2021 No.48

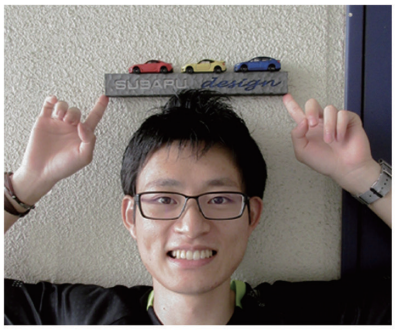
SUBARU技報

SUBARU TECHNICAL REVIEW

SUBARU
BRZ

WRX
S4

表紙デザイン



デザイン部　田原一鳴

「WRX」と「BRZ」の“強烈でスパイスの効いた個性”にフォーカスを当てて表現しました。
元気の良いスポーツカーが同じ年に複数台デビューする機会は滅多にないので、これまで以上にインパクトがあって、手に取りたくなる様な表紙デザインを目指しました。

SUBARU TECHNICAL REVIEW

2021 No.48

巻頭言

変革期をチャンスに！
みんなで築きあげる、未来のSUBARUへ

常務執行役員　藤　貫　哲　郎

「自動車業界は変革期にある」は何時の時代でも常套句ですが、今まさに気候変動に対する具体的な姿が見えてきました。直近ではSUBARUの最大市場であるアメリカでは2030年までにZEV（Zero Emission Vehicle）を乗用車50%以上に求める大統領令にバイデン大統領が署名を行いました。

さらに内燃機関には燃費、排気ガスなどの規制が強化され電動化への流れを加速させています。

この大きな世の中の変化に対して「正しい危機感」を持ってゲームチェンジの「チャンス」であり、むしろSUBARUの強みを発揮することで次の飛躍につながると考えています。それには変化の兆しをとらえ、そのための構えを行い、変化に素早く対応する事です。

SUBARUは自動車会社として規模の小さな会社であったが故、技術者の担当範囲が広くまた部署間の連携の強さなど小回りを活かしたクルマづくりを行ってきました。また限られた技術リソースを上手く組み合わせてお客様価値を生み出してきました。レガシィの車高を上げた外観をかえた（だけの！）アウトバックなどコンパクトな開発ですが多くのお客様に御支持いただいています。

知恵を出し合って合理的な開発でお客様に選んでいただける商品をタイムリーにお届けする事、これは時代がどうであれモノづくりとしてブレない姿です。このSUBARUの従来の強みをより強固にするため7月に技術本部の組織を大きく変えました。

まず一つの技術本部になることが一番の変化点です。従来の縦割り型の開発体制の打破が目的です。「前向きな気持ちが強いが故に自然と壁を作ってしまう」「その部門の壁を乗り越える調整に多くの時間を割いてしまう」こういった現状を打破し「みんなで変えて行こう！」と前向きな一体感を創るためです。さらにCTO室を新設し重要な技術開発テーマの立案、推進を行う体制としました。このCTO室には技術本部だけでなく製造、調達のメンバーも加わり「SUBARUづくりの刷新」を加速させます。

組織の形が変わるのと同じくそこで働くメンバーの意識や行動も変えて行かないと組織の力を発揮できません。今回の組織変更では従来の機能別の組織割から価値軸と機能軸が有機的に絡み合う形に変えて行きました。これは今後の状況に応じてさらに柔軟に変化させて行きます。組織マネージメントと技術マネージメントを混在させながらベストの運営とするためです。

それによって従来の「自分の仕事の範囲」という枠をこえて今よりも高い視点を持つ技術者として成長してほしいという思いがあります。SUBARUの成長はそこで働く人の成長によって実現されます。技術は日々進歩しています。必要となる技術領域も変化してゆきます。将来が見えない不確定な時代だからこそ技術を養い、高めて将来への構えを作ることが大切になります。今が正にその時であり今後のSUBARUを方向付けます。繰り返しますが今はチャンスの時です。SUBARUの強みである技術へのこだわり、社員同士のつながりの強さを活かして未来のSUBARUをみんなで作ってゆきましょう。

目　次

✦巻頭言

「変革期をチャンスに！
みんなで築きあげる、未来のSUBARUへ」――藤貫　哲郎

✦小特集「新型BRZ」

1. 新型SUBARU　BRZの紹介――SUBARU BRZ 開発プロジェクトチーム …… 1

2. 新型BRZ　スポーツシートの開発――尾野寺 晃秀・田中　明子・朝倉　孝幸・笹野　晃弘 …… 29

3. 新型BRZの車体開発――安田　政宜・島田　良輔・四戸　孝治・竹内　謙斗・植木　敏行 …… 33

4. 新型BRZ向け2．4L水平対向エンジンの紹介
京徳　信夫・永洞　真康・最首　陽平・仙波　正隆・長田　健志・梶川　丈喜…… 41

5. スポーツカーコックピットシステム：デジタルメータ開発について
髙野　裕生・鈴木　一文・川谷　健太・柄澤　英之…… 49

✦小特集「新型WRX」

6. 新型WRXの紹介――SUBARU WRX 開発プロジェクトチーム …… 54

7. 新型WRX向け走行制御開発――井上　　秀・桂野　岳彦・角田　嘉人・和氣　嵩暁・石田　拓夢 …… 82

✦論文・解説

8. 新型BRZのアライアンス開発について（デザイン編）
佐藤　正哉・愛場　和樹・相賀　博志 …… 85

9. 新型WRXのデザイン――中村　真一・安藤　貴洋・斎藤　　實・相賀　博志・雲野　裕紀 …… 90

10. 新型フォレスターのデザイン開発について――磯村　　晋・小林　昂平・雲野　裕紀 …… 96

11. 新型レガシィアウトバックのデザイン開発について
田中　　繁・戸谷　裕之・小林　昂平・池田　理恵・磯村　　晋 …… 101

12. CVTオイルポンプ音開発における統計的因果探索手法LiNGAMの活用
小山　智樹・山本　宇紘・金子　　隆・
斎藤　　誠…… 106

13. ドライバーモニタリングシステム：ジェスチャーコントロール機能の開発
時﨑　淳平・浅井　恵二・山﨑　達郎 …… 113

14. 定常過渡におけるPM/PN排出低減に向けた燃料噴射系の開発
加藤　真亮・桂　　拓未・原井　惇行・
中山　智裕・塚本　卓磨・小野　　泰・
津田　雄史・椎名　義朗 …… 117

15. リーンNOxトラップ(LNT)触媒に関する研究
佐々木 康吉・福富　駿祐・丹　　功 …… 128

16. 1D解析を用いた低温環境における始動挙動の推定
犬童　翔太・大堀　勇二 …… 134

17. SUBARUコネクテッド自動運転の研究 ———小山　　哉・山口　史人・溝口　雅人・
長谷川　悠 …… 140

18. 駐車車両脇を通過する場面での運転行動とドライバ内面的特性の関係分析
丸茂　宏貴・松本　一樹・後藤　育郎 …… 146

19. 機械学習を用いた構造系CAEの効率化 ———田中　雅大 …… 153

20. 日米における夜間横断中の歩行者死亡事故の実態
江島　　晋・後藤　　司・山本 健太郎・
KEON Timothy …… 157

21. CAEとディープラーニングの活用による計算コスト低減
山本 健太郎・和田　義孝・尾形　　海 …… 163

22. 空力テクスチャーを用いた操安性・乗心地性能の開発
畑　　秀樹・雲野　裕紀・青柳　宏紀 …… 169

23. 新型レヴォーグにおける新デザインコンセプト　BOLDER再現の取り組み
堀本　智之・山田　龍也・酒井　　等・
左　　正己・李　　若水 …… 174

24. 新型レヴォーグ アイサイトカメラ 品質確保の取組み
北島　匠・佐藤　進吾 …… 178

25. CB18（DST）用クランクシャフトの製法開発
茂木　清二・石丸　博基 …… 182

26. 自動シーリング装置の開発 ――――――松本　洋平 …… 189

27. マルチエージェントUAVによる監視飛行行動
板橋　直亮・椛山　智貴・河野　充・
勝本　健史・菊池　航矢・斉藤　成信・
星野　智史 …… 195

28. SUBARUの水平対向前輪駆動軸の前傾レイアウトとサスペンションジオメトリの関係
川合　真・古瀬　智広・坂崎　明彦…… 203

29. SUBARUが世界水準の衝突安全性能になった前夜
古川　寿也・平川　良夫・坂崎　明彦 …… 209

✦特許紹介

30. 巡回経路設定装置、巡回経路設定方法及び巡回経路設定プログラム
板橋　直亮・岡田　悟史・佐藤　維大・
星野　智史・勝本　健史 …… 219

31. 車両の乗員監視装置 ――――――――――中村　亮太・丸橋　雅幸・大西　恵太 …… 221

32. 車両の走行制御装置 ――――――――――関　淳也 …… 222

33. 車両用制御装置 ――――――――――西田　祐之・井上　浩一・田中　敬樹・
鯵本　恵介・安永　慎也 …… 223

34. シリンダライナ、シリンダブロック及びシリンダライナの製造方法
橘　由氣・椎名　義朗 …… 224

35. 車両の制御装置、サーバ、車両のモータ制御システム、及び車両のモータ制御方法
神田　晋一・小林　隆浩・米田　毅・
家永　寛史 …… 225

36. 複合構造体 ――――――――――――――向中野　侑哉 …… 226

37. 車両用表示制御装置 ――――――――――佐藤 能英瑠・鳥居　武史・澄川　瑠一 …… 227

38. 締付装置及び締付方法 ――――――――――斎藤　　学・中畑　達雄・渡邉　政雄 …… 228

39. 社外環境認識装置 ――――――――――大久保 淑実 …… 229

✦社外発表一覧(2020.1 ～ 2021.3 講演・寄稿)…… 230

CONTENTS

Foreword

Transformation Period Is a Golden Opportunity!
Build Up Our Future SUBARU Together
FUJINUKI Tetsuo

Special Issue : New BRZ

1. Introduction of New SUBARU BRZ ——— SUBARU BRZ Project Team ····· 1

2. Development of the New BRZ Sports Seat ——— ONODERA Akihide, TANAKA Akiko, ASAKURA Takayuki, SASANO Akihiro ····· 29

3. Body Development for New BRZ ——— YASUDA Masayoshi, SHIMADA Ryosuke, SHINOHE Kouji, TAKEUCHI Kento, UEKI Toshiyuki ····· 33

4. Development of Horizontally Opposed 2.4L NA Engine for New SUBARU BRZ
KYOTOKU Nobuo, NAGADO Masayasu, SAISYU Yohei, SENBA Masataka, NAGATA Kenji, KAJIKAWA Tomoki ····· 41

5. Cockpit System of Sports Car : Development of Digital Instrument Cluster
KONO Yuki, SUZUKI Kazufumi, KAWATANI Kenta, KARASAWA Hideyuki ··· 49

Special Issue : New WRX

6. Introduction of New SUBARU WRX ——— SUBARU WRX Project Team ····· 54

7. Drivability Development for New WRX ——— INOUE Suguru, KATSURANO Takehiko, KAKUTA Yoshito, WAKI Takaaki, ISHIDA Takumu ····· 82

Technical Paper & Explanation

8. Alliance Development of New BRZ (Design) ——— SATO Masaya, AIBA Kazuki, AIGA Hiroshi ····· 85

9. Design for All-New WRX ——— NAKAMURA Shinichi, ANDOU Takahiro, SAITOU Minoru, AIGA Hiroshi, KUMONO Yuuki ····· 90

10. Styling Design Development of New FORESTER
ISOMURA Susumu, KOBAYASHI Kohei,
KUMONO Yuuki ····· 96

11. Styling Design Development of New LEGACY OUTBACK
TANAKA Shigeru, TOYA Hiroyuki,
KOBAYASHI Kohei, IKEDA Rie,
ISOMURA Susumu ····· 101

12. Development for CVT Oil Pump Noise
Using Statistical Causal Discovery Method LiNGAM
KOYAMA Tomoki, YAMAMOTO Takahiro,
KANEKO Takashi, SAITO Makoto ····· 106

13. Development of Gesture Control Function in Driver Monitoring System
TOKIZAKI Junpei, ASAI Keiji,
YAMASAKI Tatsurou ····· 113

14. Development of Gasoline Direct Injection Systems for Reducing PM / PN
in Steady and Transient Operation
KATO Masaaki, KATSURA Takumi,
HARAI Atsuyuki, NAKAYAMA Tomohiro,
TSUKAMOTO Takuma, ONO Tai,
TSUDA Takeshi, SHIINA Yoshirou ····· 117

15. Study of the Lean NOx Trap (LNT) Catalyst —SASAKI Yasuyoshi, FUKUTOMI Shunsuke,
TAN Isao ····· 128

16. Analytical Estimation of Engine Starting Behavior at Cold Temperature Using 1D Simulation
INUDO Shota, OOHORI Yuji ····· 134

17. Research and Development of Next Generation Connected Automous Vehicle
OYAMA Hajime, YAMAGUCHI Fumihito,
MIZOGUCHI Masato, HASEGAWA Yu····· 140

18. Relation between Driving Behavior and Driver's Internal Characteristics
When Passing by Parked Vehicles
MARUMO Hiroki, MATSUMOTO Kazuki,
GOTO Ikuo ····· 146

19. Improving Efficiency of Structural CAE Analysis Using Machine Learning
TANAKA Masahiro ····· 153

20. Characteristics of Night-Time Pedestrian Fatalities Occurring while Crossing the Road in Japan and the U.S.
EJIMA Susumu, GOTO Tsukasa,
YAMAMOTO Kentaro, KEON Timothy ····· 157

21. Computational Cost Reduction by Utilizing CAE and Deep Learning
YAMAMOTO Kentaro, WADA Yoshitaka,
OGATA Kai ····· 163

22. Applying Aerodynamics Texture to Driving Stability and Ride Comfort Improvement
HATA Hideki, KUMONO Yuuki,
AOYANAGI Hiroki ····· 169

23. New Design Concept for the New LEVORG Efforts to Realize BOLDER
HORIMOTO Tomoyuki, YAMADA Tatsuya,
SAKAI Hitoshi, HIDARI Masami,
RI Yakusu ····· 174

24. Actions for Quality Assurance of the Eyesight Camera Installed to New LEVORG
KITAJIMA Takumi, SATO Shingo ····· 178

25. Process Development of the Crankshaft for CB18 (DST)
MOGI Seiji, ISHIMARU Hiroki ····· 182

26. Development of Automated Sealing System —MATSUMOTO Yohei ····· 189

27. Surveillance Flight by Multi-Agent UAVs ——ITABASHI Naoaki, KABAYAMA Tomoki,
KONO Mitsuru, KATSUMOTO Takeshi,
KIKUCHI Koya, SAITO Shigemichi,
HOSHINO Satoshi ····· 195

28. Relationship between Front Wheel Drive Shaft Forward Tilt Layout of SUBARU's Horizontally-Opposed Engine and Suspension Geometry
KAWAI Makoto, FURUSE Tomohiro,
SAKAZAKI Akihiko ····· 203

29. The Night before SUBARU came to have World- Class Collision Safety Performance
FURUKAWA Toshiya, HIRAKAWA Yoshio,
SAKAZAKI Akihiko ····· 209

✦SUBARU Patent Review

30. Patrol Route Setting Apparatus, Patrol Route Setting Method, and
Non-Transitory Storage Medium
ITABASHI Naoaki, OKADA Satoshi,
SATO Tsunahiro, HOSHINO Satoshi,
KATSUMOTO Takeshi ····· 219

31. Occupant Monitoring Device for Vehicle ——NAKAMURA Ryota, MARUBASHI Masayuki,
ONISHI Keita ····· 221

32. Driving Control System of Vehicle ——SEKI Junya ····· 222

33. Vehicle Control Unit ——NISHIDA Masayuki, INOUE Kouichi,
TANAKA Hiroki, AJIMOTO Keisuke,
YASUNAGA Shinya ····· 223

34. Cylinder Liner, Cylinder Block and Process for the Preparation of Cylinder Liner
TACHIBANA Yuki, SHIINA Yoshiro ····· 224

35. Vehicle Control Device, Server, Vehicle Motor Control System,
and Vehicle Motor Control Method
KANDA Shinichi, KOBAYASHI Takahiro,
YONEDA Takeshi, IENAGA Hiroshi ····· 225

36. Composite Structure ——MUKAINAKANO Yuya ····· 226

37. Display Control Device for Vehicle ——SATO Noeru, TORII Takeshi,
SUMIKAWA Ryuichi ····· 227

38. Tightening Device and Tightening Method ——SAITO Manabu, NAKAHATA Tatsuo,
WATANABE Masao ····· 228

39. Vehicle Exterior Enviroment Recognition Apparatus
OKUBO Toshimi ····· 229

✦List of Published Reports

····· 230

新型 SUBARU BRZ の紹介

Introduction of New SUBARU BRZ

SUBARU BRZ 開発プロジェクトチーム
SUBARU BRZ Project Team

抄　録

SUBARU BRZは2012年にトヨタ自動車(株)との共同開発として、SUBARUが開発・製造を行った初の車両として誕生した。同時開発車両である TOYOTA 86と共に、スポーツカーの市場喚起とモータースポーツ文化の振興に大きな役目を果たし多くのお客様に愛されてきた。

2代目となる新型SUBARU BRZは初代で培ってきた技術・知見に加え、両社の技術を駆使し、お客様の期待に応え、安心と愉しさの最大の表現車として進化と深化を遂げるべく開発を行った。

Abstract

SUBARU BRZ is the first vehicle developed and manufactured by SUBARU in the joint development project with TOYOTA MOTOR CORPORATION in 2012. It has vitalized the sports car market and the motorsport culture together with its brother TOYOTA 86, and has been loved by our customers.

The new second-generation SUBARU BRZ has been developed with the best technology and knowledge of both companies to meet customer expectations and to express Enjoyment and Peace of Mind the most.

1.　まえがき

BRZの名は“BOXER Engine”“Rear-Wheel Drive”“Zenith”の頭文字に由来し、水平対向エンジンの持ち味である低重心を際立たせた究極の後輪駆動車という意味を持つ。

初代からその価値を受け継ぐと共に2012年からの9年間、市場とお客様と共に蓄積してきた経験と技術を基に、新時代のスポーツカーとして相応しい新価値を獲得しつつ進化と深化を果たすべく開発を行った(**図1**)。

図 1　新型 BRZ 外観

2.　BRZというクルマ、初代BRZの功績

初代SUBARU BRZ(以降BRZ)発売当時、2012年の日本市場において、2ドア／4シータースポーツカーは存在自体がない状態であった。

2000 cc自然吸気エンジン、後輪駆動、クーペスタイル、乗員4名、車重1300 kg以下、200万円台の価格帯という、唯一無二の特徴を持つ商品として誕生した。

また、TOYOTAとSUBARUの共同開発車として注目度も高く発売と同時に多くのお客様の支持を得ると共に、9年間の販売も堅調に推移し両社合計で20万台以上の製造販売実績を残した。

乗員4名で後席があり、且つクーペとしては大容量のトランクルームを有する利便性の高さから日常使用からサーキットでのスポーツ走行、ワンメイクレースまで幅広いユースを実現しスポーツカーとモータースポーツ文化の振興に大きな役目を果たした商品であったと振り返ることができる(**図2**)。

図２　86/BRZ の作ったスポーツカー文化

3.　開発の狙い

「笑顔と若さという生きる活力を約束する、極限のピュアスポーツカー」をコンセプトに掲げ、初代BRZの持つ卓越したパッケージと基本構造を踏襲しつつ、低重心・軽量・重量配分最適化に磨きをかけた商品を目指し開発した。

3.1　スタイリング＆パッケージング

初代BRZは2ドア4シータークーペとして、ボディサイズ、パワーユニットレイアウト、車体骨格構造、乗員レイアウト、ユーティリティを高いレベルで実現しており同サイズ車両としては完成されたパッケージングを有しており、基本パッケージは初代BRZを踏襲した(図3)。

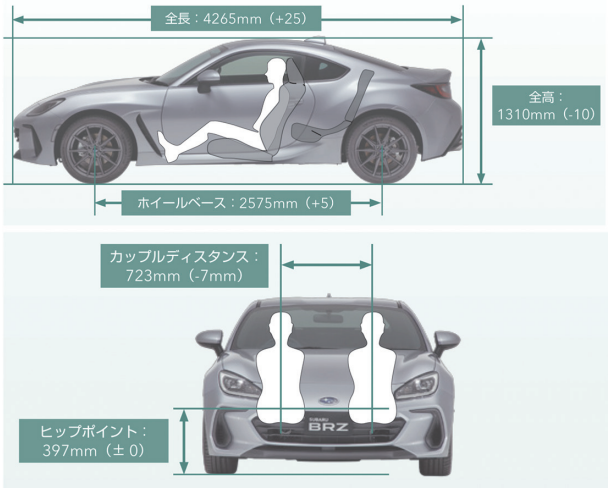


図３　基本パッケージ（（）内は初代比寸法）

さらなる低重心・重量配分適正化を図るため、運転席・助手席間寸法(カップルディスタンス)の7 mm縮小と運転席シートのリフター調整量を下方へ5 mm拡大した(図4)。

トランクルームはスポーツ走行での荷役性を目的とし、タイヤ4本＋サーキット走行に必要な工具箱やヘルメット、ツナギなどを格納できるよう開発を行った(図5)。

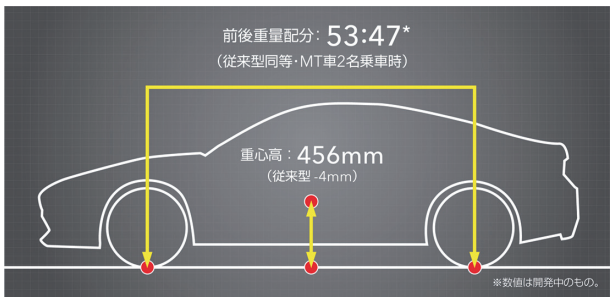


図４　前後重量配分及び重心高

図５　タイヤ搭載状態

3.2　エンジン＆トランスミッション

初代BRZをお買い求め頂いたお客様からの「もっとパワーが欲しい」という声に応え、新開発の2.4L自然吸気エンジンを採用した。

出力向上に際しスポーツカーとして必要な「回したくなる吹けの良いエンジン」という商品性をキープするため、ターボ化やロングストローク化を行わず、初代BRZでも採用しているD-4S技術を継続採用。初代BRZで得られた知見を基に出力向上、最高回転数維持、スポーツカーに相応しいエンジンフィールを両立させた(図6)。

図６　FA24 型エンジン

トランスミッションにおいてはより多くのお客様にスポーツ走行を愉しんで頂けることを狙いATの進化に注力。ATスポーツモードの強化により、「マニュアルシフト操作＝スポーツ走行」という既成概念から、「ステアリング操作に運転リソースを集中し走行

ラインを狙った通りに走る＝スポーツ走行」という提案できる商品として開発を行った(図7)。

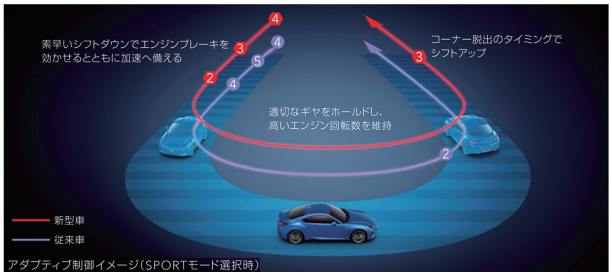


図 7　AT スポーツモード制御

3.3　運動性能の進化

スポーツカーに求められる最大の要素である操安性、旋回性を進化させるため、車体、機構の従来要素の構造進化に加え、空力操安をコンセプトとして新採用。空力操安開発においては、各種アイテムの追加と共に、解析、風洞、実走での開発評価体系を強化した(図8)。

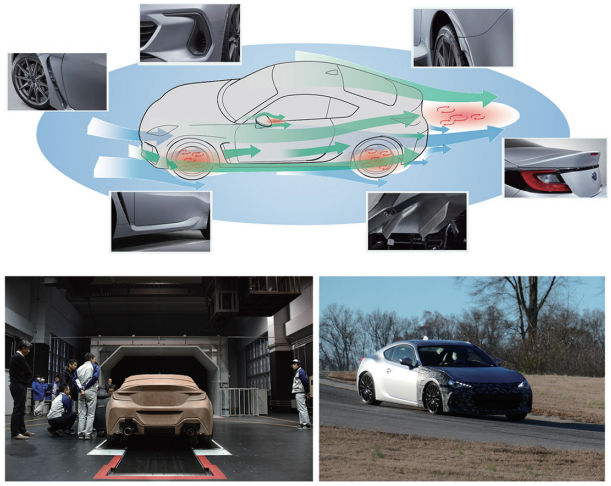


図 8　空力操安開発

3.4　安全性の進化

「スポーツカー＝安全なクルマ」とお客様へ提案することを狙いとして、衝突安全性能の向上と各先進装備の採用を行った(図9)。

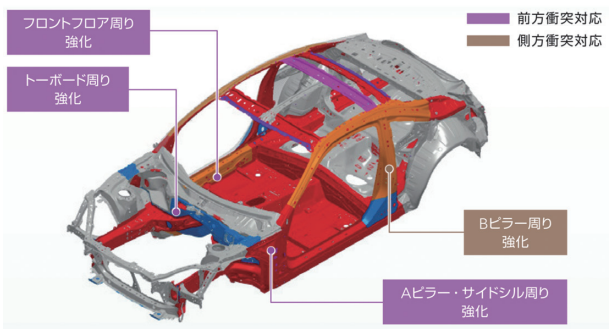


図 9　車体骨格強化狙い

車体骨格構造の見直しと各補強部材の材料特性の強化、構造体の適正化により衝突時の車両変形の抑制を行った。

運転席にはニーエアバッグを採用し衝突時の乗員障害を軽減することを実現した(図10)。

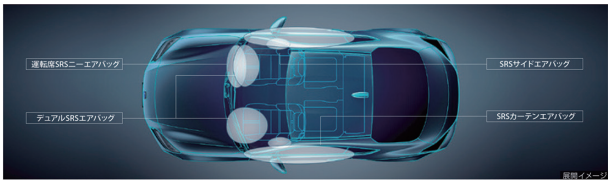


図 10　各席エアバッグ

ATにはアイサイトを採用。低く狭いキャビン、ボディにおいても先進安全装備を適正にレイアウトし安全性とスタイリングの両立を実現した(図11)。

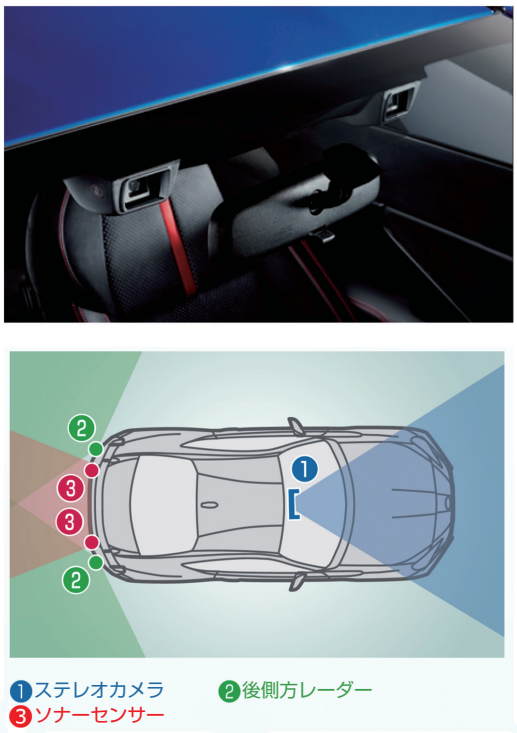


図 11　AT 車先進安全装備

3.5　まとめ

本章及び以降紹介される技術によって新型BRZは大きく進化を果たしているが、BRZ開発として最も重要なことは「バランス」である。

開発に関わる全員で車両トータルでの性能構築を行うことにより、高次のバランスとそれがもたらすスポーツカーとしての商品性を実現することができている。

表 1　基本諸元表

車名・型式	スバル・3BA－ZD8			
車種	R		S	
	2.4L DOHC			
	RWD（後輪駆動）			
	6MT	E-6AT	6MT	E-6AT
■寸法・重量・定員				
全長×全幅×全高[mm]	4265 × 1775 × 1310 ※注1			
室内長×室内幅×室内高[mm]	1625 × 1480 × 1060			
ホイールベース[mm]	2575			
トレッド(前／後)[mm]	1520/1550			
最低地上高[mm]	130			
車両重量[kg]	1260	1280	1270	1290
乗車定員[名]	4			
車両総重量[kg]	1480	1500	1490	1510
■性能				
最小回転半径[m]	5.4			
燃料消費率[km/L](国土交通省審査値)◆WLTC	12.0	11.8	11.9	11.7
■ステアリング・サスペンション・ブレーキ				
ステアリング歯車形式	ラック&ピニオン式			
ステアリングギヤ比	13.5：1			
サスペンション(前輪／後輪)	ストラット式独立懸架／ダブルウィッシュボーン式独立懸架			
主ブレーキ形式	2系統油圧式(倍力装置付)			
ブレーキ(前／後)	ベンチレーテッドディスク／ベンチレーテッドディスク			
駐車ブレーキ形式(後2輪制動)	機械式			
■エンジン				
型式・種類	FA24			
	水平対向4気筒			
	2.4 L DOHC 16バルブ デュアルAVCS			
内径×行程[mm]	94.0 × 86.0			
総排気量[cc]	2387			
圧縮比	12.5			
最高出力(ネット)[kW (PS) /rpm]	173 (235) /7000			
最大トルク(ネット)[N·m (kgf·m) /rpm]	250 (25.5) /3700			
燃料供給装置	筒内直接＋ポート燃料噴射装置＜D-4S＞			
燃料タンク容量[L]	50			
燃料種類	無鉛プレミアムガソリン			
■トランスミッション				
変速機形式	6MT 前進6速　後退1速	E-6AT（マニュアルモード付） 前進6速　後退1速	6MT 前進6速　後退1速	E-6AT（マニュアルモード付） 前進6速　後退1速
変速比(第1速)	3.626	3.538	3.626	3.538
変速比(第2速)	2.188	2.06	2.188	2.06
変速比(第3速)	1.541	1.404	1.541	1.404
変速比(第4速)	1.213	1.000	1.213	1.000
変速比(第5速)	1.000	0.713	1.000	0.713
変速比(第6速)	0.767	0.582	0.767	0.582
変速比(後退)	3.437	3.168	3.437	3.168
減速比	4.100	3.909	4.100	3.909

＊社内測定値および社内型式名(方式名)
注1：全高はルーフアンテナを含む数値、ルーフ高は1280 mmとなります。

4. デザイン

デザインについては、別報にて解説しているため、この章では割愛する。

5. 外装の進化

「いくら格好が良く見えても、偽物だと本質的にはカッコ悪いな」そんな想いから、「すべてのカタチに機能を持たせたスタイリング」に拘って外装を進化させた。特に、エアロダイナミクスは、レース車両の知見も反映させ、空気抵抗の低減／操縦安定性の向上を実現させた。

5.1 外装フロントまわり

安全性と先進性を進化させたランプ、海洋生物からヒントを得て実現したテクスチャーの採用(5.1.5参照)。機能を追求し、車両の安全や操安性まで影響を与える外装部品の進化を紹介する。

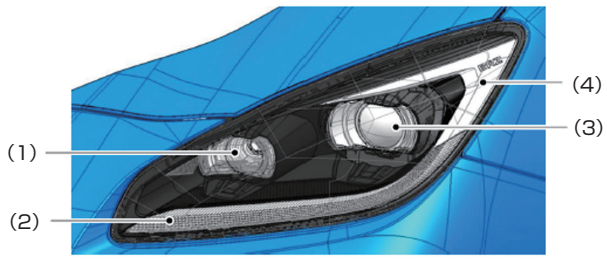
5.1.1 LEDヘッドランプ

意匠と機能性を最小構成でシンプルに表現するフルLEDヘッドランプを採用した。ヘッドランプ後端を大きく後退させることで、スポーティさを表現。

外周部が黒色となる二色成形のヘッドランプアウターカバーを採用、ターンランプとLEDヘッドランプには、異形レンズカバーを採用した。エッジライト方式のポジションランプとそれにつながるエクステンションによってSUBARU共通モチーフ(Cシェイプ)を表現、ひと目でSUBARUと分かる外観を実現した。

新型のプロジェクターユニットにより、配光性能を向上。車高が低いスポーツカーでもより遠くを明るく照らせるようにし、夜間の安全性を向上させた。

エクステンション側面部に「BRZ」のロゴを配置し、ブランド表現を強化した(図12)。



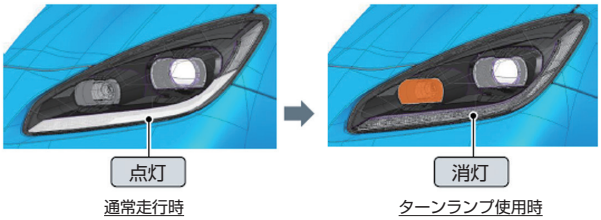
(1) ターンランプ（1灯LED）
(2) ポジションランプ／デイタイムランニングライト（DRL）(LED)*1
(3) バイファンクショナルLEDヘッドランプ（ロービーム／ハイビーム）*2
(4) エクステンション

＊1：ポジションランプデイタイムランニングライト(DRL)は、点灯時の光度が異なる。
＊2：上級グレードは、ハイビームアシスト（HBA）、ステアリング連動ヘッドランプ（SRH）付き。

図 12 ヘッドランプ各機能

5.1.2 デイタイムランニングライト(DRL)

北米、中国、豪州 ポジションランプは現行車と同様に、デイタイムランニングライト(DRL)としても機能。デイタイムランニングライト(DRL)作動中にターンランプの点灯操作を行うと、ポジションランプは消灯する(図13)。



＊：画像は点灯状態を表現したイメージのため、実際の車両とは異なります。

図 13 DRL 点灯形態

5.1.3 ステアリング連動ヘッドランプ(SRH)

より安全な夜間視界を確保するため、先進安全装備を搭載した。ステアリング操作に連動して進行方向の先を照射する、ステアリング連動ヘッドランプ(SRH)を設定。夜間走行の安心感をさらに高めた(図14)。

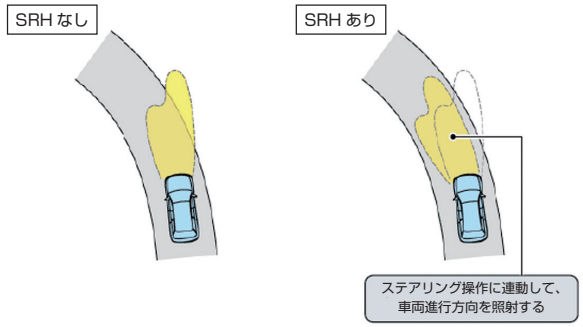


図 14 SRH 点灯範囲

5.1.4 フロントバンパー

ノーズコーンデザイン(グリルレス)を採用し、スポーツカーらしいシンプルで迫力のある造形とした。ラジエーターなど内蔵部品形状を工夫することで、立体的なバンパー造形とロー＆ワイドなノーズ構成を実現した(図15)。

図 15 フロントノーズ造形

バンパー意匠と両立しながら正面開口部を大型化するとともに、内部には両側面に導風板および下面に整流板を配置することでラジエータの冷却効率を最適化した(図16)。

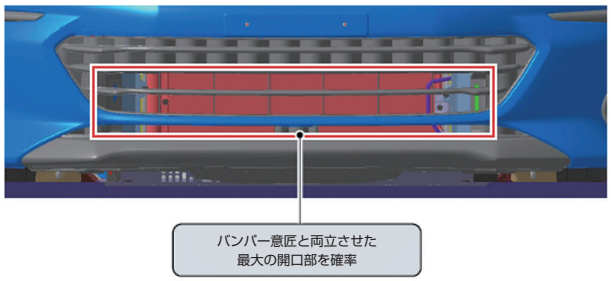


図 16　ラジエータ開口

導風板は、大型化された開口部から流入する走行風を部品側面の斜面によってラジエータに導く構造とした(図17)。

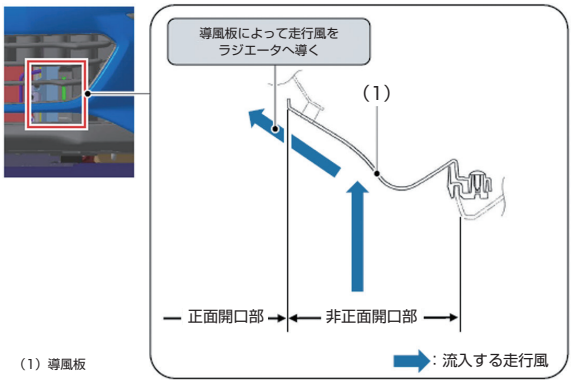


図 17　ラジエータ開口側面部

整流板は、バンパー開口下面を密閉しつつ、走行風を整流してラジエータに導く構造とした(図18)。

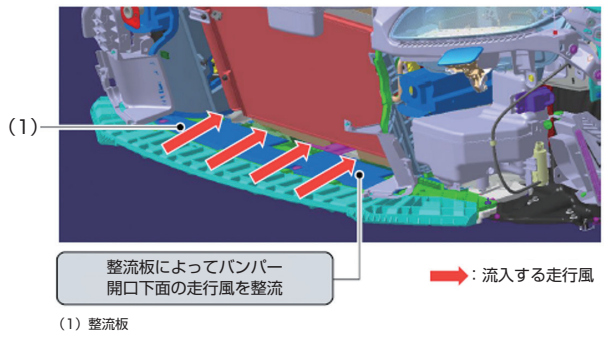


図 18　ラジエータ開口部

5.1.5　フロントバンパーダクト

フロントバンパー前面に当たる空気を後方へ排出することで、空気抵抗を低減するフロントバンパーダクトを採用した。排出する空気の一部をバンパー内に分配することで、バンパー内の空気の滞留を抑制し、操縦安定性も向上させた。

フロントバンパーダクト外周部に空力性能を向上させるテクスチャーを採用。テクスチャーが小さな乱気流を発生させることで、空気の剥離を抑制し、空気抵抗を低減させた(図19)。

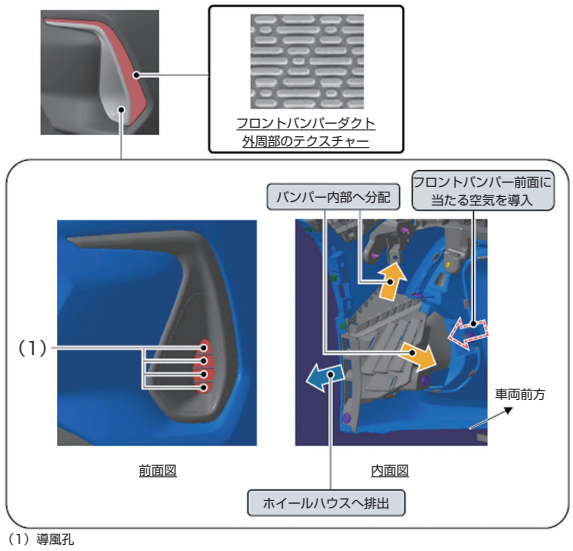


図 19　フロントバンパーダクト

5.1.6　カウルパネル

Aピラー、フェンダー構成にあわせ、カウルパネルの構成や形状を最適化。水平基調を強調するとともに、シンプルな構成により見栄えを向上した。Aピラー付け根部周辺のフード、フェンダー、ドアの稜線を連続化させることで、シンプルですっきりとした外観とした。現行車と同様に、カウルサイドの上端をフェンダー上辺より下方に配置し、デザイン性を向上した(図20)。

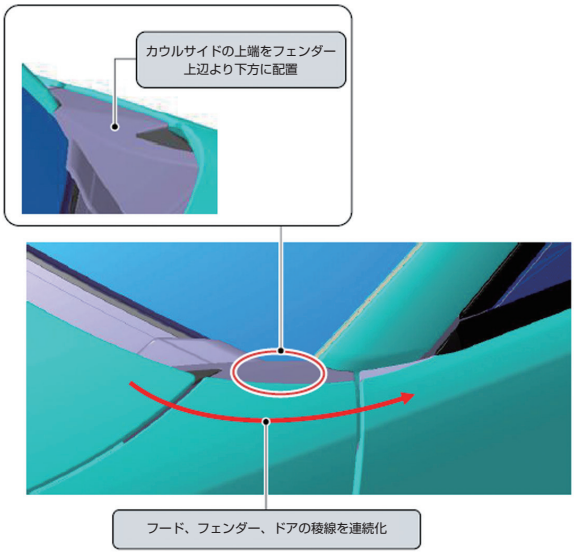


図 20　カウルサイドパネル

カウル上面部は凹凸やルーバーの形状にデザイン性を織り込み、スムーズ化することで、外観の見栄えを向上させた(図21)。

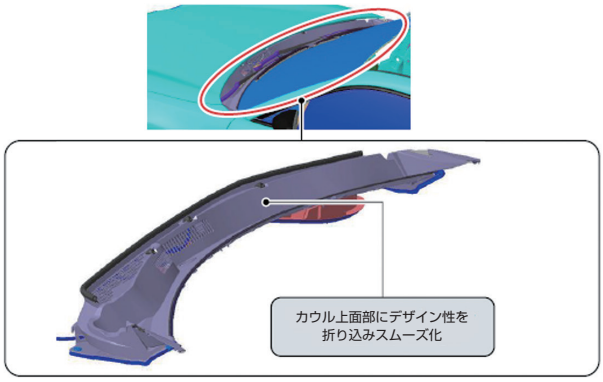


図 21　カウルパネル上面

カウルサイドはＡピラーの接地部にリップを追加するとともに、フードヒンジ部の逃げリップを最小化しつつ形状を最適化した(図22)。

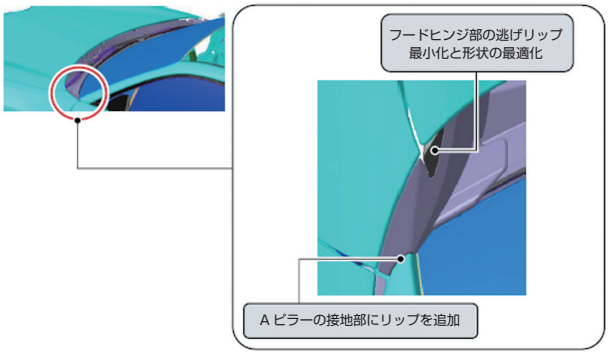
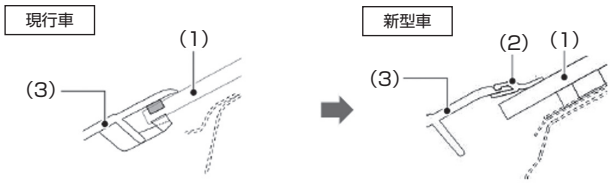


図 22　カウルサイドリップ

カウルパネルのフロントガラスとの分割部にリップを採用し、ガラスに隙間なく追従させることで、質感を向上させた(図23)。



(1) フロントガラス　(3) カウルパネル
(2) リップ

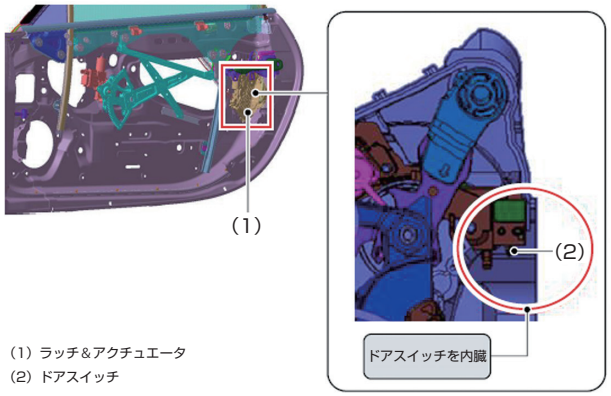
図 23　カウルパネルリップ

5.2　外装サイドまわり

数多くの空力／操安性向上アイテムを織り込んだサイドまわり。特に後述するエアアウトレットは、あらゆる条件でも機能する、空気を味方に付けた拘りのアイテムである。

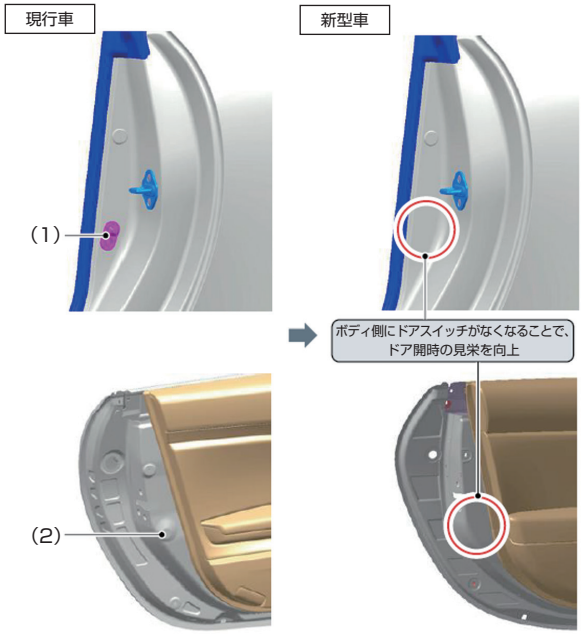
5.2.1　ドア外観

ドアスイッチをラッチ＆アクチュエータに内蔵化するとともに、ドア側のスイッチ受け面を廃止することで、ドア開時の見栄えを向上した(図24、図25)。



(1) ラッチ＆アクチュエータ
(2) ドアスイッチ

図 24　ドアラッチスイッチ

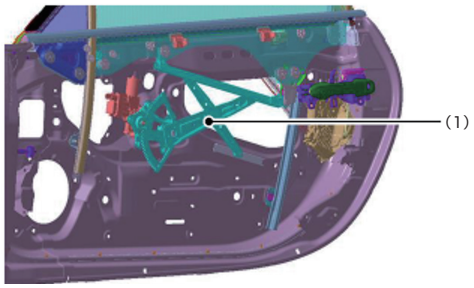


(1) ドアスイッチ
(2) ドアスイッチ受け皿

図 25　ドアパネルスイッチ面

5.2.2　パワーウインドゥ

レギュレータ＆モータ ASSY のモータに、パワーウインドゥの昇降制御ECU を一体化したスマートモータを採用(図26)。



(1) レギュレータ＆モータ ASSY

図 26　レギュレータ＆モータ装着部

エンジンスイッチOFF後でも、ドア開または一定時間(最大45 秒)経過するまでは、パワーウインドゥの操作を可能とするオフディレイ機能を採用した。

これによりウインドゥを閉め忘れたときなど、再度プッシュエンジンスイッチをONにする必要がなく、利便性が向上した。

5.2.3　ドアミラー

ミラー視認性の最大化と空力特性を両立しつつ、小型でスポーツカーらしいドアミラー意匠を実現した。形状を最適化することで、三角窓からの広い視界を確保した。法規対応のために縦幅を、視認性向上のために横幅を拡大した（図27）。

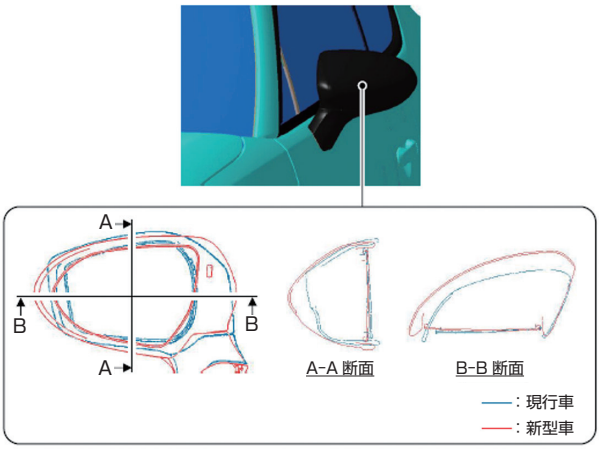
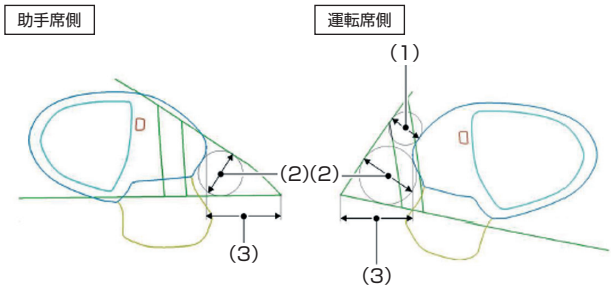


図 27　ドアミラー代表断面

(1) 三角窓からの視界向上

右左折時やコーナリング時に視界の妨げにならないよう、ドアミラーの形状や位置を最適化し、三角窓からの視界を向上した（図28）。

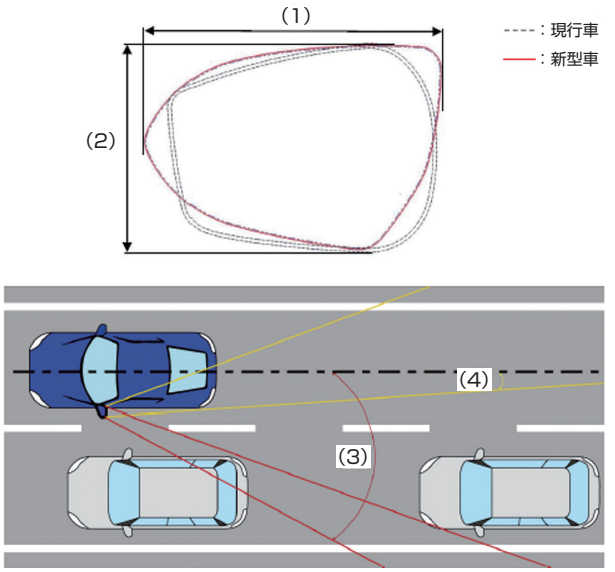


			現行車	新型車
(1)	隙間角： 三角窓の上部とドアミラーに接する最小の円を、平均的な成人男性が、運転席から見た円錐の角度。	運転席側	2.8°	3.8°
(2)	円錐角： 三角窓とドアミラーに接する最大の円を、平均的な成人男性が、運転席から見た円錐の角度。	運転席側	5.7°	6.5°
		助手席側	2.7°	2.7°
(3)	水平角： 三角窓の前部とドアミラーに接する直線を、平均的な成人男性が、運転席から見た角度。	運転席側	7.5°	8.3°
		助手席側	4.6°	4.6°

図 28　三角窓廻り視界

(2) ドアミラー鏡面と間接視界の拡大化

ドアミラー鏡面の寸法を拡大して外向きと内向きの視認角度を拡大した（図29）。



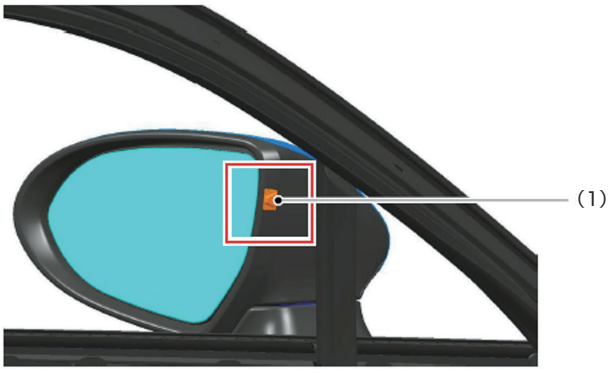
		現行車	新型車
(1)	縦幅	120 mm	123 mm
(2)	横幅	157 mm	178 mm
(3)	外向き最大角	32.1°	34.8°
(4)	内向き最大角	0.1°	− 4.1°

図 29　ドアミラー後方視界

(3) BSD/RCTAインジケータ※1、SRVDインジケータ※2の配置

BSD/RCTAインジケータ※1、SRVDインジケータ※2をドアミラーボディ内側に配置して室内からの良好な視認性を確保した（図30）。

※1：北米　　※2：北米以外



(1) インジケータ点灯時

図 30　SRVD インジケータ

(4) 空力向上

ドアミラーのボディ上下およびステー後端の形状を最適化し、空気抵抗と風切り音を低減した。ドアミラーのボディ上下の形状を緩やかな凸面とすることで、空気の剥離を抑制する。凸面の後に平坦面を設定することで、空気の流れを後方へ整流する。ドアミラーのステー後端に小さな曲面を設定することで、ステー後方の空気の剥離を促し、ステー背面への空気の巻き込みを抑制する（図31）。

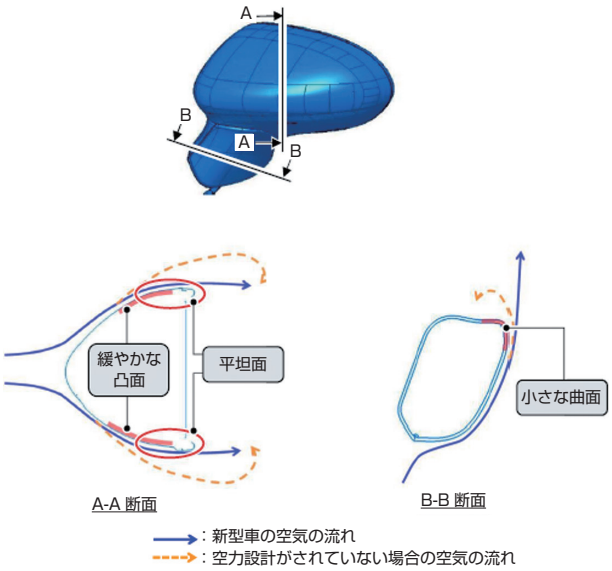
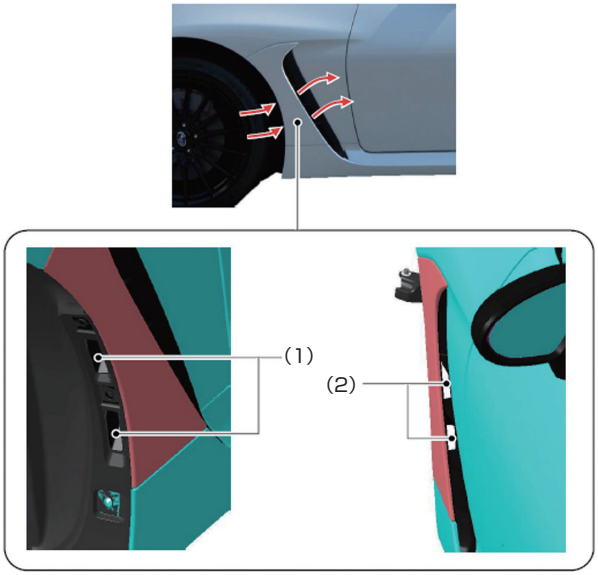


図 31　ドアミラー空力対応

5.2.4　フロントエアアウトレット

スポーツカーデザインと操縦安定性を両立するアイテムとして、フロントエアアウトレットを採用した。

フロントホイールアーチ内に流れ込む空気を車両側面へ排出することで、ホイールハウス内の乱流を抑制する。サスストローク時（バンプ時）に発生するホイールハウス内の空気の乱れを整流する。ホイールハウス内から排出される空気が車両側面の走行風に対し干渉することで直進安定性を向上した。旋回時の車両内側を整流することで旋回性を向上した（図32）。



（1）フロントマットガードスリット（導入孔）
（2）フロントエアアウトレット（排出孔）

図 32　エアアウトレット概略図

5.2.5　サイドシルスポイラー

スポーツカーデザインを強調するアイテムとして、サイドシルスポイラーを採用した。

車両側面の空気の流れをコントロールすることで、直進安定性や操縦安定性能を向上するサイドシルスポイラーを採用した。サイドフィン形状によって車両側面の空気の流れを整流することで、直進安定性を向上した。車両後部の跳ね上げ形状の側面角度を最適化することで、操縦安定性を向上した（図33）。

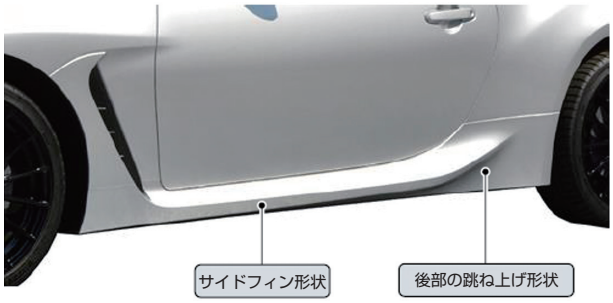
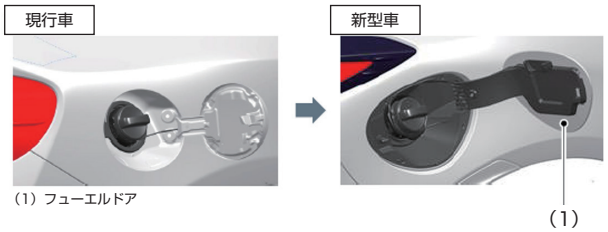


図 33　サイドシルスポイラー概略図

5.2.6　フューエルドア

フューエルドアまわりの樹脂化と電動ロック／アンロックシステムの採用により、470 gの軽量化を実現するとともに、フューエルドア開時の外観品質を向上させた。開閉部の分割幅を3.5 mmから2.8 mmに縮小し、外観の見栄えを向上させた（図34）。

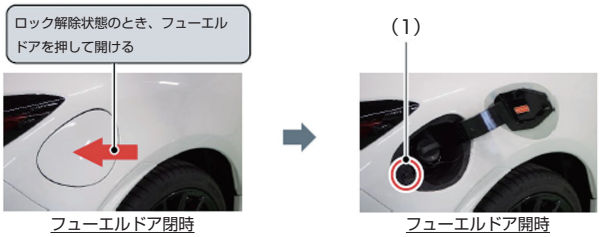


（1）フューエルドア

図 34　フューエルドア概略図

電動ロック／アンロックシステム

フューエルドアの室内オープナーレバーを廃止し、アクチュエータを用いた電動ロック／アンロックシステムを採用。利便性を向上させるとともに、レバーをなくすことで運転席足元のすっきり感を実現した。フューエルドアを直接押して開くプッシュオープンタイプを採用。利便性を向上させるとともに、寒冷地でフューエルドアが凍結した場合の実用性を向上させた（図35）。



（1）プッシュリフレクター

図 35　フューエルドアロック・開閉

5.3 外装リヤまわり

フロントから流れてくる空気を、最終的に整流し、揚力を抑え、車両全体でのトータルバランスを整えたリアまわり。走りこみによって仕上げた高度な機能を有した部品がリヤまわりにも配置されている。

5.3.1 リヤコンビネーションランプ

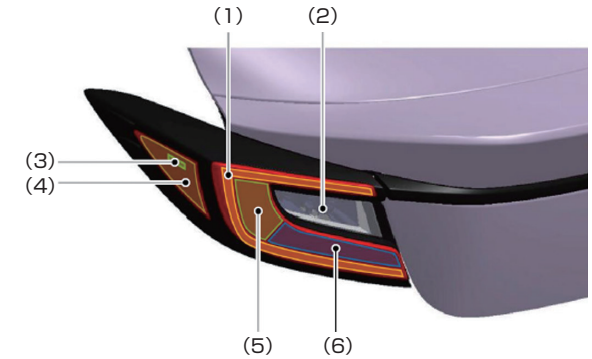
意匠と機能性を最小構成でシンプルに表現するフルLED リヤコンビネーションランプを採用した。リヤコンビネーションランプの機能を集約し小型化することで、スポーツカーらしい車両後面意匠の実現に寄与した。トランクガーニッシュモールとの連続造形によって、リヤコンビネーションランプとの一体感を持たせた構造とした(図36)。

図 36 リヤコンビランプ廻り

テール／ストップランプの発光によってSUBARU共通モチーフ(Cシェイプ)を強調する構造とした。

3色成型のアウターレンズを採用した。従来の赤とクリアに黒色のレンズを追加することで、引き締まったシャープな外観と、トランクガーニッシュとの一体感を実現した。

リヤコンビネーションランプフィンを採用。気流に小さな渦を発生させることで車体を左右から押さえつけ、操縦安定性を向上させた(図37)。

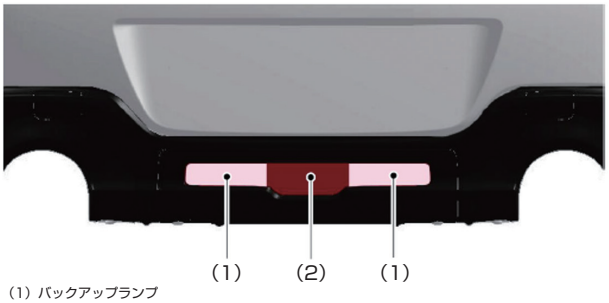


(1) 北米以外 テールランプ(LED)
北米 テール／ストップランプ(LED)
(2) ターンランプ(LED)
(3) 北米 サイドマーカーランプ(LED)
(4) 北米 サイドリフレックスリフレクター
(5) ストップランプ(LED)
(6) リヤリフレックスリフレクター

図 37 リヤコンビランプ機能配置

5.3.2 バックアップ／リヤフォグランプ

リヤバンパー下部のバンパーカバー内にバックアップランプおよびリヤフォグランプを配置した。また、上下幅を最小化することで、リヤバンパーに配置するライセンスプレートのレイアウト性を確保した(図38)。

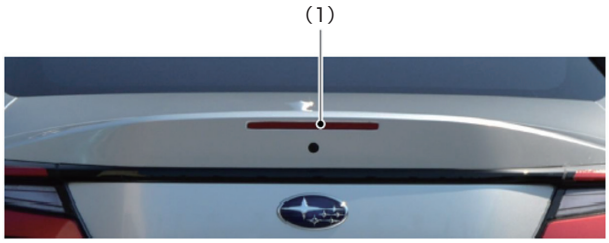


(1) バックアップランプ
(2) 中国、豪州 リヤフォグランプ

図 38 リヤフォグランプ機能配置

5.3.3 ハイマウントストップランプ

現行車では室内に配置していたハイマウントストップランプを、新型車では室外配置とし、リヤガーニッシュに内蔵する構造とした。これにより、車両後面意匠の向上に寄与した。また、室内に配置されていたハイマウントストップランプがなくなったことで、後方確認時の視界を向上させた(図39)。



(1) ハイマウントストップランプ（LED）

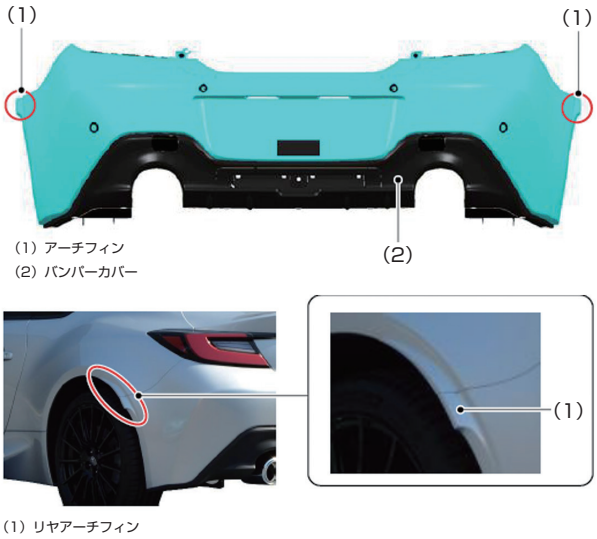
図 39 ハイマウントストップランプ概略

5.3.4 リヤバンパー

現行車と同様に、スポーツカーらしい意匠のバンパーカバーを下部に配置。

後部左右の挙動を安定させ、操縦応答性を向上するリヤアーチフィンを採用した。車両側面の大きな空気の流れを整流し、車両後側方の空気の剥離を抑制する。

ライセンスプレートをリヤバンパーに配置する構造とした。アーチフィンをボディ同色としてサイドフィンと一体化したことで、リヤタイヤをさらにワイドに配置できるようになった。さらにバンパー形状の工夫でボディの絞り込みが強調されることで、スポーツカーらしい迫力のあるリヤビュー形状とした(図40)。

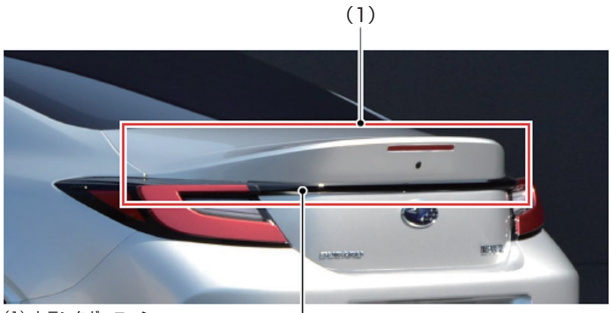


(1) アーチフィン
(2) バンパーカバー
(1) リヤアーチフィン

図 40　リヤバンパー全体概略図

5.3.5　トランクガーニッシュ

トランク後端部分に、スポーツカーらしい車両後部意匠を実現するダックテール形状の樹脂製トランクガーニッシュを採用した。ダックテール形状にすることで現行車のリヤスポイラーと同等の空力性能を確保した。車室内からの視界を阻害しないレベルでトランク上後端部分を視認できるようにすることで、後退時の車両後端位置認識を強化した。トランクガーニッシュにはハイグロスブラックモールディングを採用し、リヤコンビネーションランプと連続した一体感のある意匠とした(図41)。

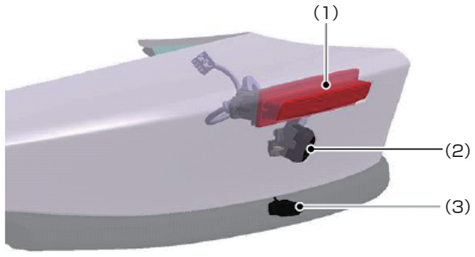


(1) トランクガーニッシュ
(2) ハイグロスブラックモールディング

図 41　トランクガーニッシュ概略図

ハイマウントストップランプの室外移設やライセンスプレートのリヤバンパー移設に伴い、ハイマウントストップランプやトランクスイッチ、リヤビューカメラ※をトランクガーニッシュに内蔵した(図42)。

※：日本以外



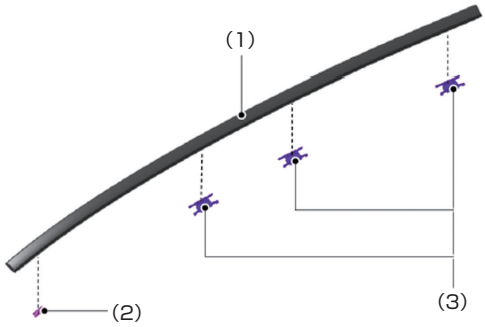
(1) ハイマウントストップランプ
(2) 日本以外 リヤビューカメラ
(3) トランクスイッチ

図 42　トランクガーニッシュ機能構成図

5.4　外装ルーフまわり

5.4.1　ルーフモール

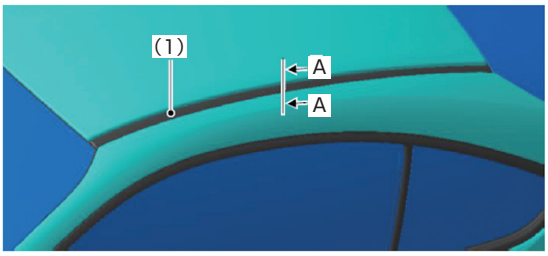
ルーフパネルのアルミ化に対応したクリップ取り付け構造のルーフモールを採用した。塗装焼き付け時の熱でルーフパネルとルーフモールを固定できるクリップを採用し、溶接不要でルーフモールの固定点を設定できる取り付け構造とした(図43)。

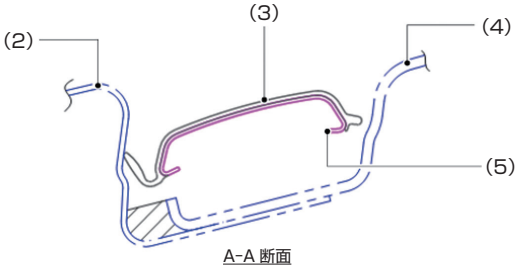


(1) ルーフモール
(2) 熱硬化クリップ
(3) 熱溶着クリップ

図 43　ルーフモール概略図

ルーフモールの芯材にSUS430を採用し、ルーフモールの幅をスリム化した(図44)。





A-A 断面

(1) ルーフモール
(2) アウトサイドパネル
(3) ルーフモール意匠面（PVC）
(4) アルミルーフパネル
(5) ルーフモール芯材（SUS430）

図 44　ルーフモール代表断面図

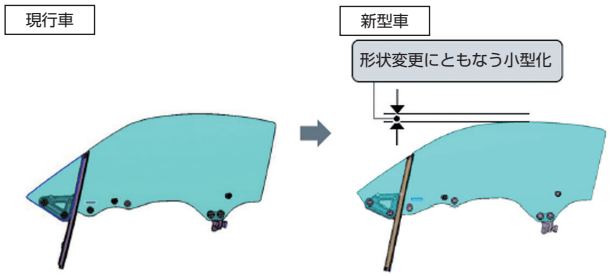
5.5　外装ガラスまわり

5.5.1　フロントガラス［北米、豪州］

現行車と同様のUVカット機能に加え、IRカット機能を追加。日差しによる暑さや肌の「じりじり感」を軽減することで、より快適な車内空間を実現した。

5.5.2　パーティションガラス／ドアガラス

グリーンUVカット機能付きガラスを採用した。ルーフの低いスポーツカースタイリングにあわせた形状へ変更した。ガラスの板厚は現行車同様としつつ、形状変更による小型化と1台当たり約516 g（約8648 g→約8132 g）の軽量化を実現した（図45）。



	現行車		新型車	
	パーティションガラス	ドアガラス	パーティションガラス	ドアガラス
板厚［mm］	t3.1	t4.0	t3.1	t4.0
質量［g/枚］	904	3420	856	3210
材質	強化ガラス		強化ガラス	
色	UVグリーン		UVグリーン	

図45　サイドガラス変更一覧

5.5.3　ウォッシャー

アイサイトの搭載に伴い洗浄性能を向上させた。フロントウォッシャーノズルを車両中央に1箇所追加し、合計3箇所とすることで着水範囲を拡大した。ワイパーの払拭範囲とウォッシャー吐出範囲を最適化した（図46）。

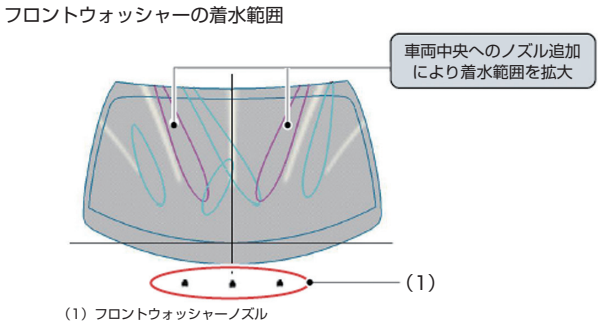
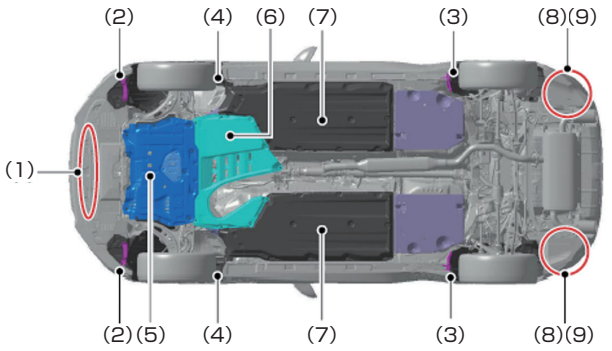


図46　ウインドゥウォッシャー吐出範囲

5.6　外装床下まわり

床下の空気の流れをコントロールし利用する最先端のエアロダイナミクスによって、空気抵抗の低減と高い操縦安定性能を実現した（図47）。



No.	空力アイテム	操縦安定性向上	空気抵抗低減
(1)	アンダーロアカバー	✓	−
(2)	フロントエアフラップ	−	✓
(3)	リヤエアフラップ	−	✓
(4)	フロントマットガード	−	✓
(5)	フロントアンダーカバー	−	✓
(6)	トランスミッションアンダーカバー	−	✓
(7)	床下アンダーカバー	−	✓
(8)	リヤエアアウトレット	✓	−
(9)	バーティカルフィン	✓	−

図47　床下部空力アイテム一覧

5.6.1　アンダーカバーロア

アンダーカバーロアにビード形状を追加した。操縦安定性用ビードを追加することで、ダウンフォースを発生させ、直進性と接地感を向上させた。また空力用ビードを追加することで、空力性能を向上させた（図48）。

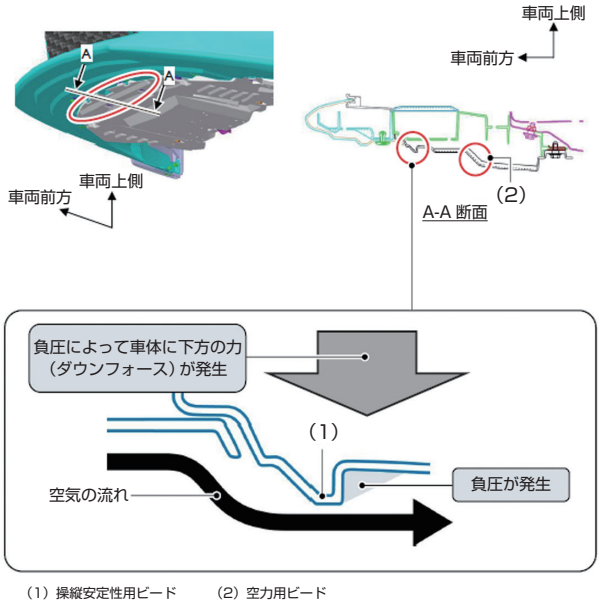


図48　アンダーカバーロア概略及び断面図

5.6.2　フロントエアフラップ

フロントエアフラップの下端を車両後方に移動することで、フロントホイールアーチ内への空気の流れをコントロールし、空力性能を向上させた（図49）。

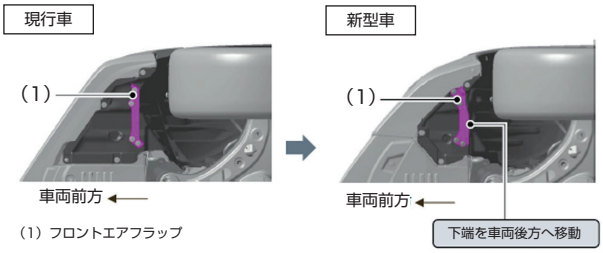


図 49　フロントエアフラップ比較図

5.6.3　リヤエアフラップ

リヤエアフラップのサイズを車両内側方向に拡大するとともに、下端を縮小することで、リヤホイールアーチ内への空気の流れをコントロールし、空力性能を向上させた(図50)。

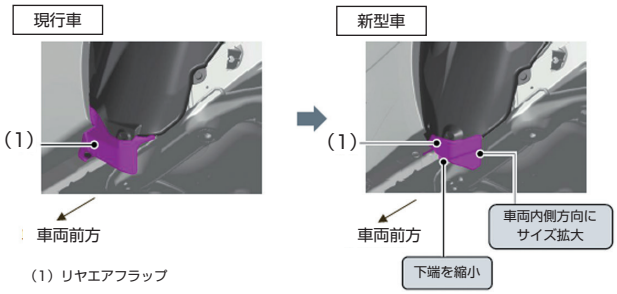


図 50　リヤエアフラップ比較図

5.6.4　フロントマッドガード

フロントタイヤ後方の段差を滑らかにすることで、ホイールアーチ内に流入した空気の排出を促進した(図51)。

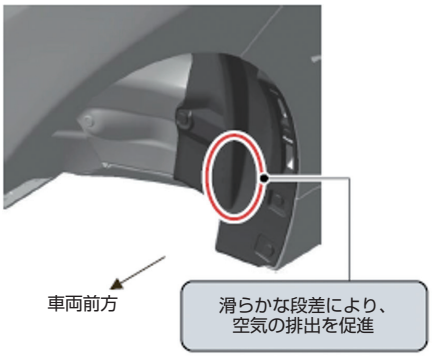


図 51　マッドガード変化点

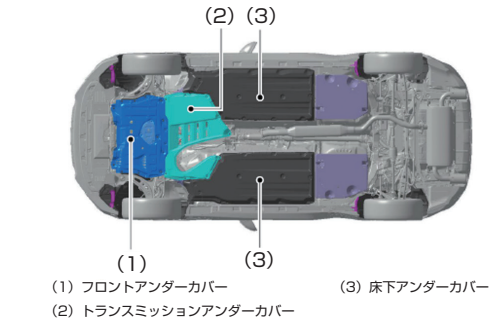
5.6.5　アンダーカバー

フルアンダーカバー化することで、クラストップの空力性能を実現した。フロントアンダーカバーにオイルドレーンカバーを採用しフラット化した(図52)。

5.6.6　リヤエアアウトレット／バーティカルフィン

リヤバンパー下部にリヤエアアウトレットを採用。床下からリヤホイールアーチを経てリヤバンパー内に流れ込み留まる空気を、床下空気の流れを使って吸い出し、リヤアウトレットから放出。これにより、車両後方の空気抵抗を抑えるとともに、空気の流れを一定にコントロールすることで、高速走行時の左右のふらつきを抑制する。

リヤエアアウトレット下面にバーティカルフィンを設置することで、床下の空気の流れを整流し、直進安定性を向上させた(図53)。



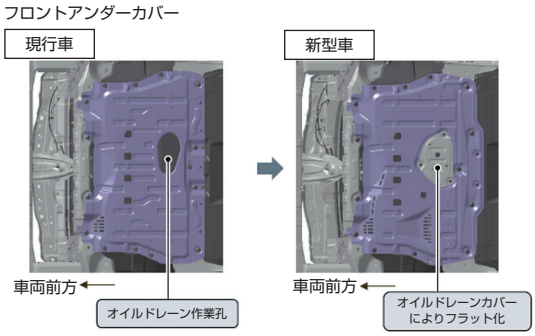


図 52　フロントアンダーカバー比較図

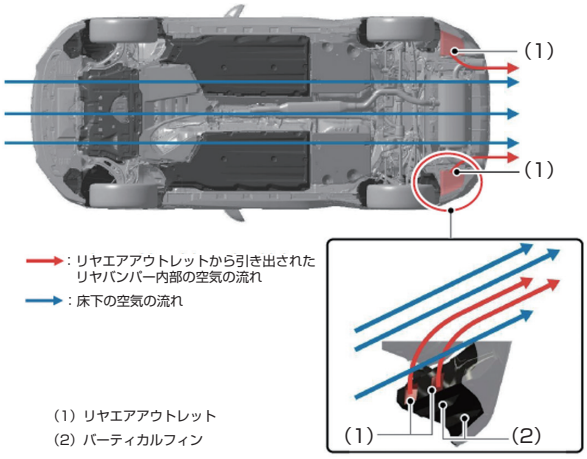


図 53　リヤアウトレット機能概略図

6.　内装の進化

すべてのカタチに機能を持たせたスタイリング

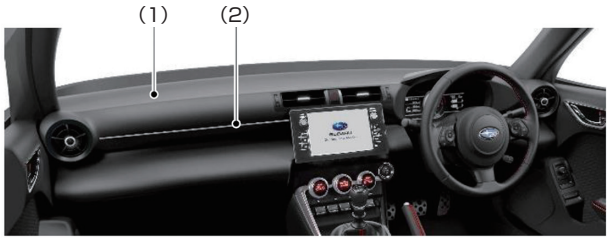
次世代のスポーツカーを目指す新型BRZ では、走りの愉しさを極めるための優れた機能性を、車内空間の随所に盛り込んだ。身体への追従性を向上させ、広い接地感のあるシートは、高G域での姿勢を保持・安定させる優れたホールド性を実現させた。さらに乗り

降りのしやすさなどの利便性を高めることにより、日常での使い勝手も向上。機能的な車内空間が、安全で快適な走りの愉しさを実現させた。

6.1　インストルメントパネル

運転への集中と、車両感覚の把握に配慮したシンプルな水平基調のインストルメントパネルを採用した。

インストルメントパネルアッパーのソフトパッドのウレタン注入量を最適にチューニングすることで、ソフトな触感を維持したまま、薄肉化(t7 → t5)を実現した。これにより、高い質感を確保しながら、軽量化と助手席エアバッグの展開性能向上を実現した。インストルメントパネルの助手席中央部に、モール加飾を追加し質感を向上した。モール加飾は、輝度を抑えたサテン調シルバーとすることで、運転中の視界の妨げにならないものとした(図54)。



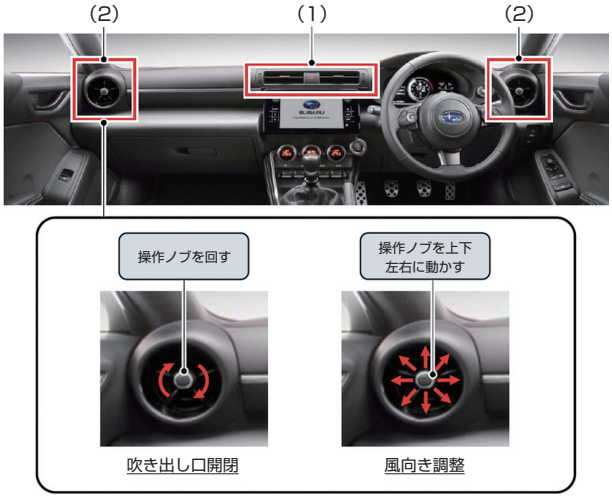
(1) インストルメントパネルアッパー
(2) モール加飾（サテン調シルバー）

図 54　インストルメントパネル概略図

6.1.1　ベンチレーショングリル

ひとつのノブで風量と風向き調整が可能なサイドベンチレーショングリルを採用し、使い勝手を向上させた。さらに、腰回りへ向けた下向きの風の指向性を向上するとともに、サイドベンチレーショングリルの

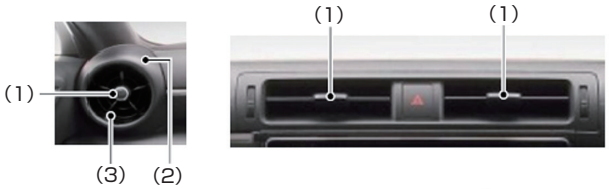
風束を広げ、包み込むような風を送風することで、快適な室内環境を実現した(図55)。



(1) センターベンチレーショングリル
(2) サイドベンチレーショングリル

図 55　サイドベンチレーション操作

操作ノブにメッキを施すとともに、サイドベンチレーショングリルの内外パネルには黒塗装と鋳物ブラック塗装を採用し、質感を向上させた(図56)。



(1) 操作ノブ
(2) サイドベンチレーショングリル、パネル（外）
(3) サイドベンチレーショングリル、パネル（内）

図 56　ベンチレーション概略図

6.1.2　メーターバイザー

メーターバイザーにPVC 表皮巻きと起毛皮革調のヌバック調表皮巻きを設定し、質感の向上とともにグレードの差別化を図った(図57)。

(1) メーターバイザー

図 57　メーターバイザー概略図

6.1.3　インストルメントパネル中央部の加飾

インストルメントパネル中央部に鋳物ブラック塗装を採用し、質感を向上させた(図58)。

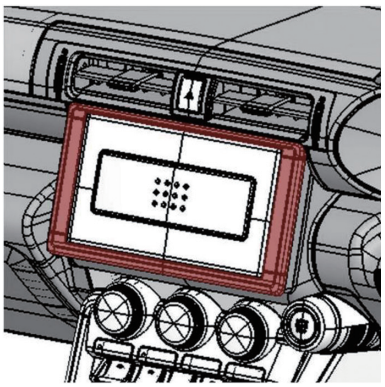
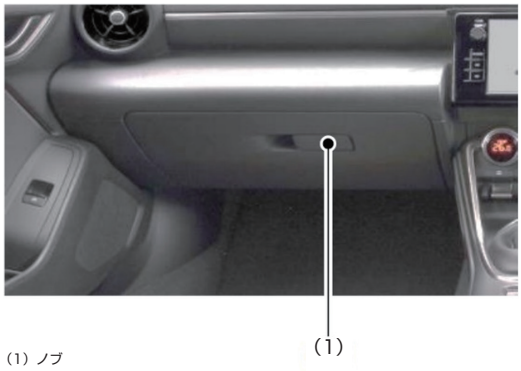


図 58　インストルメントパネル中央部概略図

6.1.4　グローブボックス

横方向操作の左右連動式ロックノブを採用し、運転席側からの操作性に配慮した。スポーツカーでありながら実用性にも配慮し、クラストップの収納力を実現した(現行車比25%向上)(図59)。



(1) ノブ

図 59　グローブボックス概略図

6.2　センターコンソール

運転に集中できるスポーツカーらしい室内空間を実現するために快適性と実用性を両立させたセンターコンソールを採用した。膝が当たる部位には、コンソールと異なるテクスチャー加工を施したニーパッドを採用した。シフトパネルまわりには、運転中の視界の妨げにならない輝度を抑えたサテン調のシルバー塗装加飾を採用することで、視認性に配慮しながら質感を向上させた。クッション性のある表皮巻きを施したコンソールリッド(アームレスト)を採用し、快適性を向上させた(図60)。

(1) ニーパッド
(2) シフトパネルまわり（サテン調シルバー）
(3) カップホルダー※1
(4) コンソールリッド（アームレスト）
※1 AT のみ
※画像は AT 車

図 60　内装装備概略図

MT 車にシフト操作時の肘当たりに配慮した専用センターコンソールを設定した(図61)。

6.2.1　コンソールリッド(アームレスト)

コンソールリッド(アームレスト)を採用し、運転に集中できる機能的で快適な室内環境を実現した。

リッド部分にクッション性のある表皮巻きを採用し、リッドの開閉状態にかかわらず、シフト操作時の肘当たりがないよう、観音開き＋落ち込み開閉仕様を採用した(図62)。

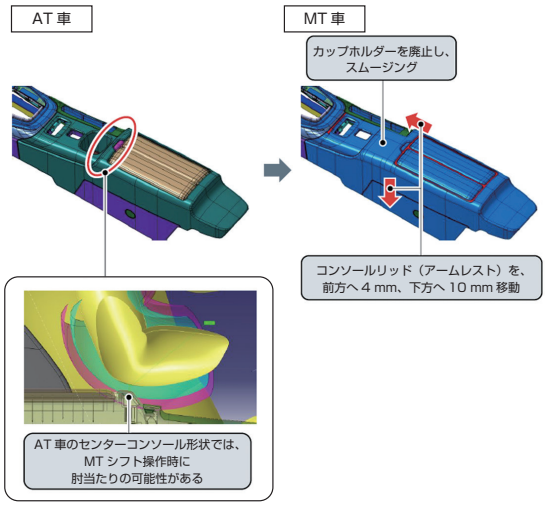


図 61　センターコンソール AT・MT 差

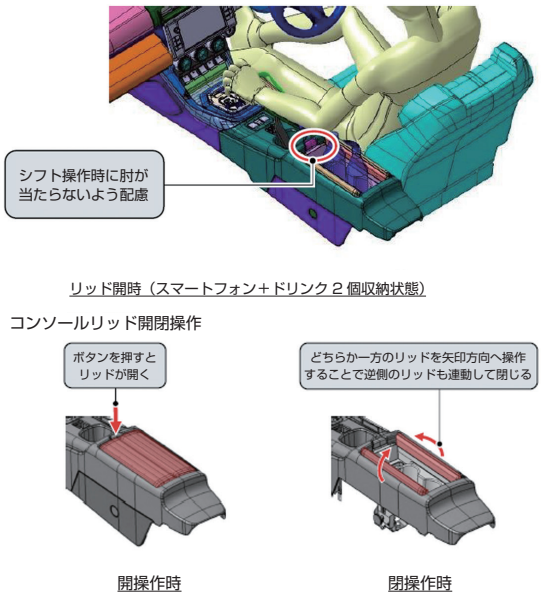
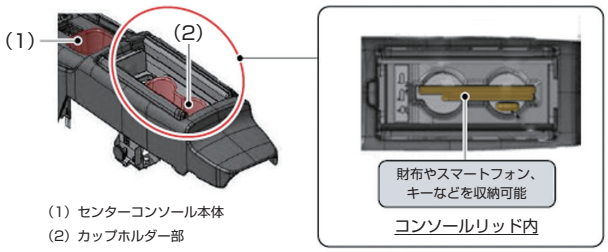


図 62　コンソールリッド開操作図

6.2.2　コンソールカップホルダー

カップホルダー3個とボトルホルダー2個を採用し、多人数乗車時の利便性を向上させた。センターコンソールにカップホルダーを採用。後席からもアクセス可能な位置に配置することで、後席乗員の使い勝手に配慮した。 また、コンソールリッド内のカップホルダー部分は財布やスマートフォンなどの収納もできる形状に工夫することで、機能性を向上させた(図63)。



(1) センターコンソール本体
(2) カップホルダー部

図 63　センターコンソール収納性

6.3　トリム

インテリアの上質感や実用性を高めるため、初代BRZに対して多くのアイテムを刷新した。

6.3.1　ドアトリム

(1) 前席の乗降性向上

ドアトリムロアの形状を最適化することで、乗降時の足との干渉を低減し、乗降性を向上した(図64)。

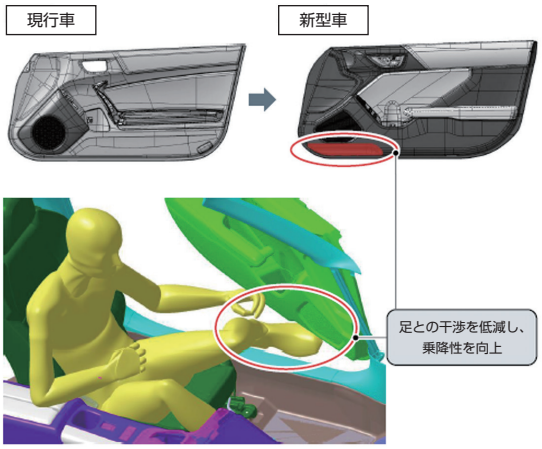
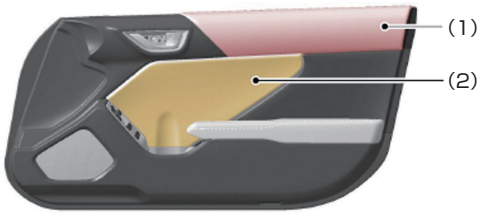


図 64　乗降時の配慮

(2) ドアトリム加飾

上級グレードには、ドアトリムアッパーに起毛皮革調のヌバック調表皮と、ドアトリムミッドにPVC表皮を設定し、グレードの差別化を図った(図65)。

加飾をシートとコーディネートすることで、室内全体で統一感を持たせるとともに質感を高めた。



No.	部位名称	標準	上級
(1)	ドアトリムアッパー	PVC 表皮	ヌバック調表皮
(2)	ドアトリムミッド	ファブリック	PVC 表皮

図 65　ドアトリム仕様

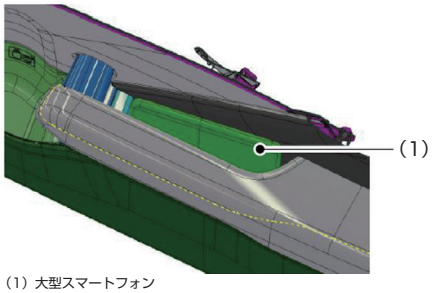
(3) アームレスト

現行車と同様に、アームレストにPVC 表皮巻きとダブルステッチを採用し、スポーティで上質な室内空間を表現した(図66)。

プルハンドルのアームレストを採用し、アクセス性を向上。アームレストのポケットには大型のスマートフォンを収納できる収納性も確保した(図67)。

(1) ダブルステッチ

図 66　アームレスト仕様



(1) 大型スマートフォン

図 67　ポケット概略図

アームレストの前端をアームレストが浮いているように見えるフローティング構造とすることで、意匠性を向上させた。形状も握りやすい形状とし、握ったまま前後や左右、上下に荷重をかけても問題ない構造とした(図68)。

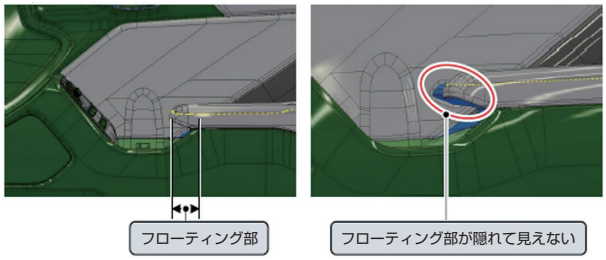
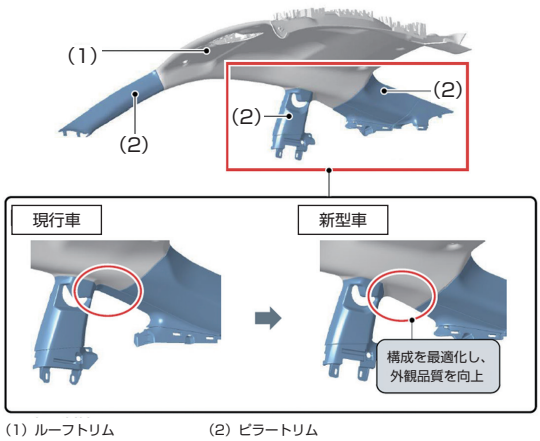


図 68　ドアトリムグリップ

6.3.2　ルーフトリム／ピラートリム

レイアウトや構造を最適化することで、スポーツカーとしてドライビングを十分に愉しむことができる運転視界を確保した。ルーフトリムとピラートリムの形状と分割構成を変更することで、シンプルですっきりとした分割線とし、外観品質を向上させた(図69)。



(1) ルーフトリム　(2) ピラートリム

図 69　トリム接続部

6.3.3　サイドシルカバー

上級グレードにステンレス製プレートと、ゴムのような性質を持つTPO（オレフィン系エラストマー）材を採用した手置きパッドを設定し、乗降性の向上とグレードの差別化を図った（図70）。

図 70　手置きパッド+ステンレス製プレート

6.3.4　ラゲッジスペース

(1) トランクルーム

趣味や旅行、サーキット走行などさまざまなシチュエーションにあわせて、荷物を収納することができる荷室空間を実現した（図71）。

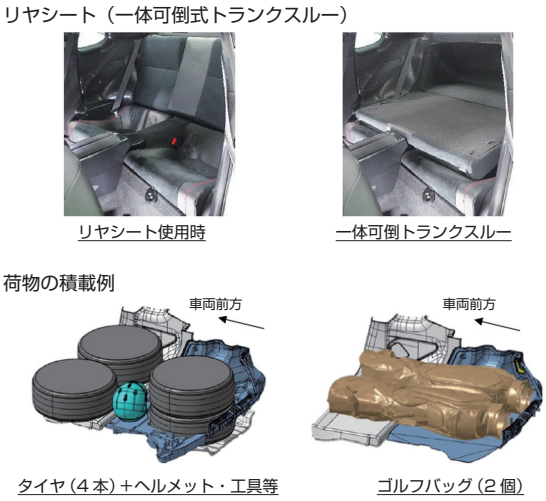


図 71　トランクルーム積載状態

(2) リヤシェルフ

現行車でリヤシェルフに設置されていたハイマウントストップランプを、トランクガーニッシュ内に移設することで、後方視界と外観品質を向上した（図72）。

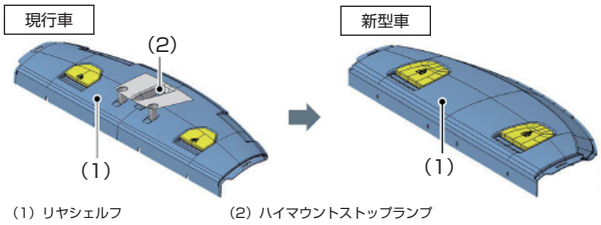


図 72　リヤシェルフ比較図

6.4　シート

新型BRZでは走りの愉しさを追求するために、機能性に優れたホールド性の高いシートを採用。疲れにくく運転に集中できる環境を作りだし、さらにクルマの挙動を正確に感じられるシートを実現させた。

6.4.1　フロントシート

シートフレームを刷新し、サポート性を高めたスポーツシートを採用。座り心地の向上と車両との一体感を実現し、運転する愉しさを提供する。

(1) スポーツカーパッケージングへの貢献

運転席のマニュアルリフターの調整代を、下側に5 mm拡大した。これにより現行車よりさらに低重心に着座できるようにするとともに、幅広い体格のお客さまが最適なドライビングポジションをとれるようにした（表2）。

表 2　　シートリフター調整範囲

調整代	現行車	新型車
上側［mm］	14	14（0）
下側［mm］	26	31（+5）

（ ）：現行車比

ホールド性を維持しながらも車両内側のサイドサポート形状を薄くすることにより、シート中心を運転席3.7 mm、助手席3.7 mm 車両中央に寄せた。マスの集中化により運動性能向上に貢献。全高の低減やキャビンの絞り込みがされた分のヘッドクリアランス低減を相殺し、現行車と同様に、頭部に狭さを感じさせることなく、ドライバーポジションがとりやすいように配慮。ドライバーからシフトレバーへのリーチが短くなり、より素早く、意のままのシフト操作性に貢献させた（図73）。

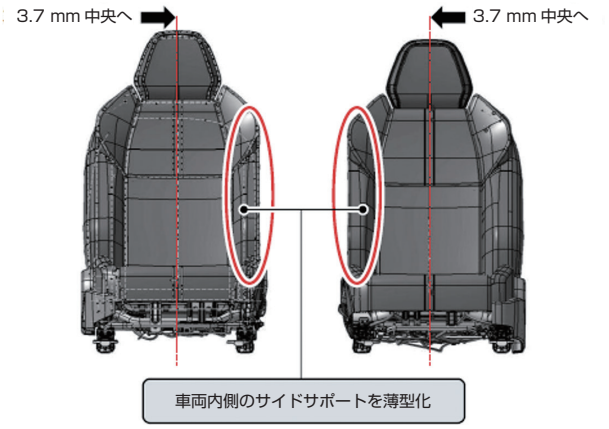


図 73　フロントシート カップルディスタンス

(2) 座り心地向上

現行車では平面状だった座面部のバネ形状を、新型車では鉢状にすることで、乗員の体にフィットさせるとともに、サポート性を向上させた（図74）。

図 74　座面バネ形状比較図

シートバックのメイン部と土手部の境にスリットを設け、腰部分のストロークと体圧分布を最適化することで、車両との一体感を実現した(図75)。

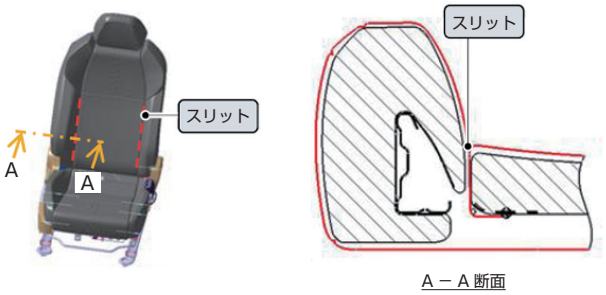


図 75　シートバックサイド部スリット

(3) 操縦安定性の向上

シートフレームにSUBARU初となるレーザー溶接を導入することで、シートフレーム接合部の合理化と高い接合性を実現。これにともないシートフレーム全体の材質、板厚等を見直すことで3 kg の軽量化を実現した(図76)。

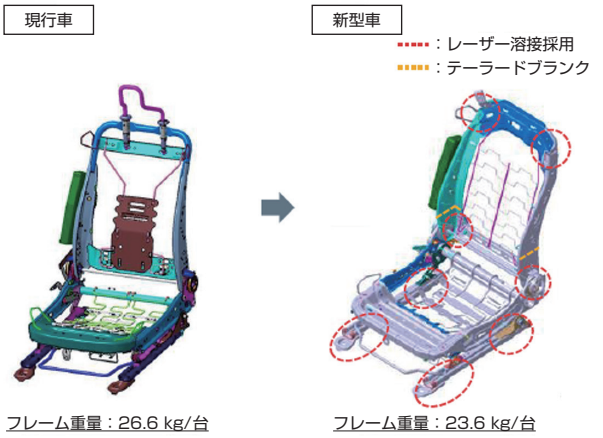


図 76　シートフレーム比較図

(4) 後席へのアクセス向上

フロントシート背面下部のリクライニングストラップを廃止し、新たにウォークインレバーを採用した。レバーの位置をフロントシート上方の最適な位置に配置することで、容易に操作でき、後席へのアクセス性と利便性を向上させた(図77)。

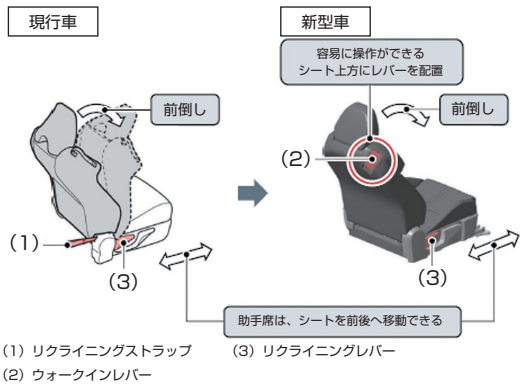


図 77　ウォークインレバー作動

(5) 快適性

現行車と同様に、運転席と助手席にシートヒーターを設定した。乗員の体圧が集中する箇所に熱線を増やすことで、効率的に温める構造とした(図78)。

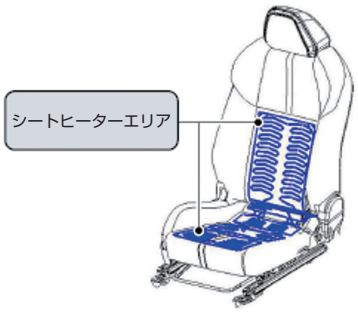


図 78　シートヒーターエリア

6.4.2　リヤシート

リヤシートのロック解除を、室内からのボタン操作だけでなく、荷室側からのストラップ操作によっても行える構造とした。これによって、荷物を載せるためにリヤシートを倒すときなど、後席に乗り込む必要がなく、利便性を向上させた(図79)。

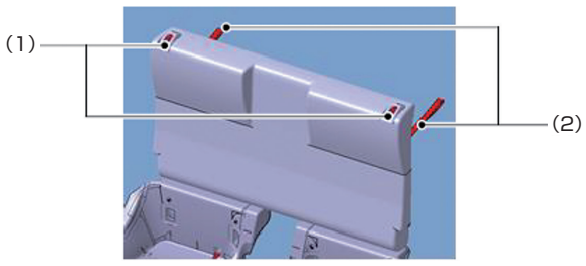


図 79　リヤシートロック解除機構

スポーツカーらしいクーペボディを持つBRZ において、背反する後席の居住空間も現行車同等に確保。頭頂部からも多少空間の余裕を残し、後席空間と外観のスタイリングを両立させた。12歳児のアメリカ人を想定した身長5.5 ft (168.2 cm) の人間※が乗車できる頭上空間を確保した(図80)。

※日本人の場合は、身長 159 cm を想定

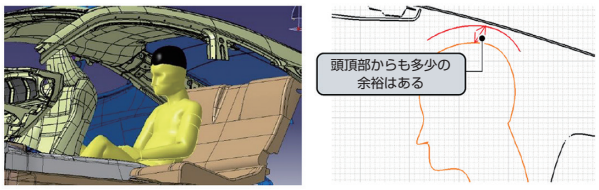
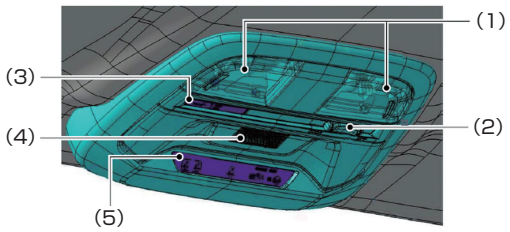


図 80　後席頭上空間

6.5　室内照明

6.5.1　マップランプ

運転席側と助手席側それぞれで点灯可能なマップランプを採用し、使い勝手と明るさが大幅に向上した。マップランプの ON/OFF は、レンズプッシュ式を採用。ドア連動時、運転席側と助手席側両方のランプが点灯することで、明るさが向上した。ワーニングボックスを各席の乗員から見やすい位置に配置(図81)。

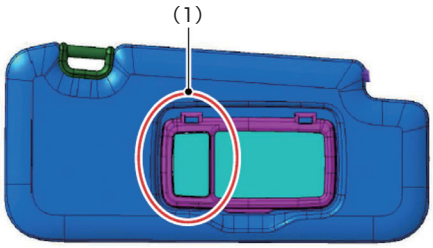


(1) マップランプ
(2) ドア連動スイッチ
(3) 米国、カナダ SOS スイッチ
(4) 日本以外 マイク
(5) ワーニングボックス

図 81　マップランプ概略図

6.5.2　バニティランプ

バニティランプを設定し、利便性を向上した(図82)。



(1) バニティランプ（運転席＆助手席）

図 82　バニティランプ概略図

6.5.3　トランクルームランプ

新型車では、トランクルームランプの搭載位置をトランクルーム中心部へ変更することで、荷室全体の明るさや照射範囲を向上させた(図83)。

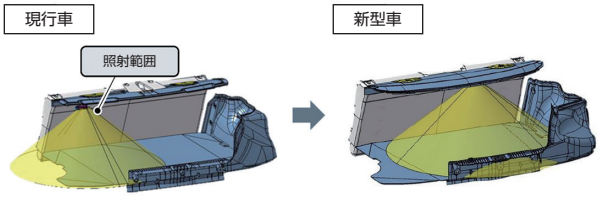


図 83　カーゴランプ照明範囲

6.5.4　カーテシーランプ

上級グレードにはカーテシーランプを設定し、利便性の向上とグレードの差別化を図った(図84)。

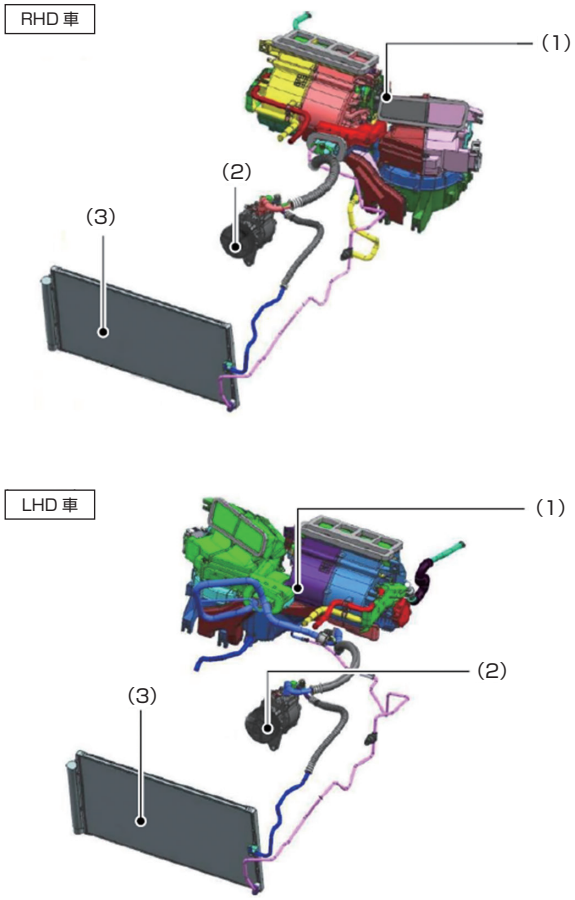
(1) カーテシーランプ

図 84　カーテシーランプ概略図

6.6　エアコンシステム

6.6.1　エアコンユニット

地球温暖化防止のため、現行車をベースに冷房性能を維持するとともに、新冷媒(HFO-1234yf) に対応したエアコンシステムを一部仕向けに採用することで、環境規制に適応させた(図85)。



(1) HVAC ユニット
(2) コンプレッサ
(3) コンデンサ

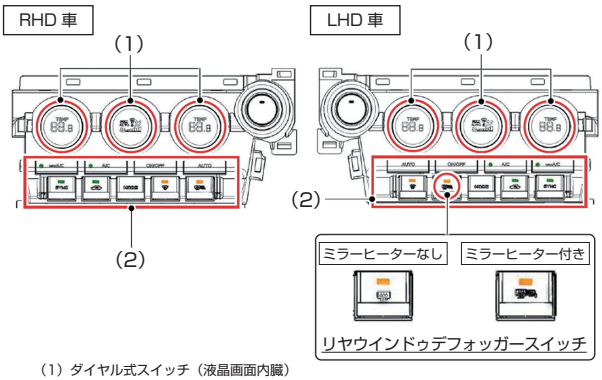
図 85　エアコンシステム全体図

6.6.2　エアコンシステム

全グレードにフルオートエアコンを採用。以下の機能を新たに追加し、使い勝手と室内環境の快適性を向上させた。

・室内を素早く冷やすことができるMAX A/C機能
・吹き出しモードにVENT Ⅱモード追加
・マニュアル操作時の風量徐変制御

また、新機能に対応したボタン、モード表示を追加したエアコンパネルに刷新。ダイヤル内には液晶画面を搭載し、昼間の視認性を向上した。また、夏場など、素早く温度を下げたいときに有効なMAX A/C機能を採用した。ONにすると冷房がONになり、設定温度LO、風量MAX、VENTモード、内気循環に自動で切り替わることで利便性を向上させた(図86)。



(1) ダイヤル式スイッチ（液晶画面内臓）
(2) ハードスイッチ

図86　エアコン操作パネル配置図

快適な温度空間を作り出す手段として吹き出しモードの多段化を採用した。冷房時に通常のVENT 吹き出し口に加え、足元にも少量の冷風を流す「VENT Ⅱ」モードを追加することで、暑いときの足元の蒸れ感を解消することが可能となった(図87)。

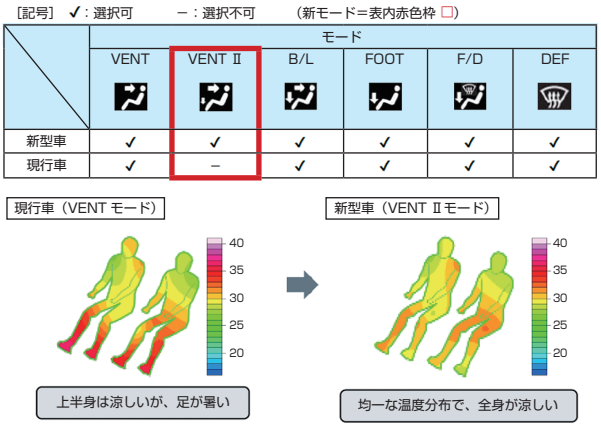


図87　エアコン作動時の体感温度比較

7.　走りの進化(ボディ)

7.1　ボディ構造の開発の狙い

新世代のスポーツカーとして、車体剛性、動的質感、乗員保護性能を進化させ安心と愉しさを体感できるボディ構造とした。ボディ構造については別報で解説しているため、本章では詳細を割愛する。

7.1.1　車体剛性

最新のスバルグローバルプラットフォーム開発の知見で得たアイテムを投入し、フロント横曲げ剛性とねじり剛性をそれぞれ約60%、約50%と大幅に向上した。

フロントのサスペンションクロスメンバとフロントフレームの間にダイアゴナルメンバ①を追加し、入力先のトルクボックス②も合わせて強化することで、サイドシルへの荷重伝達を向上させ、フロント横曲げ剛性を向上することで、ステアリング操作時のより軽快な動きを実現した(図88)。

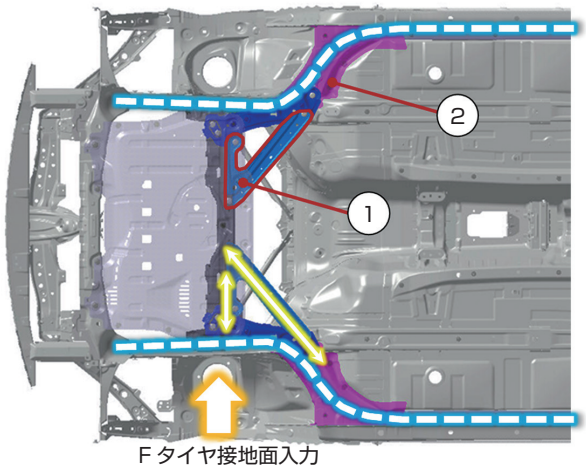


図88　車体前方部 荷重伝達図

さらに、主要骨格をプラットフォームに先に強固に組み立ててから、外板パネルを最終工程で組み立てるインナーフレーム構造を採用した(図89)。

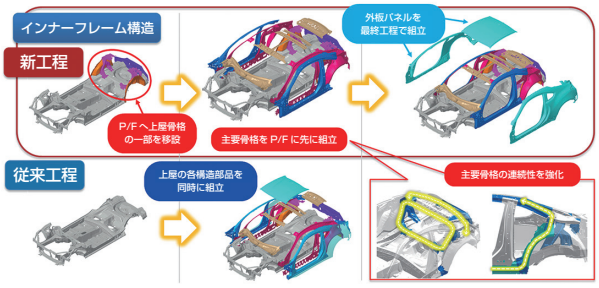


図89　インナーフレーム構造概略図

主要骨格の連続性とリヤまわりの環状骨格を強固にし、ねじり剛性を大幅に向上した(図90)。

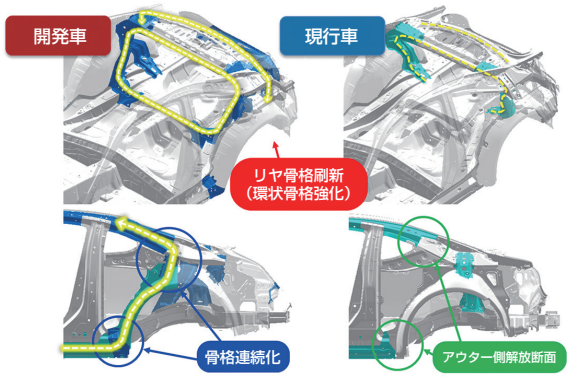


図 90　リヤ廻り剛性概略図

加えて、ボディベースの要所に構造用接着剤を塗布し、剛性向上に加え微小な振動を減衰した(図91)。

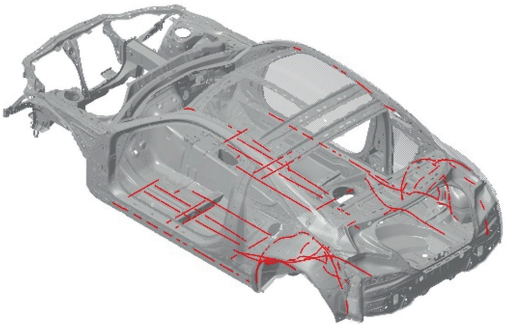


図 91　構造用接着材塗布範囲

7.1.2　衝突安全ボディ

時代に即した衝突安全性能を実現するため、ボディ各部を強化。高張力鋼板の使用比率を拡大することで、ボディの強度アップと軽量化を高次元で両立した(図92)。

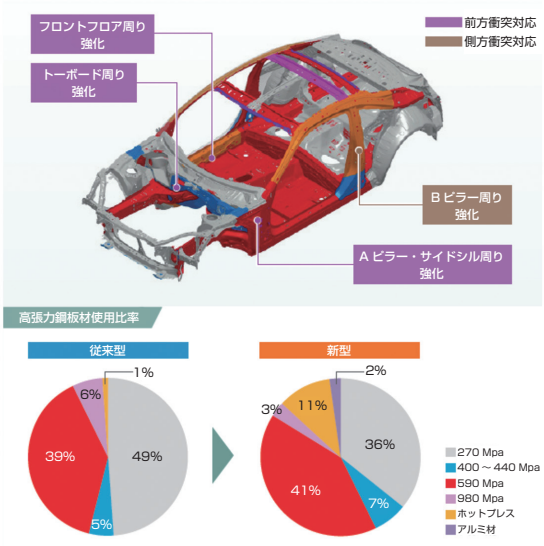


図 92　各部材採用比較図

7.1.3　軽量化による重心・重量配分の進化

スポーツ走行で重要となる低重心化と理想の前後重量配分を追求し、ルーフ・フード・フェンダの外板パネルにアルミ材を採用した(図93)。

図 93　アルミ材採用部分

8.　走りの進化(シャシー)

8.1　シャシー

初代BRZは専用プラットフォームで産まれ、その後の年次改良で走りの進化を続けてきた。フルモデルチェンジにあたり、初代の高いユーティリティを確保しつつ走りを進化させるために、熟知した初代をベースにSGPの要素を織り込んだ形で開発することを選択した。シャシーとしての大きなポイントは2点。①2.4L化したエンジンの出力を確実に受け止められること。②走りのさらなる進化。①についてはリヤサスペンションを始めとした駆動系部位に補強が必要であった。一般的に強度、剛性を上げると質量増となり、動力性能や軽快感が失われるため、構造の見直しや軽量化を行った。②について、ボディ側の曲げ、捻じれに対する剛性がアップした効果で足回り部品がしっかり使い切れるようになった。SGPアイテムを織り込んだ上で、前後スタビ、コイルスプリングのバネレート、ショックアブソーバーの減衰特性を最適化し、意のままに操れる直観ハンドリングを実現した。

8.1.1　フロントサスペンション

ベースのジオメトリは先代を踏襲しつつ、以下の変更を行った(図94)。

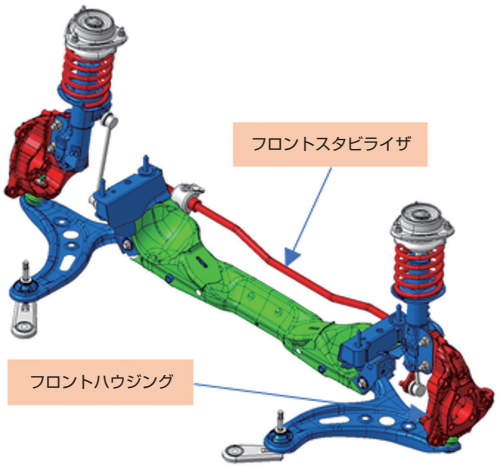


図 94　フロントサスペンション

(1) エンジンマウント
　不快な振動を低減させ、質感の高い走りを実現するためエンジンマウントを新型レヴォーグでも採用したアルミブラケットタイプに変更した。
　※本件に合わせてクロスメンバの形状を変更

(2) ステアリングギアボックス固定ブッシュ
　操舵に対してよりダイレクトに車が反応するよう、ステアリングギアボックスをサスペンションクロスメンバに固定している部位のゴムブッシュ特性を見直した。
(3) フロントハウジング
　バネ下重量を低減させるためハウジングをアルミ化。従来の鋳鉄品に対し同等以上の剛性を確保した上で片側1.5 kg（車両で3 kg）の軽量化。
(4) フロントスタビライザ
　中実から中空に変更し軽量化を図った。

8.1.2　リヤサスペンション

　リヤについても基本ジオメトリは継承しつつ以下の変更を行った（図95）。

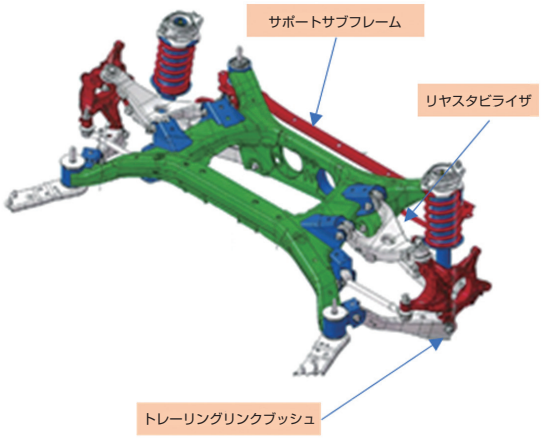


図 95　リヤサスペンション

(1) リヤサブフレーム
　エンジンの2.4L化に対応し、耐力を向上させるため、サスペンションサブフレームの板厚や溶接位置を見直した。
(2) リヤスタビライザ（取り付け構造）
　従来リヤスタビライザはサブフレームに取り付けていたが、新型では車体に直接取り付ける方式を採用した（現行インプレッサから採用した方式）。これによりボディのロールに対してサブフレームを介してではなく直接抑制することができる。スタビライザの効率が上がることでロール抑制のためにスタビライザの径アップやコイルスプリングを固くする必要がなくなるため、高い操縦安定性能と乗り心地を両立させることが可能になった（図96）。

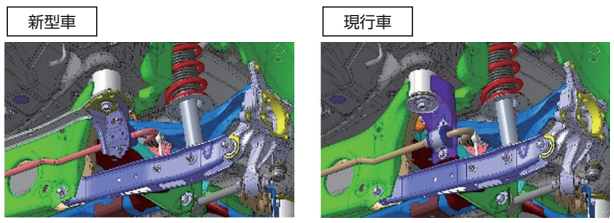


図 96　リヤスタビライザ取り付け構造違い

(3) サポートサブフレーム
　リヤサブフレームの取り付け部剛性を上げるため、サポートサブフレームを追加した。
(4) トレーリングリンクブッシュ
　コーナーリング中のリヤタイヤトー変化を抑え、トラクション性能を向上させるため、トレーリングリンクとハウジングを締結しているブッシュのバネ特性を見直した。

8.1.3　ブレーキ

　今回新型では世界的に規制が厳しくなっている銅含有量を低減させるために新規パッドを開発した。新型では、標準μパッドで現行車の高μパッドと同等の制動力を実現した。

8.1.4　アクスル

　エンジンが2.4L化されたことによるトルクアップに耐えられるよう駆動系を強化した。
(1) プロペラシャフト
　トルクアップに対する耐力を上げるため、プロペラシャフトジョイント部の径をアップ。
(2) ドライブシャフト
　プロペラシャフトと同様に耐力向上のためジョイント部の径をアップ。

8.1.5　燃料システム

　車両運動性能向上に合わせて、コーナーリング時のタンク内燃料偏りに対する吸い込み性能を向上させたるため、燃料ポンプの鞍移送特性変更、鞍移送チューブ径アップを行った（図97）。

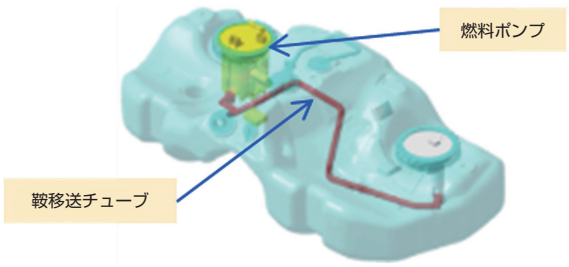


図 97　燃料タンク概略図

9.　走りの進化(ATスポーツモード)

9.1　開発の狙い

誰もが心地よく操れる。
誰もがスポーツ走行を愉しめる。

AT車　スポーツモード

新型BRZは車両全体として初代からの進化と深化を念頭に、『スポーツカーを極める』事を大目標に開発した。

モアパワーに代表されるエンジンの排気量とトルクアップに合わせ車両の大幅進化にも引けを取らないようパワートレインの随所に改良を取り入れ車両全体の進化を遂げた。

BRZは2ペダルでも走りを愉しめる。
誰もが心から愉しめるスポーツカーへ。
AT車を選ぶ人たちにも走る喜びを存分に味わってもらいたい。
これを実現したいという思いでスポーツモードの開発を行った。

9.2　新型BRZ AT車スポーツモード設定思想

初代BRZのスポーツモードはノーマルモードとスポーツモードの明確な差別化を図り、ドライバー自身がモードを選択し、意図に合った走りが愉しめる事を実現したものの、一方で、コーナーやワインディング走行での改善点が見つかった(図98)。

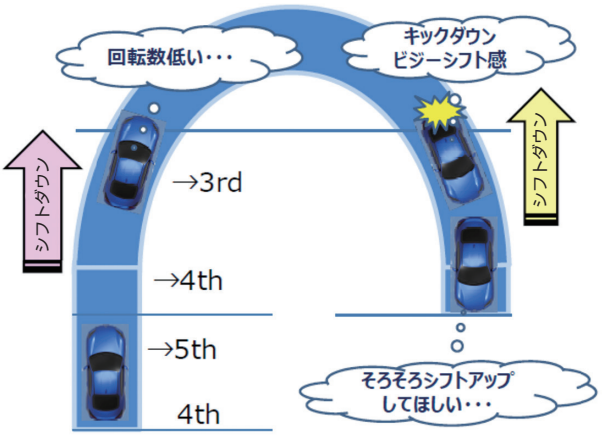


図 98　初代 BRZ ATスポーツモードの現状

『スポーツカーを極める』を探求し検討を繰り返した結果、新型のスポーツモードの訴求ポイントとして以下4項目を定めた(表3)。

・ワインディングでの走りの良さ
・意図に合った気持ち良い変速
・サーキットでも使えるAT車
・カタログスペック、記号性

これらの訴求ポイントに対する狙いと思想を明確にし達成手段を検討した。

表 3　新型 BRZ ATスポーツモード訴求ポイント

訴求ポイント					狙い思想
ワインディングでの走りの良さ	意図に合った気持ち良い変速	サーキットでも使えるAT		カタログスペック	
		実走行	カタログ	(技術／記号性)	
○	−	−	−	△	【A】
○	○	○	−	−	【B】
○	○	○	○	○	【C】
△	○	△	−	−	【D】

9.3　新型BRZ　スポーツモードの基本思想

ノーマルモードとスポーツモードの基本思想は以下と考えた。
【ノーマルモード】:普段使いで煩わしさを感じさせず、アクセル操作に対する気持ちの良い伸び感を強調
【スポーツモード】:特にワインディングでの力強いトルク感とドライバーの意図に合った変速で気持ち良さを演出

上記基本思想に基づき、スポーツカーのATに求められる性能とは、を再考した結果、ドライバーの操作・意図に対してクルマがリニアに応える事。が大切であると再認識に実現に向けた達成手段を検討した。

特に、スポーツAT車として重要なパラメータは「アクセル」、「ブレーキ」、「変速」の3要素であり、それぞれに対して、
①アクセル操作に対し、欲しい加速感が瞬時に得られ、応答遅れが無い事。
②ブレーキ操作に対し、欲しい減速度が瞬時に得られ、且つダウンシフトタイミング、エンブレが適切である事。
③変速に対し、求める変速感が瞬時に得られ、パワーバンドを外さない。且つ煩わしくない事。
という定義を設定し開発を進めた。

9.4　基本思想に対する狙いと達成手段

ATモデルでもドライバーの意思や操作にクルマが気持ちよく反応し愉しい走りが出来る。市街地やワインディングのシチュエーションやドライバーの気持ちに合わせたモードを選択でき意図に合った走りが出来る事、これは先述の通り初代BRZでも取り入れた思想ではあるが、『スポーツカーを極める』特に、ATモデルでもドライバーの意思や操作にクルマが気持ちよく反応し愉しい走りが出来る事、をさらに高次元で達成させるため、今回のATモデルのスポーツモード

は、よりドライバーの意思や操作に気持ちよく反応するように、スポーツ走行時におけるアダプティブ制御をさらに進化させた。

これらの考えの元、先述の訴求ポイントに対する狙い・思想を【A】、【B】、【C】、【D】で分類し、それぞれの強化ポイントを深掘りした内容と実現手段を表4に示す。

表４　狙い・思想と実現手段

狙い・思想		実現手段	
【A】	中低速域の力強さ ワインディング走行中の回転域のトルク感、加速の伸びを強調	車速、ギヤ段、ドライブモード毎のトルクコントロール最適化	専用のエンジン制御と変速制御
【B】	アクセルレスポンス／変速のダイレクト感向上 アクセル操作に直ぐに車が反応する ロスを感じないキビキビした変速	変速時のトルクコントロール最適化 アクセル操作とトルクコントロール最適化	専用変速制御 トルクダウン制御 ブリッピング制御 スロットル適合
【C】	シチュエーション毎に最適なギヤ段を自由選択／マニュアルモード不要 煩わしさを感じない気持ち良い走り	走行状態の判定精度向上による変速の最適化	車速、アクセル、ブレーキ、前後／横Ｇからの走行状態判定
【D】	メータ演出による変速速度感の向上 変速応答感の向上 ドライブモードに適したメータ表示による スポーツ感向上	メータ演出 メータ表示	タコメータ制御 ギヤ位置表示 ドライブモード毎の画面遷移

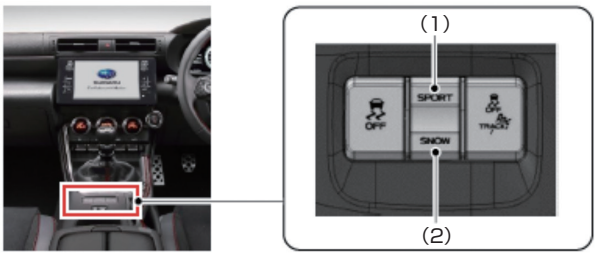
ワインディング走行中の中低速域の力強さや、アクセルレスポンス、変速のダイレクト感を際立たせるために、専用の制御マップを新設しエンジン制御と協調し制御の最適化を図った。

加えて、シチュエーションに応じたドライバーの意思で走行モードを選択し（図99）意図に合った走行を愉しめる事も、ATモデルのスポーツカーとして重要な訴求ポイントである。

ノーマルモードでは通常のATと同じ走行モード。しかし、モードを切り替えればスポーツ走行に最適な変速制御にシフト。高回転域までしっかりと使えるだけでなく、変速タイミングまでも徹底的にチューニングした。

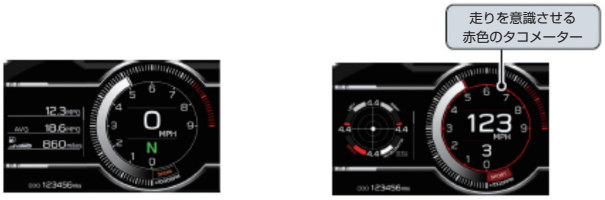
パドルで操るマニュアルモードよりも的確にシフトチェンジを行うため、ドライバーはステアリングやペダル操作に集中できる。

さらに、変速した際の変速感や応答性と視覚から感じられる高揚感も大切なスポーツカーの要素と捉え、スポーツモードの造り込みに併せ各メータ演出も織り込んだ（図100）。



(1) SPORT スイッチ
(2) SNOW スイッチ

図 99　スポーツモードスイッチ



Normal/SNOW モード　　SPORT モード

図 100　各モードのメータ表示

9.5　新型BRZ　スポーツモードの結果

表4で記した訴求ポイントと狙いと思想に対する達成結果を表5に示す。

表５　新型 BRZ スポーツモードの結果

	新型 BRZ　スポーツモードの結果
【A】	トルク特性と変速線をモード毎、ギヤ段毎に細分化し、それぞれのドライブモードに特化した設定としたことで中低速域の力強さを実現した
【B】	スポーツ用の専用変速制御による高応答化とアクセル踏み込み時の追従性を向上させたことでアクセルレスポンスと変速のダイレクト感向上を達成した
【C】	車両に発生するＧを主要パラメータとしてドライバーの意思に合った変速を実現 ドライバー操作に対して常に同じ操作となるように適合したことで予見性を向上させた
【D】	実際の加速度及び音から外れない範囲で応答性を最大限に高め応答性向上を演出 スポーツ走行に特化したモードのギヤ位置を表示することにより変速感とスポーツ走行の高揚感を強調させた

各狙いと思想に対し目標を達成した事で下記目標を達成できた。

①アクセル操作に対し、欲しい加速感が瞬時に得られ、応答遅れが無い

②ブレーキ操作に対し、欲しい減速度が瞬時に得られ、且つダウンシフトタイミング、エンブレが適切

③変速に対し、求める変速感が瞬時に得られ、パワーバンドを外さない。且つ煩わしくない。

新型BRZスポーツモードでの走行イメージを図101に示す。

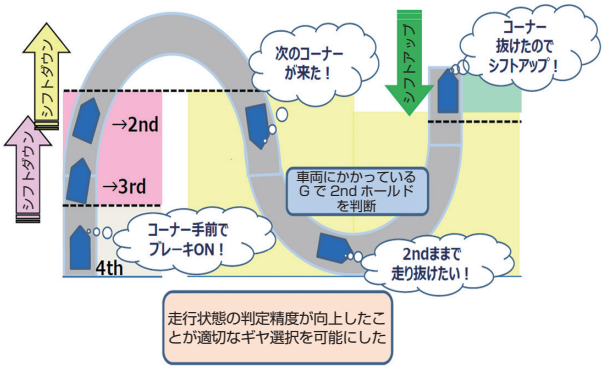


図 101　新型 BRZ ATスポーツモード走行

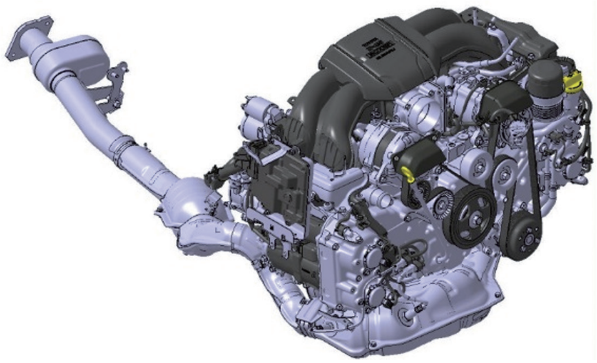


図 102　新型水平対向 2.4L 自然吸気エンジン

9.6　まとめ

MTでなければスポーツカーは満喫できないのだろうか。その答えは、新型BRZが教えてくれる。

確かにMTは、スポーツカーを操る楽しさのひとつだ。しかし、世の中には様々な理由でAT車を選ぶ人が多い現実がある。

そんな人たちにも走る喜びを存分に味わってもらうべく、新たなATの開発が始まった。その成果こそ、新しい「スポーツモード」であると考える。

ノーマルモードでは通常のATと同じ走行モード、モードを切り替えれば、スポーツ走行に最適な変速制御にシフト。高回転域までしっかり使えるだけでなく、変速タイミングまでも徹底的にチューニングをしている。

「誰もが愉しめるスポーツカー」であることを理想とし開発した。より多くの人を笑顔にするためのひらめきがこの新しいスポーツATを誕生させた。

10.　エンジン＆トランスミッションの進化

10.1　2.4リッター自然吸気エンジン

新型「BRZ」において「回したくなる吹けの良いエンジン」を具現化すべく新型2.4L自然吸気エンジン（FA24型）を開発した。FA20型で確立した「低重心・高回転」を継承しつつ全回転域でトルクを向上することで、車両動力性能の大幅な向上とスポーツカーに相応しい高回転まで伸びのあるフィーリングを実現した（図102）。

10.1.1　開発の狙い

FA20の「高回転までストレスなく回るエンジン」、「軽量・コンパクトで低重心なエンジン」はそのままに、排気量を拡大することで出力性能とレスポンスを向上、ドライバーの意のままに操れるスポーツカーに相応しいエンジン性能を狙いとした。

10.1.2　エンジン主要諸元と主要変化点

表 6　エンジン基本諸元

		新型 BRZ FA24 (2.4L D-4S)	新型 BRZ FA20 (2.0L D-4S)
エンジン型式		FA24	FA20
配置		水平対向	水平対向
燃料供給方式		筒内噴射＋ポート噴射 (D-4S)	筒内噴射＋ポート噴射 (D-4S)
使用燃料		93AKI (北米) 100RON (日本)	93AKI (北米) 100RON (日本)
気筒数		4 気筒	4 気筒
総排気量		2387 cc	1998 cc
北米	最高出力	228 HP (170 kW) /7000 rpm	205 HP (152 kW) /7000 rpm
	最大トルク	184 lb-ft (250 Nm) /3700 rpm	156 lb-ft (212 Nm) /6400-6800 rpm
日本	最高出力	173 kW (235 PS) /7000 rpm	152 kW (207 PS) /7000 rpm
	最大トルク	250 Nm (25.5 kgfm) /3700 rpm	212 Nm (21.6 kgfm)) /6400-6800 rpmm
吸気方式		自然吸気	自然吸気
弁機構		DOHC4バルブ	DOHC4バルブ
駆動方式		タイミングチェーン	タイミングチェーン
動弁系デバイス機構		吸気／排気 AVCS	吸気／排気 AVCS
ボア×ストローク		φ94.0 × 86.0 mm	φ86.0 × 86.0 mm
圧縮比		12.5	12.5

10.1.3　出力性能

ポートと直噴の噴射割合や噴射時期、燃圧等の燃料噴射制御、吸排気VVTタイミング、スロットル開度特性等を見直しFA24のハードポテンシャルを最大限に引き出し、高トルク・高出力化を達成した。また4000 rpm付近のトルク低下を抑制できたことで、扱いやすく「高回転までストレスなく回るエンジン特性」を実現した（図103）。

10.1.4　高回転対応

ボア径拡大によるピストン質量増に対応するため、FA20の斜めかち割式から、水平かち割式に変更し、ピストン上死点時の大端メタル発生面圧を低減した。それに伴い主運動部品の組み立て方式はSUBARU EJエンジンと同じ組み立て方式を採用した（図104）。

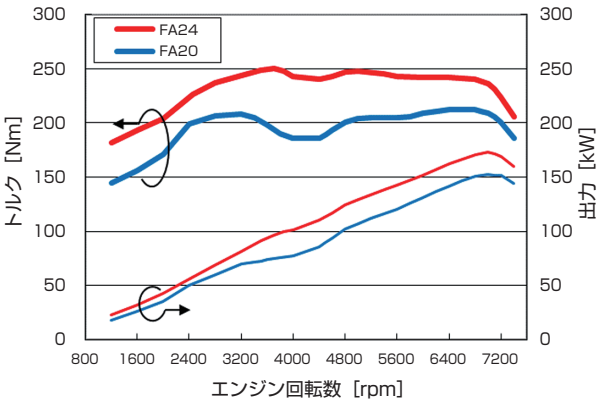


図 103　トルクカーブと出力カーブ

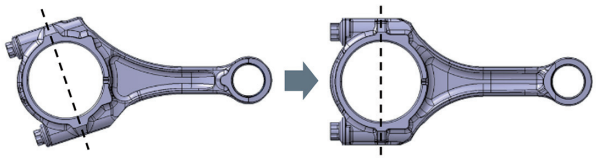


図 104　コネクティングロッド

10.1.5　排ガス性能

始動時はポートインジェクタによる燃料噴射でピストンへの燃料付着を避け、PM/PNを低減した。始動後の筒内直接噴射併用では、CAEを用いてピストン冠面の扇形キャビティ形状を最適化することで燃料噴射時期に対するロバスト性を高め、大幅リタードによる排気温度上昇でHCの低減を実現した。

10.1.6　NVH

吸気レゾネータの容量アップやインテークマニホールドの面剛性向上により、高出力化にも関わらず放射音レベルをFA20同等レベルとした。

10.2　トランスミッション

現行車のトランスミッションをベースにエンジンの高出力化に対応しつつ、MTは操作の質感向上を、ATは制御の進化を狙いとした(表7)。

10.2.1　6速マニュアルトランスミッション

現行のTL70をベースにクラッチ容量の拡大、ギヤ強度強化により高出力化に対応した。低粘度ギアオイルとニードルベアリング採用により低温時のシフト操作力を低減した。シフトゲートの面取り形状を最適化し、斜めシフト操作性を向上した。使用頻度の高い4速にカーボンシンクロを採用し、軽いシフト操作性と耐久性を両立した。クラッチ操作特性を最適化し踏み応えとコントロール性を両立した(図105)。

表 7　主要諸元表

トランスミッション			6MT	6AT
	ギヤレシオ	1 速	3.626	3.538
		2 速	2.188	2.060
		3 速	1.541	1.404
		4 速	1.213	1.000
		5 速	1.000	0.713
		6 速	0.767	0.582
		リバース	3.437	3.168
リヤデフ	ファイナルギヤ比		4.100	3.909

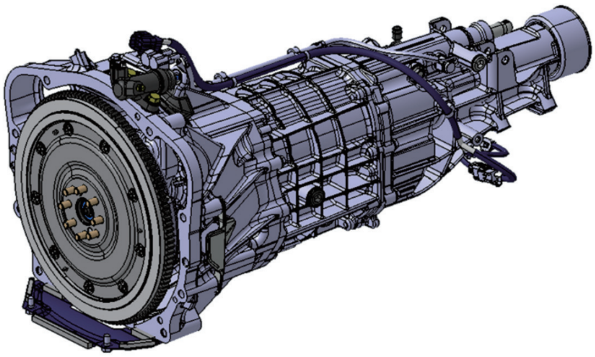


図 105　6 速マニュアルトランスミッション

10.2.2　6速オートマティックトランスミッション

現行のTX6Aをベースにトルクコンバーターの容量拡大とクラッチ枚数増加により高出力化に対応した。アダプティブ制御を進化させることでドライバーの意図・操作に対して、高い応答性と適切な加減速を実現し、走りの愉しさを向上した(図106)。

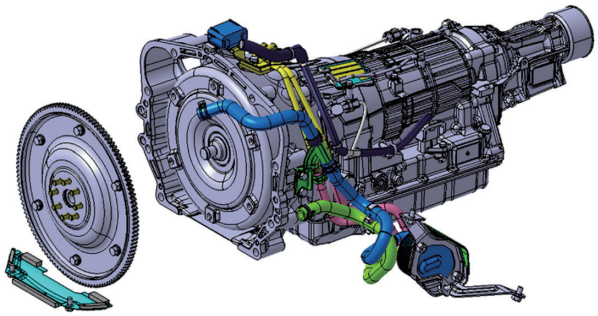


図 106　6 速オートマティックトランスミッション

10.2.3　リヤディファレンシャル

エンジン出力向上に対応し、ファイナルギア比を最適化した。AT車にトルセン※LSDを標準採用化することで車両のコントロール性を向上した(図107)。

※：トルセンは株式会社ジェイテクトの登録商標

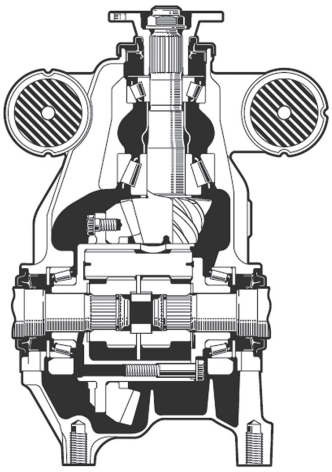


図 107　リヤ ディファレンシャル

11.　安全の進化：スポーツカーだからこそ安全

11.1　アイサイト、SRVD、RABの搭載で充実した安全装備

スポーツカーに乗りたいと思っているが安全装備の面で不安を感じたり、運転技術に自信のないお客様のために新たなスポーツカーの価値をお届けしたいと考え、AT車にSUBARU独自の運転支援システムアイサイトを、全車にSRVD（スバルリヤビークルディテクション）を搭載。より多くのお客様にスポーツカーを繰る愉しさと同時に安心・安全を提供する。普段はありがたみを感じ難い機能だが、お客様の安全なカーライフを願い、開発した。クルマに守られているという安心感のあるドライビングを存分に愉しんで頂きたい。

11.1.1　アイサイト(Ver.3)

アイサイト はステレオカメラを用いた画像処理により、先行車や障害物、車線などを認識し、状況に合わせてエンジン、トランスミッションと協調制御する運転支援システムである。BRZではSUBARU初の6速AT＋アイサイト(Ver.3)の組み合わせやスポーツカー特有の加減速特性に合わせた制御を行い、安全性と快適性を向上させた(図108)。

アイサイトは以下の機能を提供する。

(1) プリクラッシュブレーキ／ブレーキアシスト

前方の車両や障害物に衝突のおそれがあるときに注意をうながすと共に、回避操作がない場合は自動ブレーキにより減速または停止し、衝突回避または被害軽減が可能。また、ドライバーによるブレーキ操作があるときは制動力を高める支援を行う。

(2) 全車速追従機能付きクルーズコントロール

0 ～ 120 km ／ hの車速の範囲で先行車に追従し、速度を自動調節する。先行車のブレーキランプ点灯を認識し状況に応じた加減速を行う。

先行車がいないときはセット約30 ～約120 km/hで定速走行する。

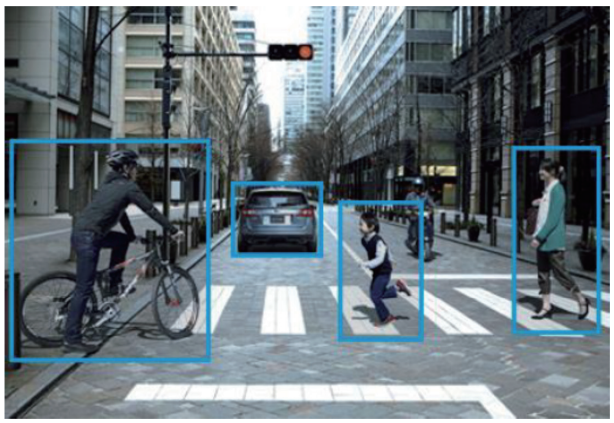


図 108　アイサイトの認識イメージ

(3) AT誤発進抑制機能

前方に障害物などがあるときに、ペダルの踏み間違いなどによる急発進を抑制する。

(4) 車線逸脱警報

車速が約40 km/h 以上のとき、車線を逸脱しそうになると警報音と警告表示で注意喚起する。

(5) ふらつき警報

継続して車両のふらつきを検知したときに、警報音と警告表示で注意喚起する。

(6) 先行車発進お知らせ

自車が停止時、先行車が発進しても自車が発進しない場合、警報音と表示でお知らせする。

11.1.2　RAB（後退時ブレーキアシスト）

後退時、後方の障害物をセンサーで検知し、表示と警報音により障害物の存在を知らせることで、ドライバーの後方確認をサポートする。

また、衝突の可能性が高い場合は、加速を抑制するとともに自動的にブレーキをかけ、衝突回避または被害軽減を図る(図109)。

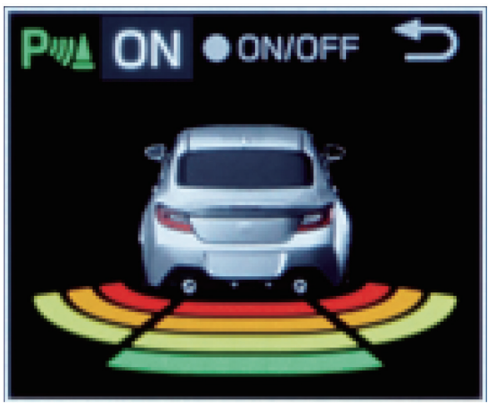


図 109　RAB の警告表示

11.1.3　SRVD（後側方警戒支援システム）

車体後部に内蔵したセンサーによって、自車の後側方から接近する車両を検知し、ドアミラーのLEDインジケータや警報音でドライバーに注意を促すことで、お客様の安心かつ愉しいドライブをサポートする（図110）。

後側方警戒支援システムは以下の機能を提供する。

(1) BSD（死角検知機能）

車両の左右後方の死角となるエリアに存在する車両を検知すると、インジケータの点灯で運転者に知らせる。また、車両を検知した状態で運転者がターンランプを操作した場合、車線変更の意思があるとシステムが判断し、インジケータの点滅により運転者に注意を促す。

(2) LCS（車線変更支援）

後方から近づいてくる隣車線の車両を検知し、車線変更すると衝突の危険性があると判断した場合に、インジケータの点灯で運転者に知らせる。車両を検知した状態で運転者がターンランプを操作した場合、車線変更の意思があるとシステムが判断し、インジケータの点滅により運転者に注意を促す。

(3) RCTA（後退時支援）

後退時に左右から近づいてくる車両を検知し、衝突の危険性があると判断した場合に、インジケータの点滅と警報音で運転者に注意を促す。

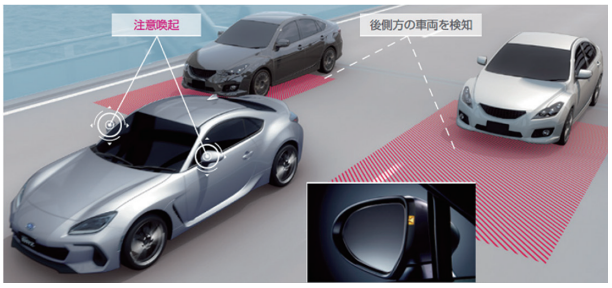


図 110　後側方警戒支援システムイメージ

11.1.4　HBA（ハイビームアシスト）

約30 km/h以上で走行中に、対向車や先行車の有無など車両前方の状況に応じて、ヘッドランプのハイビームとロービームを自動で切り替え、夜間走行時の視認性を向上させる。検知にはアイサイト のステレオカメラを用いる。ライティングスイッチの操作負荷低減やハイビームの消し忘れの防止、さらにアイサイトの認識性能の向上などの効果がある（図111）。

12.　あとがき

開発を始めて最初の課題は「初代BRZを超えることはできるのか？」だった。それだけ初代BRZはパワーユニット・パッケージ・性能の全てが高次元でバランスしており、検討を開始し一つの設定を変えると周辺含めた設定が成立しなくなり、初代BRZの完成度の高さを実感した。

図 111　ハイビームアシストの動作（ロー）イメージ

開発メンバー全員がそれを打破し初代BRZを超えるべく、過去の知見を取り込みつつも前例に捕らわれることなく挑戦し続け進化を成し遂げたのが新型BRZである。

お客様の笑顔を思い描きながらBRZというクルマが大好きなメンバーが造ったクルマであるが、振り返ると、試作車ができた時、走行評価をして車を降りてきた時、様々な場面で車両の説明をする時、各場面で全員が笑顔だったことが著者の印象に残っている。

最後に、開発に際しご協力頂いたトヨタ自動車様、サプライヤー様と全ての関係者に、プロジェクトメンバー一同深く感謝し、厚く御礼申し上げます。

【著　者】

SUBARU BRZ開発プロジェクトチーム

[商品企画本部]	井上　正彦
	関井　　誠
	原田　博幸
	宮嶋 優美子
[ボディ設計部]	植木　敏行
	大西　将弘
[内外装設計部]	山下　大輔
	鈴木　智明
[ADAS開発部]	大郷　道夫
[車両開発統括部]	藤井　忠則
	梶川　丈喜

新型 BRZ スポーツシートの開発

Development of the New BRZ Sports Seat

尾野寺 晃 秀[*1] ONODERA Akihide
田 中 明 子[*1] TANAKA Akiko
朝 倉 孝 幸[*1] ASAKURA Takayuki
笹 野 晃 弘[*2] SASANO Akihiro

抄 録

新型BRZのシートは、スポーツ走行時に身体をしっかり支える「ホールド性」をさらなる向上させつつ、シートフレームの軽量化を目指して新規開発した。

「ホールド性」向上のためにシートクッションの支持構造であるフォームドワイヤを従来の平面的な形状から立体的な形状へ変更し、シートバックボルスター部とメイン部を部分分離構造とすることで、たわみ特性を見直した。軽量化では、SUBARUのシートフレームでは初のレーザー溶接やテーラードブランクを採用し軽量化を行った。

Abstract

New BRZ sports seat is developed for seat frame weight reduction while enhancing the “hold characteristics” that supports a body well when driving the new BRZ in sports mode.

To improve the “hold characteristics,” the support structure of the seat cushion, formed wire, was changed from conventional plane shape to three-dimensional configuration. Also, deflection characteristics were calibrated by separating the seat back bolster portion and the main portion. We also adopted laser welding and tailored blank for the seat frame weight reduction. This was a first attempt as SUBARU for the seat frame.

1. まえがき

新型BRZは、先代モデルで培ってきたBRZの価値を「継承と進化」をキーワードに開発された。運転の愉しさを提供するうえで重要な部品であるフロントシートは、上述のキーワードに沿って、運転時の楽しさを継承するため、シートの座り心地のうち、特にサポート性を向上した。さらに、座り心地性能を向上させつつ、スポーツ車として車両運動性能に寄与できるよう軽量化をした。

本報では、フロントシートの座り心地性能向上と軽量化の達成状況について報告する。

＊1 内外装設計部
＊2 車両安全開発部

2. シート座り心地性能

2.1 シート性能

SUBARUのシート開発では、お客様に座り心地・使い勝手・品質などを提供する「機能価値」とお客様の情動に訴える「情緒価値」の両立を目指している(1)。「機能価値」に含まれる座り心地は、長時間着座時の「快適性」、シートに体が保持される「サポート性」から構成される。さらに、サポート性は、ドライバーの身体が包み込まれていると感じるフィット感と、コーナリング時など左右に体が振られる場面でも運転姿勢が保持できるホールド感から構成される(**図1**)。

新型BRZに搭載されるスポーツシートは、後者のサポート性の性能向上が不可欠と捉え、座り心地性能のうち、快適性性能は先代モデルを維持しつつ、サポート性能を向上させた。

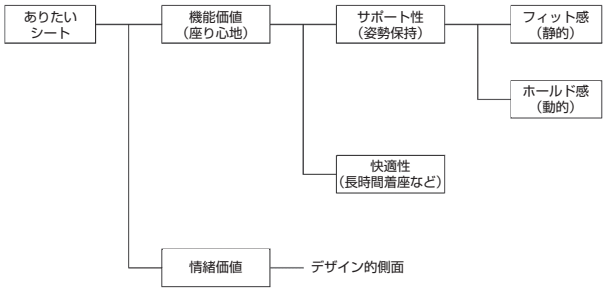


図１　シート座り心地開発の狙い（抜粋）

2.2　スポーツシート開発の目標設定と達成手段

車両の運動性能向上に伴い、フロントシートのサポート性は、欧州スポーツ車並みの性能を目指した。参考としてサポート性の評価の高い欧州スポーツ車の静的体圧分布（図2、フィット性代用）、横G負荷時の動的体圧分布（図3、ホールド性代用）を計測した。

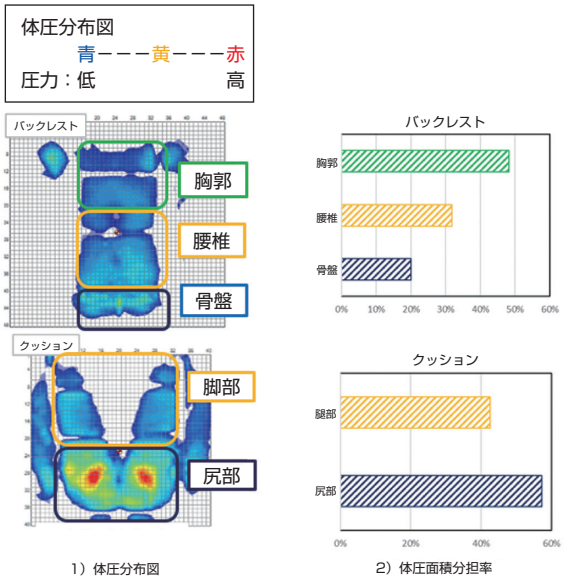


図２　欧州スポーツ車の体圧分布（静的）

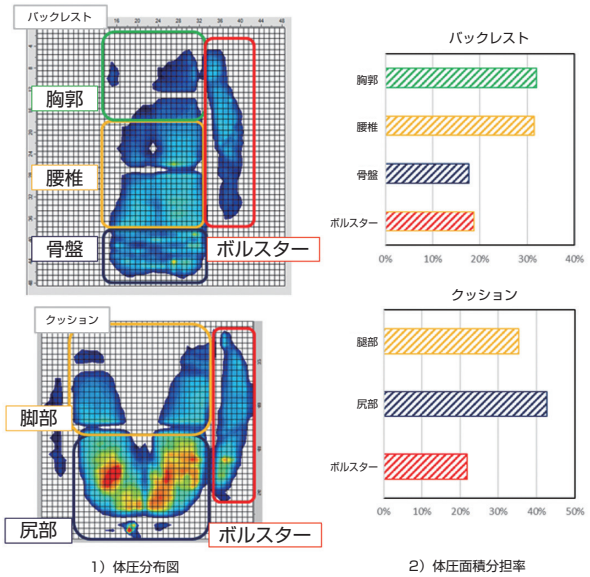


図３　欧州スポーツ車の横Ｇ負荷時の体圧分布（動的）

図2に示した1）体圧分布図を視察すると、サポート性の一要素である、フィット感の良いシートは、体圧が、腰部から脇下部を含む背面上部まで分散して分布し、局所あたりがない、シートクッション部の体圧も、尻下から腿にかけて分散して分布していることが判明した。2）に示したシートバック部を胸部・腰部・骨盤部、シートクッション部を脚部・尻部に分けた体圧分担率は、シートバック部で、胸部：腰部：骨盤部比は5：3：2、シートクッション部で脚部：尻部比が4：6となっている。

ホールド感は、図3に示す動的ホールド性のうち、1）に示す体圧分布図中シートバック部は、図2. 1）の静的体圧分布図と同様に局所当たりが発生していないことが視認できる。図3. 2）体圧面積分担率は、胸部・腰部・骨盤部に加えてボルスター部が追加されるが、静的な状態から動的な状態に遷移すると、ボルスター部への支持面積が20%増加し、特にシートバック部は荷重方向に胸部の体圧移動を、ボルスター部で受けている。これらのことを踏まえて新型BRZのシート性能の目標を以下に設定した。

・静的
　バックレスト体圧面積分担率
　胸部：腰部：骨盤部＝5±0.5：3±0.5：2±0.5
　クッション体圧面積分担率
　脚部：尻部＝4：6
・動的
　バックレスト体圧面積分担率
　胸部：腰部：骨盤部：ボルスター部
　＝3：3：2：2
　クッション体圧面積分担率
　脚部：尻部：ボルスター部
　＝3.5：4.5：2

＋ 頭部を含む上体
　体幹部移動量
　5 deg以下

さらに、シート座り心地の快適性にも関連する、シートクッション、バックレストのパッド硬度･硬さ、シート面の剛性感は、表層から中層までがたわみ感、それより深い層（深層）をしっかり感として捉え、たわみ感は、98 N負荷時の静荷重、しっかり感は245 N負荷時の静荷重でともに目標値に対する公差を3 mm以内に設定した（図4）。

これらの性能要件を満足させるため、①新規サスペンションマットを採用し、②シートバックのメイン部とボルスター部の分離構造化、③シートクッション部のパッド下に設置のフォームドワイヤの立体化を採用した。

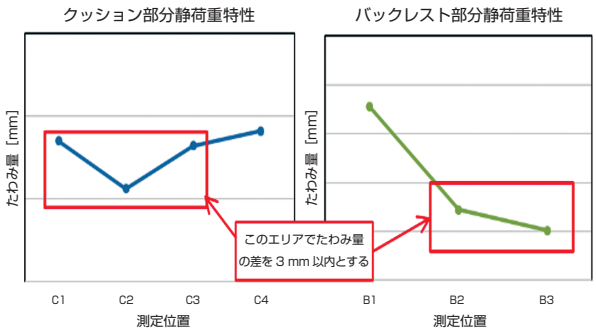


図 4　部分静荷重の設定

2.3　スポーツシートとしての妥当性確認

サポート性のうち、フィット感に関連する静的体圧を確認した(図5)。図5中 1) 体圧分布図からは、局所当たりが発生していないことが視認できる。同 2) 体圧面積分担率より、胸部：腰部：骨盤部の比が、5 ± 0.5 : 3 ± 0.5 : 2 ± 0.5 以内に入っていることを確認した。また、ホールド感に関連する横G負荷時の体圧分布からも局所当たりがなく、体圧面積分担率も目標を達成していることを確認した(図6)。頭部を含む上体体幹移動量も 4 deg であり狙い通りできていることを確認した。

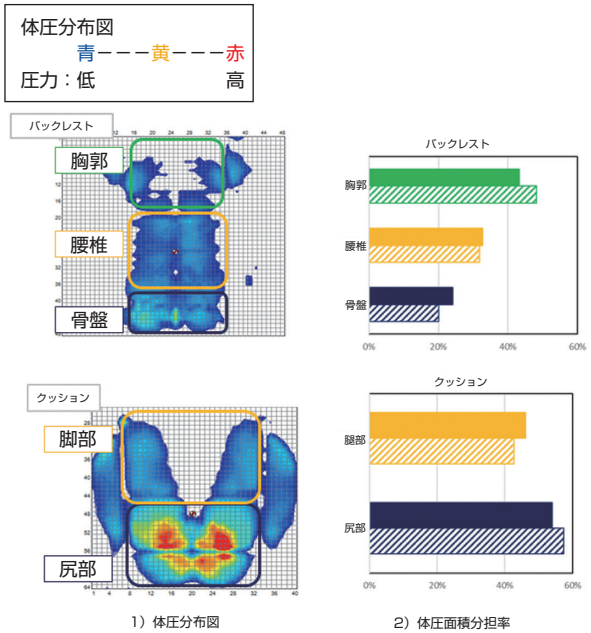


図 5　新型 BRZ の体圧分布 (静的)

数値目標が達成されているフロントシートを用いて、専門パネラーによる官能評価を SUBARU テストコースで実施し、先代モデル比で、姿勢保持に係るサポート性の評点が向上し、欧州スポーツ車並みとなっていることを確認した。さらに、北米一般道で長時間走行での快適性も先代モデル同等以上となっていることも確認した。

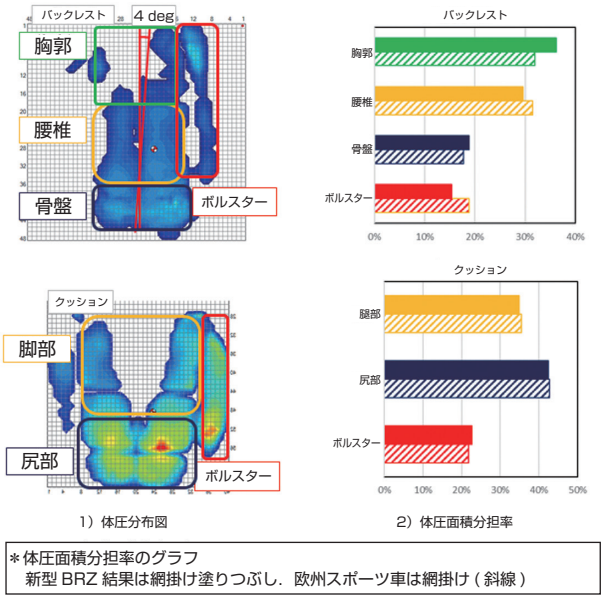


図 6　新型 BRZ の横 G 負荷の体圧分布 (動的)

3.　シートフレーム開発

3.1　シートフレーム軽量化

自動車用シートは多様な機能を有し、様々な外力に対する強度、剛性が必要とされる。一方、スポーツシートには車両の運動性能に寄与する軽量化が求められる。そこで、新型 BRZ のシートフレームでは、低入熱アーク溶接、レーザー溶接、テーラードブランクを採用することで薄肉化し(図7)、必要な強度、剛性の確保と先代モデル比で 3.1 kg の軽量化を両立させた。

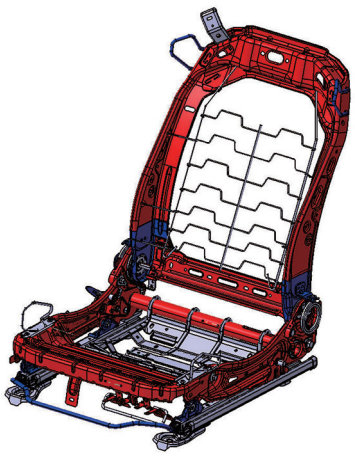


図 7　先代モデルから薄肉化した部品 (赤色)

3.1.1　シートフレーム加工方法

従来のシートフレームでは、溶接による鋼材の溶け落ちが薄肉化の課題であった。そこで低入熱アーク溶接を採用し、溶接時の入熱量を減らすことで、課題を克服。CAE にて各構成部品への入力荷重を算出し、必要十分の板厚とした。 同時に、連続溶接が可能なレーザー溶接の採用により、部品同士を複数の平面部

で一体化した。これにより、バックフレーム全体に入力を分散できることが見込め、薄肉化と補強部品の省略による軽量化を実現した(図8)。

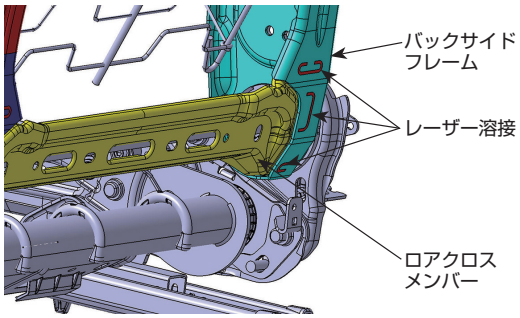


図８　バックサイドフレーム接合部

バックサイドフレームは、レーザー溶接で接合したテーラードブランクを採用し、リクライナー取り付け部以外を薄肉化したことで軽量化を実現した(図9)。

スライドレールは、部品の接合に、溶接歪の少ないレーザー溶接を採用し締結部品を削減。350 gの軽量化を実現した(図10)。

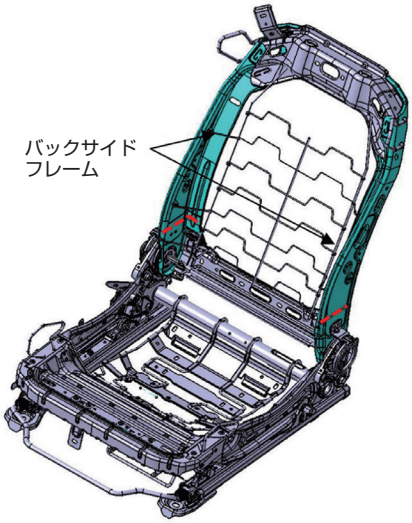


図９　テーラードブランク使用部位

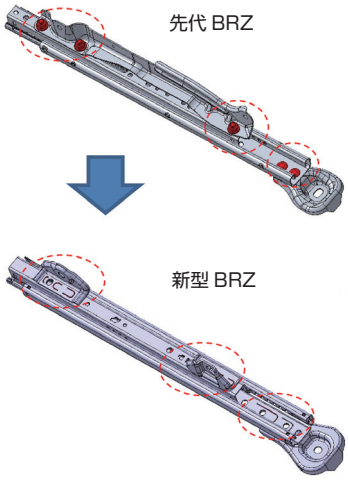


図 10　スライドレールの接合部比較

4.　あとがき

新型BRZに相応しいスポーツシートを実現させるため、SUBARU初採用となるアイテムや製造手法などに取り組み、開発に挑戦した結果、お客様に選んでいただける魅力ある商品を実現できた。

本開発を通じて得ることが出来たノウハウは、今後の車種に活かし、さらなる魅力ある商品の開発に取り組んで行きたい。

最後に多大なご協力をいただいたシートサプライヤ、関連部署の方々に深く感謝申し上げます。

参考文献

(1) 井戸ほか：新型レヴォーグ スポーティシートの開発
SUBARU Technical Review 47 (2020) P.41-46

【著　者】

尾野寺 晃秀

田中　明子

朝倉　孝幸

笹野　晃弘

新型 BRZ の車体開発

Body Development for New BRZ

安田政宜[*1] YASUDA Masayoshi
島田良輔[*2] SHIMADA Ryosuke
四戸孝治[*1] SHINOHE Kouji
竹内謙斗[*1] TAKEUCHI Kento
植木敏行[*1] UEKI Toshiyuki

抄　録

新型BRZは当社で唯一のFRスポーツカーであり「安心と愉しさ」を表現するにあたり具体性の高い車両である。今回2世代目となる共同開発車両である。さらなる安全性能、操安性能、動的質感を高めるためにスバルグローバルプラットフォーム（以下SGP）の技術知見や新技術を投入した。本稿では新型BRZで採用したその技術とその概要について紹介する。

Abstract

The new BRZ is our only FR sports car. It embodies the concept of “Enjoyment and Peace of Mind” and is a second-generation co-developed car. The new technologies of SUBARU Global Platform (SGP) are utilized for improving safety performance, driving stability, and dynamic feel. This report introduces the technological overview of the new BRZ.

1.　開発の狙い

新型BRZでは安全性能の向上、車体操安剛性の向上を開発目標としたがスポーツカーの運動性能で重要な要素である車両重量、重心高、前後重量配分について考慮しなければならない制約がある。現行車のプラットフォームの踏襲を前提でこれらの解を導き出すことを命題として開発を開始した。特に安全性能については、世界TOPレベルの性能目標とした。また現行車に対して動的質感の向上も目標性能に付加した。競技で使用されることが多い車両であるが日常での使用で所有者の満足感を促し安心と愉しさを具現化させることを狙いとした。

2.　プラットフォーム仕様

2.1　プラットフォーム共用率

現行車の超低重心パッケージをつきつめた専用フレームワークは継承し、走り・安全をさらに進化させるため車体プラットフォームの60%を新製した（図1）。

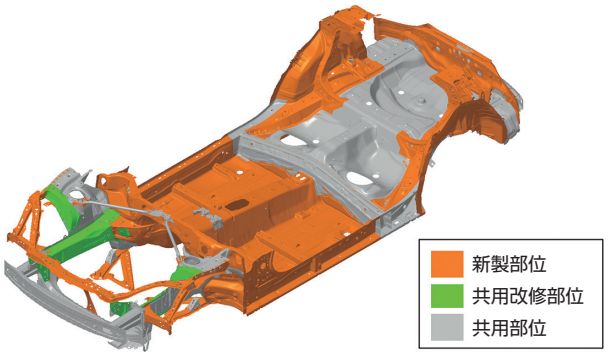


図1　プラットフォーム新製／共用部位

2.2　高張力鋼板の適用拡大

衝突時のキャビンの変形を抑え、乗員の生存空間を確保すべく、高張力鋼板を活用し衝突性能の向上と軽量化を両立させた。カテゴリートップの衝突性能を達成するためSGP同様、キャビン下のメインフレームにホットスタンプ材を採用し、サイドシルインナへもホットスタンプ材の採用を拡大した。現行車は軟鋼板であったフロントフロア、トーボードにも新型車は高張力鋼板を採用し、効率よくキャビンの変形を抑制している（図2）。

＊1 ボディ設計部
＊2 SUBARU RESEARCH AND DEVELOPMENT, Inc. Body Field Analysis Department

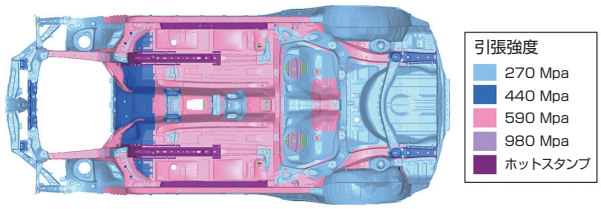


図２　床下高張力鋼板採用部位

3.　衝突安全

3.1　前面衝突

IIHS TOP SAFETY PICKレベルの衝突性能獲得とリアルワールドでの安全性向上を目的とし、SUBARU初であるフロントピラーでの衝撃吸収構造とした。これは、スモールオーバーラップなどに代表される微小ラップ衝突時に、バリアからの入力を前方に拡大したフロントピラーの内部に設けたリンフォースを圧壊させる事でエネルギー吸収を大きく向上した構造である(図3)。FR駆動のアクスルシャフトレイアウトから生まれるタイヤとキャビンの間の空間を効果的に利用することで本構造を実現した。

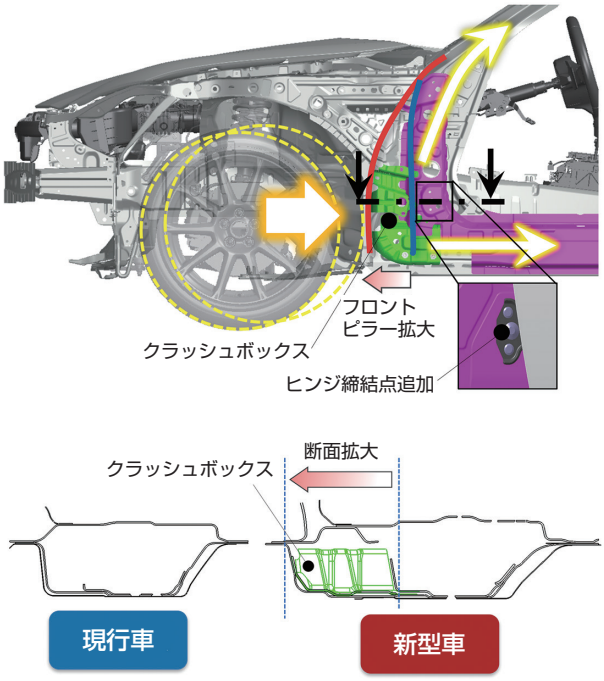


図３　フロントピラー構造

また、サイドシルインナを代表とする反力支持部にはホットスタンプ材を採用し、キャビンの変形を抑制している。ドアのロアヒンジは、締結点を追加し3点締結とすることで、車体との結合を強化し衝突時のドア開放を抑制している。以上により、スポーツカーでありながら世界トップクラスの安全性能とあらゆる前面衝突形態に対する安全性を実現している。

3.2　側面衝突

最新のNCAPに対応するため、キャビンとドアの骨格部材に高張力鋼板を集中配置し、質量増加を抑制している。パッチワーク・ホットスタンプ工法をセンターピラーアウタ、フロントピラー、サイドレール、サイドシルインナ、ドアリンフォースに採用した。

特にセンターピラーでは、テーラードブランク工法も組み合わせ、1つの部品の上下で異なる材質とした。直近開発車に対して大幅に薄板材としたため、材料加熱から型搬送までの間に材料の冷却が進んでしまい焼入れ硬化が不足する課題があり、マンガンの配合比率を高めた材料を新規開発し焼入れ性を向上。SUBARUで初めて採用している。センターピラーインナにもテーラードブランク工法を採用し、上部は高強度部材で変形を抑制し乗員の生存空間・エアバック展開スペースを確保。下部は積極的に断面をつぶすことで衝突エネルギーの吸収と車体変形モードの安定化をはたしている。また、ホットスタンプ工法のサイドレールを後端まで一体化し、高張力鋼板を採用したリヤレールへの荷重伝達を向上させ、後席乗員の生存空間を確保した(図4)。

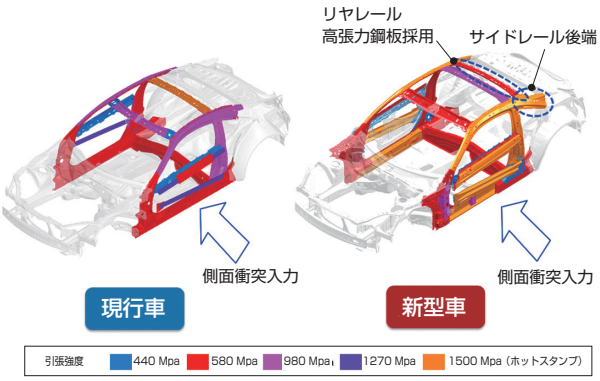


図４　側突骨格構造

サイドドアでは、SUBARU初採用となるホットスタンプ工法のドアリンフォースは、ロアにパッチワーク・ホットスタンプ工法を採用し、骨格耐力を現行車から最大で60%向上させた。現行車の閉断面から開断面にすることで、ポール衝突時に骨格部材がつぶれ残ることによる乗員への攻撃性を抑制している。アッパは、骨格剛性の確保のため閉断面としたが、車両室外側をホットスタンプ、室内側を冷間高張力鋼板材と外内で強度差を設け、衝突時に断面を変形させることでつぶれ残り量を減少させ、ロア同様に乗員への攻撃性を抑制した(図5)。

また、現行車はロール工法のため曲率一定の制約があったが、新型車はプレス工法にすることで、曲率の制約が無くなり意匠自由度を向上している。

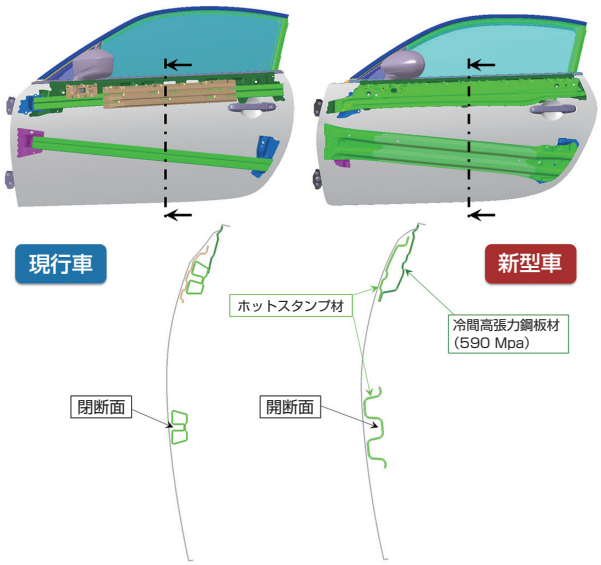


図５　サイドドア構造

3.3　高張力鋼板適用割合

衝突性能の向上と軽量化の両立のために採用した高張力鋼板の適用割合は、現行車の46%から55%へ高まった。ホットスタンプの採用比率は他のSUBARU車比で、過去最高となっている(図6、7)。

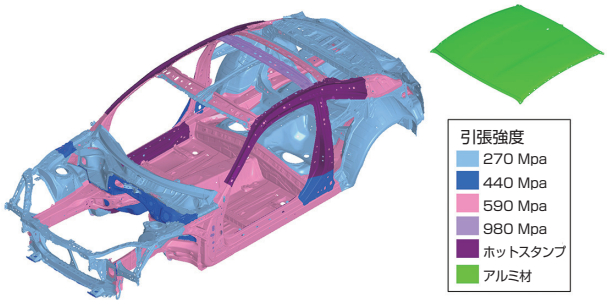


図６　高張力鋼板採用部位

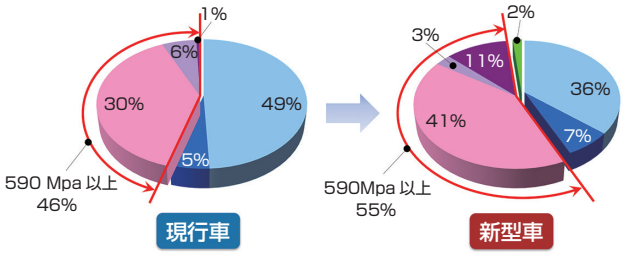


図７　高張力鋼板適用割合

4.　操安・乗り心地

新型BRZでは大幅に向上したエンジン出力とハイグリップタイヤの性能を余すことなく発揮するため、現行車に対し、車体ねじり剛性を約50%、フロントストラクチャー横曲げ剛性を約60%向上させた。

4.1　インナーフレーム構造

主要骨格の結合および連続性の強化による車体剛性の向上を目的として、新型車ではインナーフレーム構造を採用した。

リヤバルクヘッド、リヤホイールエプロンといったアッパーボディ骨格をプラットフォーム骨格へ移設することで、スポット作業穴などの制約を必要とすることなく溶接可能になり、結合点数も増やすことで、プラットフォームとアッパーボディの結合を大幅に強化することが可能となった(図8)。

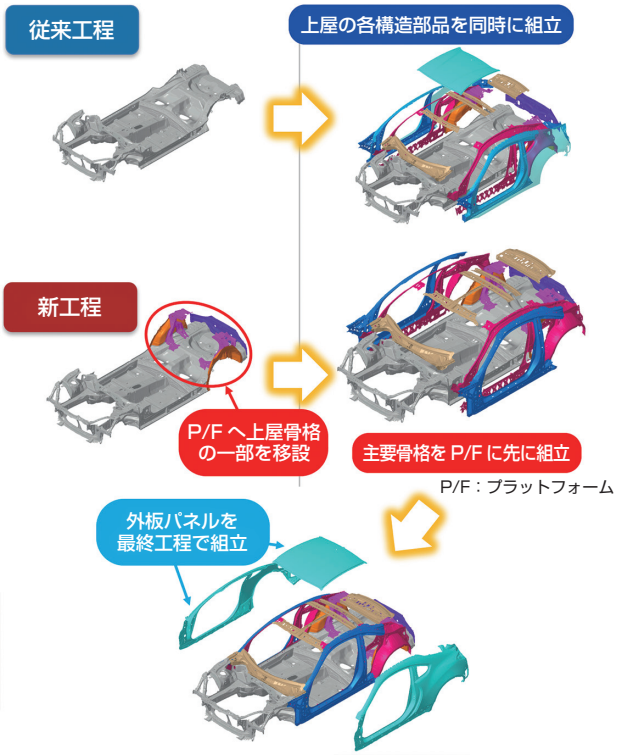


図８　インナーフレーム構造

また、外板パネルを最終工程で組み立てることで、アッパーボディ骨格では、サイドシルアウタからサイドレールアウタにかけて骨格を連続してつなぐことが可能になり(図9)、ボディのインナ側、アウタ側共に、ボディ全体の骨格連続性が向上している。

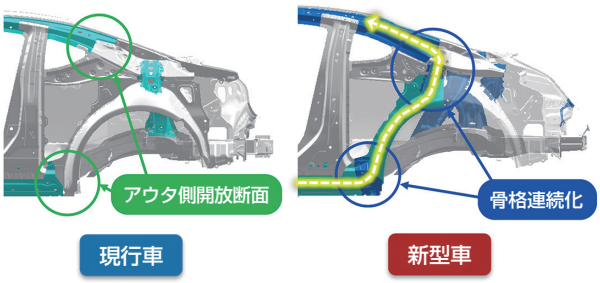


図９　アッパーボディ後方の骨格連続性

4.2　リヤボディ骨格構造

旋回時のトラクション性能向上を目的にインナーフレーム構造を採用すると共に、車体後方部の骨格を大きく見直した。アンダーボディとアッパーボディの結合部で局所的な変形を抑制するため、リヤクロスメンバとリヤバルクヘッドをつなぐ骨格を追加し閉断面骨格で結合した。スポット溶接にて強固に結合することで軽量かつ効率的に荷重伝達できる構造とした(図10)。

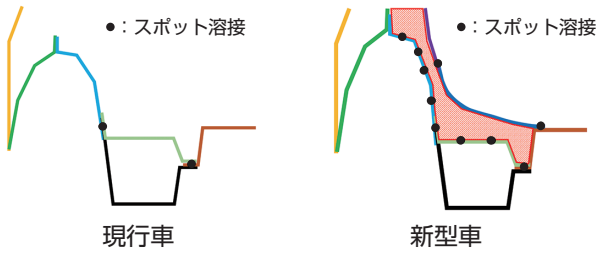


図 10　リヤボディ骨格結合構造

また、リヤバルクヘッド骨格コーナー部の骨格通しをスムーズになるよう部品の構成を見直したことで、現行車に対し骨格連続性が大きく向上し、車体変形の抑制に大きく寄与している(図11)。

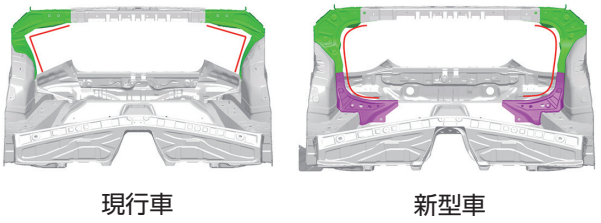


図 11　リヤバルクヘッド構造

トランク開口部にて変形が顕著であるコーナー上部では変形を抑制するため、リヤホイールエプロンの後方に新規骨格を設定した。リヤパネル後方の骨格と結合することで開口部の倒れ変形を抑え、ねじり剛性を向上している(図12)。

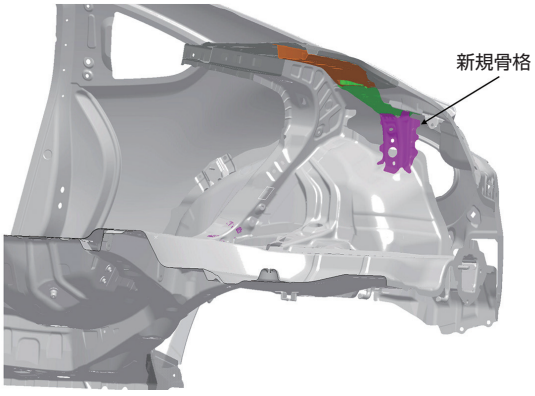


図 12　トランク開口部補剛構造

また、リヤスカートインナを車両側方方向に現行比で33%拡大するとともに、板継部を延長することで、リヤフレーム～スカートインナ間の面外変形及びコーナー部の変形を抑制した(図13)。

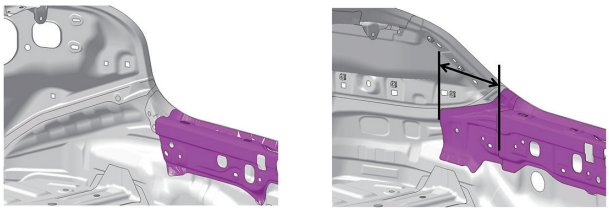


図 13　リヤスカート補剛構造

4.3　構造用接着材

現行車に対し構造用接着材を新たに採用した。アンダーボディ、リヤクォーターまわりのスポット溶接しているフランジ面へ構造用接着材を約16 m塗布した。スポット溶接間の板同士の結合を強化することでボディの微小な変形を抑え、走行時の不快な振動の抑制と操舵応答性の向上を実現させている(図14)。

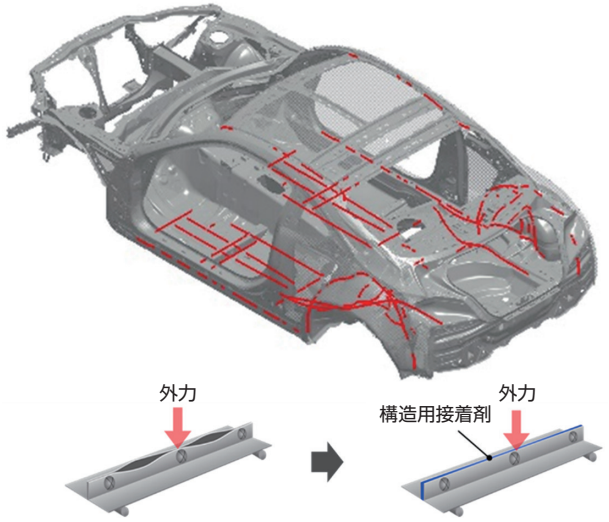


図 14　構造用接着材塗布部位

4.4　サスペンションクロスメンバ／サブフレーム締結構造の強化

高い操縦安定性を狙いレガシィと同様にサスペンションクロスメンバの締結構造を見直した。締結部のウェルドナット溶接工法をプロジェクション溶接からスポット溶接に変更し、締結部の応力集中を均一化することで、サスペンションと車体との結合力を向上させた(図15)。それによりステアリング操舵に対する車両応答性の不感帯が減少している。

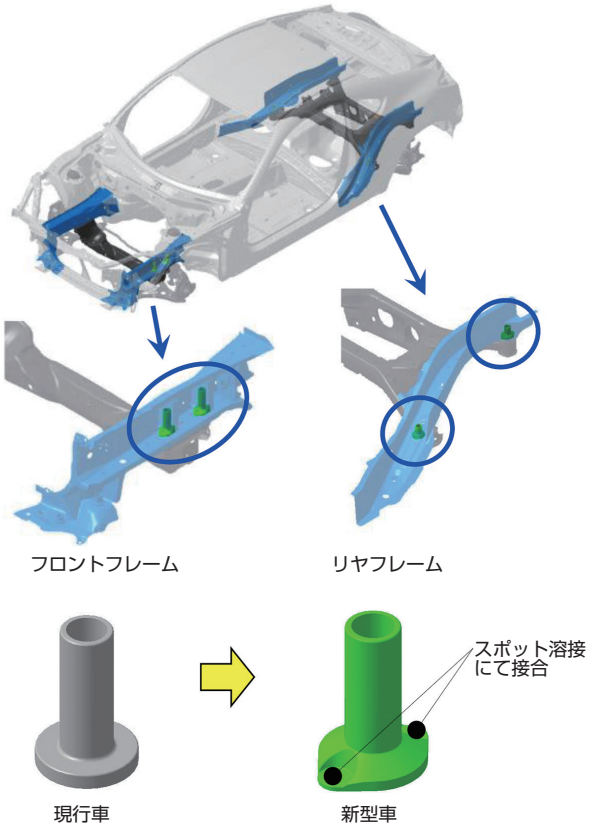


図 15　サスペンションクロスメンバ締結構造

4.5　ダイアゴナルメンバー

フロントの応答性向上を目的にサスペンションクロスメンバとトルクボックスをつなぐダイアゴナルメンバーを設定した。タイヤ接地面からの入力に対し、荷重を補剛部材経由でトルクボックスに分散させることでフロントフレーム付け根の変形を抑制している。トルクボックスに分散させた荷重を効率よくサイドシルに伝達するためトルクボックスの補剛を実施した(図16)。

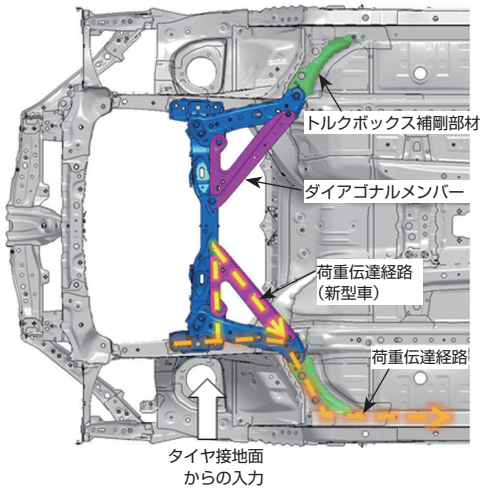


図 16　床下補剛構造

5.　軽量化・重量配分

部品のアルミ材化

車両の低重心と軽量化を狙いルーフとフェンダーにアルミ材を適用した。フェンダーについては新型フォレスター以降の開発車で採用済であるがルーフについてはSUBARU初採用である。双方ともにデント性能に有利な#6000系のアルミ材を採用した。

5.1　アルミフェンダーの開発

アルミ材(フェンダーパネル)と鉄(車体)の異種金属締結部では自然電位差による電食防止が必要となる。対処としては水分、塩分が入らないように接触面をシールドする方法と接触面を電気的に絶縁する方法がある。今回は後者を選択した。

車体との締結部(図17)に樹脂で表面処理をしたナットサートリベットを挿入し同じく樹脂で表面処理をしたボルトで締結する構造とした(図18)。これにより鉄とアルミの材料間に樹脂が介在し電位差の発生を無くすことが可能となった。

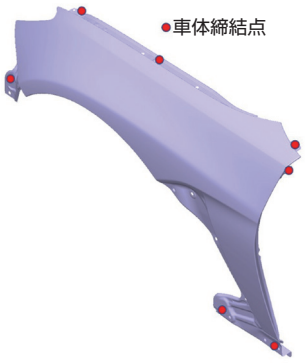


図 17　フェンダー車体締結点

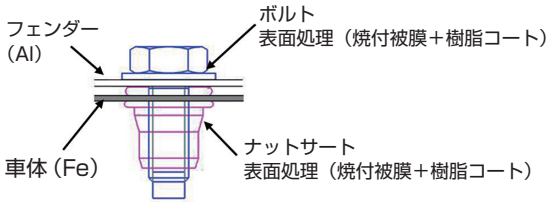


図 18　フェンダー締結構造

5.2　アルミルーフの開発

塗装や搭載精度の品質を考慮し、異種金属結合にてボディ工程での搭載方法を採用した。このハイブリットボディの工法は難題があり他銘の過去の実績も少ない。この問題と対処法を以下に解説する。

結合方法：

異種金属の溶接技術は確立していないため別の手段で結合を行った。主はリベット系の結合を採用したがその種類によってメリット、デメリットがあり部位や用途、生産性により数種類を使い分けた(図19)。

1. ブラインドリベット：高強度材にも適用可能(図21)、止水構造(図23)が必要となる。
2. トグルカシメ：締結上部が平面となる。締結強度の管理が難しい(図20)。
3. SPR（セルフピアスリベット）：締結上部が平面となる。締結強度が強い。高強度材に使用不可(図22)。
4. ネジ締結：締結信頼性がある。止水構造が必要。生産性が悪い。
5. 構造用接着材：適用が容易。歪を誘発する。

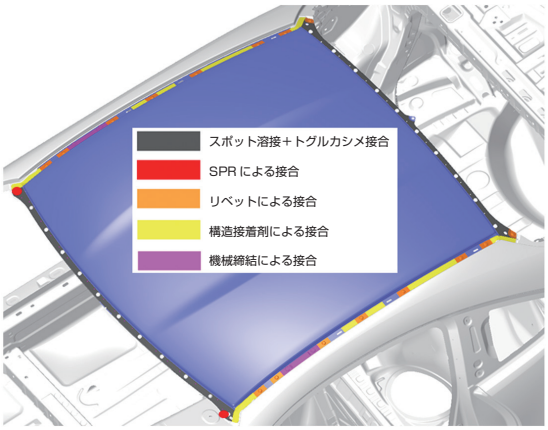


図 19　アルミルーフ構造

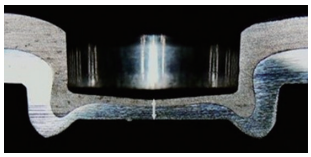


図 20　トグルカシメ

図 21　ブラインドリベット

図 22　セルフピアスリベット

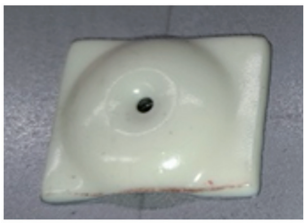


図 23　メルトシール

熱歪：

鉄とアルミ材の異種金属結合で出来たボディはその熱膨張率の違いから塗装乾燥炉の雰囲気温度でアルミ素材の材料が多く変形をする(図24)。おおよそは弾性変形だが、剛性が弱い部位は塑性変形に達する場合があり、それが意匠面に現れ歪として検出される(図25)。対応としては熱歪シミュレーションCAEを用いて意匠の変更、締結位置、板厚選定、応力の逃がしの設定(艤装締結)などで歪抑止する解を導いた。

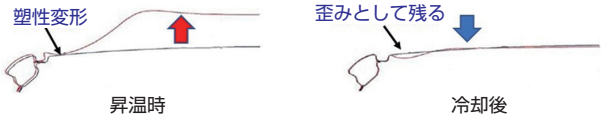


図 24　熱歪変形模式図

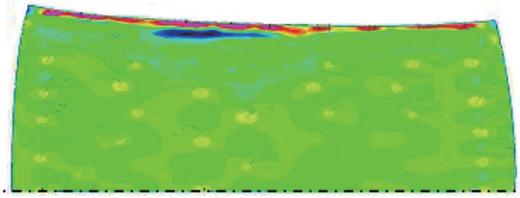


図 25　熱歪分布

熱変形：

上記の熱歪とは異なる現象で熱炉での膨張による弾性変形中に熱硬化型の接着材が硬化を開始し熱が冷めても復元しない現象(図26)であり、意匠曲率が再現しない。変位の大きな場所から接着材を排除することで対処した。

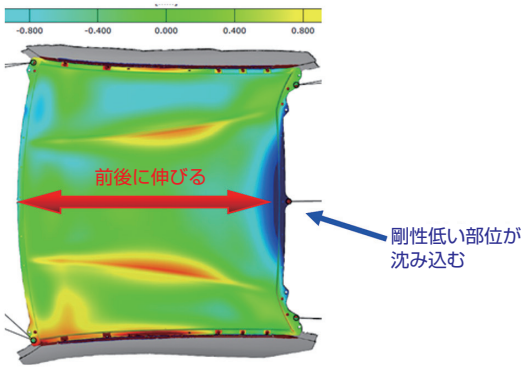


図 26　焼き付け後の面精度分布

ペイントシーラー剥がれ：

熱炉でのアルミパネルの動きが多いことからルーフ外周に塗布しているペイントシーラーが割れる現象が起こる。拘束していない部位での発生のためルーフパネルの端末形状にて剛性を上げパネルの移動を減少させ且つシーラーの体積を増加させ伸び率を確保することによってシーラーの剥がれを防止した(図27)。

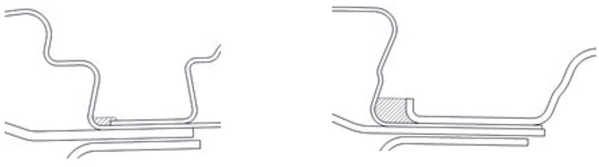
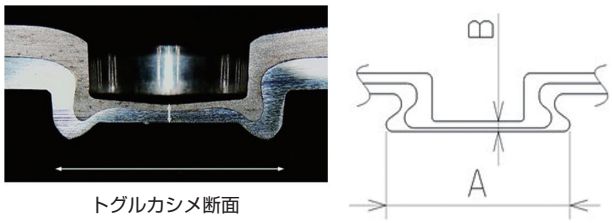


図 27　ルーフパネル端末形状

締結品質：

カシメやリベット類の締結強度の品質保証のため非分解による管理方法を定義した(図28 A、B寸法)。



トグルカシメ断面

図 28　カシメ管理方法

市場補修：

分解交換補修が必要となった場合、市場での設備で補修が可能なように一部補修専用部品を準備した(図29)。ガラス接着面に凹凸無く打つことが可能な皿型のリベットを用意した。工場でのアルミのスポット溶接部の代替となる。

図 29　補修専用　皿型ブラインドリベット

6.　実用

スポーツカーでありながら十分な実用性も兼ね備えていることが、初代BRZが長くお客様に愛されている理由のひとつと考える。新型の開発においては、クロージャーの操作フィーリングを進化させる改良を行った。

6.1　トランク操作性

トランクヒンジのジオメトリとガスダンパ反力を最適化し、急開き感のない自然なトランク開閉スピードを実現した。また、ガスダンパの反力設定の最適化と大型ストッパーの設定および調整式ストッパーを採用することで、トランク閉速度の低減と、軽い操作感を実現し、あわせてトランク建付品質を向上させた(図30、31)。

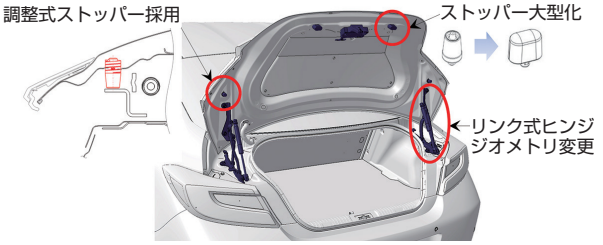


図 30　トランク構造

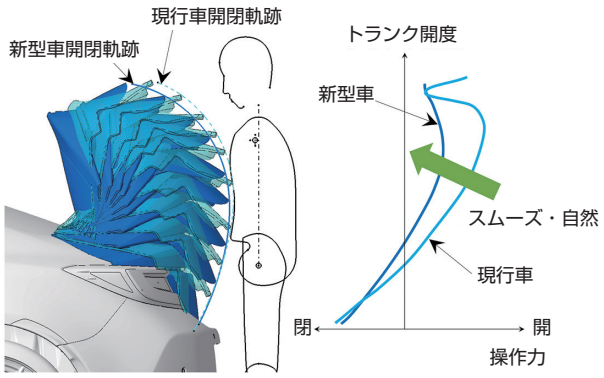


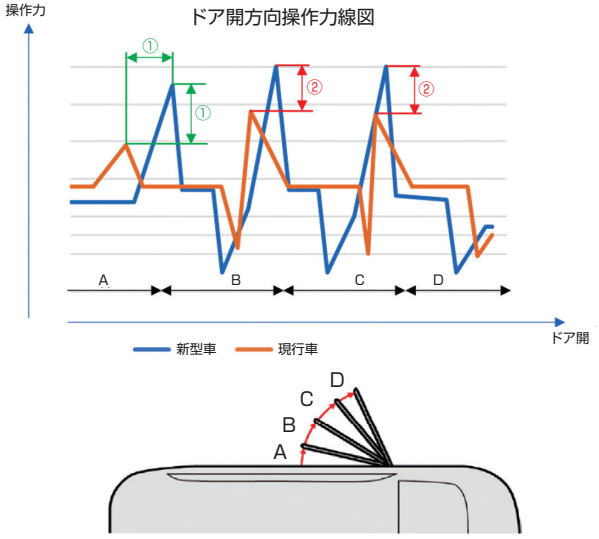
図 31　トランク開閉軌跡と操作力

6.2　ドア操作性

ドアを開け閉めする際の途中停止時の保持性を向上させて、お客様の使い勝手を向上させた。具体的にはドアチェッカーの形状を見直すことで、以下①、②を実現した(図32)。

①開き始めの1つ目の停止位置と操作力を見直し、操作時の節度感を向上させ、操作フィーリングを向上させた。

②坂道や風の強い日などでもお客様の意図した通りに操作できるように、各途中停止の保持力を適正化した。



ドア開閉略図（車両を上から見た図）

図 32　ドア開方向操作力

7.　まとめ

命題であった諸性能の向上と重量バランス、軽量化の両立解をSGPアイテムの投入によるプラットフォームの発展、インナーフレーム構造化、アルミへの材料置換技術の手法により導くことができた。スポーツカーだからこそ愉しくさらに安全であることを示せる車体に仕上がったと考える。

今回、開発に携わった社内外の多くの方の協力の上で商品化することができた。紙面を借りて御礼申し上げる。

参考文献

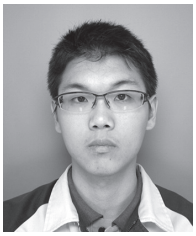
(1) 青田裕之ほか：新型レガシィ／アウトバック動的質感向上ボディの開発, SUBARU技報, No.46, 2019
(2) 矢代佑樹ほか：新型フォレスターのアルミフェンダー開発, SUBARU技報, No.45, 2018

【著　者】

安田　政宜

島田　良輔

四戸　孝治


竹内　謙斗

植木　敏行

SUBARU 新型「レヴォーグ」を発表

～高度運転支援システム「アイサイトX」搭載グレード構成比が先行予約台数の９割超え～

2020年10月15日

新型「レヴォーグ」を10月15日に発表しました。
新型「レヴォーグ」は、SUBARUに脈々と受け継がれる「より遠くまで、より早く、より快適に、より安全に」というグランドツーリングのDNAを継承。そのうえで、SUBARUの最新技術を結集し、「先進安全」、「スポーティ」、「ワゴン価値」の３つの価値を革新的に進化させたパフォーマンスワゴンです。

新型レヴォーグ「GT-H EX」エクステリア

新型レヴォーグ「GT-H-EX」インテリア

新型 BRZ 向け 2.4L 水平対向エンジンの紹介

Development of Horizontally Opposed 2.4L NA Engine for New SUBARU BRZ

京 徳 信 夫[*1] KYOTOKU Nobuo
永 洞 真 康[*1] NAGADO Masayasu
最 首 陽 平[*2] SAISYU Yohei
仙 波 正 隆[*2] SENBA Masataka
長 田 健 志[*3] NAGATA Kenji
梶 川 丈 喜[*4] KAJIKAWA Tomoki

抄 録

低重心・高バランスといった水平対向エンジンの素性の良さを活かし、高回転・高出力・環境性能を高次元で両立する自然吸気2.4Lエンジンを開発した。

本体構造および主運動系、動弁系部品など強度・剛性バランスを追求し、排気量拡大にもかかわらずエンジン重量の軽量化を果たした。燃料システムにはD-4S※システムを採用し、現行から各種エンジン制御を見直し、環境性能と高出力を両立させた。これらにより、『回したくなる吹けの良いエンジン』を実現。また従来型と同様に4-2-1排気系をコンパクトに納め、エンジン上部の補機類にも拘りエンジン全高を縮小、低重心の素性の良さを継承し、歩行者保護性能を満たしつつスポーツカーらしいデザインに貢献した。

※D-4S：Direct injection 4 stroke gasoline engine Superior version。D-4Sはトヨタ自動車株式会社の登録商標。

Abstract

The all-new FA24 engine was developed exclusively to be fitted in the 22MY Subaru BRZ. The basic construction comes from FA20, a former unit developed for the 13MY BRZ. To achieve both high horsepower and environmental friendliness, and also meet the vehicle concept "Mastering sports cars", the engine adopted technical changes such as bigger crankshaft pins, lighter crank pulley, sophisticated connecting rod with improved material strength, light weight pistons, and also Toyota's D-4S* system.

※D-4S : Direct injection 4 stroke gasoline engine Superior version. D-4S is registered trademarks of Toyota Motor Corporation.

1. まえがき

SUBARUの商品軸のひとつであるスポーツカーの商品力の一端を担うパワーユニットとして、市場で好評を頂いた現行『BRZ』に対するお客様の声をもとに新型のパワーユニットのあるべき姿を検討。『低重心・高回転』の特長を継承し、自然吸気エンジンの排気量拡大によるさらなる高出力化を決心。

エンジン開発技術を投入し、高い信頼性と商品力に直結する性能を具現化した。

本報では新型『BRZ』の象徴ともいえるFA24型水平対向エンジンを紹介する。

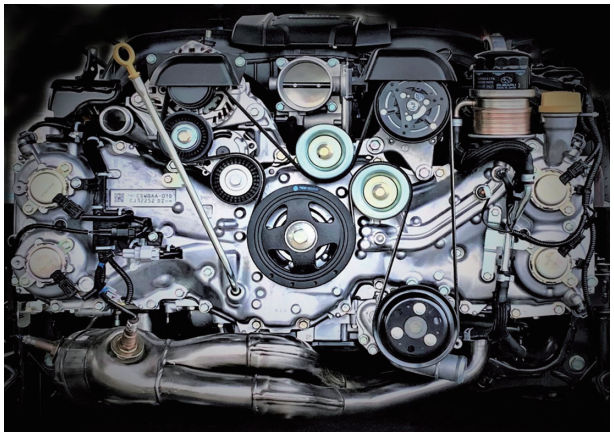


図 1　新型 BRZ 向け 2.4L 水平対向エンジン

＊1 パワートレイン設計部
＊2 車両環境開発部
＊3 車両運動開発部
＊4 車両開発統括部

2.　基本諸元

エンジン諸元を表1に示す。

表 1　エンジン基本諸元

		新型 BRZ FA24 (2.4L D-4S)	現行 BRZ FA20 (2.0L D-4S)
エンジン型式		FA24	FA20
配置		水平対向	水平対向
燃料供給方式		筒内噴射 ＋ポート噴射 (D-4S)	筒内噴射 ＋ポート噴射 (D-4S)
使用燃料		93AKI (北米) 100RON (日本)	93AKI (北米) 100RON (日本)
気筒数		4 気筒	4 気筒
総排気量		2387 cc	1998 cc
北米	最高出力	228 HP (170 kW) /7000 rpm	205 HP (152 kW) /7000 rpm
	最大トルク	184 lb-ft (250 Nm) /3700 rpm	156 lb-ft (212 Nm) /6400-6800 rpm
日本	最高出力	173 kW (235 PS) /7000 rpm	152 kW (207 PS) /7000 rpm
	最大トルク	250 Nm (25.5 kgfm) /3700 rpm	212 Nm (21.6 kgfm) /6400-6800 rpm
吸気方式		自然吸気	自然吸気
弁機構		DOHC4 バルブ	DOHC4 バルブ
駆動方式		タイミングチェーン	タイミングチェーン
動弁系デバイス機構		吸気／排気 AVCS	吸気／排気 AVCS
ボア×ストローク		94.0 × 86.0 mm	86.0 × 86.0 mm
圧縮比		12.5	12.5

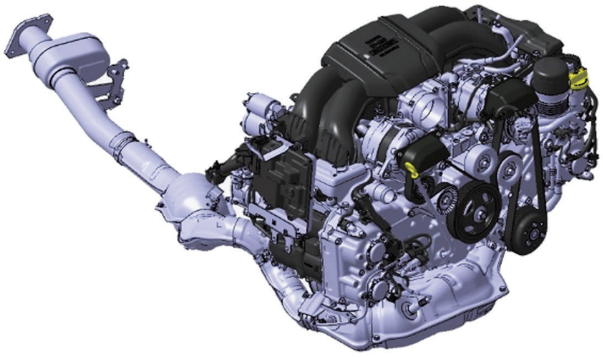


図 2　FA24 鳥瞰図

3.　高出力・高回転へのアプローチ

3.1　高出力化

3.1.1　吸気性能向上

吸気バルブ形状による出力性能向上のアプローチとして、バルブ有効開口面積を指標に吸気バルブ径を決定。排気量拡大（ボアアップ）に対応するため、吸気バルブ径をSUBARU最大径となるφ37 mm（FA20：φ35 mm）に拡大。シリンダヘッドの吸気ポートはタンブル（指向性）思想のS字カーブではなく、FA20同様、バルブ全周から空気を送り込む思想（高流量）とし、吸気バルブ径拡大に合わせて形状を最適化した。FA20に対して有効開口面積を約18%向上（図3）。出力ピークまで伸びのあるトルクカーブを実現した。

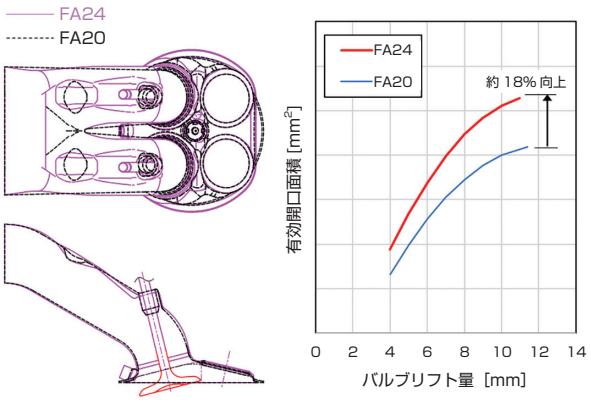


図 3　シリンダヘッドポート・有効開口面積

樹脂成型インテークマニホールドはCAE解析にてブランチ径、ブランチ長さについてパラメトリックスタディを実施。出力効果が最も得られるブランチ直径φ70 mm、ブランチ長さ400 mmに決定した（図4、5）。

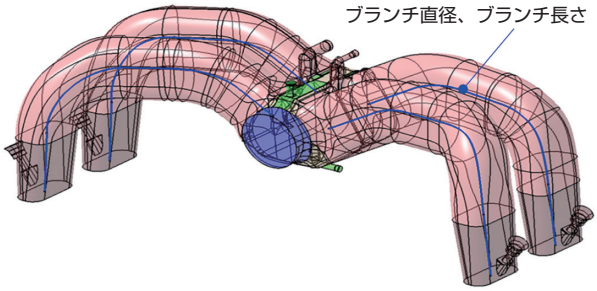


図 4　インテークマニホールド

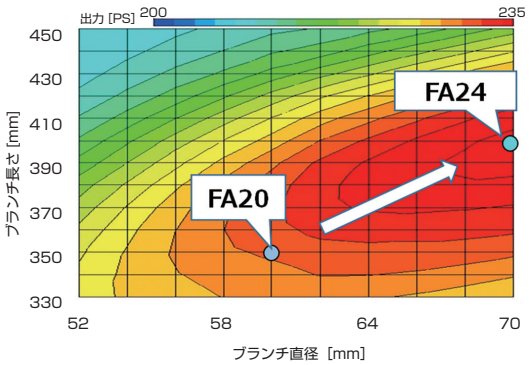


図 5　インテークマニホールドのパラメトリックスタディ

3.1.2　排気性能向上

排気性能向上のためエキゾーストマニホールド形状を最適化した。集合方法はFA20同様4-2-1。CAE解析にて、ブランチ径×長さ、デュアル径×長さについてパラメトリックスタディを実施。7000 rpm出力点の同調点最適化を狙いつつ、全域で高トルクを維持できるトルク特性を実現した（図6、7、8）。

出力向上のため、連結パイプ部はパイプ基本径を拡大(φ54→φ60.5)、ハイドロ加工を用いて必要隙ぎりぎりまで拡管した。センターエキゾーストパイプ径も同様に拡管(φ60.5→φ63.5)した。排ガス温度上昇に伴う高温強度確保のためベローズを最適化(6山→8山)した。

排気量拡大しているものの排気圧力はFA20と同等まで低減させた(図9)。

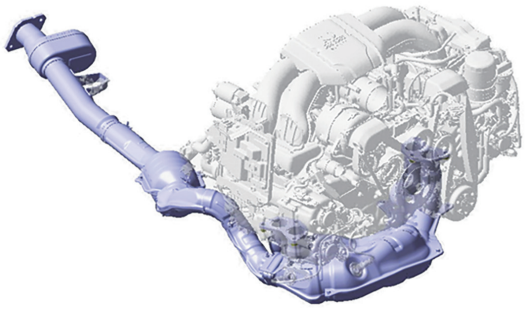


図6　排気システム形状

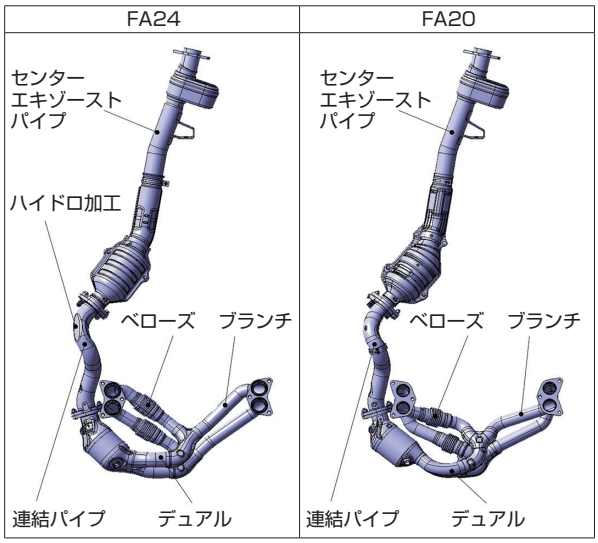


図7　排気システム比較

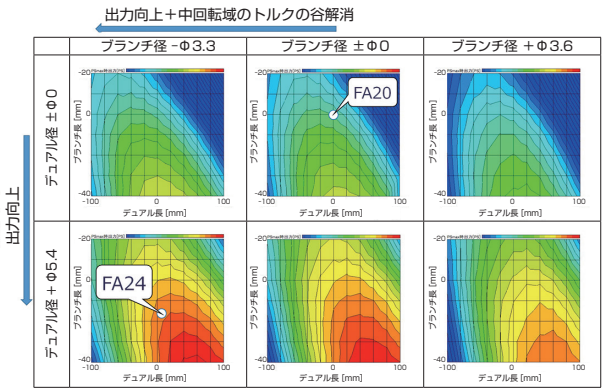


図8　エキゾーストマニホールドのパラメトリックスタディ

3.1.3　ピストン裏ポンプロス低減

FA20 用シリンダブロックをベースに、ボア径を拡大している(φ86 mm → φ94 mm)。ボア径拡大に

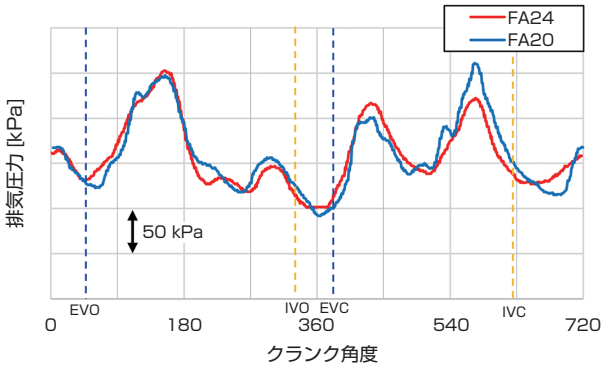


図9　排気圧力 CAE 解析結果

より高回転時のピストン裏側の空気抵抗が大きくなる。また、ピストン径拡大により慣性荷重が大きくなるため、クランク荷重を受けるシリンダブロックのメインジャーナル部への負荷が高くなる。メインジャーナル頂面のエッジ部を除去するコンタリング加工を追加し、エッジ部の応力をFA20に対し、約11%以上低減。且つ、同時にボア間連通路を広げることが可能となり、ピストン裏の空気抵抗を減らし、高出力・高回転に対応した(図10)。

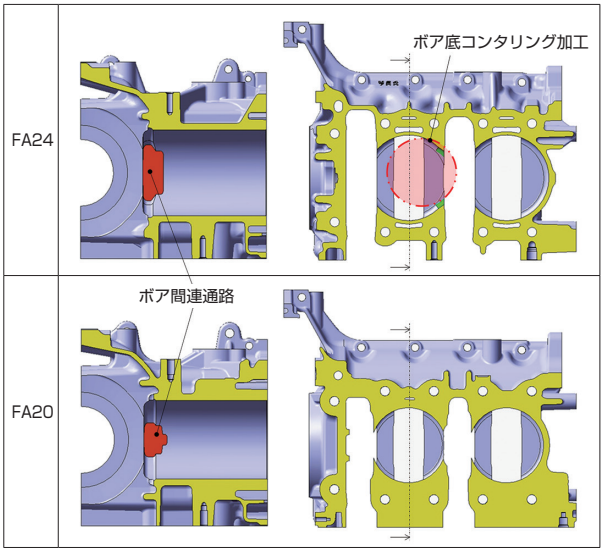


図10　シリンダブロック連通路

3.1.4　燃料噴射系　混合気形成

環境性能と高出力化を実現するため、筒内噴射とポート噴射、二つの燃料噴射方式を備えたD-4Sシステムを採用した(図11)。ポートと直噴インジェクタの噴射比率の最適化、高負荷時λのリッチ化を抑制することで、インジェクタの流量スペックは現行同等を実現できた。流量スペックを不変としたことで、ポート噴射比率を現行より高めることができ、低燃費、低エミッション化を実現できた。また、高流量パージソレノイドの採用により、エバポ性能を向上させた。

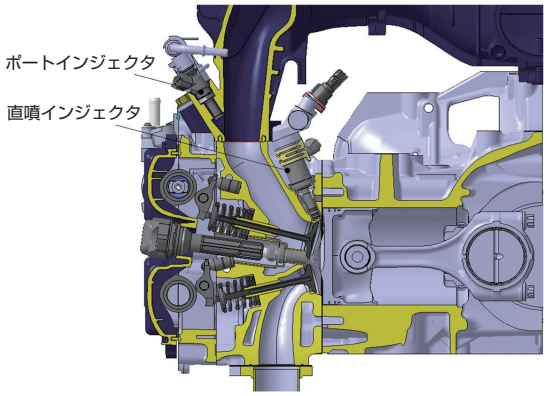


図 11　インジェクタ配置

3.2　高回転対応

以下に示す技術により、排気量拡大しつつレッドゾーン7500 rpmまでスムーズに回るエンジンを実現した。

3.2.1　ピストン

ピストン径拡大に対し、冠面裏およびピンボス周辺の補剛をおこない、強度要件を満たしつつ軽量化を実施(図12)。結果、ピストン重量はFA20に対し＋67 gとなるが、コネクティングロッド・クランクシャフト仕様をはじめとした設計配慮により主運動系部品および周辺部品の信頼性を確保した。

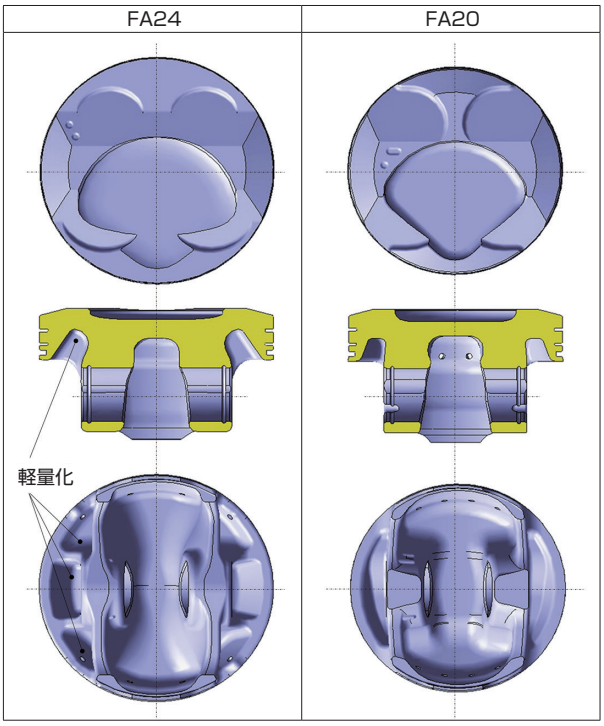


図 12　ピストン図

3.2.2　コネクティングロッド・ベアリング

FA20に対し、FA24ではクランクシャフト剛性アップ、及び、コネクティングロッド面圧低減のため、クランクシャフトピン径を2 mm拡大した。FA20、FA24 Prototypeの斜めかち割式、FA24の水平かち割式のピストン上死点時のコネクティングロッドベアリング面圧を図13に示す。FA20とFA24 Prototypeの斜めかち割式では、225°付近で高面圧が発生している。これは、左右非対称の大端形状、且つ、コネクティングロッドベアリング合わせ面付近のリリーフ形状により荷重分布が不均一となるためである。水平かち割式にすることで、クランクピンに対し左右対称な形状・剛性を確保することが可能となり、225°付近の面圧を低減した。また、シリンダブロック下からコネクティングベアリングキャップが組み付けられなくなるため、主運動系(ピストン・コネクティングロッド)の組み立て方式はサービスホール式を採用した。コネクティングロッドにはCB18で採用した高強度材料を採用することで、クランクシャフトピン径2 mm拡大にもかかわらず大端部増肉を最小限とし重量増加は約＋1 g/本に抑えた。

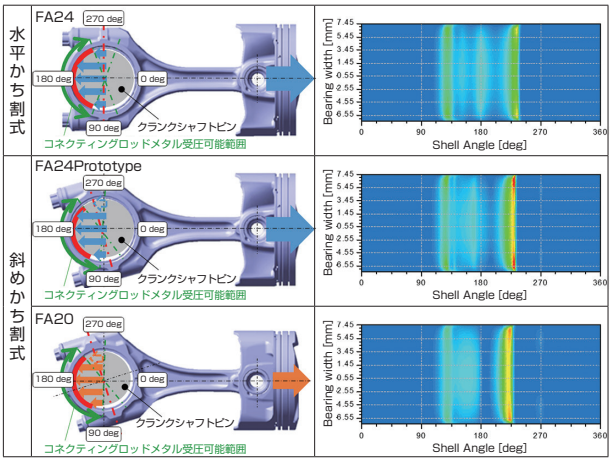


図 13　コネクティングロッドベアリング面圧

3.2.3　クランクシャフト・回転運動系

排気量拡大しながらも、クランクシャフト回転軸周りの慣性モーメント低減に取り組んだ。ピストン・クランクシャフト・コネクティングロッドの慣性モーメント増加に対し、クランクプーリ・クランク角センサープレートを軽量化し、現行FA20に対し慣性モーメントを約19%低減(図14)。メインベアリングには5か所全てにモリブデンショットを実施し、フリクションを低減。また、フレキシブルフライホイールを採用し、クランクシャフト後端の挙動を安定化することで、メインベアリングへの入力低減を図った。

3.2.4　バルブ・バルブスプリング・カム

吸気バルブ径拡大に伴う重量増により高回転で吸気バルブの挙動悪化が懸念されたため、吸気バルブの軸部を中空化。吸気バルブ径拡大にもかかわらず、

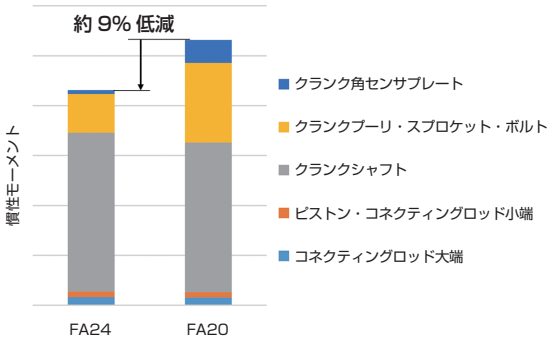


図 14　クランクシャフト周りの慣性モーメント

FA20比で約6 g/本の軽量化。また、排気バルブも中空部容積を拡大し、約2 g/本の軽量化を実現した。排気バルブは燃焼室温度の熱引きを向上させるため、中空部に冷媒としてナトリウムを封入。さらにゲッター材(Ti粉末)を追加で封入することで、内部のナトリウムの流動性を向上し、燃焼室の温度低減・高出力化に貢献している(図15)。

また、高回転時の性能向上のため、バルブスプリングのサージングを抑制する必要があった。バルブスプリングの固有振動数を高めることが有効であり、FA20に対しバルブスプリングセット長を拡大し、バルブスプリングの設計自由度を向上。不等三段ピッチのバルブスプリングを採用し固有振動数を約26%以上高めて、高回転時のサージングを抑制した。

カムシャフトは薄肉化し、約330 g/台の軽量化を実現した(図16)。

軽量・小型AVCSを採用し、全長約3.7 mm短縮、約1,225 g/台の軽量化を実現した。

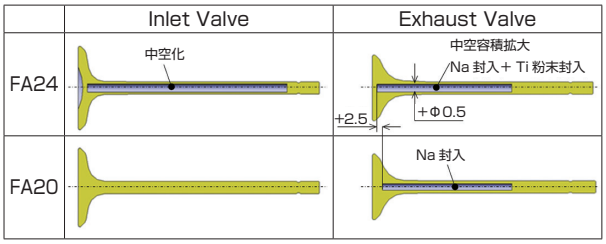


図 15　吸排気バルブ断面図

3.2.5　潤滑

排気量拡大に伴い、特に主運動系への負荷がFA20よりも高く、主運動系摺動部のオイル必要流量が増加する。オイルポンプを専用設計とし、オイルポンプローター径縮小によりフリクションを低減、高回転までストレスなく回る仕様とした。また、ボトルネックとなっていたストレーナ通路断面拡大・通路形状簡素化を行い、圧力損失を低減。オイルポンプ効率を約3%向上した(図17)。ストレーナは材質を樹脂に変更し、約48 gの軽量化を実現した。

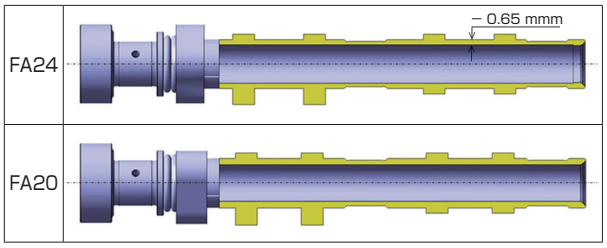


図 16　カムシャフト断面図

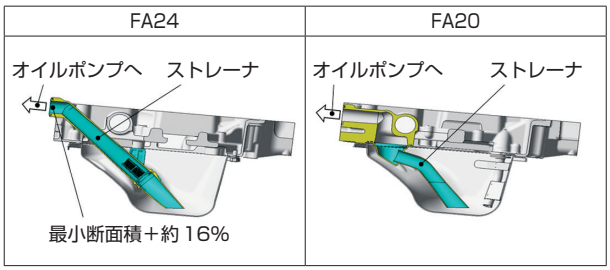


図 17　ストレーナ断面図

また、クランクピン・コネクティングロッド大端の大型化に伴う主運動系回転軌跡の拡大によるエンジンオイル攪拌(フリクション増加)を回避し、かつオイル交換時のお客様負担を軽減するため、エンジンオイル投入量の低減を図った。

エンジン内部のオイル挙動を可視化し、チェーンカバー、オイルパンアッパ、シリンダブロックにオイル搬送リブを追加することで、オイルパンへのオイル戻り性を確保し、旋回時のオイル片寄りを抑制することでストレーナからのエア吸い耐力を確保(図18)。結果、FA20に対して0.4Lのオイル削減を達成した。これにより、オイル攪拌による高回転時のフリクションを低減、出力向上に貢献した。

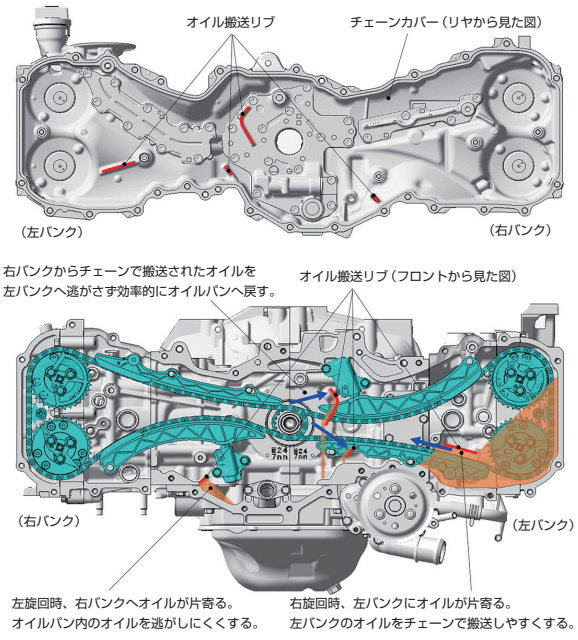


図 18　オイル搬送リブ

主運動系の摺動面保護・オイル冷却を目的とし、FA24は、専用の水冷式オイルクーラ(5段コア)と水配管を新設した(図19)。オイル温度を約15℃低減した。

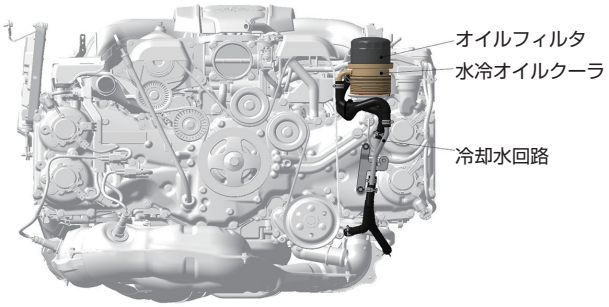


図 19　水冷オイルクーラ

4.　高出力と環境性能の高次元バランス

4.1　出力・トルク特性

排ガス、燃費性能に配慮しながら、ポートと直噴の噴射割合や噴射時期、燃圧等の燃料噴射制御、吸気・排気バルブタイミング、スロットル開度特性等を見直した。その結果、FA24のハードポテンシャルを最大限に引き出し、高トルク・高出力化を達成した(図20)。また4000 rpm付近のトルク低下を抑制できたことで、扱いやすいエンジン特性を実現できた。本改善により全車速域にて加速タイムが向上した(図21)。

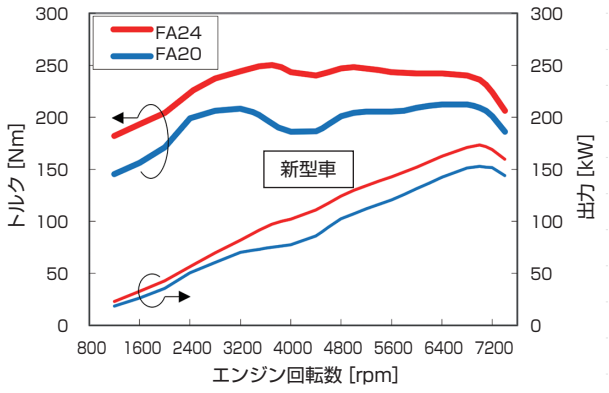


図 20　出力トルク特性

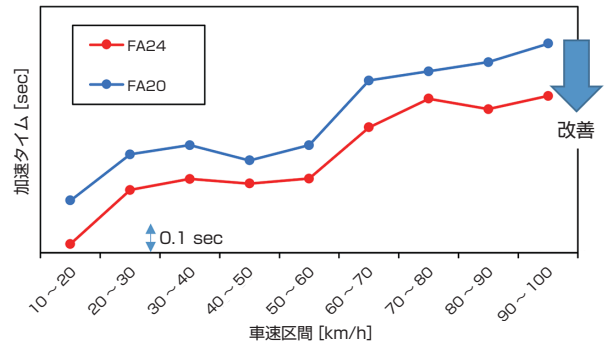


図 21　加速タイム

4.2　排出ガス性能の改善

PM/PN、HCは低温始動時及び始動直後に多くが排出されるため、始動時噴射制御の最適化と共に早期に触媒を活性温度まで上昇させる必要がある。

FA24では始動時はピストンへの燃料付着によるPM/PN悪化を避けるため、ポートインジェクタによる燃料噴射を採用。始動後は筒内直接噴射を併用して大幅な点火時期リタードを行い、排出ガス温度を上昇させることでPM/PN、HCの低減を狙った。

筒内直接噴射の制御には排出ガス温度の上昇と燃焼安定性を高次元で両立させるためにCAEを用いて燃料噴射タイミングとピストン冠面形状の最適化を図った。

燃焼安定化には噴霧のバラつきに対する混合気形成のロバスト性向上が課題となったが、初期燃焼ばらつきがプラグ周り8方向の当量比分布標準偏差に相関があることに着目(図22)。CAEで解析を行った結果、図23に示す通りピストン冠面の扇形キャビティを拡大することで標準偏差が改善することがわかり、燃料噴射時期に対するロバスト性を高めた上で大幅リタードによる排気温度の上昇を実現した(図24、25)。

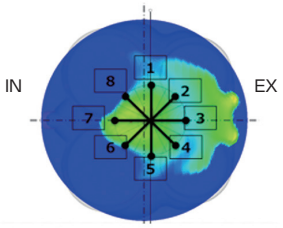


図 22　プラグ周り解析ポイント

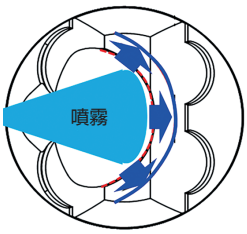


図 23　ピストン冠面の扇形キャビティ形状

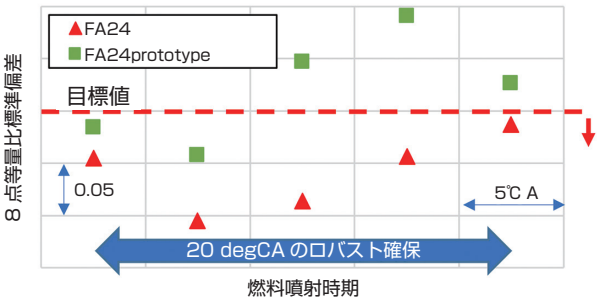


図 24　プラグ周り標準偏差改善結果

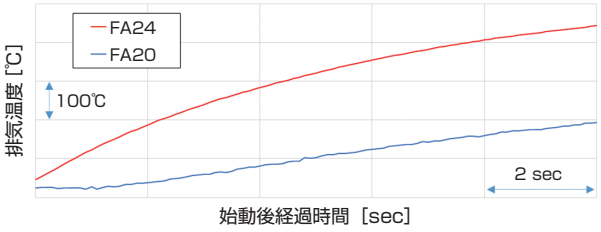


図 25　排気温度

5.　車両性能に対する貢献

エンジンの基本性能以外にも、安全性能、スポーツカーとしてのデザイン、快適さ(振動騒音)等の商品力向上にも貢献した。

5.1　低重心・歩行者保護

スポーツカーらしいボンネットフードデザインと歩行者保護を両立するため、現行FA20に対しさらなる全高抑制をおこなった。

水冷オイルクーラ追加により、エンジンの全高が高くなるが、SUBARU他機種で採用している水冷オイルクーラから配管径見直しにより全長を5 mm短縮。さらに、オイルフィルタは全長10 mm短縮品を採用し、エンジン全高アップを最小限とした。オルタネータは、取付け位置を変更し、FA20に対し10 mm低くした。

これらにより、スポーツカーらしいボンネットフードデザインと歩行者保護安全性を両立した(図26)。

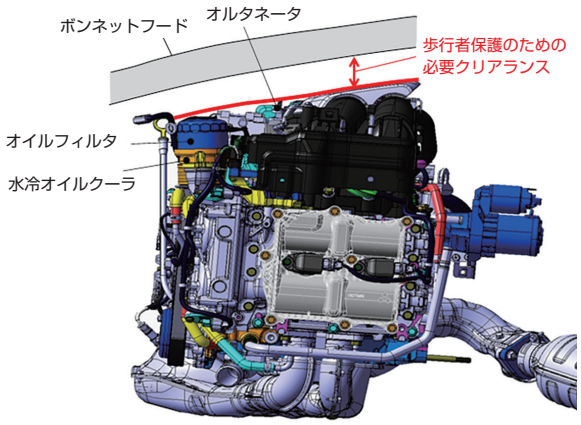


図 26　歩行者保護

5.2　衝突安全性

IIHS TSP(2021基準)衝突規制に準じた3つの衝突モードに対し、燃料系を保護する構造とした。

鋳鉄燃料プロテクタ、及び、締結ボルト高強度化など、衝突対応構造の見直しを実施。

シミュレーション、静圧壊試験、実車試験を行い、シミュレーション精度を向上させながら、各部品の形状、材質を最適化した(図27)。

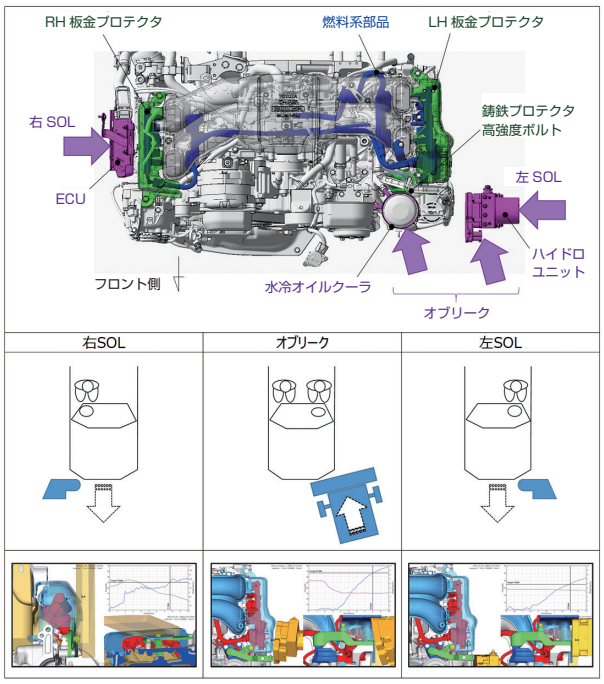


図 27　衝突安全のための部品構成と CAE 解析

5.3　NVH

FA24エンジンは高出力化のため、吸排気の圧損低減や排気量拡大に伴う急速燃焼化によりNVは増大傾向となる。車外音法規対応や車室内騒音低減のため、エンジンの放射音をFA20同等レベルへの改善に取り組んだ。

放射音の寄与度を分析すると図28のように250 Hz帯以下の低周波数帯域は吸気吸入音寄与が高く、それ以上の周波数帯域は吸気放射音の寄与が高いことがわかった。

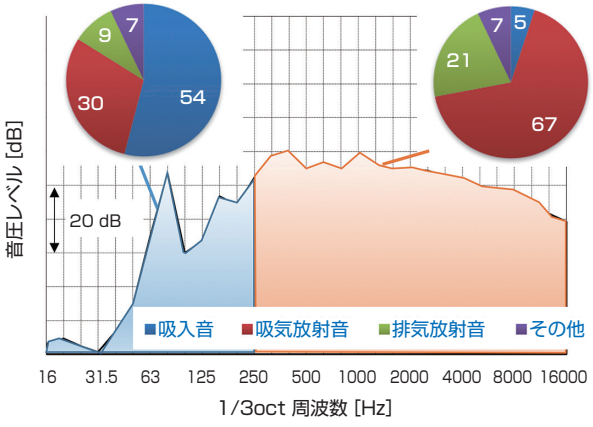


図 28　放射音寄与度分析結果

吸気吸入音はレゾネータの容量アップやダクト開口部の径を最適化することで改善し(図29)、吸気放射

音は吸気系部品特にインテークマニホールドの面剛性向上による改善を図ることで、FA24の放射音レベルはFA20同等レベルを実現した(図30)。

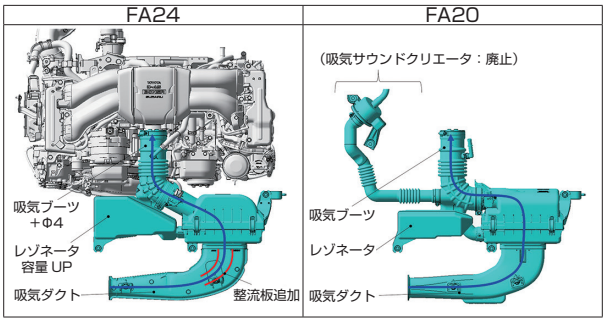


図 29　吸気システム

また、クランクシャフトとアルミダイカスト製シリンダーブロックの線膨張係数差による暖機後の軸受け隙間拡大により、緩加速領域時にクランクシャフトが左右方向に横切ることで発生する振動を低減するため、ブロックの#1、5ジャーナル軸受けへ鉄系材料のピースを鋳込む“鋳込みジャーナル”を採用し、温間時の軸受け隙間拡大を抑制した。また、エンジン本体構造系の捩り剛性を向上して、FA20以下の振動レベルを実現し、緩加速時の不快な音質を改善した(図31)。

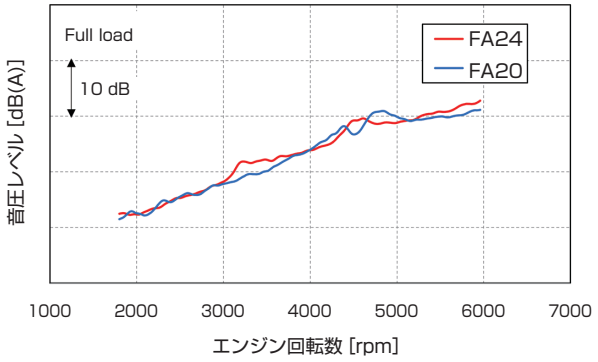


図 30　エンジン放射音比較

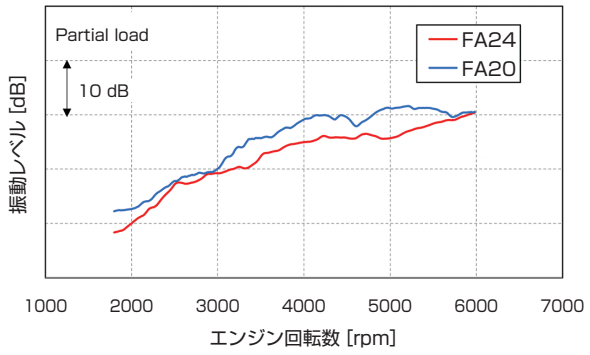


図 31　エンジンマウント取付部振動比較

6.　まとめ

商品力を牽引するパワーユニットを目指し開発を推進。排気量拡大をしながらも軽量化と環境性能、高回転域も含めた信頼性を高次元で両立するエンジンとなった。最後に、本エンジン開発に際して、協力企業の皆様、トヨタ自動車株式会社殿、関連各部をはじめとした社内外関係各位の御協力に感謝致します。

参考文献

(1) Nobuo Kyotoku：Development of Horizontally Opposed 2.0-liter Natural Aspiration Gasoline Engine for Subaru BRZ, 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2012
(2) 加藤直樹ほか：BRZ用2L水平対向自然吸気エンジンの開発，スバル技報 No.39
(3) 京徳信夫：BRZ用2L水平対向自然吸気エンジンの開発，JSAE SYMPOSIUM No.17-13 新開発エンジン

【著　者】

京徳　信夫

永洞　真康

最首　陽平

仙波　正隆

長田　健志

梶川　丈喜

スポーツカーコックピットシステム：デジタルメータ開発について

Cockpit System of Sports Car：Development of Digital Instrument Cluster

髙野裕生* KONO Yuki
鈴木一文* SUZUKI Kazufumi
川谷健太* KAWATANI Kenta
柄澤英之* KARASAWA Hideyuki

抄　録

新型BRZは、スポーツカーとして走りを極めるだけでなく、アイサイトやSUBARU最新のインフォテイメントシステムを採用し全方位で進化した。それに伴い、メータに表示する情報も格段に増加した。また新たにSPORTモードやTRACKモードの専用画面を表示し、スポーツカーとしての機能価値向上を目指した。

それら多くの情報や機能価値を融合したメータを、従来型同等のコックピットパッケージの中で実現することが必要であった。私たちは街乗り・ワインディング・高速道路・サーキットなどお客様のあらゆるユースケースに対応し、常に運転に集中できるメータを追求した。

本稿では、SUBARU初となる7インチTFT液晶とセグメント液晶を組み合わせたデジタルメータを開発したので、その内容について紹介する。

Abstract

The new BRZ has evolved in all directions with EyeSight and the latest infotainment system of SUBARU. Information displayed on the meter has increased remarkably. Moreover, the new SPORT/TRACK mode screen is displayed to improve the functional values as a sports car.

Such meter integrated with a lot of information and functional values was needed to be realized in the conventional cockpit package. We pursued to realize a cluster that drivers can always concentrate on their driving, responding to all their use cases such as from city driving to circuits.

This article introduces a digital meter that combines a 7-inch TFT LCD and a segment LCD.

1. まえがき

2012年にBRZ初期型が発売されてから約9年を経て誕生した新型BRZは、運動性能の向上だけでなく安全性や利便性を高める機能が追加され、より幅広いシーンで愉しめる車へと進化した。全方位で進化したスポーツカーのHMI（Human Machine Interface以下、HMI）としては、様々な情報をわかりやすく伝えるだけでなく、新たな価値を加え、誰もがスポーツ走行を愉しめる表示が必要となる。

日常からサーキットの限界走行まで、走りの愉しさと安心をお客様に提供するため、メータのHMIを新型BRZ専用に刷新した。

＊ コネクティッドカー開発部

2. 開発の狙い

新型BRZに乗る人すべてに、安心して運転が愉しめる空間を提供し、あらゆるユースケースに対応したスポーツカーコックピットへと進化するために、以下3つのコンセプトを設定した。

①直感的でわかりやすく先進感のあるメータをコンパクトに実現
②走行モードに合わせて表示を変える
③アイサイトやコックピットシステムとの連携機能の強化

その詳細について解説する。

2.1 2枚の液晶を組み合わせたコンパクトで先進感のあるメータ

ライトウェイトスポーツカーならではのコンパクト

なコックピットパッケージの中で、従来型から大幅に増加した情報表示と先進感のある表現を実現するため、7インチTFT液晶とセグメント液晶を組み合わせた。アナログゲージ廃止による物理的スペースの削減と警告灯／表示灯の配置を見直し最適化することで、従来型と変わらないコンパクトなメータを実現し、メータバイザを低く抑えた水平基調のインストルメントパネルに適合した(図1)。

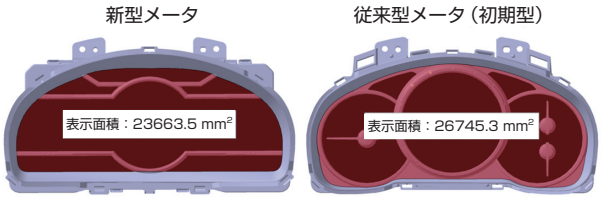


図１　メータ形状の新旧比較

その一方、形状や性質が異なる2枚の液晶を、メータ一台の中で一体感を持たせることが課題であった。この課題に対し、ハードウェアとソフトウェアの両面でアプローチを行った。

ハードウェア面では、スモーク入りメータガラスの採用や表示物が無い液晶角部はシームレス文字盤で覆うことで、液晶の区切りが目立たないようにした。加えて今回は、水平対向エンジンをモチーフとした立体的な造形のシルバーリングを2枚の液晶を横断するよう左右対称に設置することで、メータ全体の一体感を強調した(図2)。

異なる2枚の液晶間では、白黒のコントラストも異なるため、同じ輝度設定にするとセグメント液晶の白が明るく見えてしまう。これに対しソフトウェア面では、合計12段階ある輝度テーブルを液晶それぞれで分けて設定することで、両者の見栄えを統一した。

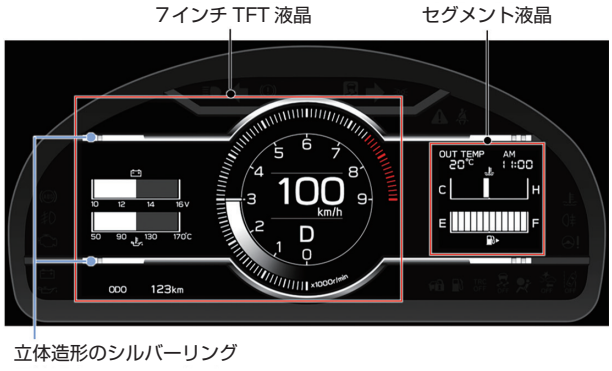


図２　メータ構成

2.1.1　視認性を追求したNormalモード

Normalモードでは、表示レイアウトを最適化し瞬時に情報を読み取ることができる見やすいメータを実現した。速度計はデジタルスピードのみを中央に大きく表示することで見やすさを向上した。また液晶表示だけでなく、シルバーリング造形を用いた物理的なエリア分けを行うことで、視認性や瞬読性を向上した。

走行に関する情報は、視線移動量の少ないセンタータコメータ内に集約した。メータ右側には、知りたい時にすぐに把握できる情報として外気温、時計、水温計、燃料計を常時表示し、左側は好みの画面を選択できるマルチインフォメーション表示を配置した。シルバーリングで区切られた液晶左上はアイサイト表示、左下は距離計及び警告灯表示とした(図3)。

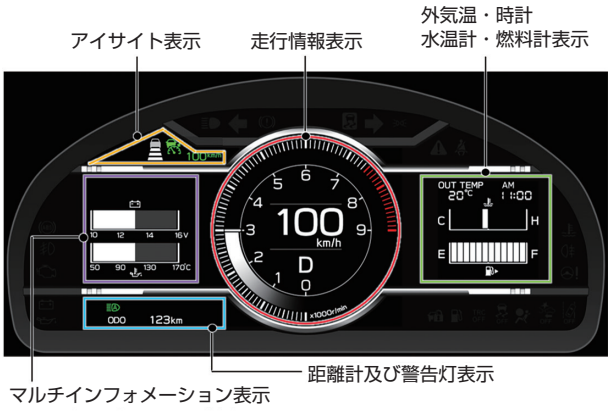


図３　表示のグルーピングとレイアウト

ステアリングホイールに設置された十字スイッチを操作し選択できるマルチインフォメーション表示には、新たにアイサイト画面やナビゲーション、オーディオ情報画面(輸出向けのみ)を追加した。さらに各種運転支援機能のON/OFF切り替え設定のみを集約した画面を設けることで、利便性を向上した。

また従来型からあるドライビング情報やスポーツコンテンツは意匠を刷新し、直感的でわかりやすく先進感のある表示を実現した(図4)。

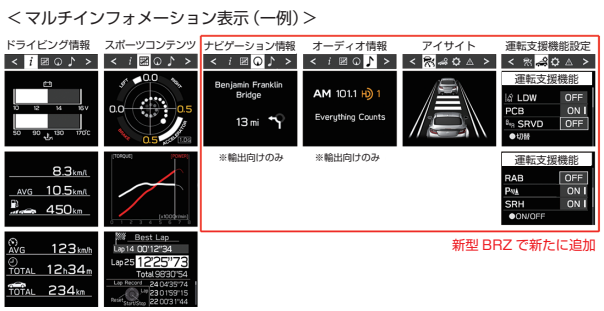


図４　マルチインフォメーション表示（一例）

2.2　走行モードに合わせ表示を変えるSPORT/TRACKモード

新型BRZのメータでは、走行モードに合わせてセ

ンタータコメータ内の表示を変化させ、SPORTモード及びTRACKモード専用の表示を行う。ワインディングやサーキット走行など、あらゆるスポーツ走行シーンに対応した最適な表示を実現した(図5)。

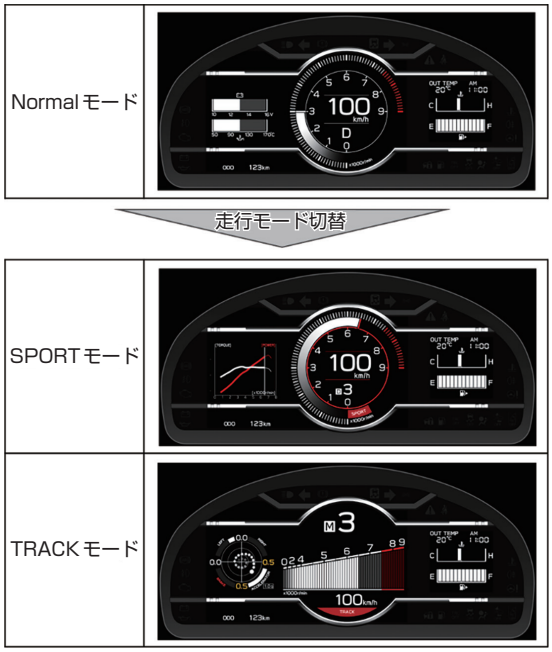


図５　走行モードに合わせたメータ表示

2.2.1　スポーティな走りを演出するSPORTモード

SPORTモードでは、シフト表示をDからギヤ段数表示へ自動的に切り替え、よりダイレクト感のあるAT制御によるシフト操作をリアルタイムにドライバーへ伝える。またタコメータのリングやゲージ先端は赤色に変化させ、走りの愉しさを演出するSPORTモード専用意匠とした(図6)。

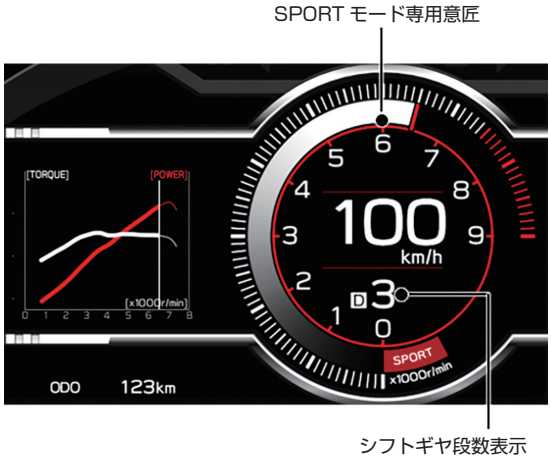


図６　SPORT モード（AT 車）

2.2.2　サーキット走行に特化したTRACKモード

乗る人すべてがスポーツカーならではの走りを存分に愉しめるよう、サーキット走行に特化した専用表示を設けた。本表示を開発する上では、プロドライバーによる走行フィードバックや知見を取り入れ、サーキットでのスポーツ走行に最適な表示を実現した。

サーキット走行ではさらに重要な表示となるシフト表示を、視線移動の少ない中央上部に最も大きく表示した。タコメータはバータイプとし、0 ～ 4000 r/minまでは目盛りを500 r/min刻み、4000 ～ 8000 r/minを100 r/min刻みとすることで、サーキット走行で常用するエンジンの高回転領域を強調し、その視認性を向上した(図7)。

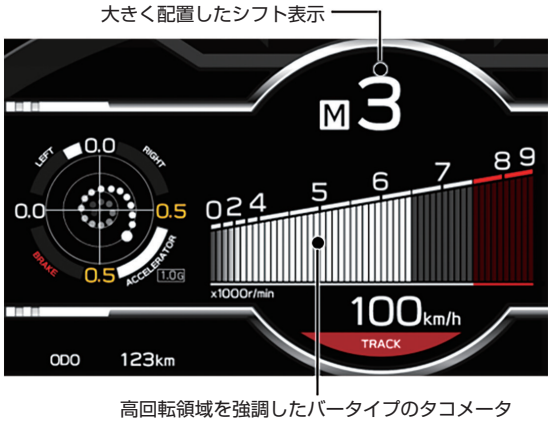


図７　TRACK モード

2.2.3　シンプルで明快なREVインジケータ

シフトアップタイミングをドライバーに伝え、サーキットでのスポーツ走行をアシストする機能の一つとしてREVインジケータを採用した。従来型のLED表示から液晶表示としたことにより、表現力や表示の自由度が上がったが、日常走行よりも大きなG(重力)がかかるサーキット走行中でもわかりやすいシンプルな表示とした。

任意に設定したREVインジケータ回転数に突入すると、ブザー吹鳴と同時にシフト部が半円形状にアンバー色で点灯する。ドライバーが視線を前方に向けたままでもシフトアップタイミングが認識できるよう大きく表示した。またレッドゾーン突入時は、インジケータは赤色に変化する(図8)。

図８　REV インジケータ（一例）

2.3　アイサイトやコックピットシステムとの連携機能の強化

新型BRZではアイサイトやコックピットシステムなどの新たな装備の搭載に伴い、コックピット内での表示及び音声の連携機能を強化した。

また従来型では、センターインフォメーションディスプレイのみに表示していたインフォテイメント情報も、より視線移動の少ないメータに連携表示を行うことで、スポーツカーでも安心・快適な移動空間を実現した。

2.3.1　安心・安全をサポートする運転支援表示

一般的な乗用車に比べ、運転目線が低く周囲の状況が把握し難いスポーツカーにとって、運転支援装備はドライバーの安心・安全につながる。一方、その制御状態が目に見えてわからないとドライバーの不安へとつながってしまう。安心して運転操作を行うためには、車両の制御状態が常に把握でき、わかりやすく使いやすいHMIを構築することが必要である。

新型BRZでは、各運転支援機能の制御状態をマルチインフォメーションへ表示するほか、より視線移動の少ないメータ左上部にアイサイト専用の表示エリアを設けた。アイサイト専用表示エリアには、全車速追従機能付クルーズコントロールの設定車速や先行車との設定距離及び認識状態を表示する（図9）。走行モードや別のマルチインフォメーション表示に切り替えた際も、常に決まった場所に表示するため、ドライバーは瞬時にアイサイト制御状態を把握することができる。

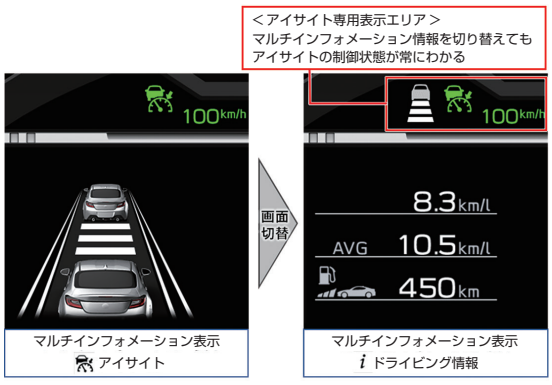


図9　アイサイト表示

割り込み画面は一律してマルチインフォメーションエリアに表示する。SUBARUの他車種同様、危険度に応じて割り込み画面枠の色分けを行い、シンプルかつ直感的な表現とした（図10）。

図10　運転支援機能の割り込み画面表示（一例）

2.3.2　安心・快適な移動空間をサポートするコックピットシステム連携機能（輸出仕様）

新型BRZではコックピットシステムによる連携機能を輸出仕様向けに設定した。ドライバーが持っているスマートフォンなどの外部機器とも連携し、リアルタイムにメータ表示を行うことで、スポーツカーでも快適な移動空間を実現した。

コックピットコントロール統合システムを介してスマートフォンと連携し、再生している音楽情報やTurn-by-Turn情報、電話通話情報をメータ及びセンターインフォメーションディスプレイに表示する。またプリクラッシュブレーキ作動時などのアイサイト機能による警告時は、表示連携に加えて、ドライバーがメータの警報音に気付くようオーディオ側のボリュームを自動的に減衰させる音声調停制御を実現した（図11）。

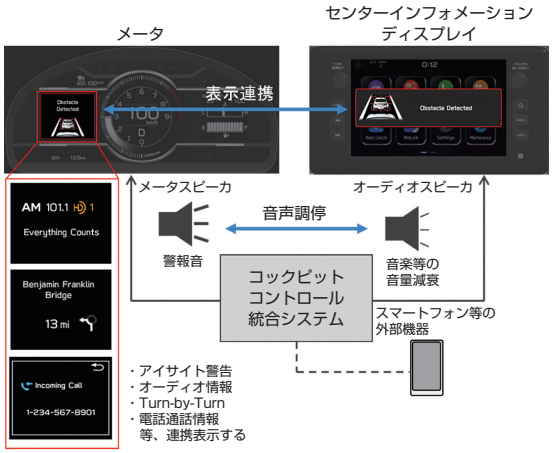


図11　コックピットシステムの表示／音声連携概略図

2.4　BRZならではのメータオープニング

水平対向エンジンをモチーフとしたデザイン性と機能性を備えたシルバーリング造形を活かし、エンジン始動時には、水平対向エンジンのクランクシャフトとピストンの動きを表現したオープニングアニメーションを行う。

このオープニングアニメーションの実現に向けては、左右のピストン表示の見栄えを揃えることが課題

であった。7インチTFT液晶とセグメント液晶の間では、黒→白へ切り替わる際の応答速度が異なり、セグメント液晶は点灯させる際の通電時間が短いと十分な明るさが出せない。この課題に対して、1つあたりの点灯時間を3倍に変更し、1つ飛ばしに表示を切り替えることで2枚の液晶間の見栄えを統一し、自然な表現を実現した(図12)。

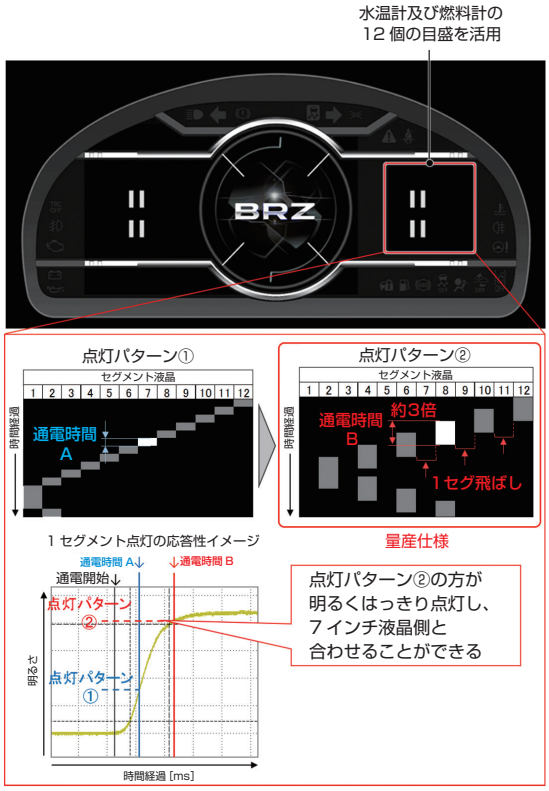


図 12　メータオープニング

3. まとめ

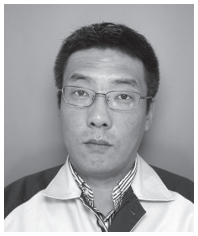
全方位で進化した新型BRZは、サーキットだけでなく、より幅広く走りを愉しめるピュアスポーツカーとなった。今回、私たちはそのコンパクトなスポーツカーパッケージの中で、多くの新しい付加価値を融合させあらゆるユースケースにも対応した、走りの愉しさと安心感を提供するメータの量産化を実現した。

今後もスポーツカーを愉しむ世界中のお客様にご満足いただける商品を提供していきたい。

最後に、本開発にあたり、トヨタ自動車株式会社をはじめ、多大なるご支援を頂きました社内外関係者の方々に深く感謝いたします。

【著　者】

髙野　裕生


鈴木　一文

川谷　健太

柄澤　英之

SUBARU「ステラ」一部改良モデルを発売

～スマートアシストⅢを全グレードに標準装備～

2020年8月27日

SUBARUは、「ステラ」を一部改良し、発表・発売しました。

今回の一部改良では、スマートアシストⅢを全グレードに標準装備。また、新たなボディカラーとして「ダークエメラルドマイカ」を追加したほか、「パールホワイトⅢ」に代わって「シャイニングホワイト・パール」を採用しました。

ステラカスタム　Rスマートアシスト

新型 WRX の紹介

Introduction of New SUBARU WRX

SUBARU WRX 開発プロジェクトチーム
SUBARU WRX Project Team

抄　録

新型WRX は、4 世代に渡って培ってきた“WRXの個性やヘリテージ(The car as WRX)”を継承させた。“革新を超え、さらにその個性を極めること”をキーコンセプトと開発目標に掲げ、“This is the New WRX！”とお客様から評価されるように開発した。そのキーコンセプトは、次のとおり。

・エクステリアデザインをさらに大胆かつアグレッシブに変化させること。
・パフォーマンス(動力性能)をWRXの個性に基づき、さらに高めること。
・時代と市場の変化に合わせ、2 ペダルでも圧倒的なパフォーマンスを提供すること。
・よりクオリティの高いスポーツ性能を実現し、より多くのお客様に選んでもらう機会を創出すること。

上記の革新と進化が新型WRXに必要不可欠であると考慮し、開発してきた。

本章では、その新たな価値を与えられた新型WRXについて、紹介する。

Abstract

The new WRX inherits “characteristics and heritage of WRX (The car as WRX)” that have been developed over four generations. With the key concept and development target set to “Seeking the characteristics to the utmost limit beyond innovation,” we have developed the new WRX in a way that customers would evaluate it as “This is the new WRX !”

The key concepts are as follows:

- Change the exterior design even more boldly and aggressively.
- Further improve performance (driving dynamics) based on WRX's characteristics.
- Provide overwhelming performance even with a 2-pedal automatic transmission in response to changes in trends and markets.
- Create opportunities for more customers to choose WRX with high-quality sporty performance.

Considering that the above innovation and evolution are essential, we have developed the new WRX.

In this report, we will introduce you the new WRX with the new values.

1. まえがき

WRXは、1992年にIMPREZAをベースにして、モータースポーツを戦うために誕生し、それ以来、モデルチェンジを重ねながら世界の多くのファンに愛されてきた。新型WRXは、“WRXらしさ(The car as WRX)”とは、圧倒的なパワーと加速をもち、ステアリングやアクセル操作に呼応してキビキビと動き、何といってもカッコいいクルマ、さらに4名乗車し荷物が十分に積め、お買い求めやすい価格で提供できる、「あらゆる路面での走りと用途に応えるマルチパーパスな全天候型スポーツセダン」であることと再定義し開発した。

2. 開発の狙い

2.1 コンセプト

新型WRXのコンセプトは『パフォーマンス性と実用性を兼ね備え、マルチに愉しめるパフォーマンスセダン』である。4世代続いた“WRXらしさ”をしっかりと継承・進化させることが新型WRXの使命であり、より幅広いお客さまに日常から非日常まで安心と愉しさをお届けするという意味を込めて設定した。すなわち、非日常を感じられるエキサイティングな性能・大

胆なデザイン・操る愉しさを備えるというパフォーマンス性と、日常のライフスタイルに応えられる実用的な機能・パッケージ・装備・ワンランク上の乗り心地や上質さ・安全性という実用性を同時に兼ね備えることで、お客さまの高い期待にお応えできると考えている。

2.2　お客様に提供する３つの価値

『WRXらしさの継承・進化』を実現するポイントは3つの価値であり(図1)、それぞれを“革新を超え、さらに極める”をキーワードに開発を進めてきた。

WRXの3つの価値「パフォーマンスカー価値」「SUBARUとしての価値」「セダン＝実用車としての多才な価値」のうち、「パフォーマンスカー価値」はSUBARUラインナップの中でもWRXという存在を差別化して際立たせる特に重要な価値であり、加速や操縦安定性といった従来のパフォーマンスカー価値だけでなく、見ただけで圧倒的なパフォーマンスを感じ取れるエクステリアデザインや、室内に座っただけで、すぐに走り出したくなるコックピット、シート、ステアリングなど、多くの進化のポイントを有している。

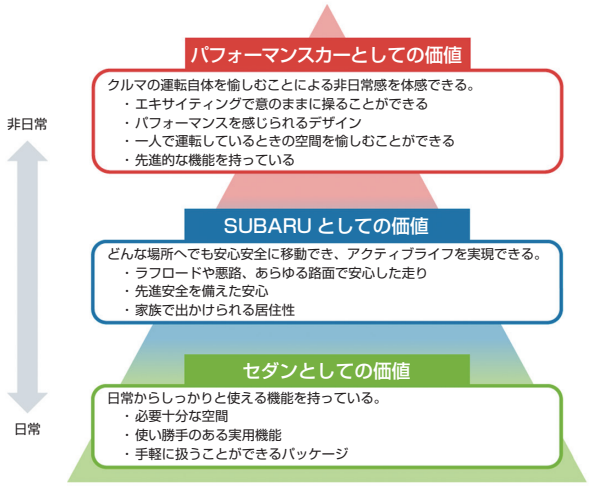
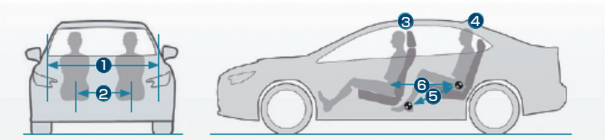


図１　　WRXの３つの価値

2.3　パッケージ

新型WRXも従来同等にグローバル展開することが決定しており、それに見合うようにデザインとパッケージを両立させた(図2、3)。

全長は、ドライバーだけでなく乗る人すべてが快適で心地よい移動時間を過ごせるようにホイールベースを延長して後席空間を大幅に拡張し、実用車の価値の基礎であるゆとりある室内スペースを確保しつつス



室内寸法［mm］

			従来型	新型（ ）は従来型車比
①	ショルダールーム	前席	1411	1441（+30）
		後席	1372	1412（+40）
②	カップルディスタンス	前席	710	730（+20）
		後席	690	690（±0）
③	ヘッドルーム	前席	1011	1010（−1）
④		後席	942	933（−9）
⑤	後席レッグルーム		899	926（+27）
⑥	前後席間距離		844	869（+25）
	リヤシート座面長		342	360（+18）

図３　室内寸法

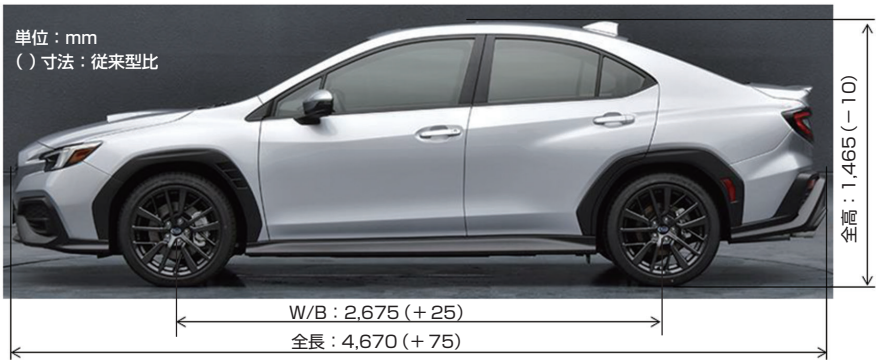


図２　内外装デザインとパッケージング

ポーツカーとしても取り回しのよいサイズを維持した。

全幅は、アグレッシブな造形を実現するためトレッドを拡げてフェンダーを力強く張り出しつつ、前後席それぞれのショルダールームと乗員間スペースを拡大することで、広々としたゆとりのある室内空間を実現した。

全高は、後席ヘッドルームを従来型と遜色ない寸法を確保しつつルーフを下げて、WRXらしいアグレッシブな車両全体のフォルムとホイールベースのバランスを最適化しデザイン性と居住性を両立した。

2.4　グレード構成と仕様装備

1）国内向け

国内向けのグレード展開と代表的な装備一覧を**表1**に示す。

STI社との共同開発グレード『STI SPORT』も発売開始時点からラインナップし2グレード体系とした。新型アイサイト及び歩行者保護エアバックなど最新の安全装備は全車標準装備とし、それぞれのグレードで先進運転支援システム（ADAS）を搭載した新グレード『EX』を設定、ナビ付き大型11.6インチセンターディスプレイや、3モードの表示切替が可能な12.3インチフル液晶メーターなどを標準装備とした。

2）米国向け

SUBARUが脈々と守り、今回も継続採用した6MTは3グレード体系とした。

特にスバルパフォーマンストランスミッション車には、電子制御ダンパーやパワーステアリングの電制可変を用いて、お客さまのお好みやシーンに応じて、

表1　主要装備一覧（国内仕様）

：標準装備　：STI Sport 装備　：メーカー装着オプション

車種		GT-H	GT-H EX	STI Sport R	STI Sport R EX
		2.4 L DOHC 直噴ターボDIT			
		スバルパフォーマンストランスミッション			
■AWDシステム・足回り・メカニズム					
VTD－AWD［不等＆可変トルク配分電子制御AWD］					
245/40R18タイヤ					
18インチ×8 1/2Jアルミホイール	ダークガンメタリック塗装				
	ブラック塗装＋切削光輝				
電子制御ダンパー（ZF製）					
アルミ鍛造製フロントロアアーム（ピロボールブッシュ付）					
SI-DRIVE［3モード（I/S/S#）］					
ドライブモードセレクト［Comfort/Normal/Sport/Sport＋/Individual］					
2ピニオン電動パワーステアリング					
■操作性・計器盤・警告灯					
プッシュオープン式フューエルリッド					
本革巻ステアリングホイール（レッドステッチ）		ディンプル付		高触感革、ピアノブラック調加飾パネル	
本革巻シフトレバー（ピアノブラック調＋ダークキャストメタリック加飾）					
シフトブーツ（レッドステッチ）					
アルミパッド付スポーツペダル（アクセル、ブレーキ、フットレスト）					
フルオートエアコン（左右独立温度調整機能、後席ベンチレーション、クリーンフィルター付）					
12.3インチ液晶メーター					レッドリング、STIロゴ入り
4.2インチマルチインフォメーションディスプレイ付ルミネセントメーター		ホワイトリング照明		レッドリング照明、STIロゴ入り	
メーターバイザーリング（ダークキャストメタリック塗装）					
■ナビ・オーディオ					
11.6インチセンターインフォメーションディスプレイ＆インフォテインメントシステム［通信用USB（2ケ）＋AUX（音声）入力端子付］					
オーディオレス仕様［7インチセンターインフォメーションディスプレイ、通信用USB（2ケ）付］					
■シート					
シート材質（メイン／サイド）		ファブリック／トリコット（レッドステッチ）		本革　注2［ボルドー（レッドステッチ）］	
		ウルトラスエード®　注2［ブラック（レッドステッチ）］		ウルトラスエード®／本革　注2［ブラック／ボルドー（レッドステッチ）］	
フロントスポーツシート					
RECARO®フロントシート（ブラック／ボルドー、レッドステッチ、STIロゴ入り）＋運転席8ウェイパワーシート（前後スライド／前チルト／リフター／リクライニング）					
運転席10ウェイパワーシート（前後スライド／前チルト／リフター／リクライニング／ランバーサポート）				注1	
助手席8ウェイパワーシート（前後スライド／前チルト／リフター／リクライニング）					
アクセスキー対応運転席シートポジションメモリー機能					
運転席シート自動後退機能					
シートヒーター［運転席＋助手席（3段階温度調整機能付）、後席左右］					

注1：レカロシートは8ウェイパワーシートになります。
注2：本革シート及びウルトラスエード®シートは、シートの側面と背面及びヘッドレストなどに合成皮革を使用しています。

WRXらしいスポーツ性の高い操縦安定性から、格上のクルマのような上質な乗り心地までキャラクター変更できるドライブモードセレクトを装備した最上級グレード『GT』を新設定し4グレード体系とした。

3. 主要諸元

新型WRXの主な諸元は表2の通り。

表２　主要諸元表（国内仕様）

車名・型式	スバル・5BA・VBH			
車種	GT-H	GT-H EX	STI Sport R	STI Sport R EX
	2.4L DOHC 直噴ターボ DIT			
	AWD（常時前輪駆動）			
	スバル パフォーマンストランスミッション			
■寸法・重量・定員				
全長×全幅×全高[mm]	4670 × 1825 × 1465[注1]			
室内長×室内幅×室内高[mm]※	1925 × 1515 × 1205[注2]			
ホイールベース[mm]	2675			
トレッド(前／後)[mm]	1560/1570			
最低地上高[mm]※	135			
車両重量[kg]	1590[注3]		1600[注3]	
乗車定員[名]	5			
車両総重量[kg]	1865[注3]		1875[注3]	
■性能				
最小回転半径[m]	5.6			
燃料消費率[km/L](国土交通省審査値)◆ JC08モード	12.7			
燃料消費率[km/L](国土交通省審査値)◆ WLTCモード	10.8			
■ステアリング・サスペンション・ブレーキ				
ステアリング歯車形式	ラック&ピニオン式			
ステアリングギヤ比	13.5：1			
サスペンション(前輪／後輪)※	ストラット式独立懸架／ダブルウィッシュボーン式独立懸架			
主ブレーキ形式	2系統油圧式(倍力装置付)			
ブレーキ(前／後)	ベンチレーテッドディスク／ベンチレーテッドディスク			
駐車ブレーキ形式(後2輪制動)	電気式			
■エンジン				
型式・種類	FA24			
	水平対向4気筒			
	2.4 L DOHC 16バルブ デュアルAVCS直噴ターボDIT			
内径×行程[mm]	94.0 × 86.0			
総排気量[cc]	2387			
圧縮比※	10.6			
最高出力(ネット)[kW (PS) /rpm]	202 (275) /5600			
最大トルク(ネット)[N·m (kgf·m) /rpm]	375 (38.2) /2000-4800			
燃料供給装置	筒内直接燃料噴射装置			
燃料タンク容量[L]	63			
燃料種類	無鉛プレミアムガソリン[注4]			
■トランスミッション				
変速機形式	スバル パフォーマンストランスミッション(マニュアルモード付) 前進無段 後退1段			
変速比(第1速～第8速)	3490～0.505 (マニュアルモード時　1速3.490/2速2.030/3速1.461/ 4速1.115/5速0.903/6速0.755/7速0.645/8速0.571)[注5]			
変速比(後退)	3.393			
減速比	4.444			

※社内測定値および社内型式名（方式名）

注1：全高はルーフアンテナを含む数値。
注2：サンルーフ装着車は室内高が−15 mm となります。
注3：サンルーフ装着車は車両重量／車両総重量が+10 kg となります。
注4：無鉛プレミアムガソリンが入手できない時は無鉛レギュラーガソリンを使うこともできますが、エンジン性能は低下します。
注5：マニュアルモード時の各変速ポジションにおける代表的な変速比です。

4.　デザイン

デザインについては別章にて紹介する。

5.　車体構造

日常で大切な、「意のままに操る歓び」「不快な振動が少なく快適な乗り心地」「高い静粛性」はそのままに、非日常を感じさせる刺激的な動力性能にも耐えうるセダンボディとすべく開発を行った。ボディ全体剛性の向上（図4）、ステアリング操舵時の応答性向上、不快な振動の抑制、及び乗り心地の向上を実現し動的質感を向上させている。

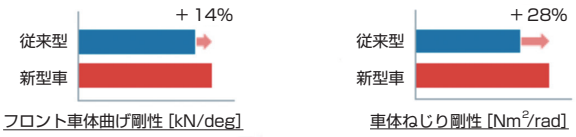


図4　ボディ剛性

5.1　車体骨格

5.1.1　スバルグローバルプラットフォーム

2016年に発表され、現行IMPREZAより採用しているスバルグローバルプラットフォームをハイパフォーマンスセダンである新型WRX用に最適化した。フレームワークは相似形とし、車両重量増加に対応するための骨格耐力強化を行っている（図5）。

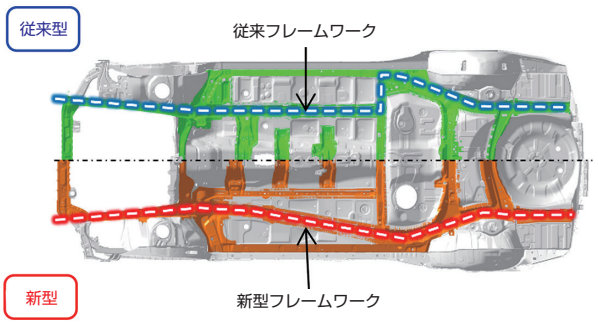


図5　スバルグローバルプラットフォーム構造

5.1.2　フルインナーフレーム構造

フルインナーフレーム構造をLEVORGやLEGACYに続いて採用した。アンダーボディにアッパーボディとの結合を強化する骨格を移設するとともに、アッパーボディの骨格を外板パネルから分離することで連続性を強化し、これにより、さらなる高剛性と軽量化を実現している（図6）。

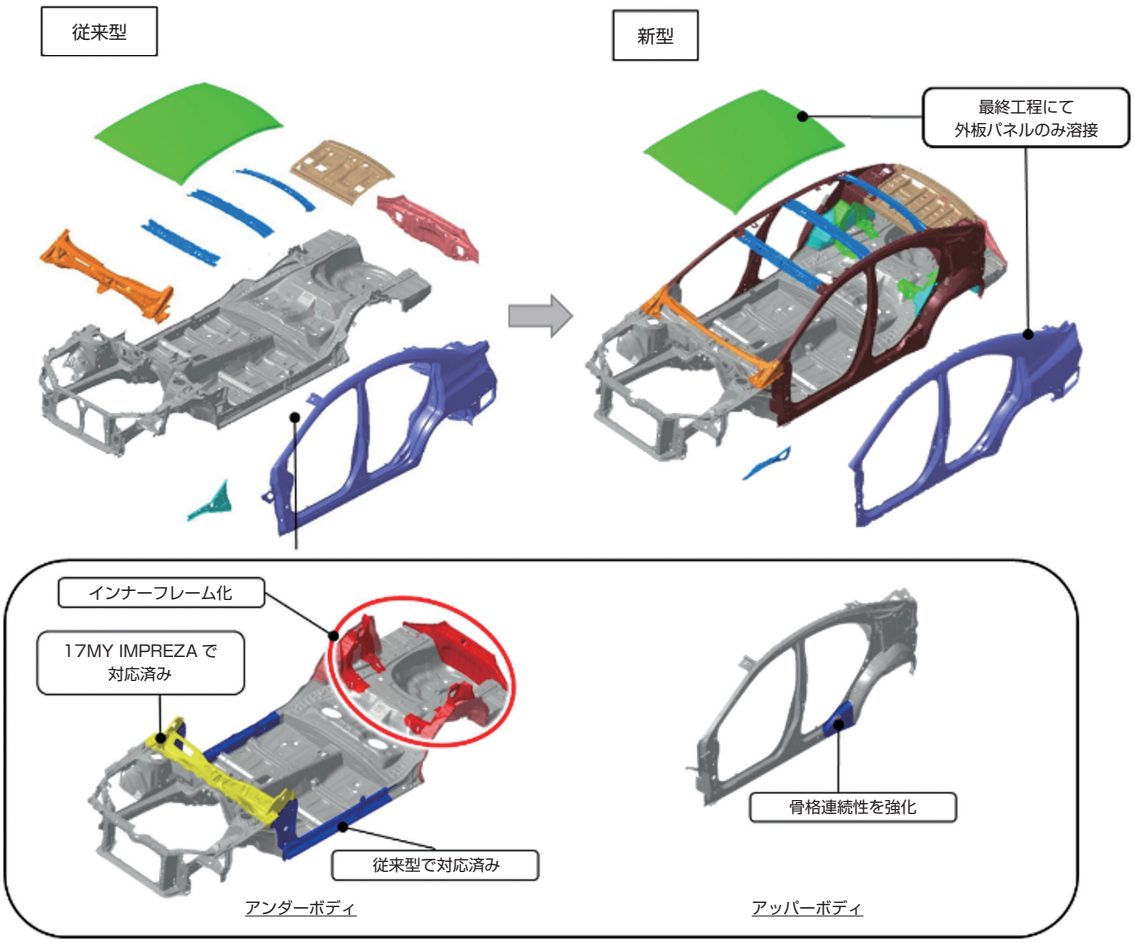


図6　フルインナーフレーム構造

また、フルインナーフレームの採用により、主にリヤバルク廻りのアンダーボディとアッパーボディの結合を従来型から強化することができるため、大幅に剛性を向上させている(図7)。

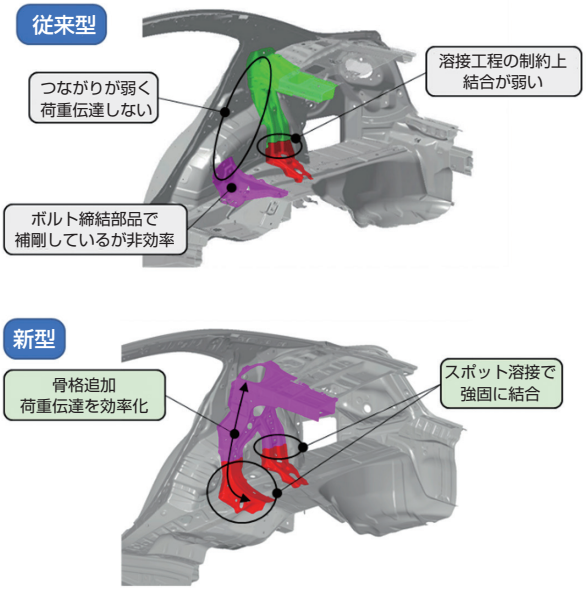


図 7　リヤバルク骨格構造

5.1.3　構造用接着剤

車体剛性と振動騒音性能の向上のため、構造用接着剤の採用範囲を拡大した。効果の高い部位から優先的に採用し、最小限で最大の効果が発揮できる部位への適用とした(現行IMPREZA：7 m・新型車：26 m)(図8)。

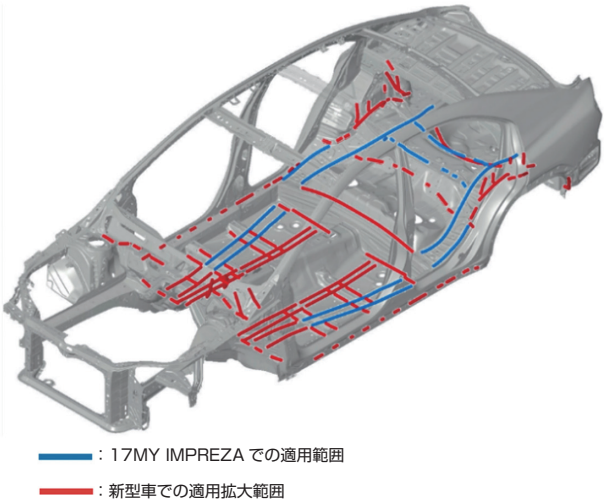


図 8　構造用接着剤塗布拡大

5.2　静粛性の向上

新型WRXでは、上質なセダンとして乗員全員が会話を愉しめる空間を提供するため、静粛性の大幅な向上を図っている。

5.2.1　吸音・遮音

音源であるエンジンからキャビンへ伝わる空気伝播音に対して、音の経路の遮断を効率的に行うために吸遮音材を設定した。インシュレーター拡大によるエンジンルーム内の吸音性能向上及び、フェンダー内への吸遮音材の設定により、音の経路を遮断しキャビン室内の静粛性を向上させている。また、ロードノイズや石・水はねによる音を吸収するため床下・リヤタイヤ廻りに吸音素材を採用すると共にトンネルインシュレータの範囲拡大を行った(図9)。

5.2.2　床下制振材

スバルグローバルプラットフォーム骨格に対し、パネル振動解析を用いて、制振材の板厚と配置の最適化を実施した。必要な厚さの制振材を効果的な箇所へ適用することで、ロードノイズの低減と軽量化を実現させている(図9)。

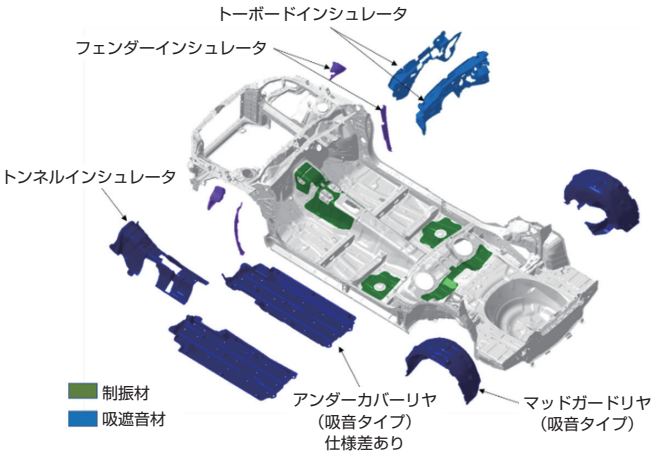


図 9　吸遮音材配置

5.2.3　断面発泡材

骨格内を通ってキャビンに侵入してくる走行音を防ぐため、ボディ骨格内部に断面発泡材を設定した。音の伝達経路を分析し、従来車に対して発泡材の配置を最適化している(図10)。

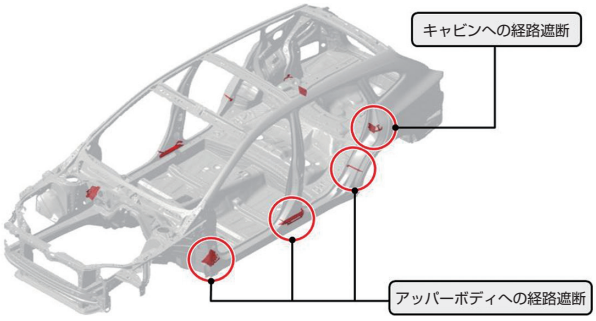


図 10　断面発泡材

6.　外装

視界を含めた、SUBARUならではの安全性の進化に加え、アクティブライフを実現する新機能・利便性を実現した。さらに、パフォーマンスを表現した先進的なスタイリングと機能を融合させ、SUBARUのエクステリアを革新した。

6.1　フロントバンパー

6.1.1　空力テクスチャーの採用

バンパー下部に、ワイド感のある大型のロアカバー及びフォグランプカバーを採用して立体的で緻密な造形を実現した。また、これらカバーにSUBARU初となる空力テクスチャー（ヘキサゴンパターン）を採用して機能感を表現した（図11）。

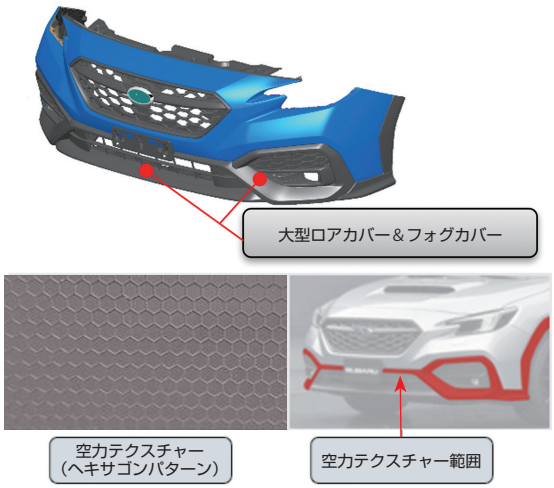


図11　フロントバンパー

6.1.2　前側方レーダーの取り付け構造

国内向けのフロントコーナーレーダーはバンパーに内蔵する構造として、性能の確保と意匠性を両立した（図12）。

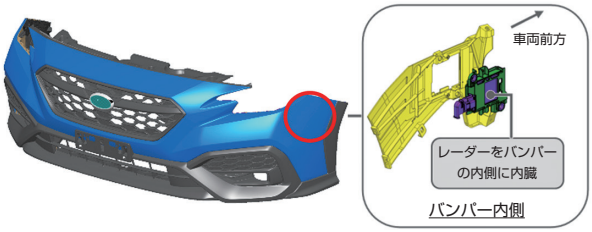


図12　フロントコーナーレーダー取り付け構造

6.2　リヤまわり

6.2.1　リヤバンパー

エアアウトレットをLEVORGに続いて採用して操縦安定性を向上させた。また、バンパーのブラックアウトエリアは、面積を拡大するとともに下端をキックアップさせる事で前傾姿勢を協調した。さらに、このブラックアウトエリアにも空力テクスチャー採用しスポーティイメージを向上させた（図13）。

図13　リヤバンパー

6.2.2　リヤコンビランプ

3色成型（赤、クリア、黒）のアウターレンズを採用しシャープな外観を表現し、バックランプとリアフォグランプはLED化して視認性を向上させた（図14）。

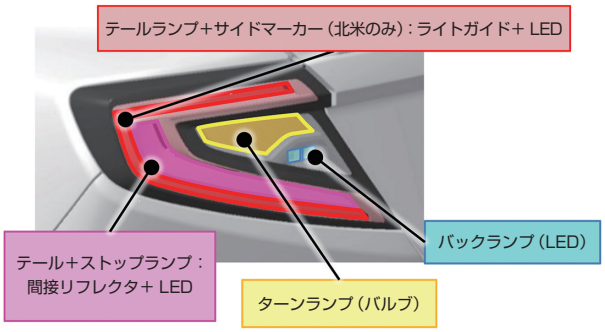


図14　リヤコンビランプ構成

また、SUBARU共通モチーフ（Cシェイプ）のテール／ストップランプには、微細カット加工を施したライトガイドを採用してシャープで均一な質感の高い点灯を実現している（図15）。

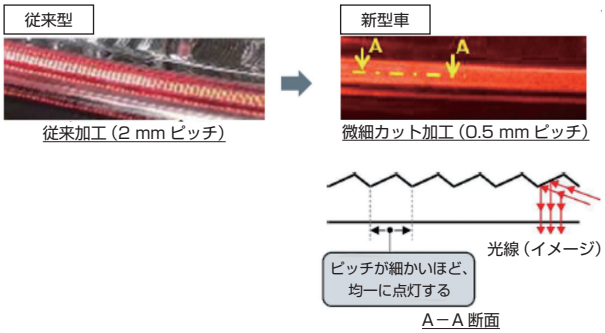


図15　ライトガイド微細カット加工

さらに、リフレクタ(反射板)には、鉱物の様なギザギザした加工を施した。これにより、火山のマグマのように点灯し、内にみなぎる力強いパフォーマンスを表現した(図16)。

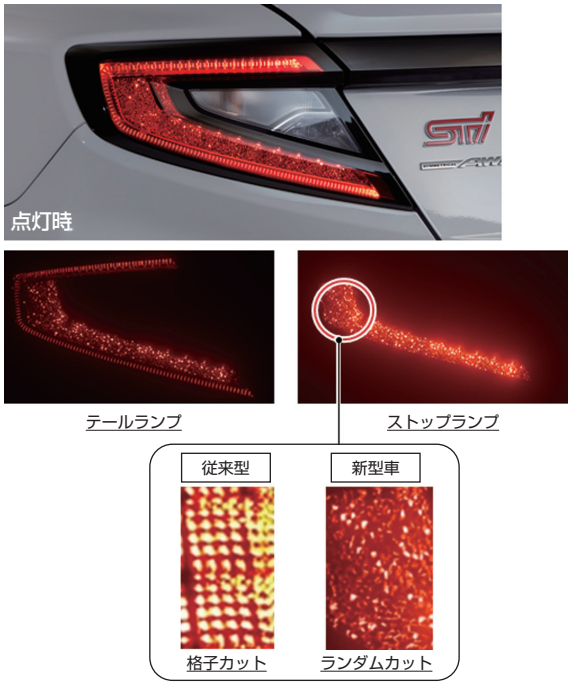


図 16　リヤコンビランプ光り方

6.3　サイドまわり

6.3.1　リヤドアガラス

リヤドアガラス下端をモールと共にキックアップさせて力強い前傾姿勢を表現した。また、キックアップしたモールは一体成型とする事で、質感を向上させた(図17)。

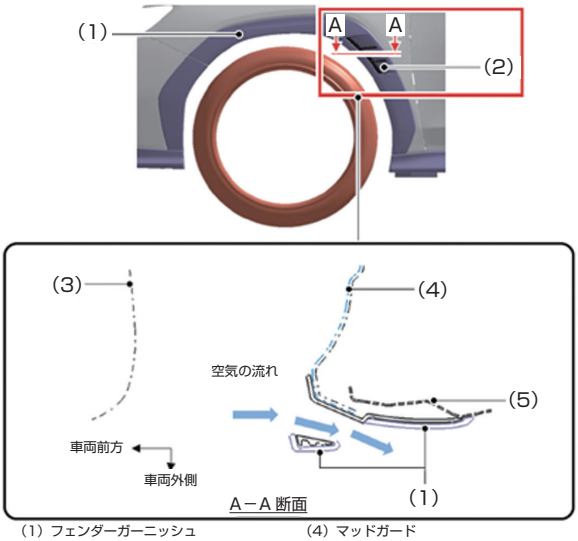
図 17　R ドアガラスのキックアップ形状

6.3.2　フロントフェンダー＆スポーツサイドガーニッシュ

アルミフェンダーの採用により、従来車比2.3 kg(54%低減)の軽量化を実現した(図18)。

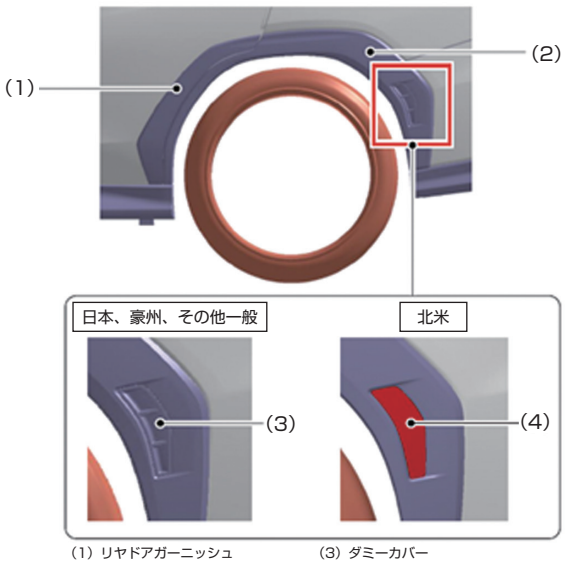
また、フロント及びリヤフェンダーには空力テクスチャー(ヘキサゴンパターン)を使用したスポーツサイドガーニッシュを採用し、外観の一体感を図るとともに、機能感を表現した。さらにフロントエアアウトレットを設定し、操縦安定性を向上させている(図19、20)。

図 18　アルミ製フロントフェンダー



(1) フェンダーガーニッシュ
(2) エアアウトレット
(3) タイヤ
(4) マッドガード
(5) フェンダー

図 19　フロントスポーツサイドガーニッシュ



(1) リヤドアガーニッシュ
(2) リヤクォーターガーニッシュ
(3) ダミーカバー
(4) サイドリフレックスリフレクター

図 20　リヤスポーツサイドガーニッシュ

6.3.3　サイドシルスポイラー

空力テクスチャー（ヘキサゴンパターン）を使用したサイドシルスポイラーを採用して外観の一体感を図るとともに、機能感を表現した。また、乗降性に配慮しながらも下面幅を確保することで、空力性能を向上させるとともに、断面には曲率を持たせることで、剛性を高めるとともに石はね音の低減を実現した（図21）。

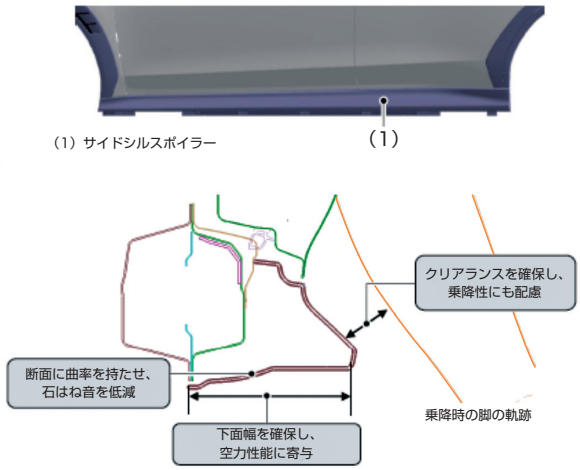


図21　サイドシルスポイラー

6.4　サンルーフ

サンルーフ作動機構（スライダー、レールなど）を見直して簡素化することで、薄型化および軽量化し燃費や操縦安定性への影響を最小限にとどめた。

ディフレクターの樹脂化と形状の工夫により、気圧変動により生じる耳の圧迫と風切り音を抑えている。また、作動機構を見直し、従来型比で開口量を15 mm拡大、厚さ3 mm減、重量約500 g減を実現した（図22）。

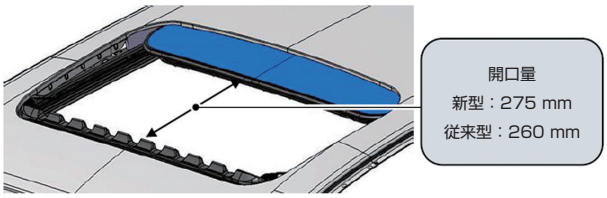


図22　サンルーフ

6.5　空力性能

6.5.1　エンジンアンダーカバー

エンジンアンダーカバーに操縦安定性ビードを設定し、ダウンフォースを発生させることで、直進性と接地感を向上させた。また、空力用ビードも設定することで、下面の空気の流れを整え、空力性能を向上させている（図23）。

さらに、エンジンアンダーカバーに空力性能を向上させるテクスチャーを採用し、空気抵抗を低減させている（図24）。

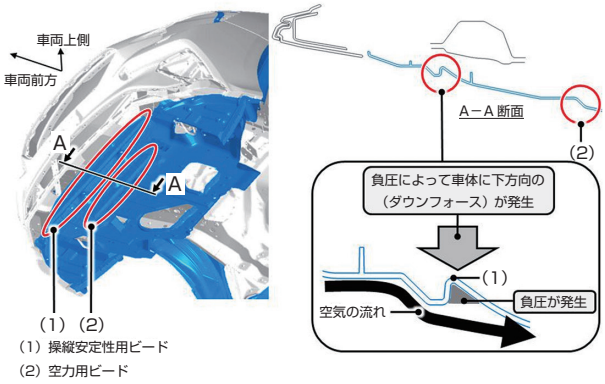


図23　エンジンアンダーカバーの空力向上

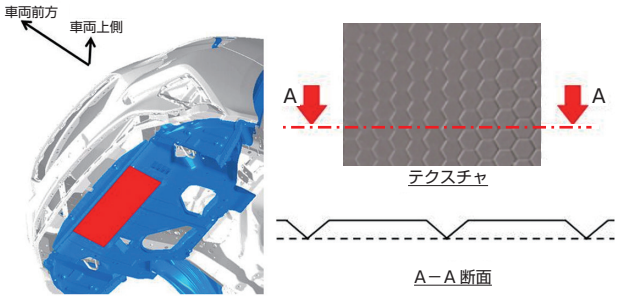


図24　アンダーカバーのテクスチャーイメージ

6.5.2　マッドガードフロント

マッドガード前壁にエアスリットを設定した。これによりエンジン房内圧を下げることができ、床下流れと側面流れとの干渉を抑えることにより、背面圧力を低減させて空気抵抗を低減している（図25）。

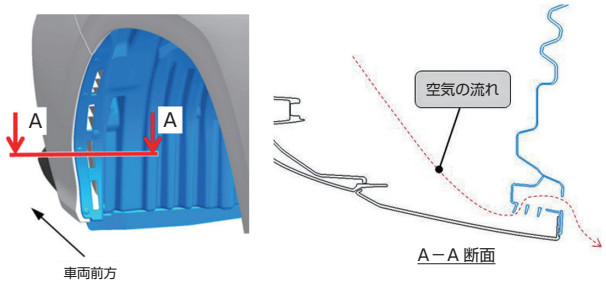


図25　マッドガードフロントのエアスリット構造

6.5.3　トランク後端形状

トランク後端にキックアップ形状を設定し（図26）、車両後方の空気性能の向上を行った。車両後方での渦発生を抑えることにより、車両後方の負圧を減少させ（図27）、空気抵抗を低減させることで、燃費向上を実現している。

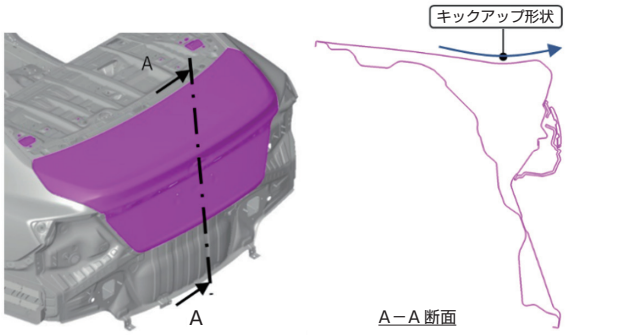


図 26　トランク形状

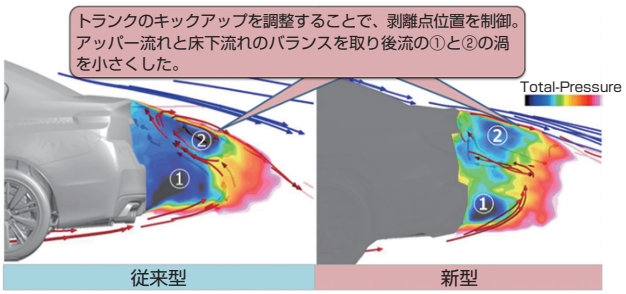


図 27　負圧減少

7.　内装

新型 WRX の内装は、「安定」「安心」「愉しさ」の3軸を起点にスポーティ性に先進性が融合した空間を創出することを開発テーマとした。

包まれ感と触れるところの細部にまで拘った心地の良い形状や素材感を付与し、先進的なデジタルコックピットが革新のパフォーマンスセダンとしての価値をさらに向上させている（図28）。

図 28　国内　STI Sport R グレード

7.1　インパネ&コンソール

LEVORG でも好評である、SUBARU インテリアの3軸を起点としたスポーティな空間表現を踏襲した。詳細は別章を参照いただきたいが、大型 CID を中心に機能を集約した先進感、座った瞬間に走りだしたくなる気持ちを高めるコックピットとした。また、海外展開向けの MT 用コンソールはこのインパネにふさわしい造形で新製した（図29）。

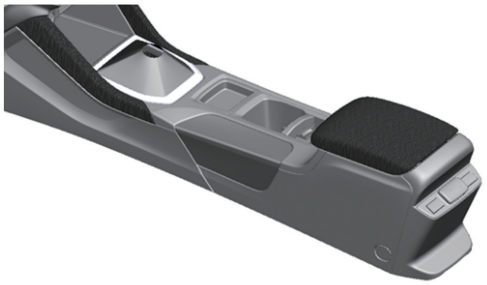


図 29　MT センターコンソール

7.1.1　インパネ MID 加飾

インパネ MID 加飾は、LEVORG と同じ PVC 表皮巻きタイプのほかに樹脂原着タイプの2種類を設定し、世界展開での幅広いグレードマネージメントに対応できる構成とした。表皮巻きタイプは赤色のステッチを施しスポーティさを演出している。また一部の上級グレード*には、ステッチを境に上側表皮にヌバック調人工皮革を使い上質さとスポーティさを演出した仕様を設定している（図30）。

＊仕様は展開国により違いがあります（以下同様）。

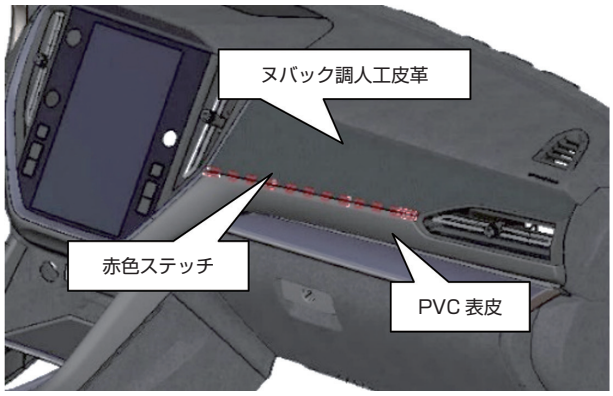


図 30　インパネ MID 表皮

7.1.2　MT センターコンソール*

快適なシフト操作性を考慮し、カップホルダやリッドの位置を最適化するなど従来車から再設計した。カップホルダにペットボトルを立てた状態でも、シフト操作を阻害しないクリアランスを確保している（図31）。

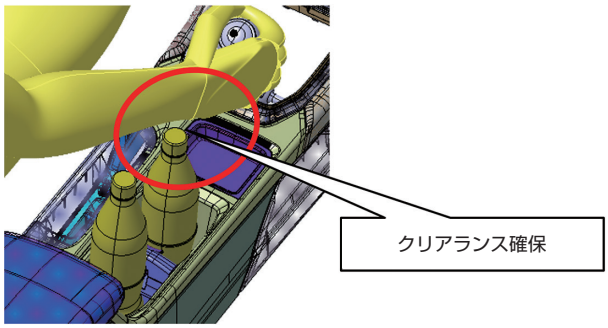


図 31　シフト操作時のクリアランス

またシフトレバー前には、スマートフォンなどを収納することが出来る、従来型より拡大したポケットを設定した(図32)。

図 32　シフト前ポケット

後席空調なし車*には、コンソール背面にも後席乗員用の収納トレイを設定し、利便性の向上を図った(図33)。

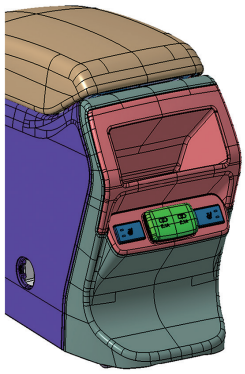


図 33　コンソール背面収納トレイ

7.2　レカロシート

SUBARUの安全性や利便性、レカロのスポーツ性能の両立を目標とし、新型レカロシートを開発した。快適性とサポート性を両立するとともに、スポーツ志向をより高めたシート形状を実現、さらにシート表皮にはウルトラスエード®を採用し質感を高めている(図34)。

図 34　新型と従来型レカロシート比較

7.2.1　形状

シートバックレスト中央にY型デザインを採用することで、体幹から肩甲骨を支えるというレカロの座り心地に対する設計思想を具現化した。さらにコーナリング時のハードな横Gにも対応するサイドサポートの採用などによって、従来型レカロシートを上回る高いスポーツ性を備え、高次元で快適性とスポーツ性を両立させている(図35)。

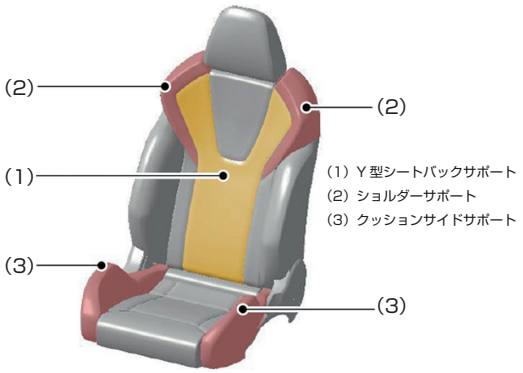


図 35　新型レカロシート形状

7.2.2　座り心地向上

座り心地を向上させるため、次の4つの構造変更を採用した。

1) 大腿部横のクッションサイドサポート高さを拡大、かつフレーム部にワイヤーを追加してホールド性を向上するとともに、太もも付け根付近のクッションサイドサポートの高さを抑えることで着座時の窮屈感を軽減した(図36)。

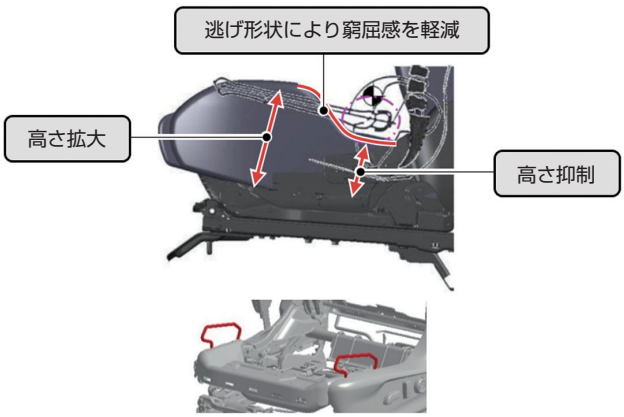
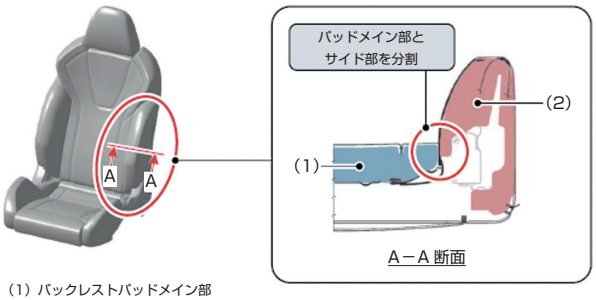


図 36　クッション部のサイドサポート形状

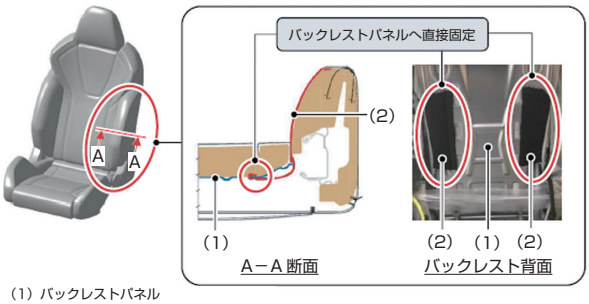
2) バックレストパッドのメイン部とサイド部を分割することで、コーナリング時のメイン部の変形を抑制し、乗員の姿勢安定性を向上させた(図37)。



(1) バックレストパッドメイン部
(2) バックレストパッドサイド部

図 37　バックレストパッド断面

3) パッドの分割構造とともに、バックレストサイドカバーの固定方法も変更。従来型のパッド内にインサートされたワイヤーへの固定構造から、新型車ではバックレストパネルへの直接固定構造に変更し、コーナリング時におけるサイドカバーの変形を抑制し、安定したサイドサポートを実現した(図38)。



(1) バックレストパネル
(2) バックレストサイドカバー

図 38　バックレストカバー部構造

4) バックレストパネルにはレカロ専用設計のソリッドパネルを採用し、骨盤の動き(回転)を抑制し、高いサポート性を実現した(図39)。

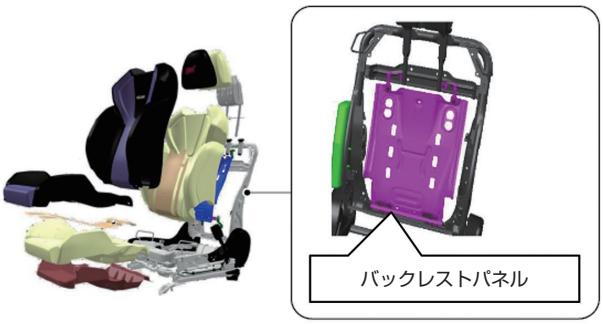


図 39　バックレストパネル

7.3　後席

後席にシートヒータ*を設定し、後席乗員の快適性を向上させた。乗員の体圧に合わせ、熱線のレイアウトを最適化し、より効果的に温めることができるシートヒータとしている。また、好みや気温に合わせた、2 段階の温度調節とし、センターコンソール後部に、後席用のシートヒータースイッチを設定して後席乗員の利便を向上させている(図40)。

(1) 後席シートヒータースイッチ

図 40　後席用シートヒータ

7.4　トランクルーム

VIZIV PERFORMANCE CONCEPT のスポーティなトランク造形と日常での使い勝手を犠牲にせずしっかりと荷物を搭載できることを開発目標としてディスカッションを繰り返してきた(図41)。

図 41　開発時の搭載確認の事例

例えば、トランクトリムでは、部品を3分割することで成形限界を超えた荷室幅寸法の拡大を実現した(図42)。

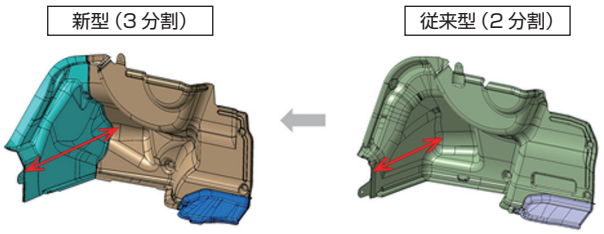


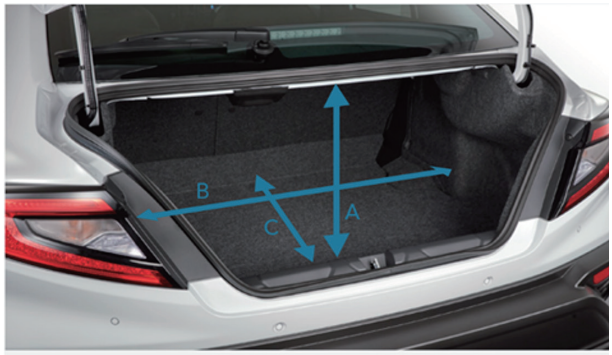
図 42　新型と従来型のトランク SD トリム比較

また、トリムと車体との隙間の最小化などもおこないながら荷室空間の拡大を図っており、従来車で積載できたものは新型車でも搭載できる工夫をしている(図43)。

7.5　コンビネーションメータ

コンビネーションメータのマルチインフォメーション画面及び、国内向け12.3インチフル液晶メータの基本画面エリアに、ブースト計表示を追加し、2.4L ターボ車

専用のスポーティな走りを演出した(図44、図45)。



	従来型	新型（　）は従来型比
A：荷室面～リヤパネル間高さ [mm]	492	500（＋8）
B：荷室幅（ホイールハウス間）[mm]	1080	1100（＋20）
C：荷室フロア奥行き [mm]	1006	1001（－5）

図 43　トランク寸法

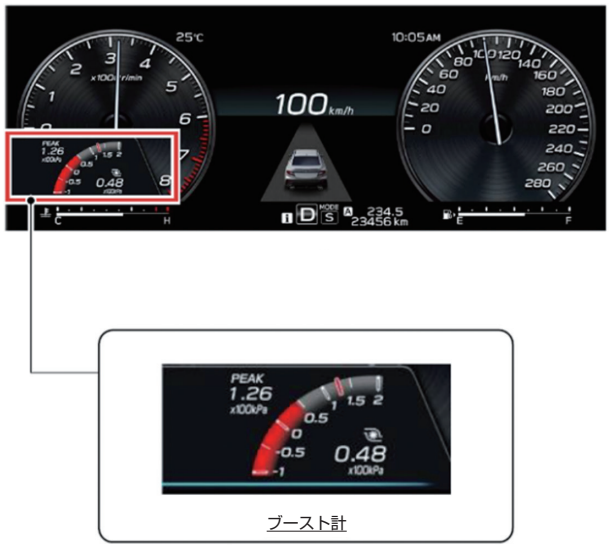


図 44　12.3 インチ フル液晶画面

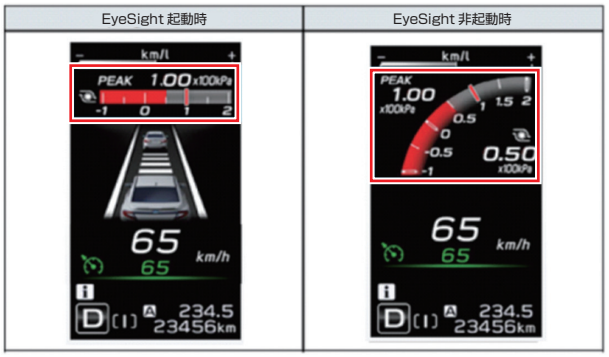
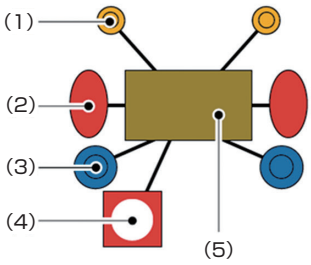


図 45　4.2 インチマルチインフォメーション画面

7.6　harman/kardon®オーディオシステム*

北米、豪州、一般向けの一部グレードに、harman/kardon®オーディオシステムを搭載した。すべての座席で高品質な音楽を愉しめるオーディオシステムであり、コンサート会場で生演奏を聴いているような、自然な音響空間を実現している(図46)。



(1) インストルメントパネルサイドスピーカー　(4) リヤシェルフスピーカー
(2) フロントドアスピーカー　(5) 8 ch アンプ
(3) リヤドアスピーカー

スピーカー	口径、タイプ	再生周波数範囲
インストルメントパネル サイドスピーカー	80 mm + 16 mm コアキシャルスピーカー	250 Hz ～ 20 kHz
フロントドアスピーカー	7 × 10 in ウーファー	40 Hz ～ 1.6 kHz
リヤドアスピーカー	170 mm + 25 mm コアキシャルスピーカー	80 Hz ～ 20 kHz
リヤシェルフスピーカー	265 mm サブウーファー	40 Hz ～ 1.0 kHz

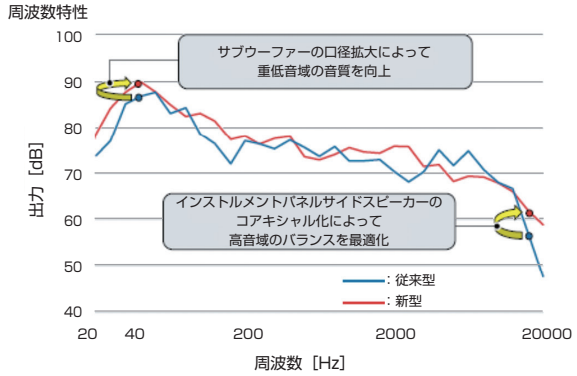


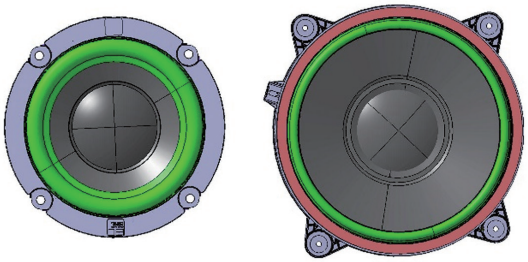
図 46　オーディオシステム概要

7.6.1　パワーアンプ

Harman社のGreenEdge®システムを採用した。高能率のスピーカーと、それに合わせて最適に設計されたパワーアンプの構成であり、従来の、車両配線や回路内部で損失していた電力を極限まで排除した。これにより、中小音量時は低消費電力であり、大音量時は状況に応じて従来システムよりも大きな音量を出力可能とした。加えて、Harman社の圧縮音源復元技術Clari-Fi™を採用し、データ圧縮により失われた音楽成分をCD相当の音質まで復元が可能にした。リアルタイムの演算処理によって、MP3やAAC、また異なる圧縮率の音源をそれぞれ適切な補正量で復元可能としている。

7.6.2　スピーカー

リヤシェルフに搭載するサブウーファーの口径を、従来型の200 mmからSUBARU最大サイズである265 mmへ大口径化したことで、さらに迫力のある重低音の再生を可能とした(図47)。



従来型 WRX 用（200 mm）　　新型 WRX 用（265 mm）

図 47　大口径サブウーファー

8.　パワーユニット

8.1　エンジン

新型WRXに搭載する専用エンジンとして、北米ASCENT、OUTBACK、LEGACYに搭載されているレギュラーガソリン仕様の2.4L水平対向直噴ターボエンジン（FA24）をプレミアムガソリンに対応させ採用した。ベースとなるFA24は、2.0L水平対向直噴ターボエンジン（FA20）をベースにボア径を拡大することで排気量を2.4Lとし、環境性能、動力性能、振騒性能、軽量化を高次元でバランスさせたエンジンであり、低速から力強く、リニアなトルクの立ち上がりを実現している。

8.1.1　開発の狙い

新型WRXのパワーユニットには、パフォーマンスカーとしてのさらなる価値向上のため、現行WRX以上のエキサイティングな性能が求められる。環境規制に対応させつつ求められる性能を実現させるため、プレミアムガソリン化によりノッキング限界を向上させて、低速域から力強いトルクを発生、さらに変速制御を備えたリニアトロニックとの協調制御を強化する事で、現行WRX以上の加速性能を実現させる事を開発の狙いとした（図48）。

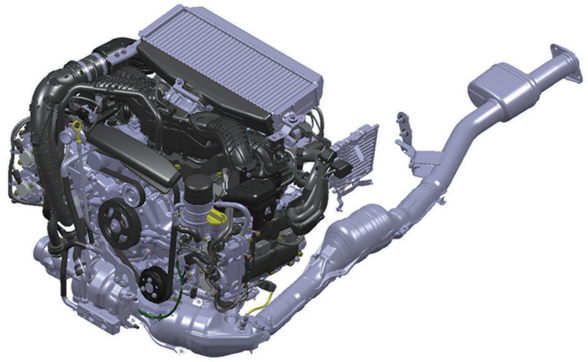


図 48　新型 WRX 用 FA24

8.1.2　エンジン主要諸元と主要変化点

表3に北米向けの新型WRX用FA24エンジンの主要諸元、表4にFA20に対する主要変化点を示す。FA20に対して、排気量拡大、燃焼改善、冷却改善によるノック限界を向上させて環境規制に対応させつつ、出力向上を実現させた。

表 3　エンジン主要諸元（北米仕様）

	新型 WRX 用 FA24	（参考）FA20
エンジン型式	FA24	FA20
配置	水平対向	水平対向
燃料供給方式	筒内噴射	筒内噴射
使用燃料	ガソリン 91AKI	ガソリン 91AKI
気筒数	4 気筒	4 気筒
総排気量	2387 cm^3	1998 cm^3
最高出力	271 HP/5600 rpm	268 HP/5600 rpm
最大トルク	350 N・m/ 2000 − 5200 rpm	350 N・m/ 2000 − 5200 rpm
排ガス規制対応	Tier3 BIN125/ LEV3 ULEV125	Interim・Tier3 BIN160/LEV2 LEV + Optional LEV3
吸気方式	過給吸気	過給吸気
弁機構	DOHC4バルブ	DOHC4バルブ
駆動方式	タイミングチェーン	タイミングチェーン
動弁系デバイス機構	吸気／排気 AVCS	吸気／排気 AVCS
ボア×ストローク	94.0 × 86.0 mm	86.0 × 86.0 mm
圧縮比	10.6	10.6

表 4　FA20 に対する主要変化点

変更目的	燃費向上	出力向上	NVH改善	法規対応	軽量化
本体構造系	◎	○	◎	○	◎
主運動系	◎	○	○		◎
動弁・動弁駆動系	◎	○	◎		◎
潤滑系	◎				◎
冷却系					○
吸気系	◎	◎	◎	◎	◎
排気系	◎			◎	◎
燃料系	○	○	○	◎	
電装系	○	○		◎	◎

◎：主目的
○：◎に付随

8.1.3　出力性能

図49に北米向けの出力特性を示す。FA20に対して、排気量UP、吸気系形状変更による吸気圧損の低減、筒内ガス流動の強化、主機冷却および吸気冷却性能の強化などによりノッキング限界を向上させた。これにより、低回転域及び、高回転域のトルクを向上させている。

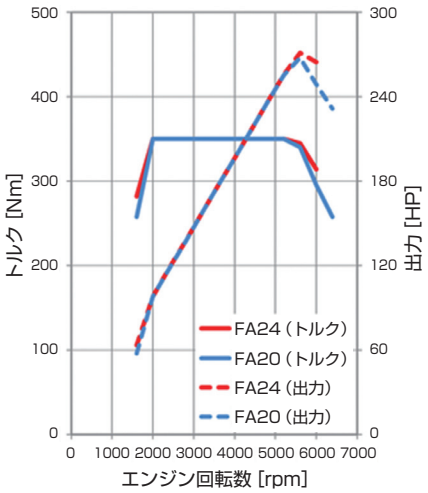


図 49　トルクカーブ（北米向）

8.1.4　加速性能

図50にアクセル全開踏み込み加速時の車両加速度を示す。新型WRXは、排気量UP、ターボチャージャのウェイストゲートバルブ、エアバイパスバルブの電制化による制御の緻密化、新しい変速制御を備えたリニアトロニックとの協調制御により、従来型WRXに対して人が加速したと感じるまでの時間を約29%短縮し、アクセル操作にリニアに対応できるようにした。

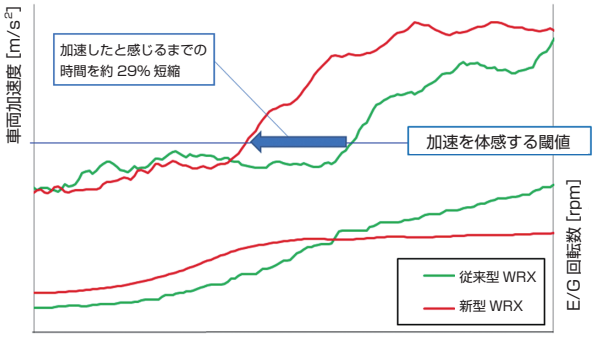


図 50　アクセル全開時踏み込み時の車両加速度

8.1.5　振騒性能と軽量化の両立

振動と騒音低減を目的に、エンジン全体として主運動系と動弁系、シリンダブロック、オイルパンアッパ等のエンジン構造系部品の最適化や補剛をおこない、振動伝達と放射音の低減を図った。

振騒性能の背反となる質量に対しては、フルASSY解析を行うことで全体最適を図った。また、樹脂化による材料置換や構造合理化などにより、FA20に対して4.6 kgの軽量化を図った。

8.2　クーリングシステム

パフォーマンスカーとしてスポーツ走行に耐えうる冷却耐力向上を目標に開発を行った。

8.2.1　ラジエータサイズの拡大

ラジエータのコア投影面積を従来型比で6.5%の拡大を行った（図51）。

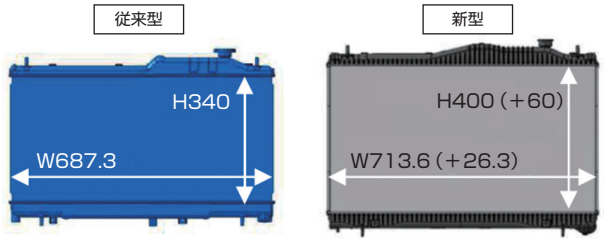


図 51　ラジエータ比較

8.2.2　ラジエータコア次世代化

ラジエータコアの単位面積当たりの放熱効率を従来型比で約9%の向上した。

8.2.3　ラジエータファン大径化

ファンの有効外径を従来型比で12.9%拡大した（図52）。

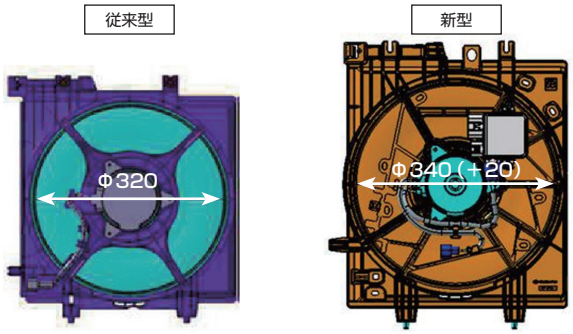


図 52　ラジエータファン比較

8.2.4　ラジエータファンモータ出力向上

出力230Wのファンモータを採用してラジエータへの風量を増加させ、放熱効率を約9.8%向上させた。またファンモータ制御は直並列制御から、PWM（パルス幅変調）制御に変更し、ファンの回転をスムーズに可変することで、振動と騒音の低減を実現している。

8.3　トランスミッション

新型WRXのコンセプトに従い、トランスミッションは大きく進化させた。

オートマチックトランスミッションは、2018年のASCENTから採用したリニアトロニックに刷新したスポーツ変速制御を織り込み、さらにWRX伝統的のVTDセンターデファレンシャルに新たな基軸の制御を織り込み、AWDスポーツ用のオートマチックトランスミッションとしてトータルに進化させたスバルパフォーマンストランスミッションを採用した。

マニュアルトランスミッションは、SGPへの搭載にあたり、動的質感向上を織り込んだ。

リヤデフは従来型と同仕様を継続採用した。

8.3.1　スバルパフォーマンストランスミッション

SUBARUのオートマチックトランスミッションの中で、大容量かつ高付加価値のトランスミッションとして位置付けられた大容量リニアトロニック(TR690)は、2009年の5代目LEGACYに初めて搭載されて以降、これまで各車系に適用設計されてきた。2018年ASCENTには、発進デバイスと主変速部バリエータを大きく刷新したTR690をリリース。そのTR690をベースに、WRXに伝統的に採用されてきたVTDセンターデファレンシャルを組み合わせ、また、新型WRXにふさわしいスポーツ変速制御を新たに開発してトータルに進化させた(図53)。このため新たにスバルパフォーマンストランスミッションと名づけた。

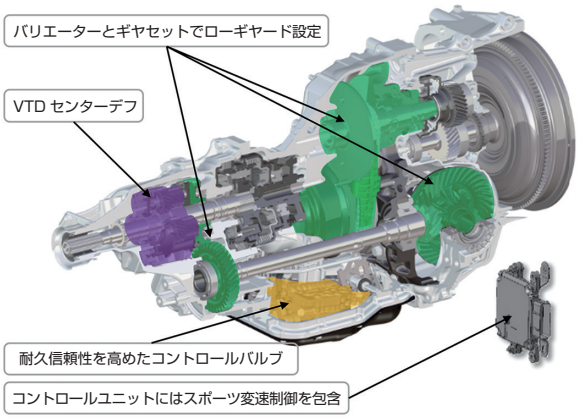


図 53　スバルパフォーマンストランスミッション仕様概要

(1) 動的質感の向上

レシオカバレージを拡大(6.91←6.43)したバリエータにローギヤード化したトランスファギヤを組み合わせて、WRXに求められる動力性能と最高速をトータルでバランスさせたギヤ比としている。前後進切替機構はダブルピニオン化してリバースギヤ比をローギヤード化した。トルクコンバータは流体性能を変更しダンパー剛性を適正化することで、走りの軽快さを確保し振動と騒音の低減を図った。

変速制御には新たにスポーツ変速制御を開発し、上述のハードウェアと組合わせることで、ハードとソフトウェアの両面から、動的質感向上の最大化を図った。エンジンとの協調制御をより深めることで、アップシフト時のクイックなトルクダウン制御を実現し、変速を終えるまでの時間を30%短縮(2→3速)。ダウンシフト時にはブリッピング制御を加えて同時間を50%短縮(3→2速)させた(図54)。

また、SI-DRIVEで実現される各変速モードも変更し、従来型ではアクセルペダルの高開度時にオートステップ変速としたSモードを、S♯モードと同じく全域8速固定段制御とした他、アップシフトとダウンシフトのスピードはモード毎に変化をつけて、実現出来る特性の幅を拡げている(10.走りへのこだわりを参照)。

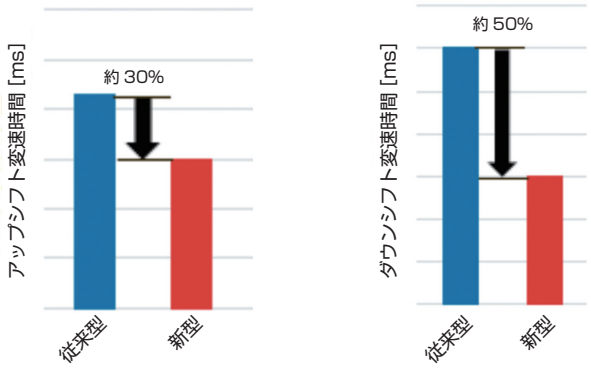


図 54　変速時間の比較

(2) 燃費の向上

レシオカバレージを拡大したバリエータとリダクションギヤ、トランスファギヤ、そしてファイナルギヤ比を最適に選択したことで、動的質感と燃費性能の両立に寄与した。また、ISS用電動オイルポンプの採用により、アイドリングストップを実現し燃費向上に寄与した。

(3) トランスミッション諸元と変化点

2018年のASCENTで刷新したTR690をベースに、新型WRX用に適用設計した(図55、表5)。

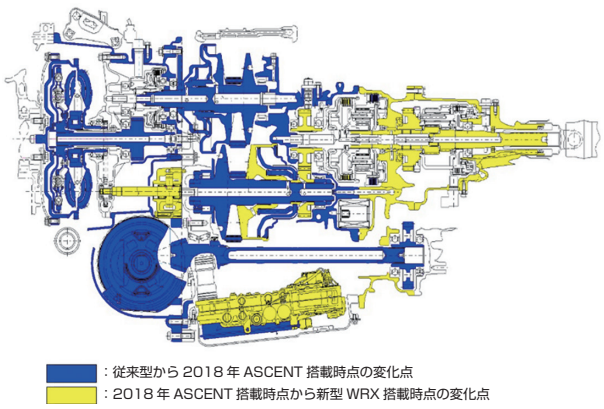


図 55　変化点

表 5　諸元

	新型	従来型
許容入力トルク [Nm]	375	400
レシオカバレージ	6.91	6.43
ギヤ比　LOW	3.490	3.106
OD	0.505	0.483
リバース	3.393	2.081
トランスファー	1.081	1.000
ファイナル	4.111	4.111

※国内仕様

①チェーン・バリエータ

プーリーコーン外径の変更によりレシオカバレージを6.43から6.91に拡大し、レシオの幅を拡げた(図56)。また、チェーンピッチやロッカーピンの端面形状を最適化し、トランスミッション単体で最大40%のチェーンノイズレベルを低減させた(図57)。

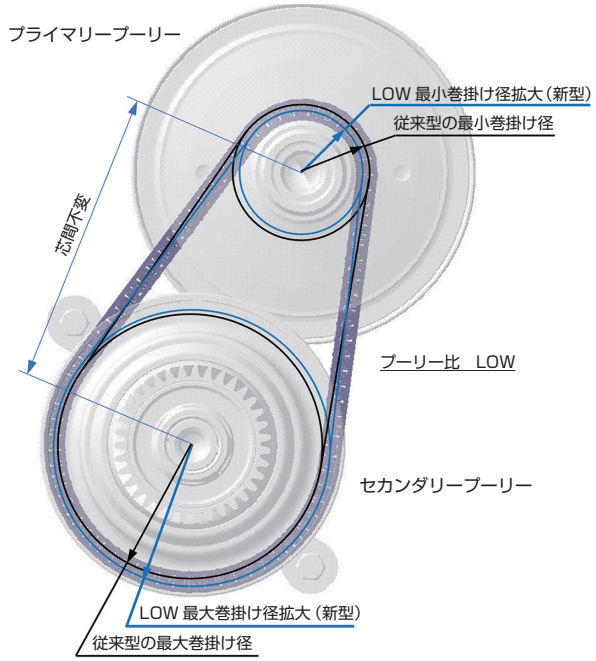


図56　レシオカバレージの拡大

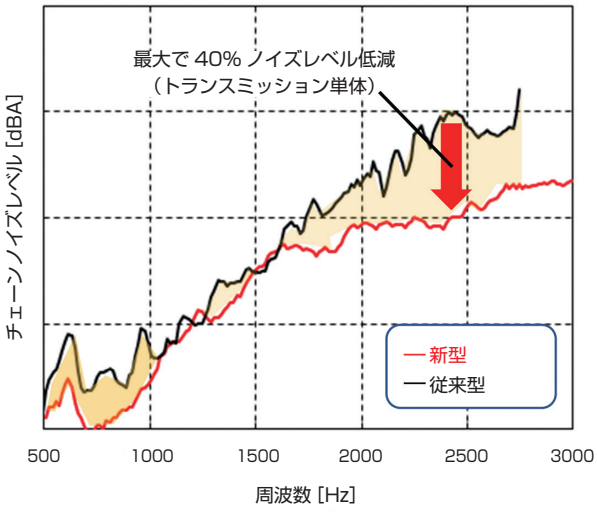


図57　チェーンノイズの低減

②トルクコンバータ

流体性能を適正化してWRXの軽快な走りに貢献し、イナーシャマスとダンパー特性の最適化で振動・騒音性能を向上させた。また、ISS採用に合わせて、リングギヤ諸元を変更した。

③低粘度CVTフルード

撹拌抵抗低減のために新しいCVTフルードを採用した。40℃の動粘度を約24%低減させている(図58)。

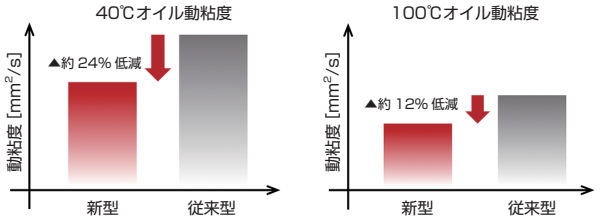


図58　フルード低粘度化

④油圧コントロールバルブ

油圧ロスの低減のためセカンダリー圧独立制御を採用し、それを従来型と同じ寸法で油圧回路を成立させるためリニアソレノイドを小型化した。また、AWD制御の制御性向上のため、LSDクラッチ制御にリニアソレノイドを採用した(図59)。さらに、スポーツ変速制御の変速速度と変速頻度に対応するため、プライマリーアップシフトバルブの摩耗耐力を高める変更を織り込んだ。

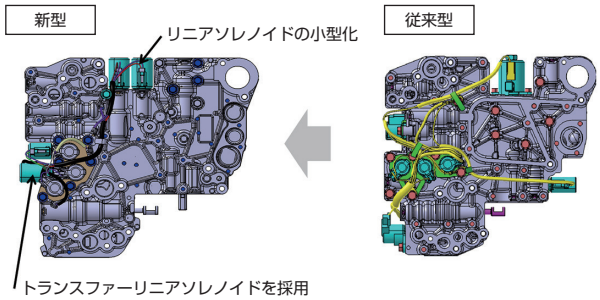


図59　コントロールバルブ

⑤クラウンギヤ溶接ディファレンシャルギヤ

撹拌抵抗の低減のため、クラウンギヤをボルト締結から溶接に変更したディファレンシャルを採用した。また、同時に同目的でバッフルを追加した(図60)。

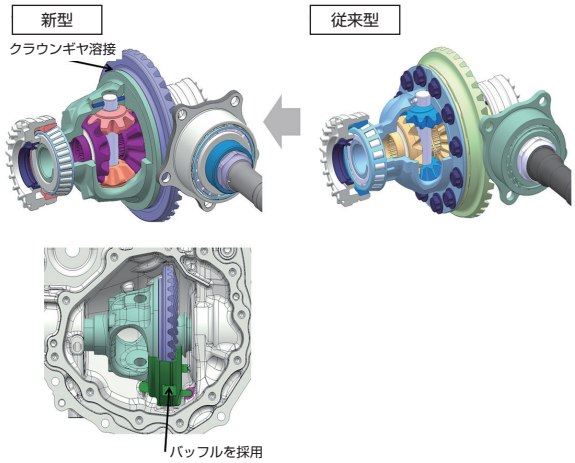


図60　ディファレンシャルギヤ

⑥電動オイルポンプ

燃費向上に貢献するため、ISS用の電動オイルポンプを採用した。

8.3.2　マニュアルトランスミッション*

基本設計を継承しながらSUBARUの小型系を支えてきたTY75は、新型WRXへの搭載に対してもさらなる改良を行なった。

(1) ギヤ比の最適化

924DIB-Rの性能を引き出し、新型WRXの動力性能と燃費性能を両立させるため、仕向地毎に最適なギヤ比を選択した(**表6**)。

表６　TY75 ギヤ比一覧

		主変速	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	Rev	TRF	Final
新型	北米	LJ	3.454	1.947	1.366	1.029	0.825	0.666	3.636	1.000	4.111
	欧州・豪州・一般	LJ	3.454	1.947	1.366	1.029	0.825	0.666	3.636	1.000	4.444
従来型	北米	LB	3.454	1.947	1.296	0.972	0.780	0.666	3.636	1.000	4.111
	欧州・豪州・一般	LJ	3.454	1.947	1.366	1.029	0.825	0.666	3.636	1.000	4.444

(2) 動的質感の向上

振騒性能が向上し暗騒音が下がったスバルグローバルプラットフォーム(SGP)に搭載するため、ギヤ音の改善を行なった。2速と3速のドリブンギヤの歯面仕上げをシェービングからフォーニングに変更。雪害カバー上に制振材：レジェトレックスを追加した。

(3) 品質の向上

TY75はその長い歴史を通して、絶え間ない品質向上策を織り込んできた。この新型WRXへの搭載に際して、より多くのお客様により安心して末永く所有いただけるよう、改めて品質レベルアップのポイントを洗い出し、4速ワッシャーの硬度アップを織り込んだ(**図61**)。

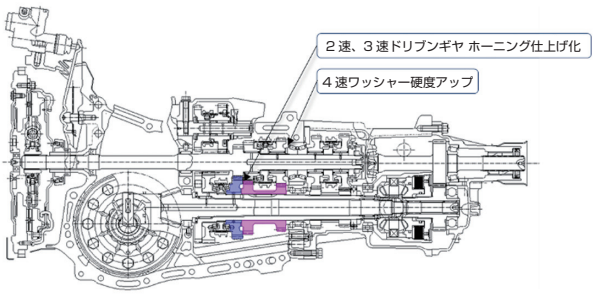


図 61　TY75　主要変化点

8.3.3　リヤデファレンシャル

新型WRXに対して、R167リヤデファレンシャルを従来型から継続採用した(**図62**)。

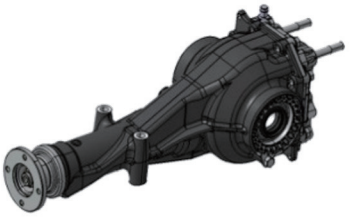


図 62　R167 リヤデファレンシャル

9.　シャシ

新世代SUBARUを代表するスポーツモデルとして、新型WRXがこだわったのは「エキサイティングに意のままに操る自在性」。クルマがまるで自分の手足の延長であるかのように、緻密でスムーズに動くことにより、車の運転自体を愉しみ非日常感を体感できるとともに安心感のあるストレスフリーな走行を実現している。日常のシーンはもちろん、非日常でのロングドライブ、曲がりくねったワインディング、さらには悪天候下でさえ、クルマを意のままに操れる気持ちよさでどんな場所でも安心安全に移動でき走りの愉しさを感じていただけるよう開発した。

9.1　サスペンション

新型WRXにスバルグローバルプラットフォームを採用するにあたり、パフォーマンスセダンにふさわしい走りの実現のために、足まわりの諸元を再構築した。サスペンションが素直にその役割を果たせるレイアウトとし、実用サスペンションストロークを、フロント約5%、リヤ約20%増加させることで、乗り心地を向上させた。これにより、パフォーマンス性と実用性兼ね備えマルチに愉しめる走りを提供するための操縦安定性、乗り心地、静粛性のすべてを高い次元で両立させ、その安心感のある操舵性能や乗り心地により、運転自体を愉しみながらどんな場所でも安心・安全に移動できる快適な走りを実現させている。

9.1.1　フロントサスペンション

図63にフロントサスペンション構成を示し、各部詳細を以下に記載する。

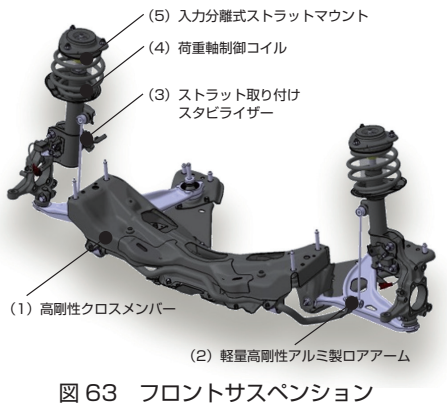


図 63　フロントサスペンション

(1) 高剛性クロスメンバー

車両の応答性を高めつつ、タイヤやエンジンからの振動伝達を遮断するため、高剛性サスペンションクロスメンバーを採用した。さらにK型ブレースの追加により横曲げ剛性を向上して操舵時のロアアームからの入力によるクロスメンバーのたわみを抑制している。

(2) 軽量高剛性アルミ製ロアアーム

全車にアルミ製ロアアームを採用。高剛性化と軽量化を両立させた。

(3) ストラット付けスタビライザー

スタビライザーの取り付けをロアアームからストラットへ変更して効率を上げることで、ロール剛性を約20%向上させた。これにより車両全体のロール剛性を高めつつ前後のロール剛性バランスを車両重量配分にあわせて最適化した(図64)。ロール軸の前傾化とあわせて、操安性の向上させるとともに、コーナー進入にノーズが自然にインに入り込んでいく気持ち良いフィーリングを実現した。

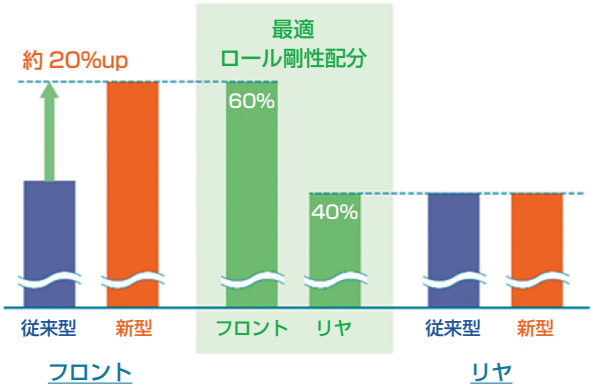


図 64　ロール剛性の最適化

(4) 入力分離ストラットマウント

ヘルパーとダンパーの入力のみマウント本体ゴムを介して車体に伝達し、コイルの入力は直接車体に伝達する入力分離構造を採用した。振動騒音性能と操縦安定性を両立している。

(5) 荷重軸制御コイル

コイル上部とストラットマウントとの接触形状を最適化することでコイルの反力方向を安定させ、ダンパーのフリクションを低減することで乗り心地を向上した。

(6) マスオフセットの低減

正確で応答性が高く、すっきりとしたステアフィールを実現するため、従来車比でマスオフセットを大幅に低減した。ロアアームとハウジングをつなぐボールジョイントの締結構造を変更してジョイント中心を車両外側へ移動させ、操舵時の回転中心軸とホイール中心を近づけたことによって、より小さなアシスト力で転舵できるとともに路面からの外乱で舵が乱されにくくした(図65、図66)。

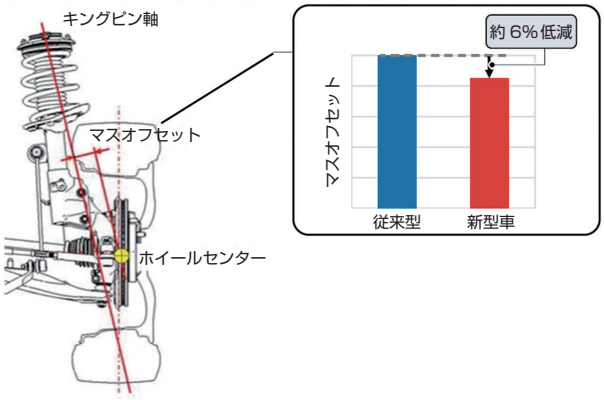


図 65　サスペンション構成（イメージ図）

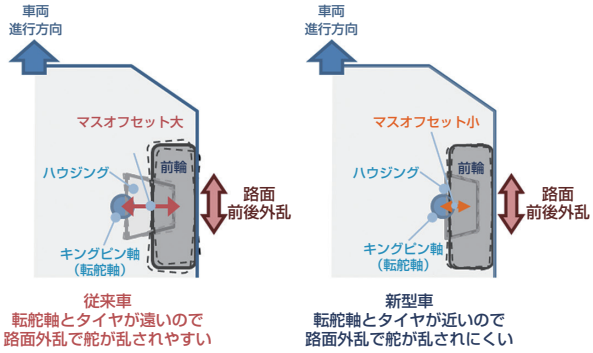


図 66　マスオフセットの低減効果イメージ

9.1.2　リヤサスペンション

図67にリヤサスペンションの構成を示し各部詳細を以下に記載する。

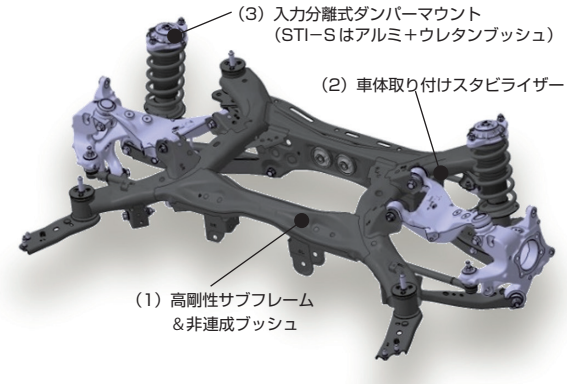


図 67　リヤサスペンション

(1) 高剛性サブフレーム＆非連成ブッシュ

高剛性のサブフレームと非連成ブッシュの採用により、車両の応答性を高めつつ、タイヤ等からの振動伝達を低減した。

(2) 車体取り付けリヤスタビライザー

スタビライザーの取り付けをサブフレームから車体に変更したことで、車体の揺れを低減させた。

(3) 入力分離式Rrダンパーマウント

コイルからの入力とダンパーからの入力経路を分離し、ダンパーからの振動伝達をより効率良く低減することで、振動騒音性能を向上させた。更に電制ダンパー採用車は、ダンパー伝達部のブッシュをゴムからウレタンに、ハウジング部を鉄から軽量高剛性のアルミへ変更し、振動騒音性能と乗り心地を一層高めつつ、軽量化も果たしている。

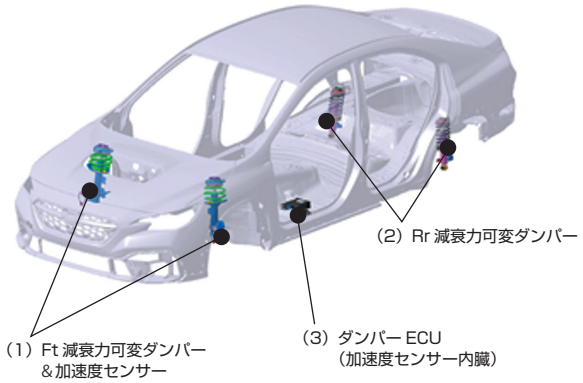


図 69　電子制御ダンパーシステム構成

9.1.3　電子制御ダンパーシステム

ZF社製電子制御ダンパーシステムを一部グレード*に採用した。システムが路面や車両の走行状況に応じてリアルタイムにダンパーの減衰力を最適制御することで、操縦安定性や乗り心地を飛躍的に向上させ、ロングドライブでの快適な走りと、スポーツ走行時の意のままに操る愉しさを高い次元で両立させた(図68)。

(1) システム概要

フロントシート下、及び左右フロントダンパーに設置された加速度センサーからの情報と、車速、エンジントルク等の車両信号からの情報を複合的に組み合わせて路面や車両の状況を推定、その瞬間における最適な減衰力をコントロールユニットが演算し、リアルタイムに4輪のダンパー減衰力を制御する。これにより、路面の凹凸や段差をいなしつつ、車体の大きなロールやピッチングを抑え、揺れが少なくフラットな乗り心地とロール感の少ないスポーティな操縦安定性を実現した(図69、図70)。

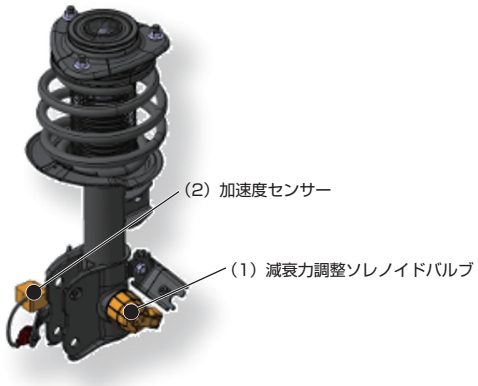


図 70　電子制御ダンパー Ft ストラット部詳細

(2) 減衰力のドライブモードセレクト連携

減衰力設定の異なるComfort/Normal/Sportsの3つのモードを設定し(図71)、ドライブモードセレクトを操作することで、お客様の好みに合わせて減衰力特性を選択可能とした。これにより、乗員や路面状況等に合わせて多様な好みに対応できるようになっている。また、LEVORGに対しても、制御ソフトと伴に

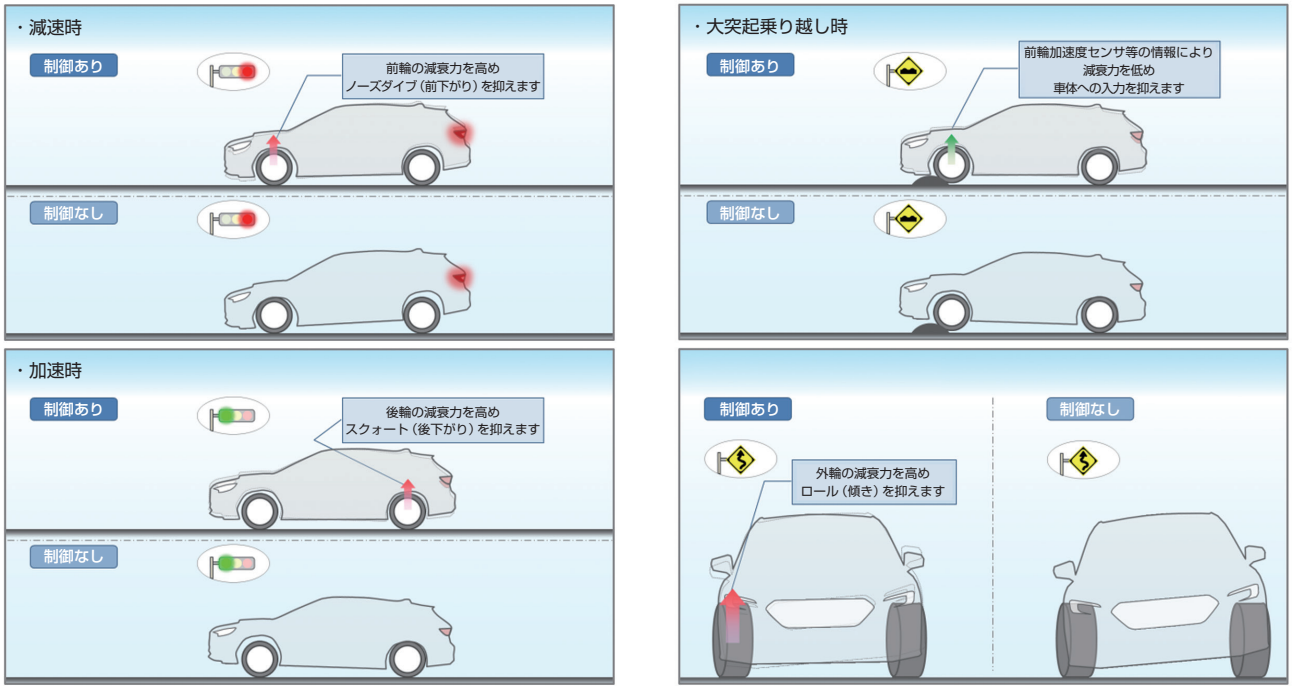


図 68　電子制御ダンパー動作例イメージ

バルブ特性も変更し、減衰力をアップさせつつ変化幅も広げることによりさらにスポーティセッテングとした。

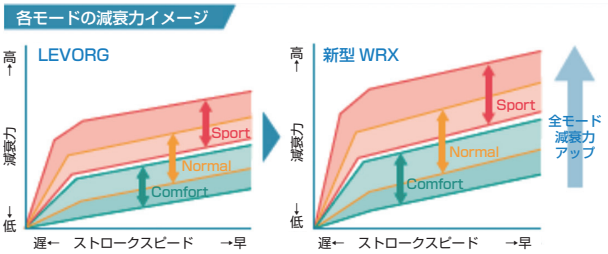


図 71　減衰力可変イメージ（LEVORG 比較）

9.2　ステアリング

9.2.1　電動パワーステアリング

(1) 2ピニオン電動パワーステアリングを全車に採用した。ドライバーのステアリング操作軸をモーターアシスト軸から切り離すことで、これまでモーターアシスト軸にかかっていた操舵初期の抵抗を不要としている（図72）。

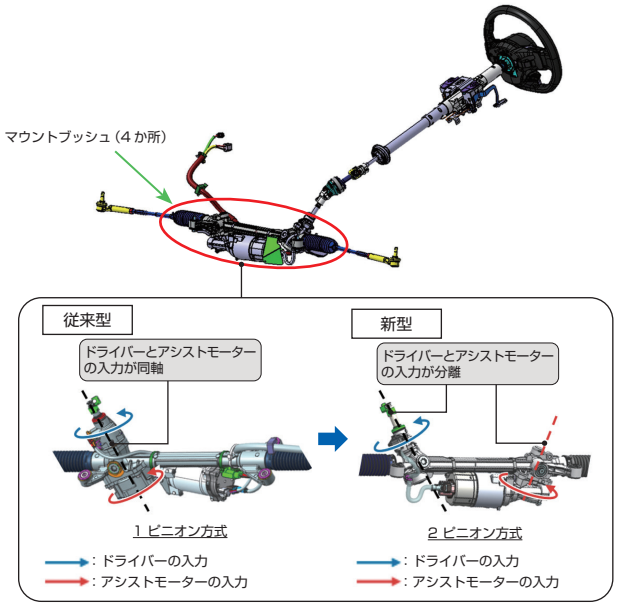


図 72　2ピニオン電動パワーステアリング

新機構のフリクション低減によって、なめらかでリニアなトルク伝達を可能とし、ダイレクトで自然な操舵感を実現するとともに、応答遅れのないスポーティなステアリングフィールを実現した（図73）。

従来型同様、マウントブッシュはハードタイプを採用し、LEVORGに対しさらにスポーティなセッティングとした。

(2) 操舵力のドライブモードセレクト連携

ドライブモードセレクトと連携する操舵力可変機能を搭載した。Comfort/Normal/Sportsの3つのモードを設定（図74）。ドライブモードセレクトを操作することで、お客様の好みに合わせて操舵力特性減衰力特性を選択可能とした。

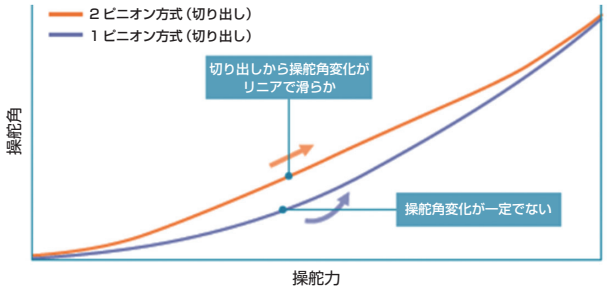


図 73　2ピニオン式の操舵力イメージ

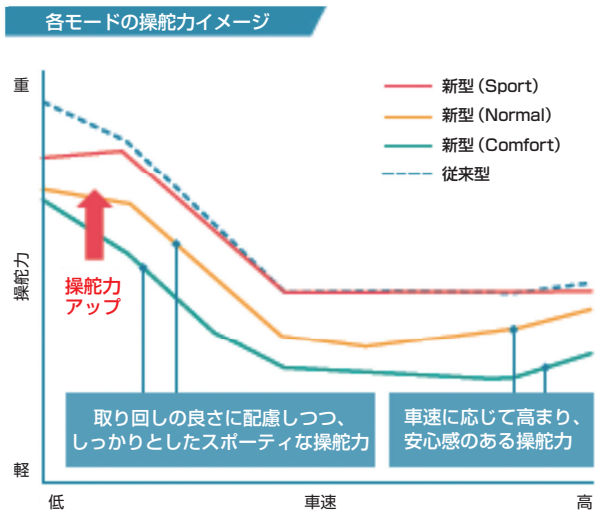


図 74　操舵力可変イメージ

9.3　タイヤ&ホイール

9.3.1　タイヤ

操縦安定性と快適な乗り心地、振動騒音性能を高次元で融合したハイパフォーマンスタイヤ「SP SPORT MAXX GT600A」を専用チューニングした。グレード別に235/45R17と245/40R18サイズを展開している*。

9.3.2　ホイール*

動きのある造形で軽快さとパフォーマンスを余すところなく路面へしっかりと伝える力強さを感じさせるデザインのホイールを採用した（図75）。

9.4　ブレーキ

9.4.1　ブレーキブースター

スポーツリニアトロニック車には電動ブレーキブースターを採用した。従来のVDCユニットによる昇圧よりも優れた昇圧特性により、プリクラッシュブレーキや全車速追従機能付きクルーズコントロール制御時の応答性を向上させ、より衝突回避性能を高めている。

また、負圧ブレーキブースターと同様のリアクションディスクを用いたペダル反力構造を採用すること

17 インチアルミホイール
ダークグレーメタリック

18 インチアルミホイール
マットグレー

18 インチアルミホイール
ブラック＋切削光輝

18 インチアルミホイール
ダークグレーメタリック

図 75　ホイール仕様

で、自然なブレーキフィーリングを実現し、短めのストロークとしながらも、踏力勾配を高くすることでコントロール性と剛性感を確保した。踏んだ瞬間から効く安心感と、短いストロークで剛性感のある、よりスポーティなブレーキフィーリングを実現している。

MT 車には従来車同様に負圧式ブレーキブースターを採用した。

9.4.2　フロントブレーキ

17 インチのベンチレーテッドブレーキを全車に採用した。

1) キャリパーのシリンダーボディ剛性を向上し、シリンダーサイズを小径化して液量ロスを減らすことで、無効ストローク領域を低減した。

2) ディスクローター摺動面厚さを変更し、効きとばね下重量の軽量化の最適化を図った。

9.4.3　リヤブレーキ

従来型同様に、MT 車は機械式パーキングブレーキを採用し、スバルパフォーマンストランスミッション車は電動パーキングブレーキ(EPB) を内蔵した17インチベンチレーテッドブレーキを全車に採用した。スバルパフォーマンストランスミッション車はディスクキャリパーのスライドピンブッシュを低摩擦材へ変更し、さらにパッド摺動部にグリス塗布を追加してブレーキ引き摺り抵抗を削減し燃費性能を向上させている。

10.　走りへのこだわり

10.1　SI-DRIVEの進化

10.1.1　走りのキャラクター

新型WRXの特にスバルパフォーマンストランスミッション車において、レスポンスよくキレのある変速を実現させ、さらにドライバーの意図にリニアに反応する変速フィーリングを実現させるために『スポーツ変速制御』をSI-DRIVEのS/S# モードに取り入れた。これまで以上にアグレッシブさを際立たせたS/S# モードのスポーティな走りから、スムーズで乗り心地のよいIモードの走りまで、SI-DRIVEのモードの走りの特性を大きく変化させることで、日常から非日常まで、さまざまな走りのキャラクターをいつでも愉しめるようにセッティングした(表7)。

表 7　モードによる変速制御の違い

	SI-DRIVE※1			マニュアルモード
	I	S	S#	
	燃費や乗り心地のよさと、実用的な加速を兼ね備える走り	街中でも煩わしくなく、ワインディング走行も愉しめるスポーティな走り	これまで以上にスポーツ走行に特化したアグレッシブな走り	手動で自在に変速でき、ドライバーが思った通りの走り
変速制御	通常	[NEW] スポーツ変速制御		手動
変速特性	無段階変速※2	8 段変速	8 段変速	8 段変速
シフトアップスピード	通常	高速	超高速※3	超高速※3
シフトダウンスピード	通常	高速	高速	高速
シフトダウンブリッピング	なし	あり	あり	あり

：新型車の変化点
※1：ドライブモードセレクト付き車では「パワーユニット」の項目で選択可能
※2：アクセルを踏み込んだときはギヤ段 8 速固定化を実施
※3：シフトアップ時に変速を感じさせるような車体 G の変動がある

10.1.2　スポーツ変速制御

クルマを操ることを愉しむためには、ドライバーが意図したクルマの動きやイメージと実際の動きが一致する「予見性」と、ドライバーの操作に対する「レスポンス」のよさが重要である。

新たなスポーツ変速制御では、この予見性とレスポンスに注目し、ドライバーの意図に応える変速特性やダイレクトな加速フィーリング、キレがよく素早い変速によって、高い「レスポンス」と「予見性」を実現してクルマを操る愉しさをより強く感じられるようにした(表8)。

1) シフトアップ制御では、エンジン回転数とトルクの制御によって、素早く切れのよいシフトチェンジを実現した。レスポンスのよいエンジンサウンドとあいまってシフトチェンジしていることをしっかりと認識できるため、スポーティなクルマを操る愉しさをより高く感じられるようにしている。

表８　クルマを操る愉しさを実現するポイント

ねらい		技術
予見性	ドライバーの意図に沿ったリニアでしなやかな加減速	ドライバーの意図にマッチした変速特性とオートブリッピング制御
	エンジン回転数と車速の連動	全モード固定ギヤ段制御
	加速性能とコントロール性の両立	ギヤ段ごとのトルク制御
レスポンス	変速キレ感向上	ダウンシフト時の素早い変速とブリッピングサウンド
		アップシフト時の素早いトルクカット

ドライバーの操作に対するクルマの「予見性」と「レスポンス」を向上。
MT にも劣らないクルマを操る愉しみを提供する

2）シフトダウン制御では、減速時においても減速Ｇの強さに応じてシフトダウン量（ギヤ段）をコントロールするセッティングとした。ドライバーの意図に沿って、シフトダウンさせたいギヤをブレーキングの強弱だけでコントロールできる制御としている（図76）。

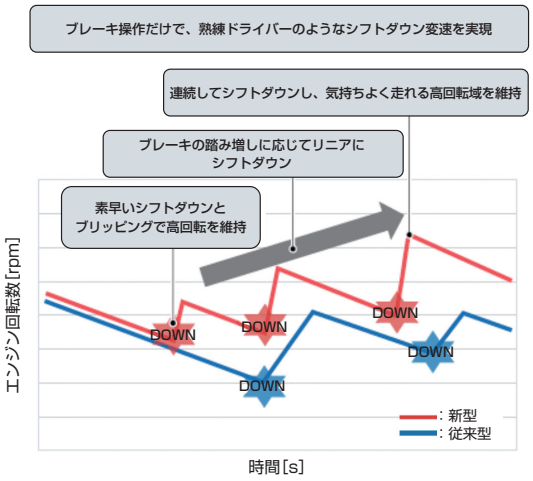


図 76　ブレーキを踏み増した時のイメージ

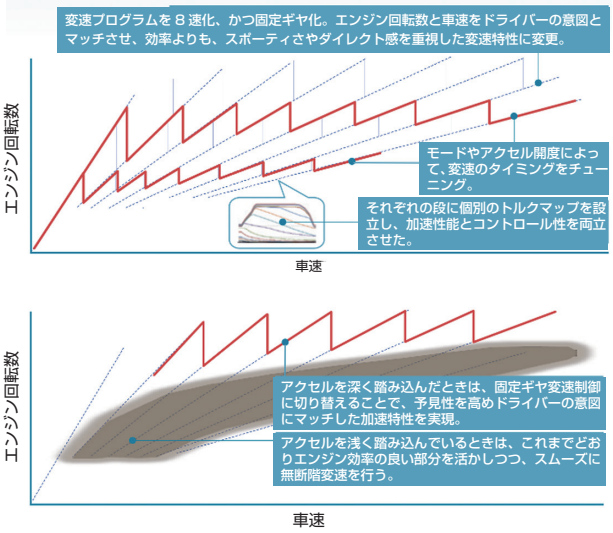


図 77　上段：S/S# モード時の変速イメージ
下段：I モード時の変速イメージ

3）S/S# モード選択時（ドライブモード付き車ではスポーツモード、スポーツ＋モード、Individual モードのパワーユニットで選択したとき）は、走行時の加減速に応じて、よりアクティブにキレのある変速を行う制御へと進化させた。またiモード時でもアクセル開度が大きいときは8段変速制御へ切り替える設定としている（図77）。

シフトポジションがDレンジのままでもドライバーが意図した通りの変速が行われ、熟練ドライバーによるMT操作のような変速を実現しスポーツ走行時の走りの愉しさをさらに強化している。

1）～3）を採用することで熟練ドライバーが操るMT車のようなフィーリングを実現させ操る愉しさを高めた。例えばコーナリング時のシーンを例に図78にその走りのイメージを示す。

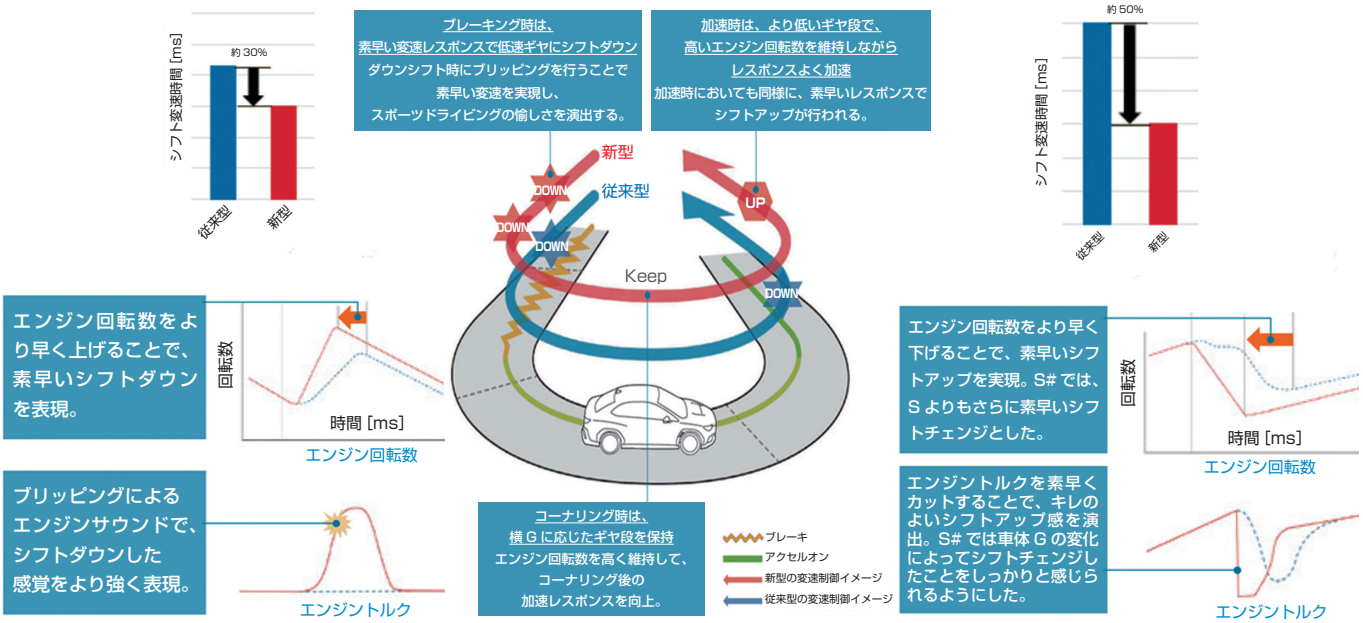


図 78　コーナリング時のイメージ

10.2　VTD-AWDの制御

従来型では1モードだったAWD制御を、新型車(ドライブモードセレクト付き*)ではNormalとSport の2モード化することで、走行シーンにあわせた最適な前後駆動力配分を実現した。

10.2.1　Normalモード

従来車と同様に、トラクション性能を重視した。

10.2.2　Sportモード

旋回に最適なLSDトルク設定とすることにより、旋回性能を重視した。複合遊星歯車(プラネタリーギヤ)式センターデファレンシャルと電子制御LSD(油圧多板クラッチ)を採用するWRXでは、走行状態の変化に応じて差動を制限することで、最適な駆動力を確保し、安定した走りを実現している。しかし、LSDトルクを上げると、コーナリング中のアクセルON時に前輪へ駆動力を配分することで、トラクション性能は向上するが、旋回性能は低下する。そこで、LSDトルクを低く設定することで、前後の差動制限を抑制し、旋回性能を高めるSportモードを設定。走行シーンにあわせモードを切り替えることで、より旋回性の高い、スポーティなドライビングを愉しめる特性とした(図79)。

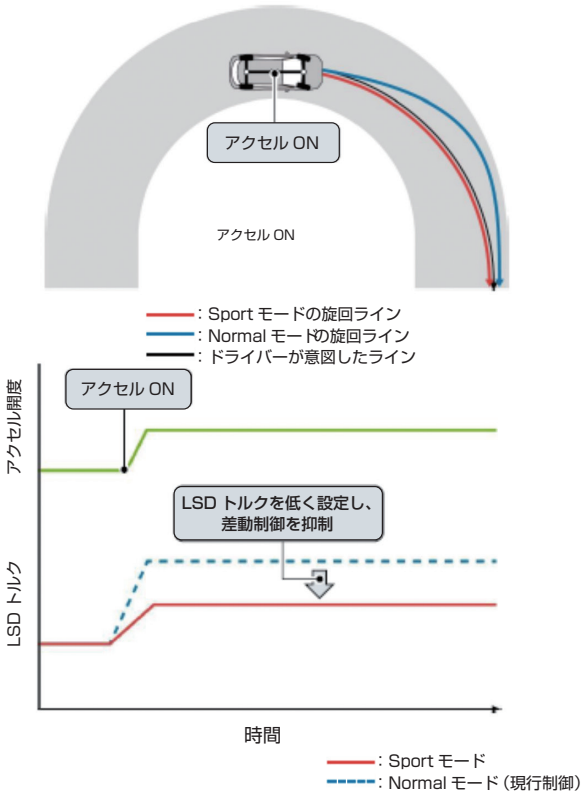


図 79　VTD-AWD 新制御のイメージ

10.3　VDC制御

17MY BRZから採用されたTRACKモード制御を、新型WRXにも設定した。TRACKモードはビークルダイナミクスコントロール(VDC)やTCSなどの制御介入度合いを弱めることで、ドライバーによる車両コントロール領域を増やしている。車両挙動が大きく乱れた場合には乱れを緩和させる制御が介入するため、サーキット走行などでの限界領域において、よりスポーティな走りを愉しむことができるようにした(表9)。

表 9　VDC 制御の違い

モード	切り替え方法	概要
NORMAL	エンジン始動時	クルマの走行状態を各種センサーで常に検知して横滑りやタイヤの空転を抑え、理想の走行状態に近づけるようドライバーをアシスト
TRACK [NEW]	VDC スイッチ短押し	制御の介入タイミングを遅らせることでドライバーによる車両コントロール領域を広げる
VDC OFF	VDC スイッチ長押し	制御が介入することなく、ドライバーの意のままに操ることができる

10.4　動的質感の追求

新型WRXでは、SUBARUが追求してきた動的質感を大幅に進化させた。上述の通りクルマの根幹となるボディ・シャシのあらゆる要素を見直し、意のままに操れる操縦安定性をさらに磨き上げながら、快適な乗り心地と振動騒音が少ない「心地よさ」も追求し、すべてのパフォーマンスをSUBARU史上最高レベルで実現している。また、これまでの車両開発やモータースポーツの知見を結集し、走りのパフォーマンスを徹底的に鍛え上げ、その実力は、非日常の走りだけでなく、日常でのあらゆる使用シーンにおいて、誰もがそのよさを感じ、愉しく、安心して快適にお使いいただけるものとしている(表10)。

表 10　動的質感の進化

分類	代表的な動的要素	
意のままに操れる操縦安定性	クルマが期待通りに動く「応答性」	ステアリング操作に対する応答のよさ
		リヤの遅れの少なさ
	無駄な挙動のない「安定性」	ロール変化の少なさ
「心地よさ」を高めた乗り心地と振動騒音	車両姿勢の速い「収束性」	おさまりのよさ
	スポーツマインドを刺激する加速サウンド	

10.4.1　クルマが期待どおりに動く「応答性」

旋回時の横力伝達遅れが少ないセダンならではの高剛性ボディをさらに高めたことで、ステアリング操作に対しさらにすばやくクルマを反応させた。とくに連

続してステアリングを切り返すようなシチュエーションにおいても、車両がしっかりと切り返しに追従させた。どのようなシーンでも車の動きをコントロールでき、意のままに操れるWRXらしい走りを、さらに高次元で愉しむこととしている（図80）。

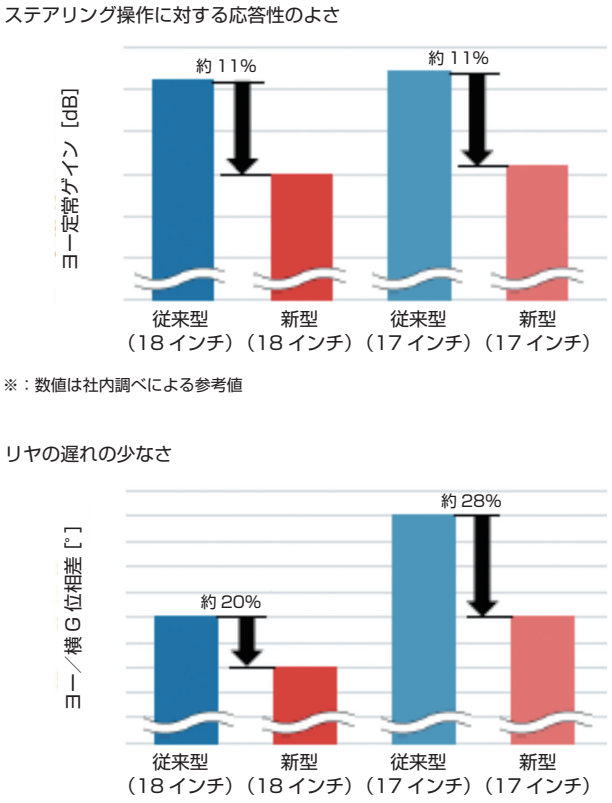


図80　ステアリング操作に対する応答性

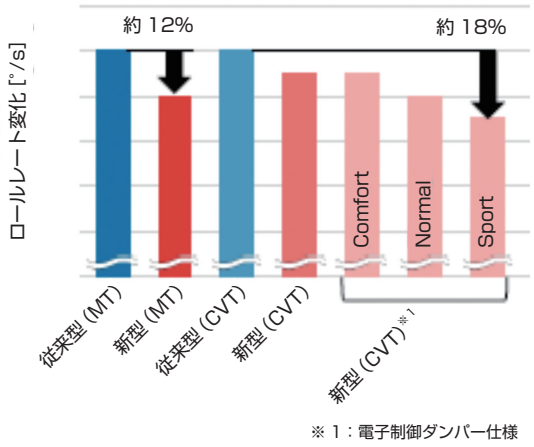


図81　ロールの少なさ

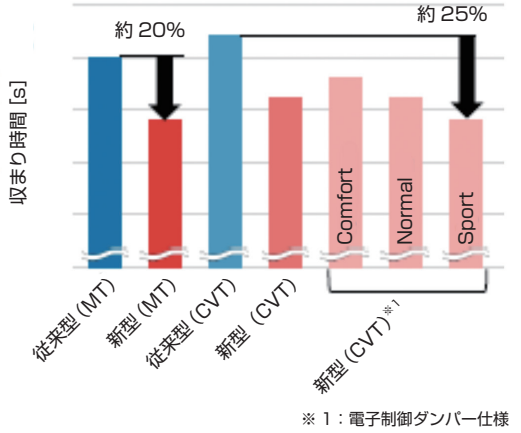


図82　おさまりのよさ

10.4.2　無駄な挙動のない「安定性」

コーナリング時の車両姿勢の変化を抑えることにより安定性を高めたことで、路面に吸い付くような引き締まった走りと、ステアリング修正をすることのない、狙ったライン通りのコーナリングを実現した。また、電子制御ダンパー付き車*では、Sportモードを選択することで、車両姿勢の変化がより抑えられ、さらなるスポーティさを愉しむことができるように設定している（図81）。

10.4.3　車両姿勢の速い「収束性」

路面の凸凹などによる衝撃をしっかりと吸収し、車体の揺れをすばやく収める足回りによって、さらに安定した走りと、快適な乗り心地を実現した（図82）。

10.5　特別なグレードの設定*

LEVORGで採用した、お客さまが好みに応じてスイッチひとつで走りのキャラクターを変更できる『ドライブモードセレクト』を新型WRXにも採用した（GT/tS/STI Sportグレード*）。パワーユニットだけでなく、ステアリングやダンパー、エアコンに至るまで、さまざまなユニットの制御を細かく調整することによって、高級車からスポーツカーまで、クルマのキャラクターがお客さまの気持ちや個性に寄り添い、自在に変化させることができることとしている。

ドライブモードセレクトには4つのプリセットモードと「Individual」を選択可能とし、特に「Individual」ではドライバーのお好みに応じた各ユニットの設定をカスタムでき、ステアリングのスイッチで呼び出すことで、自分だけの特別なドライブモードを愉しむことができる。また、ドライバーモニタリングシステム付き車*は、登録したお客さまの顔を認識すると、ドライビングポジションだけでなく「Individual」モードの設定も呼び出している。自分だけの特別なドライブモードと、ドライバーモニタリングシステムの組み合わせによって、ドライバーとクルマがシンクロするような一体感のある走りを実現するだけでなく、所有する悦びを感じられる設定としている。

LEVORGに対しては、各デバイスの制御ソフトを新型WRX専用のチューニングとした（図83）。

モード	COMFORT	NORMAL	SPORT	SPORT +	INDIVIDUAL
パワーユニット (SI-DRIVE)	i	i	S	S#	お好みの設定が可能（最大５名分の登録が可能）
パワーステアリング	Comfort	Normal	Normal	Sport	
ダンパー	Comfort	Normal	Normal	Sport	
AWD	Normal	Normal	Normal	Sport	
アイサイト（ACC）	Comfort	Standard	Dynamic	Dynamic	
エアコン	Mild	Normal	Normal	Normal	
モード特性	← 快適性	ベース	スポーツ性 →		

赤枠：WRX S4 専用セッティング

図 83　ドライブモードセレクト

11.　安心・安全

SUBARU独自の「総合安全」思想に基づき、新型WRXでもそのすべての要素を磨き上げ、お客さまにさらなる安心・安全を提供している（図84）。

本章ではとくに衝突安全と予防安全について記述する。

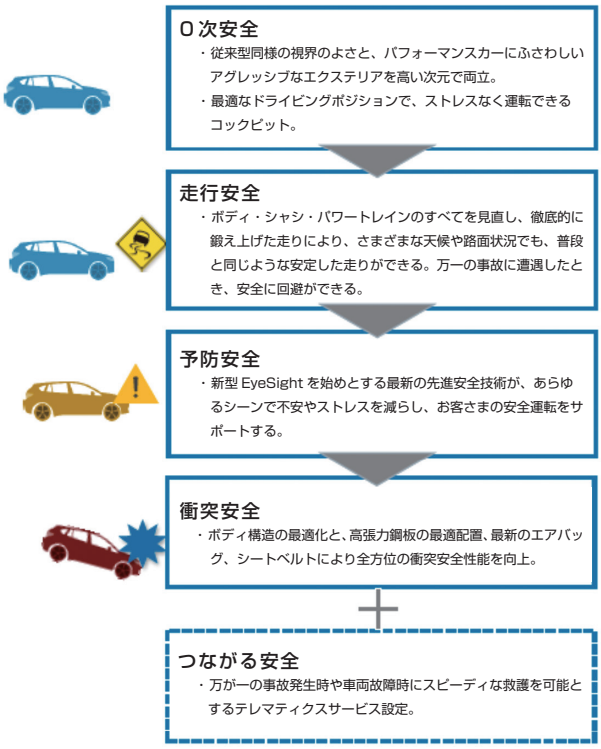


図 84　SUBARU の総合安全思想

11.1　衝突安全

2020年度JNCAP自動車安全性能ファイブスター大賞を獲得した新型LEVORGと基本構造を共通化し、セダンとしても衝突安全性能を徹底的に追及し、グローバルで全方位の衝突安全性能を飛躍的に向上させた。

衝突安全ボディ構造の最適化と、高張力鋼板の最適配置により、前面、側面、後面すべての衝突安全性能を向上させ、乗員および歩行者保護性能を高めている。これらの衝突安全性能は進化させたスバルグローバルプラットフォームを採用したことで飛躍的に向上し、その高い安全性能は、SUBARUが収集した実際に起き得る事故形態の情報をベースとして、アセスメントで想定していない形態の事故までを見据え磨き上げている。

11.1.1　前面衝突

骨格構想は新型LEVORGと同等とし、スモールオーバーラップ対応としてガセット構造を採用した（北米のみ）。衝突時の安定した変形モードとエネルギー吸収を実現している（図85）。

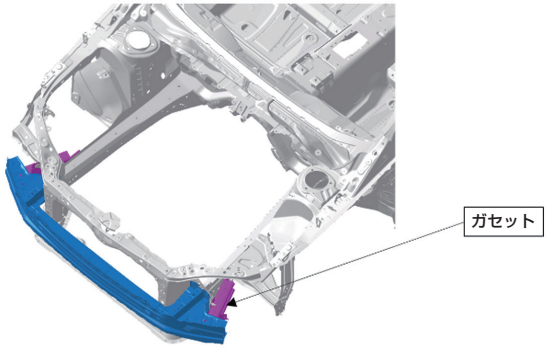


図 85　ガセット構造（北米）

11.1.2　側面衝突

車体基本骨格は新型LEVORGと同等とし、ドアビームには1.5 GPa級の鋼管を採用し衝突時のドア侵入を防ぐ構造とした（図86）。

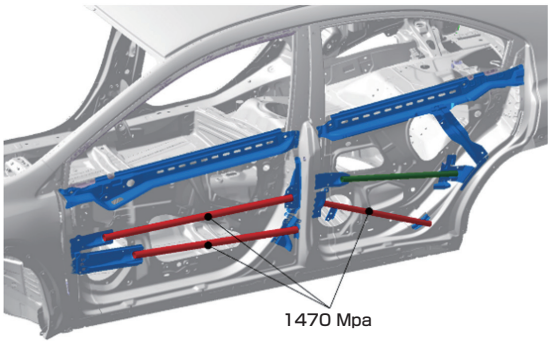


図 86　ドア構造（北米）

11.1.3　後面衝突

リヤフレームの高さ方向オフセット量を低減することにより荷重伝達効率を向上。曲げモーメントを低減することで、衝突時の車体変形抑制を行っている（図87）。

11.1.4　高張力鋼板の適用拡大

ボディ構造の最適化と高張力鋼板の適切な配置により、質量増加を抑えるとともに、前面、側面、後面す

べての衝突安全性能を向上させた。高張力鋼板比率は従来型の53%に対して56%まで採用を拡大。980MPa以上の超高張力鋼板の比率を6%⇒12%に拡大し（北米）トップレベルの衝突性能と軽量化を両立させた（図88）。

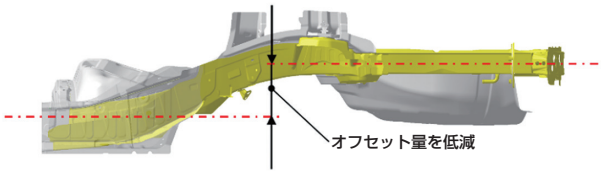
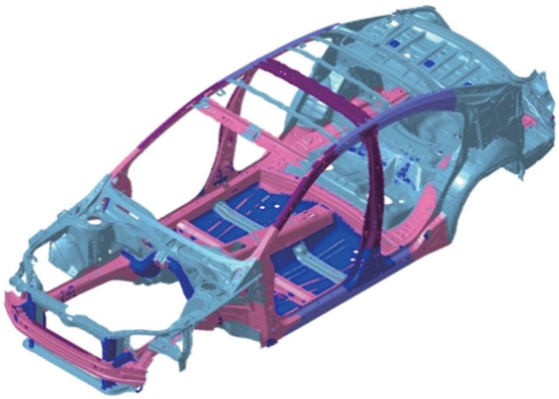


図87　リヤフレームレイアウト



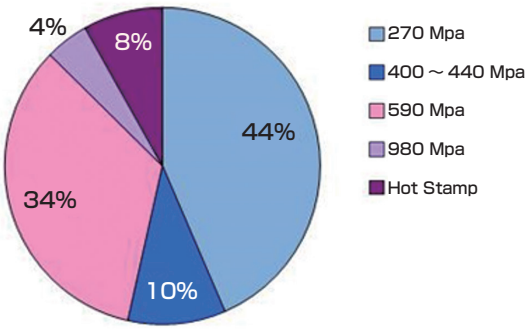


図88　高張力鋼板適用部位（北米）

11.2　予防安全

新型WRXでも、全面刷新し飛躍的に進化させた新型EyeSight*を導入している（表11）。

なお、国内向けはLEVORGと同じシステムなので割愛し、グローバル展開している機能について補足する。

11.2.1　制限車速を考える作業をサポート

［トラフィックサインリコグニッション／インテリジェントスピードリミッター］（豪州のみ）

通常、ドライバーは常に制限車速を道路標識で確認し考えながら運転している。道路標識の見落としによる制限車速違反を抑制するとともに、その負担を減らし、ドライバーがより運転操作に集中できるように配慮した。

1）制限速度の道路標識を認識してドライバーにお知らせするトラフィックサインリコグニッション

2）認識した制限速度を目標に自車の速度を制限するインテリジェントスピードリミッター

という2つの機能を採用した（図89）。

表11　新型EyeSightの機能

機能名	分類
プリクラッシュブレーキ	機能向上
前側方プリクラッシュブレーキ※1	新機能
緊急時プリクラッシュステアリング※2	新機能
エマージェンシーレーンキープアシスト※3	新機能
車線逸脱抑制	機能向上
車線中央維持制御・先行車追従操舵制御	拡大展開
全車速追従機能付クルーズコントロール	機能向上
トラフィックサインリコグニッション／インテリジェントスピードリミッター※4	新機能
青信号お知らせ※1	新機能
後退時ブレーキアシスト	拡大展開

※1：日本のみ
※2：後側方レーダー装着車のみ
※3：日本、豪州
※4：豪州のみ

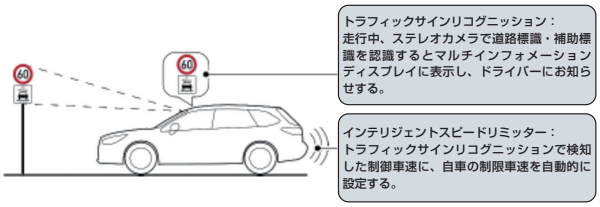


図89　トラフィックサインリコグニッション／インテリジェントスピードリミッター

12.　あとがき

新型WRXは、WRXらしくパフォーマンスの革新を極めた商品を目指して開発し、お客さまの期待にお応えできる商品となったと確信しています。

パフォーマンスを目指して鍛え上げたボディ骨格やシャシ構造は、同時に乗り心地のよさや上質感の源になっており、加えて新型EyeSightによる衝突回避性能の向上など、安全性も格段に向上し、より幅広いお客さまに受け入れていただける商品だと考えています。

我々開発チームは、この新型WRXが世界中で、“お客様の心の導火線に火を点ける：Ignite the customer's heart”現象がおきるように願っております。

最後に、関係各位のご尽力に対し、プロジェクトメンバー一同深く感謝し、紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

【著　者】

SUBARU WRX開発プロジェクトチーム

［商品企画本部］	五島　　賢	［コネクティッドカー開発部］	酒井 健一郎
	外埜　敏雄	［電子プラットフォーム設計部］	全　　大鎬
	下中　一彦	［ADAS開発部］	関　　淳也
	篠塚　順三	［デザイン部］	源田　哲朗
	浜田　恵理	［車両開発統括部］	中路　智晴
	遠藤　雄太		久保田 博之
［ボディ設計部］	松本　幸裕		青山　　寛
	片海　哲哉		安並　正浩
［内外装設計部］	沼田　圭史		中島　良太
	横山 啓一郎		

SUBARU 「フォレスター」改良モデルを発表

～新開発 1.8L直噴ターボ “DIT” エンジン搭載グレード「SPORT」を新設定～

2020年10月22日

- e-BOXER搭載グレードを拡大展開
- 乗員認識技術「ドライバーモニタリングシステム」を全グレードに設定※1
- X-BREAKに新制御「e-アクティブシフトコントロール」を搭載

SUBARUは、「フォレスター」改良モデルを発表しました。
今回の改良では、力強い走りと環境性能を高い次元で両立した新開発1.8L直噴ターボ “DIT” エンジン搭載グレード「SPORT」を追加。さらに、新感覚の走りの愉しさを実現する電動技術e-BOXER搭載グレードを「X-BREAK」「Touring」に拡大し、「X-BREAK」には新制御のモーターアシストe-アクティブシフトコントロールを採用しました。

※1：「Advance」「SPORT」に標準装備。「X-BREAK」「Touring」にメーカー装着オプション

フォレスター「SPORT」

新開発 1.8L 直噴ターボ “DIT” エンジン

新型 WRX 向け走行制御開発

Drivability Development for New WRX

井上　秀[*1] INOUE Suguru
桂野岳彦[*1] KATSURANO Takehiko
角田嘉人[*1] KAKUTA Yoshito
和氣嵩暁[*1] WAKI Takaaki
石田拓夢[*2] ISHIDA Takumu

抄　録

新型WRX向けにパワートレインの協調を軸とした新たな走行制御を開発した。

新制御では、これまでのCVT（Continuously Variable Transmission）で不足していたドライバー操作に対する「レスポンス」の向上に取り組んだ。

本稿では仕様変更の着眼点と性能向上の詳細を報告する。

Abstract

We have developed a new driving control centered on powertrain coordination for the new WRX.

The new control has worked to improve the “response” to driver operations, which was not possible with conventional CVT（Continuously Variable Transmission）.

This paper describes the contents of specification changes and performance improvements.

1.　まえがき

従来よりスポーツ走行性を向上するため、変速比を固定した多段制御や、走行状況によりエンジン回転を切り替えるアダプティブ制御を採用してきた(1)。

新型WRX向けCVT開発の着手にあたり、他銘と従来型WRXの比較調査を実施した。比較車はSUBARUの主要市場である北米のCセグメント車群の中からコンフォート～スポーツ分野を選択し、市街地・郊外・高速道路を走行し感応評価により評点付けを行った。

図1に示す通り、従来型WRXのスコアは比較的コンフォートの車両に近い結果となった。分析の結果、スポーツ車に求められる“レスポンス不足”が評点の差として表れている事が見えてきた。新型WRXでは、レスポンス向上のため、以下3点(**図2**)の開発に取り組んだ。

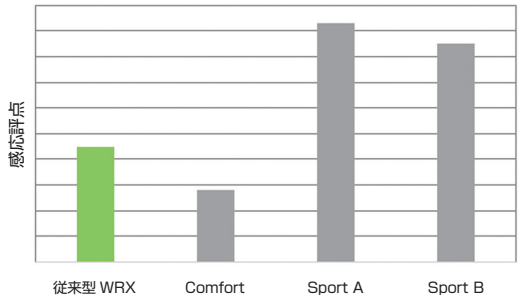


図１　感応評価結果

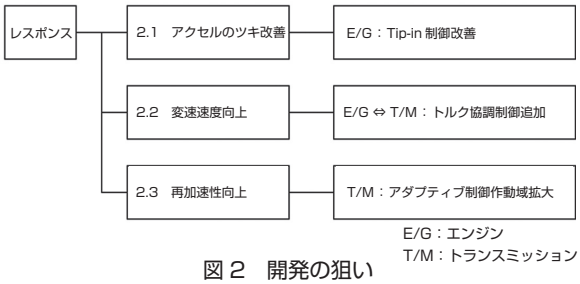


図２　開発の狙い

2.　レスポンス向上

2.1　アクセルのツキ改善

アクセルオフからペダルを踏み込む、Tip-inと呼ばれる操作をした際の急峻なトルク増加によるショックおよびユサユサ挙動は加速・快適性の質感を損なう。ショック抑制にはトルク増加を抑制することが有効であるが、応答性とトレードオフの関係にある。従来は、空気量（スロットル開度）制御によりトルク増加を抑制していたため、ショック抑制と加速応答の両立に限界があった。

＊1 車両環境性能開発部
＊2 電子制御開発部

新型WRXでは、ショックを抑制した上で、加速応答を改善するために、空気量制御よりも応答が早い点火時期制御をショック抑制に用いた。

Tip-in制御改善の効果を図3に示す。Tip-in制御無しでは加速度立ち上がりが素早い一方で、顕著なショックが発生している。新Tip-in制御では従来制御に対し、ショックを抑制した上で素早い加速度の立ち上がりを実現した。

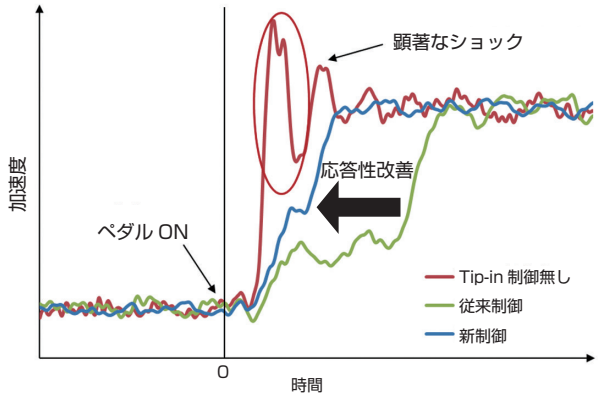


図3　Tip-in制御手法の違いによる加速応答性比較

2.2　変速速度向上

CVTは変速中も常時駆動力を伝達しているため、リニアな加速が実現できる。一方、レスポンス改善のため素早い変速を行うと、パワートレインの慣性力が車両に伝わり、押し出しや引き込みショックに繋がる。

新型WRXでは、アップシフト、ダウンシフト共にエンジンとのトルク協調見直しによって変速速度の向上を実現した。

2.2.1　アップシフト時間短縮

変速品質を担保するため、トルクダウンのタイミングと量を適切にコントロールする必要が有る。

従来の空気量を用いたトルクダウン制御の場合、空気の応答遅れが大きいため、変速時間短縮と従来型同等の変速品質の両立は困難であった。

そこで、応答性に優れた燃料カットと点火時期遅角を併用したトルクダウン制御を開発した。

新制御では、変速の進行度に合わせて要求量を適切にコントロールすることで、品質を落とすことなくアップシフト時間30%短縮を実現した。図4にアップシフト時間の比較結果を示す。

2.2.2　ダウンシフト時間短縮

従来のダウンシフトは、変速速度の適合でショックとレスポンスを両立させていた。新型WRXではさらなるレスポンス向上を図るため、ブリッピング制御を採用する事でダウンシフト時の慣性力を相殺し、ショックとレスポンスの向上を実現した。

ブリッピング制御投入により、従来型に比べて変速時間50%短縮を実現した。図5にダウンシフト時間の比較結果を示す。

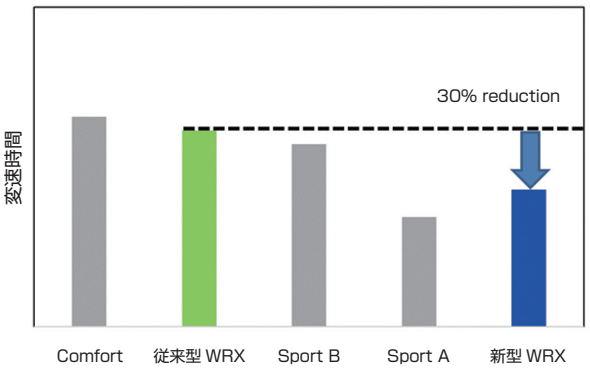


図4　アップシフト時間比較

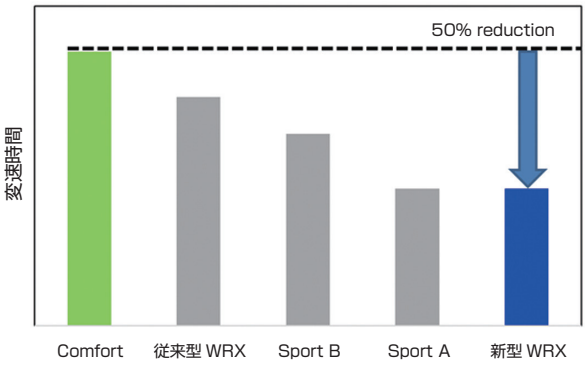


図5　ダウンシフト時間比較

2.3　再加速性向上

従来型はブリッピング制御が無く、ダウンシフト時に変速ショックが出やすく、積極的にアダプティブ制御を動かす事が困難だった。新型WRXではブリッピング制御を採用し、変速品質を向上させる事でアダプティブ作動領域を拡大するとともに、減速度に合わせてリニアに回転を上げ、ドライバの意図に合った回転数を保持する事により再加速時のレスポンスを改善した。図6に減速度に応じたダウンシフト回転数比較を示す。

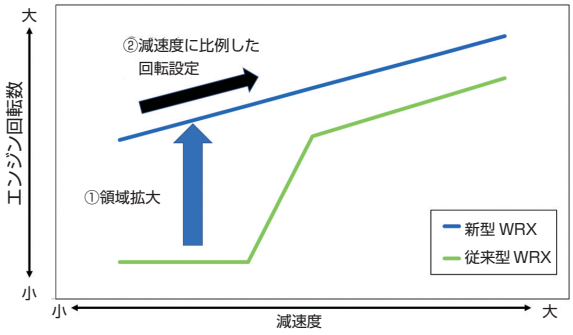


図6　ブレーキ時ダウンシフト到達回転数比較

3. まとめ

新型WRX開発において、レスポンス改善を目標に掲げ、アクセルのツキ・変速速度向上・アダプティブ制御領域拡大に取り組み、Cセグメントのスポーツ車としてトップクラスの応答性を実現した。

今回の開発を通して、SUBARUの目指す“安心と愉しさの”のさらなる進化に結び付けられたと考える。

環境規制の強化等でスポーツ車を取り巻く環境は今まで以上に厳しくなることが予想される。引き続きパワートレインの開発を通じ、お客様の笑顔に貢献できる取り組みを推進する。

最後に、制御開発に協力して頂いた関連部署の方々に、深く感謝いたします。

参考文献

(1) 鯵本啓介, 他：スポーツリニアトロニック用新変速制御の開発,『スバル技報』, No.41 p.73

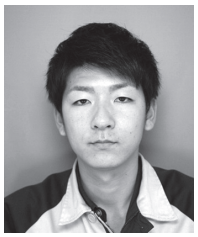
【著　者】

井上　　秀

桂野　岳彦

角田　嘉人

和氣　嵩暁


石田　拓夢

SUBARU「サンバートラック」「サンバーバン」一部改良モデルを発売

2020年9月3日

SUBARUは、「サンバートラック」「サンバーバン」を一部改良し、発表・発売しました。
今回の改良では、「サンバートラック」「サンバーバン」ともにオートライトを全車標準装備とし、夜間の安全性を向上させました。また、「サンバートラック」は架装車である「三方開ダンプ」と「パネルバンハイルーフ」にスマートアシストⅢを標準装備し、より多くのお客様に先進安全機能を選択いただけるグレード構成としました。

サンバートラック　TC スマートアシスト

サンバーバン　VC スマートアシスト

新型 BRZ のアライアンス開発について（デザイン編）

Alliance Development of New BRZ (Design)

佐 藤 正 哉* SATO Masaya
愛 場 和 樹* AIBA Kazuki
相 賀 博 志* AIGA Hiroshi

抄 録

今回の新型GR86/BRZの開発では、開発初期の段階から情報共有を行い、合同合宿などを通して意思疎通の精度を高めてきた。さらに、デザインと設計の要件すり合わせでは、SUBARU側の設計者がトヨタへ訪問していた現行に対し、新型車ではトヨタのデザイナーがSUBARUのデザインスタジオに常駐し、企画を交えたプロジェクトを進める体制へと変更。そうすることで、デザイン／設計／企画とのコミュニケーションが密になり、お互いの要望をより近い距離で、より長い期間、本音で意見を交わすことができ、機能性とデザイン性を両立した、より精度の高いクルマを作り上げることができた。

Abstract

In the development of this new GR86/BRZ, information has been shared from the early stages of development, and the accuracy of communication has been improved through activities such as joint training camps. SUBARU used to visit TOYOTA to discuss design and design requirements; however, for this new model, TOYOTA designers were stationed in the design studio of SUBARU, and we had close heart-to-heart communication for a long period of time.

Through that, we were able to produce a more accurate vehicle with functionality and design.

1. まえがき

初代86/BRZは、2012年の販売から10年近く経過しているが、今でも多くのお客様に愛着を持ってお乗り頂いており、日常使いからサーキットやレース等、使い方や年齢は幅広く、スポーツカーとしてのお客様の裾野を広げた。2代目の開発では現行の86/BRZが確立した、スポーツカーとしての魅力や価値、現行車を愛していただいたお客さまの期待を超え、誰からも認められる真のスポーツカーを実現するために取組んだ内容について紹介する。

2. 新型車として提供する価値

新型GR86/BRZのデザインを実現するために、以下3つの価値を設定した。「運転を愉しむ快感」「眺めているだけでも、幸せな気持ちになれる」「愛着」。そしてこれらの価値を創出するため、多くのキーワードの抽出から導き出し、4つのメソッド「動的感性デザイン」「体幹を鍛える」「Simplicity」「Timeless Design」に落とし込むことで、一目見ただけで走りへの期待が高まり、いつまでも飽きることのないデザインを実現することが出来た。

3. エクステリアデザイン

3.1 走りへの高い期待と躍動を想起させるデザイン

内外装のデザインは、トヨタのデザイナーを中心にSUBARUのデザイナーとモデラーが協力して仕上げた。先述の狙いを具現化するべく、低く構えたフロントと、FRスポーツカーの特徴でもある力強いリヤフェンダーで、ドライバーに高揚感を与えながら、同時にスポーツカーを所有する悦びを高めた。又シンプルで大きな面を中心に構成することで、さまざまな環境下で異なる表情を映し出し、眺めていても飽きることのない、長く愛されるデザインとした。

＊ デザイン部

3.1.1　フロントビュー

フロントバンパーはBRZ専用デザイン。フード先端へ行くほど前傾姿勢を強め、力強い走りを期待させるアグレッシブなフロントビューに、SUBARUデザインフィロソフィー「Dynamic x Solid」と、それを進化させる新たなデザインコンセプト「BOLDER」によって、ヘキサゴングリルを現行車よりもロー＆ワイドに設置。また、ヘキサゴングリルを起点とし、張り出したフロントフェンダーを突き抜けるように配置されたエッジのラインは、芯の通った造形とすることで、体幹の力強さとダイナミックな抑揚を表現。ソリッドなボディと合わせ、個性をより大胆に際立たせた(図1)。

図１　フロントビュー

3.1.2　サイドビュー

空力性能を向上させるサイドシルスポイラーやエアアウトレットなど、スポーツカーとしての性能を最大限に引き出す機能性とデザインを両立。大胆に大きく張り出したフィン形状のサイドシルスポイラーは、サイドセクションに動きを与え、優れたデザイン性とともに高い操縦安定性を実現。大きく開いたエアアウトレットの開口は、操縦安定性を高めるとともに、高いスポーツ性能を予感させる形状としている(図2)。

図２　サイドビュー

3.1.3　リヤビュー

サイドに張り出したスタンスのよいリヤフェンダーは、ルーフからテールにかけてのスラント部分を絞り込むことでスポーティさを強調。ルーフからの流れを車体後部のダックテールまでスムーズにつなげることで、シンプルかつ洗練されたデザインに仕上げた(図3)。

図３　リヤビュー

4.　ディテールデザイン

4.1　ヘッドランプデザイン(図4)

外周部をブラックアウトした二色成形のヘッドランプレンズをSUBARU初採用し、スポーティで精悍な印象に仕上げた。また、エッジライト方式のポジションランプ&DRL(国内除く)と、それにつながるエクステンションによってSUBARU共通のCシェイプモチーフを表現。ひと目で“SUBARUのスポーツカー”と分かる印象的なフロントマスクを形づくった。

図４　ヘッドランプ

4.2　リヤコンビネーションランプ(図5)

フルLED化によって、ランプを機能集約化。小型化することで、スポーツカーらしい引き締まったリヤビューを演出。さらにトランクガーニッシュモールから連続した造形とし、リヤビュー全体の統一感を高めた。

図５　リヤコンビネーションランプ

4.3　アルミホイール

新型に伴いトヨタデザインのアルミホイールを新開発。意のままに走るために無駄をそぎ落とし、鍛えぬいたような軽量感のあるホイールを設定。BRZ用のカラーとして、18インチ(図6)はマットダークグレーメタリックを選択。存在感を高め、引き締まった足回りを演出させ、17インチ(図7)はスーパーブラックハイラスターとし、走行時はもとより駐車時の佇まいをも光輝な印象で演出させた。

図６　18 インチホイール　　図７　17 インチホイール

5.　インテリアデザイン

5.1　運転に集中できる、シンプルで機能的なデザイン

スポーツカーとして、走りを存分に愉しむためには、ドライバーが運転に集中できる室内空間を整えなければならない。そこで新型GR86/BRZでは、シンプルな水平基調のインストルメントパネル(図8)や、低く設定されたメーターフードなどにより、広い視界を確保。ドライビングポジションからフードとフロントフェンダーが視認できることで、車両感覚をつかみやすくし、よりドライビングの愉しさに集中できる環境を実現させた。

図８　インテリア正面視

又、この視界の良さは、ドライバーが運転に集中するための安心感の創出にもつなげた。インストルメントパネルの中央部には、インフォテインメントシステムや各種スイッチなど操作系を集約。加えて、輝度を抑えたサテン調シルバーのモール加飾を採用することにより、視界に配慮しつつ、使い勝手と質感を向上。さらに、大きく使い勝手のよいアームレストにもなるセンターコンソールを採用することで、快適性と実用性の両立も実現した(図9)。

図９　インテリア斜視

5.2　上質さと躍動感をあわせ持つシート表皮

シート表皮は、高い機能性と素材のよさが感じられる2つの仕様を設定した。

(1) 本革＆ウルトラスエードシート(BRZ：上級仕様)

本革やウルトラスエードなどの素材を採用し、座面とシートバックの赤の差し色がアクセントになることで、上質さを表現。また座面とシートバック中央部のウルトラスエードにパーフォレーション加工を施すことで、質感を高めつつ通気性を向上させた(図10)。

図 10　上級仕様

図 11　ベース仕様

(2) スポーツファブリックシート(BRZ：ベース仕様)

黒のスポーツファブリック仕様にも、赤のステッチを採用する事でスポーティーなイメージは統一。シンプルながらも飽きることのないデザインとすることで、素材のよさを感じられるようにした(図11)。

5.3　フル液晶メーター

新型GR86/BRZでは、SUBARU 初の7 インチTFT液晶とLCD セグメント液晶を融合させたフル液晶メーターを採用。 運転に必要な情報を集約することで、運転中の視認性・瞬読性の向上を追求。日常の運転からスポーツ走行時まで、あらゆる状況下でも直感的に情報を把握することが可能になった(図12)。

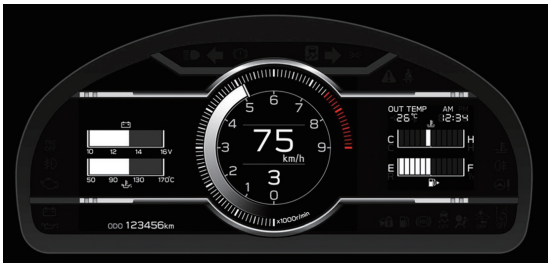


図 12　メーター画面抜粋

5.3.1　ウェルカムアニメーション(BRZ編)

立体的なシルバーリング造形と液晶画面での映像を組み合わせることで、水平対向エンジンをイメージさせるウェルカムアニメーションを採用(図13)。イグニッションスイッチをON にすると、水平対向エンジ

ンの形状を模したシルバーリングの中央にBRZ のエンブレムが現れ、それを背景にクランクシャフトの回転と左右のピストンストロークをイメージしたアニメーションで、これから始まる走りの愉しさを演出させた。

図 13　アニメーション画面

6.　外装色

6.1　新色イグニッションレッドについて

お客様に“安心と愉しさ”を提供するSUBARUのスポーツブランドのために、特別なレッドを開発。SUBARUのスポーツブランドには、すでにWRブルーがあり「SUBARU=鮮烈で冷静なブルー」のイメージを確立し、不動の地位を築いているが、今回は、そんなSUBARU・ブルーのイメージを良い意味でブレイクスルーし、新たなSUBARUの魅力と価値を創造する、アグレッシブで鮮烈なレッドを開発。3 層構造（図14）の3 コート塗装を採用し、中塗りを高彩度レッド・ブライトネス層とすることで、発光するような鮮やかさを実現した。

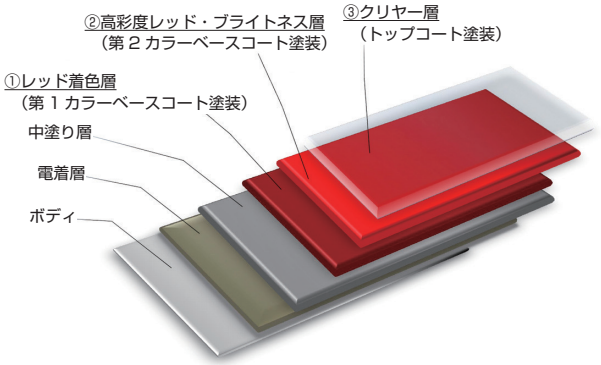


図 14　ボディ塗装膜イメージ

7.　空力テクスチャと操安性能

7.1　鮫肌による整流効果

鮫は水の中を移動するが、「流体の中を動く」という側面で捉えれば、空気という「流体」の中を走るクルマの表面にも同じ原理が応用できるのではと想定。

この鮫の肌（図15）の特徴を模して生み出した独自のテクスチャーパターン（図16）を採用。

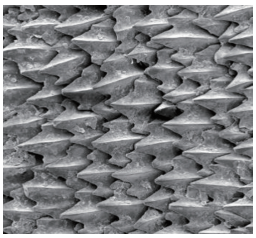


図 15　鮫肌拡大

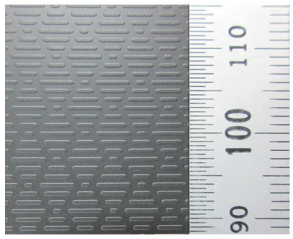


図 16　テクスチャ拡大

このテクスチャを位置や角度を調整しながら実車へ配置し、風洞試験や実走行テストを繰り返すことによって、空気抵抗や操縦安定性に対する効果を確認。その結果、このテクスチャをフロントバンパーダクトへ配置（図17）し、空気の流れをコントロールすることで最適な効果が生まれることを突き止めた。走りを愉しむスポーツカーにおいて、空力を車両全体でマネージメントすることは、非常に重要な要素。高速走行時は空気の乖離によって発生する車体まわりの乱流が車両を不安定にさせるが、新型GR86/BRZは空気の流れや量をコントロールすることで、車体がふらつかないしっかりとした直進安定性や、乱流に影響されないハンドリングを実現した。

図 17　テクスチャ配置説明

8.　終わりに

2代目GR86/BRZのデザインでは、トヨタ/SUBARUが考える独自のFRスポーツモデルのデザインを、機能や走りを意匠に関連づけながら実現出来たと考える。これも先行段階での意思疎通やトヨタデザイナーのSUBARUのデザインスタジオでの常駐、企画を交えたプロジェクト推進という体制により、コミュニケーションが密になり、議論と判断が適宜行われていた事が大きいと考える。今後も両社、良好な関係を築きながら、環境に配慮した、お客様の求める商品をお届けしていきたい。

【著　者】

佐藤　正哉

愛場　和樹

相賀　博志

SUBARU「ジャスティ」一部改良モデルを発売

～新しい「スマートアシスト」を標準装備し、安全性能を向上～

2020年9月24日

- **ウェルカムオープン機能付きパワースライドドア、電動パーキングブレーキ、オートブレーキホールド等を搭載し、利便性を向上**
- **内外装デザインを一新**

SUBARUは、「ジャスティ」を一部改良し、発表・発売しました。
今回の一部改良では、新しい「スマートアシスト」を標準装備。新しい「スマートアシスト」は、ステレオカメラの刷新により、衝突警告機能・衝突回避支援ブレーキの性能が向上したほか、全車速域アダプティブクルーズコントロール、路側逸脱警報機能、ふらつき警報機能等を追加。長距離の走行でもドライバーの負荷をこれまで以上に軽減し、安全運転を支援します。また、利便性の向上、内外装デザインを一新。

ジャスティ

新型 WRX のデザイン

Design for All-New WRX

中 村 真 一*
NAKAMURA Shinichi

安 藤 貴 洋*
ANDOU Takahiro

斎 藤 實*
SAITOU Minoru

相 賀 博 志*
AIGA Hiroshi

雲 野 裕 紀*
KUMONO Yuuki

抄 録

新型WRXのデザイン開発では、お客様にエクステリアデザインの魅力を存分にお伝えするべく、コンセプトカーレベルの大胆なデザイン表現を量産車で実現することに挑戦した。またインテリアデザインでは、お客様のユースケースや機能にデザインを関連づけ、新型WRXの商品性をより明確に力強く表現することができた。

Abstract

In the design development of the new WRX, we challenged to realize a bold design expression with a mass production vehicle that is at the concept car level to fully convey the attractiveness of the exterior design to our customers. For the interior design, we related the design to customer's use cases and functions and expressed the product value of the new WRX more clearly and powerfully.

1. まえがき

初代WRXは1992年にモータースポーツで勝つために生まれ、誰よりも速くゴールするためにパワーとコントロール性能を極め、日常使いからサーキットやラリーのようなモータースポーツ等、お客様がお使いになるあらゆるシーンでその性能を身近に感じて頂くことができるクルマであり続けてきた。新型WRXもこのスピリットを受け継ぎ、これまでWRXを愛して頂いたお客様の期待に応えるべく、その卓越した運動性能を表現したデザイン開発の内容を紹介する。

2 新型WRXのデザイン開発の狙い

現在SUBARUは、お客様に提供する価値『安心と愉しさ』をデザインで伝えるためのフィロソフィー『DYNAMIC × SOLID（躍動感×塊感）』に加え、さらに個々のクルマの個性や魅力を大胆に表現する『BOLDER』でデザイン開発を取組んでいる。新型WRXでは商品コンセプトである『パフォーマンス性と実用性を兼ね備え、マルチに愉しめるパフォーマンスセダン』をデザインで実現しお客様へ提供することを狙いとしデザインテーマを『Aggressive』と設定し、以下3つの注力点「走りへの期待を高める前傾姿勢」「パフォーマンスを全身で表現した力強いスタンス」「本物の高機能表現」に落とし込むことで、あらゆるシーンでWRXらしい運動性能を感じとることができるデザインの実現を目指した（図1）。

図 1 DESIGN CONCEPT

3. エクステリアデザイン

3.1 目標はコンセプトカーレベルの造形表現

SUBARUのデザインは、これまでコンセプトカーと量産車とでそれぞれ役割を与えて提案してきた。コンセプトカーには将来への夢やあるべき姿を存分にお伝えする役割、量産車には現実の生活の中でお客様に

＊ デザイン部

お使い頂くことを前提とした商品としての役割である。

一方、これまでのこの考え方では、新型WRXのデザインの魅力を高めることは難しいと判断し、2017年に発表した将来のSUBARUのパフォーマンスセダンの姿を示したSUBARU VIZIV PERFORMANCE CONCEPTのデザインを新型WRXのデザイン表現目標とした(図2)。

図２　SUBARU VIZIV PERFORMANCE CONCEPT

3.2　エクステリアデザインの構成要素

新型WRXの商品コンセプトと表現目標であるコンセプトカーのデザイン表現要素から、エクステリアデザインの表現の核となる3つの構成要素を抽出した(図3)。

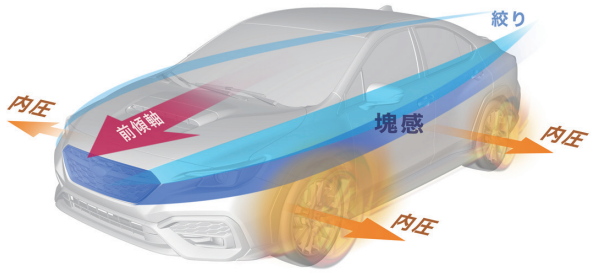


図３　THREE ELEMENTS OF EXTERIOR DESIGN

(1) 乗員を守る塊感のあるキャビンデザイン

ヘキサゴングリルからはじまりキャビンを包み、リヤに向けて絞り込んでいく塊感のある造形を創出。乗って頂いているお客様をキャビンでしっかりと守るイメージを視覚的に表現した(図4)。

図４　CABIN　DESIGN

(2) 内にみなぎるパワーを感じるフェンダー表現

パフォーマンスを全身で表現した力強いスタンスを表現するため、ボディーの内側にみなぎるパワーが外側へ力強く隆起したフェンダー造形で、新型WRXの個性を大胆に表現した(図5)。

図５　FENDER DESIGN

(3) 走りへの期待を高める前傾姿勢

一目見て走りへの期待を感じて頂くために、止まっていても今にも走り出しそうに見える様、スタートラインでスタートを待つ緊張感のあるアスリートの前傾姿勢から着想し、低く構えたサイドビューに前傾の軸を通した造形によりこれを表現した(図6)。

図６　LEANING FORWARD DESIGN

また、外装部品の随所に実際に機能するアイテムを設定、前傾姿勢の視覚的要素だけでなく機能的にも走りへの期待を感じて頂けるデザインを採用した。具体的には、ボディーの下部のスポーツサイドガーニッシュやリヤバンパーには、エアアウトレットや空気の流れを整える空力テクスチャー(ヘキサゴンパターン)を設定し、お客様が運転した際に実際に感じて頂ける走りの性能の向上に貢献する(図7)。

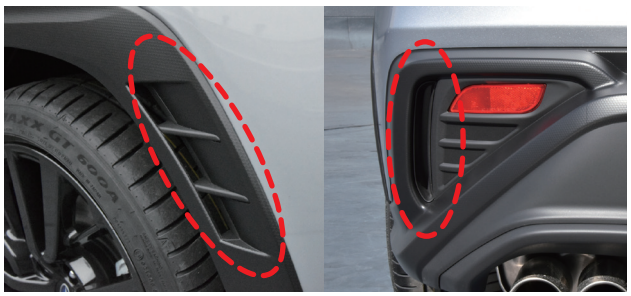


図７　REAL FUNCTIONAL DESIGN

3.3　ディテールデザイン

(1) ヘッドランプデザイン

ランプの機能を集約したコンパクトなデザインでスポーツカーらしい精悍な表情を演出、さらに外周部分をブラックアウトし、SUBARU共通のCシェイプモチーフを明解に表現した。また、点灯時も均一な面発光で表現するなど、昼夜を問わず新型WRXのフロントまわりのデザインをスポーティーに演出した(図8)。

図８　HEADLAMP

(2) リヤコンビネーションランプデザイン

火山のマグマの様な力強い発光パターンが印象的なランプは、細かく分かれたリフレクター（反射板）の面向きを精密に変え、ランプ機能と力強い運動性能を想起するデザインを両立した。また、左右のランプをガーニッシュで繋ぎ、ワイド感やフェンダーの張り出し感を演出し、新型WRXの堂々とした迫力のあるリヤまわりのデザインに貢献している(図9)。

図９　REAR COMBINATION LAMP

(3) ホイールデザイン

新型WRX専用の18 inch新意匠ホイールは太さの異なるスポークを効果的に配置し、軽量化とホイール剛性を両立しながら、エンジンパワーを余すところなく路面へ伝える力強さを演出。また、中央から放射状に伸びるスポークデザインを採用し、視覚的にホイールの直径が大きく見える効果を加えることにより、新型WRXにふさわしい性能と力強い外観を両立したホイールデザインを創出した(図10)。

GT-S（ダークガンメタリック塗装）　STI Sport R（ブラック＋切削光輝）

図 10　ALUMINUM WHEELS

4.　インテリアデザイン

4.1　お客様と車が一体となるインテリア

普段使いからモータースポーツまで、お客様がお使いになる様々なシーンで新型WRXの運動性能を愉しんで頂くためには、運転に集中でき、大人四人が快適使える室内空間を整えなければならない。前席まわりには車の挙動を感じ取りやすい水平軸を通した安定感のあるインストルメントパネル、各シートに座った際には腰まわりを包み込むようなボリュームある造形で移動中の安心感や車格感を演出。さらに、流れる風景と調和するトリムのデザイン、各種機能を集約して操作性を高めたセンターパネルなど、お客様と車が一体となるインテリアデザインを実現した(図11)。

図 11　INTERIOR DESIGN

4.2　見やすく使いやすい表示部のデザイン

情報表示エリアをメーターとセンターパネルに集約し、それぞれの画面までの視距離や画面角度を調整し見やすく疲れにくい画面位置のレイアウトを追求。表示部に用いるグラフィックスは時代にふさわしい先進感表現と瞬読性を両立のため、視覚的な妨げとなる要素を排除し、安全安心に繋がる表示デザインを実現した(図12)。

図 12　DISPLAY DESIGN

4.3　インテリアの作り込み

(1) グリップ断面をつくり込んだステアリング

ドライバーのあらゆる握り方を研究し、様々なシーンを想定しながら使いやすい握り心地をつくり込んだグリップの断面形状。ラリーやサーキットなどのスポーツ走行時には、親指の付け根で押し付けて操作しやすい断面形状でありながら、日常での使い勝手にも考慮し、新型WRXにふさわしい、マルチに使えるグリップ断面のステアリングとした(図13)。

図 13　STEERING WHEEL DESIGN

(2) 自宅からサーキットまで使えるスポーティーシート

見た目から伝わるスポーティーさを高めるとともに、より一層のスポーティーな走りにも対応できる様、サイド部分の形状を見直しサポート性を高めた。また着座時の快適性の向上のため、乗員の体圧を均等に支えるメイン部の形状とするとともに、乗り降りもしやすいシートを実現した(図14)。

図 14　SEAT DESIGN

(3) 新デザインのRECAROシート

新型WRXの卓越した運動性能を存分に愉しむことのできるRECAROシートを新たに開発。バックレストは体幹から肩甲骨を支える構造を採用し、標準スポーツシートを超える快適性とハードな横Gにも対応するサイドサポートによる高いホールド性を両立した(図15)。

図 15　RECARO SEAT DESIGN

5.　カラー＆マテリアルデザイン

5.1　SUBARUのカラー＆マテリアルの方向性

SUBARUのカラー＆マテリアルは、提供価値である「安心と愉しさ」の表現するためのキーワードを「インパクトと深み」に設定し、新型WRXにふさわしいカラーコーディネートを探求した。

5.2　エクステリアカラー

お客様の個性を表現できるエクステリアカラーを厳選し、専用の新色ソーラーオレンジ･パールを筆頭に、新色セラミックホワイトを含むベーシックカラー4色と、新色プレミアムレッドと新色サファイアブルー・パールを含むキャラクターカラー4色の計8色をラインナップした。新色のソーラーオレンジ・パールは、オパールと3種類の輝度の異なるシルバーフレークを使い、ソリッドライクなインパクトのあるオレンジと、スタイリングを際立たせるハイライトの輝きを両立させた。また、新色セラミックホワイトは、ピュアスポーツのための、硬く軽量なファインセラミックスをイメージした新しいソリッドホワイトとして開発し、久しくWRXに無かったコンペティション・シーンに映えるソリッドのホワイトを復活させた（図16）。

図 16　EXTERIOR COLOR

5.3　卓越した走行性能に貢献する外装のシボ

ボディー下部を一周取り囲むように設定した黒色樹脂部分には、開発ドライバーや空力の専門部門と共に開発した操縦安定性に貢献する「空力テクスチャー（ヘキサゴンパターン）」を採用。ヘキサゴン柄のシボパターンはゴルフボールの凹みの整流効果から着想した。

シボパターン表面の凹凸形状は大きな空気渦の発生を防ぎ、空気の整流効果を生み出す効果がある。実際に中速度域から効果を生み出し、高速度域においては車体が空気のベールに包まれながら走っているような安定感を感じ取ることができる（図17）。

図 17　EXTERIOR GRAIN

5.4　内装コーディネーション　シートのカバーリングと表皮マテリアル

新型WRXの運動性能を存分に愉しむためには、ドライバーが乗車姿勢を崩すことがなく運転に集中できるシートが必要である。シートに使う素材についても、パフォーマンスを表現した外観だけでなく、グリップ性のある素材であることが求められる。それらを両立できるファブリックとウルトラスエードを中心に素材を厳選した。シートの仕立て外観と合わせてそれぞれの素材の摩擦係数を確認しながら張り込む範囲を設定し、シートの外観と機能を両立させた（図18）。

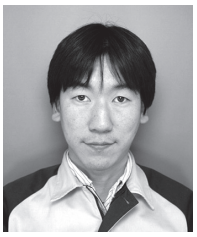
図 18　SEAT MATERIAL

6. おわりに

この新型WRXのデザインは、SUBARUのあらゆる力を結集しWRXの個性や機能や走りを実現できたと考える。これも将来のあるべき姿として先行して示したコンセプトカーの大胆なデザインを表現目標に定め、関連部門と同じ目標として共有できたことが大きい。お客様の目線で隅々まで思考を巡らせたこのデザインで、お客様の心を動かし、お客様のライフステージでワクワクする体験を生み出し、より良い人生を送って頂くための一助となることを期待する。今後もSUBARUの一貫した開発思想や卓越した技術を情緒的な価値に昇華させてお届けしていきたい。

【著　者】

中村　真一


安藤　貴洋

斎藤　　實

相賀　博志

雲野　裕紀

ソフトバンクとSUBARU、
自動運転車のユースケースに関する実証実験を実施

～5Gおよびセルラー V2Xを活用した合流時車両支援の実地検証に、世界で初めて成功～

2020年12月1日

ソフトバンク株式会社
株式会社SUBARU

ソフトバンク株式会社と株式会社SUBARUは、自動運転社会の実現に向けて、第５世代移動通信システムおよびセルラー V2X通信システムを活用した安全運転支援や自動運転制御に関わるユースケースの共同研究を2019年から進めていますが、このたび合流時車両支援の実地検証を行い、2020年８月に世界で初めて成功しました。

合流試験に使用した 5G および C-V2X システムを搭載した
自動運転実験車両と美深試験場テストコース
実験車両は左からWRX S4、フォレスター、インプレッサSPORT（2台）

新型フォレスターのデザイン開発について

Styling Design Development of New FORESTER

磯　村　　晋[*1]
ISOMURA Susumu

小　林　昂　平[*2]
KOBAYASHI Kohei

雲　野　裕　紀[*1]
KUMONO Yuuki

抄　録

「安心と愉しさ」をデザインで表現する『DYNAMIC × SOLID』。そのフィロソフィーの全てを織り込み2018年に誕生した第5世代フォレスター。

新型フォレスターでは、各市場から高いご評価頂いたその内外装デザインの、「個性と存在感をさらに高める」を「BOLDER」に表現する事を目指した。以下にその取り組みを説明する。

Abstract

The 5th generation FORESTER was born in 2018 embodying the philosophy of "DYNAMIC × SOLID" that expresses "Enjoyment and Peace of Mind" with its design.

The new FORESTER aimed to express "further enhancement of the individuality and the presence" of the past interior and exterior designs highly evaluated by each market in a "BOLDER" way.

1. まえがき

現行型フォレスターは「DYNAMIC × SOLID」を全身で表現し「安心と愉しさ」をお客様へお届けした。

現在SUBARUデザインは、そのフィロソフィーをさらに進化させ、SUBARU車それぞれの商品性、個性を大胆「BOLDER」に表現し、商品価値を際立たせる事に取り組んでいる。

図１　Production model of new FORESTER

新型フォレスターでは、そのBOLDER思想で機能性と存在感を大胆に高め、SUVらしい力強さと冒険心をかき立てるデザイン表現で、さらなる「安心と愉しさ」をお客様へお届けする事を目指した(**図1**)。

また、新たに北米市場にはWILDERNESSエディションを加え、新型フォレスターのシリーズバリエーションの充実と、SUBARU SUVラインアップの強化で、より多くのお客様へお届け出来る「安心と愉しさ」を提案した(**図2**)。

図２　Production model of WILDERNESS edition

＊1 デザイン部
＊2 SUBARU RESEARCH AND DEVELOPMENT, Inc.

2. エクステリアデザイン

エクステリアでは、そのBOLDER思想で、一目見て強い印象を与えるSUVらしさと冒険心をかき立てる、“新しいフォレスターらしさ”を目指した。具体的には、ヘキサゴングリルから始まる強い中心部の立体、そこに強いボリュームのバンパーサイドを勘合させ、縦基調のスタンスと厚み有る力強い立体感を強調する。そして先進性を付加する事を狙いとした(図3)。

図３　Concept example of BOLDER

(1) 存在感ある力強いフロントデザイン

大型化され力強さを増したヘキサゴングリルを高い位置に配し、そこから始まる立体の流れをフロントからサイド、そしてリヤにまで連続させることによる勢いとボリュームで存在感を大胆に強調し、よりシンプルで張りの有る面で造り込む事で、車輌全体での統一感も向上させ質感を高めた。

ディティールでは、機能をそのままに小型化した先進性表現のヘッドランプとフォグランプを効果的に四隅に配し、バンパーの塗面を拡大しフロント全体で厚みと立体感有る強いスタンスをさらに高めた(図4)。

図４　Production model of new FORESTER

(2) 統一感有る力強さと先進性の表現

サイドではルーフレールのカラード化と、新意匠のフロントバンパーの「嵌合」モチーフを取り入れ、力強さと動きを表現した18インチアルミホイールを設定し、質感向上と力強さを強化した。またリヤバンパーカバーもフロントデザインと連動した新意匠とし、車輌全体で統一された上質感と先進性を表現した(図5)。

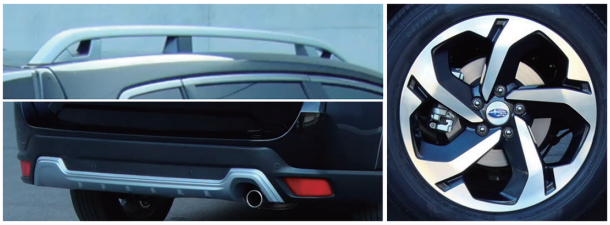


図５　Production model of new FORESTER
：an example of NA spec.

(3) 個々のキャラクターを際立たせるカラー＆マテリアル

エクステリアカラーでは、新型フォレスターが目指すアクティブな表現を高めるべく、有彩色のバリエーションを充実させた。若々しくスポーティーなカスケードグリーンシリカと、普遍的な魅力を持つオータムグリーンメタリック、力強さと上質さを併せ持つブリリアントブロンズメタリックを加えた10色ラインアップで、幅広いフォレスターユーザーの嗜好に応え得るカラーバリエーションとした。

また、各部品色やマテリアル表現も各グレード夫々のキャラクターを際立たせる専用仕立てのカラーコーディネートを施し、シリーズバリエーションの広がりを強めた(図6)。

図６　Exterior color variations

3. インテリア カラー＆マテリアル

インテリアでは、グローバルに高いご評価を頂いている基本デザインをそのままに、さらなる質感表現と充実感を強化し、新型フォレスターに相応しい室内空間を目指した。

具体的には、市場毎の各グレードのキャラクターと世界観をより強調した明確な個性に、上質感と先進性、ふくよかさ表現を高めるカラーコーディネートとした。

(1) 各キャラクターと世界観を際立たせるカラーコーディネート

例えば、北米の「TOURING」で採用したブラウン仕様では、シートアクセント材とドアアームレストにブラック色を効果的に配す事で、若々しいスポーティな表現と共に上質表現と汚れ等へ配慮する機能性を強化。「LIMITED」ブラック仕様では、アームレストと同色の表皮加飾をインパネ部に与え、統一された上質さに先進性を付加した。これによりメインテーマの連続造形を強調し、包まれる安心感表現も高めた。また「SPORT」では、アクセントカラーを各操作系に集中させ、アクティブさに機能性表現を加え強調した(図7)。

図７　Interior Color variation：an example of NA spec.

(2) 個性を高めるカラー＆マテリアル表現

国内仕様では、「TOURING」と「X-BREAK」に撥水シート材を採用し、アクティブさと機能性を強化した。色調も黒色とする事でスポーティさもさらに高めた。また「ADVANCE」では、ナッパレザーシートの設定で大幅な質感向上を図った。色調も二色展開とし、バリエーションの広がりと充実感を高めた(図8)。

図８　Interior Color variation：an example of JPN spec.

4.　WILDERNESS エディション

お客様の「もっと先まで行ける」期待を増幅させる商品造りで、SUBARU SUVラインアップにもう一つの世界観を加え、さらなる「安心と愉しさ」の提案を目指し、北米市場へWILDERNESSエディションを新たに設定した。

その第一弾となるOUTBACKに続き、新型フォレスターにもWILDERNESS エディションを設定した。「More Active More Rugged」のデザインコンセプトをそのままに、BOLDER思想でフォレスターが持つ機能性を大胆に表現し、シリーズバリエーションの充実とWILDERNESSシリーズの強化を目指した。具体的には、WILDERNESS共通の「ラギッドで精悍な表情」と「機能を強調した特別な仕立て」を踏襲しつつ、新型フォレスター WILDERNESSらしさを表現した(図9)。

図９　WILDERNESS Design Concept

(1) エクステリア

フロント廻りでは、より大きく立体的なヘキサゴングリルと、プロテクトエリアを大幅に拡大したバンパーでラギッドさを強めた。さらにコーナー部分を削ぎ落とし、SUBARU新アイコンの六連LEDフォグランプを高い位置に配し、走破性の高さもアピールした。さらにカバーバンパーとスキットプレートを強調し機能表現も強めた。

サイド廻りでは、専用形状のルーフレールにアクセントカラーのアナダイズドイエローを配し、機能性をアピールした。ウインドモールとオールテレインタイヤに呼応する力強い専用17インチホイールをマットブラックで引き締め精悍さを高めた。

また、この強い足回りを支えるドア部とアーチ部のクラッディングは、力強い専用デザインを採用した。同様にサイドシルスポイラーも、ロードクリアランスを強調するシンプルで力強い形状とし走破性の高さを表現した。

リヤ廻りでは、カバーバンパーを専用形状とし、さ

らにリヤスポイラーサイドとリヤゲートガーニッシュを専用仕立てとする事で、統一されたラギッドさと機能性を強調した(図10)。

図 10　Production model of WILDERNESS

カラー＆マテリアルでは、エクステリアカラーにWILDERNESS専用色のガイザーブルー、アクセントカラーのアナダイズドイエロー色を採用し、統一感有る仕立てとした。また幾何学シボによるプロテクション表現をフロントからサイド、そしてリヤの主要部品にまで一貫する事で、視覚的なプロテクト感をさらに高め、新型フォレスターのWILDERNESSらしさを高めた(図11)。

図 11　Exterior color & material

(2) インテリア カラー＆マテリアル

インテリアでも、WILDERNESS共通のテーマ、「スポーティで精悍な空間創り」と「機能を強調する特別な仕立て」を統一し演出、そこに新型フォレスターらしさを付加した。

具体的には、ピラーとルーフ、アッパートリムの黒色化と、専用ダークグレイ色をコンビネーションさせたトリム類、各加飾部分に施したダークメタリック色塗装で、精悍で機能性の高い車内空間を目指した。

また、ステアリングやシフトノブ、Xモードスイッチの操作系部品、各ステッチやタグにアクセントカラーのアナダイズドイエロー色を効果的に配す事で、精悍でラギットな室内空間に、スポーティでアクティブなコントラストを効かせ、WILDERNESSらしさをさらに高めた(図12)。

図 12　Interior color & material

シート表皮材も同様、専用のダークグレイ色の防水仕様のポリウレタン素材を採用し、表面にヘキサゴンパターンのエンボス加工を取り入れ、より滑りにくくしっかり身体をホールドする機能性も高めた。ここにも統一したアクセントカラーのステッチやネームタグを効果的に配した。またヘッドレストにもシンボルマークのエンボス加工を施し特別感有る仕立てで、WILDERNESSらしさをさらに高めた(図13)。

図 13　Seat design

5.　おわりに

フォレスターは誕生以来、その独自性と機能性の高さを、沢山のお客様からご支持を頂いてきた。

新型フォレスターでは、BOLDER思想でそのフォレスターらしさに磨きをかけ際立たせ、商品性と存在感を大胆に高めた。より沢山のお客様に「安心と愉しさ」をお届けするべく、さらにデザインに磨きをかけて行く所存である。

【著　者】

磯村　　晋

小林　昂平

雲野　裕紀

SUBARU「インプレッサ」一部改良モデルを発表

～インプレッサの個性が際立つ３つの新グレードを設定～

2020年10月8日

● e-BOXER搭載グレード「Advance」・「2.0e-L EyeSight」を新設定
● STIチューニングの最上級グレード「STI Sport」を新設定

SUBARUは、「インプレッサ」を一部改良し、発表、発売しました。
今回の改良では、インプレッサ５ドアに、新感覚の走りの愉しさを実現する電動技術e-BOXERを搭載した「Advance」・「2.0e-L EyeSight」、インプレッサのスポーティさをより際立たせSTIのチューニングによって上質な乗り心地を実現した最上級グレード「STI Sport」を新たに追加しました。

インプレッサ SPORT「Advance」

インプレッサ「STI Sport」

新型レガシィアウトバックのデザイン開発について

Styling Design Development of New LEGACY OUTBACK

田中　繁[*1]
TANAKA Shigeru
戸谷裕之[*1]
TOYA Hiroyuki
小林昂平[*2]
KOBAYASHI Kohei
池田理恵[*1]
IKEDA Rie
磯村晋[*1]
ISOMURA Susumu

抄　録

「安心と愉しさ」をデザインで表現し「新たなSUBARUらしさと価値提案」を目指す『DYNAMIC × SOLID』。

新型レガシィアウトバックは、そのフィロソフィーの全てを織り込んだ重要な商品で有る。

その次世代レガシィアウトバックに相応しい、さらなる独自性の進化を目指した。以下にそのデザインの狙いを説明する。

Abstract

“DYNAMIC × SOLID” is our theme expressing “Enjoyment and Peace of Mind” in design and aiming to provide “new SUBARU-ness and product value.” The new LEGACY OUTBACK is the third vital vehicle that incorporates all of these philosophies. We pursued further evolution that suited the next generation LEGACY OUTBACK. The ideas of the design are explained below.

1.　まえがき

SUBARUの基幹車種であるレガシィアウトバック（以降アウトバック）は、1995年に第2世代レガシィツーリングワゴンの派生モデルとして誕生し、グローバルスタンダードに相応しい商品性とアウトバックらしい上質さとスポーティさを目指し、常に時代とお客様の声に寄り添い独自の進化を図ってきた。

新型アウトバックでは、商品コンセプトで有る「知的好奇心を刺激し、新たな発見を促すクロスオーバー」の具体化に向け、現行インプレッサから始まるSUBARUデザインフィロソフィー「DYNAMIC × SOLID」の集大成に相応しいデザインの進化で、次世代アウトバックの有るべき姿、独自性を表現した（図1）。

2.　デザイン開発の狙い

デザインコンセプトを「ACTIVE × TOUGH」に、「アウトバックが持つ独自性の強化」と「SUBARUのフラッグシップとして存在感の強化」をスタイリングでさらに強く表現する事を狙いとした。

図1　Production model LEGACY OUTBACK

2.1　エクステリアデザイン

エクステリアは、アウトバックの持つアクティブ性能を全身で表現するデザインを目指した。

＊1 デザイン部
＊2 SUBARU RESEARCH AND DEVELOPMENT, Inc.

具体的には、躍動感と力強さが響き合う事で生まれる独自性により、新しいアウトバックらしさを表現した。

(1) 存在感ある力強いフロントデザイン

フロント廻りは、SUBARUアイコンのヘキサゴングリルを起点に大きく立体的な造形で押し出しの強い印象を与えた(図2)。

図２　フロントビュー

フロントグリルは2本の立体的な横バーモチーフで伸びやかさと力強さを表現、造り込まれた加飾を効果的に配す事で質感表現も高めた。

バンパー廻りではボディにフィットしたクラッディングで機能性の高さを表現し、大型バンパーガードで力強さと走破性の高さをアピールし、光輝塗装を施す事で質感の高さも強調した。

フォグランプには、SUBARUの新アイコンと成る6連LEDを採用し先進性を表現。その周辺の加飾パネルを精緻に造り込み、ワイドなスタンスと質感を高めた。

ヘッドランプでは、よりシャープな表情を目指し薄型化で機能を集約し、SUBARUアイコンのコの字シグネチャーを印象的にした。またLEDターンを採用し、先進性と存在感を強めた(図3)。

図３　力強いスタンスと上質感、先進性の表現

(2) 力強さと躍動感、機能を表現したサイドビュー

ショルダーラインから上のキャビンシルエットやウィンドウグラフィックスは、躍動感とスピード感で「ACTIVEさ」を表現。ロアボディとホイールアーチ廻りでは、厚みを感じる面と造り込まれた力強い立体感で「TOUGHさ」を表現した。その二つの要素を高次元で融合し、新しいアウトバックの独自性を高めた。

またアウトバックの機能であるクラッディングは、最新のハイキングシューズをイメージし、ボディフォルムや骨格の動きにフィットさせた勘合デザインによる新しいラギッド表現で、機能表現も進化させた(図4、5)。

図４　スタイリング概念図

図５　サイドビュー

(3) 厚みと機能表現を強化したリヤデザイン

リヤ廻りでは、リヤゲートのピーク位置を高くし、ラインにも動きを持たせることで躍動感と厚みを強調した。また、バンパーエリアではフロント廻りに呼応した造形と仕立てとし、機能感と質感表現の統一を図った(図6)。

図６　リヤビュー

リヤコンビランプは、立体形状でコの字モチーフを強調し、ヘッドランプと同様にシャープな表情を持たせ、高い位置にレイアウトする事でよりワイドなスタンスを表現した(図7)。

図7　立体的なリヤコンビランプ

(4) 機能とスタイリングが融合したディテール

ディテールでも「ACTIVE × TOUGH」表現を強調した。

機能性の高いクロスバータイプのルーフレールを踏襲し、前後にロープフックを設定。機能的な形状とアルミ材の質感表現で、アイキャッチを高めた。

ドアミラーはウィンドウモールと一体化し空力性能を高めた形状で、ウィンドウ廻りをシンプルに纏めた。

段付きリムを採用した18インチホイールは、ラギッドで大きく見えるデザインを狙った。切削光輝にダークメタリック塗装を施し上質さも表現した(図8)。

図8　「ACTIVE × TOUGH」な機能表現

2.2　インテリアデザイン

インテリアは、現行インプレッサから始まる次世代SUBARUインテリアデザインの思想をさらに進化させ、新型アウトバックに相応しい室内空間を目指した。

具体的には、伸びやかな連続造形で開放感を表現したアッパーエリアと、量感ある造形で適度な包まれ感を演出したロアエリアとのコンビネーション。

その二つの大きな流れの起点と成るセンターエリアに収まる大型ディスプレイでは先進感を表現した(図9)。

図9　スタイリング概念図

(1) 伸びやかで開放感有るアッパーエリア

センターから左右、そして後方へと繋がる大きな流れの造形。ダッシュボード中段部分にミッド加飾を採用し、マテリアルの変化が生み出す豊かな表情で前方への圧迫感を軽減し、さらに開放感を高める事を狙った(図10)。

図10　アッパーエリア

(2) 適度な包まれ感を演出するロアエリア

センターコンソールはシフトユニット位置を上げ、それが生み出す量感を後方にまで流す造りの大きな造形と、センターとドアアームレストを中心に豊かな立体感表現を与える事で適度な包まれ感を演出し、アウトバックらしい安心感を表現した(図11)。

図11　ロアエリア

(3) センターエリアの充実感と先進性表現

新型アウトバックでは、次世代SUBARUインテリアの特徴としてセンターエリアをさらに進化させた。11.6インチの縦型モニターを高い位置に配し、ベンチレーショングリル等の周辺機能も一体化、徹底したフラッシュサーフェス表現とクリアな仕上げを施す事でフラッグシップに相応しい充実感と先進性を表現した。また、フル液晶メーターを採用して次世代のドライバーズカーに相応しい先進性も強調した(図12)。

図 12　センターディスプレイとフル液晶メーター

(4) シートデザイン

シートデザインは、身体全体にフィットする立体造形とシンプルで大らかな仕立てで、心地良い包まれ感の有る豊かさを表現した。またシート背面はポケット機能等を損わず、より後席空間を広く感じるシンプルな形状とカバリングで纏めた。前席同様に造り込まれた後席シート形状と統一された仕立てにより、乗る人全てがゆったりくつろげる、アウトバックらしい上質な居心地の良い空間表現を目指した(図13)。

図 13　シートデザイン

(5) ユーティリティ

空間効率の良い造形とアイディアで新たな収納スペースを生み出し、アウトバックらしい機能性を強化した(図14)。

図 14　インパネトレイ・コンソールサイドポケット

2.3　カラーマテリアルフィニッシュデザイン

カラーマテリアルフィニッシュは、「インパクトと深み」をキーワードに「安心と愉しさ」表現を目指した。具体的には、お客様を一瞬でひきつける魅力＝「インパクト」で愉しさを、時間経過と共に醸し出す表情＝「深み」で安心を表現し、アウトバックが持つアクティブさと上質感をさらに高めるカラーバリエーションとコーディネートを目指した。

(1) エクステリアカラー

エクステリアカラーは新色2色を含めた9色をラインナップ。様々なアウトバックユーザーのニーズに応え得る普遍的な魅力を持つカラーバリエーションとした。新色オータムグリーンメタリックは、アクティブさと上質感を高める事で、新型アウトバックが目指す世界観をストレートに表現した。ブリリアントブロンズメタリックでは、シックで洗練された高い質感表現で、ラギッドさとリッチさを併せ持つアウトバックの独自性を強調した(図15)。

図 15　EXTERIOR COLOR バリエーション

(2) 個性を際立たせるカラーコーディネイト

新型アウトバックは、商品コンセプトをより際立たせる、LIMITED/X-BREAKの2グレードのシンプルな設定とした。

LIMITEDは、機能感有る原着部品と光輝表現のコントラストで、アクティブさと上質感が融合するアウトバックらしい独自性をより高めた。X-BREAKでは、より精悍でスポーティな世界観を演出し、新型アウトバックのバリエーションの広がりを表現した。エクステリアカラーは、主要部品をダークトーンで引き締め、その中に艶とマテリアルの表情とコントラストを与え、新型アウトバックに相応しい高い質感も付加した。また、専用ラダータイプのルーフレールを採用し、よりハードでアクティブなシーンにも対応出来る機能性も高めた。加えて、アクセントカラーのエナジーグリーンを内外装の中に効果的に配することで統一された世界観を演出し、アクティブイメージを強化した(図16)。

図 16　X-BREAK の世界観

(3) インテリアカラー

インテリアカラーは、LIMITED/X-BREAK の世界観をシンプルに表現し、それぞれの個性を際立たせた。

LIMITED は、黒色を基調に普遍的な魅力のスポーティさと大陸的な大らかさを表現。連続造形のミッド加飾色で包まれる安心感を強調し、要所を引き締めるケーシングモチーフにはグロスブラック／光輝塗装を効果的に配して質感を高めた。また、シートには肌触りがよく高質感なナッパレザーを設定、際立たせたステッチワークと合わせて新型アウトバックに相応しい上質さを高めた。ブラウン色仕様では、黒色とのコントラスト表現を高めて、シリーズ中最もアクティブで上質な仕立てとした。

X-BREAK では、黒色と専用ダークグレー色とのトーンオントーンのコンビネーションでスポーティな機能性を表現。シリーズ中最も精悍でスポーティな仕立てとした。ポリウレタン防水シートの採用や、アクセントカラーのエナジーグリーン色ステッチワークでアクティブさを強調した(図17)。

3.　おわりに

お客様へ「安心と愉しさ」の価値をデザインで表現する「DYNAMIC × SOLID」。その全てを注ぎ込む集大成と成る新型アウトバック。我々が、沢山の想いを込め、次世代に相応しいアウトバックらしさ表現に果敢にチャレンジ出来たのは、開発に携わった全ての方々の熱意と勇気によるものである。

アウトバックは誕生以来、常に時代とお客様の声に寄り添い独自の進化を遂げる。今産声をあげた新型アウトバックも、「安心と愉しさ」のデザイン表現にさらに磨きをかけて行く所存である。沢山のお客様に愛され、可愛がられるクルマに育つ様に。

LIMITED ナッパレザーシート : ブラウン

X－BREAK ポリウレタン防水材シート : ダークグレー

図 17　INTERIOR COLOR バリエーション

【著　者】

田中　　繁

戸谷　裕之

小林　昂平

池田　理恵

磯村　　晋

CVT オイルポンプ音開発における統計的因果探索手法 LiNGAM の活用

Development for CVT Oil Pump Noise Using Statistical Causal Discovery Method LiNGAM

小 山 智 樹[*1] KOYAMA Tomoki
山 本 宇 紘[*2] YAMAMOTO Takahiro
金 子 隆[*1] KANEKO Takashi
斎 藤 誠[*1] SAITO Makoto

抄 録

CVT構造が複雑化する中、分析に用いる計測データ量がますます膨大となり、オイルポンプ音の起振源や伝達経路を特定するのが困難になっている。そこで、短時間で確度が高い要因分析を行うため、統計的因果探索手法LiNGAM（Linear Non-Gaussian Acyclic Model）を用い、分析の効率化を図る。

本稿では、自動車開発特有の時系列・多点計測データを扱う際の適用ポイントを中心に述べ、その有効性についても紹介する。

Abstract

Elucidating the main excitation force and the transfer path of oil pump noises requires huge effort and resources especially because CVT is getting complicated by hardware and control systems. We used LiNGAM (Linear Non-Gaussian Acyclic Model) for understanding the causal structure of the issues to efficiently estimate the key factor from the measurement data.

This report shows the technical tips and the usefulness of this method with typical measurement data.

1. まえがき

近年、自動車開発では益々厳しくなる環境規制や多様な市場要求に応えるべく、早急な課題対応が求められている。パワートレインの開発においては、燃費やコストなど相反する要求を高次元で成立させるため、新規デバイス採用の選択も少なくない。SUBARUでも変速機（**図1**）の高効率化を狙い、2ポート吐出のオイルポンプシステムを採用した。一方、新システムでは分岐と集合の組み合わせが複雑な油圧回路システムのため、実験やCAE技術など従来手法の延長では課題の早期撲滅が困難である。そこで、本稿では従来手法とは異なり統計的因果探索手法を活用し、データ分析からメカニズム解明まで行ったので紹介する[(1)]。

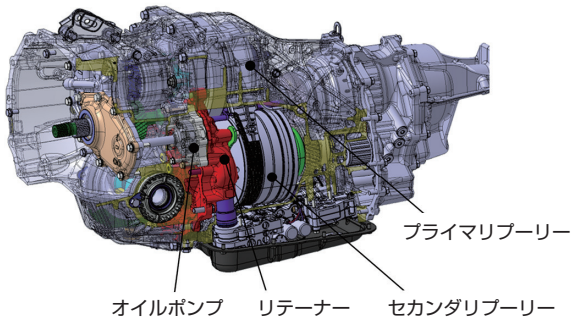


図1 CVT トランスミッション

2. CVTオイルポンプの変化点と騒音課題

2.1 2ポートオイルポンプシステムの概要

今回採用したオイルポンプシステムでは、さらなる燃費性能の向上を狙い、油圧システムの刷新を行った（**図2**）。具体的には、ライン圧とセカンダリプーリー圧を独立制御とし、オイルポンプは吐出ポートを2ポート化（**図2、3**）した[(2)]。

＊1 CAE部
＊2 車両運動開発部

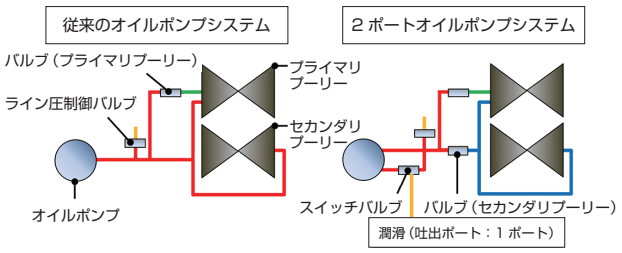


図２　オイルポンプシステム

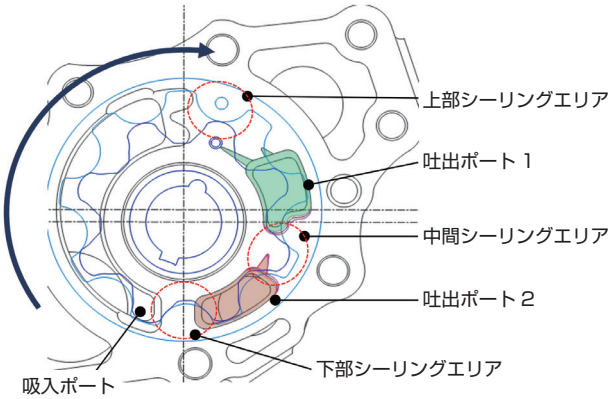


図３　２ポートオイルポンプの構造

本システムでは、ポンプ高回転時の必要以上の吐出を避けるため、1系統を低圧な潤滑回路へ吐出するなど、オイルポンプ負荷を軽減する状態へ切り替えることが可能となる。この機能により、潤滑流量を確保しながら代表的な車速域でオイルポンプ損失を14%、常用域でオイルポンプ駆動トルクを最大32%低減した。

2.2　騒音課題

今回のオイルポンプシステムでは燃費性能が向上した一方、構造が複雑なため、システムを成立させていく過程で、特定の運転条件で油圧脈動が増大し、オイルポンプ音が顕在化した（**図4、5**）。

油圧脈動が当初予測を超えた要因として、ポンプの幾何学的制約（各部クリアランス、歯形形状とそれに伴うポート間の連通）、下流回路の圧力損失変動（下流要素であるコントロールバルブの応答）の影響や固有値影響（配管形状）の影響など様々なことが考えられる。従来の実験とCAEによる分析手法では、起振や伝達の要と考えられる部位の振動や油圧挙動を計測し、CAEの予測と突き合わせて相互に比較検証しながら、メカニズムを解明する手段をとってきた。しかし、2ポート化により油圧回路構造が複雑となることで着目すべき部位が飛躍的に増加、さらには車両制御も複雑化した。これにより、課題となる音のベンチ試験での再現性確立や考慮しなければならない計測条件などが多様化し、メカニズム解明の難易度が上がった。

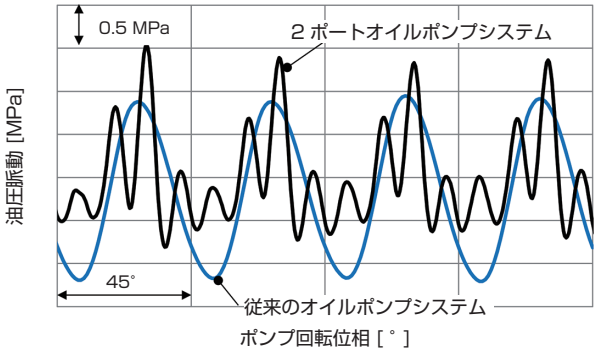


図４　油圧脈動

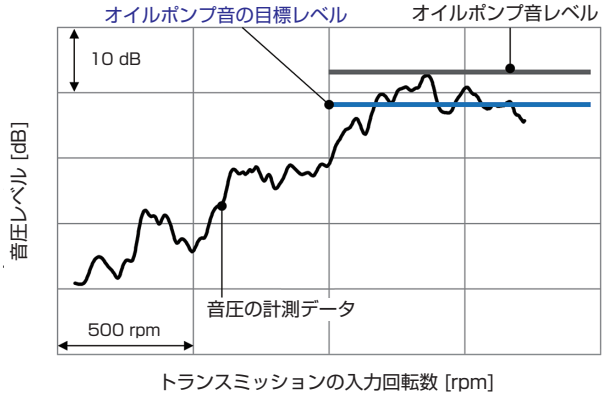


図５　２ポートオイルポンプシステムの騒音課題

2.3　従来の要因特定方法とその課題

前述通り、2ポート化に伴い計測点が膨大となるため、以下2つの手順で要因を特定した。

STEP1. 音と相関のある波形の抽出

多点計測の波形データは、計測点が最大で約100点、さらにエンジン回転数が基準となるデータからオイルポンプの回転成分に着目すべく、1次～10次まで次数分解を行っているため、数百以上の膨大なデータ群となる（**図6**）。分析者は、このデータ群から音と相関のある波形を次数毎に目視で判断し抽出する。

STEP2. 因果関係の推定

STEP1.で抽出した波形を物理的な伝播順序に並べ、波形の特徴を目視で追いながら因果関係を推定する（**図7**）。

これらの要因特定方法には3つの課題が挙げられる。

①目視で多量の波形データ群の相似性を確認するため、分析者の主観的な判断となり、音と相関のある波形の選択が定量的でない。

②波形データ群から、相関関係に加えて因果関係を推定することが非常に困難である。さらに、構造・制御の複雑化に伴い、反射波や定在波まで考慮すると因果関係の推定が一層難しくなる。

③熟練の技術者でも数週間レベルの時間が掛かる。

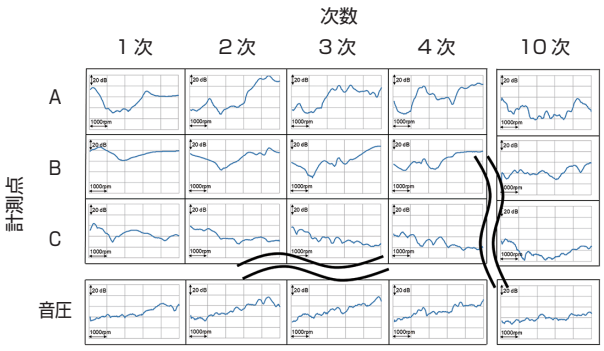


図６　従来の分析方法 STEP1

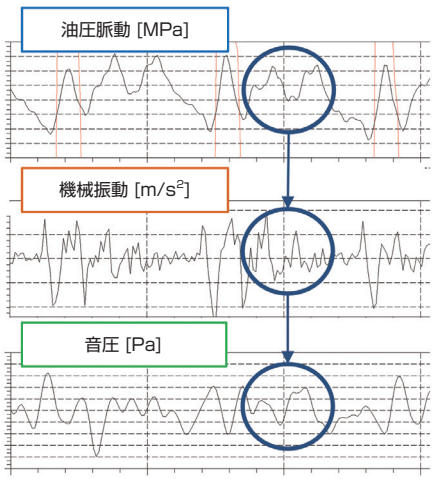


図７　従来の分析方法 STEP2

3.　統計的因果探索手法LiNGAM

3.1　LiNGAMによるアプローチ

従来の要因特定方法と課題から実現したい分析を整理すると、以下2つの分析手順となる。

STEP1. 音と相関のある波形の抽出

膨大な波形データ群（図6）から、音と相関のある波形を定量的に抽出し、関連性を順位付けする。

STEP2. 因果関係の推定

STEP1.の相関波形から因果関係を推定する。それにより、音の根本原因を捉える。

本稿では、これらの分析に適した技術である統計的因果探索手法LiNGAMを用いたオイルポンプ音のメカニズム分析手法を提案する。

3.2　LiNGAMの概要

LiNGAM（Linear Non-Gaussian Acyclic Model）[3]とは、データの分布から因果関係を推定する因果探索手法の1種である。従来の因果探索手法では、正規分布データを仮定する手法が主流であったが、多変量の場合に因果関係が推定できない問題があった。本手法は、非正規分布データを仮定することで、従来手法の問題を解消し、因果関係の向きと強さを推定可能にした。以降では、LiNGAMの代表的なアルゴリズムであるDirectLiNGAMを用いて因果関係の推定方法を説明する。

n個の観測変数$x_1, x_2,\cdots,x_n$に対するLiNGAMモデルは式(1)の様に示される。未観測交絡因子がない場合に式(1)は、観測変数x_iが、その変数以外の観測変数x_j ($j = 1,\cdots, n\ ; j \neq i$) と誤差変数$e_i$の線形和で示せ、係数$b_{ij}$を求めることで、$x_j$（原因）から$x_i$（結果）への因果関係の向きと強さを推定することができる。係数$b_{ij} = 0$の場合、x_jからx_iへの因果関係はない。ただし、誤差変数e_iは互いに独立で非正規分布に従うと仮定する。

$$x_i = \sum_{j \neq i} b_{ij} x_j + e_i \quad (i, j = 1,\cdots,n\ ; j \neq i) \tag{1}$$

$$x_i = \frac{cov\,(x_i, x_j)}{var\,(x_j)} x_j + e_i \quad (i, j = 1,\cdots,n\ ; i \neq j) \tag{2}$$

$$r_i^{(j)} = x_i - \frac{cov\,(x_i, x_j)}{var\,(x_j)} x_j \quad (i, j = 1,\cdots,n\ ; i \neq j) \tag{3}$$

次に式(2)(3)を用いた式(1)b_{ij}の推定手順を示す。

STEP1. 相関の算出

式(2)に示す様に、全変数に対して線形回帰を行い、網羅的に相関（回帰係数 $\frac{cov\,(x_i, x_j)}{var\,(x_j)}$ ）を算出する。

STEP2. 因果関係の推定

LiNGAM等の因果推論では観測データに含まれる誤差の伝播順序を推定することで因果関係の向きを決定する。LiNGAMは観測変数x_jと 式(3) 残差$r_i^{(j)}$の独立性［$x_j, r_i^{(j)}$］の評価を行い、観測変数x_jが全ての残差$r_i^{(j)}$ ($i = 1,\cdots, n\ ; i \neq j$) と独立の場合に観測変数$x_j$に含まれる誤差$e_j$が観測変数$x_i$へ伝播しているとし、$x_j$が原因、$x_i$が結果であると推定する。因果の向きが決定すると、その際の回帰係数が式(1)b_{ij}の因果強さ（2変数間の相関値）となる。

例えば、2変数(x_1、x_2)の場合、［$x_1, r_2^{(1)}$］と［$x_2, r_1^{(2)}$］の独立性を比較し、［$x_2, r_1^{(2)}$］の独立性が高い際に、x_2が原因（親子関係の親）、x_1が結果（親子関係の子）となる。3変数の場合は図8に示す様に、親変数が決定した後、残りの変数から親変数の影響を取除き（式(3)）、残りの変数間で親変数を推定する手順となる。以上の手順を繰返すことで多変量の場合においても、親（上流）側の観測変数から順に子（下流）側へと因果関係を推定することができる。

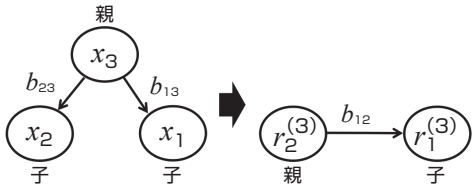


図８　３変数による因果関係の推定手順

4. LiNGAM適用課題と対策

4.1 LiNGAM活用における自動車開発データの適用課題

機械学習や統計分析を扱う場合、データの前処理（クレンジングや特徴抽出）や最適手法の選択、後処理として結果の可視化が重要になる。そこで、一般的な振動や音の分析フローによるクレンジング後のデータ（図9）、分析結果（図10、11）から今回の適用課題3つ（a、b、c）を述べる。分析フローの概要は、クレンジング処理は次数分解と標準化を行い、計算アルゴリズムは脳波などの医療分野でも利用されているDirectLiNGAMを用い、後処理は、因果グラフの出力を行う。ここでの標準化とは、油圧脈動MPaや機械振動m/s^2、音圧Paの様なスケールの異なる波形同士の分析も考慮する処理である。なお、対象とした実験データは油圧脈動18点、機械振動21点、音圧1点の計40個の計測点からなり、計測区間は800 rpm～2700 rpmの回転上昇を与えたデータである。

a. 波形の特徴が埋没

自動車開発では、過渡現象を再現する実験を頻繁に実施する。オイルポンプの開発では急加速や坂道発進時の性能を評価するため、エンジン回転数を上昇させる実験を行い、図9の様な右肩上がりのデータを多く扱う。この右肩上がりの大きな傾向をトレンドという。一方、振動や音の伝播を観るための波形は、トレンドより小さな変動形である。そのため、観たい波形がトレンドに埋もれることで、相関分析の際に、共通のトレンドに対して相似性がある（回帰係数 $\frac{cov(x_i, x_j)}{var(x_j)}$ が大きい）と判断されてしまう。

b. 結果の可読性が低い

40点の計測データを用いた因果分析の結果を図10に示す。○枠内がラベル名、矢印の始点が原因（親）、終点が結果（子）になる。矢印に隣接する数値が2変数間の相関値（係数b_{ij}）になる。

緑枠の音圧ラベルに対して重要な波形ラベルを抽出する場合、2変数間の数値は、音圧ラベルに対する相関値ではない。そのため、各ラベルが複雑に絡み合う因果グラフから音圧に関わる重要波形を読み解くことは厳しい。

c. 物理的な因果順序が不規則

メカニズム解明には、物理法則や過去知見を有効的に利用することも必要である。本稿で扱う伝播メカニズムは物理的に油圧脈動、機械振動、音圧の順序で伝播すると考えられる。しかし、分析結果（図11）は機械振動から油圧脈動へ伝播する場合もあり、物理的な因果順序に矛盾する。ここで、因果矢印の総数に対して誤った因果順序を示す矢印総数の割合をエラー率と定義すると、エラー率は36.2%と高い結果であった。

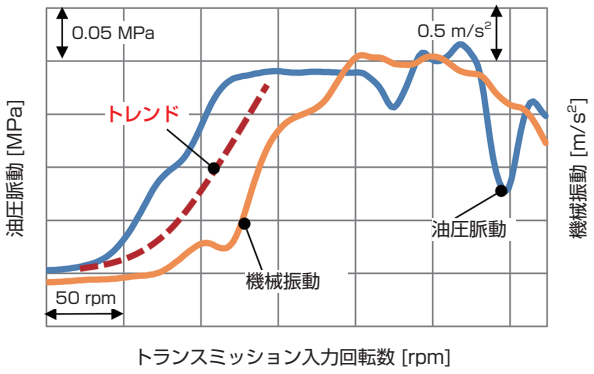


図9　一般的な分析フローによるクレンジング後のデータ

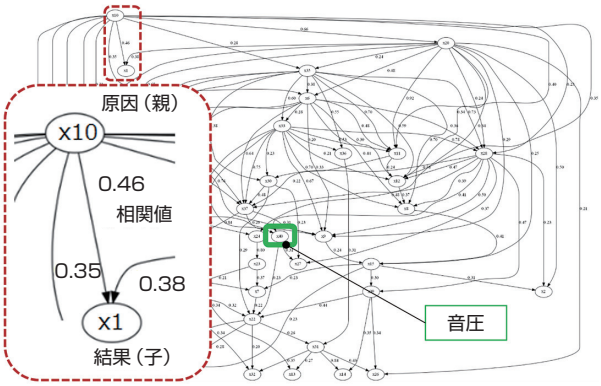


図10　一般的な分析フローによる分析結果（40点）

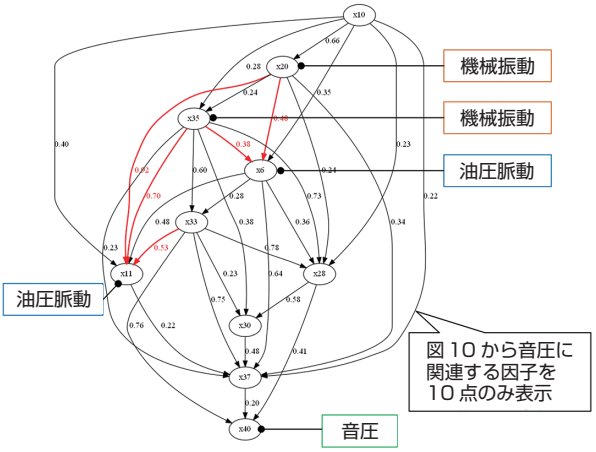


図11　一般的な分析フローによる分析結果（10点）

4.2　適用課題への対策

3つの課題に対して対策A、B、Cを検討した。

A. 特徴抽出

前処理としてクレンジング後に差分処理$(X_t - X_{t-1})$[4]を追加することで、特徴を抽出した。ここで、X_tとは時系列データを示す。**図9**のトレンドを含んだデータに対して差分処理を行った結果を**図12**に示す。右肩上がりの傾き成分が除去され、波形の特徴が表れた。

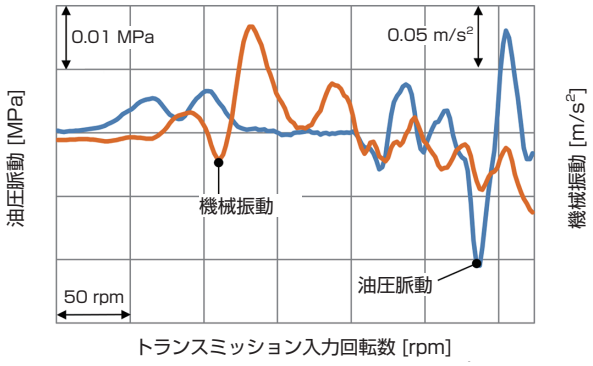


図 12　差分処理による特徴抽出

一方、全ての波形データに対して無作為に差分処理を施すと、過剰差分となってしまい精度悪化の要因と成る。そこで、データに対して差分処理が必要か判定するため、ADF-GLS検定（Augmented Dickey-Fuller-Generalized Least Squares test）[5]も同時に行った。本検定は、「仮説：データは定常である」を統計的に判定する手法であり、その判定結果から、トレンドを含む非定常データの有無を判断する。具体的な検定アルゴリズムは差分変換$(\Delta X_t = X_t - X_{t-1})$した回帰式(4)をベースに自己回帰係数$\beta$の有意性を評価することで定常性を検証する。ここで、αは定数項であり、γはトレンド項係数、tはトレンド項、pはラグ次数、θはラグ項係数、ε_tはホワイトノイズを示す。検定式(4)から帰無仮説H_0：$\beta = 0$（定常でない）、対立仮設H_1：$\beta > 0$（定常である）として、有意水準を上回り帰無仮説が棄却されない場合、非定常データ（トレンド有）と判断した。

$$\Delta X_t = \alpha + \gamma \cdot t + \beta \cdot X_{t-1} + \sum_{i=1}^{p} \theta \cdot \Delta X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (4)$$

最適なラグ次数pの選択には主にAIC（Akaike Information Criterion）もしくはBIC（Bayesian Information Criterion）が用いられる。また、有意水準は5%（P－value = 0.05）が一般的であるが、5%以下にすると、より厳密に判定が行われるため、適切な水準値を設定する必要がある。そこで、本検定の実施にあたり適切なパラメータを選択すべく、4.1節で示す物理的因果順序のエラー率を用いて各組合せの精度評価を行った。先ず、全計測データに対してADF－GLS検定を用いて非定常性（トレンド有）を判定し、非定常性を持つ場合は差分処理を行った。その後、DirectLiNGAMによって因果関係を求めることでエラー率を算出した。その結果、式(4)に対してAICと有意水準（P－value = 0.01）1%の組合せが最もエラー率が低下する（10.8%）最適な設定値であることが分かった。このように、本設定によるADF-GLS検定と差分処理を実施することでトレンドに埋もれたデータの特徴抽出を行った。

B. 結果の可読性向上

本稿では係数b_{ij}（2変数間の相関値）を用いて、目的変数に対するその他因子の相関度を算出した。

図13に示す様に、目的変数から遡り、係数b_{ij}を線形和することで因果順序を考慮した相関度を算出し、その値が大きい因子のみ出力することで、結果の可読性を向上させた（例：相関度が0.3以上のラベルのみを表示した）。

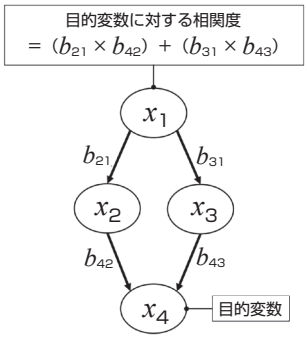


図 13　目的変数に対する相関度の算出アルゴリズム

C. prior knowledge-DirectLiNGAM [6]の活用

pk（prior knowledge）-DirectLiNGAMについて説明する。この手法は、DirectLiNGAMの派生であり、因果関係の事前情報が存在する場合に、その情報を利用することで精度向上が図れる。事前情報を表す変数a_{ij}^{pk}を式(5)の様に定義することで、3.2節で解説した係数b_{ij}の推定に事前情報が反映される。例えば、機械振動因子x_nは油圧脈動因子x_mの原因にはならないため、変数$a_{mn}^{pk} = 0$として情報を与えることで、既知な因果的順序を正しく推定可能となる。本稿は、4.1節で示す事前情報（物理的因果順序）を反映すべく本手法を活用することで、エラー率を0%に下げた（物理的因果順序の誤判定を無くした）。

$$a_{ij}^{pk} = \begin{cases} 0 : x_j \text{は} x_i \text{の原因ではない} \\ 1 : x_j \text{は} x_i \text{の原因である} \\ -1 : x_j \text{は} x_i \text{の原因になるか不明である} \end{cases} \quad (5)$$

本節の対策A、B、Cを踏まえた分析フローを図14に示す。

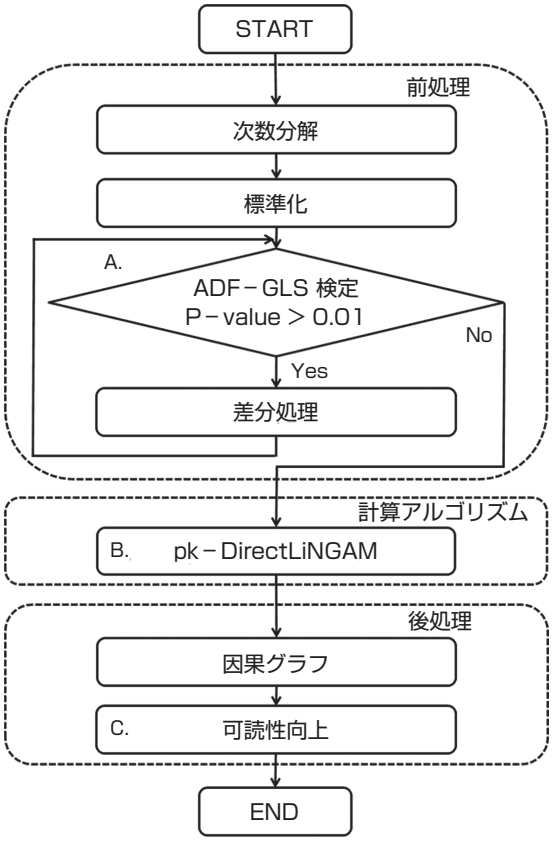


図 14　分析フロー

5.　LiNGAM分析結果とオイルポンプ音改善案

5.1　LiNGAM分析結果

図15にオイルポンプシステムの各計測点(横軸)における、音圧に対する相関度(縦軸)を示す。縦軸の絶対値が大きい程、相関度が高いことを示す。この結果から最も音に寄与した成分はオイルポンプに隣接するリテーナーであることが分かる(図1)。なお、本部位は過去知見から予め想定された箇所と同じであるが、周辺の部品との兼ね合いで設計変更の自由度がなく、リブを付ける等の対策が厳しい場所である。

一方、図16の因果グラフは、起振源から音への伝達経路を示す。この結果から、油圧回路上で「下部シーリングエリア」部が最も上流に位置する親因子であり、オイルポンプ音の根本的な増幅要因の可能性があることが分かった。本部位は、吐出側と吸入側の間に位置し(図3)、圧力遮断を担う箇所であることから、低圧の部位となるため、経験的に疑わない部位であった。しかし、本分析で先入観に囚われず発見することができた。

以上の結果から、LiNGAMを活用することで、2.3節で述べた従来の要因特定方法の3つの課題に対して、以下を実現した。

① 定量的な相関の算出による順位付け

音に対して定量的に相関度を算出することで、客観的に優先順位を付けて対策可能となった(図15)。

② 因果関係の推定による主要因特定

複雑な油圧回路システムから主要因を特定することが可能となった(図16)。

③ 分析時間の効率化

本手法の分析時間は数分である。数週間掛かっていた従来に対し大幅に削減した。さらに、誰でも簡単に本分析を実施することが可能となった。

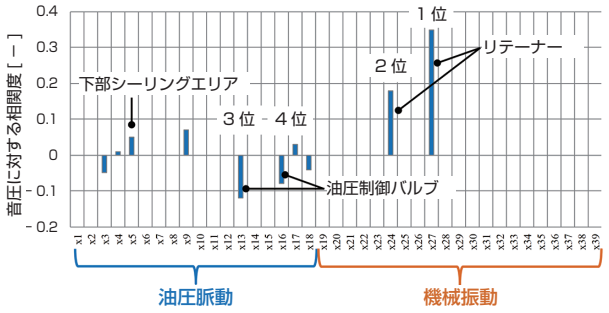


図 15　オイルポンプ音に対する相関度

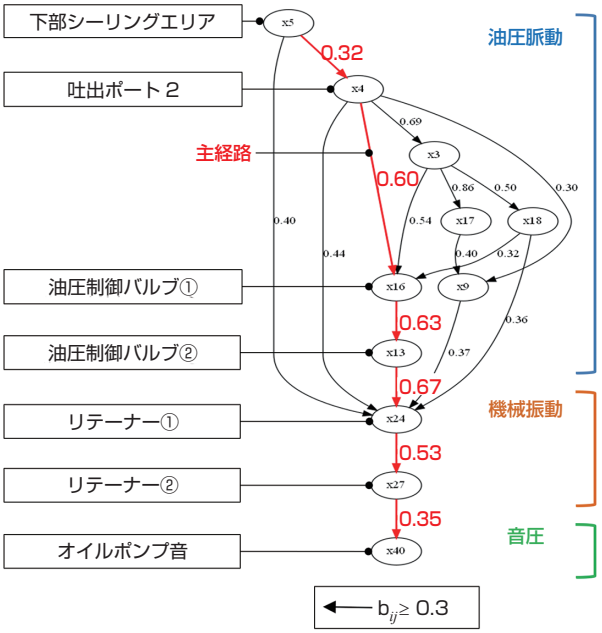


図 16　因果グラフ

5.2　オイルポンプ音改善案

分析結果で示した「下部シーリングエリア」部の分析を進めた結果、本部位のシール性が保てず、漏れ込みによる圧力脈動が生じていた。そこで、シール長を拡大することで、オイルポンプ音を4 dB改善できた（図17、18）。

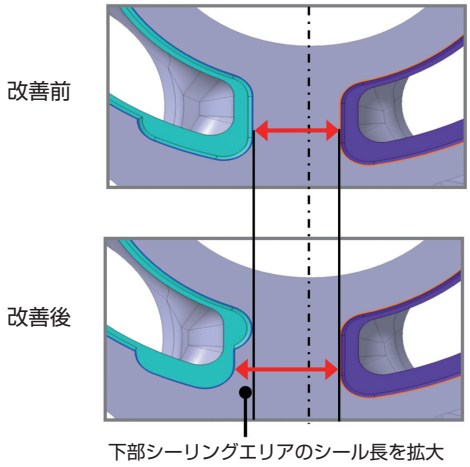


図 17　改善部位

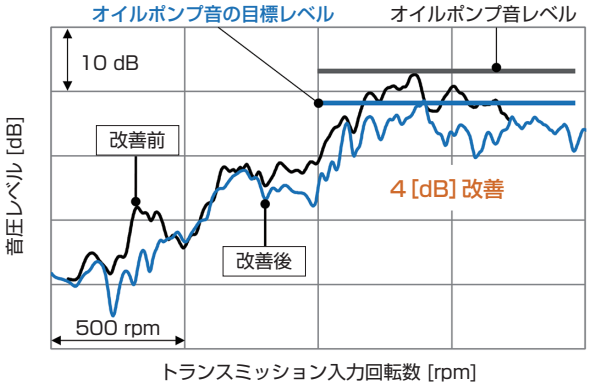


図 18　改善結果

6.　まとめ

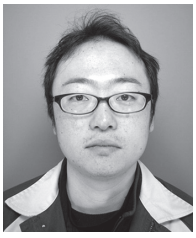
自動車の構造や制御システムが複雑化することで、メカニズム解明が困難になっている。本稿では、統計的因果探索手法LiNGAMを用いたメカニズム分析手法を構築し、2ポート吐出オイルポンプシステムに適用した。その結果、因果関係を求めることで起振源から伝達経路までを解明することができた。また、対策立案と効果検証により本手法の妥当性を確認して有効な手段であることを示した。今後は、本手法の適用範囲を拡大し、自動車開発の様々な課題に早く応えられる開発プロセスを構築していく。

参考文献

(1) 小山智樹，山本宇紘，浅野貴文，斎藤誠：統計的因果探索手法を用いたCVTオイルポンプ音の起振源・伝達経路の推定，自動車技術会2021年春季大会 学術講演会 講演予稿集，20215031（2021）
(2) 堀江信也，藤井忠則：新型高容量チェーン式CVTの開発，自動車技術会2018年春季大会 学術講演会講演予稿集，20185317（2018）
(3) 清水昌平：統計的因果探索，株式会社講談社，978-4-06-152925-0（2017）
(4) 横内大介，青木義充：現場ですぐ使える時系列データ分析，株式会社技術評論社，9784774163017（2020）
(5) 坂野慎哉：ADF-GLS検定とその用途、京都大学経済論叢，第183巻第2号(2010)，p.35-44
(6) T.Inazumi, S.Shimizu, T.Washio：Use of prior knowledge in a non-Gaussian method for learning linear structural equation models, 9th International Conference on Latent Variable Analysis and Signal Separation（LVA/ICA2010），p.221-228

【著　者】

小山　智樹


山本　宇紘

金子　　隆

斎藤　　誠

ドライバーモニタリングシステム：ジェスチャーコントロール機能の開発

Development of Gesture Control Function in Driver Monitoring System

時 﨑 淳 平* TOKIZAKI Junpei
浅 井 恵 二* ASAI Keiji
山 﨑 達 郎* YAMASAKI Tatsurou

抄 録

SUBARUが掲げる「安心と愉しさ」をお客様に届けるために、ドライバーモニタリングシステム（以下、DMS）にジェスチャーコントロール機能（以下、本機能）を追加した。本機能は、マルチファンクションディスプレイ（以下、MFD）バイザー下に搭載されたカメラと近赤外LEDを使用してDMSにかざした手の形（以下、ジェスチャー）を画像認識することにより、ジェスチャーの種類を判定している。また、本機能では判定したジェスチャーの種類により、エアーコンディショナーの設定温度をタッチレスで変化させる機能を有しており、目線を落とさずにエアコンを使えることによって「安全性」と「利便性」の観点からDMSを進化させることに成功した。

Abstract

In order to deliver “Enjoyment and Peace of Mind” to our customers, we added a gesture control function to the Driver Monitoring System (DMS). In this function, a camera and near-infrared LED are installed under the visor of the Multi-Function Display. This function judges gesture types by imaging, processing, and calculating driver’s gesture images. In addition, this function can change the set temperature of the air conditioner by specific types of gestures in a touch-less manner. We have succeeded in evolving DMS from the viewpoint of safety and convenience.

1. まえがき

当社は、乗る人すべてに「安心と愉しさ」を提供することを目標に車両開発に取り組んでいる。その中でもドライバーの様子を見守ることでヒューマンエラーによる交通事故を未然に防止し、加えて個人認識によるパーソナライズ機能を有するドライバーモニタリングシステム（以下、DMS）の開発に注力してきた。また、今までには搭載されていなかった先進的な装備や安全装置が自動車に積極的に採用されており、お客様のニーズもそれに合わせて安全性や利便性にフォーカスされている。このような環境下で、お客様に「安心と愉しさ」を提供するためにDMSにジェスチャーコントロール機能（以下、本機能）を追加し、商品の「安全性」、「利便性」の観点からDMSを進化させることに成功した。

＊ コネクティッドカー開発部

2. 開発の狙い

近年、自動車は安全装備・先進装備で大きな進化をしており、運転支援機能や自動運転機能など、今まででは考えられなかったシステムが車に搭載されてきている。このような変化に応じるため、安全性と利便性の観点からSUBARU車へ付加価値を与え、お客様に「安心と愉しさ」を提供するために本機能の開発に取り組んだ。

2.1 安全性の向上

警視庁交通局の調査によると、平成30年度の交通事故全体でわき見が起因しているものは60,990件あり、事故原因数の2位に位置している[(1)]。本機能は、これらの脇見運転に起因する事故の中で運転以外の操作、その中でも比較的操作頻度の多いエアーコンディショナー（以下、エアコン）の操作に着目し、エアコンをタッチレスで操作できる機能を搭載させることで

脇見運転を未然に防ぐことを目指した。

2.2　利便性の向上

車の装備をタッチレス操作とすることで、利便性の向上に貢献することも狙いとした。車両走行中のエアコン操作にフォーカスし、タッチレス操作により運転中のエアコン操作をより簡単にすることで、利便性の向上を図った。

3.　システム構成概要

3.1　システムブロック図

システム構成を図1に示す。ユーザーがかざした手の形（以下、ジェスチャー）の情報と、CAN経由で各ユニットから取得する車両情報を基に判定を行い、判定結果を各ユニットへ送信する。

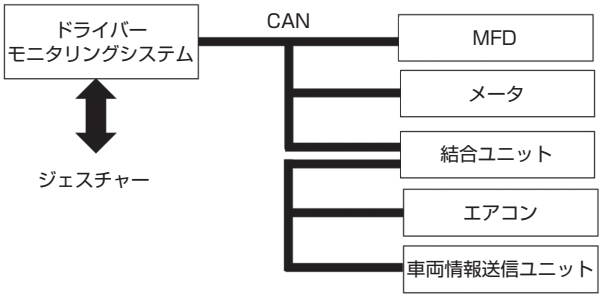


図1　システムブロック図

3.2　機能割付け

ユーザーのジェスチャーをDMSが認識し、認識結果をエアコンとMFDに通知する。ジェスチャー認識結果をもとに、エアコンは空調の設定温度を変更し、設定温度をMFDに通知する。MFDは、ジェスチャー認識結果（通知音）及び空調の設定温度（表示）をユーザーに通知する。

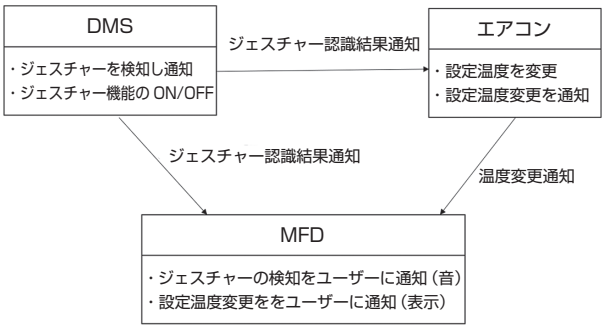


図2　ジェスチャーセンシング論理構造

4.　センシングシステム

本システムではセンシング精度や応答性に重きを置いているため、カメラを使用したセンシング方式を採用した。また、太陽光を始めとした外乱光からの影響に対しても高いロバスト性が期待でき、夜間でも光自体の煩わしさが少ない近赤外カメラを採用した。

4.1　ハードウェアの構成

図3に示すハードウェアでDMSは構成されている。近赤外LEDとカメラモジュールを搭載し、ドライバーを近赤外画像として撮像する。

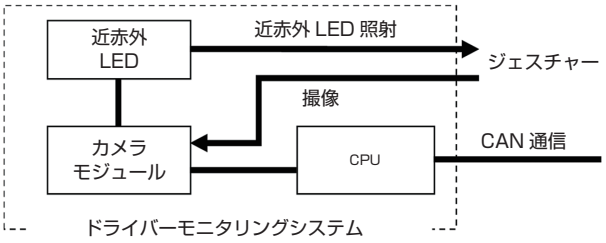


図3　ハードウェア構成

4.2　レイアウト

図4に示すようにDMSはMFDバイザー下に搭載してある。近赤外LEDとカメラの画角エリアがドライバーを撮像できるように確保されており、アイサイト等の他ユニットに影響が及ばないように配慮してレイアウトしている。

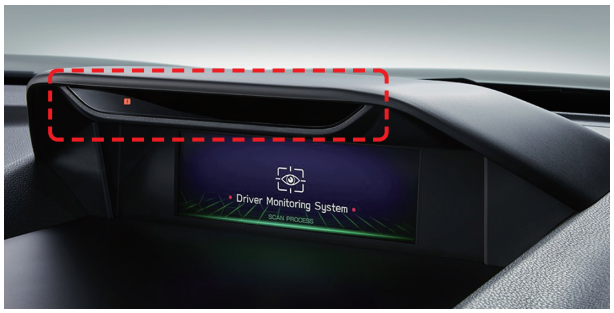


図4　ドライバーモニタリングシステム搭載位置及び外観

4.3　検知原理

近赤外LEDが発光し、ユーザーの体に反射した光を受光して、近赤外画像を撮像する。撮像された画像の手の形状から、ジェスチャーの種類を判定し、出力する（図5）。

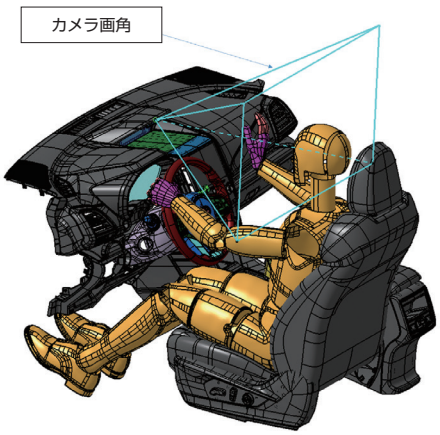


図５　検知原理

4.4　ジェスチャーの種類

グローバルで使用するにあたり、ジェスチャーの候補を何種類か挙げ(ピースサイン、サムズアップ、OKサインなど)、否定的な意味のあるジェスチャーを除外していった結果、「グー」と「パー」のジェスチャーを採用した(図6)。手のひらを見せるパーは一部の国で侮辱にあたるため、手の甲を見せるパーでもジェスチャーが反応するように設計した。

「グー」を検出したらエアコンの設定温度を2℃下げ、「パー」を検出したら設定温度を2℃上げるとした。

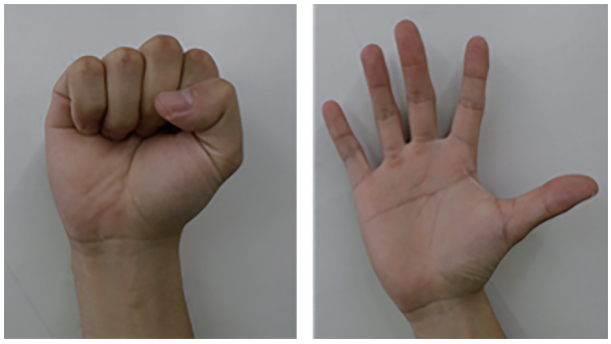


図６　採用したジェスチャー

4.5　ジェスチャー検知エリア(Hand-Box)

乗員がジェスチャー動作を行う範囲をジェスチャーの検知エリア(Hand-Box)として定義した。

4.5.1　ジェスチャー検知エリア(Hand-Box)の大きさ

ジェスチャーの大きさを体格別(Small：小柄な成人女性相当、Medium：標準体型の成人男性相当、Large：大柄な成人男性相当)で定義することにより、手の大きさや体格などの個人差によらず検知をできるようなエリアを設定した。

4.5.2　ジェスチャー検知エリア(Hand-Box)の位置

周辺に何もなく、安全かつハンドルから手を放す時間が短くなるような位置に検知エリアを設定した。加えて、乗員の各体格のヒップポイント、腕の長さ、手の厚みなどを参考にし、人間工学的にジェスチャーの届く範囲を定義し、検知範囲位置を確定した(図7)。

また、ハンドルを握る手を間違えてグーと検知しないように、グーを検知する時は一部検知範囲を制限した(図8)。

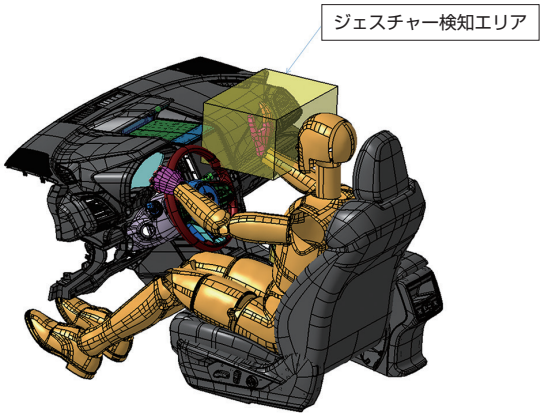


図７　ジェスチャー検知エリア

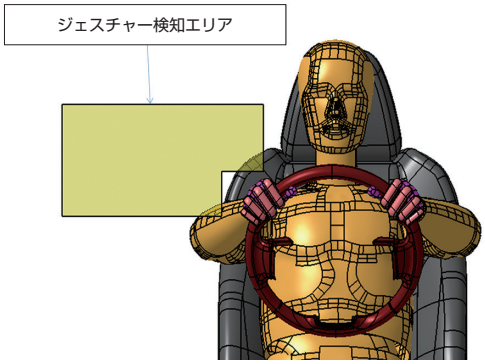


図８　ジェスチャー検出エリアの制限

4.6　判定ロジック

判定ロジックを図9に示す。

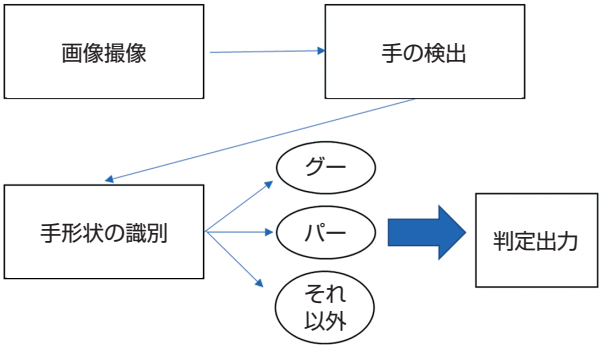


図９　ジェスチャー判定フロー

4.3と図5に示すように、ユーザーの体に近赤外光を当て、その反射光からユーザーの姿を撮像する。その画像の中のHand-Boxから手を探索し、検出したな

らば手の形を識別する（グー、パー、それ以外）。その結果を出力する（図9）。

4.6.1　過検出対策

ジェスチャーを検知するにあたり、開発の段階で以下の課題が挙がり、それぞれで対策をおこなった。

①車両上側にある装備操作時の手の過検出※1
②動いている手に対する過検出
③服のしわや顔への過検出
④後部座席の人や物への過検出

※1　過検出：ジェスチャー以外の動作や物をジェスチャーとして検知してしまうこと

4.6.2　除外要件※2

以下のような場合には、安全運転及びそれに伴うドライバーの行動を優先させたり、煩わしさ防止、安全上や車両機能の優先度の観点などから本機能の動作を制限した。

・ジェスチャー判定を報知することにより、ドライバーが運転に注意を払っている状態が著しく阻害される場合
・ドライバーの運転に必要な注意が損なわれており、不安全な状態の場合
・ドライバーが運転に必要な行動や車両機器操作を行っている場合
・後退時や駐車時
・優先度の高い車両機能動作時

※2　除外要件：本機能を停止させる条件・要件

5.　まとめ

DMSにジェスチャーコントロール機能を追加した。エアコンの設定温度をタッチレスに変更できるようにすることで、「安全性」、「利便性」の観点からDMSを進化させることに成功し、新たな価値をSUBARUの車両に付随させた。当社は今後も「安心と愉しさ」をお客様に提供するために技術の開発を推進するとともに、新しい価値の創造に邁進していく。

6.　謝辞

最後に、本システムの開発に多大なるご協力をして頂いた三菱電機株式会社の関係者各位に、厚く御礼を申し上げます。

参考文献

(1) 警視庁交通局：平成30年中の交通死亡事故の発生状況及び道路交通法違反取締り状況等について，2019年2月

【著　者】

時﨑　淳平

浅井　恵二

山﨑　達郎

定常過渡における PM/PN 排出低減に向けた燃料噴射系の開発

Development of Gasoline Direct Injection Systems for Reducing PM / PN in Steady and Transient Operation

加藤 真亮[*2] KATO Masaaki
桂 拓未[*2] KATSURA Takumi
原井 惇行[*2] HARAI Atsuyuki
中山 智裕[*2] NAKAYAMA Tomohiro
塚本 卓磨[*2] TSUKAMOTO Takuma
小野 泰[*2] ONO Tai
津田 雄史[*1] TSUDA Takeshi
椎名 義朗[*1] SHIINA Yoshirou

抄 録

ガソリン直噴エンジンにおけるPM/PNは、定常状態ではインジェクタチップウエット、過渡時は燃焼室壁面各部位への燃料付着が大きな影響を与える。LIFによる燃料付着計測などにより、各噴射時期と燃焼室内の各燃料付着の関係性が明らかにされた。チップスートの増加傾向は試験・分析手法を構築し、座間らの式の改良により時系列でのPNの増加傾向を評価可能であることが分かった。また、噴口設計の最適化によりチップウエットを低減し48%の定常PN低減が可能である。また、噴霧の流量分配により壁面付着傾向の異なる噴霧で、冷間・暖機後においてPNに与える影響の調査を行った。これにより、付着箇所の冷却水温度や燃料圧力がPN排出に与える影響が明らかにされた。低温時にはライナ付着領域の寄与度が上昇し、一方で高燃圧化の際はピストンに対する噴霧の相対的な速度が上昇する影響が大きくなることが分かった。

Abstract

PM/PN reduction is required for direct-injection gasoline engines by RDE conditions. Soot caused by fuel wetting on combustion chamber walls accounts for the major amount of PM, it is necessary to improve injection systems. Relationships between fuel wettings and PN in each injection conditions are clarified, and it was found that PN has different sensitivities to water temperatures and injection strategies. An evaluation method for injector aging was established and injector tip-wetting has been reduced for PN reduction in steady operation conditions. Considering transient operation, effects of flow rate distribution for nozzles on PN are also investigated.

1. まえがき

1.1 微小粒子状物質への規制強化

近年では各国にて自動車へのCO2排出量低減に加え, 欧州EURO7やCalifornia Air Resources Board (CARB) のLEV Ⅳ規制など、より厳しい将来排ガス規制が検討されている。欧州においては図1に示すようにWLTC (Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycle) のようなモードベースの規制に加え、RDE (Real Driving Emissions) 実走行環境におけるPM (Particle Matter) への規制が行われ、マニューバベースでの開発が求められるようになっている。さらに粒子状物質の規制では10 nm以上のPN (Particle Number) に規制強化が行われ、PM/PN低減が重要な

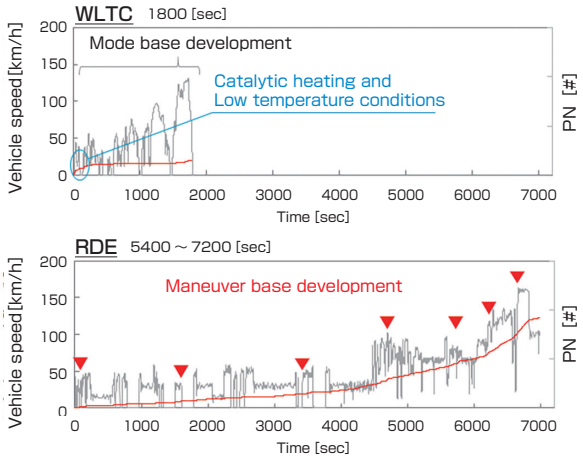


図1 WLTC and RDE

＊1 パワートレイン設計部
＊2 車両環境開発部

技術課題となっている[1][2]。直噴ガソリンエンジンにおけるPMの中でもsootは燃焼室壁面に付着した燃料液膜付近の局所過濃混合気から生成される割合が多く、定常だけでなく冷態時やアクセル操作に伴う過渡制御時などで特に多く排出される傾向がある。

2.　PM/PNの排出特性

2.1　車両走行時のPN排出特性

メカトロニクスに対応するV-model開発VDI2206[3]に適応したRDEの排出ガスの開発手法はMaschmeyerらによってMost Relevant Test Methodologyなどが提唱されているが、中でもPM/PNは3次元の流体力学的な燃料液膜挙動から、燃焼、分子動力学によるPAHs（多環芳香族炭化水素）の生成、凝集、再酸化、それらが数時間という時間軸で生じるデポジットの生成などと相互影響を持つなど、現象が複雑で定量的な予測が難しく、V-model開発の中では実験データベース構築によるサブプロセスが必要となるといった事も言われている[4]。

図2に代表的な過渡走行時における車速とPN排出量を示す。PNはCritical Caseで示す様な、過渡の制御変化を伴う箇所にて高い濃度を示す。図3に図2中のCritical Case2を統計分析した結果を示す。図3(a)で無次元回転数-無次元負荷の平面上で見ると車両走行に伴う動作線上に高濃度でPN排出が見られる。さらにこれらを時間で微分すると過渡を表す無次元回転数変化率と無次元負荷変化率が得られる。これら結果を運転点の使用頻度とPN積算値で重みづけし統計処理すると、平均化した過渡条件であるCritical rampと呼ばれる過渡条件が得られる。 Critical Case2の場合を例に過渡分析を行うと図3(b)となる。縦軸・横軸交点は定常状態を意味しているが、Critical rampを算出すると図3で赤点に示されるように無次元回転数24.0%、無次元負荷34.7%に対し 無次元回転数変化率0.34%/sec、無次元負荷変化率4.28%/secとなりこれらは定常状態の現象ではなく過渡と運転条件特有の現象が支配的であると分かる。これら分析により、RDEなど実走行条件ではPNを含む排ガス開発に対しては、定常運転条件に加えて、過渡運転条件を含めた運転条件とPN排出量の分析、それらを用いた開発が必要とされる事が分かる。

2.2　ガソリン直噴エンジンにおける燃料付着とPN

直噴ガソリンエンジンにおいて燃焼起因のPM、中でもsoot成分については燃焼室壁面における燃料付着が支配的である。

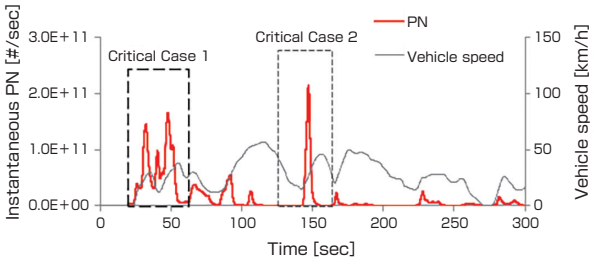


図2　PN Emissions on a Driving Condition

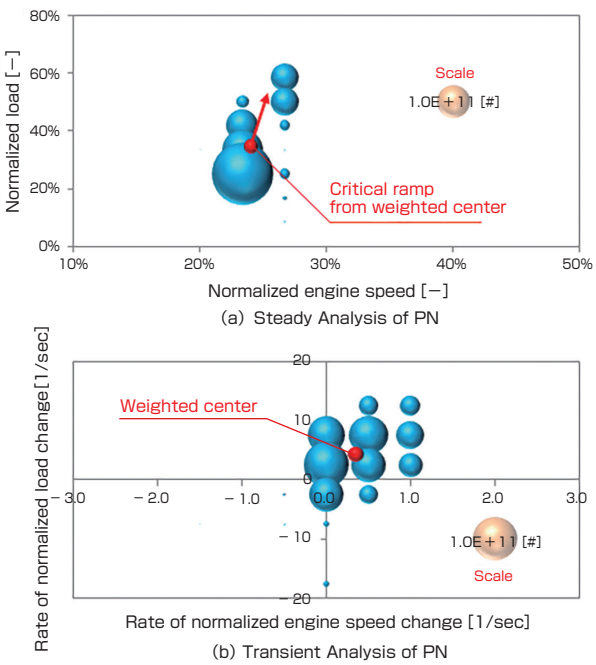


図3　MRT Analysis of Critical Case 2

図4に示す全周ガラスライナを有する可視化エンジンを用いて、燃費代表点の運転点で冷間時に発火運転を行いDBI（Diffusion Back Illumination法）を用いて計測した燃料起因PMであるsoot像を図5に示す。噴射時期（Start of Injection：SOI）は60 deg.ATDCで画像は燃焼～膨張行程にかけての代表的なクランク角度での像を抽出した。各sootの生成位置はそれぞれの燃料付着と密接に関係している事が分かる。これら燃料の付着箇所の違いにより、燃料の蒸発からPMの生成、高温・高圧雰囲気や酸素濃度によって異なる再酸化・熱分解速度、さらには凝集を経て最終的に構成される粒子径分布が異なってくる。

同様に可視化エンジンを用いて、各SOI時期における定性的な燃料付着とPN排出量の関係性の調査を行った。低温環境を模擬し燃料には蛍光剤を添加したドライソルベントを用い、実際の運転条件にて燃料を噴射、UV光源を用いLaser Induced Fluorescence：LIFを行い燃料付着挙動を観察した。これら燃料付着をピストン、ライナ、ヘッドそれぞれについて分離しSOI毎に積算輝度値を無次元化したものを図6に示す。

ピストンへの燃料付着は吸気行程初期に下降中ピストンに対する過早噴射、BDC以降の上昇中ピストンへ対向する遅滞噴射時期で増加する。一方でライナ付着はピストン摺動に伴う噴霧への曝露期間の関係でピストン付着と逆の増減傾向となる。ヘッド付着は流動やピストン表面での反射などとの影響により噴射時期の遅角化で増加の傾向となる。

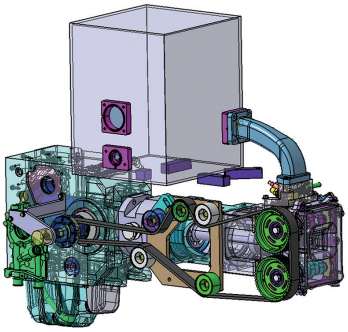


図４　Optical Engine

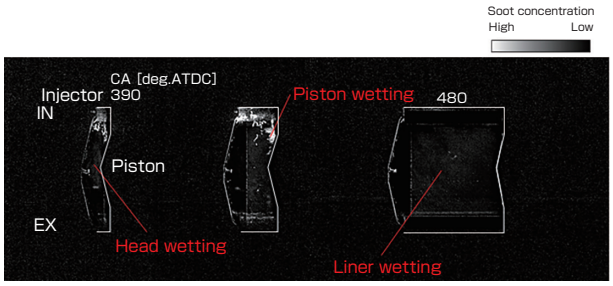


図５　Soot Images by Means of DBI

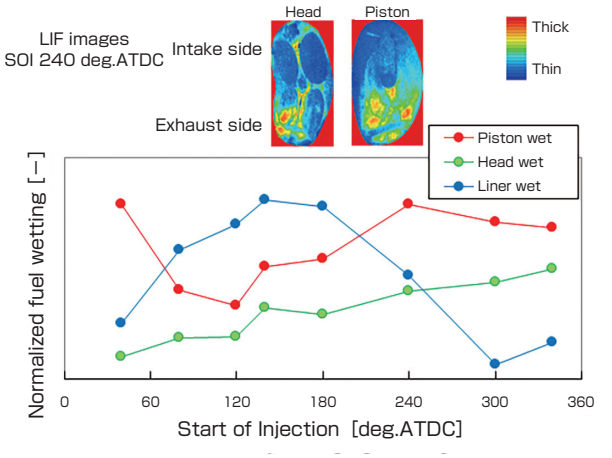
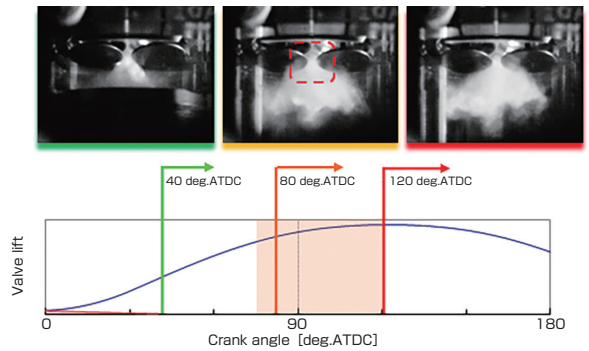
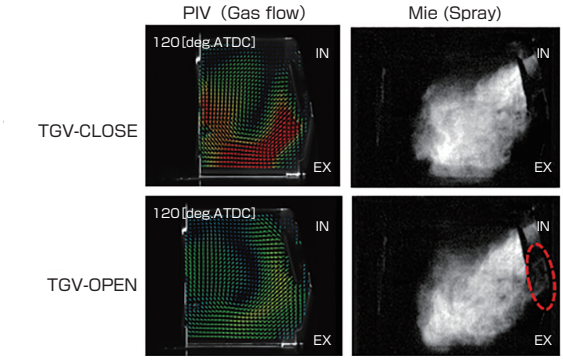


図６　Characteristics of Fuel Wettings

これらに加え、冷間時には最大バルブリフト付近での燃料噴射時期に局所的に生じる図７(a)に示す吸気バルブ付着や、流動制御機構などによりタンブル流を弱めるなどした際に、吸気行程後半噴射時期の比較的長い期間、ヘッドなどへの燃料付着増加を伴う図７(b)に示す流動影響などがある。



(a) Spray Impingement for Intake Valves Measured from the Exhaust



(b) Effect of Charge Motion to Spray

図７　Valve Wetting and Effects of Charge Air Motions

さらには、後述するインジェクタ先端の濡れ(Tip-wet)起因のTip-sootを合わせたこれら燃焼室壁面への付着燃料液膜は壁面温度の影響を受けながら、蒸発を経て最終的には燃焼期間以降でPMの生成へと至る。これら付着の傾向を、水温Twが363 Kの暖機後におけるPN排出特性と対比すると図８のような関係性が得られる。この噴射時期に対するPN排出特性は、図９に示す様に回転数、負荷、噴射制御などによりその特性が変化する。エンジン回転数が上昇すると噴射期間がクランク角度に対し長くなり、逆に燃料圧力を高くすると逆に短くなる。加えて実走行状態では,空気量、温度、A/Fフィードバックなど、現象の応答性により瞬間の物理量が定常状態の想定物理量とずれを生じる事で、定常PN値に対し過渡分で高い濃度のPN排出となる事が分かる。

本報告では、定常運転時に燃料の壁面付着の少ない噴射制御条件においてPN排出の主要因となるTip-soot、過渡運転時にPN濃度を生じるピストン冠面およびライナへの燃料付着に大きく影響する噴霧パターンと減圧沸騰による噴霧外形の変化、さらに触媒暖機モード中の成層リタード燃焼における燃料付着についてそれら特性調査を実施したので報告する。

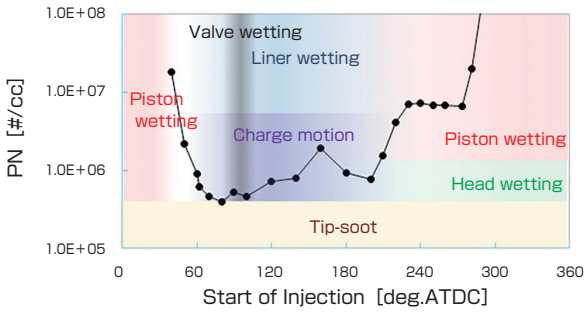


図８　Comparison between PN and Fuel Wetting

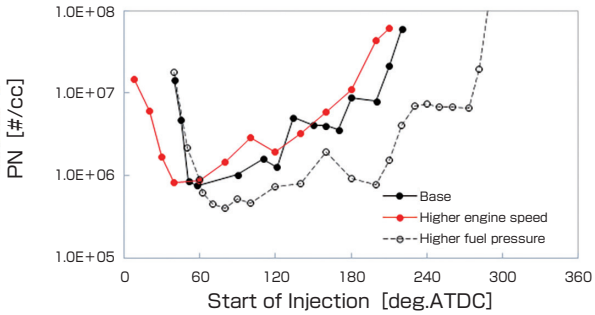


図９　PN Characteristics in Operating Conditions

3. 実験装置

実験装置概略を図10に、単気筒エンジンの諸元を表1に示す。実験には吸排気脈動調整システムと分離冷却システムを有する単気筒エンジンを用い、吸排気脈動および壁面温度については事前の調整により量産4気筒エンジンの境界条件を再現している。PMの計測にはCambustion社のDMS500を用い、PMの凝集・再酸化影響を排除するために排気ポート直下にて10～1000 nmのPNと粒子径分布を計測している。単気筒エンジンには図11に示す可視化窓を備え、燃焼室吸気側が観察出来る構造となっており,これにより高速度カメラにより可視光による燃焼の直接撮影を行った。

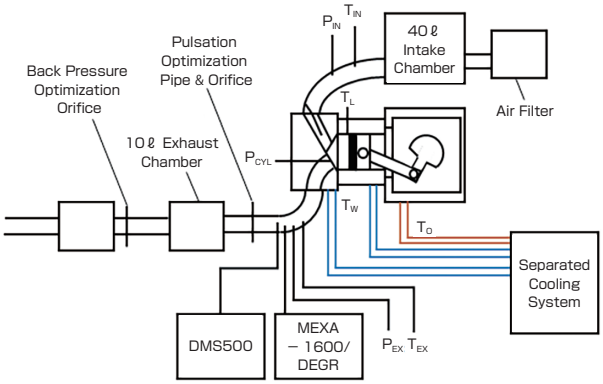


図10　Experimental Setup

表1　Engine Specifications

Single Cylinder Engine Specifications	
Bore Stroke [mm]	Φ 94 × 90
Displacement [cm^3]	624.58
Compression ratio [－]	12.0
Cooling water temperature [K]	273～373
Injection system	Side mounted gasoline direct injection
Fuel pressure [MPa]	10～38

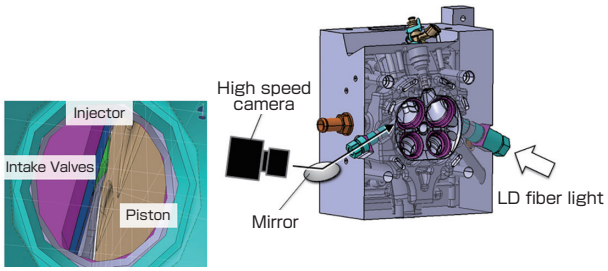


図11　Optical Access Windows

4. 結果及び考察

4.1 Tip-sootの特性

エンジンの定常状態を想定しPN低減するため、インジェクタのTip-wetting起因のPMであるTip-sootの低減を行った。1600 rpm、IMEP745 kPaにおけるSOI毎のPN特性について、水温Twが273、313、363、373 Kにて計測した結果を図12に示す。SOI60 deg.ATDC以前とSOI90 deg.ATDC以降のSOIではピストンとライナ付着が支配的で、Twの低下とともにPNが急増する。その一方でSOI60～90 deg.ATDCでは図8で示す様にそれらへの燃料付着は少なく、このような条件においてPNが最小値を取る。この噴射時期では低Tw化によりTop-soot起因のPNは減少する特徴を示す[5]。

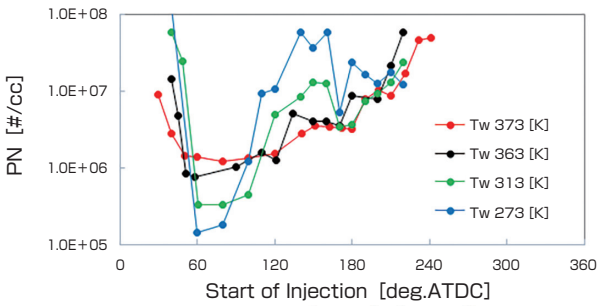
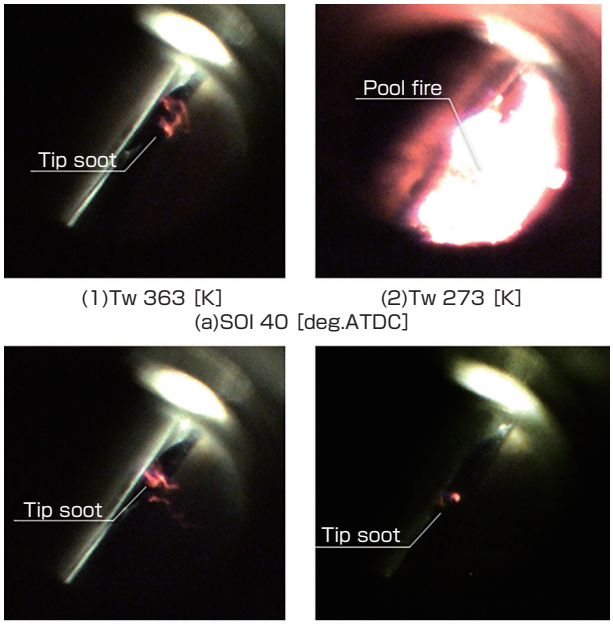


図12　Effects of Temperature for PN Characteristics

実際に特徴的なSOI40 deg.ATDCのピストン付着、SOI60 deg.ATDCのTip-wettingのそれぞれが支配的な条件において、Tw 363、273 Kで燃焼室内部を観察した結果を図13に示す。図13(a)に示すSOI40 deg. ATDCでは、Twが363 Kの場合に見られるTip-sootに加えTwが273 Kの場合にはピストン冠面にて

燃料付着に伴うプール火炎を生じている。一方で図13(b)に示すSOI 60 deg.ATDCにおいては、Twが273 Kの低水温条件でTip-wettingからの燃料蒸発が抑制され、輝炎が減少している。この結果からもPNが最小となるSOI条件においてはTip-sootが支配的であると言える。また、Tip-soot起因のPNは数時間という比較的長いスケールでの経時変化を伴い、インジェクタ先端に堆積するデポジットと関係している事が知られている[5]。



(1)Tw 363 [K] (2)Tw 273 [K]
(a)SOI 40 [deg.ATDC]

(1) Tw 363 [K] (2) Tw 273 [K]
(b) SOI 60 [deg.ATDC]

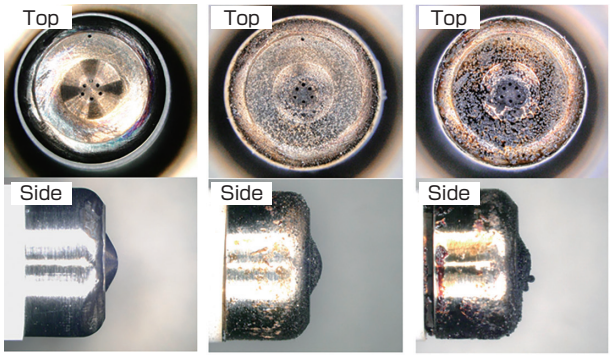
図 13　Luminous Flames of Each Fuel Wettings

4.2　インジェクタのエージング評価

Tip-soot起因のPNを定量的に評価するため、インジェクタ先端のデポジット堆積とそれに伴うPNドリフトに影響を与える運転条件を明確にし、エージング運転条件を選定した。

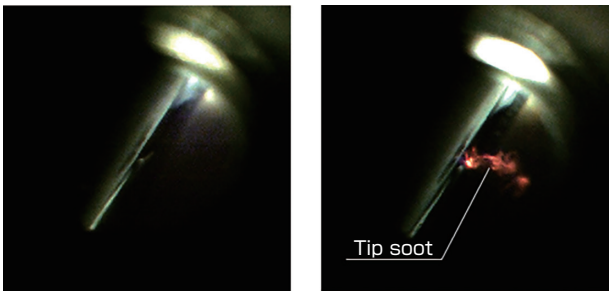
エンジンとエンジンオイル、吸排気系、他部品について約8 hの慣らし運転を実施。その後インジェクタのみ新品と交換し、1600 rpm IMEP745 kPa定常運転にて15分毎にPNを計測しながら8 hのエージングを行った。図14に0 h、1 h、8 hにおけるインジェクタ先端の状態を示す。1 h経過するとインジェクタ先端の噴口間、及び広範囲に面積的なデポジットの堆積が確認される。8 h経過後では、噴口周辺に堆積・脱落を繰り返し厚さ方向へ成長するデポジットが観察された。

図15に同じ運転条件における、新品インジェクタと、8 hエージング後の、膨張行程50 deg.ATDCにおける輝炎の様子を示す。新品のインジェクタでは噴口付近で輝炎が観察されないのに対し、8 hのエージング後では噴口付近からTip-sootによる輝炎を生じている。



(a) 0 [h] (b) 1 [h] (c) 8 [h]

図 14　Injector Tip



(a) 0 [h] (b) 8 [h]

図 15　Luminous Flames of Tip-soot before and after 8 h Aging

同じく図16に8時間のエージング中に計測されたPN計測結果を示す。試験開始直後ではPNが4.1×10^4 #/ccであるのに対し、PNは約2 h後まで急激な増加を，その後は増減を繰り返しながら緩やかに増加・収束し8 hでは7.6×10^5 #/ccとなった。Tip-sootはインジェクタ先端で成長するデポジット量および、そこに吸蔵される燃料量に比例すると仮定し、燃焼室におけるデポジットの成長を分析した座間ら(6)の式を基に、経過時間tで表された下記に示す式を用い、変曲点の前後で第一、第二の式によりPNに対し近似を行った。

$$N_{PN} = a_i t^{\beta i} \quad \cdots (1)$$

得られたβ_iは速度変数でありTip-soot増加に与える影響を評価可能であると考えた。二つの近似曲線の交点から得られる変曲点到達時期はt_1その際のPNをN_1とし、さらにエージング後PN値を定量比較するために第二近似線のa_2、β_2から算出される100 h経過後のPN予測値をN_{100h}とした。

これらによりPNドリフト特性が評価できると判断し、実際に想定されうる各種運転条件がPNドリフトに与える影響を調査した。表2に想定したエージング運転条件を示す。単気筒エンジンにてインジェクタを新品に交換した後に、基準とした定常PN評価運転点を前後に15 min運転し、その間に回転数・負荷変化、水温変化、λ制御、エンジン停止、触媒暖機の成層リ

タード燃焼を運転し、それらを繰り返し8 hのエージング試験を実施。定常PN評価点でのPN時系列変化の履歴を(1)式で分析した。

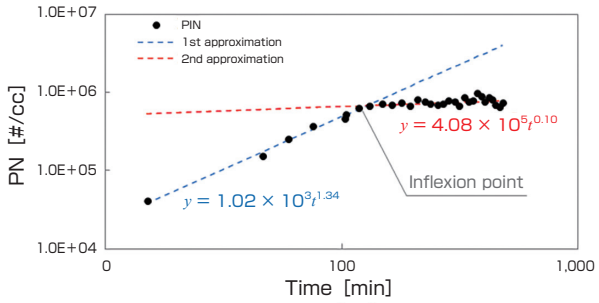


図16　PN Drifts and Approximations

表2　Operating Conditions for Aging

No.	Condition	Operation		
1	Steady	1600[rpm], IMEP745 [kPa]	15 [min]	× 32 sets
2	Transient	1600[pm], IMEP745 [kPa] 1200[pm], IMEP155 [kPa] 3200[pm], IMEP760 [kPa]	15 [min] 30 [min] 30 [min]	× 6 sets
3	Low Tw	Tw367[K] Tw change Tw288 [K] Tw change	30 [min] 30 [min] 30 [min] 30 [min]	× 4 sets
4	λ	λ 1.0 λ 0.8 λ 1.0 λ 1.2	30 [min] 30 [min] 30 [min] 30 [min]	× 4 sets
5	Engine stop	1600[pm], IMEP745 [kPa] Engine stop 1min 1600[pm], IMEP745 [kPa]	15 [min] 1 [min] 14 [min]	× 14 sets
6	Catalytic heating	1600[pm], IMEP745 [kPa] Engine stop and θ IG 10[deg.ATDC] 1600[pm], IMEP745 [kPa]	15 [min] 1 [min] 14 [min]	× 14 sets

一例として**図17**にλを振った試験を実施した際の例を示す。黒のプロットの定常運転でのエージングに対し、λ振りではその制御条件によってPN排出量が異なり、λ 0.8のリッチではPNは増加しλ 1.2のリーンでは減少する事が分かる。その中から黒のプロットの定常運転と同じ運転条件である橙のプロット部分であるλ 1.0のPN値のみを抜き出し分析を行った。その結果初期の速度係数β_1は1.14となり定常運転時のβ_1 1.34よりも小さく、逆に後半の速度係数β_2は0.30となり定常運転時のβ_2 0.10よりも大きな値となった。速度係数の違いは挟み込み運転をした、λの異なる条件中に、運転条件がデポジットの成長・剥離及び燃料吸蔵へ影響を与えた結果であると言える。さらに細かく、それら想定される運転条件の寄与度を分析する場合は、それらの運転の直前・直後における代表運点でのPNを比較しΔPN/dtを分析する事で分析を行った。**図18**に**表2**に示す各運転条件にて8 hエージングを実施した際のβ_1、β_2を示す。低水温を含む条件ではβ_1、β_2共に低く、初期の面積的なデポジット堆積も抑制されていた。エンジン停止を含む条件ではβ_1の増加が確認され初期のPN増加が加速する傾向が見られた。λを変化させた場合β_2が増加する傾向が見られ、リッチ雰囲気条件が体積的なデポジットの成長を促進すると考えられる。これら結果を元に決定したインジェクタのエージング条件を**表3**に示す。インジェクタの基本設計を変更した際は本エージング条件を用いTip-sootを評価する事とした。

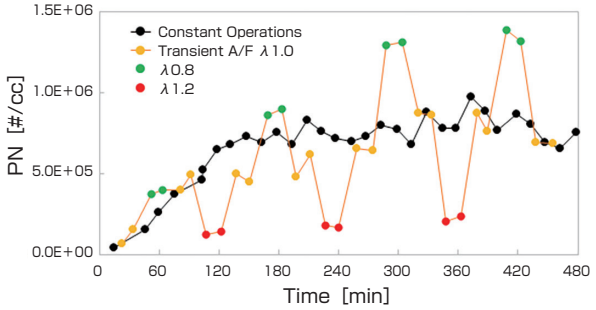


図17　Injector Aging with λ -Switching

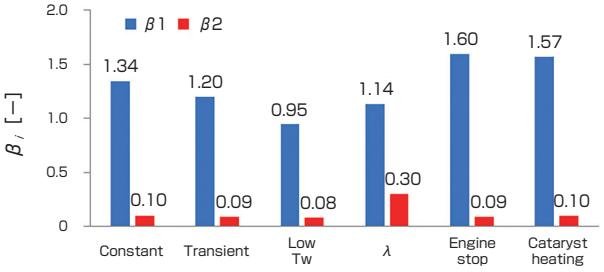


図18　Coefficients of in Each Operating Conditions

表3　Operating Conditions for Aging

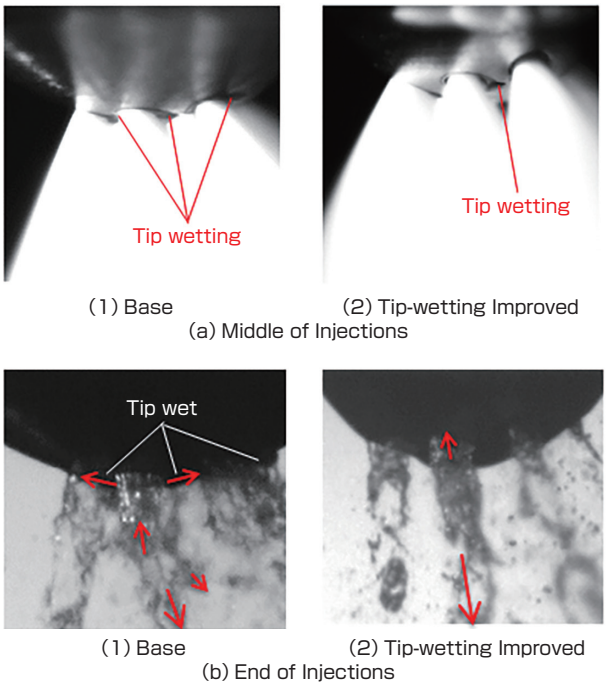
	No.	Condition	Operation	
1st	1	Steady	1600[rpm], IMEP745 [kPa]	15 [min]
	2	Transient	1600[pm], IMEP745 [kPa] Engine stop 1600[pm], IMEP745 [kPa]	15 [min] 30 [min] 30 [min]
	3	High Tw	Tw363 [K] Tw change Tw373 [K] Tw change Tw367 [K]	30 [min] 15 [min] 30 [min] 15 [min] 30 [min]
2nd	5	Mid-speed Mid-Load	1600[pm], IMEP745 [kPa] 3200[pm], IMEP760 [kPa] 1600[pm], IMEP745 [kPa]	15 [min] 15 [min] 15 [min]
	6	λ Rich	λ 1.0 λ 0.8 λ 1.0	30 [min] 30 [min] 30 [min]

4.3　Tip-wetとPNの低減

Tip-sootの経時変化に対し定量的な評価条件と手法を構築した。次に具体的にインジェクタのTip-wet低減とそれによるPN低減効果の評価を行った。

Tip-wetの改善には噴口内部流路の最適化[7]、加えて段付き噴口を用いた。噴口設計によるTip-wet低減効果を確認するために、定容容器に設置したインジェクタ先端に対し長焦点顕微鏡を備えた高速度カメラで計測した。容器内雰囲気圧力33 kPa（絶対圧）と強制的にガソリンが実際のエンジンにおける燃料加熱と同等の減圧沸騰を生じる条件において噴霧挙動の観察を行った。ベース、改善後の各インジェクタについて、

Tip-wetの主要因である、噴射期間中の噴口周囲の濡れ、噴射終了時の粗粒・液柱・液膜の再付着を観察した結果を図19に示す。ベースインジェクタにおいては噴射期間中に減圧沸騰に伴う噴霧の広角化と不安定性により全ての噴口周囲でTip-wetが確認された。一方で改善後のインジェクタでは、噴射期間中の噴口周りの濡れは改善され6噴口中2噴口で観察された。噴射終わりを見ると、ベースインジェクタでは液柱・液膜が閉弁時に相互干渉しながら飛散し、さらに噴口方向へ戻る液柱が噴口周囲へ再付着する様子が確認された。それに対し改善後では噴射終わりの粗粒・液膜・液柱が噴口軸方向へ運動し、段付き噴口内部へ収まる事で噴口周囲への付着が低減された。



(1) Base　(2) Tip-wetting Improved
(a) Middle of Injections

(1) Base　(2) Tip-wetting Improved
(b) End of Injections

図 19　Tip-wet

Tip-wetの改善が確認出来たため、前章のインジェクタエージング条件にて､ベース･改善後の両インジェクタについてPNを計測した。図20にエージング試験中におけるPNの時系列変化を示す。実線は基準とする評価点でのPN値を示しており、Tip-wetを改善する事で初期のPN増加率が低減、変曲点であるt_1はベースインジェクタが131分に対し改善後が、375分と長くなり、N_{100h}はベースインジェクタが1.08×10^6 #/ccに対し、改良インジェクタで5.54×10^5 #/ccと約48%の低減が得られた。

さらに図21に機関回転数1600 rpm IMEP745 kPaにおいてSOI 60 deg.ATDCの同燃圧条件にて単段、多段噴射を行った際のPNを示す。ベースインジェクタでは2段噴射に伴い、単段噴射比で192%とPNは倍増する。その一方、Tip-wetを低減した改善後では2段噴射とする事で単段噴射に対し14.2%までPNが低減している。このように,燃焼室壁面への燃料付着が少ない領域では,多段噴射制御はTip-wetが多いとPNを増加させる可能性がある。多段化制御を使用する前提としてTip-wetの低減が必要である事が分かる。

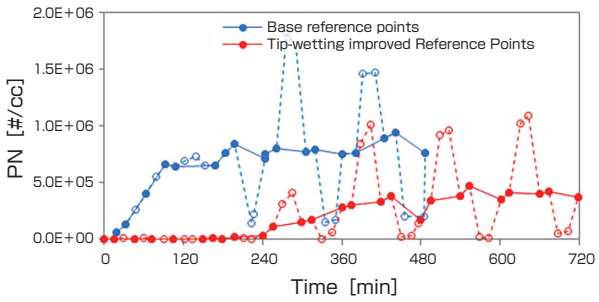


図 20　Aging Variations of Tip-soot

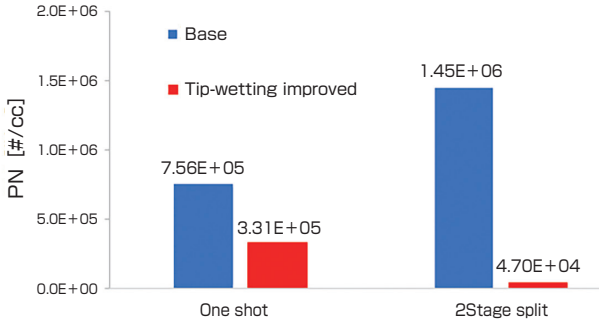


図 21　Effects of Injection Strategies for Tip-soot

4.4　減圧沸騰影響による噴霧の縮流と壁面付着

実走行時や過渡運転時においては図22に示す様に雰囲気圧力や燃料の温度が変化する事で噴霧外形が大きく変化する事が知られている。図中の雰囲気圧の減圧、燃料温度昇温条件は使用燃料のガソリンにおいては2相領域に相当する。特に燃料の減圧沸騰条件では噴霧のビーム間のエントレインの相互効果によるシュリンク（縮流）やキャビテーションや噴霧角の拡大、不安定性の増大によりTip-wetが助長される事が考えられる。Tip-wetについては前章にて対応済みであるためここでは縮流に伴う噴霧のパターン変化について､これらに対し噴口配置を最適化し縮流の抑制と、それに伴う壁面への燃料付着低減について検証を行った。本調査では、減圧沸騰条件として安全の観点から噴霧外形の変化が大きかった雰囲気の減圧条件を主として燃料付着影響の検証を行った。なお、減圧雰囲気における噴霧については縮流が確認されてはいるが、単一のビームにおける分裂後のペネトレーションについては廣安･新井の式で予測される範囲の伸長である。

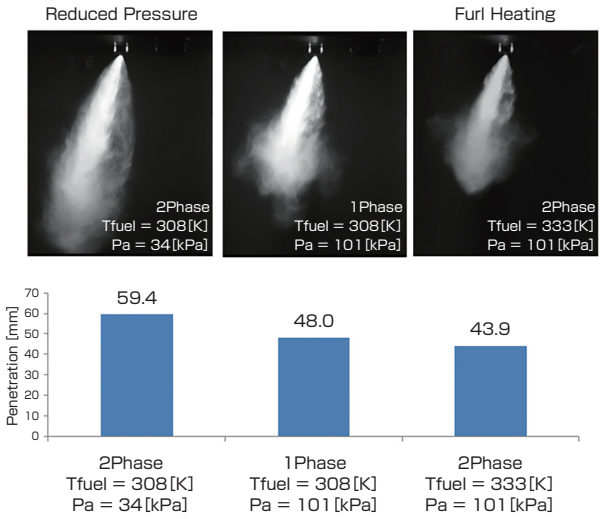


図 22　Sprays in Flash Boiling Conditions

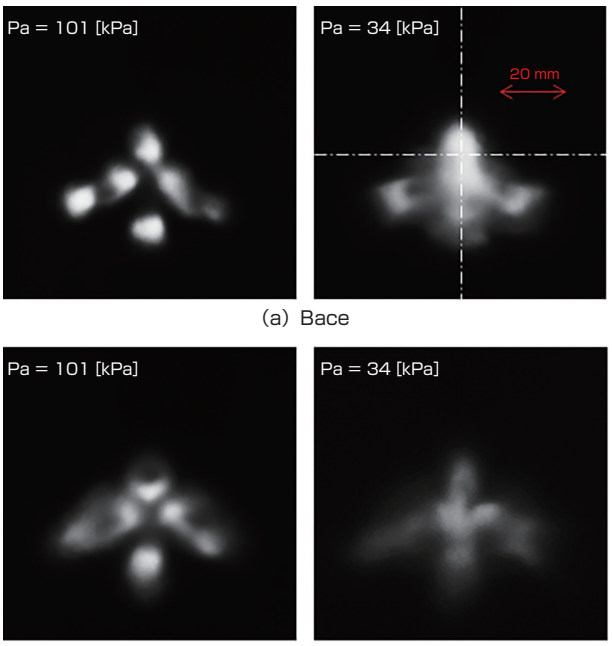


図 23　Effect of Shrink to Spray Pattern

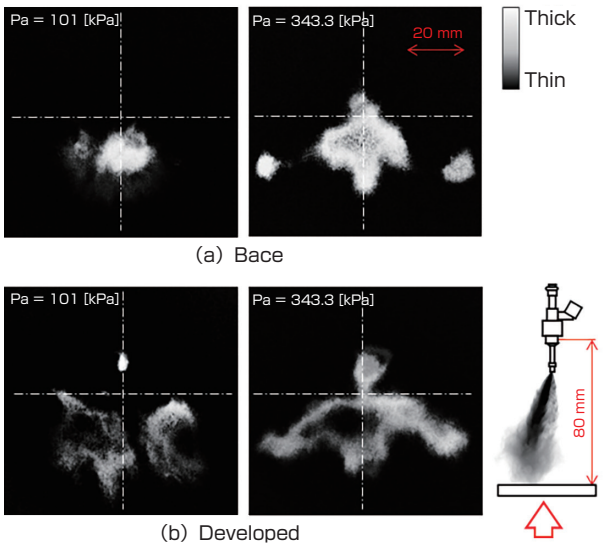


図 24　Effect of Shrink to Fuel Wettings

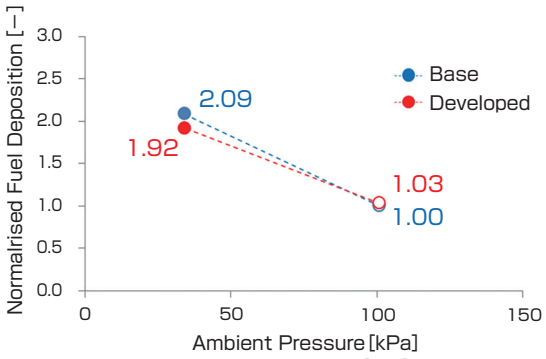


図 25　Effect of Flash Boiling to Fuel Wettings

図23にベースインジェクタと、噴口配置を最適化したインジェクタにおける噴口から30 mm下方における噴霧パターンについてレーザシート光を用い断面にてミー散乱光を計測した結果を示す。ベースインジェクタでは減圧条件下においては、縮流を生じ、噴霧パターンの判別が困難になっている事が分かる。一方で改良インジェクタでは大気圧条件に対し減圧条件下でも噴霧外形を維持した噴霧となっている事が分かる。同じ条件にて、噴口から80 mm下方に設置した平板上に付着した燃料を計測した結果を図24に示す。燃料の付着計測には、エアロゾル薄膜を塗布した平板を用いた。付着した燃料は粒子間に吸蔵され、燃料量により変化する透過光強度によって付着液膜量を計測した。ベースインジェクタでは減圧雰囲気場ではペネトレーションの伸長と縮流に伴い、噴霧中心部に狭い範囲に集中して厚く燃料付着が確認される。それに対し改良インジェクタでは、大気圧場で広く薄く付着する傾向が、減圧雰囲気場でも維持されており、シュリンクを低減し局所に厚い付着が抑制されている事が分かる。これら輝度の積算値から無次元燃料付着量を算出した結果を図25に示す。前述の通り、減圧条件下にて、ベースに対し改良インジェクタにて8%の付着低減が確認された。これらより噴口配置の最適化により減圧沸騰へのロバスト性改善と、それ伴う燃料付着の低減が可能であることが分かった。

実際に、これら減圧沸騰条件における噴霧のシュリンクと燃料温度がPN排出に与える影響を調査した。図26に改善前のベースインジェクタでの減圧沸騰を伴う噴射制御条件でのPN排出特性を示す。燃費代表点でのPN排出特性である黒線に対し、燃料温度を加熱し57℃から85℃まで昇温すると、Tip soot領域を除く壁面付着領域におけるPNは低減傾向となった。また、減圧条件であるPa34 kPa相当のIMEP210［kPa］相当では燃料噴射幅が3.26［msec］から1.27［msec］へと短縮された事により、PNは全域で大幅な低減傾

向となり、単なる噴霧形状の縮流影響以上に、制御値とTip-wet影響が大きく出る結果となった。

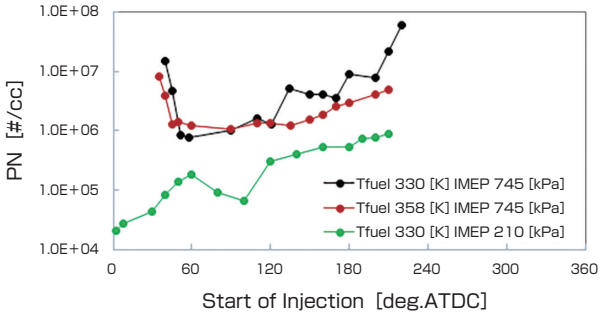


図 26　Effects of Flash Boiling to PN

4.5　過渡制御条件を想定した壁面付着とPNの低減

過渡時のPN低減には**図8**で示したPN排出特性の中でもPNが急増する領域に噴射制御が入らない事が求められる。つまり選択された最良値を取るSOIの前後に、ロバストなSOI期間を広く取り、噴射幅の変化だけでなく低Twや過渡時の残圧などによる燃料圧力PFが異なる条件に対してもロバストである事が求められる。これは**図6**の燃料付着特性から考えると、ピストンとライナへの燃料付着低減を意味している。そこで噴霧の基本的パターンが噴射時期とPN排出特性に与える影響について、Twと燃料圧力P_Fの異なる条件で調査を行った。**表4**に供試した噴霧パターンを示す。

表 4　Spray Patterns

	Base 6 holes	Different diameter 6 holes	5 holes
Flow ratres	6 holes Equally	Piston direction hole − 20% Other 5 holes + 4%	Piston direction hole − 100% Other 5 holes + 20%
Spray designs			

前章の噴口にてTip-sootを改善したインジェクタにおいて、噴口毎の流量を等分配とした6孔のインジェクタを基準として、ピストン方向の噴口流量を20%削減し他噴口に＋4%ずつ割り振った異口径6孔、さらにピストン向きの噴口を廃止し＋20%ずつ他噴口に割り振った5孔の3種類のインジェクタを供試した。**図27**に各インジェクタのSOIに対するPN特性を調査した結果を示す。**図27(a)**に示すTw367 Kの暖機後の条件で燃圧PF10 MPaの条件においては異口径6孔、5孔はピストン方向流量の低減に伴い、吸気行程SOIにおけるPN最良領域のロバスト性改善効果が認められる。しかし**図27(b)**に示すTw273 Kでは、120～180 deg.ATDCにかけてのライナ付着領域のPN寄与度が上昇する。SOI90～120 deg.ATDC付近において、流量分配によりライナ付着が増加したインジェクタでPN増加傾向となった。さらにTw273 Kの条件でP_F38 MPaの高燃圧化を行った場合、**図27(c)**に示す様にSOIに対するPN排出特性が大きく変化する。これは高燃圧化に伴い噴霧の速度が上昇する事により壁面への付着時期が変わる事に起因する。特にPN最良値を取るSOI時期の変化は噴口毎の流量分配の影響を強く受ける。等分配6孔の噴霧ではPF10 MPa Tw367 KにてSOI60 deg.ATDCでPN最良となり、低水温・高燃圧でSOI時期もロバストでPN最良値も改善であるのに対し、異口径ではPF38 MPa、Tw273 KにおいてSOI 80 deg.ATDC、5孔ではSOI 120 deg.ATDCと最良タイミングが遅角化する。これは過渡制御条件においてPNが悪化する要因の一つであり、単一に噴射制御が選定されるようなエンジン制御に対しては好ましくない特性となる。以上より噴霧ビーム毎に噴口－壁面間距離が同等の場合、暖機後では異口径噴口による流量分配は有効であるが、低水温時のPN低減や高燃圧化との併用に関しては好ましくない場合がある。その場合、多段噴射の活用もしくは低水温専用の噴射制御が有効である。

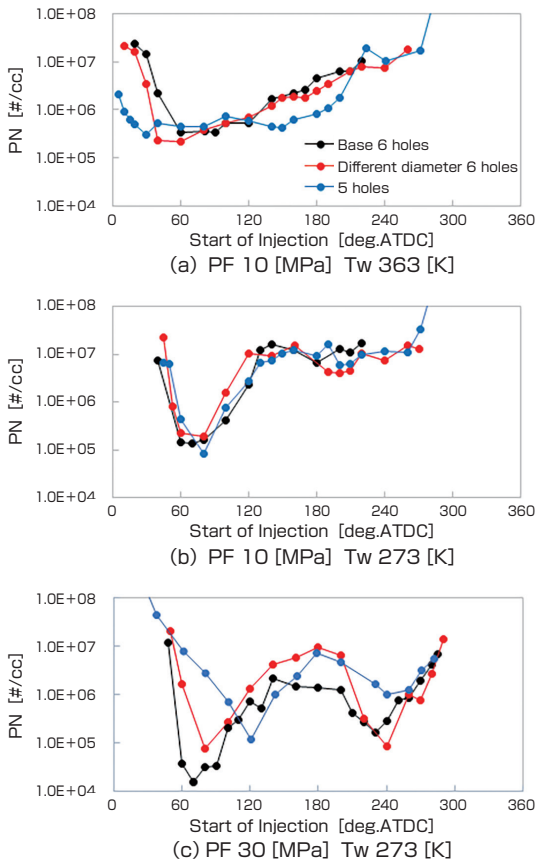


図 27　PN Characteristics of Each Spray Patterns

4.6　触媒暖機モード中の燃料付着

冷間における触媒暖機モード運転はPM排出の主要因の一つであることが知られている。燃焼室壁面および油水温度は燃焼の境界条件を構成しており、それらを時間との関係性を見ると境界温度についての過渡状態であると捉えることが出来る。触媒暖機運転時のリタード燃焼において着火安定性のために混合気をプラグ付近に成層化する2段目SOIを変化させた際のピストン表面の濡れと燃焼状態を**図28**に示す。その際同時に計測した排ガスと燃焼安定性の値を**図29**に示す。**図29**に示す様に噴射時期を遅角していくと燃焼安定性の指標であるσPiが比較的良いエアガイド領域が2段目SOI270［deg.ATDC］まで存在する。その後さらに2段目SOIを遅角するとウォールガイド領域となり、成層化が強くなりΦ-Tマップ上においてDesirable Pathに近づくほどにNOx排出量が低減する[8][9]。同時にHC排出量も遅角とともに一旦低下し、さらに遅角してSOI300 deg.ATDCを超えると増加傾向を示す。ここで本計測ではピストン形状がエアガイド形状を使用しており、燃焼安定性がウォールガイド領域を形成出来ていない。PNについては、2段目SOIが300 deg.ATDC付近で急増する傾向を示す。燃焼室内を観察すると、2段目SOI300［deg.ATDC］ではボア中心のピストン冠面上に燃料のキャリーオーバーフューエルが確認されるが輝炎は殆ど確認されない。320 deg.ATDC以降では吸気側に燃料が厚く付着し、同時に燃焼行程中における輝炎の生成が確認できる。これらの結果より、PNの低減には今岡らが述べるキャリーオーバーフューエルの抑制が重要であり、経時変化するピストン冠面上の燃料量と温度が支配的である[2]。NOx、HC及びσPi低減とPN低減を両立する観点ではエアガイド領域に対し成層が強いSOI270～300 deg.ATDCのウォールガイド領域におけるキャリーオーバーフューエル低減が有効である。

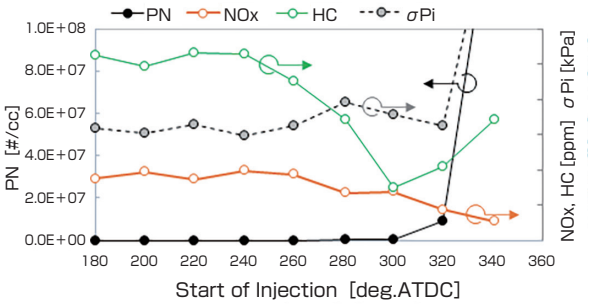


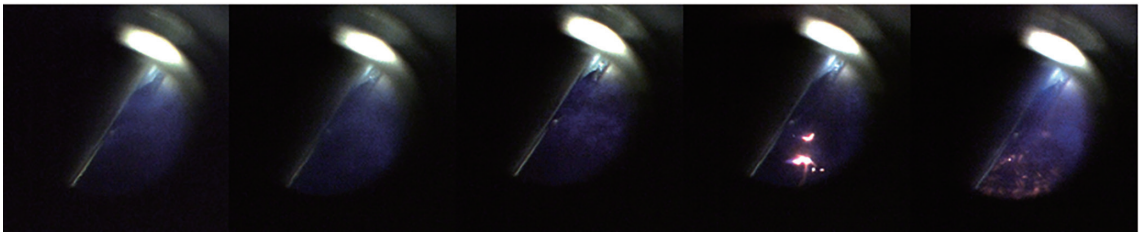
図29　NOx, HC, σ Pi and PN with Catalytic Heating Conditions

5. まとめ

PM/PN低減向け燃料系の開発を行い以下結言を得た。

1. PNドリフトと呼ばれるTip-sootの増加傾向は指数関数により近似と速度変数の評価が可能である。
2. 定常の噴射制御時のPN低減に対し、噴口流路最適化設計と段付き噴口によりTip-sootが48%程度低減した。Tip-wetting低減の無い多段噴射はPN増加させる、多段噴射制御の使用にはTip-wettingの低減が必要である。
3. 減圧沸騰に対する縮流の影響は燃料温度よりも雰囲

(a) Carryover Fuel Wetting at TDC before Intake Stroke



(a) Luminous Flames in the Combustion Chambers

図28　Fuel Films and Luminous Flames in Combustion Chambers

気の圧力低下の方が影響は大きいが、噴口形状にて縮流による燃料付着の増加影響などは改善可能である。ただし、実機において噴射制御を加味すると縮流影響は小さい。一方で PNが増加するのは燃料温度上昇時のTip-sootである。

4.噴口毎の流量分配は暖機後の定常制御時のPN低減に有効であるが、過渡条件を考慮し低水温、高燃圧条件下ではその限りでは無く最適な噴射制御が変化する。噴口間流量分配などを有効に活用するには冷間専用の噴射制御が必要である。

5.触媒暖機モードでは今岡らの述べる、キャリーオーバーフューエルによる多サイクル積算での液膜厚さと、それらの蒸発量が支配的であり(2)、NOx、HC、σPiとPNを合わせた排ガス性能改善にはエアガイド領域から噴射時期を遅角し、ウォールガイドに入った領域の活用が有効である。

謝辞

本調査報告ではインジェクタの設計・製作にあたり日立Astemo株式会社の白石拓也氏を始めとする多くの方々に技術的にご協力・ご助言を頂いた。ここに深く感謝の意を表する。

参考文献

(1) 森吉泰生ら, ガソリンエンジンにおける粒子状物質の生成, 日本燃焼学会誌, 第56巻178号(2104)

(2) 今岡佳宏ら, 直噴ガソリンエンジンの低温過渡PM発生メカニズムの解明及びPN低減技術に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol. 50, No. 3, May (2019)

(3) Jürgen Gausemeier et al., NEW GUIDELINE VDI 2206 – A FLEXIBLE PROCEDURE MODEL FOR THE DESIGN OF MECHATRONIC SYSTEMS, ICED 03, Stockholm, August 19-21, (2003)

(4) Hauke Maschmeyer, et al., Sytematische Bewertung verennungs-motrischer Antriebssysteme hinsichtlich ihrer Realhrtemissionen am Motorenprüfstand, Shaker Verlag、Achen (2018)

(5) Kufferath A. et al., Assessment of Feasible System Solutions for Future particle Emission Requirements、in Fuel Systems for IC Engines, London、IMechE (2015)

(6) 座間叔夫ら, 小型直噴ディーゼルエンジンにおけるシリンダヘッドデポジットの生成特性, 日本機械学会論文集(B編), 78巻794号 (2012)

(7) 板谷ら, インジェクタの流れ解析を用いたPN低減手法の検討, 自動車技術会論文集. Vol. 9, No. 2, March (2018)

(8) T. Kamimoto and M. Bae, SAE Paper880423 (1988)

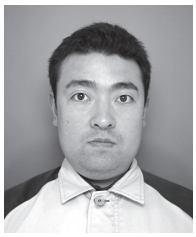
(9) 中山智裕ら, SIエンジンにおける燃費・排ガス性能向上のためのガス流動と混合気形成の要素開発, SUBARU技 報(SUBARU Technical Review), 45号, PP. 183-192 (2018)

【著　者】

加藤　真亮

桂　　拓未

原井　惇行


中山　智裕

塚本　卓磨

小野　　泰

津田　雄史

椎名　義朗

リーンNOxトラップ（LNT）触媒に関する研究

Study of the Lean NOx Trap (LNT) Catalyst

佐々木　康　吉*　　福　富　駿　祐*　　丹　　功*
SASAKI Yasuyoshi　FUKUTOMI Shunsuke　TAN Isao

抄　録

リーンバーンエンジン実現のためには、NOxを浄化する触媒が必要となる。我々はLNT触媒の開発に取り組み、2つの課題の解決に取り組んだ。一つ目の技術として、吸蔵材であるBaの量には触媒仕様によってバランス点があることを見出し、NOx吸蔵量を向上させた。これは、多量のBaを用いるとNO酸化活性が低下することにより、吸蔵量が低下するためである。二つ目として、LNT触媒の硫黄脱離性を向上させた。触媒コート上層のPt密度を高めることで、脱離しにくい下層への硫黄被毒を抑制し脱離特性を向上した。これらの技術を織り込むことで、高性能なLNT触媒を開発したので紹介する

Abstract

A de-NOx catalyst is necessary for the lean-burn engine system. In this study, we developed an LNT catalyst and addressed two issues. First, it was found that the optimal amount of Ba for LNT catalyst depends on catalyst specifications, and high NOx capacity was realized. The reason is that a large amount of Ba lowers the activity of the NO oxidation and this decreases the NOx trap capacity. Second, high sulfur-purge performance has been achieved. Enhancing density of Pt concentration at the upper coat of the LNT catalyst suppresses sulfur poisoning at the lower coat that is difficult to purge sulfur. As described above, a high performance LNT catalyst has been developed.

1．まえがき

世界的な環境意識の高まりから、燃費の向上は自動車普及の大きな課題である。その有効な手段の一つとしてリーンバーンエンジンが研究され、これまでにもいくつか量産化されてきた。このタイプのエンジンにはリーン燃焼時に排出されるNOxが三元触媒での浄化が困難であるために、LNT（Lean NOx Trap）触媒などのNOx後処理技術が必要となる場合がある[1～7]。今回我々は、リーンバーンエンジンの実現手段としてLNT触媒の開発に取り組んだ。

LNT触媒の市場投入には大きく2つの課題がある。1つ目はNOx吸蔵量の向上である。NOxは図1に示すようにリーン運転時に一旦Baなどの吸蔵材に蓄えたのち、リッチ雰囲気として還元ガス（CO、HC、H_2）により浄化される。吸蔵できるNOx量が少なければ頻繁に還元ガスを供給しなければならず、燃費悪化の要因となる。そのため、LNT触媒には高いNOx吸蔵

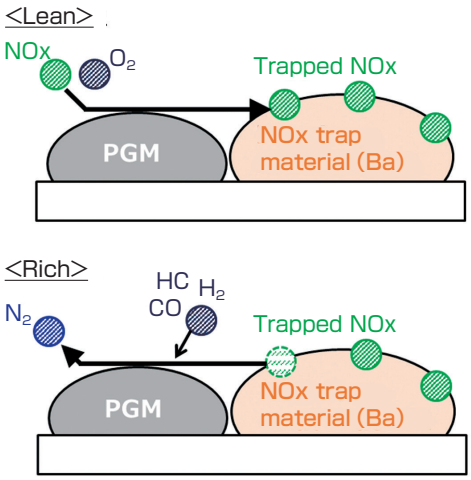


図1　LNT触媒の浄化メカニズム[7]

＊ 車両環境開発部

量が求められる。2つ目は燃料などに含まれる硫黄（S）による被毒の影響を最小限にすることである。LNT触媒はSに被毒されNOx吸蔵性能が低下する。これはSが酸化されて生成するSOxはNOxと類似の化学的特性を持っており、吸蔵サイトが飽和しNOx吸蔵を阻害するためである。被毒したSは高温・還元雰囲気にすることで解除することができるため、その効率の向上が求められる。本報告では、LNT触媒のNOx吸蔵量と、S脱離（以下、Sパージと定義）効率の向上の2点の検討について紹介する。

2. 実験方法

2.1 供試触媒

触媒は、Pt、Rhを担持したLNT触媒をハニカム担体にウォッシュコートして試験に用いた。構成は、上層にRh層、下層をPt層とした2層コートで、吸蔵材としてのBaはPt層に担持した。

2.2 性能評価方法

LNT触媒の性能評価は、モデルガス試験および水平対向エンジンを用いた実機試験にて行った。モデルガス試験では、還元前処理を行った後にリーン定常およびリーン・リッチパターンを繰り返した試験を行い、触媒前後のガスを分析することで最大NOx吸蔵量、NO酸化率、NOx浄化率を求めた。モデルガス用評価サンプルには、テストピースサイズにくり抜いたLNT触媒を用いた。実機試験では、エンジンベンチにて、温度、空気量を所定の条件に合わせた後にリーン・リッチパターンを繰り返し、LNT触媒前後のガスを分析計で測定することで、NOx浄化率を算出した。触媒耐久としては、エンジンベンチにてストイキ、フューエルカット、リッチを含む複合サイクルを繰り返し800℃ × 180 hrでの熱劣化耐久、および電気炉を用いたS被毒耐久の2種を実施した。

2.3 物性評価法

Ptの粒子径評価にはX線回折法（X-ray diffraction. 以下、XRDと記載。装置：ブルカージャパン製、D8 ADVANCE）を用いた。シェラーの式からPt結晶子径を算出し、Ptの粒子径とした。

Ptのメタル化率はin-situ X線吸収微細構造解析法（X-ray absorption fine structure. 以下、XAFSと記載）の解析結果から算出した。測定は大型放射光施設SPring-8のBL08B2にて実施した。測定セル内で700℃に保持されたLNT触媒の粉末ペレットへ、2%CO、10%O_2ガスをそれぞれ5分間ごとに交互に導入し、その時の価数変化を透過法により測定した。

LNT触媒に付着するSの定量には蛍光X線分析（X－ray Fluorescence. 以下、XRFと記載。装置：スペクトリス製、Axios）を用いた。Sの被毒およびSパージにはモデルガス装置を用いた。コート層内の元素分析は、EPMA（日本電子製、JXA-8230）の線分析にて評価した。

3. 結果と考察

3.1 NOx吸蔵量の向上

3.1.1 Ba量とNOx吸蔵反応との相関

初めに、性能向上の切り口を探るため、Ba量とNOx吸蔵性能を定量化した。NOx吸蔵は、**図1**に示すように、リーン雰囲気中でNOからNO_2への酸化反応（式(1)）と、Baなどの塩基性物質にNO_2を硝酸塩として吸蔵する反応（式(2)）の2ステップからなる反応であり、各々の反応についてBa量の影響を調査した。

$$2\,NO + O_2 \rightarrow 2\,NO_2 \quad (1)$$

$$4\,NO_2 + 2\,BaO + O_2 \rightarrow 2\,Ba(NO_3)_2 \quad (2)$$

図2にBa量に対する各温度の最大NOx吸蔵量を示す。ここで最大NOx吸蔵量とは、環境温度において触媒に吸蔵できる最大量を示している。試験はモデルガス評価装置にて実施した。最大NOx吸蔵量は、どのBa量においても300℃程度をピークとする山形の温度依存性を示した。Ba量に着目すると、点線で示したようにBa量が増えるに伴い最大NOx吸蔵量が増加したが、一定量以上でサチュレートした。

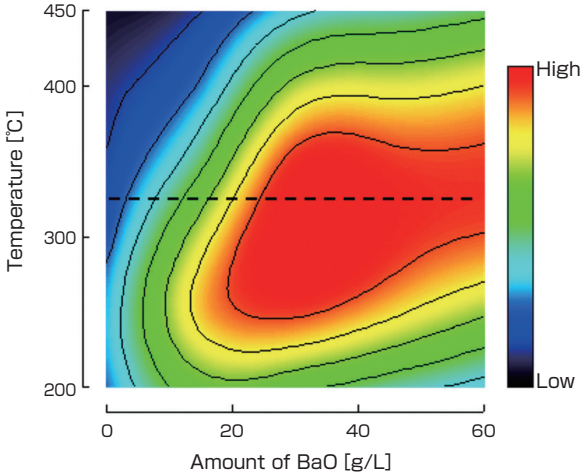


図2　LNT触媒の最大NOx吸蔵量

次に、Ba量とNO酸化反応の関係をモデルガス評価装置にて調査した結果を**図3**に示す。代表温度の320℃でみると、NO酸化率はBa量に依存しており、

Ba量が増えるほど酸化率が低下した。この傾向は、図2でみられたBa量が増えると最大NOx吸蔵量が増える傾向とは逆の傾向である。この要因を明らかにするため、酸化反応に及ぼす貴金属状態の影響を調査した。

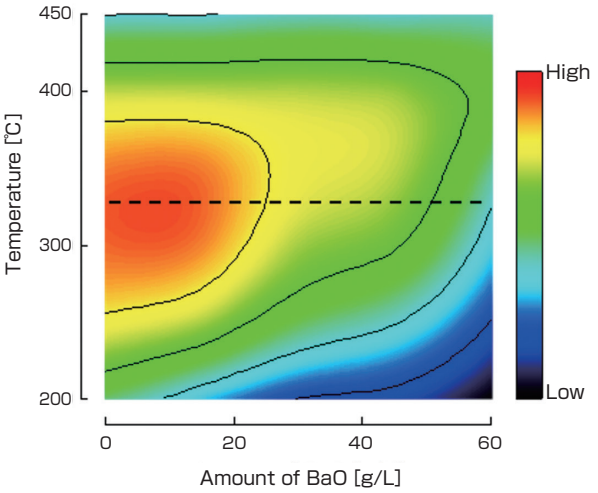


図３　LNT 触媒の NO 酸化性能

3.1.2　Ba量とPt粒子径の相関

上述したように、LNT触媒は、酸素の多いリーン雰囲気中でNOをNO_2に酸化し、Baなどの塩基性物質にNO_2を吸蔵させる。一般的にLNT触媒にはPt、Pd、およびRhの三種類の貴金属が使われる。その中でもPtは、PdやRhと比べNO酸化反応に対して高活性であるため、LNT触媒には多用されている[1～6]。図3でみられたBa量とNO酸化反応との関係についてPt粒子径の観点から相関を調べた。Ba量の異なるPt層の触媒粉末について、XRDで測定しシェラーの式から算出した結晶子径をPt粒子径として評価した。800℃で熱劣化させた結果を図4に示す。Pt粒子は、Ba量の増加に伴い粒成長する傾向が認められた。この結果は、図3のNO酸化反応が低下する傾向と良い相関がある。これにより、Ba量の増加に伴いPt粒子が粒成長しやすく、そのためにNO酸化反応が低下したものと考えられる。逆にBa量が少なくなると、Pt粒子は高分散に存在し、NO酸化反応が優位になる。このように、Ba量の調整により、LNT触媒のNO酸化反応を向上できることが明らかとなった。

3.1.3　Pt粒子の粒成長抑制のメカニズム

ここで、Ba量によるPtの粒成長について考察する。Pt粒子は蒸気圧の高いPtO_2になることで粒成長が進むことが知られている[8]。そこで、Ptの酸化状態を解析し、Pt粒子の粒成長抑制のメカニズムを考察した。触媒は排出ガス中では高温下で酸素の多いリーン雰囲気と、COやHCの多いリッチ雰囲気に晒される。その排出ガス雰囲気を模擬し、Pt粒子の価数の変化をin-situ XAFSにより解析した。図5に、700℃でのリーン雰囲気からリッチ雰囲気に切り替えたときのPtのメタル化率を示す。解析には、Ba量の異なる2種類のサンプルを用いた。リーンからリッチに切り替わることでどちらのサンプルもPtの価数が変化しており、メタル化率が上昇している。しかしながら、サンプル間でメタル化に要する時間や到達値に違いがみられた。Ba量が少ないサンプルでは、リッチ雰囲気に切り替わると約180秒でPtメタルに還元されたのに対し、Ba量が多いサンプルでは還元が進む速度が緩やかであり、約380秒と還元に長い時間を要した。さらに、そのメタル化率はBa量が少ない方が高かった。

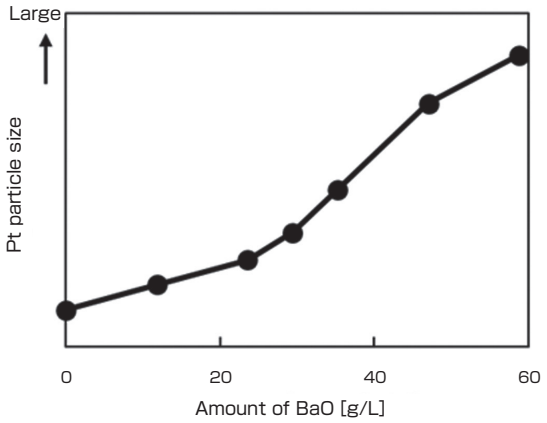


図４　Pt 粒子径と Ba 量の相関

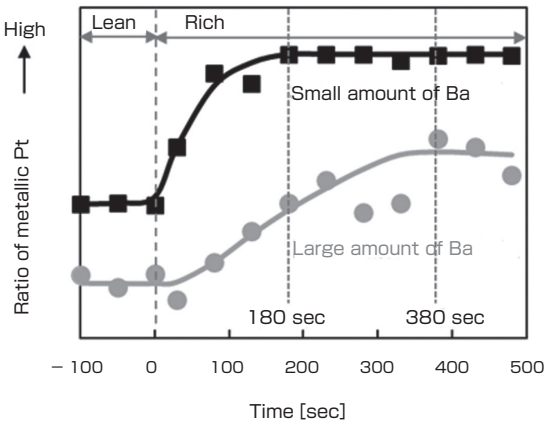


図５　リーンからリッチ雰囲気切り換え時の
Pt メタル状態の変化

図6に700℃リーン雰囲気でのPtメタル化率とBa量との関係を示す。リーン雰囲気下でもBa量に対する相関が確認された。Ba量が増えるとPtのメタル化率が低下し、Pt酸化物の割合が多くなった。これは、塩基性度の高いBaがPt粒子近傍に多く存在する

ことにより、Pt粒子が酸化物化されたためと考察する。このPtメタル化率のBa量依存の結果は、**図4**に示したPt粒子径の結果とよく相関している。in-situ XAFS解析により、Ba量の増加に伴いPt粒子は酸化物として存在するため粒成長が顕著であったと考える。

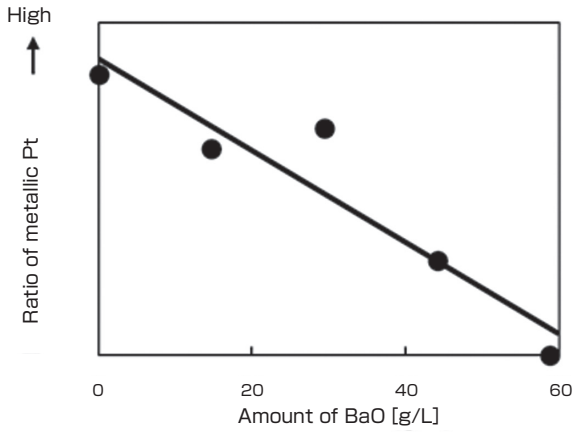


図6　Ptメタル化率とBa量の相関

以上の結果から、Ba量を増加させると最大NOx吸蔵量は増加するが、ある一定量で飽和する。その一方で、Pt粒子の粒成長を助長させるために、NO酸化性能が低下することがわかった。このことから、NOx浄化性能に対してBa量にはバランス点があると考えられる。その検証のため、Ba量が異なるLNT触媒を用いてNOx浄化性能を評価した結果を**図7**に示す。試験は、エンジンベンチにてリーン・リッチサイクルを繰り返した時のNOx浄化率を性能の指標とし、温度とガス量の2パラメータを振り評価を行った。その結果、Ba量が少ないLNT触媒の浄化率は、Ba量の多いLNT触媒の浄化率に比べて、広範囲な温度領域、ガス領域で高いことがわかった。特に低温、高ガス領域で大きく性能が向上した。このように、Ba量を制御することによりNOx浄化性能を向上できるBa量のバランス点が存在することを明らかにした。

3.1.4　Pt担持母材の改良

一般にPtなどの貴金属は高分散化のためにAl_2O_3などの母材に担持されて使用される。そのため、Ptの耐熱性向上には母材の改良も重要となる。**表1**に母材改良によるPtの粒子径の効果を示す。改良前では、900℃の耐久でPt粒子が検出される程度の大きさに粒成長していたのに対し、母材改良後では検出できないほどに高分散であった。また1050℃においても母材改良によるPtの粒成長抑制の有意差が確認された。以上のように、母材を改良することによってもPt粒子の耐熱性を向上させた。

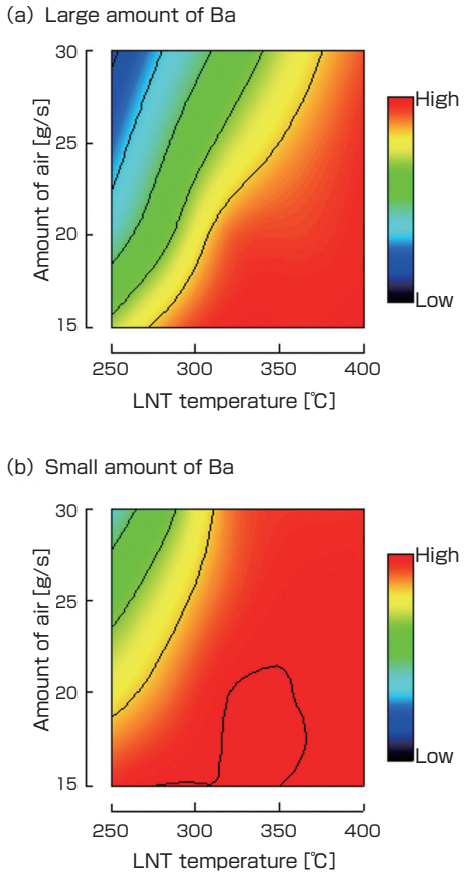


図7　LNT触媒のNOx浄化率
((a) Ba量の多いLNT、(b) Ba量の少ないLNT)

表1　母材改良前後でのPt粒子径

	Pt crystal size	
	Conventional base	Improved base
900℃ aging	Small	Not detected
1050℃ aging	Large	Middle

3.2　Sパージ効率の向上

3.2.1　Sパージ後の触媒状態解析

LNT触媒はS被毒により大きく性能が低下することが知られている[9]。S被毒による性能低下は、燃料などに含まれるS成分がLNT触媒のPtなどの貴金属によりSOxに酸化されBaと化合し硫酸塩となり、NOx吸蔵を阻害するために起こる。そのため、S被毒を解除する方法が用いられる。LNT触媒に生成された硫酸塩は高温・還元雰囲気下で分解され、除去することができる（Sパージ）。このSパージを車両運転中に効率よく行うことができるLNT触媒が求められる。

高効率なSパージ性能を見出すため、LNT触媒に被毒したSの状態を調査した。Sパージ前後でのSの分布を調査した結果を**図8**に示す。LNT触媒は、上層のRhを含むコート層と、PtとBaを含むコート層から構成されている。ここで便宜上、上層のRh層を1st layer、以降PtとBaを含むコート層を2nd layer、3rd

layer、4th layerと表記する（図9、左図参照）。S被毒後では、上層から下層までSが分布していた。Sパージをすることにより、付着していたSはコート層全体で減少するが、下層に向かうほど残存するSが多かった。この原因としては、硫酸塩の分解に必要な還元ガスが下層まで十分に供給されていないことが考えられる。

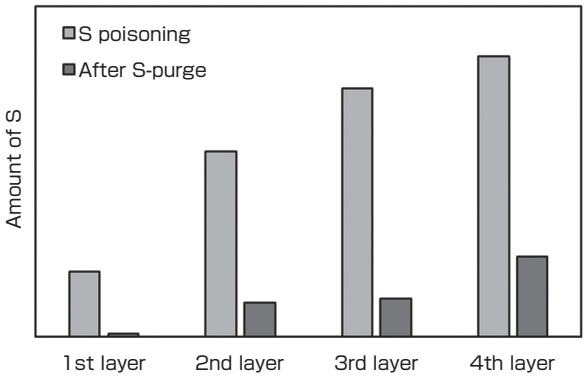


図８　Sパージ前後でのLNT触媒中のS堆積量

3.2.2　改良触媒の効果検証

被毒したSを脱離しにくい下層ではなく上層に留めることによるSパージ効率の向上を目的に、コート構成の改良を検討した。上述したように、SはPtなどの貴金属に酸化されることで触媒内に残存する。このことから、上層のPt密度を高めることで、S被毒の分布を上層部のみに留めることを狙った（図9）。ここで改良前後の貴金属の総量を同一とするために、下層のPtを上層に移動させた 図10(a)に改良前を、図10(b)に改良後のコート層断面のPtの線分析結果を示す。改良前ではPtの濃度が均一だったものを、改良後では上層のPtの密度を高めている。次に、改良LNT触媒のSパージ前のS被毒量分布を図11(a)に、Sパージ後のS被毒量分布を調べた結果を図11(b)に示す。改良後では、上層に多くSが分布をしているが、Sパージをすることによって、改良前では多く残存していた下層を含め、コート層全体でSの残存量が改善した。上層でも残存量が少なかったのは、Sパージは貴金属を起点に起きる反応であり、Pt濃度を高めたことでパージ効率が向上したためと考える。このように、コート改良によりSパージ効率を向上させた。

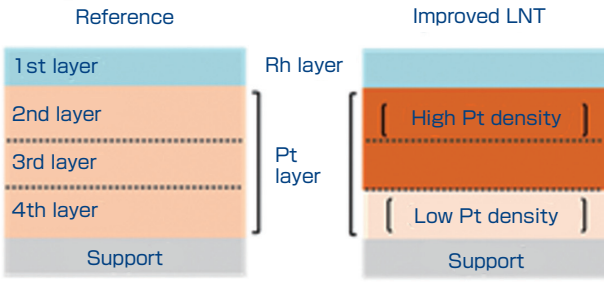


図９　改良LNT触媒イメージ

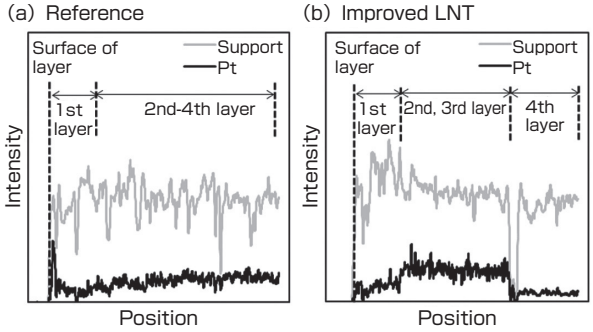


図10　LNT触媒のPt分布

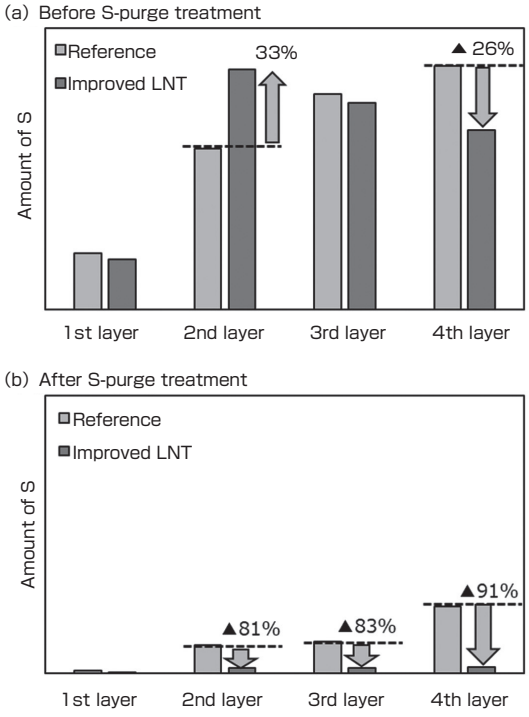


図11　改良LNT触媒のS堆積量
（(a) S被毒後、(b) Sパージ後）

3.3　開発触媒のNOx浄化性能

最後に、バランス点にコントロールしたBa量を含み、Sパージ性を向上させたLNT触媒のNOx浄化性能を確認した結果を図12に示す。評価はモデルガス評価装置にて行った。LNT触媒のSパージ後の浄化性能は改良前と比べて52%向上することを確認した。

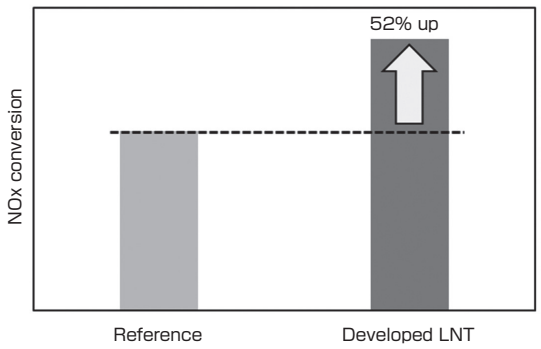


図12　Sパージ後での改良LNT触媒のNOx浄化率

4. まとめ

LNT触媒のNOx吸蔵量と、Sパージ効率の向上について検討した。その結果Ba量の増加に伴いPtが粒成長することにより、NO酸化反応を低下させることが明らかとなった。そのため、触媒設計に応じてBa量のバランス点を見出すことが吸蔵量を向上させる有効な手段の一つであることを見出した。またSパージ効率の向上には、コート上層のPtの高密度化が有効であった。これは、コート下層のパージされ難いSが低減することによる。

これらの技術を織り込み、高NOx浄化率を有し、Sパージ性を向上させたLNT触媒を開発した。

5. 謝辞

本研究を進めるに当たり、in-situ XAFS解析を株式会社住化分析センター殿にご協力頂いた。この紙面を借りて厚くお礼申し上げる。

参考文献

(1) Naoto Miyoshi, et al.：Development of New Concept Three-Way Catalyst for Automotive Lean-Burn Engines, SAE Technical Paper, 950809 (1995)
(2) Naoki Takahashi, et al.：The new concept 3-way catalyst for automotive lean-burn engine：NOx storage and reduction catalyst, Catal. Today, Vol.27 p.63-69 (1996)
(3) 大野弘志ら：NOx吸着反応型三元触媒システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.11 No.2, p.45-50 (1999)
(4) Ichiro Hachisuka, et al.：Deactivation Mechanism of NOx Storage-Reduction Catalyst and Improvement of Its Performance, SAE Technical Paper, 2000-01-1196 (2000)
(5) Kinichi Iwachido, et al.：Development of the NOx Adsorber Catalyst for Use with High-Temperature Condition, SAE Technical Paper, 2001-01-1298 (2001)
(6) Kinichi Iwachido, et al.：NOx Trap Catalyst Technologies to Attain 99.5% NOx Reduction Efficiency for Lean Burn Gasoline Engine Application,SAE Technical Paper, 2009-01-1077 (2009)
(7) 中野勉ら：希薄燃焼ガソリンエンジンにおける排出ガス低減開発, SUBARU TECHNICAL REVIEW, No.47, p.81-86 (2020)
(8) 荒井弘道ら：固体表面における金属粒子サイズの制御と触媒作用−1− 表面, Vol.17 No.11, p.675-692
(9) 加藤健治ら：希薄燃焼エンジン用NOx吸蔵還元型三元触媒システムの開発, TOYOTA Technical Review, Vo.44 No.2, p.30-35 (1994)

【著　者】

佐々木 康吉

福富　駿祐

丹　　功

1D 解析を用いた低温環境における始動挙動の推定

Analytical Estimation of Engine Starting Behavior at Cold Temperature Using 1D Simulation

犬 童 翔 太* 大 堀 勇 二*
INUDO Shota OOHORI Yuji

抄 録

近年の電動車両では、燃費や重量の面から従来のスターターではなく、ISGや高電圧の駆動モータを用いて始動する車両が増えてきた。これらの新規デバイスを用いた始動開発では、車両への影響度合いを定量的に分析するために、特に条件が厳しい低温環境まで考慮して、始動時における筒内圧やトルク、回転数変動を机上試算することが重要である。

本稿では、モデル互換性の高い国際標準記述（VHDL−AMS）を用いて、1D解析環境における低温エンジン挙動の推定手法および開発への適用事例について紹介する。

Abstract

Recently, some hybrid vehicles have an engine starting system using a new device such as a high voltage motor rather than a conventional starter. It is important to make an accurate estimate of starting torque or energy when a new starting system is adopted because cold condition may cause a decrease of battery power and an increase of engine friction.

In this study, we used non-causal simulation software which can analyze any physical domain at one dimension and estimate the behavior of engine start at cold temperature.

1. まえがき

近年、世界的な環境規制の強化に伴い、エンジンと駆動モータを組み合わせたハイブリッド車両の市場シェアが増加している。このようなハイブリッド車両のなかには、駆動モータによりエンジンを始動させることで、従来のスターターを廃止し、重量低減やコスト削減が図られる車両もある。

新規始動システムの開発にあたっては、始動可否だけでなく始動時の電源挙動や振動、騒音、動力性能など車両全体の性能を満足させる必要があり、その品質を担保するために開発工数が増大する可能性がある。そこで企画段階で課題を把握し開発を効率化するために、高い互換性を持つ解析モデルを用いたMBD手法が重要となる。

企画段階で新規始動システムの課題を把握するためには、始動に要求される必要トルクやエネルギーを精度よく見積もることが重要となる。特に低温環境では電池の出力性能の低下やエンジンフリクションの増大により始動性能が悪化するため、外的要因を考慮した試算が必要である。

本稿は、国際標準記述であるVHDL-AM（IEEE1076.1）を活用し、運動、熱、流体などの物理領域を1次元で解析できる非因果シミュレーション環境にて、低温における始動必要トルクを試算し、その際の始動挙動を推定する手法および開発への適用事例について紹介する。

2. 推定手法概要

低温における始動可否を机上で判断するために、エンジン・ギヤ・モータモデルを組み合わせた始動システムモデルを1D解析ソフトで構築した。

モータリング時における始動トルクを正確に試算するために、エンジンモデルは空気による圧縮・膨張およびメカニカルフリクションを考慮してモデル化している。またモータモデルは、出力トルク特性をマップ化して織り込み、ねじり剛性や出力トルクの応答遅れは考慮していない。

＊パワートレイン設計部

2.1　エンジンモデル

図1に推定手法の検討に用いたエンジンモデルの模式図を示す。筒内、クランク、吸排気系、メカニカルフリクションをモデル化し、回転部のイナーシャを考慮したエンジンモデルを構築した。またモデル化したエンジンの諸元を表1に示す。

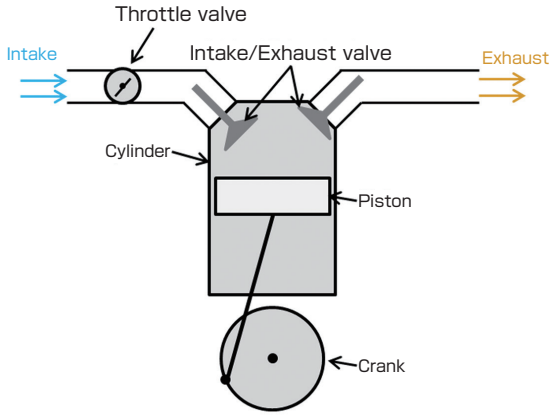


図 1　エンジンモデル概要図

表 1 モデル化したエンジンの諸元

Specification	Value
Model	FB25
Cylinder Layout	H4
Valve Layout	DOHC 4 valve
Displacement [cc]	2,498
Bore × stroke [mm]	94.0 × 90.0
Compression ratio	12.0 : 1

2.1.1　筒内モデル

シリンダーピストンモデルは、内部気体の状態方程式(1)、およびエネルギー保存則(2)を満たすようにモデルを構築した[1]。

$$PV = \frac{m}{MW} R_0 T \tag{1}$$

$$Q_d = \frac{d(mCvT)}{dt} + P\frac{dV}{dt} \tag{2}$$

P：筒内圧　　V：筒内容積　　m：気体質量
MW：モル質量　　R_0：理想気体のガス定数
T：筒内温度　　Q_d：熱量　　Cv：定積比熱

筒内壁の熱損失は、ニュートンの冷却則(3)を適用、熱伝導率の導出はwoschni式(4)[2,3]を適用した。式(4)の実験定数は、0.013とした。

$$Qloss = h \times A \times \Delta T \tag{3}$$

$$h = C \times D^{-0.2} \times P^{0.8} \times w^{0.8} \times T^{-0.53} \tag{4}$$

$Qloss$：筒内壁からの熱損失　　h：熱伝達率
A：筒内壁面積　　ΔT：筒内壁と外部の温度差
C：実験定数　　D：ボア直径　　P：筒内圧
w：平均ガス流速　　T：筒内温度

平均ガス流速wは、ピストンの平均速度C_mに比例すると仮定し、式(5)とした。係数であるC_1は圧縮・膨張行程および残りの行程の2パターンで切り替わるようモデルを構築した。

$$w = C_1 \times C_m \tag{5}$$

$$C_m = \frac{2 \times N_E \times S}{60} \tag{6}$$

$$\begin{cases} C_1 = 2.28 \text{（圧縮・膨張行程）} \\ C_1 = 6.18 \text{（上記以外の行程）} \end{cases}$$

C_1：実験定数
C_m：ピストン平均速度
N_E：エンジン回転数
S：ストローク

2.1.2　クランクモデル

クランクモデルは、ピストンの並進運動をクランクの回転運動に変換するため、図2に示すモデルとした[1,2]。上死点からのピストン距離、クランク周方向の力およびエンジントルクは式(7)、(8)、(9)の通りである。

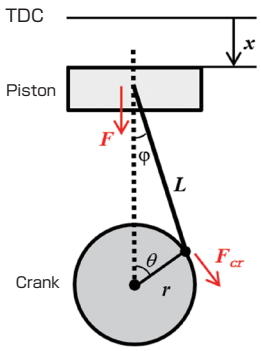


図 2　ピストンークランクモデル概要図

$$x = (L+r) - (r\cos\theta + L\sin\varphi) \tag{7}$$

$$F_{Cr} = \frac{F}{\cos\varphi} \times \sin(\theta + \varphi) \tag{8}$$

$$T = F_{Cr} \times r \tag{9}$$

x：上死点からのピストン距離
L：コネクティングロッド長さ
r：クランク半径　　θ：クランク角度
φ：コネクティングロッド角度

2.1.3　吸排気モデル

スロットルバルブ、吸排気バルブのモデル化はオリフィスモデルをベースとした[1]。バルブの開口面積に応じて、オリフィス前後の質量流量および熱流が保存されるようモデルを定義した。

図3にスロットルバルブの模式図（a.縦断面 b.横断面）を示す。色付きの部分の面積を有効開口面積として定義し、モデルに入力した[4]。

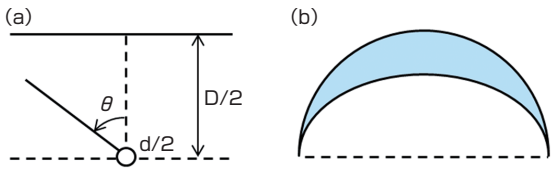


図３　スロットルバルブの断面図

クランク角度ごとの吸排気ポートの実効開口面積を図4に示す。バルブの開閉タイミングは実機と合わせ、バルブリフトカーブはサイン波で近似した。また吸排気ポートのスロート径における面積に到達した場合は、それ以上の面積とならないモデルとした。

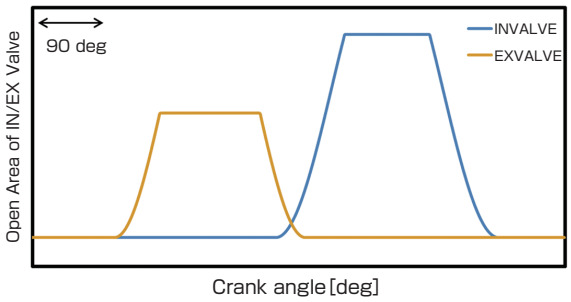


図４　クランク角度に応じた吸排気ポートの実効開口面積

2.1.4　メカニカルフリクション

エンジン回転数ごとのメカニカルフリクション（Nm）をマップ化し、モデルにインプットした（図5）。マップには油温90℃および－30℃のときの計測結果を用いている。測定範囲外のエンジン回転領域においては、値を外挿した。

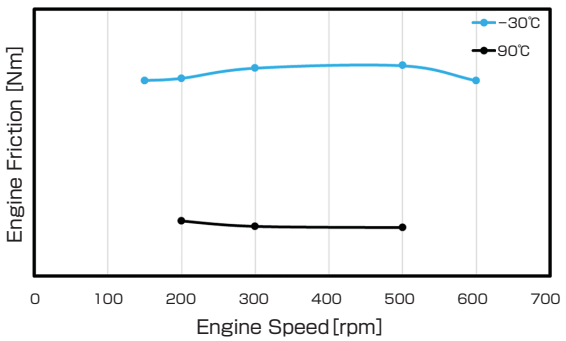


図５　エンジン回転数に応じたメカニカルフリクション

2.2　モータモデル、ギヤモデル

モータ回転数に応じてトルクを出力するマップモデルを用いた。またシステムによってモータリダクションギヤがあるものに対しては、自動車技術会のギヤモデルを参考にモデルに織り込んだ[5]。

2.3　始動システムモデル

エンジンモデル、モータモデルおよびギヤモデルを組み合わせ、始動システムモデルを構築した。実車測定結果と比較するために、実車を模擬した始動システムモデルを2パターン構築した（図6（a）、（b））。

また油温－30℃でのエンジンベンチにおける実測結果と比較しエンジンモデルを単体検証するため、エンジンベンチ試験を模擬したクランク軸直結モータによる始動システムモデルも構築した（図6（c））。

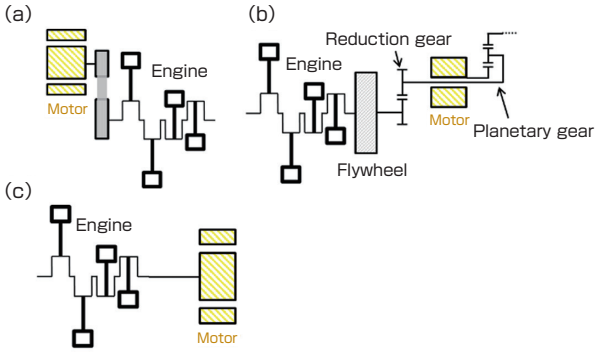


図６　エンジン始動システムモデル概要図
（a）、（b）実車を想定したシステム
（c）エンジンベンチを想定したシステム

3.　妥当性検証

構築した始動システムモデルの温度影響を検証するために、油温90℃および－30℃において実測値と解析値を比較した。油温90℃は暖機完了後のエンジン再始動を想定し、－30℃は低温下におけるエンジン初始動を想定している。解析の精度は二乗平均平方根誤差（RMSE）にて評価した。

3.1　油温90℃における実車測定結果との比較検討

実車を模擬した始動システムモデル（図6（a）、（b））に油温90℃でのエンジンフリクションマップを適用し、解析を行った。得られたエンジン回転数のデータを実測データと比較した結果を図7に示す。

全区間におけるRMSEはそれぞれ図6（a）のシステムでは53、図6（b）のシステムでは30であり、比較的良好な相関が取れていることが分かった。

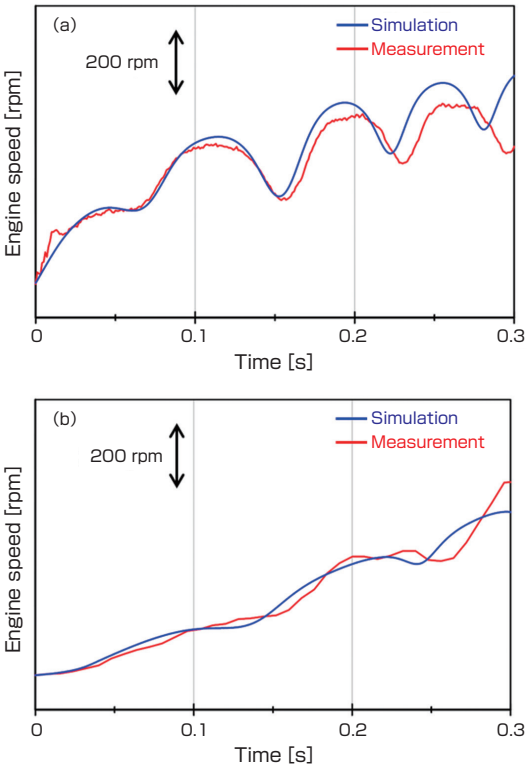


図 7　油温 90℃におけるエンジン回転数の実測と解析の比較結果

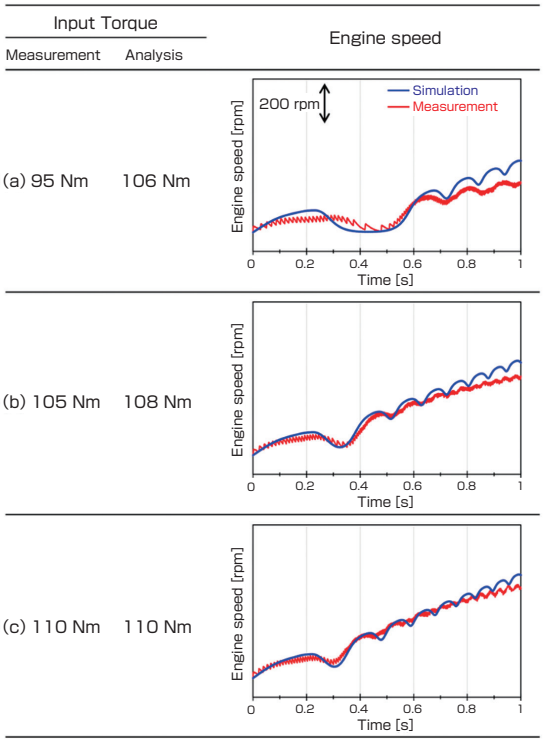


図 8　油温－30℃におけるエンジン回転数の実測と解析の比較結果（woschni 実験定数は 0.13）

3.2　油温－30℃におけるモデル補正検討

油温－30℃で、エンジン回転数および筒内圧の実測データと解析データを比較したところ、解析の方が大きい結果となった。そこで補正関係を明らかにするために図6(c)のモデルを用いて油温－30℃におけるエンジンモデル単体の妥当性を検証した。次に実車を模擬した始動システムでも妥当性を検証するために、実車測定結果を用いて比較検証を行った。

3.2.1　油温－30℃におけるエンジンモデルの補正内容

エンジンベンチ試験で得られた実測データと比較するため、クランク軸直結モータによる始動システムモデル(図6(c))を用いて、油温－30℃でのエンジンフリクションマップを適用し、解析した。実測・解析ともに一定トルクをエンジンのクランク軸に入力する条件としており、モータリング開始時のクランク角度も揃えている。

筒内圧の圧力ピーク値について、解析の方が大きかったことから、筒内の熱損失を大きくするために、woschni式で用いられている実験定数を0.13という値に変更した。図8および9にエンジン回転数および筒内圧の結果を示す。

モータリング可能となる最小入力トルクは実測で95 Nm、解析で106 Nmと、乖離していることが分かった(図8(a))。一方で、エンジン回転数の挙動について、RMSE値は25～50の範囲に収まっており、相関の高い解析結果が得られたことが分かった。

筒内圧の圧縮のピーク値は、実測と解析で同等の値となっている(図9)。筒内の熱損失を大きくすることで、狙い通り実測と解析のそれぞれのピーク値が同等となっていることが分かった。

実測と解析の入力トルクの乖離については、筒内圧の挙動を詳細に模擬出来ていないことが要因だと考えられる。実測結果では、緩やかに立ち上がりピークに達しているのに対し、解析ではピーク値に達したあと、その値が継続している(図9)。

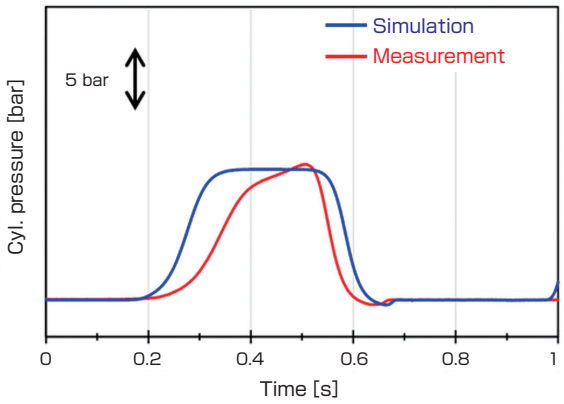


図 9　実測（入力トルク 95 Nm）および解析（入力トルク 106 Nm）の筒内圧比較結果

そのため解析では、継続したピーク値を乗り越えるために、実測よりトルクが必要となったと考えられ

る。この挙動乖離の原因は筒内の熱損失など様々に考え得るが、式(10)の補正関係を用いて、低温における始動挙動の推定を行うこととした。

$$T_{sim} = 0.26\ T_{mea} + 81.4 \qquad (10)$$

T_{sim}：解析におけるクランク軸入力トルク
T_{mea}：実測におけるクランク軸入力トルク

3.2.2　油温−30℃における実車測定結果との比較検討

最後に、woschni式の実験定数の適合、およびクランク軸入力トルクの補正関係の2点を考慮した実車相当の低温始動システムモデルを構築した(**図6(b)**)。油温−30℃における実測および解析の結果を**図10**に示す。

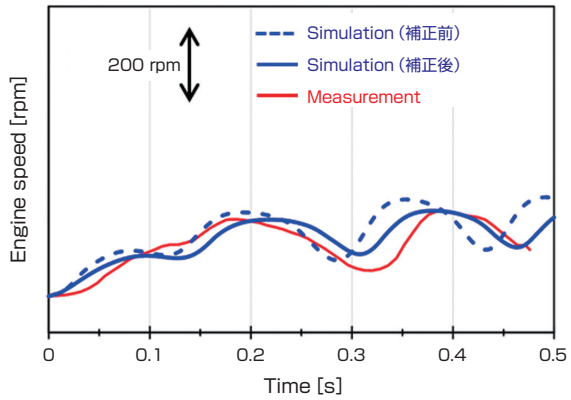


図10　実車想定モデルを用いた油温−30℃におけるエンジン回転数の実測と解析の比較結果

補正後の結果は補正前と比べ、全域にわたって良好な相関が取れており、RMSE値は34であった。このことから実車相当のシステムモデル構築による、−30℃における始動挙動を推定する手法が確立できたといえる。

4.　適用事例

現在のe-Boxerシステムでは、エンジン上に搭載されたISG(Integrated Starter Generator)がエンジン再始動機能を担っている。この再始動機能をトランスミッションに搭載されている高電圧駆動モータが担うことで、ISGを廃止することができ、コストおよび重量を低減できる。

そこで次期HEV開発に向けて、0℃における必要始動トルクを本手法により定量化し、高電圧駆動モータによる始動性能を評価した。

表2には検討に用いたシステム諸元を示す。次期HEVシステムの想定として、e-Boxerと同じシステム構成で、燃費および動力性能を改善するため、エンジンおよびモータを高出力化したシステムを検討対象とした。また駆動系のイナーシャ、機械損失はそれぞれのシステムに合わせて設定した。

表2　検討した車両システム諸元表

	現行e-Boxer	仕様1	仕様2
エンジン排気量	2.0L NA	2.5L NA	2.4L ターボ
変速機	CVT	CVT	CVT
駆動モータ性能	10 kW/65 Nm	20 kW/200 Nm	20 kW/200 Nm
始動デバイス	ISG	駆動モータ	駆動モータ
モータリング出力	2 kW	10 kW	10 kW

システム仕様および始動におけるクランクの開始角度(BTDC160/70)ごとに、e-Boxer相当の始動性能を満足するトルク、およびモータリングにおける最初期圧縮を乗り越えるために必要な最小限トルクの2点を試算した。ここでe-Boxerシステム相当の始動性能とは、油温90℃において基準時間以内に目標回転数に達すること、としている。

図11にシステム仕様1における開始角度BTDC160での始動解析結果を示す。なお参照データとして油温90℃におけるe-Boxer実測データおよび20℃におけるモータトルク100Nmでの解析データも併記している。**図11**から油温0℃においてe-Boxer始動性能を満足するためには、150 Nmのモータトルクが必要であり、油温20℃での解析データと比較するとおよそ1.5倍であることが分かる。このことからフリクション増大を引き起こす油温低下は、始動モータの要求性能に大きく影響すると考えられる。

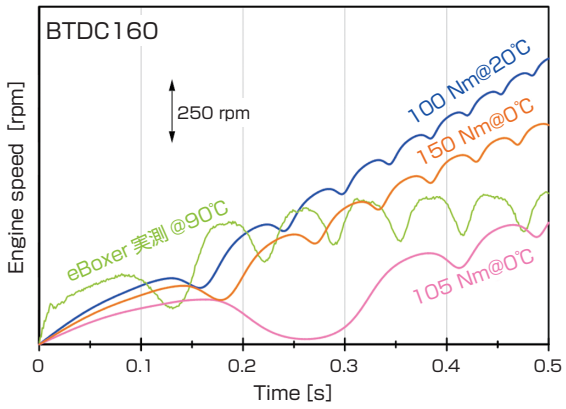


図11　システム仕様1、開始角度BTDC160における油温およびモータトルクに応じたエンジン回転数

表3には**図11**の結果を含めたシステム仕様および開始角度ごとのトルク値を示した。システム仕様2においても油温0℃におけるe-Boxer始動性能満足トルクは160 Nmと大きい結果であった。

またシステム仕様に関わらず、クランク開始角度はe-Boxer始動性能満足トルクにはあまり影響を及ぼさない一方で、必要最小限トルクには強く影響を及ぼしていることが分かった。これは始動性能満足トルクでは回転数の高い領域に、必要最小限トルクでは回転数の低い領域に着目しているためと考えられる。回転数の高い領域ではメカニカルフリクションによる抵抗成分が支配的である一方で、回転数の低い領域では、コンプレッションによる抵抗成分が支配的であると推察される。そのため必要最小限トルクは、クランク開始位置による空気圧縮量変化の影響を受けやすくなったと考えられる。

表３　システム仕様、開始角度ごとの始動性能満足トルクおよび最低限トルク

システム仕様	1		2	
開始角度（BTDC）	160	70	160	70
始動性能満足トルク	150 Nm	150 Nm	160 Nm	155 Nm
必要最小限トルク	105 Nm	90 Nm	120 Nm	75 Nm

検討しているシステム仕様においてe-Boxer始動性能満足トルク150 ～ 160 Nmを駆動モータが出力すると、車両への駆動トルクは40 ～ 50 Nmとなり、EV走行時の要求駆動力を満足できない可能性がある。その場合、低温における始動目標回転数を下げ、始動性能と動力性能を両立させる必要がある。一方で目標回転数を下げると、クランク開始角度による圧縮空気量変化の影響も無視できなくなるため、始動性能を担保するためエンジン停止位置制御の採用要否も含めて議論する必要がある。

上述の通り、油温やクランク角の開始角度ごとに始動に必要なトルクを定量化した。本試算結果により、EV走行中にエンジンを始動させた際の駆動力変化やエンジン始動時間を含めた加速応答性、エンジン停止位置制御の要否など、始動に関わる車両開発を定量的に議論できる環境となった。今後は高電圧システムにおける電源挙動や車両の振動、騒音といった分野との連携を深め、お客様価値を高められるMBD開発としていく。

5.　まとめ

本検討では、国際標準言語を用いて1D解析による始動システムモデルを構築し、油温－30℃における始動挙動の推定を行った。得られた結果は以下の通りである。

1. 実車相当の始動システムモデルを構築し、油温90℃において解析したエンジン回転数を車両実測と比較すると、概ね良好な相関が取れた。このことから油温90℃における始動挙動の推定はできると言える。
2. 油温－30℃におけるエンジンモデル単体の検証結果からwoschniの式における実験定数の適合やクランク軸入力トルクの補正が必要なことを明らかにし、油温－30℃における実車での始動挙動の推定ができる手法を確立した。
3. 本推定手法を用いてe-Boxerシステムにおける始動性能満足トルクおよび必要最小限トルクを試算し、始動時の動力性能やエンジン停止位置制御の要否など始動に関わる車両性能を定量的に開発できる環境を構築した。

参考文献

(1) 辻公壽, 関末崇行, 加藤利次：燃費, 駆動力検討のためのパワートレインモデル,自動車技術会学術講演会予稿集(2015), 20155096

(2) 石川義和：自動車用ガソリンエンジン設計の要諦, 山海堂(2002)

(3) 窪山達也：熱損失の経験式(Woschniの式), Society of Automotive Engineers of Japan, Engine Review, Vol.2, No.3 p20-24（2012）

(4) 青木勇太, 江見雅彦, 島野健仁郎, 木村修二, 榎本良輝：DIディーゼル機関の燃焼室壁面における熱伝達率予測式に関する研究,自動車技術会論文集, Vol.43, No.1, p115-121（2012）

(5) John J. Moskwa：Automotive Engine Modeling For Real Time Control, MassachusettsInstitute of Technology,https：//dspace.mit.edu/handle/1721.1/14617（1987）

(6) 自動車技術会国際標準記述によるモデル開発・流通検討委員会：自動車システムのモデルベース開発入門, 自動車技術会(2017)

【著　者】

犬童　翔太

大堀　勇二

SUBARU コネクテッド自動運転の研究

Research and Development of Next Generation Connected Automous Vehicle

小山　哉* OYAMA Hajime
山口史人* YAMAGUCHI Fumihito
溝口雅人* MIZOGUCHI Masato
長谷川悠* HASEGAWA Yu

抄　録

次世代のレベル3、レベル4の自動運転実現に向け、特性の異なるセンサにより「継続性」と「冗長性」を持った自動運転試験台車を製作した。さらにコネクテッドによりこれら特性を強化するとともに、車両とサーバを低遅延ネットワークで結び、サーバによる管制制御アルゴリズムを構築。車載センサでは難しい合流区間でのスムースな合流自動運転制御をシミュレーションで検証した。

Abstract

For the realization of next-generation Level 3 and Level 4 autonomous driving, we have developed an autonomous driving test vehicle with “continuity” and “redundancy” using sensors with different characteristics. Furthermore, by strengthening these characteristics with “Connected”, we have developed a server-based vehicle control algorithm that connects the vehicle and the server with a low-latency network. Using HIL Simulator, we verified the smooth merging automatic driving control in the merging section, which is difficult with the in-vehicle sensor.

1. まえがき

SUBARUでは2030年交通死亡事故ゼロを目指した自動車開発を進めている。また同じくして社会からの自動運転への機能要求も広まっていくことが予想される。

技術研究所では次世代自動運転研究として高レベル自動運転（自動運転レベル3、4：運転責任がシステムにある）に取り組んでおり、今回プロトタイプとなる試験台車の構築を行った。

既存の自動運転レベル2（運転責任がドライバにある）の拡張として高レベル自動運転を実現していく。拡張されたシステムはコネクテッドの考えを取り入れたものとなった。

2. SUBARU高レベル自動運転システムの概要

高レベル自動運転が可能な走行環境として、自動車専用道（高速道）に加え一般道もターゲットとしてシステムを構築した。

高レベル自動運転には一般的に以下2つの要件が求められる。

○ユーザが作動を期待しているところでは連続で作動する

○単一故障によって急激に機能が維持できないことにならない

これらを「継続性」「冗長性」という形で表現する。高レベル自動運転ではシステムとセンシングでこれらの要素を満たしていくことが望ましい。

レベル2自動運転車両（アイサイト）をベースとし、センシングに対しての「継続性」「冗長性」を実現する。開発した高レベル自動運転台車は主に周囲認識をもれなく行えるよう、車両の前方に加え、側方から後方を検知するセンサを搭載した構成となった（**図1**、**表1**）。

＊ 技術研究所

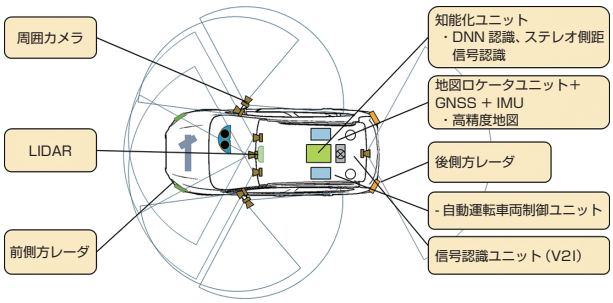


図 1　高レベル自動運転台車センサ構成

表 1　センサ検知範囲と役割

	センサ
前方物体検出	ステレオカメラ、Lidar
側方、後方物体検出	単眼カメラ、Radar
経路検出	ステレオカメラ、高精度地図

各方向のセンシングは「冗長性」の観点から2つのセンサでカバーしている。

これらは同時にセンサ特性としてもパッシブセンサ／アクティブセンサの関係にあり、「冗長性」としての複数センサとしての役割だけでなく、「継続性」も考慮した補間関係になっている。

例えば「全周囲カメラ」は物体識別に優れているが、低照度での性能確保が難しいのに対し、「レーダ」は物体識別には難があるが、外界の照度に影響を受けない。

高レベル自動運転中はこれら相補間の2つのセンサの両結果を基に制御を行い、どちらかのセンサが使用できない環境の時は、検知できているセンサ情報を基に自動運転の安全な終了、もしくは自動運転レベルを段階的に下げていく処理を行い、急激な自動運転の中止を回避する。

このように高レベル自動運転車に対して複数のセンサを用意するが、「継続性」の観点では不十分と考えられた。それはセンサの検知距離限界に加え、物理的な遮蔽物や急激な悪天候などでは自律センサでは限界があるためである。そのことから、自律センサで検知できないものはコネクテッドからの情報により、センシングを補間する考えを取り入れた。

なお、高精度地図は距離限界のない経路センサとして考えている。

車載センサとコネクテッドによる自動運転センシングの機能役割をまとめた（図2）。

コネクテッドによるセンシングの拡張を自動運転車に取り入れる考えは同時に車両自律センサではカバーしきれない事故への対応の可能性も示唆しており、交通死亡事故ゼロを実現する観点でもコネクテッド情報は必要となると考えられる。

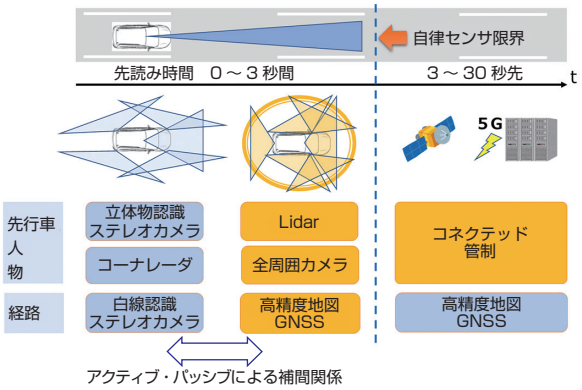


図 2　センサ役割範囲

3.　SIP実証実験

今回開発したセンサシステムを搭載した高レベル自動運転台車で第2期SIP内閣府実証実験[(1)(2)]に参画し、東京臨海部での一般道自動運転試験を行った（図3）。コネクテッド機能として信号情報の配信（V2I）を用いている。

図 3　SIP 実証実験試験光景

SIPの試験システムからV2Iとして信号の灯火情報と残時間が配信され、信号が物理的に遮蔽され車載センサで検知できないときに、配信情報を用いた信号停止制御を行う（図4）。

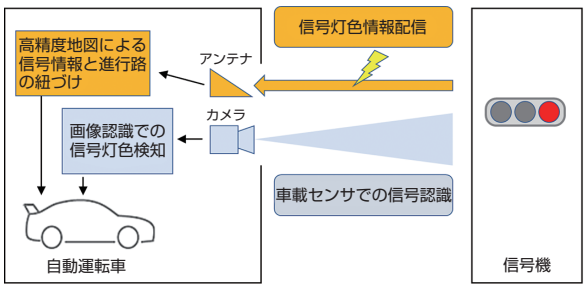


図 4　試験システム

これは車両自律センサの検知限界をコネクテッド情報により補間するケースとなる。

信号が遮蔽される環境として、一般道環境における

道路構造や路側物、同一もしくは隣車線にいる大型車トレーラによる信号灯火機の遮蔽に対して、コネクテッド（V2I）からの情報による信号減速制御の確実性、安定性が確認できた。また交差点横断車両による信号遮蔽時の制御継続性にも効果がみられた（図5、6）。

図５　周辺車、交差車両による信号機遮蔽

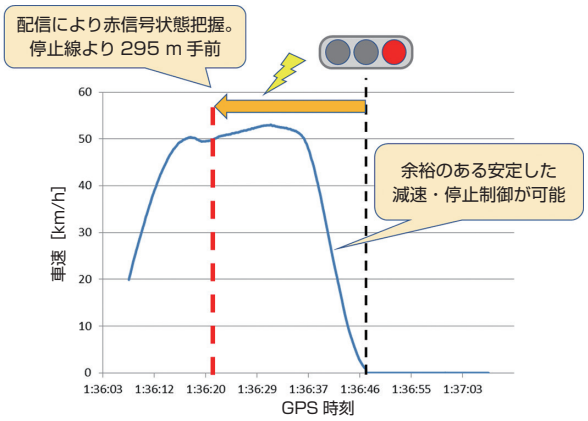


図６　信号情報による安定した信号減速

4.　コネクテッド自動運転

高レベル自動運転のセンサとして車載自律センサのみでの構成では悪天候のような道路の環境や車両、構造物による検知物の物理的遮蔽に対して継続的なセンシングが難しく、高レベル自動運転成立のためにコネクテッド機能が要求されていくことが予想される。

先のSIP実証実験では、コネクテッドにより信号情報を車両側がダウンロードして受け取り、自律センサの補間・拡張として使用していたが、コネクテッドのシステムでは自車両の情報をアップロードすることも可能である。

コネクテッドの考えを進めると、自動車は自車の位置情報をサーバに上げ、サーバから周囲情報を受け取る構成が考えられるが、同時にサーバ側は実環境の複数の自動車の情報が集約された状態が実現できる。

今回これを実環境の写像としてとらえることで、自動運転に関わる判断処理をサーバで行うサーバ管制制御についてシミュレータを構築し検討した。

4.1　低遅延サーバによる制御

自動運転判断処理をサーバ側で行うためには、車両とサーバとの通信の遅延が課題になる。

サーバ処理コネクテッドシステムの通信遅延と不安定性の多くはインターネット網での不確実な遅延に原因があるため、キャリア内のネットワークに接続されたサーバを活用することで、低遅延性が期待できる（図7）。

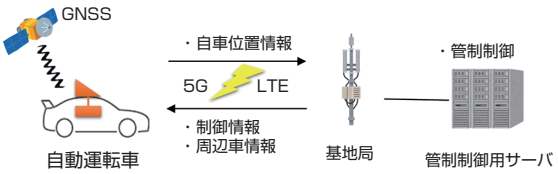


図７　コネクトシステム構成

AWS Wavelength[3] のサービスは、上記のように低遅延性が期待できる構成となっているため、この活用を検討した。また、同サービスは5Gを想定したシステムとしてサービス展開されているが、5G/LTEどちらでも使用できる。サーバ管制制御で求められる応答速度と、現在の5Gの普及状況を鑑み、今回はLTEでの評価を行った。

実車による自動運転ユースケースを想定し北海道美深町でのAWS WavelengthとLTE構成での通信遅延計測を行った。通常の通信状態では通信応答は70-100 msに収まり、想定しているサーバ管制制御には十分な性能が出る見込みがあることが確認できた（表2）。

表２　AWS Wavelength 通信遅延量

美深テストコース	美深道道 49 号
77 ms	69 ms

4.2　コネクテッド自動運転　合流ユースケース

サーバ管制制御が優位で、かつ自動運転制御実現性を検証できるユースケースとして高速道路での余裕のない合流ケースで検証する。実際の環境でも車両自律センサによる自動合流は、本線の状況がセンシングできてからの車速制御となるため、区間の短い限られた合流車線では制御も急となるケースも多い（図8）。

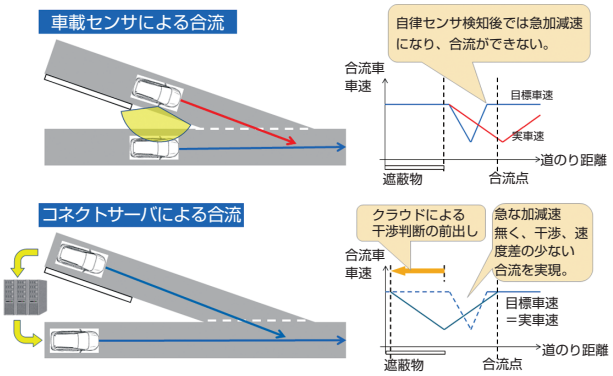


図８　コネクトによる合流ユースケースと狙い

例えば首都高速のような余裕の少ない合流状況となる。将来の実車検討も考慮し、美深テストコースの合流を模した状況でシミュレーション評価を行う。

今回は合流車両と本線車両が同時に合流地点に到達するタイミングで走行させた。

4.3　サーバ管制制御アルゴリズム

サーバと各車両は通信で接続し以下の処理を行う。各車両はGNSSで取得した車両の緯度、経度、時刻をサーバにアップロードする。サーバではアップロードされた車両情報と高精度地図情報から各車両を道路上に再配置し、道路ごとに現在から将来の車両位置を計算し、将来の車両の位置占有を求める。車両間で将来位置が干渉する場合、車両同士の衝突を意味しており、干渉状況を解消するような車両制御情報を対象車に指示を行うことで、将来の干渉状態を解消する(図9)。

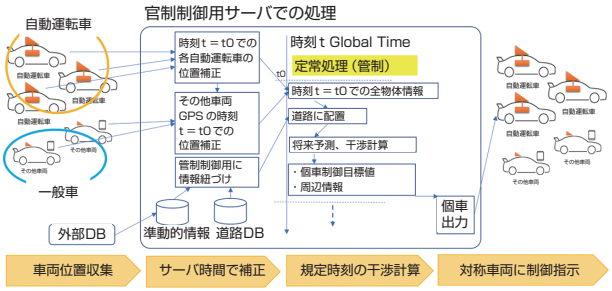


図９　サーバ定時間処理

サーバでは車両に搭載されたGNSS位置情報から車両を高精度地図上にマッピングするが、干渉判断するためには精度の高い位置推定が必要となる。今回、対象車両は自動運転車であることから高精度のGNSSが搭載されているものとして取り扱い、主に時間誤差の補正について述べる。

車両からアップロードされるGNSSデータには高精度な緯度経度情報に加え、GNSSが位置計算した高精度な時刻情報がある。

サーバ側で見ると、各車両の位置測位情報も各車両のGNSS処理タイミングは異なるため、異なる時刻の車両位置情報として受信される。また各車両からの情報は通信状況も含め時間遅れが生じるため、データ欠損についても考慮が必要となる。サーバでは定時間処理として現在状態推定を行うことからサーバもGNSS時刻ベースで定時刻処理を行う必要があり、定時間処理を行う時刻ベースでの車両位置推定を行う。

まず、サーバが車両位置を受信すると、サーバ内高精度地図からGNSS受信時刻の道路上での車両位置を確定する。道路は道路リンク構造によって分割され、道路ごとに起点からの道のり距離を示す座標系Sで表現される。S座標上で現在状態推定を行う時刻と、GNSS受信時刻の時間差による位置ズレを補正する(図10)。

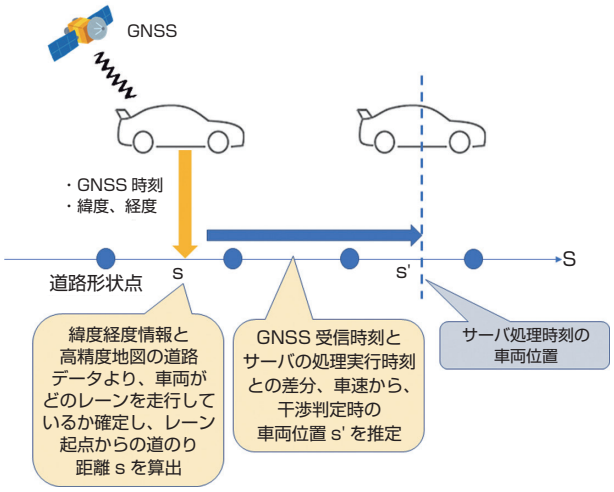


図 10　高精度地図と時刻補正

サーバで定時処理するときの車両位置が決定されると、各車両の速度より道路上の将来位置の予測を行う。s-tグラフ(道のり距離－時刻グラフ)であらわされた車両位置は車両の長さを考慮した帯状に表現され、将来の道路上での車両占有を表している。

サーバでは各車両の将来予測状態を各定時刻で判断する。車両占有領域が干渉している場合、車両同士が衝突する予測となる。将来の干渉が発生した場合は干渉車両同士で車速の調整を行い干渉状態の解消を図る。

合流車線と本線車線の干渉は車線リンクと車線属性で将来車両位置を本線車線にコピーする(図11)。

合流ユースケースでは主に合流側の車両を減速させることで干渉の解消を図った(図12)。

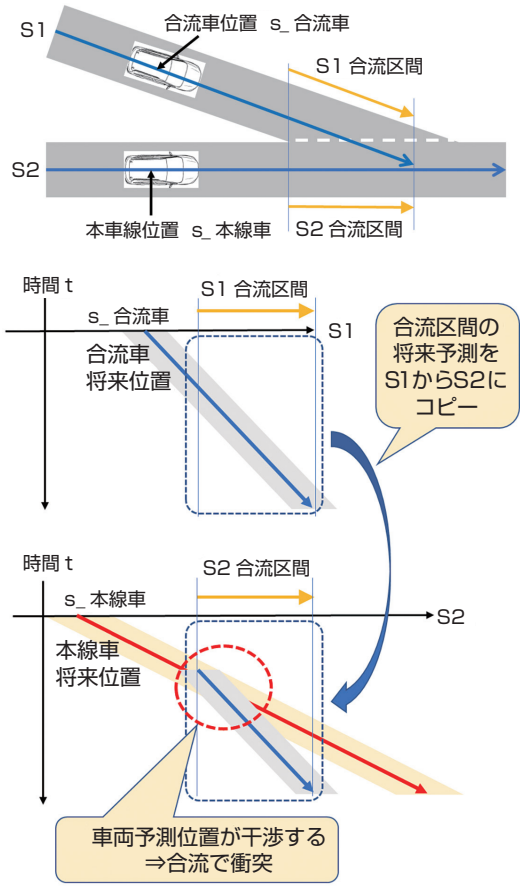


図 11　合流道路構造と合流干渉判定

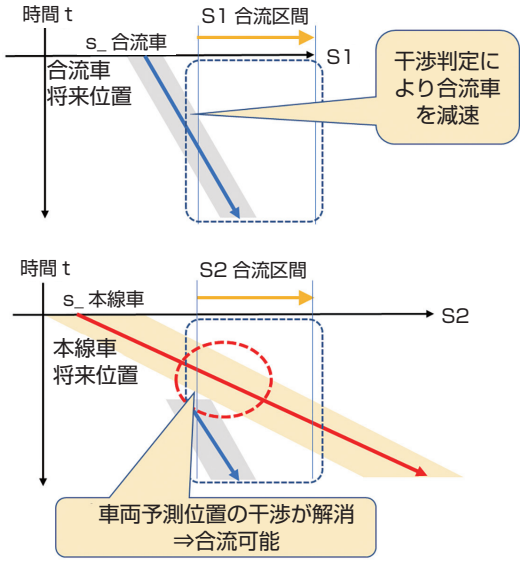


図 12　合流干渉の解消

サーバ管制では将来予測に基づく判断であり時間的余裕を持った状況で車両減速が実行できる、車両側への指示は定減速指示のみで指示時間で本線車両との前後位置関係調整を行うセッティングとした。このため合流側車両も大きな減速無しに、自動運転で設定された車速を維持することができる。

4.4　サーバ管制制御自動運転シミュレータ

サーバ管制制御自動運転を評価するため、自動運転シミュレータとAWS　Wavelengthを接続したサーバ管制制御自動運転シミュレータ（HILS）を構築した。美深テストコースを模擬した本線を走る2台の車両と、合流路を走る自動運転車両を再現する。

車両状態計算器としてETAS、車両挙動モデルはCarsimを用い、合流側車両は実車と同じ自動運転センサ群と制御コントローラを持つ構成とした。

サーバ側は実際の環境であるAWS　WavelengthのEC2に管制制御サーバ処理アルゴリズムを実装した（図13、14、15）。

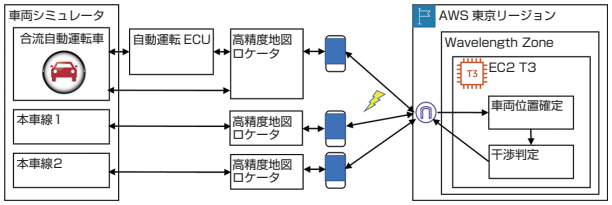


図 13　コネクテッド自動運転 HILS の構成

図 14　自動運転 HILS

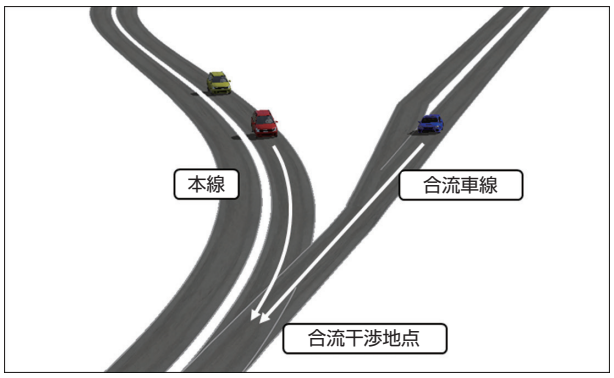


図 15　合流試験環境（美深テストコース模擬）

本線と合流車線の速度は同じ70 km/h、合流箇所で衝突するシチュエーションとし、シミュレーション検証を行った。

グラフで見られるよう、サーバ干渉判定による合流車両の減速により、本線側の車両間隔が広い場合は2車両間に、車両間隔が狭い場合は2台目の後ろに減速して合流できたことが分かる（図16、17）。

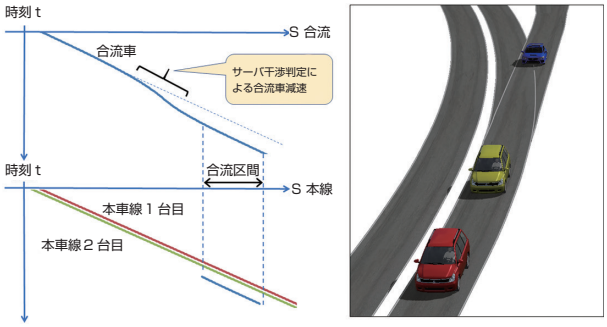


図 16　本線車、車間が短い時の合流

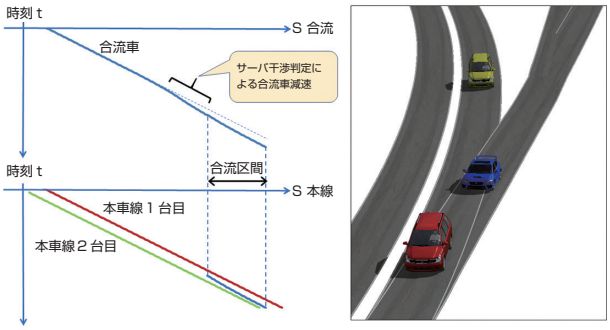


図 17　本線車、車間間広い時の合流

5.　まとめ

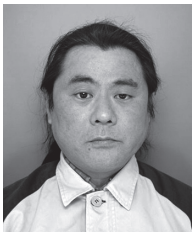
次世代の自動運転として「冗長性」「継続性」を考慮し、コネクテッドの機能を搭載した自動運転試験車とサーバ管制システムを構築した。これらは高レベル自動運転の要件を満たすためのシステムだけでなく、交通事故ゼロのための技術としても期待される。

開発に協力いただいた株式会社両毛システムズ、日本システムウェア株式会社に深謝する。

参考文献

(1) NEDO：戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期「自動運転（システムとサービスの拡張）」
https：//www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101219.html
(2) SIP Café：SUBARU【東京臨海部実証実験】
https：//sip-cafe.media/info/6134/
(3) AWS Wavelength：5G デバイスのための超低レイテンシーアプリケーションを提供する
https：//aws.amazon.com/jp/wavelength/

【著　者】


小山　　哉

山口　史人

溝口　雅人

長谷川　悠

SUBARU「プレオ プラス」一部改良モデルを発表

2020年12月1日

SUBARUは、「プレオ プラス」を一部改良し、本日2020年12月1日に発表しました。
今回の改良では、オートライトを全車標準装備とし、夜間の安全性を向上させました。

プレオ プラス　G スマートアシスト

駐車車両脇を通過する場面での運転行動とドライバ内面的特性の関係分析

Relation between Driving Behavior and Driver's Internal Characteristics When Passing by Parked Vehicles

丸 茂 宏 貴* MARUMO Hiroki
松 本 一 樹* MATSUMOTO Kazuki
後 藤 育 郎* GOTO Ikuo

抄 録

細街路で駐車車両があるような場面では、物陰からの飛び出しや急なドアの開放などに備えて、事前の減速や間隔を空けての走行が事故防止に効果的である。

技術研究所の筆者らは、将来の車には上記のような危険の存在をドライバへ伝え、予備的な回避を促す機能が必要と考えている。しかし減速や回避の仕方にはドライバ一人ひとりによって差がある。危険を伝えるタイミングが画一的だと、ドライバが危険に気付いて回避するつもりでも不要なお知らせが発せられ、煩わしく感じる課題がある。対策として、危険を伝えるタイミングを個々のドライバに合わせて自動的に調整することで煩わしさを抑制する方策を提案している。

本稿では基礎検討として、一般ドライバが駐車車両脇を通過する際の回避行動の差と、その差と個人特性との関連性を分析した結果を報告する。加えて、将来の商品化を想定した場合の課題についても述べる。

Abstract

In case of passing by vehicles parked at the side of a narrow road, earlier actions, such as reducing speed and making a certain distance are effective to prevent accidents.

We believe a function which notifies the driver of these actions will be necessary. However, if the notification timing is defined uniformly and is not suitable for every driver, some of the drivers would feel it bothersome. As one of the solutions, we propose a method which automatically adjusts the notification timing for each driver.

As a foundation study, we surveyed differences of drivers' evasive behavior when passing by parked vehicles and analyzed the relation between the differences and drivers' characteristics. Issues expected in the future are also described.

1. まえがき

技術研究所では交通事故撲滅に向け、一般道の複雑な交通環境を想定した基礎研究に取り組んでいる。日本の一般道での車両対歩行者における事故形態は、単路での歩行者横断が約4割[(1)]と最多で、そのうち路上駐車車両による死角からの飛び出しが約3割[(2)]と最も多い。死角からの飛び出しは、相手を発見してから回避しようとしても難しい[(3)]ため、この様な場面では、ドライバに対して予めの減速や死角と間隔を空けるよう促す運転支援が効果的である。しかし、上記の様な予備的な回避の仕方にはドライバ毎に差がある[(4)]ため、危険を伝えるタイミングが画一的であると、ドライバによっては煩わしく感じる懸念があり、対策として危険を伝えるタイミングを個々のドライバに合わせて自動的に調整する方策を筆者らは提案している。

本稿では、ドライバによって異なる回避行動を推定するための基礎検討として、駐車車両脇を通過する場面でのドライバ毎の回避行動の差が、ドライバの運転スタイルや負担感受性などの内面的な個人特性と関連しているのではないかと仮説を立て分析を行った。

2. 仮説および検証方法

運転経験をつんだドライバは、物陰からの飛び出しなどの危険に対して、事前に減速したり間隔を空けたりといった安全な回避行動がとれる[(5)]。そこで我々は、ドライバが運転経験をもとに長期的に形成した「運転

＊ 技術研究所

スキルへの自信」等の内面的な個人特性（以降、内面的特性と呼ぶ）が、駐車車両脇を通過する速度や側方距離の取り方等の回避行動と関係していると仮説を立てた。

内面的特性は運転スタイルチェックシート（以降、DSQと呼ぶ）や運転負荷感受性チェックシート（以降、WSQと呼ぶ）によって取得できる[6]。また上記の想定場面では、リスクテイキング傾向[7]や危険感受性[8]といった危険回避に関わる内面的特性も強く関係すると考えたため、これも取得した。

内面的特性と回避行動の関係を分析した先行研究は複数[9]～[11]ある。しかし駐車車両脇を通過する場面では見つけられなかったため、統計的検定および機械学習を用いて分析した。さらに内面的特性を機械学習モデルの入力として回避行動を推定した。個人の回避行動を精度よく推定できれば、異なる回避行動をとった場合に通常とは異なる認知判断、例えばうっかり危険を見落としている可能性などを客観的に察知できる。そこで異なる回避行動をとり始めたタイミングで危険を伝えることで、個々のドライバにとってさらに事故回避に役立つ機能とできると考えている。

なお本実験は、自動車技術会「人を対象とする研究倫理ガイドライン」に沿った株式会社SUBARU倫理審査委員会の審査承認を得て実施した。

3. 実験

3.1 実験参加者

表1の通り男性12名、女性8名が実験に参加し、運転経験および年齢層で男女比はおおよそ3：2である。

表1 実験参加者の構成（人数）

運転経験	20代	30代	40代	50代	60代
3年以上業務運転に従事	2	1	2	2	0
日常生活でのみ運転	1	3	3	2	4

3.2 走行ルート

三重県四日市市のJR四日市駅から生活道路を通り、幹線道路を経由してJR四日市駅に戻る1周5 kmを走行ルートとした。概要を図1に示す。ルート上には時間制限駐車区間の設定された道路が2箇所（図2、3）あり、それぞれに駐車車両を配置した。なお道路交通法を遵守し、駐車車両は規定時間内に移動させた。

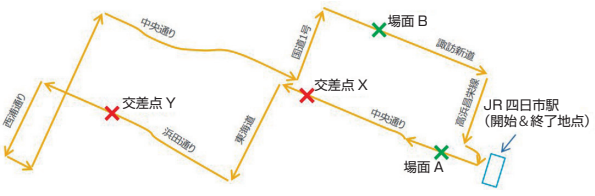


図1 走行ルート概要

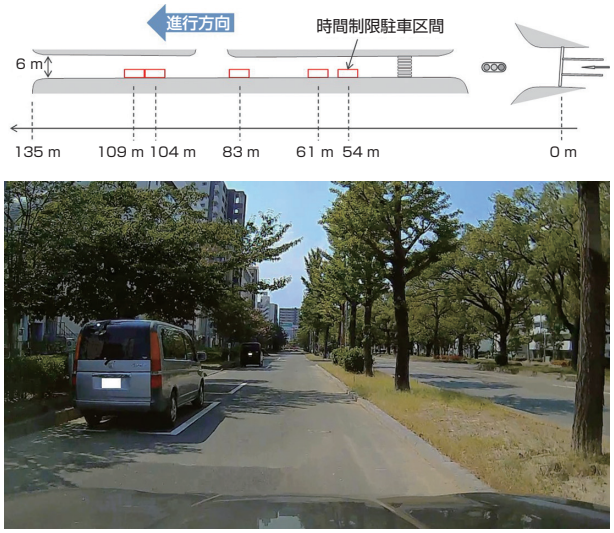


図2 駐車車両脇を通過する場面A
上：駐車区間の概要、下：走行時の前方映像

図3 駐車車両脇を通過する場面B
上：駐車区間の概要、下：走行時の前方映像

3.3 取得した内面的特性

表2は危険回避に関わる内面的特性（以降、危険回避特性と呼ぶ）について先行研究[7][8]を再編したものである。回答尺度はいずれも「非常に当てはまる」「かなり当てはまる」「少し当てはまる」「全くあてはまらない」の4段階、尺度得点は順に4、3、2、1とした。項目1～4の尺度得点を平均し「パーソナリティ・態度」、同様に項目5～8より「ハザード知覚」、項目9～13より「自己技能の評価」、項目14～18より「リスクテイキング傾向」を算出した。実験参加者は走行前に表2およびDSQ、WSQへ回答した。表2およびDSQ、WSQで取得できる内面的特性を表3に示す。

表２　危険回避行動に関わる質問紙項目

No	質問文
1	友だちに比べると自分はこわいもの知らずな運転をする方である
2	人から運転が強引だとたまに言われることがある
3	他の車に並ばれると、先に出たくなる
4	気分次第で、車を飛ばしたくなることがある
5	隣の車線を走る車が割り込み始めるまでウインカに気付かないことがある
6	左折をするとき、後方への巻き込み確認をよく忘れる
7	前を走る車のブレーキランプに気付くのが遅いときがある
8	高速道路の料金所を出た後、後ろの車に注意をしないで車線変更をしてしまう
9	狭い道でも、思いのまま走ることができる
10	割込みは上手いほうだ
11	カーブの多い細かい道でも変化に富んでいる方が楽しい
12	商店街など混雑した道路で、歩行者や対向車をかわして走る自信がある
13	カーレースをしてみたい
14	自転車で自動車や歩行者の間をすり抜けることがある
15	歩行時、道路を斜め横断することがある
16	歩行時、赤信号でも車が来なければ渡ることがある
17	歩行時、信号のないところで道路を横断することがある
18	駆け込み乗車することがある

表３　DSQ および WSQ で取得可能な内面的特性

	内面的特性
DSQ	運転スキルへの自信の有無
	運転に対する消極性
	せっかちな運転傾向
	几帳面な運転傾向
	信号に対する事前準備的な運転
	ステイタスシンボルとしての車
	不安定な運転傾向
	心配性的傾向
WSQ	交通状況把握
	道路環境把握
	運転への集中阻害
	身体的活動度の低下
	運転ペース阻害
	身体的苦痛
	経路把握や探索
	車内環境
	制御操作
	運転姿勢
危険回避特性	パーソナリティ・態度
	ハザード知覚
	自己技能の評価
	リスクテイキング傾向

3.4　計測した運転行動データ

表４に示すセンサ類を当社フォレスターへ搭載しデータを計測した。実験参加者は走行前に危険予知トレーニングを行い、さらに車両感覚を確認するための慣熟走行を行った。その後、ルート開始地点へ移動し走行を開始した。十分な休憩を挟んだ上で実験参加者1人当たり3回の繰り返し走行を行った。

表４　取得した運転行動データ一覧

取得データ	使用センサ、方法
自車速度	車両CAN
加速度／角速度（3軸）	Racelogic IMU04
緯度経度	Racelogic VBOX3iSL-RTK
周囲物距離	Hesai Pandar64
自車前方映像	JVC-KENWOOD DRV-MP745

4.　解析

4.1　回避行動の特徴量抽出

図2、3に示す2地点で、解析範囲を図中の0 m地点、終了位置を140 m地点と定め、走行データを抽出した。この場面における個人の回避行動の特徴量は、駐車車両脇の通過速度および側方距離[4]とした。いずれかの時間制限駐車区間に駐車車両が配置されており、駐車車両が複数存在する場合には、通過速度が最も低い場合を解析対象とした。また、先行車や対向車が存在し通過速度や側方距離が影響を受けたデータは解析対象から除いた。

表５に特徴量の統計値を示す。「個人内ばらつき」とは、実験参加者毎の3回の走行における標準偏差を、全実験参加者で平均した値である。また「個人間ばらつき」とは、実験参加者毎の走行3回の平均値について、全実験参加者の標準偏差を算出した値である。個人内ばらつきよりも個人間ばらつきのほうが大きく、回避行動の差を表す特徴量として適切と考える。

表５　駐車車両脇通過時の特徴量の統計値

場面	特徴量	個人内ばらつき（標準偏差の平均値）	個人間ばらつき（平均値の標準偏差）
A	通過速度	0.64 m/s	1.43 m/s
	側方距離	0.07 m	0.14 m
B	通過速度	0.80 m/s	1.44 m/s
	側方距離	0.12 m	0.17 m

4.2　統計的検定による分析

まず交通環境の異なる場面A、Bの間で、ドライバの回避行動に共通性があるか調査した。次にその共通性を内面的特性で説明できるか検証した。

図4に実験参加者毎の特徴量(走行3回の平均値)の分布を示す。プロットの違い(○、△)はクラスタ分析(k-means)により2クラスタへ分けた結果を意味する。相対的に通過速度が低く側方距離が長いクラスタ(○)と、通過速度が高く側方距離が短いクラスタ(△)が場面A、Bの共通傾向として見られた。ここで場面A,Bに共通して同じクラスタに含まれる実験参加者のみを抽出し、新たに「低速かつ長距離」の群1(●)と「高速かつ短距離」の群2(▲)を作成した。詳細を表6に示す。なお図4および表6のP××は実験参加者××を意味する。

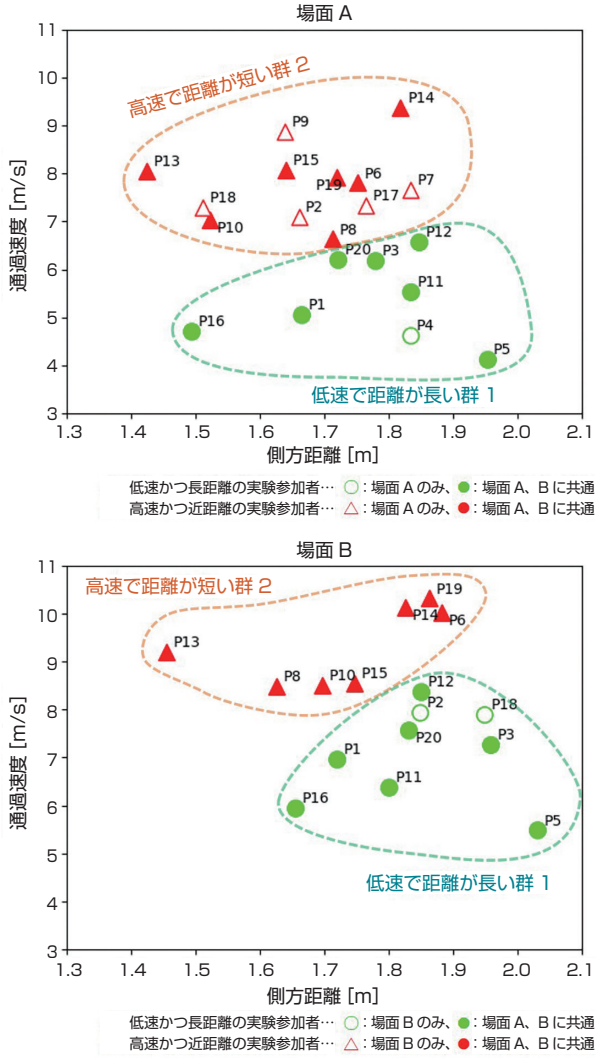


図4　ドライバ毎の通過速度と側方距離（平均値）

表6　場面 A,B に共通する回避行動による群分け

群番号	回避行動の傾向	該当する実験参加者
1	低速かつ長距離	P1, P3, P5, P11, P12, P16, P20
2	高速かつ短距離	P6, P8, P10, P13, P14, P15, P19

次に表6の2群について、前述の内面的特性(表3)それぞれを対象に、Mann-WhitneyのU検定を行った。「信号に対する事前準備的な運転」で有意差($p = 0.04$)、「心配性的傾向」で有意傾向($p = 0.07$)が認められた。それぞれの箱ひげ図を図5に示す。

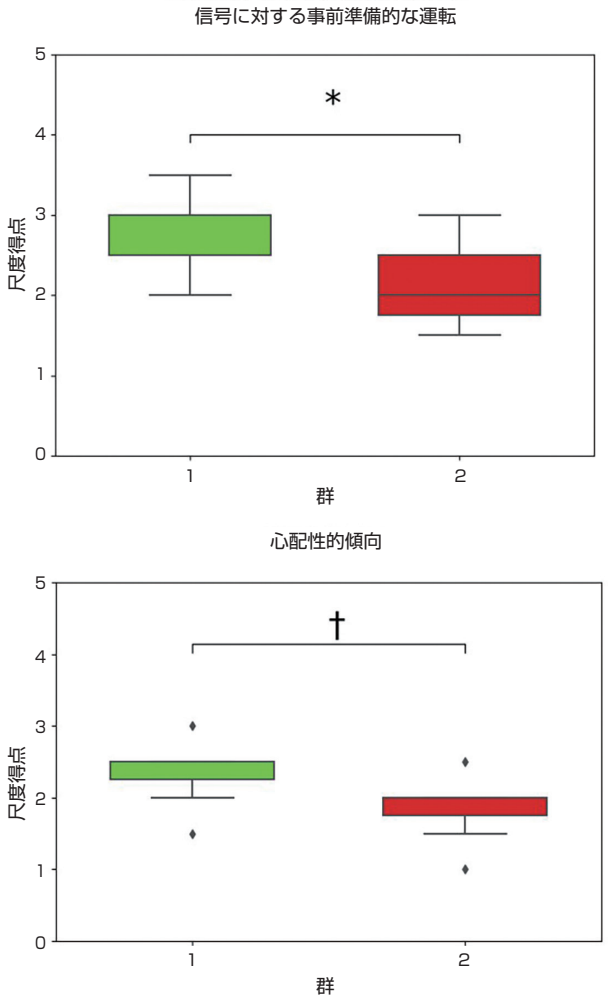


図5　箱ひげ図（＊：$p \leqq 0.05$, †：$p \leqq 0.10$）

4.3　機械学習による分析

統計的検定は実験参加者の一部のみを対象とした分析に留まるため、全ての実験参加者を対象とした場合にも同様の傾向が得られるか、機械学習による分析で検証を行った。

機械学習の一種であるランダムフォレスト[12]は、学習の際に目的変数を推定する上での、各々の説明変数の影響度を示すジニ重要度[13]を算出可能である。本稿では通過速度および側方距離を目的変数とし、個々の内面的特性についてジニ重要度を算出した。具体的には、回帰型のランダムフォレスト(決定木数100、最大深さ4)を用いた。また説明変数として内面的特性(表3)に加え、場面A、Bの交通環境の差を考慮するため、駐車車両脇を通過する際の走行可能な道幅(場面A：3.6 m、場面B：6.0 m)も追加した。なお制限速度も交通環境を説明する変数となり得るが、場

面A、Bで共通(40 km/h)のため省いた。場面A、Bで取得した全データ40人分のうち、先行車等の影響を受けた6人分を除いた34人分を対象とし、学習8割、検証2割にランダムサンプリングし、学習および検証を10回繰り返した。

結果を平均二乗偏差(RMSE)の統計値として**表7**に示す。学習のRMSE平均値が個人内ばらつき(**表5**)よりも小さいことから、十分学習できていると判断した。また、平均のジニ重要度を**図6**に示す。「信号に対する事前準備的な運転」が最大であり「心配性的傾向」も上位5番目であった。統計的検定による分析と矛盾しない結果であった。

表7　場面A、Bを対象とした学習および検証の結果（繰り返し学習10回）

	目的変数	RMSE平均値	RMSE標準偏差
学習	通過速度	0.39 m/s	0.28 m/s
	側方距離	0.04 m	0.03 m
検証	通過速度	1.23 m/s	0.80 m/s
	側方距離	0.10 m	0.07 m

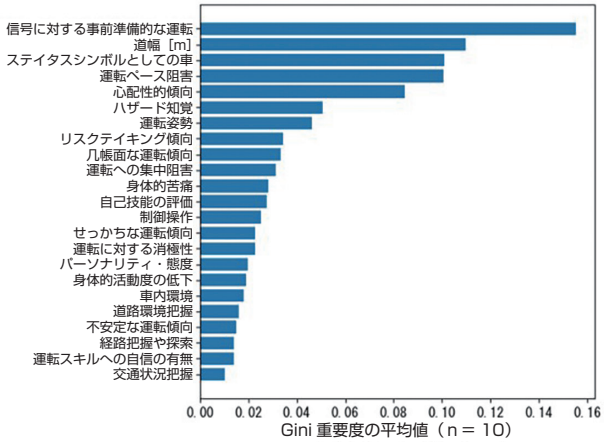


図6　平均のジニ重要度（繰り返し学習10回）

5.　考察

5.1　内面的特性に基づく回避行動の推定

統計的検定および機械学習による分析を通じ、駐車車両脇を通過する場面での通過速度および側方距離の差が内面的な特性、特に「信号に対する事前準備的な運転」と関係することが示された。物陰からの飛び出しや急なドアの開放などに対し、予め減速したり間隔を空けたりする事前準備的な特性が現れたと考える。

この結果を基に2章で述べた、通常と異なる回避行動をとるか推定する技術への内面的特性の活用可能性について検証した。具体的には、内面的特性を入力として実験参加者毎の通過速度および側方距離を精度良く推定できるか、ランダムフォレストを用いて調べた。4.3節の解析との相違点を説明する。第1に、将来的には高精度地図から道路環境情報を取得できると仮定し、説明変数から道幅を除いた。第2に、説明変数として用いる内面的特性を、ジニ重要度の上位5番目までにあたる「信号に対する事前準備的な運転」「運転ペース阻害」「ステイタスシンボルとしての車」「心配性的傾向」に限定した。第3に、場面A、Bそれぞれで機械学習モデルを構築した。検証データを用いた推定結果を**表8**に示す。

表8　内面的特性から推定した回避行動（繰り返し学習10回）

場面	目的変数	RMSE平均値	RMSE標準偏差
A	通過速度	1.05 m/s	0.69 m/s
	側方距離	0.10 m	0.07 m
B	通過速度	1.03 m/s	0.64 m/s
	側方距離	0.11 m	0.08 m

内面的特性を4つに限定した場合でも、**表5**に示す個人内ばらつきから大きく乖離せず、かつ個人間ばらつきを下回る精度で推定が可能であった。個人を十分判別できる精度であり、通常と異なる回避行動をとるか推定する技術への活用が可能と考える。

課題について述べる。危険を伝えるタイミングを個人に合わせて精密に調整するためには、例えば駐車車両手前で減速を始める位置など、ドライバの操作タイミングや操作量を時系列で推定する必要がある。本稿での推定技術を時系列へ拡張し、解決を図る。

5.2　他の運転行動から内面的特性を推定する試み

将来的に本稿の技術を商品化する際、内面的特性をアンケートで取得することは現実的でない。さらにユーザーが使い始めてから短時間で回避行動を推定できることが理想である。そこで、回避行動よりも高頻度に行われる運転行動からドライバの内面的特性を推定取得できるか検討した。

具体的には「信号に対する事前準備的な運転」が赤信号で停車する際の減速行動と関係すると仮説を立て、手前の交差点と100 m以上間隔の空いた信号交差点2ヵ所(以降、交差点XおよびYとする)を対象とした。さらに「信号に対する事前準備的な運転」傾向が強いドライバほど、より手前からアクセルペダルの踏込を止めたり、青信号への切り替わりを予測して減速を遅らせたりすると仮定し、100 m手前の交差点を通過してから停車するまで赤点灯を継続しており、かつ対象の信号交差点まで先行車が存在しないデータのみを分析に用いた。

減速行動の特徴量は、アクセル開度がゼロとなって

から信号手前の停止線で停車するまでの余裕時間(以降、TTIと呼ぶ)[14]に加え、減速を遅らせることで停車直前の減速度が大きくなると考え、停車前5 mの平均減速度(以降、平均減速度と呼ぶ)とした。**表9**に特徴量の統計値を示す。

表 9　信号交差点停車時の特徴量の統計値

交差点	特徴量	個人内ばらつき（標準偏差の平均値）	個人間ばらつき（平均値の標準偏差）
X	TTI	0.36 s	0.40 s
	平均減速度	0.01 m/s^2	0.01 m/s^2
Y	TTI	0.52 s	0.55 s
	平均減速度	0.01 m/s^2	0.02 m/s^2

選出した特徴量を入力とし、「信号に対する事前準備的な運転」の尺度得点をランダムフォレストで推定した。パラメータ(決定木数。最大深さ)、学習／検証方法は4.3節と共通である。結果を**表10**に示す。

表 10　「信号に対する事前準備的な運転」の推定結果（繰り返し学習 10 回）

交差点	RMSE 平均値
X	0.5
Y	0.4

尺度得点における実験参加者間の標準偏差は0.5であり推定値のRMSE平均値と同程度であったため、検討方法では個人を判別できる精度で内面的特性を推定できなかった。理由として、特徴量の個人内ばらつきと個人間ばらつきが同程度であり、減速行動の差を表す変数としてより適切な特徴量が必要だと分かった。今後は別の特徴量や運転行動を対象に、内面的特性の推定をする。

5.3　本稿で未着手の課題

本稿の検討は、駐車車両脇を通過する場面において、先行車や対向車などの影響が無い状況に限定しており、実際の交通環境で起こり得る外乱は考慮できていない。また実験参加者も限定的で、再現性の確認も不十分である。5.1および5.2節で挙げた課題を解決した上で、対象とする場面や交通環境の複雑さを拡張していく。

6.　結論

・駐車車両脇を通過する場面の通過速度および側方距離は、ドライバの内面的特性、特に「信号に対する事前準備的な運転」と関係する。
・内面的特性を入力として通過速度および側方距離を推定したところ、個人を十分判別できる精度で推定可能であった。危険通知を行うタイミングを個人毎に調整する機能への適用可能性を示唆する結果である。
・商品化を考慮し、高頻度に行う運転行動から内面的特性を取得可能か試みたが、赤信号で停車する際の減速行動を対象とした場合では取得できなかった。

参考文献

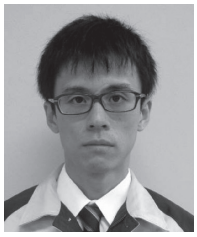
(1) 松井ほか：ドライブレコーダデータにおける車両と歩行者のニアミス状況の特徴，自動車技術会学術講演会前刷集，No.10-10, p.15-20（2010）
(2) 北島ほか：歩行者事故・ニアミス発生前映像に基づく歩行者行動実態の解析，自動車技術会学術講演会前刷集，No.101-07, p.17-20（2007）
(3) 趙雨ほか：ドライブレコーダ映像を用いた事故再現による衝突被害軽減ブレーキの効果評価，自動車技術会2018年春季大会講演予稿集，No.20185300（2018）
(4) 竹本ほか：駐車車両側方通過時における不安全運転行動の特徴分析，人間工学，Vol.48, No.1, p.7-16（2012）
(5) 面田ほか：運転技量差に着目した複数の衝突リスク対象に備えた駐車車両脇通過時の走行方法分析，自動車技術会論文集，Vol.49, No.3, p.617-622（2018）
(6) 石橋ほか：運転者特性把握のための運転スタイル・運転負担感受性チェックシートの開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.55-02, p.9-12（2002）
(7) 中村ほか：リスク行動に関わるドライバー個人特性尺度の作成の試み，立教大学心理学研究，Vol.48, p.35-46（2006）
(8) 松井裕子ほか：車両運転における要注意運転傾向に関する質問紙調査，INSS JOURNAL，Vo.23, 2016 SR-1, p.2-12（2016）
(9) 石橋ほか：運転スタイルの指標化と追従運転行動，自動車技術会論文集，Vol.39, No.1, p.121-126（2008）
(10) 高橋ほか：実路走行実験データに基づく一時停止交差点の通過行動の解析，自動車技術会論文集，Vol.44, No.6, p.1465-1470（2013）
(11) 麝嶋ほか：ドライバ特性が運転行動に与える影響，日本人間工学会第48回大会，日本人間工学会大会講演集（2007）
(12) Breiman： Random Forests, Machine Learning, Vol.45, Issue 1, p.5-32（2001）
(13) Louppe, et al.： Understanding variable importances in forests of randomized trees,

Proceedings of the 26th International Conference on Neural Information Processing Systems, vol.1, p.431-439（2013）
(14) 平松ほか：自動走行における運転スタイル個人適合手法の提案(第2報) − 交差点での制動タイミングのモデル化手法の検討 − , 自動車技術会論文集, Vol.51, No.3, pp.460-465（2020）

【著　者】

丸茂　宏貴

松本　一樹


後藤　育郎

SUBARU 新型「レヴォーグ」が「2020－2021 日本カー・オブ・ザ・イヤー」を受賞

2020年12月7日

日本カー・オブ・ザ・イヤー実行委員会が主催する「2020－2021 日本カー・オブ・ザ・イヤー」の最終選考結果が2020年12月7日に発表され、新型「レヴォーグ」が日本カー・オブ・ザ・イヤーを受賞しました。

2020-2021 日本カー・オブ・ザ・イヤー

新型レヴォーグ「GT-H EX」

機械学習を用いた構造系CAEの効率化

Improving Efficiency of Structural CAE Analysis Using Machine Learning

田　中　雅　大*
TANAKA Masahiro

抄　録

エンジン開発に用いられるCAE技術は年々高度化しており、それに伴いモデル作成を含めた解析時間の増加が進んでいる。その中でも、強度やシール性といった信頼性の予測に用いられる構造系CAEは、モデルの詳細化によりメッシュ作成や条件設定の時間増加を招いている。我々はこれまで、作業の自動化や計算速度の向上を行ってきたが、さらなる効率化を目指し、高速でCAE結果の予測を行うサロゲートモデルの構築に取り組んだ。今回、エンジン部品であるシリンダヘッド・ブロックの熱変形量を算出するCAEに対して、データを学習して分類や予測を行う機械学習の技術を用いた、サロゲートモデルを構築したので紹介する。

Abstract

CAE technology used in engine development is becoming more and more sophisticated every year. As a result, the time required for analyses is increasing. In particular, structural CAE used for reliability prediction leads to increase of time required for modeling. We have been working on automating the process and improving the calculation speed to make it efficient. To realize further efficiency, we have built a surrogate model that can make predictions of CAE results at high speed. This time, we introduce you a surrogate model we developed using machine learning technology to calculate the thermal deformation of the cylinder head and block.

1.　まえがき

製品開発において強度やシール性などの信頼性検討では、構造解析が広く適用されている。構造解析ではCADデータ作成、メッシュ作成、条件設定などの作業時間がかかり、結果が得られるまでのリードタイムが長いという課題がある。さらに近年では、解析モデルの大規模化が進んでおり、解析の事前準備にかかる時間が長期化している。またエンジン開発では、燃焼の変更に伴う構造解析の実施回数が増加している。

CAEのリードタイム短縮と実施回数の削減を実現する手法の一つとして、サロゲートモデルの活用が挙げられる。サロゲートモデルとは、CAEモデルを簡略化した代理モデルのことであり、高速で結果を算出することが出来る手法である。

本稿では、エンジン部品であるシリンダヘッド・ブロックの構造解析に対して、蓄積したCAEデータを基に、機械学習を用いたサロゲートモデルの構築を行ったので紹介する。

＊ CAE部

2.　構造解析の概要

2.1　構造解析の目的

構造解析の部品構成を**図1**に示す。シリンダヘッド・ブロック間は冷却水や潤滑油、燃焼ガスが流れており、それらをエンジン外へ流出させないようにメタルガスケットでシールしている。しかし、エンジン運転中にシリンダヘッド・ブロックが熱変形することで隙間量が拡大すると、ガスケットのビード面圧が低下し、シール不良を招くことがある。そのため、製品設計において隙間量の予測が重要となる。隙間量を算出するために以下の順で2つの解析を実施している。

①熱流体解析：性能要件で決められた温度に合わせ込みを行い、温度分布を作成する解析

②変形解析：①で作成した温度分布を入力条件として、隙間量を算出する解析

この2つの解析を併せて熱変形解析と呼称する。

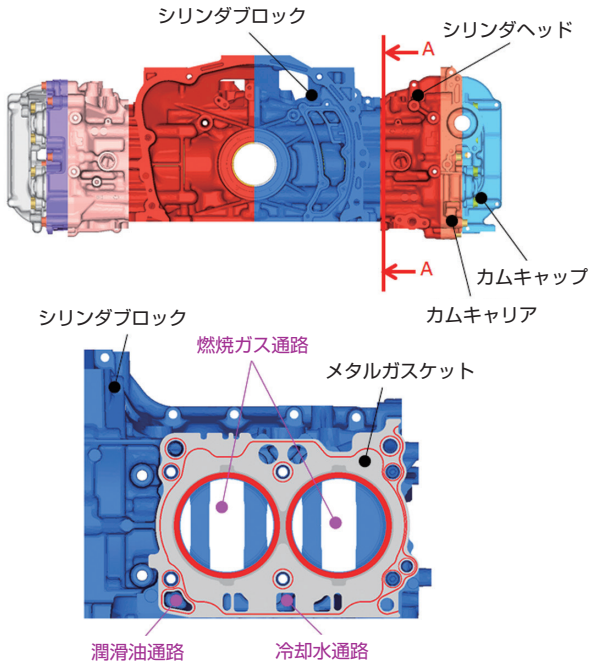


図１　解析モデルの部品構成

2.2　解析の定型化

熱変形解析は、エンジン開発に適応する上で、安定した結果評価および解析作業の効率化を目的に、メッシュ作成方法や解析条件設定の方法、結果処理方法を定型化していた。また、自社内で複数のエンジン開発に適用されているため、データ量が豊富であった。

3.　開発効率化の狙い

従来の自社のエンジン開発では、熱変形解析を繰り返し実施することでボルト軸力や材料特性などの設計パラメータを決めていた。しかし、本手法は連成した解析を実施するため、結果を得られるまで解析計算時間を含めて約80Hを要し、リードタイムが長いという課題を抱えていた。

課題解決のために、図2で示す検討プロセスを構築した。このプロセスでは、高速で設計パラメータの試行錯誤を可能にするサロゲートモデルを用いた。これにより、CADデータ作成前に設計パラメータの探索が行えるため、熱変形解析の実施回数を削減し、大幅な効率化が実現できると考えた。

サロゲートモデルの構築には、過去の解析結果から隙間量の予測を可能にする機械学習を用いた。熱変形解析は2章で示したように、データ量が豊富で且つ、定型化してデータ収集を行っているため、機械学習に適していると判断した。

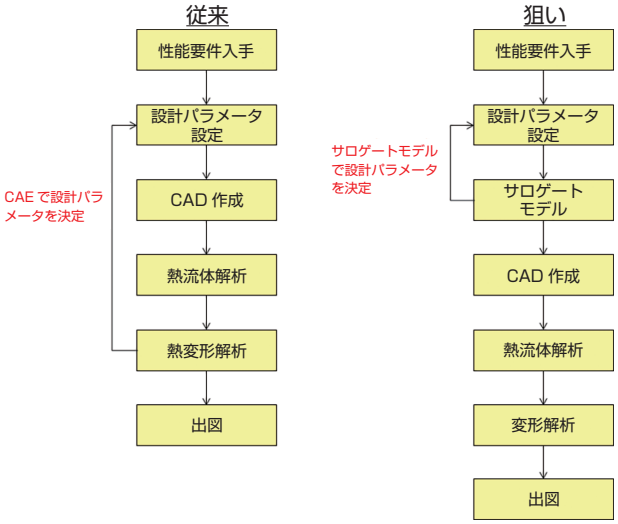


図２　開発プロセス比較

4.　説明変数の設定

機械学習において、予測したい変数（目的変数）とその原因となっている変数（説明変数）を設定する必要がある。今回のケースにおいて、目的変数は隙間量である。また説明変数には、大別すると性能要件、設計パラメータ、位置情報の3つを設定し、11個のデータを収集した。なお､位置情報とは､シリンダヘッド・ブロックの左右とエンジン上下を表した文字列のデータである。3章で示したようにCADデータ作成前に隙間量の予測が行える必要があるため、説明変数に形状データを用いなかった。

一般に熱変形量は以下の式で表される。

$$\Delta L = \alpha \Delta T L \qquad (1)$$

ここで、ΔLは熱変形量、αは線膨張係数、ΔTは温度差、Lは代表長さである。製品寸法を表わす説明変数を有していない場合、式(1)から予測精度が十分に得られないと考えられるが、収集したデータの前提条件が自社の水平対向4気筒エンジンであり、製品寸法を表す代表長さがほぼ一定のため、十分な予測精度が得られると仮説を立てた。

5.　機械学習の選定

熱変形解析で得られる隙間量を算出するために、機械学習を用いたモデルを構築した。モデルの選定基準は、以下の2つである。

・高い予測精度が得られるモデルを構築することが可能であること
・各説明変数の隙間量に対する寄与度が評価できること

エンジン開発においては、複数の関係者の合意と理解が不可欠であり、設計者は予測結果に対して物理的な解釈を説明する必要がある。そのため、寄与度評価が容易に出来ることは特に重要である。これらが満足できると考えられる「重回帰」と「ランダムフォレスト」を候補とした。

5.1　重回帰

5.1.1　重回帰の概要

重回帰は式(2)で表され、各説明変数の係数がデータから推定されることで予測を可能にするモデルである。

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 \cdots + b_n X_n \qquad (2)$$

ここでyは予測値、bは回帰係数、Xは説明変数である。

5.1.2　データの前処理

寄与度評価を行う上で、各説明変数の数値スケールが異なっていると、回帰係数同士の比較が出来ず評価が困難になる。そのため各説明変数に対して分散が1、平均が0を取る標準化処理を行い、スケールを合わせた。

次に多重共線性について評価を行った。多重共線性とは、説明変数同士の相関が高い場合に表れ、回帰係数の分散が大きくなり、寄与度分析が困難となる性質を示すものである。多重共線性が発生しない基準は、式(3)で定義されるVIF値が5.0以下とした。これは、一般に相関が強いとする基準が決定係数(以下R^2)0.80以上であることに由来している。

$$\mathrm{VIF} = \frac{1}{1 - R^2} \qquad (3)$$

式(3)を用いて各説明変数のVIF値を算出したところ、設計パラメータの中の材料特性に関する説明変数と位置情報に関する説明変数が基準を満たさない結果となった。多重共線性を避けるために、主に説明変数の削除や説明変数の合成が取られるが、説明変数の合成を行うと解釈性の悪化に繋がるため、今回は2つの説明変数の削除を行った。その結果、VIF値は基準を満たすことが確認できた(**図3**)。図中のv1からv5は設計パラメータ、v6は性能要件(温度)、v7からv9は位置情報を示す説明変数である。

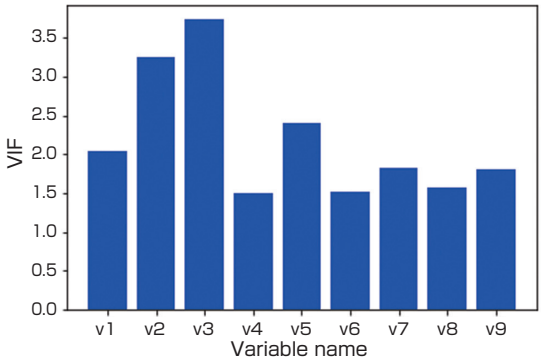


図3　各説明変数のVIF値

5.2　ランダムフォレスト

ランダムフォレストとは、説明変数に対して階層的に条件分岐を繰り返して予測を行う決定木を拡張したモデルである。通常、決定木はデータに対して過剰適合しやすく、汎化性能が低い傾向がある。過剰適合とは、与えたデータに対して適合し過ぎてしまい、新しいデータに対する予測精度が低下することである。これに対してランダムフォレストは複数の決定木を構築して平均を取るため、過剰適合を低減することができ、高い予測精度が期待できる。またランダムフォレストは個々の説明変数に対して独立に処理を行うため、データの前処理が不要であり、多重共線性に対しても頑強である。

6.　検証方法

モデルの検証に用いる値として、決定係数R^2と平均絶対誤差(以下MAE)の2つを設定した。R^2は、予測値が解析結果と同じ傾向を示すかを評価する数値であり、0.80以上を目標精度とした。MAEは予測誤差を表しており、15 μmを以内を目標精度とした。この数値は、隙間量の閾値を基に許容できる誤差を算出して設定した。

R^2とMAEの算出は、収集したデータを学習用データと検証用データに分割した上で、検証用データを用いて行う。しかし分割方法によって数値がばらつく可能性があるため、複数回データ分割と数値の算出を行い、その平均値を取るクロスバリデーションという手法を用いた。

6.1　モデルチューニング

ランダムフォレストにおいて、決定木の数をチューニングする必要がある。一般に決定木の数は多いほど過剰適合が低減できる。しかし、決定木の数を増加することで得られる精度の向上はサチュレーションする。サチュレーションする本数を見極めるために、

決定木の数が1～50本のモデルをそれぞれ用意した。これらに対してクロスバリデーションを用いて、R^2とMAEを算出した。その結果を**図4**に示す。決定木の数が50本では十分にサチュレーションした。学習時間は用意したモデル全てで十分に小さいため、決定木の数は50とした。

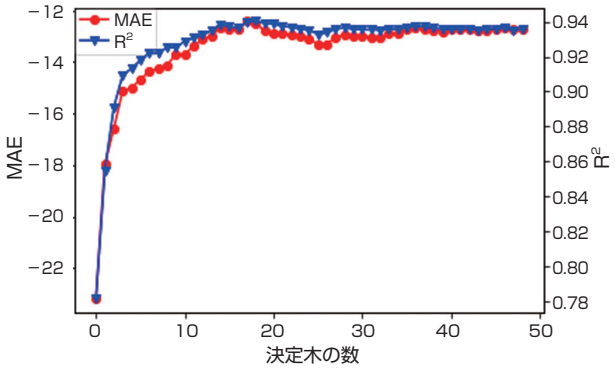


図4　決定木の数とR^2,MAEの関係

6.2　予測精度比較

重回帰とランダムフォレストそれぞれのR^2とMAEの数値を**表1**に示す。ランダムフォレストでは、目標精度を満たした。

重回帰とランダムフォレストそれぞれ説明変数の寄与度分析を実施した結果、温度と線膨張係数が最も高い寄与度を示した。これは式(1)に沿った結果であり、解析結果の傾向を捉えていることが確認できた。

これらの結果から、必要な精度を確保しており寄与度分析が実施できるランダムフォレストを選定した。

表1　検証結果一覧

	重回帰	ランダムフォレスト
R^2　[−]	0.88	0.93
MAE［μm］	17	11
目標 OK/NG	NG	OK

6.3　効率化結果

構築したサロゲートモデルは、説明変数を入力すると数秒で予測値を算出できる。そのため、設計パラメータの試行錯誤を容易に行えるモデルとなった。

従来、設計パラメータの決定までに熱変形解析を2度実施していたと想定すると、サロゲートモデルを活用することで、解析実施回数が1回で済むため、約80 Hの効率化が期待できる結果となった。

7.　おわりに

シリンダヘッド・ブロックの熱変形解析に対して、機械学習を用いたサロゲートモデルを構築することができた。その結果、設計パラメータの決定をスムーズにし、エンジン開発の効率化を行うことができた。今後は本稿のような機械学習を用いた開発の効率化を推進していくために、全社的な取り組みとしてAIを活用できる技術者の育成に注力していく。

最後に、本検討を進めるに当たり、多大なるご協力をいただいた社内関連部署の方々に深く御礼申し上げます。

参考文献

(1) Andreas C.Muller, Sarah Guido：Pythonではじめる機械学習, 2017年(オライリー・ジャパン, オーム社)
(2) 公益社団法人 日本材料学会：材料強度学
(3) 松井孝典, 宇賀田徹, 町村尚:土木学会論文集G（環境）,Vol.70, No.6（環境システム研究論文集 第42巻）, 2014年

【著　者】

田中　雅大

日米における夜間横断中の歩行者死亡事故の実態

Characteristics of Night－Time Pedestrian Fatalities Occurring while Crossing the Road in Japan and the U.S.

江　島　　晋[*1]　EJIMA Susumu
後　藤　　司[*2]　GOTO Tsukasa
山　本　健太郎[*1]　YAMAMOTO Kentaro
KEON Timothy[*3]

抄　録

日米における夜間横断中の歩行者死亡事故の実態について分析した。近年、歩行者の死亡事故が課題になっており、夜間横断中の歩行者と直進している四輪乗用車との死亡事故の割合が高いことがわかっている。特に歩行者事故における頭部外傷は致死率も高く、車両との衝突箇所を詳細に分析することは歩行者保護の観点からも重要である。本研究では、国内と米国における代表的な交通事故例詳細データベースを基に受傷状況について分析した。また、日米の地域差による受傷形態の違いについても比較することを行った。日米における歩行者事故における特徴を分析し、歩行者死亡事故を低減するための効果的な対策について報告する。

Abstract

The object of this study is to understand the actual conditions of night-time pedestrian fatalities in Japan and the United States. Recently, the most common pedestrian fatalities occurred at night while crossing the road. Particularly, head injuries have high fatality rates, and it is essential to analyze the impact areas on vehicle bodies in detail from the perspective of pedestrian protection. In this study, two databases of typical traffic accidents were analyzed to investigate the injury outcomes. Also, regional differences of injury patterns were investigated. This paper describes the characteristic of pedestrian fatalities and the effective countermeasures to improve safety.

1．まえがき

2019年の国内における交通事故死者数は3215人で減少傾向がみられるが、状態別死者数は歩行者が1176人（構成率36.6%）で最も多く[(1)]、歩行者事故を防ぐことが交通安全において依然として大きな課題である。一方、米国の交通事故死者数のうち歩行者が占める割合は、この10年間で12%から17%[(2)]に増加し、2019年の死者数は6205人になっており、米国においても同様の課題を抱えている。株式会社SUBARUでは2030年までに死亡交通事故ゼロ[(3)]を目指した取り組みを行っており、車両同士の事故はもちろんのこと、米国で増加傾向がみられる歩行者事故に対して効果的な安全対策の検討を行っている。

歩行者と車両の衝突状況については、日米[(4)(5)]で同じような傾向を示しており、発生時間帯は夜間が多く、歩行者の事故類型別では横断中であり、第一当事者である車両の行動類型の割合で高いのは直進中であった。特に、国内では交通弱者である高齢者の割合が高い[(6)(7)]ことから高齢化社会を迎える我が国にとって歩行者事故の対策が急務である。

本研究では、（財）交通事故総合分析センター（以下、ITARDA）による交通事故例詳細データベース[(8)]（以下、ITARDAミクロ）と米国ミシガン州の歩行者事故データベースである、Vulnerable Road Users Injury Prevention Alliance[(9)]（以下、VIPA In-Depth）を用いて、最新の歩行者事故の傷害発生状況について分析する。特に夜間横断中の歩行者との死亡事故に焦点を絞ることにする。得られた事故事例より衝突速度、歩行者の受傷部位、被加害部位等を分析することで日米の違いについても明らかにし、歩行者死亡事故における被害軽減対策を検討する。

＊1 車両安全開発部
＊2 環境安全戦略部
＊3 North American Subaru, Inc.

2. 分析方法

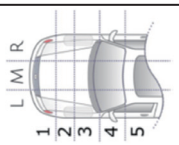
2.1 ITARDAとVIPA

ITARDAミクロは、茨城県つくば地区を中心に交通事故の詳細調査を行っており、年間150件余りの事故事例が登録されている。一方、VIPA In-Depthは米国ミシガン州アナーバー市周辺の歩行者事故の詳細調査を行っており、年間50件余り事故事例が登録されている。両者の特徴は、一件一件の事故情報が集められており、詳細な道路の状況、車両変形の状況、被害者の傷害に関する医学的な損傷度合いなどが記録されていることから、衝突時における人体の傷害メカニズム等を検討することが可能である。その反面、調査数、および調査エリアが限定されていることから、得られたデータに対しては偏りがある。本研究では、ITARDAミクロ（2017–2018）とVIPA In-Depth（2015–2019）のうち、夜間横断中の歩行者と直進中の車両との衝突に関する事故事例に絞り分析を行った。

2.2 夜間横断中の歩行者事故

表1に分析項目を示す。歩行者事故では、第一当事者となる対象車両の車体形状（軽自動車、普通・小型乗用車、SUV、etc.）により衝突時における受傷形態が異なることが予想される。また、国内と米国の状況を比較することから事故の割合として多い[5][7]普通・小型乗用車（以下、乗用車とする）に絞って分析した。夜間の横断中の歩行者事故について、衝突速度、受傷部位、加害部位、解剖学的重症度スケールであるAIS（Abbreviated Injury Scale）[10]、AISから算出されるISS（Injury Severity Score）[11]、歩行者の年齢、身長について分析した。傷害部位については、身体部位をAISコードに従い、頭部、顔部、頚部、胸部、腹部、脊椎、上肢、下肢の8つの部位に分類した。また、加害部位（Involved physical component）については、バンパー、フード、フェンダー、ピラー、ウィンドシールド、ルーフ、路面、その他の8種類に分類した。なお、間接傷害は「その他」の項目に含める。ここでは、傷害部位と加害部位の関係から傷害発生の要因について明らかにする。また、VIPA In-Depthでは車両との衝突ゾーン（Impact zone of vehicle）が登録されおり[12]、ゾーンを15-箇所（＝3（Left、Middle、Right）×5（Zone））に分割し、接触した身体部位（頭部、胸部、骨盤、下半身）が記載されている。ITARDAミクロに関しては車両との身体部位の衝突位置に関する情報が記載されていることからVIPA In-Depthの定義に準拠することにした。本分析ではITARDAミクロとVIPA In-Depthを基に事故事例を抽出することにより、歩行者死亡事故の特徴を分析する。

表1　分析項目

Parameters	Levels	
Impact speed (km/h)	Speed at which it is believed that the VRU was struck during the crash.	
AIS Code	Head, Face, Neck, Thorax, Abdomen, Spin, Upp. Extremities, Low. Extremities	
AIS severity	AIS 6 - Maximal AIS 5 - Critical AIS 4 - Severe AIS 3 - Serious AIS 2 - Moderate AIS 1 – Minor	
Person Injured (ISS: Injury Severity Score)	Killed (ISS 75) Severely injured (ISS 26+) Seriously injured (ISS 10-25) Slightly injured (ISS 2-9) Not injured (ISS 0-1)	
Involved physical component	Bumper, Hood, Fender, A-Pillar, Windshield (involved top windshield) , Roof, Ground, Others	
Impact zone on vehicle		Head Thorax Pelvis Lower body

3. 分析結果

3.1 夜間横断中の歩行者事故の傷害部位

国内および米国の歩行者死亡事故の特徴は、夜間横断中の歩行者と乗用車が絡んだ事例が多いことがわかっている。そこで、夜間横断中の歩行者の事例を抽出し、AISコードを用いて身体各部位（8部位）における傷害発生状況について分析した。なお、死亡している事例はISSの値に関係なく自動的に“Killed”に分類することにした。歩行者が夜間横断中に乗用車と衝突した事例はITARDAミクロでは16件あり、VIPA In-Depthでは31件であった。重症度をISSの値を用いて分類した結果を**表2**に示す。また、歩行者の年齢については13歳以上[13]を対象とした。ITARDAミクロは全体的にSeriously injured以上の割合が多く、重傷以上の事例を中心に調査されていることがわかる。

表2　夜間横断中の歩行者事故における重症度

Person injured	ITARDA (n = 16)	VIPA (n = 31)
Killed (ISS = 75)	12	5
Severely injured (26 ≦ ISS < 75)	1	4
Seriously injured (10 ≦ ISS ≦ 25)	3	6
Slightly injured (2 ≦ ISS ≦ 9)	0	13
No injured (ISS ≦ 1)	0	3

乗用車による夜間横断中の歩行者の身体各部位における傷害発生状況を中等症以上（AIS 2＋）に絞って分析した結果を**図1**（ITARDA ミクロ）と**図2**（VIPA In-Depth）に示す。両者で共通しているのは頭部、胸部、および下肢の傷害発生頻度が高いことがわかる。また、VIPA In-Depth は AIS 2の傷害発生頻度が頭部、脊椎、上肢、下肢にみられる。件数としては多くないが、ITARDA ミクロでは頚部傷害がみられ、VIPA In-Depth にはみられない特徴であることがわかる。

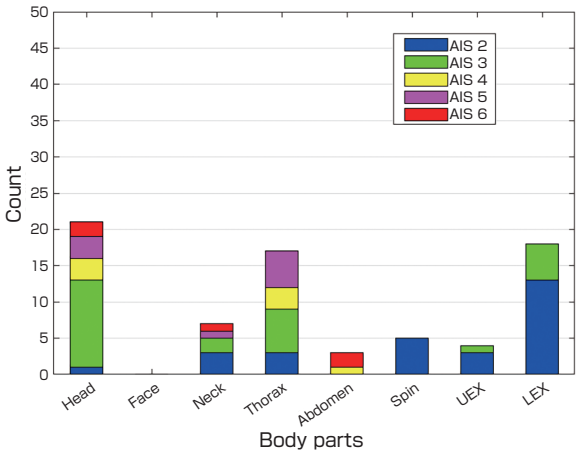


図１　ITARDA ミクロによる夜間横断中の歩行者の身体各部位における傷害発生状況（AIS 2＋）

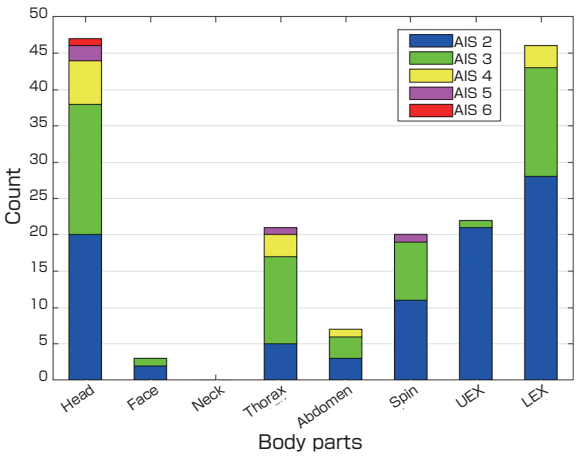


図２　VIPA In-Depth による夜間横断中の歩行者の身体各部位における傷害発生状況（AIS 2＋）

3.2　夜間横断中の歩行者事故の被加害部位

ITARDA ミクロと VIPA In-Depth について AIS 2＋の傷害部位と加害部位の関係について分析した。なお、傷害発生頻度は、被加害部位の組み合わせによる傷害件数を歩行者の人数で除することにより正規化を行った。**図3**（ITARDA ミクロ）と**図4**（VIPA In-Depth）に結果を示す。両者に共通しているのは、頭部とウィンドシールド、胸部とフード、下肢とバンパーとフードの組み合わせが多いことがわかる。また、フードが加害部位となって腹部、脊椎などを受傷していることがわかる。一方、フードが加害部位となって頭部を受傷する割合はITARDA ミクロに多いことがわかる。また、ITARDA ミクロにおいて特徴的な傷害部位として頚部が挙げられたが、加害部位として「その他」に分類されており、全て間接傷害であった。また、VIPA In-Depth は加害部位として路面が多く、頭部を受傷している事例が比較的に多いことがわかる。

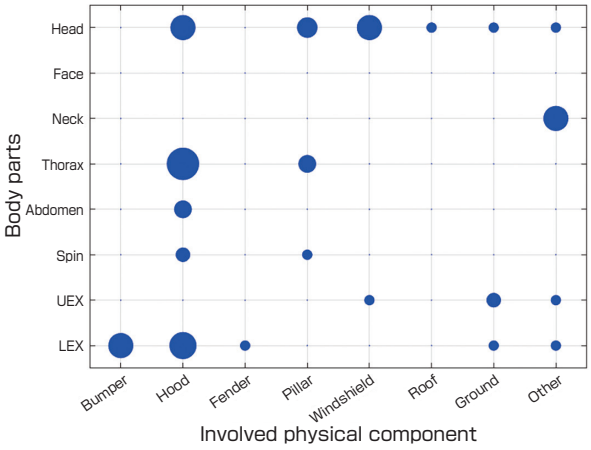


図３　ITARDA ミクロによる AIS 2＋の傷害部位と加害部位の関係

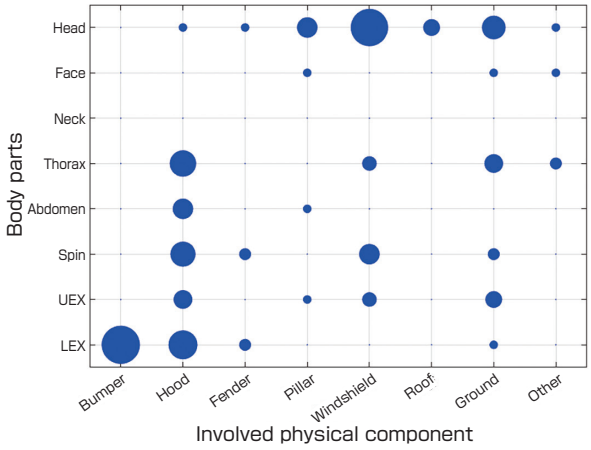


図４　VIPA In-Depth による AIS 2＋の傷害部位と加害部位の関係

3.3　死亡、または重篤な事故事例

ITARDA ミクロと VIPA In-Depth において顕著にみられた頭部、胸部、下肢の傷害について ISS 26＋に絞り、歩行者死亡事故の特徴を分析する。**表3**と**表4**に ITARDA ミクロ（13件）と VIPA In-Depth（9件）の衝突速度、年齢、身長を示す。なお、それぞれの平均値と標準偏差値を併せて示す。

ITARDA ミクロと VIPA In-Depth では、平均の衝突速度は 53.8 km/h と 60.7 km/h であり、VIPA In-Depth の方が高い衝撃を歩行者が受けている。また、

年齢はITARDAミクロの方が15歳程高い。身長に関しては、VIPA In-Depthの方が10 cm程度高い結果となった。国内では65歳以上の高齢歩行者の死者数の割合が高くなっており[6]、ITARDAミクロも比較的に高齢者が多い結果となった。一方、全米のデータによれば、夜間歩行中の死者数の割合は若年層の方が高い[14]という報告もあり、VIPA In-Depthではその傾向が顕著に表れていないことがわかる。

表３　ITARDAミクロによるISS 26 ＋の事故事例

ID	Person Injured	Impact Speed (km/h)	Age (yrs)	Height (cm)
1	killed	60	37	158
2	killed	65	83	153
3	killed	85	59	165
4	killed	40	85	148
5	killed	70	60	174
6	killed	50	57	160
7	killed	50	75	160
8	killed	35	57	168
9	killed	55	62	160
10	killed	40	49	160
11	killed	50	81	150
12	killed	50	86	155
13	severely injured	50	50	165
	Average	53.8	64.7	159.7
	SD	13.6	15.8	7.3

表４　VIPA In-Depthによる ISS 26 ＋の事故事例

ID	Person Injured	Impact Speed (km/h)	Age (yrs)	Height (cm)
1	killed	50	60	173
2	killed	60	16	180
3	killed	72	57	158
4	killed	72	51	180
5	killed	68	43	152
6	severely injured	64	41	173
7	severely injured	80	66	195
8	severely injured	24	65	150
9	severely injured	56	52	170
	Average	60.7	50.1	170.1
	SD	16.5	15.5	14.6

次に、身体各部位（頭部、胸部、骨盤、下半身）の接触位置から車両に対する歩行者の衝突状況を**表１**に示した衝突ゾーン（Impact zone on vehicle）を用いて示す。**図５**（ITARDAミクロ）と**図６**（VIPA In-Depth）は車両の損壊箇所と接触した身体部位の数を示している。接触回数が3回を超えた箇所を赤字で示している。なお、必ずしも接触位置と傷害度合い（AISスコア）とは一致していない。

ITARDAミクロでは、主に、車両の中央部では下半身と骨盤が車両前面（ゾーン1）に接触し、骨盤と胸部がゾーン２～３に接触した後、頭部がウィンドシールド（ゾーン4）に衝突している。頭部の接触位置については、ゾーン４との接触頻度が最も高いことがわかる。比較的に高い速度（**表３** ID = 5：70 km/h、174 cm）で衝突した事例では、頭部の接触位置は運転席側のルーフの近く（Right-5）まで達している。一方、VIPA In-Depthでは、主に、車両の中央部と右前部で下半身と骨盤が車両前面（ゾーン1）に接触し、骨盤と胸部が中央のゾーン２～３に接触した後、頭部がウィンドシールドの中央部（Middle-4）に衝突している。頭部の接触位置は、この位置での接触頻度が最も高いことがわかる。高い速度（**表４** ID = 7：80 km/h、195 cm）で衝突した事例では、頭部は助手席側のルーフ近く（Right-5）まで達している。

国内と米国では、走行車線が異なるが、ITARDAミクロでは中央部から左前部、VIPA In-Depthでは中央部から右前部で接触した後、ドライバはブレーキ制動をかけることなく歩行者と衝突した事例である。両者ともに頭部との接触位置は、ゾーン３～５の領域であることがわかった。

	1	2	3	4	5
Right		Pelvis：1		Head：3 Thorax：1	Head：1
Middle	Thorax：1 Pelvis：3 Lower Body：3	Thorax：2 Pelvis：2	Head：1 Thorax：1	Head：3	
Left	Thorax：1 Pelvis：1 Lower Body：2	Thorax：1	Head：1 Thorax：1	Head：3 Thorax：1	

Zone

図５　ITARDAミクロによる衝突ゾーンと身体各部位の接触位置との関係

	1	2	3	4	5
Right	Lower Body：6		Thorax：1 Pelvis：1	Head：1 Thorax：1	Head：1
Middle	Pelvis：4 Lower Body：9	Thorax：2 Pelvis：2	Head：1 Thorax：3 Pelvis：1	Head：4	
Left	Pelvis：1 Lower Body：1	Thorax：1			

Zone

図６　VIPA In-Depthによる衝突ゾーンと身体各部位の接触位置との関係

3.4　事例を用いた事故再現シミュレーション

ITARDAミクロ、およびVIPA In-Depthにおいてフードが加害部位となる事例が多いことから、夜間横断中の歩行者死亡事例（**表３** ID = 2）として事故再現シミュレーションを実施することにより受傷形態を求める。解析には車両モデルと歩行者モデル（THUMS-AF05： Version4.0_20111003）を使用し、歩行者の体格については事故事例の歩行者に合わせるため腰回りの軟部組織[15]をスケーリングした。**図７**に速度65 km/hで衝突した際の歩行者の衝突挙動を示す。

事故再現シミュレーションより、歩行者の大腿部がバンパー付近に衝突し、腰部がフードエッジを変形させた後、腰を中心に上体が回転している。その後、フードサーフェスの折れ曲がった付近に胸部が衝突し、肩を支点として頭部の慣性力により頚部に引張りが作用している。この事例は頚髄損傷(AIS = 5) を受傷しており、事故再現シミュレーションの結果は現象をよく捉えていると考える。また、フードの変形後の形状も一致していることを確認した。

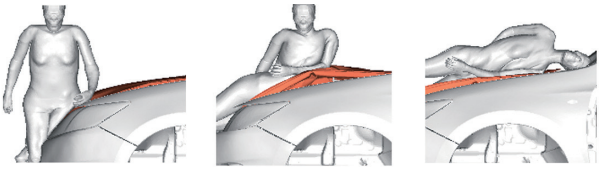


図７　ITARDA ミクロを用いた事故再現シミュレーション
(表３ ID = 2)

4. 考察

日米の歩行者事故データをもとに傷害状況、被加害部位について整理し、ISS 26 + の事故事例を抽出することにより歩行者死亡事故の特徴を分析した。

両者ともに共通していることは、比較的に郊外の中核となる学園都市周辺で収集された歩行者事故データである。国内と米国では走行車線が異なるが、同じような道路環境で発生した事故事例である。また、VIPA In-Depth については軽傷以下も含まれているが、Seriously injured 以上のデータであればITARDA ミクロと比較することは可能であると考える。

図1-2においてAIS 2 + の傷害部位として頭部、胸部、下肢を受傷する傾向を示しており、頭部の傷害発生頻度は最も高いことがわかる。ITARDA ミクロでは頚部傷害が発生している要因としては、**図7**の事故再現シミュレーションの結果からもわかる通り、肩とフードと衝突した後、頚部に引張力が作用して頚部傷害が発生している。ITARDA ミクロの事例は比較的に年齢が高い(**表3**：平均64.7歳) ことも要因として挙げられ、加齢の影響が考えられる。引き続き事例分析と積み重ねて頚部傷害について着目していく必要がある。

図3-4においてフードが加害部位となって胸部を受傷する事例がみられた。一般的にフードは歩行者への外傷を最小限に抑えるために様々な工夫[16]を施しているが、高齢者等の交通弱者が胸部を衝突した際の衝撃により傷害が発生したものと考えられる。 また、**図7**の事故再現シミュレーションではフードエッジを骨盤と接触後、フードサーフェスと胸部との間に腕を挟み込む挙動を示している。胸部とフードサーフェスとの接触時において腕の位置関係も重要であり、胸部傷害に影響を及ぼす因子として考えられる。

図5-6の死亡、またはそれに準ずる重症度を受傷した事例に絞ったところ、両者(**表3-4**) とも歩行者は平均速度60 km/h 前後で車両前面に下半身が接触し、フードの中央部に骨盤と胸部、ピラーおよびウィンドシールドに頭部が接触していることがわかった。 頭部の外傷は致死率が高く、歩行者事故の中でも傷害発生頻度が高い部位である。また、頭部への加害部位としてウィンドシールドが挙げられているが、主にウィンドシールド周辺部の比較的に硬い箇所であった。これらの車両部品は前突時のキャビン強度の確保やウィンドシールドの保持などの目的から、構造上強度を下げることが難しい部品である。そのため、頭部との衝突により傷害の発生要因となっていることが考えられる。頭部の歩行者保護性能の改善には、車体に必要な強度や剛性を確保しつつ、歩行者頭部を保護できるエアバッグ[17]が有効であると考える。また、近年、普及が進む対歩行者自動ブレーキ[18]で衝突を回避、または衝突エネルギーを出来るだけ低減させることで、頭部、胸部、および下肢への被害軽減に繋がると考える。

5. まとめ

本研究では、ITARDA ミクロおよびVIPA In-Depth を用いて国内、および米国で発生した歩行者事故の状況、ならびに傷害の発生状況について分析した。歩行者事故の特徴としては、頭部、胸部、下肢を受傷する割合が多く、特に致死率の高い頭部外傷における共通の加害部位としてはピラーとウィンドシールドであることがわかった。また、フードが加害部位となって胸部を受傷する事例もみられた。頚部傷害は国内でしかみられない特徴であり、その要因について引き続き検討する必要がある。

なお、本研究において取り扱ったITARDA ミクロ、およびVIPA In-Depth は限定された地域のデータである。引き続き事故データを収集するともに、日米の歩行者に関する交通事故マクロデータと比較しながら進める必要がある。

謝　辞

本研究を遂行するにあたり、ITARDA およびVIPA メンバーの協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

(1) 警察庁交通局：令和2年における交通事故の発生状況等について, https：//www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/jiko/R02bunseki.pdf (2021-2-18)

(2) NHTSA：USDOT Pedestrian Safety Action Plan、https：//highways.dot.gov/sites/fhwa。dot.gov/files/202011/FHWA_PedSafety_ActionPlan_Nov2020.pdf

(3) 安全なクルマ作り：https：//www.subaru.co.jp/csr/production.html

(4) 後藤司他：国内ミクロデータを用いた横断中歩行者の受傷形態に関する分析, 自動車技術会学術講演会予稿集(2021), 20215338

(5) 江島晋他：VIPAを用いたミシガン州(米国)における歩行者事故実態の把握, 自動車技術会学術講演会予稿集(2021), 20215357

(6) (財) 交通事故総合分析センター：イタルダ・インフォメーション, 夜間高齢歩行者の死亡事故, No.87 (2011)

(7) (財) 交通事故総合分析センター：イタルダ・インフォメーション, 自動車と歩行者の事故, No.83 (2010)

(8) 交通事故総合分析センター：https：//www.itarda.or.jp/

(9) Wang, S. et al.：Vulnerable Road User Injury Prevention Alliance (VIPA)：Early Data and Insights, JSAE Annual Congress Proceedings (2019), 20195095.

(10) Association for the Advancement of Automotive Medicine：Abbreviated Injury Scale (AIS)：https：//www.aaam.org/abbreviated-injury scale-ais

(11) Baker S. et al：The injury severity score：a method for describing patients with multiple injuries and evaluating emergency care、The Journal of Trauma. (1974)

(12) Wang, S. et al.：Head Injuries from the Vulnerable Road User Injury Prevention Alliance (VIPA)：Effect of Vehicle Type on Head Contact Location、Proceedings of IRCOBI Conference (2020).

(13) Monfort S. et al. : Pedestrian injuries from cars and SUVs：Updated crash outcomes from the vulnerable road user injury prevention alliance (VIPA), Traffic lnjury Prevention. (2020), doi：10. 1080/15389588. 2020. 1829917.

(14) Pedestrian Traffic Fatalities by State：https：//www.ghsa.org/sites/default/files/2021-03/Ped%20Spotlight%202021%20FINAL%203. 23. 21. pdf

(15) Parenteau et al.：Analysis of Morphomics Parameters by Gender and BMI Groups：Thorax shape and H-point、Proceedings of IRCOBI Conference (2013).

(16) 高橋信彦：歩行者保護を中心とした開発技術状況、安全シンポジウム, 12月, (2011)

(17) 橋本善之他：歩行者保護エアバッグの開発, 自動車技術会学術講演会予稿集, 2017年5月, 20175260.

(18) 熊谷光：運転支援システムによる交通事故低減効果の分析, 自動車技術会学術講演会予稿集, 2016年5月, 20165314

【著　者】

江島　　晋

後藤　　司

山本 健太郎

KEON Timothy

CAEとディープラーニングの活用による計算コスト低減

Computational Cost Reduction by Utilizing CAE and Deep Learning

山　本　健太郎[*1]　YAMAMOTO Kentaro
和　田　義　孝[*2]　WADA Yoshitaka
尾　形　　海[*3]　OGATA Kai

抄　録

自動車の開発において、開発初期段階で網羅的な試行が求められる中、従来のCAEの代替としてディープラーニングによる性能予測を行う事が、有効な検討手法の一つとして期待を寄せられている。ところが、CAEを用いた訓練データ生成に時間を要するといった問題もあり、現時点で実用的な適用事例は乏しい。

本研究ではその改善に取り組んだ。従来用いているCAEモデルを計算コストの低い別のCAEモデルで代替し結果の差異を機械学習で補完することで、従来は約1.5ヶ月かかっていたデータ生成時間を約3日に短縮できた。本稿ではその詳細について述べる。

Abstract

In the development of automobiles, while comprehensive trials are required at the initial stage of development, predicting performance by machine learning as an alternative to conventional CAE has been expected to be one of the effective methods in recent years. However, there is still a problem that it takes an enormous amount of time to generate training data using CAE, and there are only few practical application cases at this point.

In this study, we worked on these problems. By substituting the conventional CAE model with another CAE model having low calculation cost and complementing the difference in results with machine learning, the data generation time, which used to take about 1.5 months, has been reduced to about 3 days. This paper describes further details.

1. まえがき

製造業において、より良い商品をタイムリーに産み出す事が社会貢献・企業成長の両面で重要である。そのため開発部門では、詳細設計や試作確認段階での手戻りや品質低下を防止するため、開発の上流段階で数多くの性能を成立させるための素案を描くことが求められる。

開発の初期段階では多くの試行が必要となるため、近年では従来のCAEに加え、1DCAEや機械学習といったより「スピード」を重視した検討手法が用いられる傾向にある。ディープラーニングによる予測モデルをCAEの代替として用いる方法もその一つであり、期待が寄せられている一方で、工学問題への適用事例が乏しい状況にもある[(1)]。本稿ではそのような分野の研究の一助とすべく、衝突解析を題材に検討した内容について報告する。

＊1 車両安全開発部
＊2 近畿大学理工学部機械工学科
＊3 近畿大学大学院

2. 機械学習の活用における時間的な問題

通常のCAEよりも高速に結果を予測する目的で機械学習を用いる場合、設計パラメータとCAE解析結果の関係を機械学習によって関連付ける手法が用いられる。この際、学習用のデータはCAE解析で大量に生成する事になるが、1ケースあたりの計算時間が比較的長い場合には、データ生成に膨大な時間を要するため、設計パラメータの数や選び方、制約条件などが変更になった場合に学習のやり直しが困難になるという問題がある。これに対し改善策を検討した内容を説明する。

3.　歩行者脚部保護での改善事例

3.1　検討対象とするCAEモデル

本検討の題材として、歩行者衝突時の傷害評価に用いているCAE事例を選定した。秘匿すべき内容を含むため評価条件やモデルの詳細は割愛するが、車両と歩行者が衝突した際の歩行者脚部の傷害リスクを評価するものであり、図1に示すように歩行者の脚部を模擬した脚部ダミーを静止した車両に衝突させる内容である。今回はダミー重量を25 kg、衝突速度は時速40 kmの条件とした。尚、CAE解析は汎用構造解析ソフトLS-DYNAによる陽解法を用いて行った。

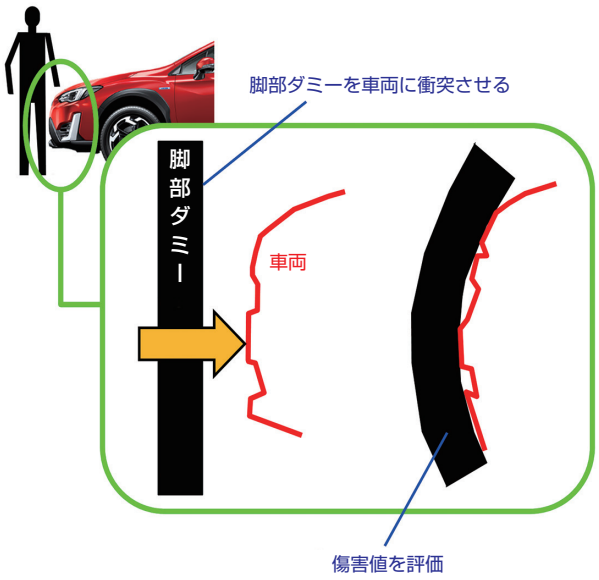


図1　歩行者脚部保護CAE

3.2　CAEモデルの概要

車両FEは数値入力によって自動でモデルを生成できるよう、バンパーやグリル、ボンネットは二次元要素を用いつつも簡易的な形状表現とし、内部の変形部材には非線形な荷重－変位特性を定義できる一次元要素を用いている。一方、脚部ダミーは車両に対し弾性体の要素数や接触定義箇所が多いため、このCAEの計算時間は90%以上が脚部ダミーの変形・接触の計算に費やされている。1ケースあたりの計算時間は実用時の実行環境で約60分であった。

3.3　設計パラメータとCAEの出力値

脚部ダミーの曲げ変形は車両前部の造形と、バンパー内部に配置された抗力部材の特性により概ね定まることがわかっており、通常これらを設計パラメータとしている。本検討では、図2に示すように、造形を表現する代表点の座標と、変形部材の位置及び荷重-変位特性を表現する数値など、全13個の数値を設計パラメータとした(13個の詳細は割愛する)。CAE解析の出力値は、脚部ダミーの複数の位置で計測された傷害リスク指標値(以下、傷害値)であり、衝突開始から規定の時刻までの時刻暦で出力される。通常は複数の位置での傷害値を評価しているが、今回はその内の一つのみ(傷害値Aと呼称する)を予測対象とし、出力時間内の最大値を扱った。

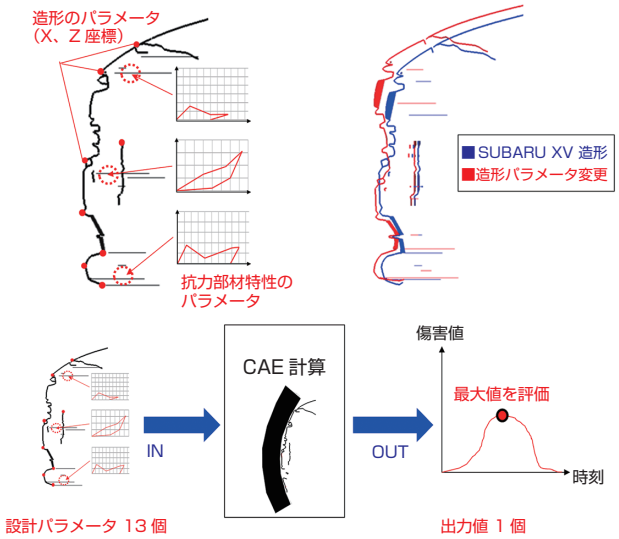


図2　設計パラメータとCAEの出力

3.4　検討内容の概要

2章で述べた問題とその改善に向けた検討の概要を、図3を用いて説明をする。図3最上段の“CAE①”は前述のCAEである。このCAE①の代替モデルとして

図3中段に示すように設計パラメータから傷害値Aを予測するニューラルネットワークモデル“NN①”を構築する場合に、CAE①を用いた訓練データ生成に時間がかかることが問題である。改善策として、図3最下段に示すようにCAE①よりも計算コストの低い“CAE②”を構築し、求めたい傷害値Aとは異なる“物理量B”を出力させ、物理量Bから傷害値Aを予測できるニューラルネットワークモデル“NN②”を構築する案を検討した。このCAE②とNN②によって傷害値Aを求めるための1ケースあたりの計算時間を短縮することができれば、NN①構築用の訓練データも短時間で生成できることになる。

ここで、図4に示すように、NN②は設計パラメータのデータ形式やパラメータの選び方に依らず。常に一定の形式のデータをCAE②から受け取るため、一度構築したNN②は、設計パラメータのデータ形式などが変更されても、物理量Bと傷害値Aの間に未知の相関が生じない限り再構築は不要である。従って、複数の車型での造形・構造の変化を先々まで見据え、対応できるようNN②を構築しておけば、ある車種の開

発時だけでなく、次期車以降も継続して使用し続ける事ができる。また、対応できないような大きな変化が生じた場合でも、新たな情報を注ぎ足して再度NN②を構築する事で、NN②の予測力を進化させ続けることができる。

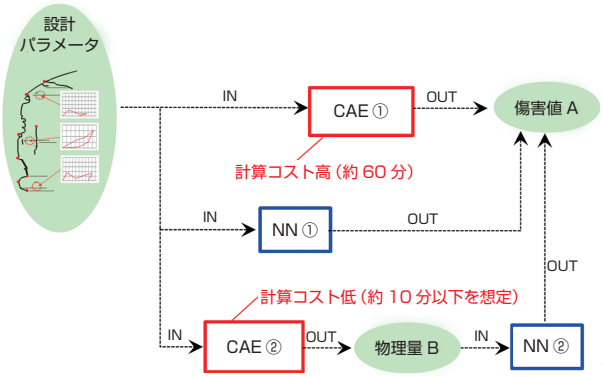


図３　検討内容　概要

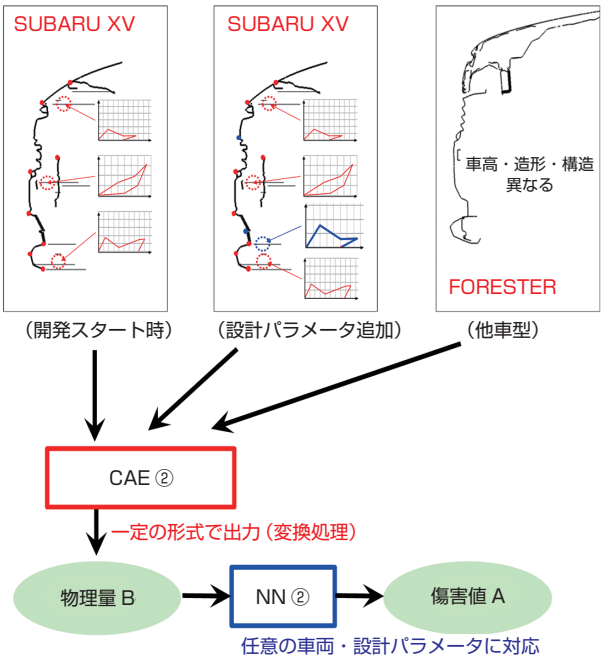


図４　NN ②の汎用性

3.5　従来手法でのNN①の構築

検討内容の詳細を説明する。まず、従来手法としてCAE①のみを用いた場合の所要時間を算出した（図5）。CAE①を用いて設計パラメータと傷害値Aのデータセットを生成し、これを訓練用データとして、十分な予測精度が得られるまで訓練データを増やしながら繰り返し学習を行った。予測精度の検証には訓練用とは別の2000ケースのデータを用い、十分な予測精度の指標は「2000ケースの推論を行った時に全体の90%以上（1800ケース）が予測誤差±5%以下となること」とした。学習には500ノード×中間層5層のネットワークをもつMLP（Multilayer perceptron）を用いた。結果、精度指標に到達するまでに要した訓練用データ数は7500ケース（内750は交差検証に使用）であり、データ生成の所要時間は約1.5ヶ月を要した。これは開発の時間軸上で頻繁に実行できる時間ではない。

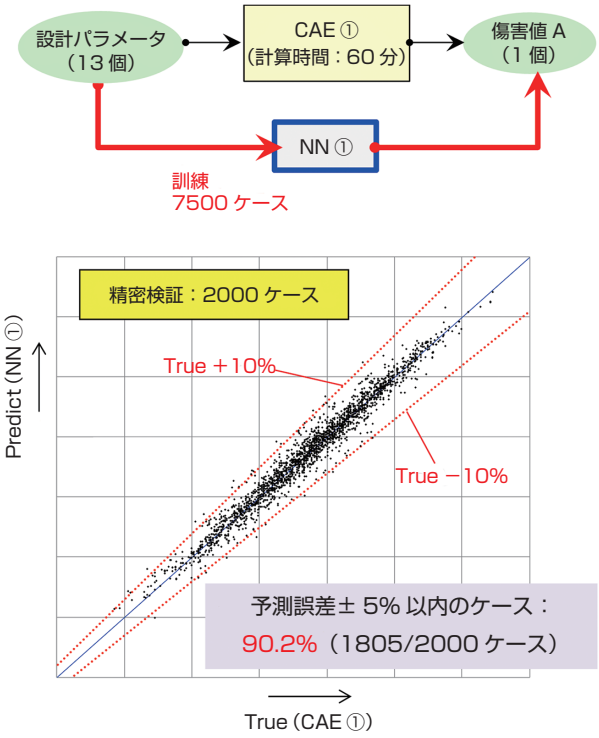


図５　CAE ①を用いた NN ①の構築

3.6　CAE②の構築

次に改善案のCAE②について説明する。CAE②に求めるのはCAE①よりも短時間で計算できることだけでなく、NN②が傷害値Aとの相関を学習できるような物理量Bを出力できることである。これは、傷害値Aを目的変数、物理量Bをその説明変数と見たときに、物理量Bは設計パラメータと同程度に傷害値Aを説明できる情報量を持つことを意味する。設計パラメータは前述の通り車両の造形と内部部材の抗力という情報であるがこれは元々、CAE①での脚部ダミーの曲げ変形の発生要因である「車両前部からの抗力の分布」を、強い関係性のある物理量で代用特性化したものである（図6）。そこで物理量Bは車両前部の抗力分布を表現できれば良いと考え、それを計測できる現象を考えた。

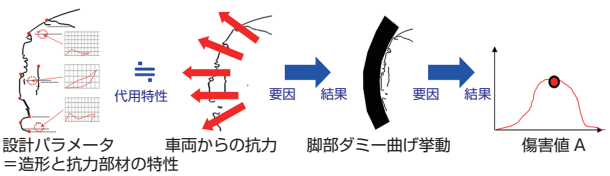


図６　傷害値 A 発生要因

まず、計測したい抗力の発生範囲はCAE①で脚部ダミーが接触している部分であるため、CAE①の脚部ダミー同様の形状の物体を車両に衝突させる形態とした。これを代替ダミーと呼称する（図7）。

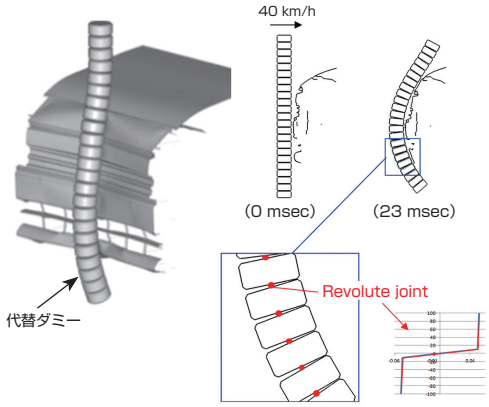


図７　代替ダミーモデル

計算時間を短縮するため代替ダミーの構成は、複数の剛体ブロックを回転ジョイントで結合したものとした。ブロック間の接触は定義せず、回転ジョイントに剛性値を設定する事で回転自由度を制限した。速度や質量配分は脚部ダミーでの設定と同様とした。CAE②の計算時間は5分となり、CAE①を用いて約1.5ヶ月を要した7500ケースのデータ生成は約3日で行う事ができた。

出力値である物理量Bは、車両の変形時の抗力を直接計測するため、当初は代替ダミーと車両の接触反力を直接用いる事を考えたが、時刻暦の波形の振動が大きく学習の妨げになる事を懸念し、各ブロックの節点情報を用いることとした。各ブロックにおける出力は重心位置における、進行方向、上下方向の変位量、及びピッチ角度の3個とした。ピッチ角は各ブロックの上下端への入力量を抽出するために用いた（図8）。ブロックの数は23個としたためこれらを69個の出力項目を持つ。さらにこれらを5ミリ秒間隔で50ミリ秒まで、計10サンプルを出力し、出力値の数は全部で690個となった。

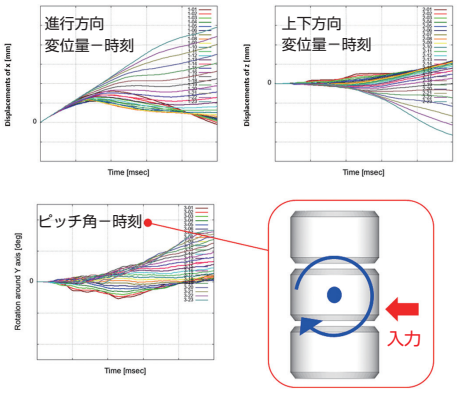


図８　物理量Ｂ

3.7　NN②の構築（物理量Bから傷害値Aを予測）

3.7.1　NN②の訓練

次に、NN②の構築について説明する。まず、図9のように設計パラメータとCAE①・CAE②の結果のデータセット7500ケースに対し、CAE②の結果（物理量B）からCAE①の結果（傷害値A）を予測できるようNN②の訓練を行った。訓練に用いたネットワークは3.5で用いたのと同様の構造である500ノード×5層のMLPである。

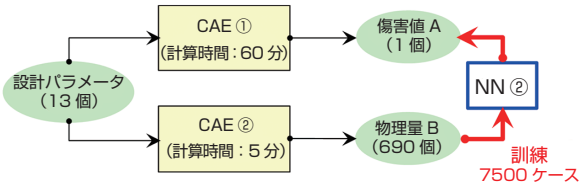


図９　NN ②の訓練

3.7.2　NN②の精度検証

訓練後のNN②の精度検証を 3.5（図5）と同じ2000ケースのデータを用いて行った。図10に示すように、

設計パラメータからCAE②及びNN②が予測した2000個の傷害値AをCAE①の結果と比較したところ、予測誤差±5%以内のケースは全体の86.2%（1723/2000ケース）となり 3.5で構築したNN①よりも予測精度が低い結果となった。

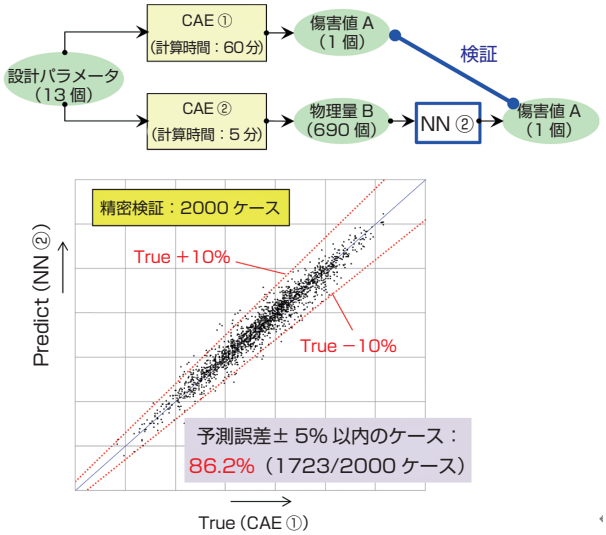


図 10　NN ②の予測精度

要因は物理量Bの情報不足と推測する。3.6で述べたように物理量Bには、車両前部の抗力分布の計測値を用いるのが理想であったが、今回使用したのは代替ダミーの各部の変位量であり、図11に示すように車両の抗力特性を間接的に表現する代用特性である。ここで情報が欠落したと考える。

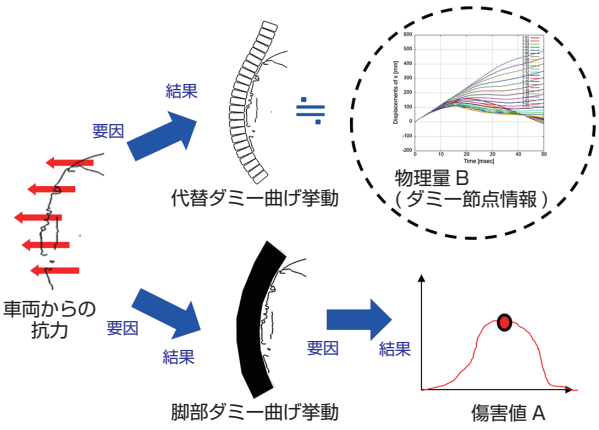


図 11　傷害値 A と物理量 B の関係

3.8　NN①の構築
（設計パラメータから傷害値 A を予測）

3.8.1　NN①の訓練

次に、CAE②・NN②を用いて訓練データを生成した場合の、NN①の構築について説明する。3.7.1 で NN②の訓練に用いたものとは別の 7500 ケースを生成し、図 12 に示すように、NN②が出力した傷害値 A と設計パラメータの相関を学習させ、NN①を構築した。ネットワーク構造は NN②訓練時と同様とした。

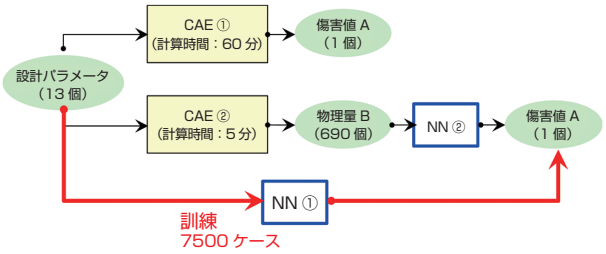


図 12　NN①の訓練（本検討案）

3.8.2　NN①の精度検証

訓練後の NN①の精度検証を 3.5（図 5）と同じ 2000 ケースのデータを用いて行った（図 14）。NN②で予測した傷害値 A を正として訓練しているため、NN②からさらに予測誤差が拡大すると思われたが、図 14 上側のグラフに示すように、予測誤差± 5% 以内のケースは全体の 85.1%（1702/2000 ケース）となり、3.7.2（図 10）での NN②の結果（86.2%）とほぼ同等であった。

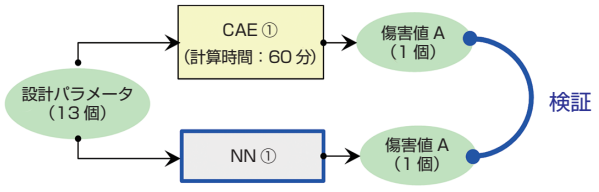


図 13　NN①の予測精度検証

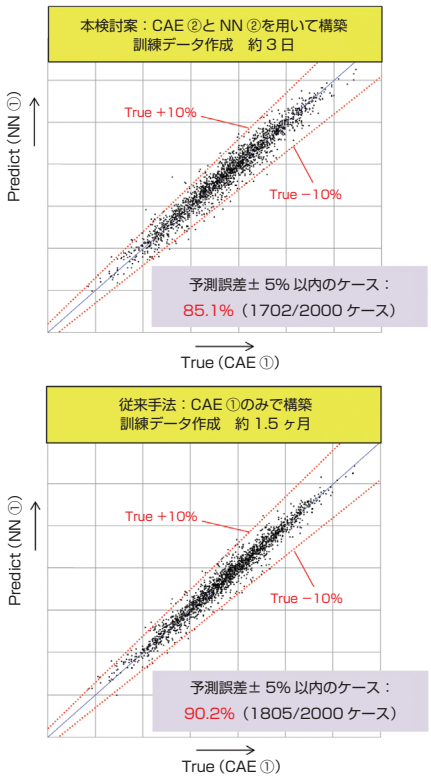


図 14　NN①の予測精度（従来手法との比較）

3.9　結果と考察

CAE①を、CAE②と NN②に置き換える事で 1 ケースあたりの計算時間を 60 分から 5 分に短縮でき、NN①の構築では従来手法と同量の訓練データ生成に要する時間を約 1.5 ヶ月から約 3 日に短縮できた。一方で予測精度は若干低下したものの、NN②に対してはほぼ同等の精度であり、NN②の精度低下が主要因と考えられる。これは物理量 B の情報不足のためと推察されるため、今後は車両の抗力特性をより直接的に計測できる方法を検討し、物理量 B の情報量補填及び NN②の精度向上を狙う。

4.　まとめ

CAE を用いた学習用のデータ生成に時間がかかるという問題に対し、計算コストの低いモデルで代替し、結果の差異を機械学習で補完することで改善を得た。今回は歩行者衝突時の傷害評価を題材としたが、本検討での考え方・知見は様々な評価に適用できると考えており、今後は他分野への応用も検討する。

参考文献

(1) 和田義孝：深層学習によるサロゲートモデル構築，プラスチック成形加工学会誌，Vol.32, No.3, p83-86 (2020)

【著　者】

山本 健太郎

和田　義孝

尾形　　海

SUBARU 2022年に発売する新型EVの名称を「SOLTERRA（ソルテラ）」に決定

～自然との共生を目指すSUBARU初となるグローバルEV ～

2021年5月11日

・SUBARUがトヨタ自動車株式会社（以下、トヨタ）と共同開発を進めるSUVモデルのEV
・トヨタと共同開発したEV専用プラットフォーム e-SUBARU GLOBAL PLATFORMを採用
・日本、米国・カナダ、欧州、中国等で、2022年年央までに発売予定

SUBARUは、2022年の発売に向けて開発を進めるEVの名称を「SOLTERRA（ソルテラ）」に決定しました。
「SOLTERRA（ソルテラ）」という名称は、ラテン語で「太陽」を意味する「SOL（ソル）」と、「大地」を意味する「TERRA（テラ）」を組み合わせた造語です。

SOLTERRA

空力テクスチャーを用いた操安性・乗心地性能の開発

Applying Aerodynamics Texture to Driving Stability and Ride Comfort Improvement

畑　　秀樹[*1]　雲野裕紀[*2]　青柳宏紀[*3]
HATA Hideki　KUMONO Yuuki　AOYANAGI Hiroki

抄　録

現在SUBARUでは「機能と意匠を両立するテクスチャーの開発」を、デザイン、設計、実験の各部門が共同で取り組んでおり、空気の整流効果を促す「空力テクスチャー（鮫肌パターン）」と、空気の剥離抑制効果を促す「空力テクスチャー（ヘキサゴンパターン）」、2つの空力テクスチャーを開発した。本稿では、これらの空力テクスチャーの狙いや効果検証結果に加え、新型BRZでの開発の取り組みについて述べる。

Abstract

Recently, Design, Exterior Design, and R&D departments have been jointly working on “texture development for function and design in a compatible way”. Two types of aerodynamics texture, the shark-skin type which affects the flow of air, and the hexagon type which inhibits the detached flow, have been developed.

We describe the target of the aerodynamics textures, the effect verification results, and the new BRZ development processes in this report.

1. まえがき

他銘含め車両の外装の未塗装樹脂部品にはテクスチャー（シボ）が入っている。テクスチャーを入れる目的は、鉄に比べ柔らかい樹脂の傷防止という機能面の他に、質感向上や生産の安定化にも寄与する。

次世代のテクスチャーでは、SUBARUらしい付加価値を目指し、「柄で空気を制御」する事が出来ないかと考えた。新型レヴォーグ以降の開発においては、車両に働く圧力や流れを制御するため、エンジンアンダーカバーにビード形状やエアアウトレットを設け、操縦安定性（以下操安性）と乗心地性能の向上による安心と愉しさの実現に取り組んでいる。外装樹脂部品に入るテクスチャーで空気流れを制御する事が出来れば、空力による操安性と乗心地性能をさらに向上させるがことが出来ると考えた。

2. 空力テクスチャー開発の狙い

初代BRZや先代SUBARU XVから、意匠性の追求を目的とし、外装のテクスチャーに車両コンセプトに合った専用柄を開発し積極的にテクスチャーを採用している。

次世代テクスチャーの開発をするにあたり、柄の新しさの他に「機能を謳える柄」を目標に掲げ、デザイン部内で2018年4月から検討を開始した。機能を謳う案は複数出たが、案の中に「空力制御機能」もあげた。数十μmの柄で空気流れを制御する事が出来れば、C_D値の向上の他に操安性向上など様々な車種にも展開できるテクスチャーになると考えた。また、空力テクスチャーの実現ができれば、航空機スピリットも感じるSUBARU独自のテクスチャーになると考え、次世代テクスチャーの機能に「空力」を選択した。

空力となるとデザイン部だけでは開発が出来ない専門領域のため、初期段階から空力実験部門と情報共有しながら開発を進め、航空宇宙部門とも連携を取り、全社的な取り組みを行った。

＊1 車両運動開発部
＊2 デザイン部
＊3 内外装設計部

2.1　乱流を活用し、空気の剥離を抑える

空気抵抗の1つは、表面から空気が剥離する事で大きな渦が発生する事が要因となっている(図1)。

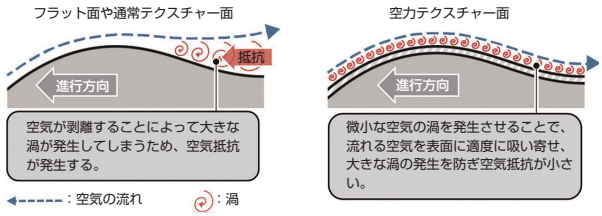


図1　空気抵抗の1つ、空気が剥離後の空気渦

表面の凹凸内で小さな渦を発生させ乱流を起こす事で流れの剥離を抑制し、空気流れを制御するテクスチャーが作れないかと考え小さな渦の乱流を活用した空力テクスチャー柄を開発した。

2.2　2つの方向性で空力テクスチャー柄を開発

1つ目の方向性は、自然界からヒントを得て開発した。水面でスムーズに水流を流す鮫の肌に着想。鮫の肌は電子顕微鏡で見ると細かい突起と溝がついており、鮫が泳ぐ時には、その溝の中で小さな渦が発生する。この小さな渦が鮫の表面で水流が乱れる事を防ぎ、溝の角度により水をスムーズに流す事で泳ぐ抵抗を抑えるといわれている。その効果を応用した競技用スイミングスーツなども生まれており、「流体の中で動く」という側面で捉えれば、空気という流体の中で走るクルマの表面にも同じ原理が応用できると想定した。鮫の肌の柄を分析し、自動車用として使用できるように柄をシンプルにしたが、小さな渦を生み出し、空気を綺麗に流すという機能は実現しないといけない。そのため、溝の本数や長さ・比率など分析し、鮫の肌と同じように小さな渦が発生しつつ空気を溝に沿って流す、空気の整流効果を促す自動車用テクスチャーを作製した(図2)。

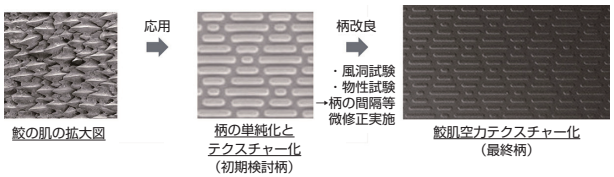


図2　空力テクスチャー（鮫肌パターン）の柄開発

2つ目の方向性は、ゴルフボールの凹みの整流効果に着想を得た。鮫の肌同様に表面の凹み形状で大きな空気渦の発生を防ぎ、空気の整流効果を生み出す事でボールは飛距離が増すという。ゴルフボールの飛ぶ速度域と自動車の速度域が近いという点も参考になると考え、様々なゴルフボールの柄や凹みを研究し原理を分析した。自動車の柄として使用できるよう、柄の意匠や凹みの角度サイズなど複数の案を検討し、自動車用テクスチャーとして使える流れの剥離抑制効果を促す、ヘキサゴン柄の空力テクスチャーを作製した(図3)。

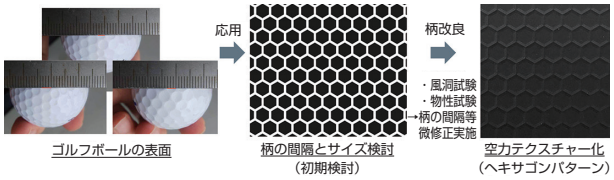


図3　空力テクスチャー（ヘキサゴンパターン）の開発

2つの考えで具現化した空力テクスチャーの試作柄は空力実験部門と共に2018年12月に1回目の風洞試験を実施した(図4)。1回目の風洞試験ではリアスポイラーに試作した空力テクスチャーを再現し効果を検証した。柄のサイズ違いや深度違い等、複数の空力テクスチャーも準備し、すべての試作柄の試験を実施し検証した。

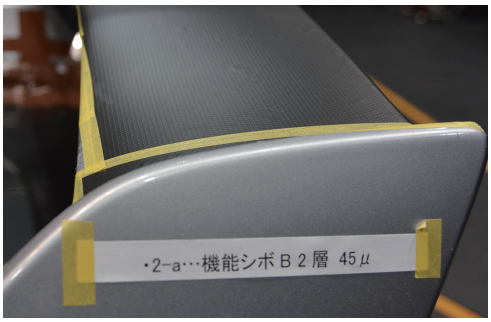


図4　空力テクスチャー風洞試験（初期検証）

2種類の各柄にて共にC_D値低減効果を得ることが出来た。検証結果から2方向の中で効果の高かった柄やサイズの絞り込みを行った。風洞試験の検証結果で柄を見極める事が出来、次は詳細な効果検証ステージに入った。

3.　実機による効果検証

今回開発した2種類の空力テクスチャーの空力効果検証を台上要素試験と台上実車試験ならびに実走試験にて行った。

3.1　ヘキサゴンパターンの効果検証

3.1.1　台上試験結果

台上評価は図5に示す卓上の簡易風洞試験機を用いて空力テクスチャー(ヘキサゴンパターン)の剥離抑制効果を確認した。試験品は図6に示す半円型の試験片で剥離点の推移の様子を比較した。試験条件は表1に示す。

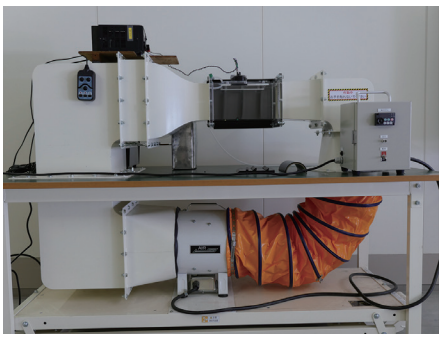
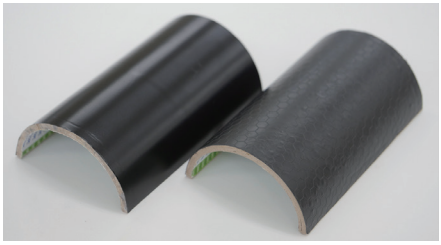


図５　卓上風洞試験機

空力テクスチャー無↓



↑空力テクスチャー有

図６　試験片（φ85 mm 半円柱）

表１　試験条件

風速	20 m/s
試験片サイズ	φ 85 mm
試験片形状	半円柱
テクスチャーパターン	ヘキサゴン
テクスチャー深さ	100 μm

図7に空力テクスチャー（ヘキサゴンパターン）有無での半円柱における剥離点の推移の様子を示す。本結果から、ヘキサゴン空力テクスチャーを施工すると空力剥離点が後方に移動したことが見て取れる。これは空力テクスチャーにより物体表面の摩擦係数が増大したことで、乱流境界層への推移を促し、剥離を抑制したものと考える。一般的に剥離抑制効果は、燃費に関わるC_D値の改善に効果的であるが、運動性能における空気外乱に対する安定性や乗心地性能においても効果があると考えた。3.1.2にて空力テクスチャー（ヘキサゴンパターン）の実走での効果検証結果を述べる。

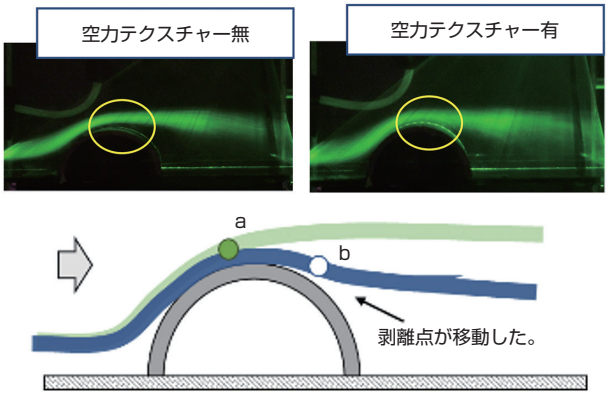


図７　観察結果

3.1.2　実走試験

新型WRXに採用した空力テクスチャー（ヘキサゴンパターン）の操安性・乗心地性能への効果を説明する。新型WRXのデザイン目標はVIZIV PERFORMANCE CONCEPTに定めた。そして、このデザインの実現を目指し、フロントバンパからリアバンパに掛けて広範囲で空力テクスチャーを採用した。開発としては、AWD駆動方式を採用する新型WRXの安定性をさらに高める技術として、空力による安定性向上に着目し、それを外装樹脂面で実現することで、意匠性だけでなく機能を付加することを狙った。図8に空力テクスチャー施工範囲（黒色部）、表2に操安性・乗心地性能の評価結果を示す。

図８　空力テクスチャー施工範囲

表２　評価結果

	仕様	操安性	乗心地
1	空力テクスチャー無	基準	基準
2	空力テクスチャー有	直進時の舵の座りと安定性が良化	ばね上の減衰感良化

現在SUBARUは北米市場に向けた製品開発を行う上で「ロングドライブでの直進安定性の向上」に取り組んでいる。車両走行時は横風等の自然風に加え、走行車両周辺には形状起因で剥離した流れと渦により圧力変動が発生しており、これにより車両挙動が乱される。この外乱に対して新型WRXは採用したヘキサゴン空力テクスチャーにより、車両周辺で発生する空気の剥離を抑えることで、直進時の空気外乱に対する車両安定性が向上した。

3.2　鮫肌パターンの効果検証

3.2.1　実車風洞試験

実車風洞試験にてC_D値の低減効果のある空力テクスチャー（鮫肌パターン）の施工位置を検討した。風洞試験結果から新型BRZでは、図9に示すフロントバンパーダクト側面部に空力テクスチャー（鮫肌パターン）を織り込むことで、C_D値の低減効果を得た。

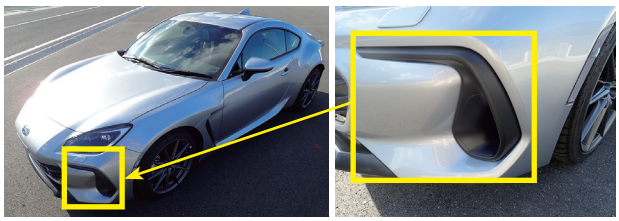


図９　空力テクスチャー設定位置

3.2.2　実走試験

次に3.2.1で説明したフロントバンパーダクト側面部に施工した空力テクスチャー（鮫肌パターン）の操安性・乗心地性能の実走官能評価結果を説明する。空力テクスチャー（鮫肌パターン）は、当初整流効果を狙って開発したが、操安性の観点では、車両周辺の流れを整流した場合は、車両の安定性は向上するが、操舵時のYaw応答のような操縦性は低下することがある。そのため、方向性を有する空力テクスチャー（鮫肌パターン）においては、車両水平方向に対する角度を変更することで、安定性と操縦性を両立できると考えた。一般的にレーシングカーで採用されているフロントバンパに設定されるカナードは20 ～ 40 deg.で設定されている。一方新型BRZはフロントエアアウトレットによるタイヤハウス内の圧力低減効果を考慮すると空力テクスチャー（鮫肌パターン）は20 deg.程度が適値と考え仮説検証を行った。

評価仕様と結果を**表３**に示す。車両水平方向に対する角度を深くするとフロントタイヤの接地感が増え、ステアリングを切った際の手応えが増えることと、フロントばね上の収まりが良化することが分かる。

カナードは、カナードの端部で乱流を発生させ、タイヤハウス内の圧力を制御する狙いで設定される。今回評価した空力テクスチャー（鮫肌パターン）は凸部の高さは45 μmと低いが、空気の流れに対して角度をつけることで、微細な渦を発生させ、カナード効果が得られた。一方で角度を0 deg.とすると、新型BRZが目指すハンドリング性能が得られなかった。これは、角度0 deg.だと実走時でピッチング挙動が発生した際に、流れの方向が定まらないことが要因であると考えた。新型BRZでは、サスペンション・ステアリング・タイヤ・空力操安アイテムの全体バランスを考慮し、**図10**に示す車両水平方向角度を20 deg.の設定とし、新型BRZで狙った軽快なハンドリング性能を実現できることを確認した。4章にて具体的な車両への織り込みについて述べる。

表３　評価結果

仕様	車両水平方向に対する角度	操安性	乗心地
1	テクスチャー無し	基準	基準
2	0 deg.	ステアリング操舵時の手応え若干低下	変化無し
3	20 deg.	ステアリング操舵時のYaw応答良化	フロントばね上の減衰感良化
4	40 deg.	フロントの接地感増えるが前後バランスが崩れる	フロントばね上の減衰感良化

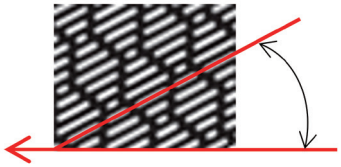


図 10　空力テクスチャー角度

4.　車両への織り込み

たった数十μmの形状（高さ）である空力テクスチャーが空力効果を有することに開発担当者としても驚いたが、一方で効果を発揮するには適切な配置が必要ということでもある。短期間で空力以外の性能や検証手法などを明らかにし、開発を成し遂げるには、組織内のコミュニケーションを密に取り、開発部署の横串を通すことが必要である。本開発では、小さな発見や考え方、懸念点を共有することに重点を置き、組織が一丸となってプロジェクトを推進した。

4.1　新型BRZの開発

新型BRZは、今までのSUBARU車に比べ、徹底的に空力性能の追求するため、他車種にはない「新型BRZ空気流れ検討会」（以下、検討会）を発足し、様々な空力特性を改善するアイテムを採用し開発を進めてきた（**図11**）。この検討会の発足の目的は、空気流れは多岐の性能に影響するため、従来の単一性能目線ではなく、車両性能としての最適化を図ることであり、検討会を通じて組織横断での議論、知見共有による検討の早期方向付けを目指した。

この新型BRZの開発と並行して、当時SUBARU内では2章で説明した空力テクスチャーの先行開発を進めており、空力特性の改善効果が確認されたため、開発の終盤であったが、さらなる空力特性の向上を狙い、空力テクスチャー（鮫肌パターン）の新型BRZへの適用を検討した。

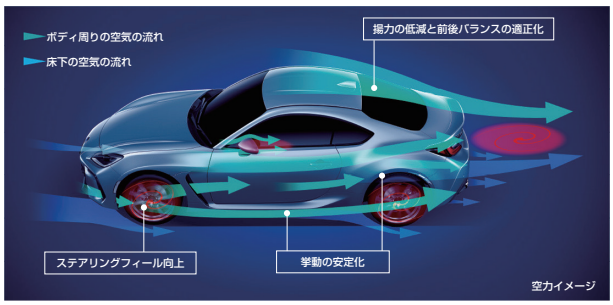


図 11　新型 BRZ 空力イメージ

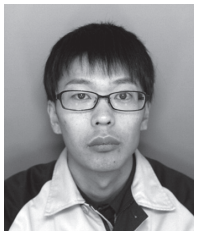
4.2　開発日程短縮のための施策

日程短縮に大きく貢献したのが、空力テクスチャーの再現手法である。数十 μm の高さであるテクスチャーを再現するには、試作用の成形型を製作するのが一般的であるが、型製作には数か月の時間を要するため、日程上採用できなかった。また議論の中で提案された対策の一つに、加工が容易な材料を用いた短期間で製作できる成形型を採用する案もあったが、微細な加工ができないため、空力テクスチャーを再現することができなかった。様々な対策案の中で、日程短縮を実現した提案がテクスチャーシートの使用である。テクスチャーシートとは、外観確認の目的でテクスチャーをシート状にしたものであり、柔軟で部品への貼り付けが可能である。製作日程は、型製作の1/10程度であり、空力テクスチャーの短期間での検証を可能とし、開発日程の短縮に大きく貢献した。このアイディアは部署を跨いだ検討会の中で導き出されたものであった。その他にも、ラピッドプロトタイピングを用いたフロントバンパ製作なども日程短縮に大きく貢献し、通常の1/5の日程で空力テクスチャー開発を完遂することができた。

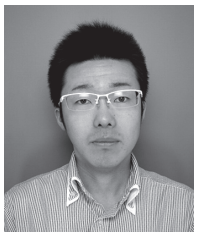
5.　まとめ

SUBARUが新たに開発した空気流れを制御できる空力テクスチャーの効果を台上要素試験と実車風洞試験ならびに実走試験にて効果検証を行った。開発した空力テクスチャーを用いることで、意匠性のみならず操安性・乗心地性能を向上させることがわかった。今後も継続的に開発を進め、SUBARUの目指す安心と愉しさの更なる向上に繋げていく。

【著　者】


畑　　秀樹

雲野　裕紀


青柳　宏紀

SUBARU AWD車の累計生産台数 2,000万台を達成

2021年7月8日

SUBARUは、2021年6月末にAWD（All-Wheel Drive:全輪駆動）車の累計生産台数2,000万台（シンメトリカルAWD以外のAWDを含む）を達成しました。1972年9月に発売した国産初の乗用タイプ全輪駆動車「スバル レオーネ 4WD エステートバン」に搭載以来、49年目での達成となります。

新型レヴォーグにおける新デザインコンセプト BOLDER 再現の取り組み

New Design Concept for the New LEVORG Efforts to Realize BOLDER

堀　本　智　之*
HORIMOTO Tomoyuki
山　田　龍　也*
YAMADA Tatsuya
酒　井　　等*
SAKAI Hitoshi
左　　正　己*
HIDARI Masami
李　　若　水*
RI Yakusu

抄　録

SUBARUブランドを磨く6つの取り組みの1つにデザインがある。新型レヴォーグ開発において新しいSUBARUデザインコンセプトBOLDERを具現化するため、プレス工程においては2つの取り組みをおこなってきた。本稿では、その取り組みについて紹介する。

Abstract

Design is one of the six efforts to improve SUBARU brand. In order to embody the new SUBARU design concept BOLDER in the development of the new LEVORG, we have undertaken two initiatives in the press process.　In this article, we will introduce our efforts.

1.　まえがき

BOLDERデザインを具現化する新型レヴォーグ開発にあたり、プレス工程における課題が2つある。

1つ目は、広範囲にわたりシャープ且つ微妙なキャラクターが設定されおり、それを正確に再現する必要がある。加工データによっては、その再現が出来ない場合があるが、それを金型切削前に評価することができなかったため、過去開発ではやり直しが発生していた。

2つ目は、フェンダーのアルミ化により、板厚とアルミ成形の性質上、コーナー部のR形状が大きくなってしまう。そのため、通常の軟鋼板部品に比べて分割部の穴あき感が発生し、見栄えが悪くなってしまう。

今回、今までの限界を超えたデザインに挑戦するために、上記2つの課題に対して取り組んだプレス技術的アプローチ及び内容について解説する。

2.　具体的な取り組み

2.1　Aピラー キャラクター見栄え再現

2.1.1　経緯

新型レヴォーグのデザインは、既存SUBARU車では初めてAピラーからルーフ部にかけて、キャラクターがあり、金型にも忠実に再現する必要があった(図1)。

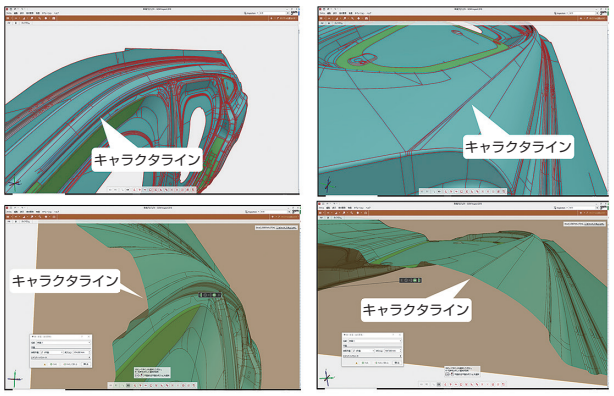


図1　キャラクターライン

2.1.2　実施内容

金型を加工する工作機械を稼働するNCデータ※は、CAMソフトの計算ロジックや加工方向により構成点位置が異なって作成される。また、同じNCデータを使用しても、工作機械コントローラ制御ロジックにより加工面の仕上りが変化することは分かっていた(図2)。

※数値制御データ

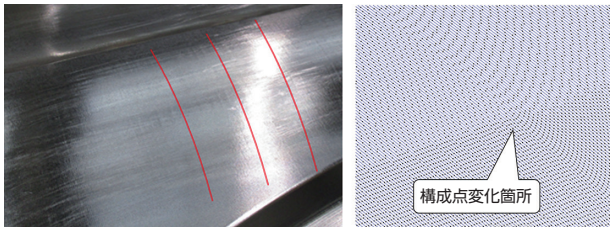
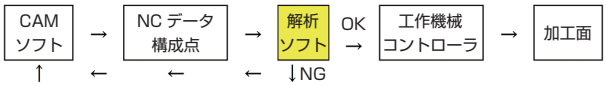


図2　仕上がり状況

＊ プレス生産技術部

これまでは、実物の工作機械で加工しないと、加工面がどのように変化するか確証はなかった。この関係性を把握するために、機械メーカが開発した解析ソフトを使用し、構成点の解析を実施した。作業の流れを表１に示す

表１　作業の流れ



この解析ソフトは、構成点の曲率を視覚的に表現する機能が搭載されている。NCデータ構成点の解析を機械加工前に実施し、最適なNCデータを選択することで、機械加工後の加工面の品質を向上させた。

2.1.3　実施結果

CAMソフトと加工方向の検証を3パターン実施し、その結果を表２に示す

①CAMソフト＝A社：加工方向＝長手(図３)

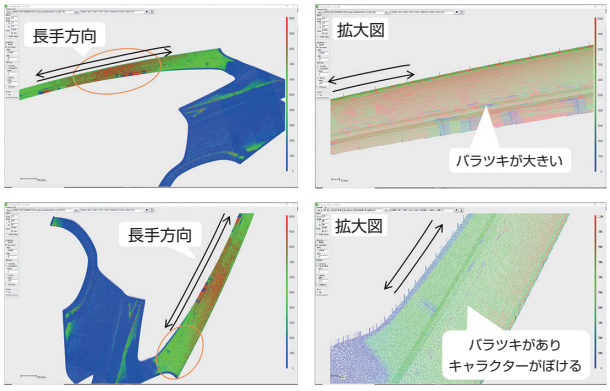


図３　A社：長手方向

構成点のバラツキが大きく、キャラクターがぼけてしまい、全体的に明瞭でない。

②CAMソフト＝B社：加工方向＝長手(図４)

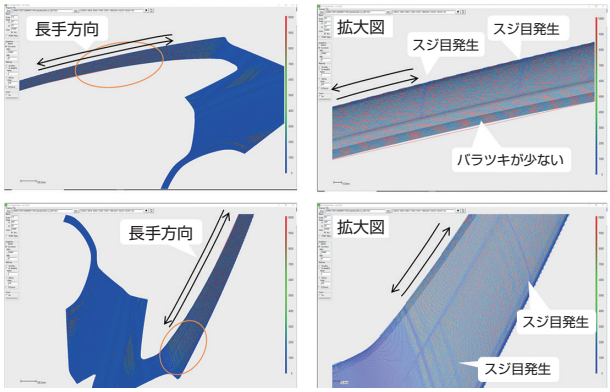


図４　B社：長手方向

構成点のバラツキが少なく明瞭だが、スジ目が発生した。スジ目があると加工面が荒れ、パネルに影響する。

③CAMソフト＝B社：加工方向＝短手(図５)

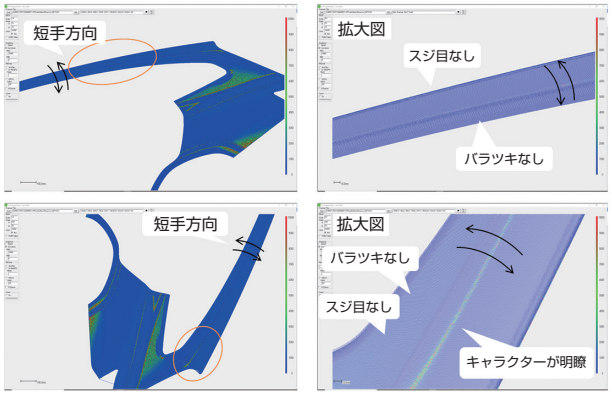


図５　B社：短手方向

構成点のバラツキがなく、キャラクターも明瞭。

この結果B社のCAMソフトで短手方向加工を採用した。

表２　比較表

CAM ソフト	加工方向	バラツキ	スジ目	評価
A 社	長手	多い	なし	△
B 社	長手	少ない	あり	△
B 社	短手	なし	なし	○

2.1.4　まとめ

今までは機械加工後の加工面で評価をしていたが、各CAMメーカのNCデータを事前に検証することで、最もデザインの再現が可能なNCデータを選択し、加工することができた。しかし、検証ソフトの結果を、官能的に判断しているため、判断する人による差があるので、定量的な評価方法を構築しなければならない。さらに、新型レヴォーグ開発で採用した加工方向は短手方向のため、機械の動きに加減速が多く発生している。加減速が多いと機械加工時間が長くなるので、今後はキャラクター再現、機械加工時間短縮の両立を図っていく。

2.2　アルミフェンダー 先端Rの見栄え向上

2.2.1　経緯

昨今の社会的背景から自動車の燃費性能向上は自動車開発において取り組むべき重要なテーマの一つであり、車体においては低燃費化実現のため、鉄をアルミに置換することで部品個々の重量を減らす取り組みが進められている。旧型レヴォーグではフードに既にアルミが採用されており、新型ではフードに加えてフェンダーにもアルミが採用され、台あたり約2.2 kgの軽量化を実現している。しかし、アルミは鉄に対して成形性が劣るため、先の尖った形状や深い断面形状を成形することができず、単純にアルミ化すると完成車の見栄えを著しく低下させる問題が発生する。ここでは、

新型レヴォーグのフェンダー先端の製品形状を最適化し、見栄えを向上させた事例について紹介する。

2.2.2　実施内容とその結果

新型レヴォーグにおいて課題となったのは図6に示すフェンダー先端の見栄えである。A部の空間が大きいと中見えも発生して見栄えが悪くなるため、この空間は小さいほど良い。見栄え改善のためにまず取り組んだのは先端の挟み角の拡大で、図7に示すとおり同じ先端Rでも挟み角の違いでA部の空間の大きさは変化する。フードの成形性やマリッジ性、ヘッドランプの輪郭デザインなどについて関係部署と検討を重ね、周辺の成立性に配慮しながら挟み角を24.5度から33.6度まで拡大することができた。

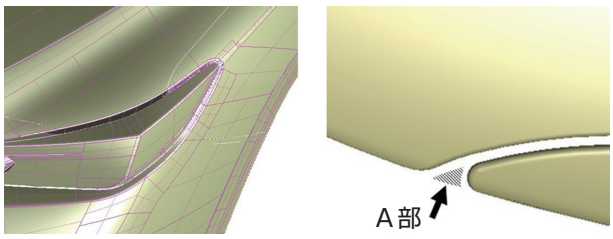


図6　見栄え懸念部位

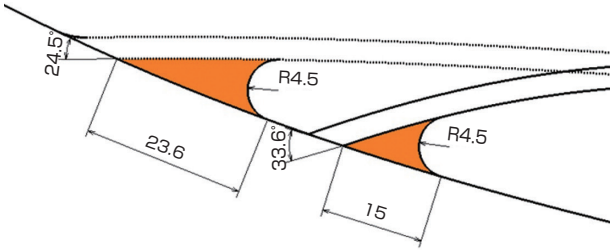


図7　先端挟み角の影響

次に先端形状の最適化による空間の最小化について検討した。本部位は絞り加工で意匠面を成形後、せん断加工、曲げ加工を経て最終形状となるが、曲げ加工では成形途中で先端に材料余りが集中し、その変形抵抗の増大によりわれが発生してしまう（図8）。そこで、われの発生を抑えつつ、先端Rを小さくする検討を実施した。

図8　縮みフランジによる先端われ

曲げ加工時の先端の成形性を決める因子は、先端の①平面R、②曲げR、③フランジ長さの大きく3つであるが、②は、先行技術開発の結果からアルミの最小曲げRは板厚と同じということがわかっており、また③も中見えしない最小長さが車体構造から求められるため、②③を固定値として①の最小Rを解析にて求めた（図9）。検討の結果、先端の最小RはR4.5となり、外観評価会議で見栄えを確認して一度は検討を終えた。しかし、他銘ベンチマーキングなどからさらなる見栄えの向上が必要と判断し、先端Rの最小化を再検討することにした。

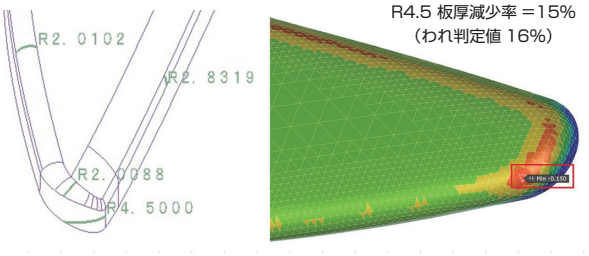


図9　先端R4.5の時の製品Rと解析結果

再検討では③を中見え品質上不変とし、①を見栄え品質からR3とした。①R4.5 →R3に小さくすることで成形性は確実に悪化するが、その分②を拡大することで成形性を補えれば良い。そこでCADによる造形検討を進めた結果、断面方向でR6程度の曲率を付けることが可能であるとわかり、この形状の成形性を解析により評価した。その結果、板厚減少率15.5%でワレ判定基準の16%をクリアすることができ、先端Rのさらなる小型化、見栄えの向上に成功した（図10）。

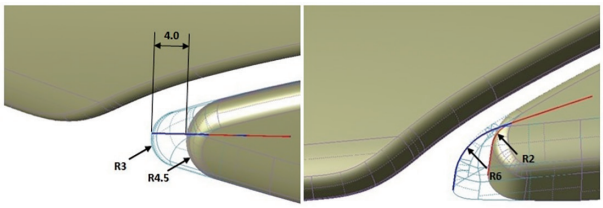


図10　先端R縮小による見栄え改善効果と断面形状

3.　今後の開発車に向けて

今回、BOLDER再現に取り組むことにより、新工法や既存技術の底上げが出来たことは大きな成果である。今後の新型車デザインはさらなる小R化など、デザイン性や要求品質が高くなることが予測され、先行技術開発による生技の試験研究が重要になっていく。今後も量産性を見据えながら、早い段階からデザイン部門と調整を行い、新デザインにチャレンジを続けたいと考える。

【著　者】

堀本　智之

山田　龍也

酒井　　等

左　　正己

李　　若水

SUBARUの2021年モデルがIIHS安全性評価で９つの賞を獲得

～2013年からの累計TSP＋獲得数は単一ブランドとして最多の57に～

2021年3月11日

SUBARUが米国で販売している2021年モデルが、米国IIHS（道路安全保険協会）によって行われた2021年安全性評価において、５つの「トップセイフティピックプラス（TSP＋）」と４つの「トップセイフティピック（TSP）」の、計９つの賞を獲得しました。

2021 年モデル　アセント（米国仕様）

2021 トップセイフティピックプラスロゴ

新型レヴォーグ アイサイトカメラ 品質確保の取組み

Actions for Quality Assurance of the Eyesight Camera Installed to New LEVORG

北　島　　匠*　　佐　藤　進　吾*
KITAJIMA Takumi　　SATO Shingo

抄　録

新型レヴォーグより搭載されるアイサイトカメラが一新された。当社製造本部としては、安心・安全・低価格で魅力ある製品を安定してお届けする事が求められている。本稿では、アイサイトカメラの進化に対して、高品質・低コストで製品をお届けするために行ってきた取組みについて概説する。

Abstract

The all new EyeSight camera has been installed to the new LEVORG. As the manufacturing division, we are required to stably deliver reliable and safe attractive cars at low price to our customers. We will report the actions that we made to manufacture our new model with high quality at low cost along with the performance evolution of the new EyeSight camera.

1.　まえがき

新型レヴォーグに搭載されたアイサイトXの機能を実現する新世代アイサイトカメラは、近年実用化が進む運転支援システムの進化を遂げると共に、当社が目指す2030年までに死亡交通事故ゼロ達成に向けた基幹装備となるものである。その中で当社製造部門の役割は、一人でも多くのお客様に、本製品を安定した品質・低コストでお届けする事である。

組立工場は塗装されたボディに部品を組付け、車両を完成させる工場であり、部品の組付作業は主に人によって行われている。組立工場において高品質・低コストな車造りを実現するためには、確実に品質保証できる工程造りや、より合理的な部品組付構造の確立が重要である。

本稿では、さらなる性能進化を達成した新世代アイサイトカメラを、当社製造部門としてより安定した品質を確保しつつ、低コストでお客様にお届けするために取り組んできた構造変化・工程変化の概略について述べる。

＊ トリム生産技術部

2.　アイサイトカメラの性能進化

本章では、新型レヴォーグより搭載された新世代アイサイトカメラの性能進化について概説する。

2.1　新世代アイサイトカメラの性能進化

運転支援システムの代表例となっているアダプティブクルーズコントロール機能や衝突回避機能を進化させるために、アイサイトカメラはより遠く・より広い視野で車両や構造物を捉える事が求められる。そのため、新世代アイサイトカメラはVer.3アイサイトカメラに対して約2倍の視野角拡大を達成している。視野角が拡大する事により、車両としてより広角から周囲の情報が捉えられるようになった。 代表例としては、走行時の隣車線の検知を実現する事で、アクティブレーンチェンジアシスト機能の実現に寄与している。

2.2　新世代アイサイトカメラ周辺構造の進化

当社のアイサイトカメラはカメラ単体で遠方の物体検知を行っている都合上、両レンズ間の距離を大きく取っている。そのため、アイサイトカメラは部品サイズが大きくなり、乗員の視認性との両立は常に課題となる。新世代アイサイトカメラは、カメラの視野を周辺部品に干渉させずに乗員との視認性を確保するために、フロントガラスに直接組付ける構造を採用した。

加えて、カメラのレンズ部分を周辺部品で覆う事で、指紋付着等を避けるレンズ保護機能とフロントガラスへの映り込み防止機能の両面を果たしている。

3. 新世代アイサイトカメラ 組付構造

本章では、新世代アイサイトカメラの組付構造の進化について概説する。

3.1 Ver.3アイサイトカメラの組付構造

本項では、従来車に設定されているVer.3アイサイトカメラの組付構造について概説する。

従来のVer.3アイサイトカメラを図1に示す。

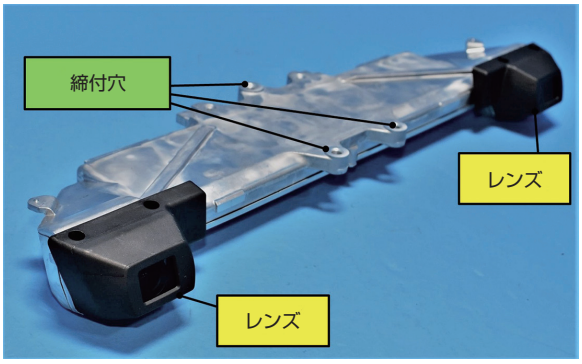


図1 Ver.3 アイサイトカメラ

Ver.3アイサイトカメラは、初代アイサイトカメラから継続してボディのフロントレールに組付ける構造を採用してきた。本来必要な視野角が確保するために、Ver.3アイサイトカメラはアジャスタという部品を介して、車種ごとに狙った位置にVer.3アイサイトカメラを配置できるように工夫している。

アジャスタ及びVer.3アイサイトカメラの組付方法を図2、3に示す。アジャスタ、Ver.3アイサイトカメラ共にボルト及びナットを用いた締付による組付構造を採用している。

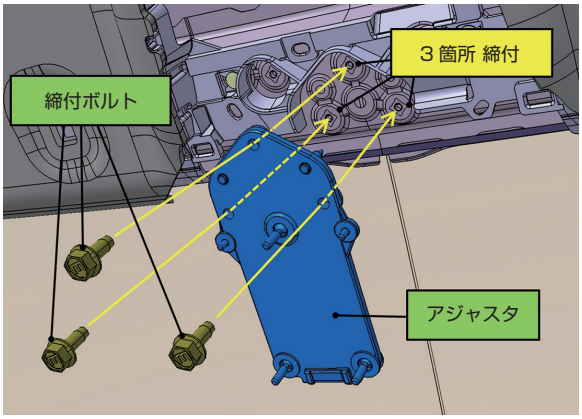


図2 アジャスタ 組付方法

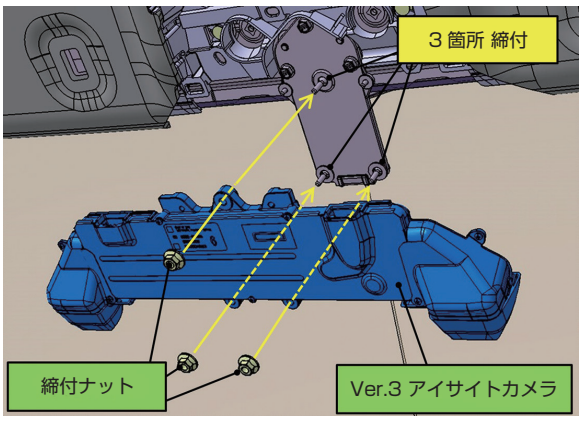


図3 Ver.3 アイサイトカメラ 組付方法

3.2 新世代アイサイトカメラの組付構造の進化

新世代アイサイトカメラを図4に示す。

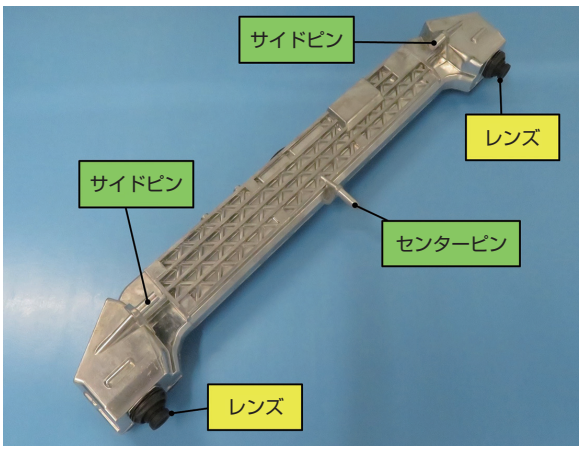


図4 新世代アイサイトカメラ

図1と比較すると分かるように、Ver.3アイサイトカメラに設定されていた締付穴は廃止され、代わりにセンターピンとサイドピンが設定されている。新世代アイサイトカメラの組付方法を図5に示す。

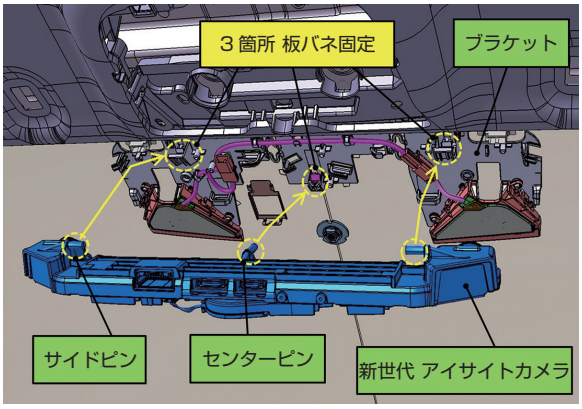


図5 新世代アイサイトカメラ 組付方法

今回、新世代アイサイトカメラをフロントガラスに直接組付ける構造を採用した事で、アジャスタを介さ

ずに狙いの位置に配置できている。また、組付構造として図5に示すブラケットに設定された3点の板バネにより、図4に記載されているセンターピンとサイドピンが固定される構造を採用した。これにより締付レスによる組付構造の簡素化を図ると同時に、限られたスペースでのコンパクトなカメラマウント構造を実現している。加えて、新世代アイサイトカメラの組付構造の進化により、約45%の作業時間短縮に寄与しており、低コストでの組付作業を実現している。

4.　新世代アイサイトカメラ　調整工程

本章では、新世代アイサイトカメラ調整工程における進化について概説する。

4.1　Ver.3アイサイトカメラ 調整作業

組立工場では、均一の車両品質を確保するためにアイサイトカメラ装備車両のカメラ位置を調整する作業を実施している。図6にVer.3アイサイトカメラの調整作業工程を示す。一定の位置に固定された車両に搭載されたVer.3アイサイトカメラは一定距離先にあるチャートボードを見る事で、自らのカメラ画角をソフトウェアで補正している。

図6　Ver.3 アイサイトカメラ 調整作業工程

4.2　新世代アイサイトカメラ 調整工程課題

2.1項で述べたように、新世代アイサイトカメラの視野角は従来比で約2倍に拡大されている。そのため、従来のチャートボードでは視野角全体を網羅する事ができず、調整作業ができない。新世代アイサイトカメラの視野角を補正するためには、チャートボードの幅を約2倍に拡大する必要があるが、図7に示すようにチャートボードの幅方向の拡大余代は約1.5倍しかなく、工程的に不成立である。

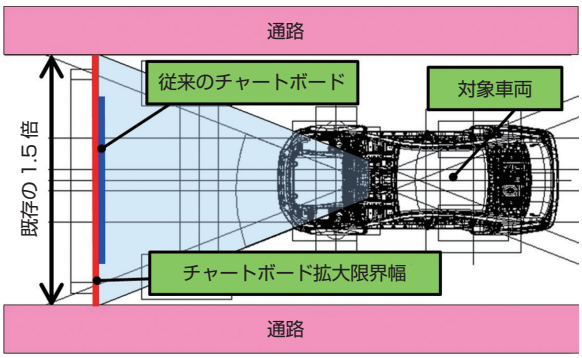


図7　アイサイトカメラ 調整工程 上面図

4.3　新世代アイサイトカメラ 調整工程課題への対応

新世代アイサイトカメラの検知画角に対応するための対応、及び実作業風景を図8、9に示す。

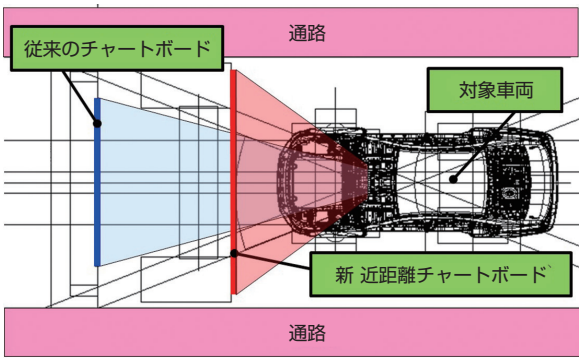


図8　新世代アイサイトカメラ 調整工程 上面図

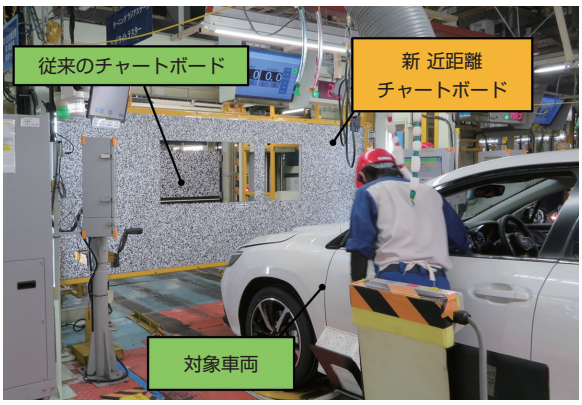


図9　新世代アイサイトカメラ 調整作業工程

幅方向のチャートボード拡張には限界があるため、従来のチャートボードに対して車両との距離を近づけた位置に新たにチャートボードを追加する事により、

新世代アイサイトカメラの視野角に対しての調整作業を実現した。また、Ver.3アイサイトカメラの調整作業で使用していたチャートボードを流用する事により、新旧の調整作業に対応できるコンパクトな工程を実現しつつ、工程整備コスト削減に寄与している。

一方、チャートボード2枚を用いた調整作業となったため、新世代アイサイトカメラの調整作業は従来比

でより複雑になり、調整作業の量産安定性を示す必要がある。

4.4　調整作業の量産安定性の提示

表1に新世代アイサイトカメラの調整作業に影響を与える要素の一例を示す。

表 1　調整作業に影響する要素一例

No	要素	考えられる影響
1	カメラ組付作業	調整画角量の増加
2	ガラス貼付作業	調整画角量のバラツキ増
3	ボード設置精度	調整画角量のバラツキ増
4	車両停止作業	調整画角量のバラツキ増

表1に示すような要素に対して量産での安定性を一つ一つ示していく事は困難である。そこで新世代アイサイトカメラ調整作業の量産安定性を示すために、

新世代アイサイトカメラの調整履歴データから、カメラが行った実補正量を分布化する事で、調整作業全体の安定性を見極める。

新世代アイサイトカメラの上下方向補正量のヒストグラムと左右方向補正量のヒストグラムを図10、11に示す。計測された補正量分布は、アイサイトカメラ本体が持つ調整可能レンジに対して十分な余裕代を確保できているため、新世代アイサイトカメラ調整作業全体での量産安定性が証明できる。

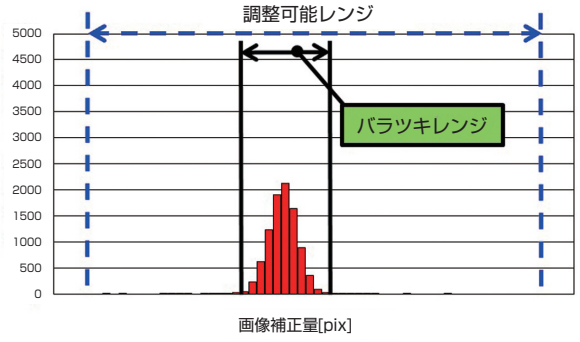


図 10　上下方向補正 ヒストグラム

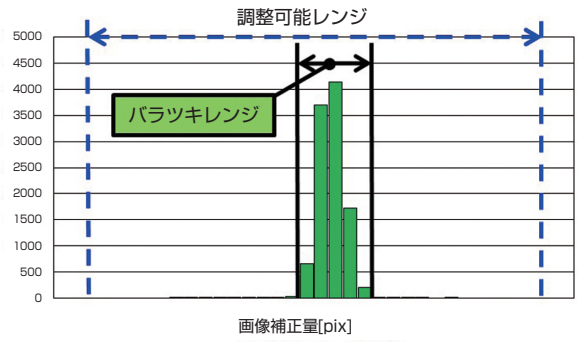


図 11　左右方向補正 ヒストグラム

5.　まとめ

本稿では、新世代アイサイトカメラの品質確保の取組みについて述べた。引き続き、トリム生産技術部の開発業務の品質をより確実なものとし、魅力ある製品を高品質・低価格でお客様にお届けできるように努めていく。

一方で今後のさらなる取組みとして、図10、11に示すように日々の量産で取得しているデータから、IoT、AIを用いて変化を予見して事前に手当てができるレベルまで引き上げる事が求められてくると考える。

また、今後自動運転の拡充などが予測される中で、今後もお客様目線に立ち、技術本部とタッグを組んで、当社としてより良い価値を高品質で提供できる工程造りにつなげていきたい。

6.　謝辞

本取組みの遂行は、当社技術本部関連部門の方々、製造本部関連部門の方々を始めとした当社関係部署の多大なる協力の下で実現できたものであり、関係された皆様に深く感謝の意を表し、心より御礼申し上げる。

参考文献

(1) 木戸 辰之輔ほか：新世代アイサイト ステレオカメラの開発, SUBARU技報第47号

【著　者】

北島　　匠

佐藤　進吾

CB18（DST）用クランクシャフトの製法開発

Process Development of the Crankshaft for CB18（DST）

茂 木 清 二*　　石 丸 博 基*
MOGI Seiji　　ISHIMARU Hiroki

抄　録

CB18型エンジンの開発コンセプトである「軽く」「小さく」「燃費良く」に向けたコンパクト化実現のため、エンジンサイズを決めるクランクシャフトの全長をいかに短縮できるかが課題であった。

その課題に対し、極薄ウェブ高周波焼入れクランクシャフトの量産化に向けた各種取組みと方策、さらなる品質の向上、生産性向上を織込みながら量産化を実現させた。その各種課題と取組みについて説明する。

Abstract

The challenge was how to shorten the overall length of the crankshaft, which determines the engine size, in order to realize compactness for achieving the CB18 engine development concepts, “light,” “small,” and “good fuel economy.”

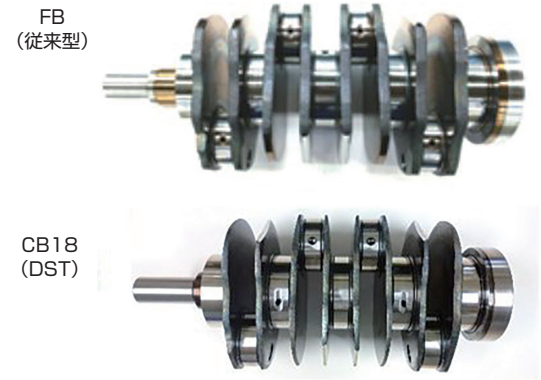
In response to this challenge, we have realized the mass production of the crankshaft by incorporating various efforts and measures for adoption of ultra-thin web induction hardening to the mass production process and for further quality and productivity improvements. The following introduces various types of issues and efforts.

1. まえがき

クランクシャフトの高周波焼入れ工法は30年以上前から採用されているが、水平対向エンジン特有の狭幅かつ大径のピン＆ジャーナルに薄肉ウェブが伴うクランクシャフトのR焼入れは、難度が高く世の中に他の採用事例は無い。

CB18型（ダウンサイジングターボ、以下DST）エンジン用のクランクシャフトは従来の水平対向エンジンに比べさらなる薄肉ウェブ化（溶けやすい・割れやすい・曲がりやすい）が必要のため、生産成立性の難度が格段に高まった（図1）。

この課題に対し、無矯正での焼入れを成立させる新高周波焼入れ及び工程設定、再加熱変形の無いインライン焼戻し、細径のバリレス油穴貫通加工など、新技術を開発、さらには工程のミニマム化、品質保証の格上げを行い量産化させた取り組みについて説明する。



	FB（従来型）	CB18（DST）	差	
全長	350 mm	316 mm	34 mm	▲10%
ウェブ幅	8.2 mm	4.85 mm	3.35 mm	▲41%

図1　FB（従来型）用クランクシャフトとの比較

2. 新工法、工程設定

今回、生産ライン新設にあたり、製品同様、工程もミニマム化を狙い、「無矯正を可能とする高周波焼入れの工法開発」及び以下7項目の「工程削減」にチャ

＊ パワーユニット生産技術部

レンジした。具体的には“仕上げ旋盤レス”、“リセス旋盤レス”、“ラップ粗加工廃止”、“カウンターウェイトの外周加工廃止”、“油穴加工のI油穴化”、“焼戻しのインライン化”、“工程集約：セル化（両端・リセンタ加工・パイロット穴・キー溝）”などを行った。

2.1　極薄ウェブ高強度クランクシャフト量産化における課題と取り組み

これまでにない極薄ウェブで要求強度も高い設計仕様のため、焼割れ感受性が高い高周波焼入れでの表面処理に加え、曲り矯正による強度低下を発生させない無矯正仕様が必須となった。

2.1.1　無矯正仕様：焼曲り過大の改善

従来のFA/FBの一部では無矯正化済であったが、焼曲り対応は難しく、今回の極薄ウェブではFA/FBよりもさらに対応の難度が上がることが予想された（図1、図2）。

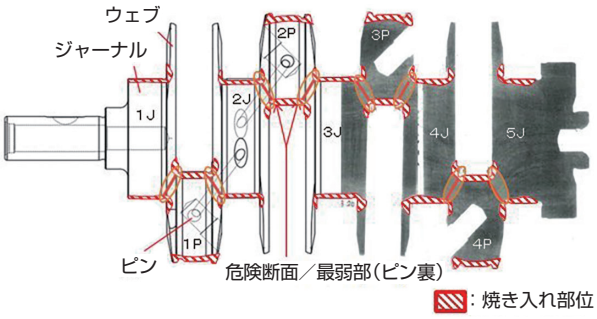


図２　クランクシャフト焼入れ部位

そこで量産化準備の前に、試作機にて量産性有無の判断、検証を進めた。試作段階での条件出しについては量産時焼曲り規格（全振れ）の半分以下に収められるかを判断基準として取り組むこととした。

(1) 焼き順の選定

各々の曲りを打ち消すため、適切な焼き順を選定する。

(a) 各個別焼きでの曲り傾向の把握を行う

①ピン（以下P）焼きは1－4P方向凸曲りとなる（図3）。

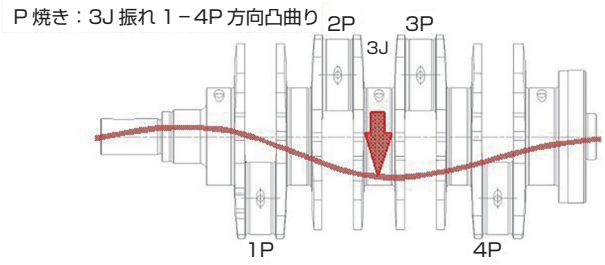


図３　P焼曲り傾向

②ジャーナル（以下J）焼き

2&4Jは両側のPとの釣り合いにより曲り影響が小さい。曲り影響の大きい1J、5J、3Jについては以下になる。

・1J、5Jは1－4P方向凸曲り、

・3Jは2－3P方向凸曲りとなる（図4）。

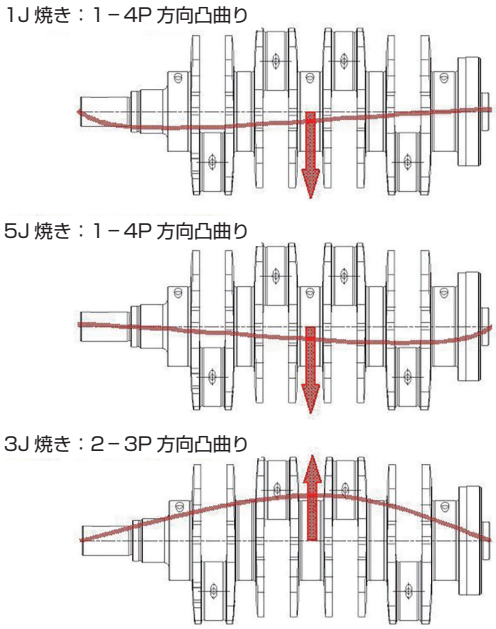


図４　J焼曲り傾向

(b) PとJでの焼き順違いによる比較を行う

①「J→P焼き」はJ焼きによる焼曲り影響に対し、P焼きでの1－4P方向凸への焼曲り悪化が増大傾向となる。特に、1J、5Jでの振れが大きくなり、3Jでの焼き調整をしても、同軸度が悪化傾向となる（図5）。

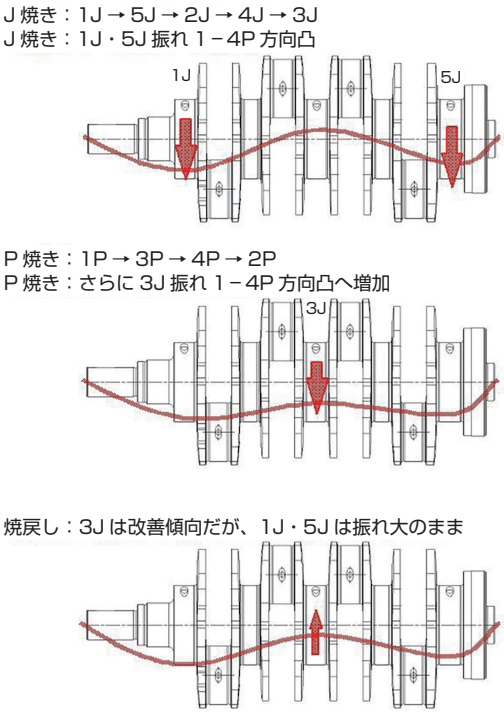


図５「J→P焼き」の焼曲り傾向

②「P→J焼き」はP焼きによる曲りを、1J･5J焼きでさらに1－4P方向凸に変化するが、3J焼きで全体を2－3P方向凸へ跳ね返すので振れも同軸度も小さくできる(図6)。

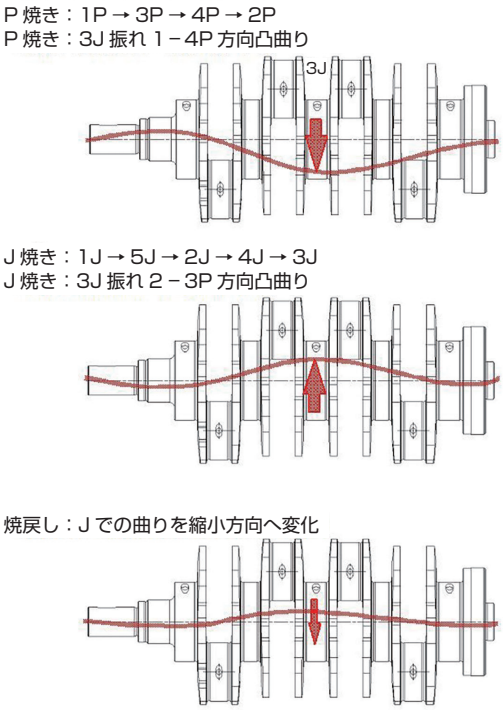


図6　「P→J焼き」の焼曲り傾向

以上より「P→J焼き」で成立解を求めることとした。「P→J焼き」での懸念は、P側ショルダへのJ焼き貫通影響によるねじり疲労強度の低下である。これに対し、後述する焼き貫通を回避可能とする、J加熱中にPを冷却する「P補助冷却」という新工法を開発した。

(2) ExtraD/R加工の開発

焼入れ前に曲り影響部位を強化することで、焼入れ時の曲り(変形)を抑制する。

FA/FBにて採用していた焼き順と加熱バランスでの調整だけでは焼曲り規格を満足することが出来ず、さらに焼曲り改善をさせる工夫が必要であった。

ディープロール加工(以下D/R加工)の有無により焼曲り量に変化があることに着目し、焼曲りを最小とするD/R加工条件を追究した。

焼き順・焼きバランス・D/R加工圧等の最適条件を見出し、無矯正仕様での安定生産を可能とした。

(a) D/R加工の役割りと工夫

D/R加工はクランク軸のリセス溝R部にローラーを押し付けながらクランク軸を回転し、塑性加工により強化する加工法である(図7)。

従来の高周波焼入れ前に実施しているD/R加工は、応力集中緩和のために旋削加工面の目つぶしを目的としている(＝低圧D/R)。

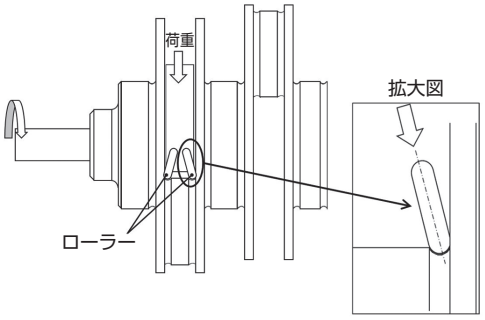


図7　ディープロール（D/R）加工法

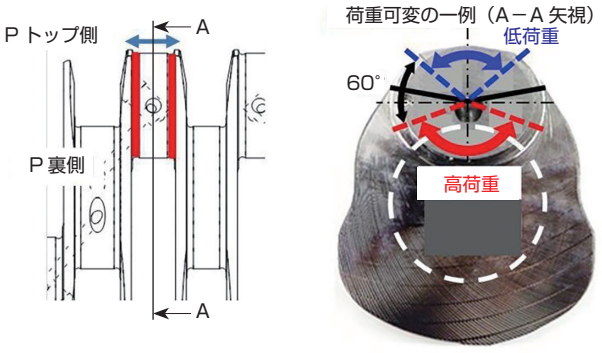
一方、過去のEA型、EJ初期型などのクランク強化手法は、一般的な高周波焼入れや窒化による表面処理ではなく、負荷のかかるリセスR溝部へ高圧のD/R加工を施す強化手法を採用していた(＝高圧D/R)。

今回、高周波焼入れ時の焼曲りに対する変形抵抗にその効果を使い、さらに極薄ウェブでも処理可能なD/R加工を開発した(＝ExtraD/R)。

(b) ExtraD/R加工の開発について

従来の低圧D/R加工では焼曲り変形抵抗が小さく、焼曲り抑制効果が足りない。しかし単純にD/R加工の高圧化(高荷重)を行うと、薄肉ウェブによるウェブ低剛性のため、Pトップ側のウェブが倒れてP幅が大きく広がってしまい成立解がなかった。

曲り変形抑制の効果はPとJとの交差しているオーバーラップ部が大きく、Pトップ側でのD/R加工については曲り影響や変形抑制には寄与しないため、必要な部位のみD/R加工を高圧化するべく、回転角度により加圧調整可能な装置を開発、採用した(図8)。



・肉薄なPトップ側は、荷重に耐えきれず変形する
・焼曲りに荷重が必要な部位はP裏側
・Pのトップ側(低荷重)と裏側(高荷重)で荷重を変える

図8　ExtraD/R加工の概念図

これによりPトップ部での変形防止が可能となり、必要な部位のD/R加工圧を上げることが可能となった。

D/R加工圧条件の最適化には、P焼き、J焼きそれぞれの変形抑制効果での焼曲りバランスと組合せる必要があり、D/R加工圧を何水準か変えて同一条件で焼入れを行い、焼曲りが最小となる条件を追究した。

焼き順、焼入れ出力バランスでの焼曲り最適化に加え、ExtraD/R加工を織込むことで焼曲りを大幅に小さくすることができた（図9）。

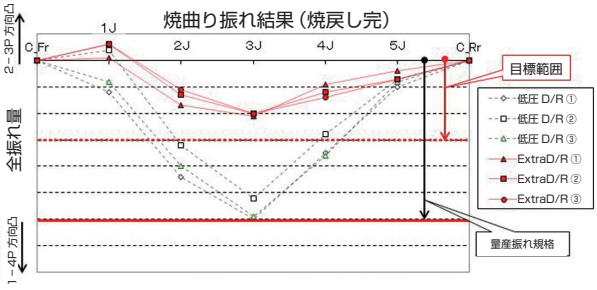


図 9　ExtraD/R 加工での焼曲り改善の比較例

この結果、無矯正仕様の判断である量産規格の半分以下を確保し量産性有りの判断を行った。

D/R加工での加工圧調整との組合せにより、高周波焼入れにおける焼曲り抑制調整手段が増えたことで、今後新規クランクシャフトに対する無矯正仕様の工程設定＆量産化が可能となった。

（本製造方法について特許出願申請中）

2.1.2　焼貫通による焼き鈍り対応＝強度低下改善

今回の極薄ウェブ高強度クランクシャフトのベースモデルとなったディーゼル用クランクシャフトでは、「J→P焼き」工程でP焼きでの加熱がJ焼き部へ影響することの対応として、P焼き加熱時（＝30 rpm）にJ部を焼入れ水で冷却していた（J補助冷却）。

（1）P補助冷却の開発

「P→J焼き」はJ加熱による焼貫通でPショルダ部に焼き境が発生しねじり強度が低下する。この改善には、ディーゼル用クランクシャフトで採用した加熱中に冷却をする機構を検討した。しかし、今回は焼き順が逆となり、J焼入れ時にPは60 rpmでクランク運動をするため、Pが上死点になった際にPへの冷却水がJ側へかかると焼入れ不良（焼ムラ、ウェブショルダ部の焼き割れ）が発生する。その改善策として、冷却ジャケットの噴射板の穴位置・サイズ・数量・方向を最適化して冷却流量の上下限設定の見極めを行い量産化仕様に落し込んだ（図10）。

①Pサイドのウェブからあふれる限度を流量上限と見て試焼きを行い、J焼きによる焼ムラや焼き割れの無きことの検証を行い上限設定とした（図11 左図）。

②P側での焼鈍り防止効果の限度（軟化限度）は、Pリセス溝を伝わりPトップ側迄冷却水がかかる流量限度の可視化ができるサンプルを準備して、当りを付け、試焼き後の切断・硬さ確認で流量下限を見極めた（図11 右図）。

（P部のJ接線部の硬さ限度を決め、流量下限とした。）

P補助冷却を採用することで、ねじり疲労強度の低下は改善され、要求強度を充分確保することができた。

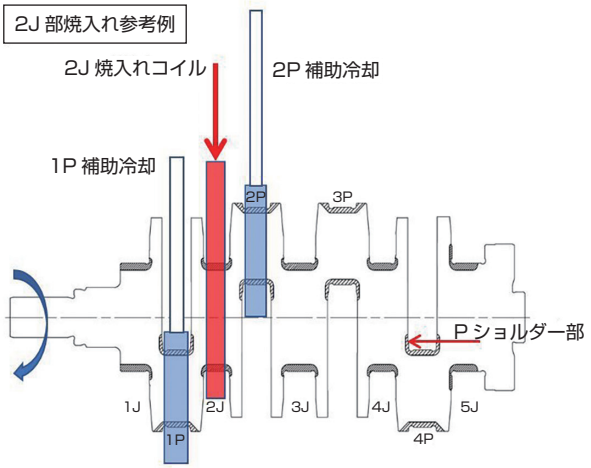
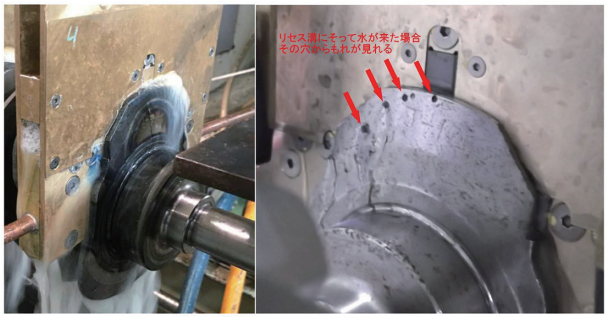


図 10　P補助冷却 模式図

↓流量調整：あふれる限度の目視確認



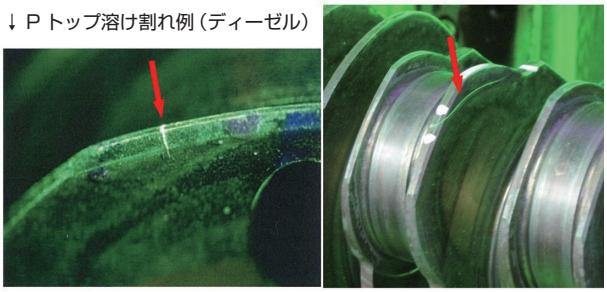
最低流量の見極めに可視化サンプルを準備↑

図 11　P補助冷却ジャケット検証

2.1.3　焼割れ防止

ディーゼル用クランクシャフトと同様に極薄ウェブによる焼割れが懸念された（図12、図13）。

↓Pトップ溶け割れ例（ディーゼル）



Pトップの焼割れ例（ディーゼル）↑

図 12　Pトップの焼割れ例

（1）Pトップウェブの焼割れ防止措置

ディーゼル用クランクシャフトに採用した改善内容とさらに新材料開発を織込む。

①形状改善：トップ側ウェブ45°方向ショルダは除肉して過加熱の緩和。

②焼入れ条件：Pトップ部への過加熱防止で回転位相毎に加熱出力を細かく制御した4分割加熱を採用。

③材料開発：硬さを低下させない範囲で成分を見直して融点を上げた専用鋼材の採用。

(2) J部ウェブショルダの割れ防止措置(図13)

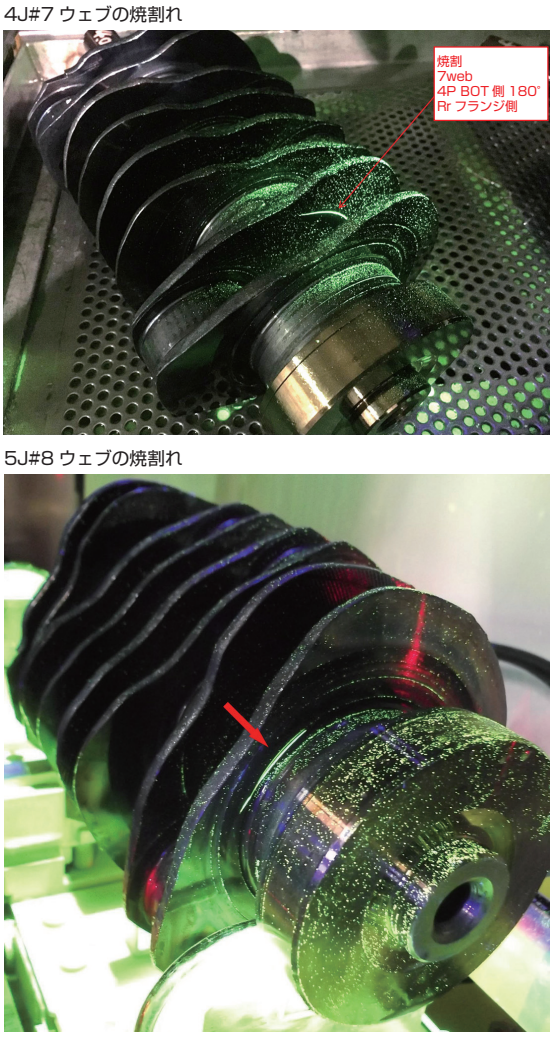


図 13　J 部の焼割れ例

割れ感受性の高いウェブ側は焼き貫通させることで焼割れ感受性を下げ、軸側加熱とのバランスを調整して最適なR焼きとした。

しかし、5Jでの#8ウェブは他のウェブよりも厚さがあるために焼き貫通が難しく、R焼き深さの最適化を狙うと、除肉したウェブショルダ部(図13下図90°方向矢印部)が過加熱状態となり、その部位から割れが発生した。

この対応には回転角度に応じて加熱出力を変化させる、パワーリダクションを行い過加熱防止とした。

Jは回転数が速く加熱発振の遅延影響を考慮する必要があり、周方向での焼入れ状態を確認しながら角度制御補正を織り込んだ。

2.2　工程ミニマム化に対する課題と取り組み

新ラインのコンセプトである、工程削減したスリムでコンパクトな骨格違いの混流ラインを実現するため『機能上必要な部位のみの加工』『2度加工廃止(粗加工レス)』『異なる部位の同時加工』『設備能力の最大活用』を切り口に工程削減を実施し、工程数を26%(▲9工程)、設備台数を25%(▲9台)削減した。

加えて、焼入れ後の焼戻しについては、従来はラインアウトしてから電気炉で行うため、運搬工数やリードタイム増となり、インライン化に取り組んだ。

2.2.1　インライン焼戻しの開発：短時間誘導加熱の炉体戻し処理の開発

例えば、低温加熱による炉体戻し処理は、他社では高周波焼入れによる研磨割れなどの二次的な不良の防止を目的として多く用いられ、電気炉処理のような製品全体を加温する焼戻しに比べ、焼戻し効果が限定される。これまで採用してきた水平対向用の高周波焼入れクランクシャフトは、焼入れ後にラインアウトして電気炉で焼戻し処理をしている。過去にインラインでの焼戻し(炉体戻し)処理を試してきたが、エンジン耐久試験で焼付きが起きてしまい、採用を断念していた。

この発生メカニズムは、エンジン内でクランクシャフトが高温になることで焼戻され、曲がることで軸受け部の接触面圧が上がるためであった(＝再加熱変形)。

ディーゼル～FA/FB開発時、この焼戻し効果以上の温度経験を工程上で与えることにより、エンジン内でのクランクシャフト変形を抑制できることがわかり、充分に焼戻し処理ができる電気炉焼戻しを採用した。当時は炉体戻しでこの処理相当の温度経験＝焼戻しをさせる条件が見極められなかったためインライン焼戻し(炉体戻し)は断念していた。

今回「予備実験での検証」を経て、「CB18(DST)専用の試作コイル」(図14)、「量産想定の試作コイル」を製作し、条件出しと効果検証を進めることで、インライン化＝炉体戻しを生産化する条件を求めることができた。

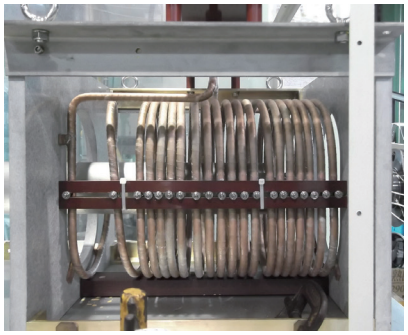


図 14　CB18(DST)専用の試作コイル

(1) CB18（DST）専用試作コイルでの検証

焼戻し処理の効果確認は、再加熱変形防止と硬さ低下限度によって行う。

再加熱変形評価（単体）は次のステップで行った。

生産想定の中で、バラツキ最悪で焼曲りが最大となる焼入れ条件で処理したクランクシャフトを加工完成状態に仕上げる。次に、エンジンのライフサイクルを想定し、高温に曝される温度と時間を求め、電気炉によりその条件で恒温処理をする。

この恒温処理前後の同軸度の変化量を計測し、所定の変形量以下であることを確認する。

しかし、単体での再加熱変形量の計測は非常に手間がかかり、試作品では仕上げ加工までに多くの時間を要する。そのため、まずは狙いの最悪条件を確実に再現できるよう、製品の各部位（PトップからP裏、J軸やリセス溝）に熱電対を取り付け昇温状態の把握を行うことで、加熱条件と昇温状態の関係性を明確にした（図15）。

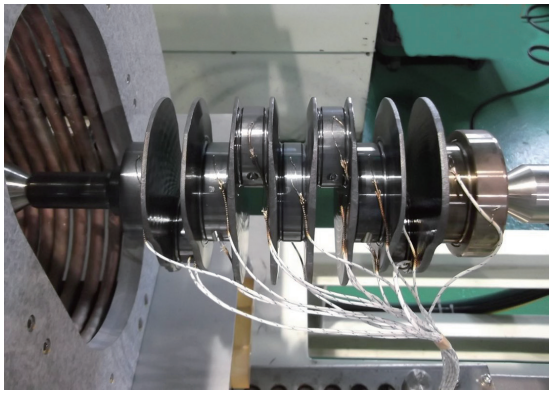


図 15　温度測定（熱電対取付）部位

そして、次の前提条件を基に試作トライを進めた。

①処理時間は、「加熱」～「伝熱・放冷」～「加熱」と繰り返し、全体時間はラインタクトを見込んだ時間内にする。

②目標温度の設定は、加熱終了時に電気炉処理での焼戻し温度となることを基本に、短時間加熱による硬さ低下のレベルを見ながら、より効果の高い炉体戻し温度条件を追究する。

③量産を想定した炉体戻し処理前の製品初期温度についても、夏場の45℃と冬季工場内放置の20℃でもカバーできることとする。

(2) 加熱条件の追究：3段加熱化

炉体戻しの加熱では、コイルに近いPトップが先に加熱され、その後にP裏、J部へと加熱されていく。しかし、単純に加熱をしていくとPトップとP裏、J部との温度差が大きくなってしまい、Pトップは所定の温度に到達しても他の部位は温度が上がりきらない。

この改善として、加熱後に伝熱をさせて全体を均一に昇温させる、3段加熱方式を採用した（図16）。

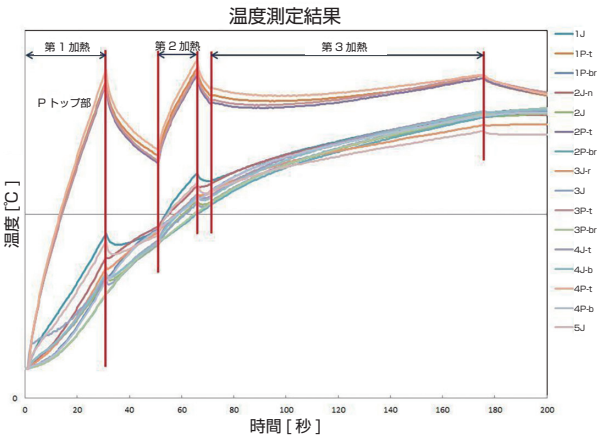


図 16　CB18（DST）炉体戻し３段加熱 例

「1段目（第1加熱）」は高出力でPトップ全体を高温にした後、加熱を止めて放置する。Pトップからの伝熱時間を設け、P裏、J部を昇温させる。

「2段目（第2加熱）」は中出力で1段目での最高温度を上限とした加温を行い、他の部位への伝熱での昇温を促す。

「3段目（第3加熱）」は低出力で加温し、Pトップは降温させずにP裏やJ部への伝熱、昇温を待ち、全体の昇温状態を均一にさせる。

次に、何水準かの加熱条件毎に、加熱終了温度の最大値を確認し、実サンプルの処理で硬さが規格内に収まるかを確認した。この時、生産バラツキを考慮し、硬さが上がりにくい最悪条件として、焼入れ条件は管理幅の下限を狙い、炉体戻し処理の加熱前製品温度は上限を選んだ。

さらに、それぞれの条件毎で、単体での再加熱変形量を確認し、電気炉処理と同等の焼戻し効果（再加熱変形量）があるものを量産条件として選定した（図17）。

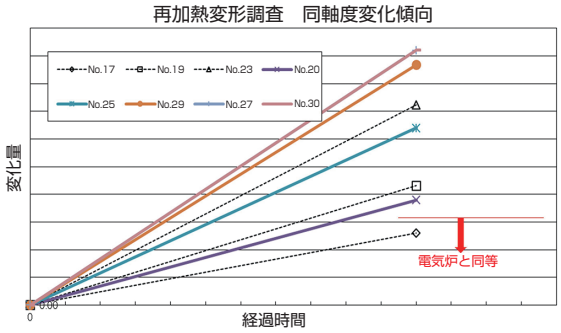


図 17　再加熱変形比較（CB18（DST）専用コイル）

(3) 量産機での生産バラツキ抑制

量産機では、試作条件を基に生産条件に落し込み、生産バラツキの抑制を織り込んだ。

連動生産中J焼き後、アフタ冷却で温度はある程度慣らされるが、例えばライン内での長時間停止などによって、焼入れ後の製品温度は工場内温度まで低下してしまう。

この時、製品の温度バラツキはそのまま炉体戻しでの完了温度に反映されることとなり、炉体戻し品質へ直接影響をうけて焼戻し効果の低下となる。

量産時のバラツキ低減として、炉体戻し処理前に温度を安定化させる狙いも含め、前洗浄工程を新たに設けた。前洗浄液は所定の温調管理を行い、事前に液流量と洗浄時間を確認し、製品温度を均一に慣らすための必要条件を検証して昇温過不足が無いようにした。

さらに、装置起動、初品時のホース＆配管内での液抜きサイクルも織り込み、ワーク温度均一化を確実なものとした。

2.2.2　油穴加工のI油穴化

品質保証の格上げとして、エンジントラブルにつながるコンタミによるメタル焼き付きを撲滅するため、油穴レイアウトの見直しによる交差バリ＆段差バリの廃止を可能とするI油穴化に取組んだ。

薄肉ウェブでのP～J間の油穴貫通は、R焼入れした部位の至近距離を通過させる必要がある。油穴を先に開けると、高周波焼入れの際に油穴と焼入れ加熱層が近いため、その部位に焼割れが生じる。この対応として、焼入れした後に油穴貫通をする必要がある。

これまでは焼入れ部の穴あけ加工を避けるため、Pショルダ外側に加工座を設け、そこから貫通穴を開けていた。しかし、今回の極薄ウェブクランクシャフトではP-J間が狭く、P軸とJ軸の貫通穴を経由する加工が必要であり、交差バリ、段差バリが避けられなかった。今回、(**図18**)のように焼入れされたPとJの軸間を直接貫通するレイアウトにして、こういった問題を改善した。

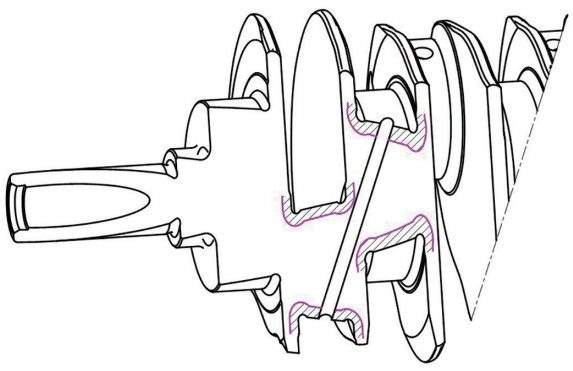


図18　I油穴貫通経路

(1) 下穴加工

焼入れ硬化した軸部へ穴あけ加工＝貫通穴を開けるのは大量生産向きではない。しかし、高周波焼入れの特徴である、表層に近い部位だけが加熱＝焼入れされることを利用し、焼入前に軸部へ下穴(座ぐり)加工を開けておく事で下穴の穴底が不完全焼入れ部となる。

その部位を利用して、貫通穴を開ける工程とし、PとJ軸の焼入れ硬化部に小径ドリルでの穴明けを可能とすることができた。

3.　あとがき

「限界まで小さく」というコンセプトでの仕様で開発がスタートし、量産を成立させるためにはいくつもの課題を解決・克服することの取組みであったが、無矯正仕様とする工程設定は従来以上の焼曲り改善とすることが出来、安定した生産が可能となった。

今回、工程削減などを織込むことができたが、新工法の焼入れについては複雑な機構となってしまった。

お客様の期待に応えるのはもちろんのこと、安く、安定した品質のモノづくりをおこなうための工夫は開発段階からの大きな課題であることを忘れないようにしたい。

最後に、今回の製法開発にかかり多大な協力を頂いた関係各位には深く感謝の意を表します。

【著　者】

茂木　清二

石丸　博基

自動シーリング装置の開発

Development of Automated Sealing System

松　本　洋　平*
MATSUMOTO Yohei

抄　録

航空機構造組立においてシール作業は高い品質が要求される重要な工程である。従来、シール作業は熟練作業者による手作業で行われており、生産性の低さ、作業者育成の面で課題であった。さらにシーラント（シール材）は有害物質を含むため作業環境の面でも問題がある。これらの問題を解決するため、自動シーリング装置を開発し、生産適用を行った。本稿では開発した自動シーリング装置について紹介する。

Abstract

Sealing for aircraft structural components is an important process in production and requires high quality. Since the sealing process is performed manually by skilled workers, low productivity and training of workers have been the issues. In addition, the work environment was another problem since sealants contain components hazardous substances. To solve these problems, we have developed a sealing automation technology and applied it to our production. This paper introduces the developed automated sealing system.

1.　まえがき

当社の主要製品の一つである中央翼は機体荷重を支える構造部品であるとともに燃料タンクでもある。そのため燃料漏れを防ぐ目的で部品の結合部にシールを施している。このシール作業は、全て手作業であり、自動化が求められてきたが、シーラントの特性や高い塗布品質要求により､実現されていなかった。そこで、これらを解決する装置を開発し、生産への適用に成功した。

2.　燃料タンクシールの概要

2.1　自動シーリング装置適用の部位とシール種類

シールには防食、空力性能向上、燃料漏洩防止等の役割があるが、燃料漏洩防止用のシールを燃料タンクシールと呼ぶ。

本稿で紹介する自動シーリング装置は中央翼の上面パネルおよび下面パネルのフィレットシールに適用される。パネルは外板とストリンガをファスナで締結し組み立てられており、フィレットシールは外板とストリンガの継ぎ目に施される。図1に中央翼の概略、図2にパネルとフィレットシールの概略を示す。

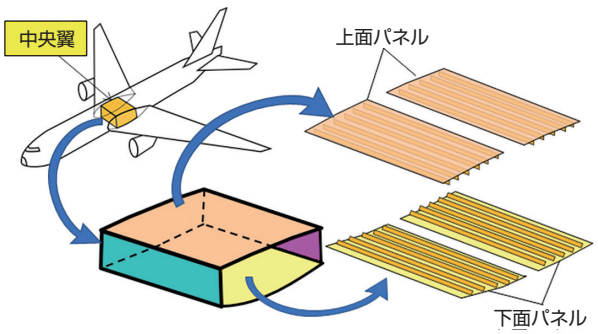


図 1　中央翼の概略

＊ 航空宇宙カンパニー　生産技術部

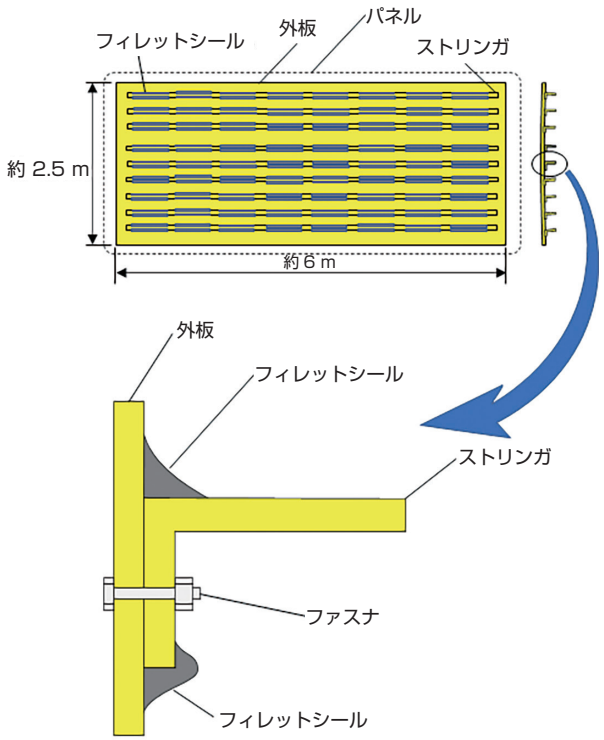


図２　パネルとフィレットシール概略

2.2　燃料タンクフィレットシールの作業フロー

当該の燃料タンクのフィレットシールは、図３に示す通りブラシコート、ファーストフィレットシール、セカンドフィレットシールの3種類のシールを重ねて塗布することが機体の製造要求で規定されている。また図４に示す通りフィレットシールの端部は滑らかに整形されていなければならない。

図５に燃料タンクフィレットシールの作業フローを示す。黄色で表示した箇所が自動化工程である。なお、自動シーリング後に検査不合格の場合は手作業で直しを行う。

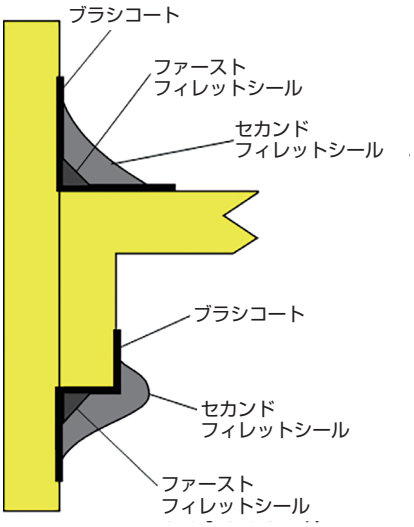


図３　燃料タンクフィレットシール

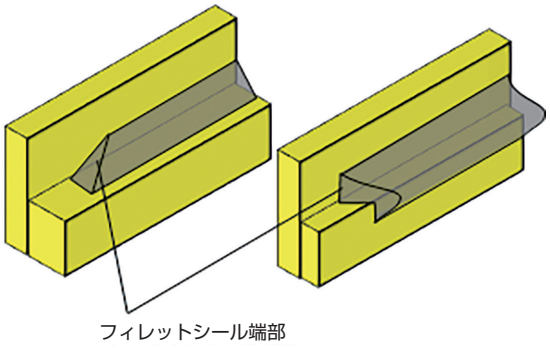


図４　フィレットシール端部の整形

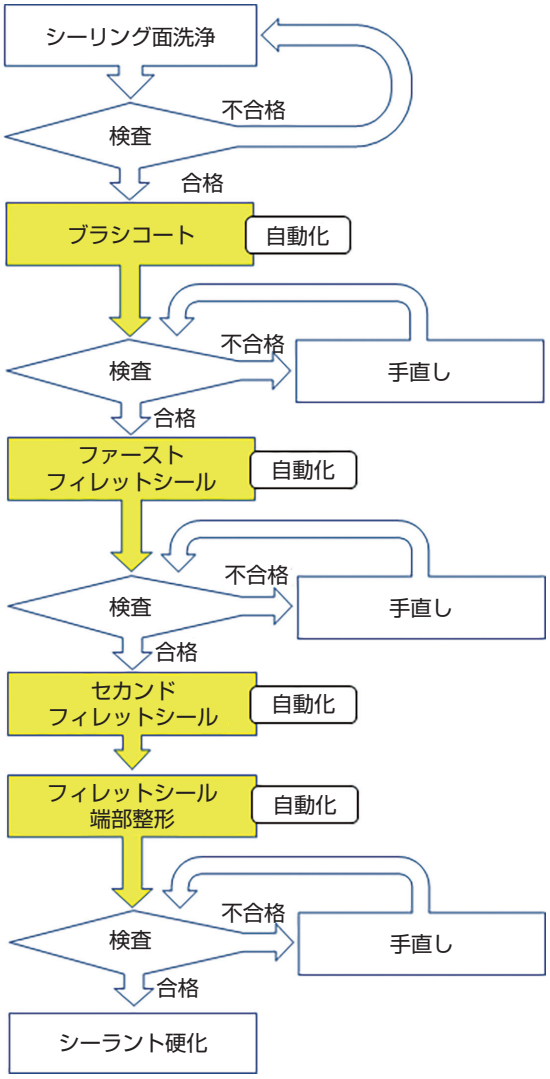


図５　燃料タンクシーリングのフロー

2.3　燃料タンク用シーラントの性質と自動化の課題

燃料タンクで使用するシーラントは二液性であり可使時間は2時間と短い。高粘度かつ高弾性の特性を持ち、これらは時間経過とともに変化、且つ温度と湿度によっても変化する。これらの性質により、自動化には以下の課題があった。

①高い粘性と弾性およびその特性変化は、シーラントの吐出量を不安定にし、品質を保つことが困難

である。
②高い粘性のため、一度シーリングを行うとノズル吐出口にシーラントが付着し、次のシーリングを阻害、または品質を低下させる。
③高い粘性と弾性はシール終了端での液切れを悪くし、パネルをシーラントで汚す原因となる。
④短い可使時間は、装置の頻繁な清掃作業を必要とし、メンテナンス性を低下させる。

シーリングの自動化には、上記①～④の課題を解決する装置の開発が必要であった。

3. 装置の特徴

3.1 装置概要

本装置の外観を図6に示す。本装置は6軸垂直多関節ロボットを基幹としている。これにシーリング用エンドエフェクタを装着し、各種シーリングを行う。6軸垂直多関節ロボットは、広い可動範囲と自由度の高い位置決め能力を有していることから採用した。また、専用の工作機械を開発するのに比べ、低コスト、短期間、コンパクトに装置構築が可能である。

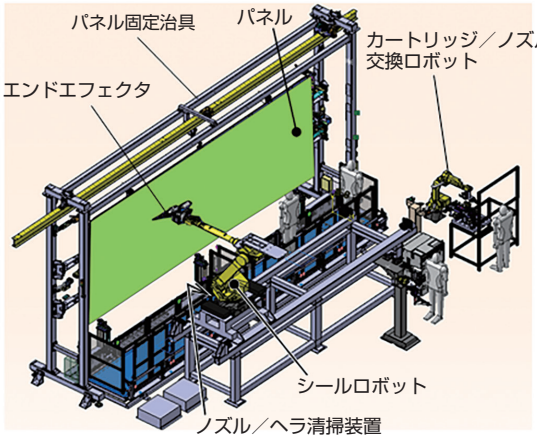


図6 装置外観

3.2 装置の主要構成品と機能

(1) シールロボット

シーリングを行う6軸垂直多関節ロボット。ツールチャンジャーを備え、シーリング用の複数のエンドエフェクタに持ち替えが可能である。また、約6 m × 2.5 mのパネルの全域にエンドエフェクタを正確に位置決めするため、追加走行軸による可動範囲の拡大、レーザプロファイラと力覚センサによる位置補正機能を備えている。

(2) エンドエフェクタ

シールロボットに取り付けるシーリングを行うツールであり、以下の3種類がある。これらの詳細は4項に記す。

・シールガン
・ブラシコートツール
・フィレットシール端部整形ツール

(3) ノズル／ヘラ清掃装置

シールガンのノズル、フィレットシール端部整形ツールのヘラに付着したシーラントを取り除く装置。ノズルとヘラのコンディションを一定に保つことで、塗布品質を安定させている。

(4) カートリッジ／ノズル交換ロボット

シールガンに装着するシーラントカートリッジとノズルを自動交換する6軸垂直多関節ロボット。シールロボットと協調して交換を行う。

(5) パネル固定治具

装置の稼働中にパネルが動かないようにする固定具。シールロボットが位置補正機能を有するため、パネル外周の数か所を押さえるのみの機能とし、正確な位置決め機能は省略している。

4. エンドエフェクタの開発

4.1 シールガン

4.1.1 シールガンの構成品と機能

シールガンの構成を図7に示す。シールガンの構成品とその機能等について以下に記す。

(1) シーラントカートリッジ

プランジャ付きのカートリッジに、二液混合済のシーラントが封入されたものである。これをシールガンに取り付けて、シーラントを供給する。シールガン上にて二液を混合させる場合に比べ、混合品質の確保、シールガンの小型化、メンテナンス性の上で有利である。但し、カートリッジ式の場合、頻繁にカートリッジ交換を行うことが難点であった。これを解決するため、交換ロボットによるカートリッジ自動交換を導入した。

なお、シーラントは混合後に急速冷凍することで硬化を止め保存することができる。本装置では冷凍したシーラントカートリッジを解凍したものを使用している。

(2) 電動アクチュエータ

カートリッジ内のプランジャを押してシーラントを吐出させる機構である。サーボモータにより、アクチュエータの押し引き動作の位置、速度を精密に制御可能である。アクチュエータの先端は、プランジャにフィットする形状かつ真空引きの機能を有し、プランジャを吸着し引き戻すこともできる。

(3) ノズル

ノズルを取り換えることで各種シーリングが可能である。ノズルはチャックリングをスライドすることで

容易に着脱でき、且つ自動交換に対応している。

ノズルとカートリッジは直結しており、中間にバルブを設けないことでメンテナンス性に配慮している。また、ノズルは離型性の良い樹脂製を採用し、ノズル内のシーラントは硬化後に容易に除去可能である。

また、ノズルの誤使用防止のため、ノズルにはRFIDチップを取り付け、識別をしている。

(4) レーザ変位計

ノズルの先にレーザを照射し、シーラントの吐出監視とその高さを測定する。

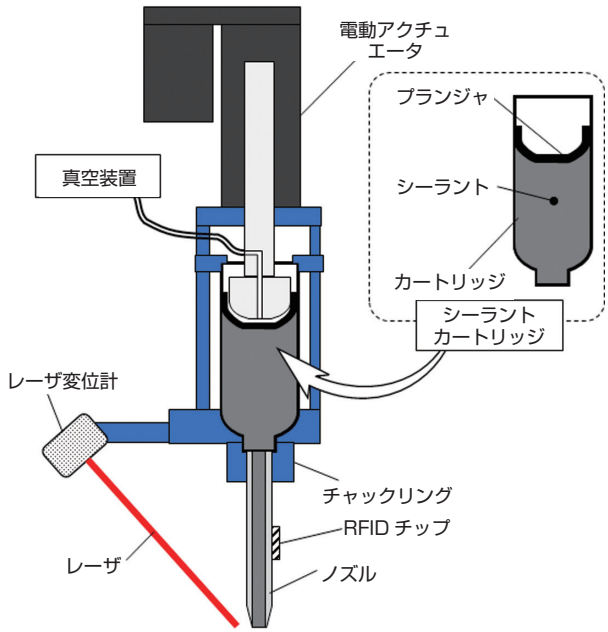


図７　シールガン構成図

4.1.2　シールガンの塗布動作ステップ

シールガンの塗布動作のステップを図8、および以下に示す。

ステップ1：ロボットでシールガンを塗布方向に対して、後傾の姿勢でパネルに位置決めする。

ステップ2：アクチュエータでシーラントを高速で押し込み、加圧する。これによりシーラントが均一に圧縮される。

ステップ3：モータの負荷が規定値に達したところで、アクチュエータを高速から低速に切り替える。ステップ2による加圧により、シーラントはノズル先端より安定して吐出される。

ステップ4：ノズルの先端にシーラントが吐出されたことをレーザ変位計で検知したのち、シールガンを移動させ、ワークへのシーリングを開始する。

ステップ5：進行方向のシーラント溜まりを、ノズルで押しつぶして整形しながらシーリングする。この時、シーラント溜まりの高さをレーザ変位計で計測し、これが一定になるようにロボットにフィードバックして、シールガンの移動速度を制御している。

ステップ6：シール端部でアクチュエータの動作を反転し、シーラントを引き込んだ後、停止させる。反転動作なしにアクチュエータを停止させた場合、残圧によりシーラントが数分間吐出され続けるが、本ステップにより良好な液切れが得られる。

ステップ7：シールガンをパネルより離し塗布が完了する。

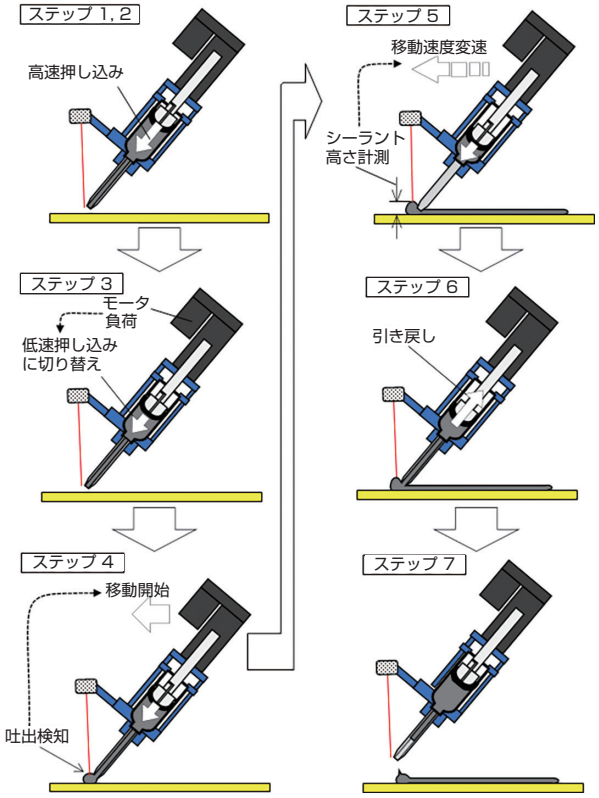


図８　シールガン塗布ステップ

4.2　ブラシコートツール

4.2.1　ブラシコートツールの構成と機能

ブラシコートツールは、ブラシとブラシを回転させるエアモータからなる。シーラントを吐出する機能はない。ブラシには市販の安価なカップブラシを採用し、使い捨てとすることで、塗布品質の安定化とメンテナンス性の容易化を図っている。

4.2.2　ブラシコートの塗布ステップ

ブラシコートの塗布ステップを図9および以下に示す。

ステップ1：シールガンでシーラントを細線状に塗布する。

ステップ2：シールロボットのエンドエフェクタをシールガンからブラシコートツールに持ち替える。

ステップ3：ブラシコートツールをパネルに位置決めしブラシを回転させる。

ステップ4：シールロボットを力覚センサにより倣い制御することで、ブラシのパネルへの押しつけ力を一定に保ちながらブラッシングする。

ステップ5：一つの面のブラッシング完了後、ブラシの回転を停止し、パネルからブラシを離す。

ステップ6：塗布面ごとにブラシの押し当て角度を変えて、ステップ3～5を繰り返す。

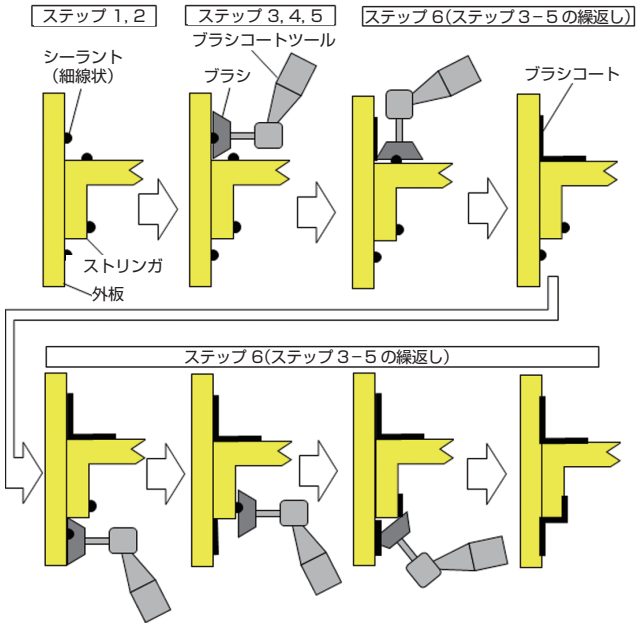


図９　ブラシコートの塗布ステップ

4.3　フィレットシール端部整形ツール

フィレットシール端部整形ツールは、先端に備えたヘラで、フィレットシール端部を切り取ることで整形を行う。ヘラは軟質かつ滑り性の良い樹脂材を採用し、パネルを傷つけることのないように配慮した。

また、フィレットシールの形状に合わせヘラを交換する必要があるため、ノズルと同様にRFIDチップを取り付けることで誤使用を防止している。

5.　生産への適用

5.1　品質保証試験

本装置の生産適用前に品質を保証できるか試験し評価した。評価項目は以下である。

①各シールの寸法(機体の要求値に入っているか)

②内部に空気混入による鬆(す)の有無

③シールのパネルへの密着性(剥がれがないか)

上記①～③の評価項目は満足していることを確認した。実際にシールロボットで塗布したフィレットシールの断面写真を図10に示す。

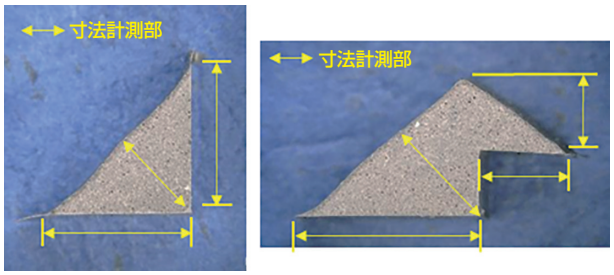


図 10　フィレットシール断面写真（品質保証試験）

5.2　生産適用

パネルのフィレットシールの8割程度を自動化に置き換えることができた。なお、2割の非適用部は、フィレットシールの断面形状が変化する箇所である。シール塗布テストの様子を図11に示す。

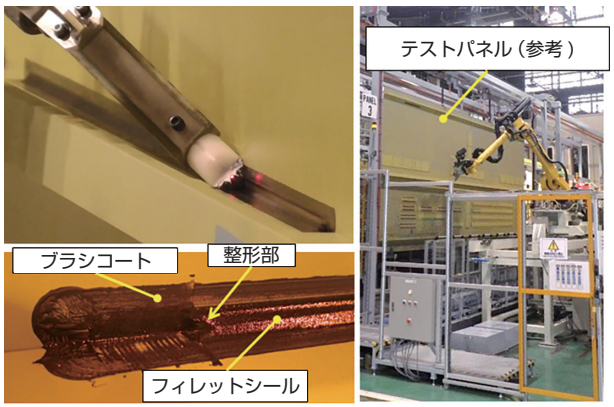


図 11　シール塗布テストの様子

6.　まとめと今後の展望

自動シーリング装置を適用することでシーリング工程の生産性と作業環境を向上することができた。

今後は本装置に対して以下を取り組み、さらに生産性と作業環境の向上を進める計画である。

①シーリングのサイクルタイム短縮

②品質安定化(不具合率の削減)

③シール検査削減(品質向上によるプロセス保証)

④自動化が適用できるシールの種類を拡大

7.　謝辞

本装置の開発は(一財)日本航空機開発協会(JADC)より(公財)航空機国際共同開発促進基金(IADF)の助成を受けて行い、本装置の最重要機器であるシールガンには東京大学生産技術研究所 ものづくりシステム連携研究センター(CMI)の研究成果が反映されている。また、生産への適用においてはBoeing社の協力を得ている。これらのサポートなくては本装置の成功はなく、感謝の意をここに申し上げる。

参考文献

(1) 東京大学：シーリング材吐出装置およびシーリング材吐出装置本体, 特許第6925616号
(2) 東京大学：シーリング材吐出装置およびシーリング材吐出装置本体, 特許第6898640号
(3) 株式会社SUBARU：シール剤吐出装置, 特開2020-58990
(4) 株式会社SUBARU：シール剤吐出装置, 特開2020-58991
(5) 松本洋平：自動シーリング装置の開発, 第58回飛行機シンポジウム講演集, 2A11（2020）

【著　者】

松本　洋平

SUBARU 長野県へ消防防災ヘリコプターを引き渡し

2020年11月19日

SUBARUは、2020年11月16日、長野県が消防防災ヘリコプターとして使用する予定の米国ベル・テキストロン社（以下、ベル社）製Bell412EPIの引き渡し式典を当社航空宇宙カンパニー宇都宮製作所（栃木県宇都宮市）において執り行いました。

引き渡し式典の様子

マルチエージェントUAVによる監視飛行行動

Surveillance Flight by Multi-Agent UAVs※

板橋 直亮[*1] ITABASHI Naoaki
椛山 智貴[*1] KABAYAMA Tomoki
河野 充[*2] KONO Mitsuru
勝本 健史[*3] KATSUMOTO Takeshi
菊池 航矢[*4] KIKUCHI Koya
斉藤 成信[*5] SAITO Shigemichi
星野 智史[*5] HOSHINO Satoshi

抄 録

本研究では複数の無人機による監視ミッションを設定し、無人機同士が協調を行う方法について理論的アプローチと機械学習によるアプローチの2方向から検討を行った。

理論的アプローチでは、各機の目的設定、役割設定、行動決定と3段階に分けてロジックを構築し、機械学習によるアプローチでは、これら全てを強化学習のみで行うようにした。

設定したミッションに対しては、どちらのアプローチでも協調してミッションを遂行することが可能であることを確認している。

本稿では、これらの手法について紹介を行う。

Abstract

In order to enable multiple UAVs to perform cooperative missions, our research has been conducted in two approaches: a theoretical approach and a machine learning approach.

The theoretical approach consists of the object setting logic of each aircraft, the role setting logic, and the behavior determining logic. In the machine learning approach, all of these are done only by reinforcement learning. Both approaches have been confirmed to be useful for the set mission.

These approaches are introduced in this paper.

※：Unmanned aerial vehicle

1. はじめに

航空業界ではAI、ドローン技術の発達により、無人機の活用が注目されている。無人機の特徴として、乗員がいないことで、高G制限といった生理的制約が無いことや、3D（Dangerous、Dirty、Dull）ミッションに向いていること等が挙げられる。また、無人機では、機数分のパイロットの確保が必要ないことから、有人機で行うより多くの機数を用いてミッションを実施することが期待できる。

このとき、やみくもに無人機の数を増やしても、各機が協調しなければ、投入した無人機の数に対して得られる成果は少なくなる。

このような背景から、今後の無人機の活用にとって重要なキーワードである「協調」をテーマに研究を行った。

協調とは「互いに協力し合うこと」である。本研究では、協調を実現するため、互いの状況に応じて役割や行動を変える方法について検討を行った。

状況に応じて役割や行動を変える方法としては、中央集権的に各機の行動を決定する方法と、自律分散的に各機がそれぞれ行動を決定する方法とがある。前者は無人機のみでミッションを行う場合に適用可能であるが、有人機と協調してミッションを行う場合には、パイロットの行動に応じて各無人機が行動を変えられる後者の手法の方が適している。そのため、本研究では将来的な有人機との協調を見据え、各無人機が各々考え行動を決定する「自律分散」による協調方法の確立を目指した。

なお、本成果は、宇都宮大学 知能ロボット・システム工学研究室との共同研究によるものである。

＊1 航空宇宙カンパニー　研究部
＊2 航空宇宙カンパニー　技術開発センター
＊3 航空宇宙カンパニー　システム設計部
＊4 航空宇宙カンパニー　自律システム設計部
＊5 宇都宮大学

2.　研究の概要

研究を行うにあたり、「無人機同士が協調して、進入機を捉え、識別する」というミッションを設定した。対象とする環境を図1に示す。

このミッションでは、監視を行う無人機である監視機（1機）及び探索機（3機）が、進入機（1機）を捉えるよう行動する。監視機は、自機を中心とした監視領域内の進入機の位置を検知可能ではあるが、進入機が何であるか識別は不可能、探索機は自機近傍の進入機の識別が可能、進入機は監視領域を通過するものとした。なお、協調行動の効果を明確に示すため、進入機の速度を探索機や監視機より1.5倍から2倍程度速くしている。また、監視領域内部であれば監視機と探索機の通信は可能とし、探索機は監視領域から逸脱してはいけないものとした。

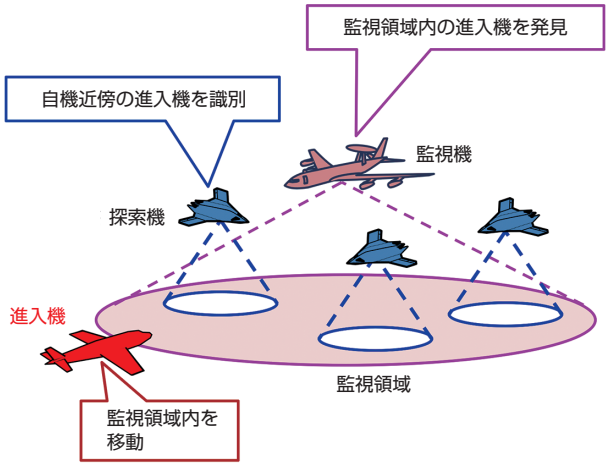


図1　対象とする環境

この環境を用いて、探索機が進入機に接近し、識別を行えた場合をミッション成功とし、進入機もしくは探索機が監視機の監視領域の外に出た場合には失敗とし、その成功率で協調のロジックを評価した。

この問題設定には2種類の協調、すなわち探索機同士の協調、監視機と探索機の協調がある。

探索機同士の協調では、探索機がフォーメーションを組んで進入機を追い込み、いずれかの探索機が識別を行えるように各々行動することが望ましい。

監視機と探索機の協調では、監視機は進入機、探索機ともに監視領域の外に出ないように移動し、探索機は進入機を追いつつ、監視機の移動を考慮し、監視領域の外に出ないように移動することが求められる。

これらを可能にするため、まずは探索機同士の協調について、理論的なアプローチと機械学習によるアプローチの2方向から研究を行った。

3.　探索機同士の協調

3.1　理論的アプローチ

3.1.1　理論的アプローチの構成

理論的アプローチでは、人と同様に将来を予測し、予測を基に行動を決定する構成でロジックを構築した。

具体的には、まず進入機の移動の予測を行い、予測結果をベースとした報酬のマップを生成、報酬を基に状態価値のマップを生成、状態価値を基に各機の行動を決定する。ここでの報酬とは、進入機を捉えられる可能性を得点化したイメージであり、状態価値とは将来的に得られる累積点のイメージである。つまり、予測結果をベースとした得点のマップを生成し、得点のマップから期待される累積得点のマップを生成、累積得点のマップから行動を決定する。

(1) 進入機の移動の予測

進入機の移動の予測は、進入機の移動方向を統計的に処理し、処理結果から移動確率（確率密度）のマップを作成することで行う。

統計的な処理としては、角度観測値を含むデータを扱う学問分野である方向統計学の代表的な確率分布モデルであるフォン・ミーゼス分布を用いた。フォン・ミーゼス分布は以下の式で表される。

$$f(\theta) = \frac{\exp\{\beta \cos(\theta - \mu)\}}{2\pi I_0(\beta)}$$

θ：確率変数（$-\pi \leq \theta \leq \pi$）
μ：基準角
β：パラメータ（移動方向統計量）
$I_0(\beta)$：0次の第一種変形ベッセル関数

このフォン・ミーゼス分布を用いた移動の予測例を図2に示す。この図は、進入機の右旋回を予測した例で、青が濃いほど移動確率が高い。進入機から近い場所の移動確率は非常に高く、離れると移動する可能性があるエリアの幅は広がり、各セルの移動確率の値は低くなる。

次に、このマップをベースに報酬のマップを生成する。

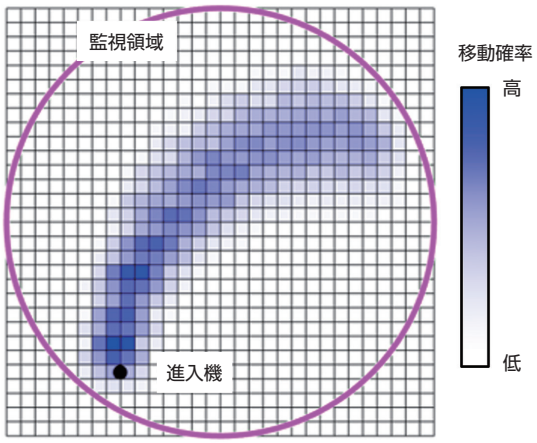


図２　フォン・ミーゼス分布を用いた移動予測例
（移動確率のマップの生成例）

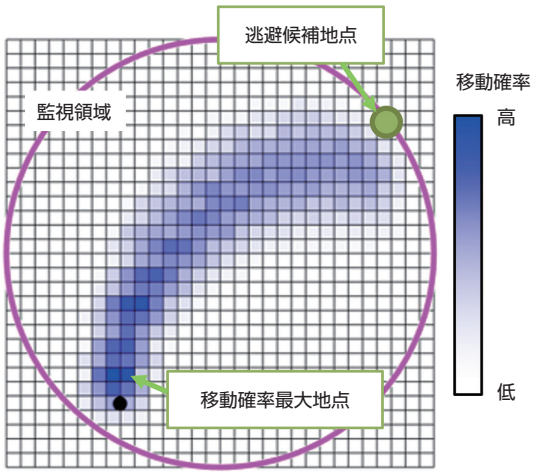


図３　移動確率最大地点、逃避候補地点

(2) 報酬のマップの生成

報酬のマップは、移動確率のマップを基に、移動確率最大地点、逃避候補地点との距離を組み合わせ、以下の式で生成するようにした。

$$R(s_j|s_i,a_{ij}) = \alpha(i)(\omega_1 P(i) - \omega_2 D_P(i) - \omega_3 D_E(i))$$

R：報酬
P：移動確率
D_P：移動確率最大地点との距離
D_E：逃避候補地点との距離
ω_1、ω_2、ω_3：重み
α：遭遇可能領域で1、遭遇不可能であれば0とするパラメータ
i：セルの位置

移動確率最大地点、逃避候補地点のイメージを図3に示す。

移動確率最大地点は、最も移動確率が高い地点で、このセルとの距離に応じて報酬が減るようにすることで、積極的に相手機に向かうようにすることが可能となる。

逃避候補地点は、監視領域の外周上で移動確率が最も高い点であり、この位置との距離に応じて報酬が減るようにすることで、先回りする行動をとらせることが可能となる。

(3) 状態価値のマップの生成

状態価値のマップは、報酬のマップに価値反復法を適用することで生成する。価値反復法とは、最適な行動を取り続けた場合に、獲得が期待できる報酬の累積値を反復計算により求める手法で、この累積値が状態価値である。

状態価値のマップの生成例を図４に示す。

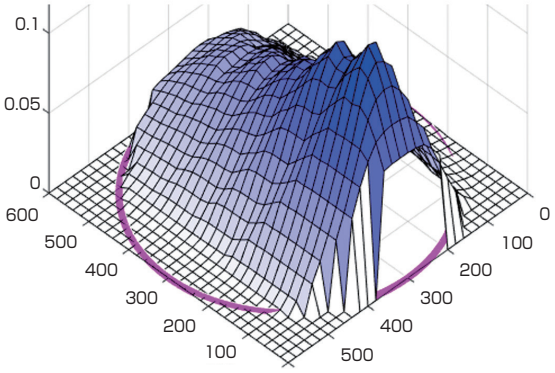


図４　状態価値のマップ例

(4) 行動の決定

行動は、状態価値のマップを用いてグリーディに決定する。すなわち、現在の推定される行動の価値の中で、最も価値の高い行動を選ぶ。

ここまでのロジックは単機での行動を決定する方法であり、このロジックだけでは協調を行うことはできない。協調を促すには、協調用の報酬を設定する必要がある。

本研究では、各機体の状態価値からリーダ機を決定し、リーダ機でない機体に協調用の報酬を与えるようにした。

(5) 協調用のロジック

各探索機の状態価値の値は、進入機との位置関係に応じて決まり、この値が大きいほど、良い位置にいることを意味している。このことから、最も状態価値が大きい機体をリーダ機に設定し、残りの機体はフォローに回るようにした。

フォローの仕方として、進入機が方向変換した場合にも捉えられるように、逃げ場を無くすような位置取りをすることが考えられる。それを最も効率的に行

う隊形は正三角形(探索機が3機の場合)であることから、進入機を正三角形の重心に置くように行動させるよう、フォローに回る機体の報酬に隊形報酬($\beta(i)P_L$)を加え、下式のようにした。

$$R(sj \mid si,a_{ij}) = \alpha(i)(\omega_1 P(i) - \omega_2 D_P(i) - \omega_3 D_E(i)) + \beta(i) P_L$$

$\beta(i)$：セルiが指定された隊形であれば1、隊形でなければ0とするパラメータ

P_L：リーダ機の状態価値が最大となる地点の進入機の移動確率

ここで$\beta(i)$は指定した隊形(正三角形)の辺上に位置する場合は有効、辺上でない場合は無効とするパラメータで、P_Lはリーダ機の成功確率(予測値)である。

この項を報酬に追加することにより、リーダ機の成功確率が高い場合にはリーダ機のフォローに徹し、リーダ機の成功確率が低い場合には自身の行動決定ロジックに従った行動を取るようにした。

隊形報酬の例を図5に示す。リーダ機は、自機の行動決定ロジックに従い、三角形の頂点に向かう。フォローに回った機体は、自機の行動決定ロジックに従いつつも、図5中の隊形報酬が設定された緑のエリアを優先的に移動する。

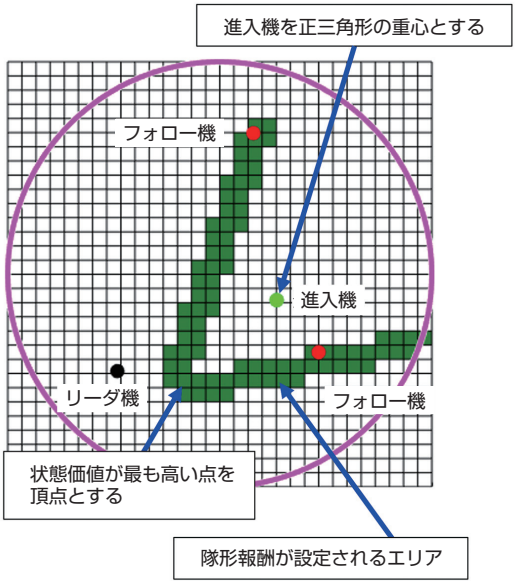


図5　隊形報酬の例

3.1.2　理論的アプローチのシミュレーション例

協調用のロジックを用いて実施したシミュレーション例を図6に示す。まず進入機の進行方向に探索機2がリーダとして向かい、探索機1、探索機3はフォローに向かった。そして、進入機が逃げようと向きを変えたが、探索機1がリーダ機に変わり進入機を捉える結果となった。

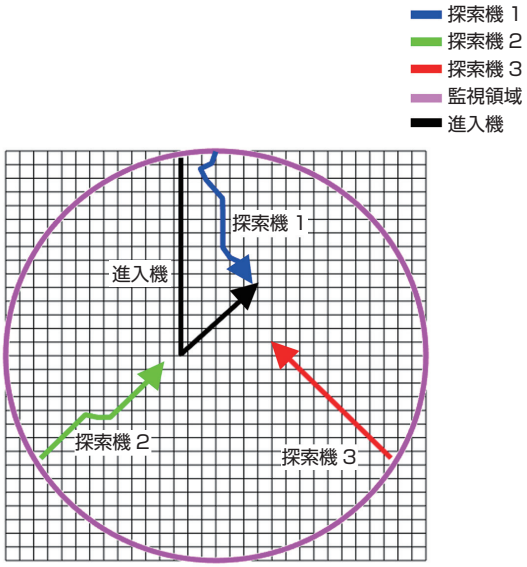


図6　協調用のロジックを適用した場合

比較として、協調用のロジックを適用しない場合のシミュレーション例を図7に示す。各機体が進入機を捉えに行った。そして、進入機が逃げようと向きを変え、大きく空いた探索機1と探索機3の間を進入機が通り抜けてしまう結果となった。

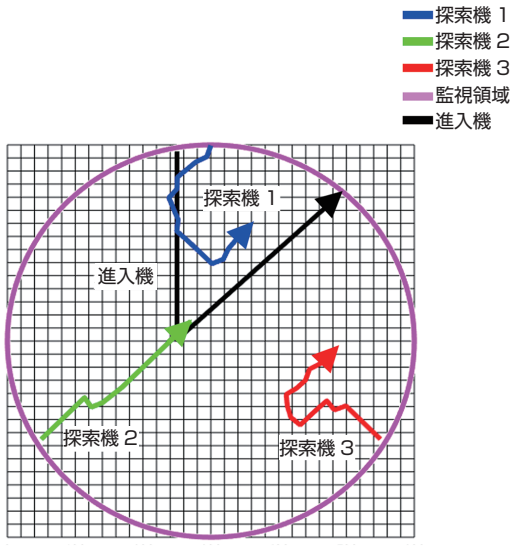


図7　協調用のロジックを適用しない場合

3.1.3　理論的アプローチのまとめ

理論的アプローチでは、進入機の移動の予測を行い、予測結果から報酬、報酬から状態価値、状態価値から行動を決定するロジックを構築、また状態価値からリーダ機とフォローに回る機体とを決定し、それぞれに役割に応じた行動をとらせるようにした。そして、

構築したロジックを用いて協調の有効性を確認した。

今回構築したロジックは、各機体の行動が報酬のみに依存することから、設計者は基本的に報酬の設計に集中することができる。もちろんミッションによって、具体的な役割や報酬は異なるが、今回構築した、将来を予測し、役割を決定し、それぞれが役割に応じた行動を取るという大枠は一般的なものであり、協調行動を設計する考え方の一つが得られたと考える。

3.2　機械学習によるアプローチ

3.2.1　機械学習によるアプローチの構成

(1) 強化学習の構成

機械学習によるアプローチでは、同様の問題に対し、強化学習によって、進入機の情報及び自機以外の探索機の情報から行動を決定するようにした。

進入機の情報の定義を図8に示す。進入機の情報は、自機の位置及び飛行方位を基準とした相対座標系における進入機との距離、方向及び飛行方位を用いた。

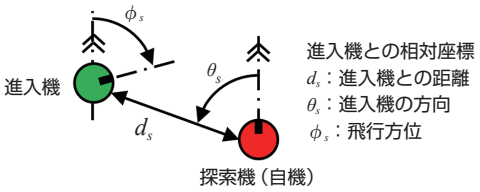


図８　進入機の情報の定義

自機以外の探索機の情報の定義を図9に示す。自機以外の探索機の情報は、自機の位置及び飛行方位を基準とした相対座標系における自機以外の探索機との距離及び方向を用いた。

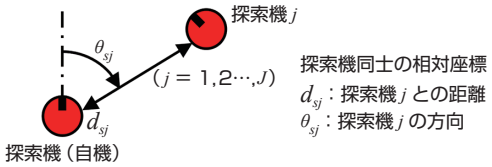


図９　自機以外の探索機の情報の定義

強化学習には、これらの進入機の情報、自機以外の探索機の情報を入力として、取り得る行動の重み（報酬の推定値）を出力するRBFnet（Radial Basis Function networkを用いた。RBFnetとは、入力層、中間層、出力層の3層を有し、中間層に基底関数を用いたニューラルネットワークのことである。本研究では基底関数にガウス関数を用いた。

強化学習の構成を図10に示す。この構成により、状態（進入機の情報、自機以外の探索機の情報）に応じて、各行動の重みが出力され、その重みから行動を決定する。

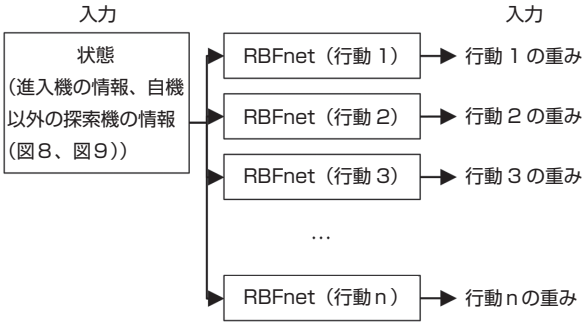


図 10　強化学習の構成

(2) 学習方法

強化学習は、1エピソード（ここでは探索機が進入機を捉え識別を行う、もしくは探索機が進入機を捉えられず、進入機が監視領域の外に出るまで）が完了後に、結果を評価して報酬／ペナルティを与えて、RBFnetを更新するようにした。

具体的には、エピソード終了時の（状態、行動）に成功であれば報酬、失敗であればペナルティの最大値を与える。次に、1ステップ遡った（状態、行動）に対し、割引率を乗じた報酬／ペナルティを与える。これを初期条件まで繰り返し遡ることで、そのエピソードで経験した（状態、行動）の重みを更新し、学習を進める。

探索機は3機いるため、それぞれに異なる報酬を与えることも考えらえるが、各機のフォローに回った行動が良かった可能性もあるため、成功した場合には全ての探索機に同じ報酬を与えた。

3.2.2　機械学習によるアプローチのシミュレーション例

強化学習を用いて実施したシミュレーション例を図11に示す。シミュレーション結果から、互いの位置関係に応じて、進入機の進路を塞ぎに行く探索機、フォローに向かう探索機と役割を分担し、協調するような行動が確認できた。これは、理論的アプローチのように、進入機の前方にいる探索機がリーダ機のように振る舞い、残りの探索機が隊形を作るような協調であった。

比較として、自機以外の探索機の情報を用いず、進入機の情報のみを入力として学習させた場合のシミュレーション例を図12に示す。各探索機が進入機に向かうのみで、協調した動きは見られず、進入機を逃してしまう結果となった。

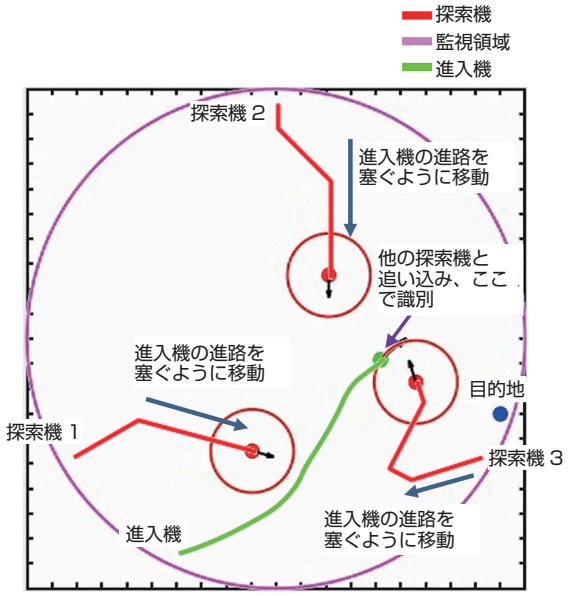


図 11　進入機の情報、自機以外の探索機の情報を入力とした場合

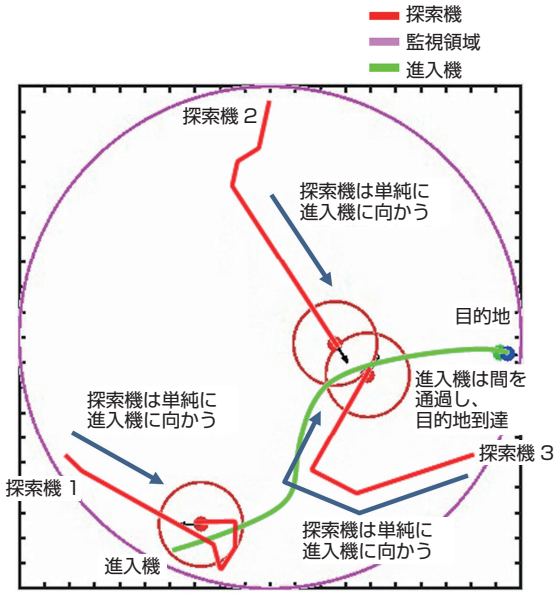


図 12　進入機の情報のみを入力とした場合

3.2.3　機械学習によるアプローチのまとめ

機械学習によるアプローチでは、進入機及び探索機の情報を入力とする強化学習を適用し、シミュレーションを実施した。

強化学習は、進入機及び探索機の情報を入力とし、学習させることで、協調的な行動を行わせることができた。協調に関しては、理論的アプローチでは隊形を正三角形と限定したが、強化学習では状況に応じてより良い隊形を選択している可能性がある。

ただし、強化学習は学習した環境に特化しており、例えば探索機を1機増やす、進入機や探索機の性能が変わるなど、学習した環境と異なる条件となった場合には、再度学習をしなおす必要がある（理論的アプローチでは、隊形報酬を変更するのみなので、直ぐに対応可能である）。また、学習させるのにもノウハウや膨大なシミュレーション数が必要である。

4.　監視機と探索機の協調

4.1　監視機と探索機の協調ロジックの検討

ここまでの検討においては、監視機の位置を固定し、固定された監視領域の内部のみで進入機の識別を行っていた。しかし、監視機も進入機に追従することによって、従来は逃してしまった進入機の識別も可能となる可能性がある。そこで、監視機と探索機の協調について検討を行った。この協調は、異なる機能／性能を有する機体の協調であり、同じ機能／性能を有する探索機同士の協調とは違った難しさがある。

監視機と探索機の協調を考える上でポイントとなるのは、監視機は進入機に接近しても識別はできないということである。つまり、監視機は、自らが探索するのではなく、探索機が動きやすいように行動しなければならない。そのための監視機の行動ロジックをシンプルに考えると、監視機を3機の探索機の中心（重心）に位置させることで、各探索機の行動範囲を確保できるように思える。しかし、このロジックでは、条件によっては探索機の行動を制限することになる。

監視機が探索機の行動を制限した例を図13に示す。この例では、3機の探索機が進入機を追従し、それぞれの探索機は進入機との会合点方向に向かっているのを模式的に表したものである。この状態から、次の場面（矢印の先）に移った場合には、監視機は図の下方向に移動し、最も進入機を捉えることができそうな図の上部に位置する探索機は監視領域を逸脱することになる。

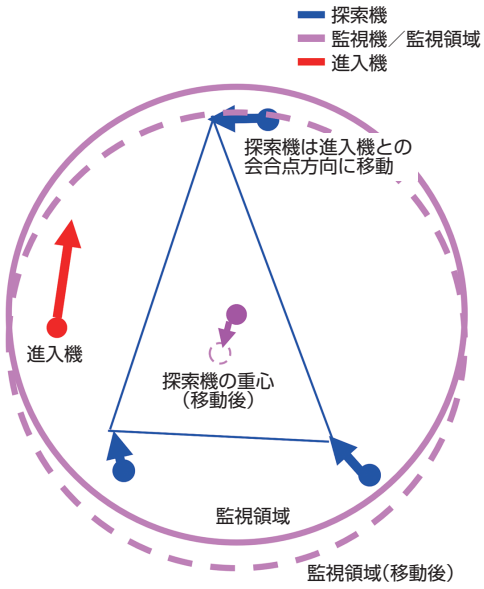


図 13　監視機が探索機の重心に移動した場合

この様な場面にも対応可能にするため、各探索機のミッションに対する寄与度を計算し、位置だけでなく寄与度を考慮し、監視機の行動を決定するようにした。具体的には、各機体の位置に各機体の寄与度を乗じ、それらの和の中心に監視機が移動するようにした。

なお、本研究では、寄与度に状態価値(3.1.1項参照)を用いた。また、各探索機についてミッションに対する寄与が少ないと判断した場合には、進入機に向かうのではなく、監視領域から逸脱しないよう追従することでチームへ貢献するというように、役割を固定化せず、目的の切り替えができるようにした。

4.2　監視機と探索機の協調のシミュレーション例

監視機と探索機の協調のシミュレーションの例を図14に示す。監視機が、各探索機の寄与度と位置から、行動を決定することにより、また、探索機1が監視領域からの逸脱を防止するように行動したことにより、従来では逃してしまっていた進入機を捉えることが可能となった。

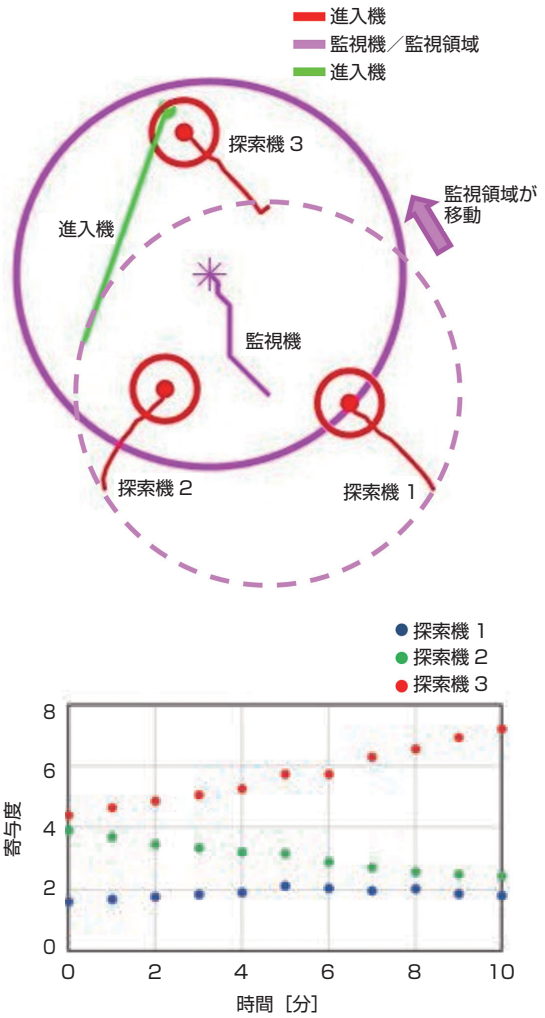


図14　監視機が寄与度を考慮した位置に移動するシミュレーション例

5.　まとめ

ミッションを協調して行えるようにするため、理論的アプローチと機械学習によるアプローチと2方向から研究を行った。今回設定した問題に対しては、どちらのアプローチでも協調してミッションを行えることを確認した。

この2つのアプローチのフローを図15にまとめた。理論的アプローチでは、各機体の目的(進入機に向かう、監視領域から逸脱しないようにする)を設定、役割(リーダ機、フォロー機)の設定、そして行動(向かう方向)を決定する。

機械学習によるアプローチでは、これら全てを強化学習のみで行う。

どちらが良いというものでもなく、ミッションに応じて適切に選択すべきだと考える。また、現状、それぞれが独立したロジックだが、これらを複合的に使えるようにすることに関しても検討の余地がある。

今後、この枠組みをさらに発展させ、有人機と無人機とが協調して目的を達成できるよう技術開発を続けていく。

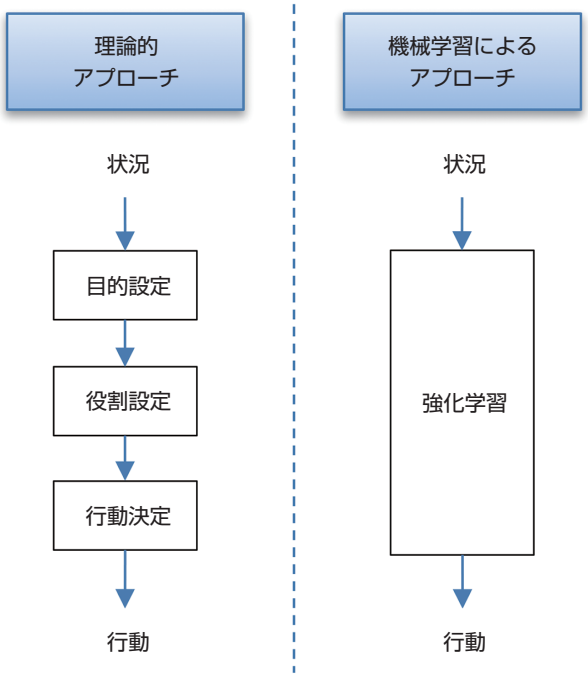


図15　協調行動に向けた２つのアプローチ

参考文献

(1) 勝本ほか：移動する監視対象の経路予測に基づいたUAVによる上空監視システム，第31回自律分散システム・シンポジウム

(2) S. HOSHINO： Aerial Surveillance System with Multiple Agents for Moving Targets, SICE 2020

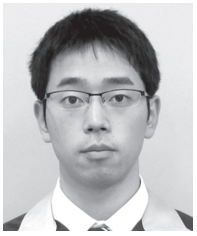
(3) 菊池ほか：マルチエージェントUAVによる監視飛行行動の強化学習, SI2020
(4) 斉藤ほか：探索機の寄与度を考慮した見張機と探索機による協調的な上空監視システム, SI2020
(5) 斉藤ほか：見張機と探索機による協調的な上空監視システムの提案, ロボティクス・メカトロニクス講演会

【著　者】

板橋　直亮

椛山　智貴

河野　　充


勝本　健史

菊池　航矢

斉藤　成信

星野　智史

SUBARU「Outback Wilderness（アウトバック ウィルダネス）」を米国で発表

～安心感や快適性はそのままに、機能強化で個性を際立たせたSUBARU SUVの新価値提案～

2021年3月31日

- **9.5インチの最低地上高に専用サスペンションやオールテレーンタイヤを組み合わせ、走破性を強化**
- **ひと目で高い機能性を予感させる、専用の内外装デザイン**
- **アウトドアフィールドでの実用性を高める充実した装備**

SUBARUは、北米専用車「Outback Wilderness（アウトバック ウィルダネス）」を米国で発表しました。

アウトバック ウィルダネス（米国仕様車）

SUBARUの水平対向前輪駆動軸の前傾レイアウトとサスペンションジオメトリの関係

Relationship between Front Wheel Drive Shaft Forward Tilt Layout of SUBARU's Horizontally-Opposed Engine and Suspension Geometry

川　合　　真[*1]　KAWAI Makoto
古　瀬　智　広[*1]　FURUSE Tomohiro
坂　崎　明　彦[*2]　SAKAZAKI Akihiko

抄　録

現在の当社のフロントサスペンションは初代レガシィのレイアウトをベースに熟成させてきた。FFベースの水平対向エンジンの搭載位置とフロントサスペンションジオメトリの要件上、高角CVJの採用などもあり前駆動軸 前傾レイアウトを成立させ現在の当社商品でも踏襲しているが、ここに至るまでの経緯をまとめた報告書などは無い。

本稿ではSUBARU1000、1300のフロントレイアウトを簡単に振り返り、そこから初代レガシィに移行する際の検討経緯、またこのフロントレイアウトが昨今の当社の強みである衝突安全性にも繋がっている事も含め車両パッケージ全体の視点で報告する。

Abstract

The front suspension of the current SUBARU model is refined based on the first generation of LEGACY. The front drive shafts of LEGACY models have a little inclining angle enabled by the high-angle constant velocity joint. This report reviews the development story of the front layout.

In the review, the front layouts of SUBARU 1000, SUBARU 1300, and the first LEGACY are reported. The relationship between the front layout and the passive safety features are also reported from the viewpoint of the whole vehicle package.

1.　まえがき

旧シャシ設計部OBの坂崎は、当社の足回りや基本諸元について、膨大なTS（Technical Standard）を残している。坂崎の当社社員としてのタイムリミットも近いことから、TSに残されていない現水平対向前輪駆動軸前傾の訳を中心に、坂崎から川合、古瀬に伝授したので報告する。

2.　現水平対向前輪駆動軸前傾の訳

2.1　SUBARU 1000～1300Gは前傾せず？

このシリーズでは、前輪駆動軸に前傾角は殆ど付いていなかったが、代わりに下半角が付いていた。

これは、スタビライザ無しでロールを抑えようとした、高めのロールセンタのダブルウィッシュボーン式サスペンションに対応して、前輪駆動軸のトランスミッション側ジョイントのスライドを小さくする事を狙い、デフの位置を前輪中心に対し高く配置したためと聞く（図1）。

このシリーズの排気系は、有名な欧州の空冷水平対向4気筒RR大衆車同様、エンジンヘッドの前後から出ており、排気系はステアリングギヤボックスの上を通っていたので、後述のレオーネの様にデフ下げのネックにはなってない。

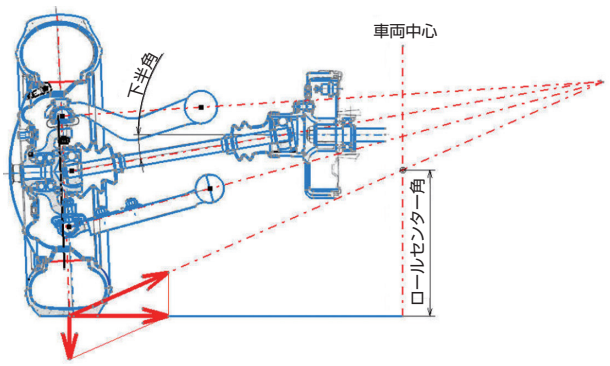


図1　SUBARU 1000～1300Gの前輪駆動軸 (1)

＊1 ボディ設計部
＊2 STI車体技術部 出向

2.2　レオーネも前傾せず？

その後の初期型のレオーネでも図2のとおり、前輪駆動軸の前傾角は極めて0度に近かったが、前輪駆動軸の下反角がSUBARU 1000 ～ 1300Gシリーズよりも大きくなった。

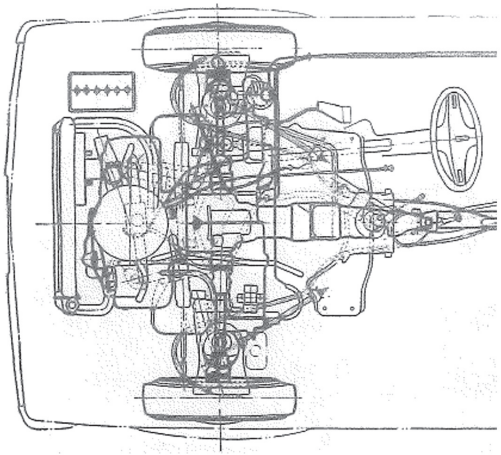


図２　レオーネ初期型の前輪駆動軸 [2]

これは、将来のS53年排ガス規制等を見据えた対応で排気浄化上、排ガス温度を下げない様にするため、排気系ポートが下出しになり、①馬力と排ガス浄化を考えた径の排気系がステアリングギヤボックスの下を通り、②そこから熱害対策上必要な隙間を取り、③ステアリングギヤボックスのブーツを配置すると、④ステアリングラック中心が決まり、⑤強度剛性上必要なラック径が決まり、⑥それをカバーするギヤボックスのパイプ径が決まり、⑦パワーユニットの上下動きに相当する必要隙間を取って、⑧スタータモータのかみ合うリングギヤの位置が決まり、⑨その中心からデフのドライブピニオンの位置が決まり、⑩ハイポイドのオフセットからデフ中心が決まる。このデフ中心と前輪タイヤ中心の高さ（車両上下方向）の差が大きくなり、下反角が付いてしまったとの事（図3）。

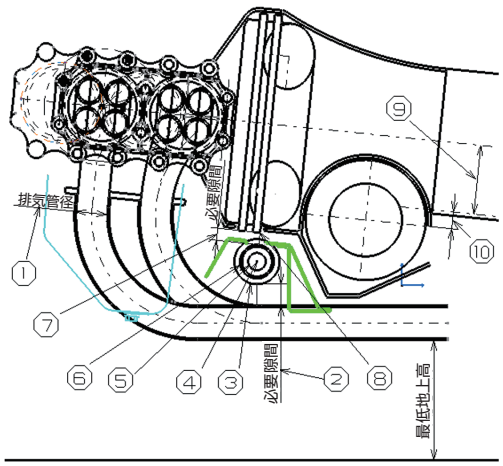


図３　下回し排気系、ステアリング、デフ中心の関係
（エンジンは現代的イメージで作図）

2.3　水平対向前輪駆動軸はレガシィから前傾？

続いて、初代レガシィの検討経緯を振り返る。

★排気量増加でエンジン全長増大

レガシィの4気筒は水平対向の2次の起振力が小さく2ℓを超える排気量でもバランサシャフト無しで十分低振動なメリットを生かし上限を2500 ccとしたため1800 ccが上限のレオーネのエンジンより、同じ設計で1割方エンジン全長が伸びた（図4）。

★3→5ベアリング化でエンジン全長増大

レオーネの最終型では1800 ccのOHCも出たが、3ベアリングのままではパワーを上げて行くとクランクケースやクランクの耐久性が持たない事が判っていたため初代レガシィでは検討当初から全車5ベアリングで計画を進行、その結果エンジン全長が伸びた（図4）。

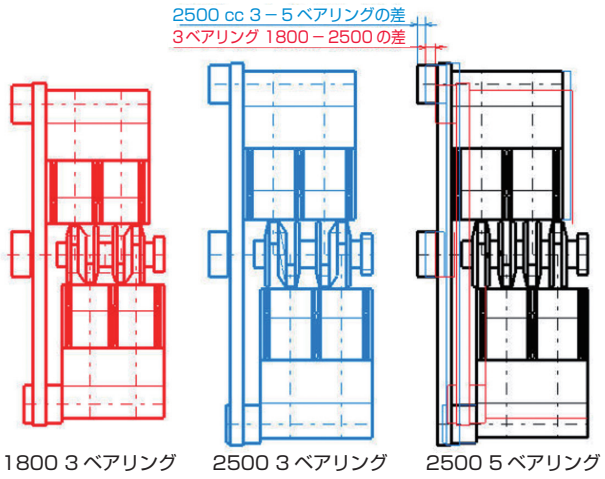


図４　排気量とベアリング数のエンジン全長への影響

★エンジンとデフの間の前後寸法増大

排気量2500 cc、エンジン出力200 PS以上に対応するため、ATのトルクコンバータやロックアップクラッチ、MTクラッチ、トルクダンパーは大容量化が必要になり、デフのリングギヤも大きくして、エンジンとデフ中心の間の寸法も増えた。

★タイヤ中心とホイールアーチ間の前後長増大

前述のエンジン出力200 PS以上のラインナップがあって「アウトバーンで200 km/h以上でクルージング可能とすること」との前程条件が加わると、当時の欧州の高性能車の相場でタイヤの幅は最低205、リムは最低15インチと割り出し、その頃の技術水準として操縦安定性と乗り心地のバランスに優れる扁平率60となり[3]、これによりタイヤ径が決まり、タイヤ中心とホイールアーチ間の前後長も増えた。

★車両全長は制限された

当時当社の置かれた状況としてはレオーネの全長

4,410 mmを大幅に超えた企画は考えられず、4550 mm（最終的には4,545 mm）が全長のリミットとなった。

★売り物になる車両緒元を逸脱した

すると、車両前端からバンパ、コンデンサ、ラジエータ、エンジン脱着スペース、クランクプーリとの関係を従来のままとしても、エンジン前端からデフまでの距離が長くなった影響でデフの位置は各部品の玉突きで後退し、前輪中心も後退し、径の大きくなったタイヤのホイールアーチが後退し、室内長は全長、ホイールベースを伸ばした（図5のD）にも関わらず、タイヤ径の拡大と前輪中心の後退で減少（図5のB-C）、前オーバハングもレオーネに対して大幅に拡大した（図5のA）。

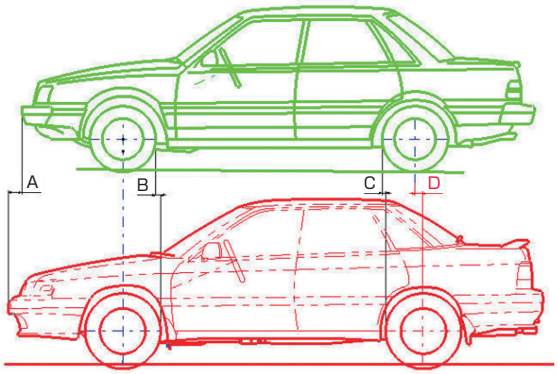


図５　レオーネ最終型とレガシィ開発初期段階比較の図

★レガシィ前輪駆動軸前傾化の経緯

坂崎は、P社製スポーツカーが量産初期のオーバステア対策の決定打としてエンジンの位置を変えずにホイールベースの57 mm延長（後輪中心の後退）をした事を知っていたので[4]、「逆P社やりゃぁ良いじゃねえか。」と提案した。

レオーネの前輪駆動軸の大きな下反角で等速ジョイント（以下CVJ）の許容角がギリギリな事で苦労していた車両開発リーダは「そんなを事したらCVJが許容角パンクで成り立た無いじゃないか。」と即応、一時検討は頓挫したが、その後暫くして前輪駆動軸設計部門長が、「こう言う手がありますよ。」と超高角CVJを提案して来た（図6）。

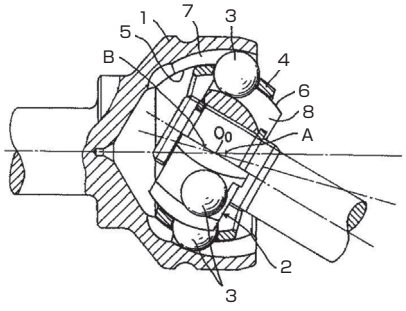


図６　超高角 CVJ の例 [5]

早速ジオメトリの検証をすると、幅の狭いタイヤで転舵によるタイヤとサイドフレームの隙間をギリギリまで攻め、旋回時の最小回転半径を確保した状態でも、辛うじてCVJが許容角度に収まる事が判明しこれを採用する方向で進む事になった（図7）。

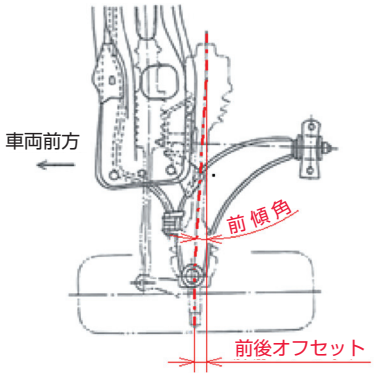


図７　初代レガシィの前輪駆動軸の前傾角

3.　駆動軸前傾のメリットは？

3.1　居住スペース確保とFtオーバハング低減

フロント・デフの位置に対し、車輪中心前方移動により、居住スペースが確保出来、オーバハング低減が出来たのが一番のメリットである。

図8にパワーユニットの位置不変で前輪中心を前出しした車両側面図を示したが、赤細線の位置にあったタイヤが青い位置まで前進しており、見た目にも違いは明らかである。

大きなFtオーバハングは、デザイン上の制約にもなっており、これを少しでも低減する事はデザイン自由度の拡大にも貢献する。

当社の伝統的水平対向4気筒レイアウトは、デフの前に縦置きに配置されたエンジンのFtオーバハングが同クラス横置き直列4気筒エンジンより100 mm以上大きく、パワーユニットの位置をそのままに前輪駆動軸を前傾させると、ラジエータ下部の上下位置を同じにすればアプローチアングルが増えて走破性が向上するし、アプローチアングルを同じにすれば、前下方視界角度とアプローチ角度に挟まれたラジエータの上下寸法を大きく出来るので、冷却性能上も有利になる。

3.2　前面衝突荷重を受ける部分の強化

エンジン左右メインフレームに掛かる衝突荷重は、車体の後方にしっかり伝えなければならない。

タイヤの後ろのスペースを確保する事で、図9のフロントピラー下部の緑の○で示した部位を強化しメインフレーム（サイドFFフレーム）の衝突荷重をサイドシルに伝える事が出来た。

タイヤを前出しして、ここのトルクボックス的な必要断面を確保する事は、その後当社が衝突安全性能で世界レベルになるためのMUST要件であった。

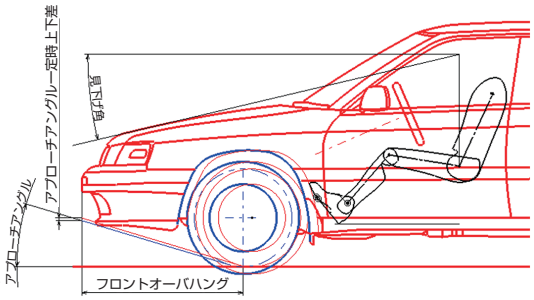


図８　タイヤ前出しの効果

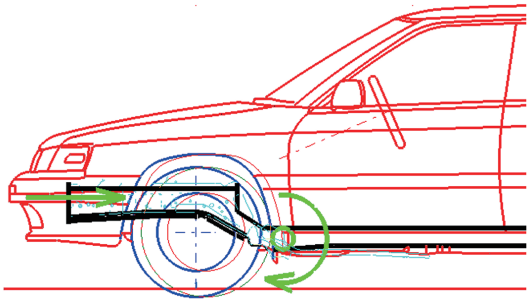


図９　タイヤ前出しによるフロントピラー下部構造

3.3　回頭性の向上

前輪中心に対し、パワーユニットを後退させられたため、回頭性が向上したが、これには図10のイラストが直観的に理解するのに役立つであろう。

図 10　旋回のし易さ、スピンの止め易さ

一般に操安性の簡易解析では、重心周りのイナーシャに対し、4輪のスリップアングルやコーナリングフォースで運動方程式を立てて解を求める事が多いが、旋回の開始時点に限定すると、後車軸中心周りの運動と捉え、中学の理科の範疇で、ニュートンの第2法則F＝M α と梃子の計算で理解出来る。

WRC（FIA世界ラリー選手権）では、当時ベース車に対し半径25 mmの範囲でデフ位置を移動して良い規定だった事から、SUBARUは限度いっぱいまでパワーユニットを後ろに移動して戦っていた。

結果、回頭性はさらに向上したがCVJのイニシャル角度は大きくなり、WRC車両の舵角が量産車よりかなり小さかったために実現できた。

3.4　前軸重量配分の軽減

前輪固定で考えると、パワーユニットの重心を後ろに下げられる、パワーユニット固定で考えると前輪を前に出せる事から、前軸重配を軽減する事が出来る。

計算は、回頭性のモーメント計算と同じである。

但し、当社の量産水平対向FWDの先祖のSUBARU 1000 ～ 1300Gでは、欧州のFWD先駆車が前軸荷重61%程度にしているところ、前軸荷重が軽く成り過ぎ、対策としてバッテリを出来るだけ前に置いたり、エンジンルームにスペアタイヤを置いたりしたくらいだから、本項は利点に当てはまらない場合もある。

3.5　左右輪舵角差の確保

水平対向エンジンのコンベンショナルレイアウトでは、ラック＆ピニオン式ステアリングギヤボックスを前輪用デファレンシャルギヤの前、エンジンオイルパンの後ろ前置きにする。

一般的に、アッカーマン・ジオメトリではその舵角差を確保するために、タイロッドエンドはギヤボックス前置きではキングピンより外側に、ギヤボックス後置きではキングピンより内側に配置される（図11）。

今日的車両では、キックバックや駆動力でのハンドルの取られを抑えるために、ホイールセンタでのキングピンオフセットはかなり小さくなっているので、キングピンはホイールセンタに極めて近い。

同じく回転アンバランスマスを振動対策上ホイールセンタに近付ける必要から、ブレーキディスクは車輪の中心面に置きたくなり、ギヤボックス前置きの場合、タイロッドエンドは、これとの干渉でキングピン軸より必要量外に出すのが困難になる（図12）。

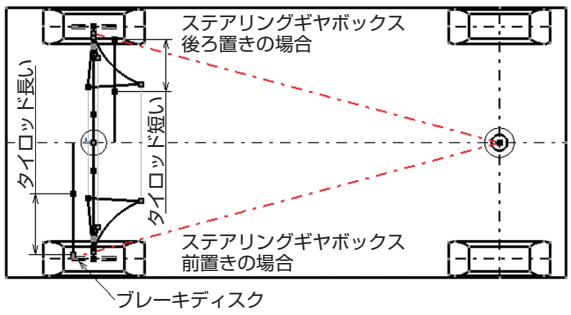


図 11　タイロッドエンドのあるべき位置

ここで、前輪駆動軸に前傾角を付けると、前輪に対してデフの位置が後ろに下がるから、ステアリングギヤボックスも後ろに下げられ、タイロッドにも前傾角が付くので、これがタイロッドエンドを外に出したのと同様の効果を生んで、必要舵角差に近いジオメトリを得る事が出来る（図12の青の状態）。

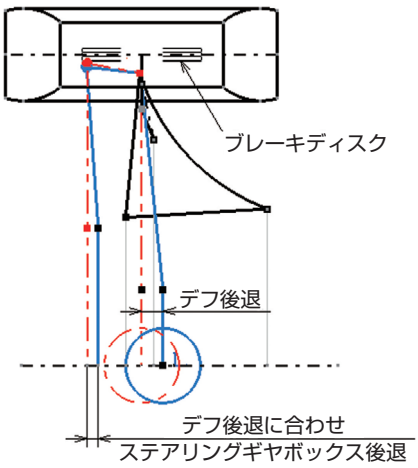


図 12　デフ後退により可能になったステアリング後退

試しに、レガシィのサスジオメトリで、ステアリングギヤボックス後退無しと後退の双方について、ラックストロークを70 mm動かした時の最小回転半径とスリップアングルの比較をしたのが図13である。

ステアリングギヤボックスの僅かな後退で、最小回転半径は内輪が大きく切れる事により僅かに減少、スリップアングルは、パラレルステアリングに近かったのが、アッカーマン・ジオメトリに近付き、スリップアングルが大幅に減少している事が判る。

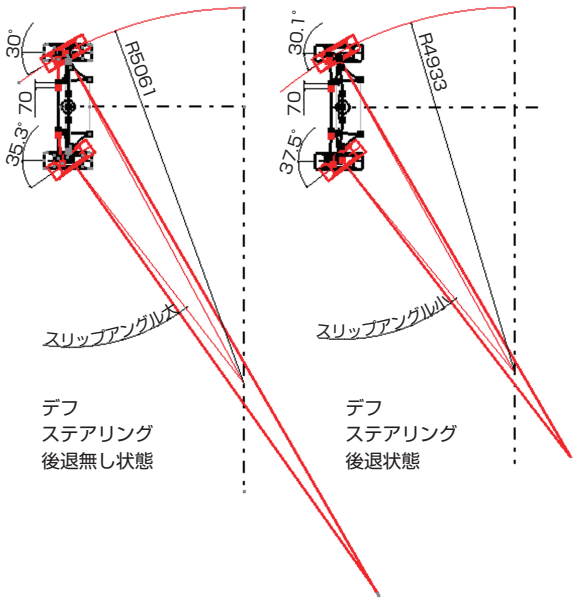


図 13　デフ後退、ステアリング後退による舵角差の変化

4.　駆動軸前傾のデメリットは？

前傾そのものがデメリットになるとは考えていないが、前傾角が大き過ぎると以下の問題を生じる。

4.1　イニシャル角度大き過ぎによる問題

6ボールのダブルオフセット型ユニバーサルジョイント（以下DOJ）しか選択肢がなくなる傾向にある。

近年改善されて来たが、軸方向にスライドするときの摩擦抵抗力がトリポード型等よりも大きいため、振動吸収の点で劣るところがあり、これは特にクリープのあるAT車のDレンジアイドリングで問題になる事が多かった。

振動対策関係者としては、この他にも低速走行時のウォブル等に応じ有利なジョイントを選択したくなるのだが、この選択肢が無くなる事が一番の問題。

また燃費対策上ジョイントの折れ角は0°が一番抵抗が少なく、当然折れ角が増えればフリクションロスが大きくなる。

現在ではジョイントのブーツは大部分が樹脂化されており問題無くなったが、初代レガシィの頃は未だゴム系のブーツも多く、保証期間中の耐久性を確保するのは当たり前だが、極めて使用寿命の長い傾向にある当社の車の一生分の耐久性を保証する開発は苦労を伴った。

4.2　最大角度大き過ぎによる問題

アッカーマン・ジオメトリでは、内輪の舵角を大きくする必要がある。

通常のCVJの許容角では、最小回転半径を一定値以上に小さくすると、ただでさえ許容角ギリギリになる事の多い内輪の折れ角が、前傾角が上乗せされる事によりパンクし、高角ジョイントを使うしか手がなくなるが、これを作って下さるメーカはレガシィ立ち上がり時点では選択肢が非常に狭くなった。

4.3　高角化した場合のコスト、質量上の問題

高角ジョイントは、一般のCVJに対しそれなりの加工上の工夫をしている事、また折って使う耐久性上の懸念から一格上のジョイントサイズを採用する必要があり、コスト、質量が増大した。

5.　まとめ

本稿では、当社が水平対向エンジンを車両前側に搭載する上で辿ってきた変遷と、その特徴を紹介した。世界で求められるクルマのあり方が大きく変わろうとする今、SUBARUにお客様が求めるものは何か？、

SUBARUらしさとは何か？を改めて考え直す時期にきており、電動化に向けた新しいパッケージングの検討が必要とされる中で、設計者には「クルマ1台の視点を持った技術者」になることが求められる。これまでの当社の歴史、諸先輩方が様々な工夫で築き上げた水平対向エンジン＋サスペンション・ステアリングレイアウト、及びその設計思想を正しく理解し、将来の当社の開発に活かしていきたい。

参考文献

(1) 影山夙：走れ!四輪駆動車，昭和52年（山海堂・東京），p.73
(2) 影山夙：走れ!四輪駆動車，昭和52年（山海堂・東京），p.166
(3) スバル技報2010_37号「スバル車のタイヤと馬力荷重の選定方法」
(4) ポール・フレール著　平井啓輔訳：ポルシェ911ストーリー，1978（二玄社・東京），p.33 ～ 36，p.119
(5) エヌティエヌ株式会社：等速ジョイント，特許第2750162号（1989出願）

【著　者】

川合　　真

古瀬　智広

坂崎　明彦

SUBARU「レヴォーグ」が、JNCAP「自動車安全性能2020ファイブスター大賞」を受賞

～衝突安全性能と予防安全性能の総合評価で最高得点を獲得～

2021年5月25日

国土交通省と独立行政法人 自動車事故対策機構（NASVA）が実施した、自動車の安全性能を比較評価する自動車アセスメント（JNCAP）において、SUBARU「レヴォーグ」が2020年度の衝突安全性能と予防安全性能の総合評価で最高得点を獲得し「自動車安全性能2020ファイブスター大賞」を受賞しました。

レヴォーグ GT-H EX

自動車安全性能 2020 ファイブスター大賞

SUBARUが世界水準の衝突安全性能になった前夜

The Night before SUBARU came to have World-Class Collision Safety Performance

古川 寿也[*1] FURUKAWA Toshiya
平川 良夫[*2] HIRAKAWA Yoshio
坂崎 明彦[*3] SAKAZAKI Akihiko

抄 録

起こっていることを理屈で、しかも定量化して理解し、仮説を立てて改善策を検証。みんなでこの一連の技術を、手の内にして行った。しかし、起こっていることを理解するのは簡単ではない。前夜の段階では、みなさんが「そんなことまでやったの？」と、疑問符が付くようなところまで泥臭い基礎実験を繰り返した。普遍的で社会が望む価値を商品に織り込むことが出来るのは、作り手である技術者にしか出来ない。そんなモチベーションがみんなを突き動かしたのだと思う。脱炭素化技術を始め、自動車技術者の目の前には、多くのテーマが存在する。みなさんの技術分野でも、是非　世界一を目指して欲しい。そんな思いで、「前夜」の泥臭い部分を主に前突にフォーカスして、まとめてみた。

Abstract

What we actually did was quite basic. Identify and understand what is now happening, with reasons, and off course next come with measurable quantified figures, make hypothesis for the improvement measures and then evaluate its effectiveness, repeating same process again and again and again, through its process automatically we gain all for ourselves.

Although we mentioned it "quite basic", understanding what is really happening is not an easy task. Before "the time" comes, it requires a lots and lots of honest and time consuming basic experiments, there were lots of research subjects that many where doubtful that we actually did them.

We believe, engineers are the only occupation that can make universal values into products that are requested from the human societies. And that is the motive that engineers truly work hard sacrificing their own personal time.

Today, in front of all automotive engineers, there are still many subjects that society needs answers, such as carbon free technologies and so on.

Within every engineer's field, please aim your subject to achieve the world's best. With this wish in my mind, we want to share our experience what really happened, the day (eve) before our achievement, especially on the sober part that everyone try to be smart skipping them.

1. まえがき

1960年代前後から議論の始まった自動車の安全は法規制と言う形で年々強化されて来た(図1)。

初期には乗員の死亡者数削減に重きが置かれ、事故分析結果から、前突、ロールオーバ、前後突後の車両火災、側突等に対し対策がなされて来た。

シートベルトの有効性が認められ、多くの国ではそれで乗員拘束は済むかに見えたが、米国には乗員に対する強制力を嫌う世論があり、エアバッグを含むパッシブレストレイントの発達を促した。

様々なデバイスや車体の進化により乗員の死亡者が

＊1 車両安全開発部
＊2 技監
＊3 STI車体技術部 出向

減ると、今度は乗員の後遺症の問題が顕在化した。

実事故をより広範囲に網羅する目的でオフセット衝突試験が考案され、今では、大衝突だけでも15形態程度が行われている。法規制の他、保険業界を中心とする情報公開で車の安全性レベルが上がって行った。

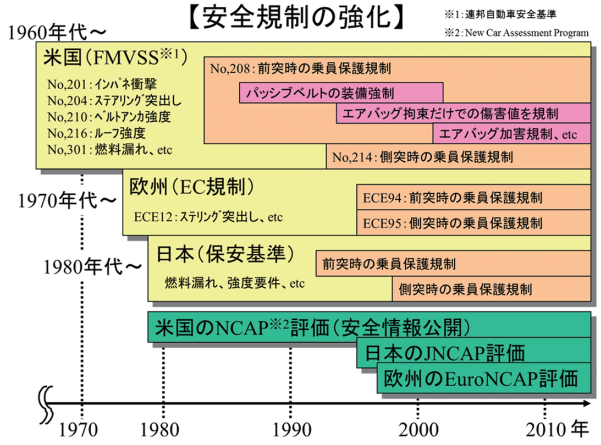


図１　当時の安全規制の強化動向

2.　衝突安全が世界TOPレベルになる前

★'80年代後半から'90年代前半

レオーネから初代レガシィ切替りの時期になる。

レオーネには今日の車両で常識になっている左右のピラーを結ぶステアリングサポートビームはなく、初代レガシィにはビームが設けられたが、運席側のピラーとトンネルを結ぶ片側だけのビームだった。

レガシィではボディ自体もねじりや曲げの剛性領域には大巾な手が入れられたものの、強度領域では先人達が衝突対策の基礎を築いた時期の構造のキャリオーバのままで、ステアリング等の2次衝突チューニングで毎度の立上り直前にドタバタし、法規制を満足して車を世に出す状態が続いていた。

2.1　衝突の個々の要素技術は確立しつつあった

社内資料の『衝突安全関係TSの利用ガイド』によると、当社が世界水準の衝突安全性能になりつつあった2000年時点で、技術基準書の数は、衝突安全全体、前面衝突関係、側面衝突関係、後面衝突関係、軽衝突関係、室内衝撃関係、内外突・内部装備品・パディング関係 等600件以上に及んだが、過半数は1990年代以前から蓄積されていたノウハウである。

1990年代後半から2000年、個々の衝突技術についてはある程度の確立がなされ「薪はくべられていた。必要なのは口火だけだった。」と言う状態にあった。

2.2　衝突性能躍進の第一のターニングポイント

前述の『衝突安全関係TSの利用ガイド』にて、当時の車両実験の総括の担当は、『衝突安全を理解するのに必要な物理常識一覧』を数ある衝突関係TS群の筆頭に位置付け、評価してくれていた。

このTSをイニシャル発行したのは、ステアリング設計の若い担当員だった者で、その序文に「今後SUBARUブランドを存続させるためにはさらに厳しくなるであろう衝突安全に対するこれまでの開発体制（小手先対応）を一掃する必要がある。 先ず車体の衝突エネルギ吸収特性を他社並みに近づける事が第一歩である。」とし、ステアリング担当としては、ステアリングホイールの剛性とコラムのエネルギ吸収特性を明確化する事をコミットしており、以下にそのTSの骨子を紹介する。

－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－

☆運動の第２法則（ニュートンの第２法則）

$F = M\alpha$　F：抗力 M：質量　α：加速度

一次衝突

・抗力一定の時、車両質量小で加速度は大きくなる。
・車両質量一定の時、抗力大で加速度は大きくなる。
・平均加速度を一定値に抑えるには、車両質量小で平均抗力を小さくしなければならない。

二次衝突

・エアバッグの抗力一定の場合、AF5や子供で人体質量小ならば人体加速度は大きくなる。
・人体質量が一定の場合、エアバッグ抗力大ならば人体加速度は大きくなる。
・平均加速度を一定に抑えるには、AF5や子供で人体質量小の時エアバッグ平均抗力小にする必要がある。
　⇒ スマートエアバッグでの展開制御が必要。

☆仕事の原理（力学的運動エネルギ保存の法則）

$$1/2 \times MV^2 = FS$$

M：質量　V：速度　F：抗力　S：衝突ストローク

・車両質量と衝突ストローク一定の場合、衝突速度の二乗に比例して平均抗力を上げる。
・車両質量と車両衝撃吸収平均抗力が一定の場合、衝突速度の二乗に比例して衝突ストロークを増やす。
・衝突速度と衝突ストローク一定の場合、車両質量に比例して車両衝撃吸収部材の平均抗力を上げる。
・衝突速度と車両衝撃吸収部材の平均抗力一定の場合、車両質量に比例して衝突ストロークを増やす。

☆衝突速度と加速度と衝突ストロークの関係

$$1/2 \times V^2 = \alpha S$$

V：速度　α：加速度 S：衝突ストローク

・人間の耐えられる加速度と車両衝突速度Vが決まれば、必要なストロークを確保せよ。

・各衝突平均G毎の、35 mph と 50 km/h の衝突ストロークは**表1**の通り。

表 1　衝突必要ストローク

	衝撃吸収ストローク	
平均加速度	35 mph 時	50 km/h 時
18 G	693 mm	546 mm
19 G	657 mm	518 mm
20 G	624 mm	492 mm
21 G	594 mm	468 mm
22 G	567 mm	447 mm

特殊な事をしないで人体に対する傷害値をクリア出来るフロア平均加速度を例えば20 Gとすると、国内 50km/h中心の開発時代は、一声500 mmの衝突ストロークと言われていた事に上表の492 mm が対応する。

FMVSS 35 mph の時代になったら、同じくフロア平均加速度を例えば20 Gとすると、ストロークはオフセット含む大衝突だけでも624 mmは必要になる。

さらに現在ではRCARや歩行者保護のための柔らかい部分が1～2インチは必要で、最低でも 650～675 mmの衝突ストロークが必要になる。

－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－

このTSを教科書とすることで、多くの部署の人が衝突性能を物理的に理解することができるようになり共通認識を持つことができるようになった。それが、衝突安全世界一を目指すうえで大きな力になった。

2.3　徐々に世界水準の衝突安全性能に近付く

前述のTS発行以前には、今から思えば笑い話の様だが、フルモデルチェンジ車の開発時の軽量化でメインフレームの板厚を1 mm以下にすると言い出す方が出たり、4気筒でも衝突ストロークギリギリの車にSVXの6気筒を載せられると妄想する方が出て試作車を作ったりで、坂崎がその度にこのTSの内容を振りかざし「ニュートンの法則とエネルギ不滅の法則は変わらない。」等説いて回る時期があったのだが、エネルギ吸収のストロークと抗力、それを支える構造の重要性は徐々に開発部門全体に浸透、そして初代レガシィもマイナチェンジを経て、他社並み以上の車体減速特性を持つに至った。

★'93発売　2代目レガシィ

乗員傷害値目標を本格的に設定しそこそこ対応。

2台目レガシィの開発段階では、国内に乗員傷害値規制はなかったが、このクルマの開発責任者は先を見る方で、もし国内にJ208（当時、FMVSS208の国内版をこう呼んでいた）が導入されても、バッチリ対応しようという意識付けが行われた。今は自工メーカにとって定例行事のようにもなっている米国IIHSによる衝突性能情報公開が1995年、初めて行われ、ここで2代目レガシィが選定された。

衝突形態は、64 km/hのディフォーマブルバリア付き40%オフセット衝突である。

2代目レガシィは、サッシュレスで窓肩リンフォースが入っていたため、抜取られた他車比でキャビンの生存空間がバッチリ残ってセーフレベルであった。

IIHS Status Reportからの引用写真を**図2**に示す。

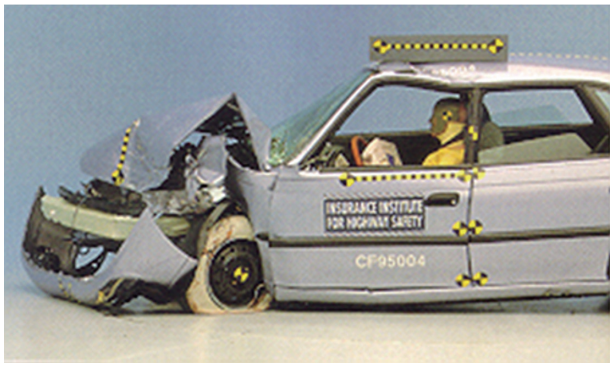


図２　２代目レガシィのオフセット衝突 (1)

3.　衝突安全　世界TOPレベルに向けて

3.1　ジャスティの衝突対応成功事例

未だオフセット衝突法規制の無かった時代、当社のジャスティの前面衝突時の車体G特性が好ましいとされていた時期があった（**図3**）。

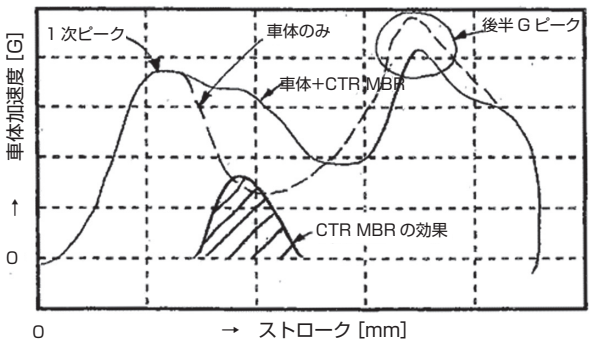


図３　ジャスティの車体Ｇ波形

組織だってその様なG特性を目指した覚えはなく、何でそうなったか探ると、車体構造設計の先輩が一人で手計算にてエネルギ吸収の辻褄合わせをしていた事を知った。

当時本人に何をやったか聞いたら、「使えるものはサスでも何でも使う。センタメンバ以外にPU全体をトーボードの広い面で受けるのも効いた。」との事。

パワーユニットを支えていたセンターメンバーを側

面視で若干の凹形状にし衝突時にコラプスしてエネルギー吸収、衝突時にエンジンを「死にマス」にするマウント設計も担当設計部隊が賢く編み出した(図4)。

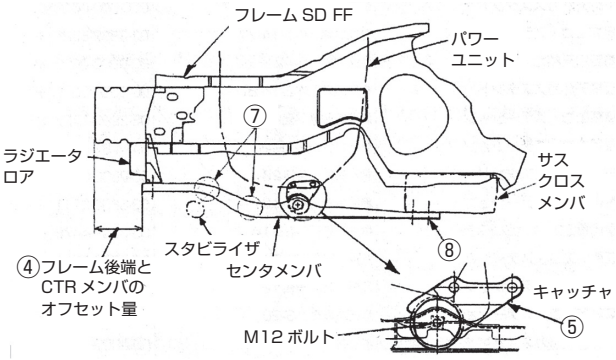


図４　ジャスティの車体

3.2　基礎検討本格的開始

1990年代初頭、衝突安全のTOPになった人物が、赴任早々、同僚職制や重役と技術本部全体に「衝突安全世界一にします。」とコミット。この時の裏話だが、当時の技本役員から言われたことは「あんまり、みんなをいじめるなよ。」だけだった。

本当にそんな事出来るのかと訝る周囲をよそに有言実行、設備、理論構築、人材確保、部下と当社の開発本部を過酷に指導し、着実に前へ進み始めた。

これ幸いと坂崎は、平川と双方の部下含めての毎週のミーティングに臨む様になり、基本的に衝突は前から順番にやっつけようと言う事で、前述の『衝突安全を理解するのに必要な物理常識一覧』の原則で既存の構造に捕らわれず合理的な構造を構築して行った。

3.3　静圧壊試験の繰り返し

バンパ、バンパビームを必要な強度、剛性要件から固めた後、メインフレームの検討に入った。

当時は当社が未だ全幅1700 mmの小型枠に拘っており、舵角差を十分取り、最小回転半径を小さくするとフレームの後端にタイヤを避けるための大きな凹みが必要で、この部分が先に座屈してしまうと、まともな抗力は発生出来ないので欧州のFWD名車の設計例を参考に、試作部門に静圧壊試験用のテストピースを作って貰っては潰しを繰り返した(図5)。

主軸を真っ直ぐ通す等1年位もがいた気がするが、結局上手く行く解は見つからず、得られた結論は今日では当たり前の「フレームは真っ直ぐにすべきで、特に稜線が大事だ」と言う事であった。

3.4　Gデザイン

F＝Mαであるから、Gをデザインする事は抗力をデザインする事に他ならない。

衝突ストロークが取れない軽1BOX等では最初のピークを高くしてエネルギ収支を満足する場合もある。

2次衝突時の車体Gを下げて衝突安全性を向上したとしたメーカもあった。

法規適合だけでなくリアルワールドでの全ての衝突を考える場合、前述のジャスティの様な台形のG波形も捨てたものではなく、エクセルで図6の様なグラフを描いて机上でエネルギ収支を検討した。

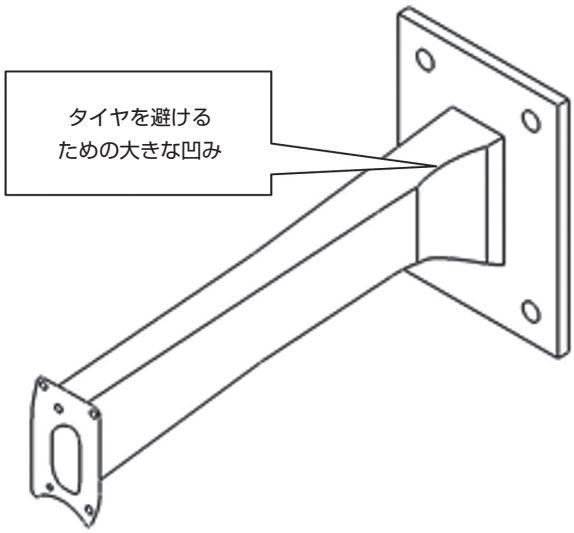


図５　静圧壊試験のテストピース例のイメージ

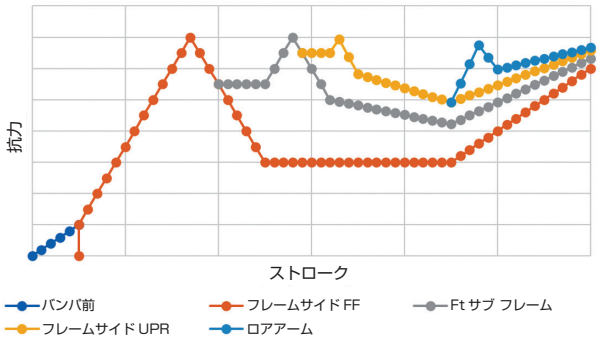


図６　衝突Ｇのデザイン例のイメージ

丁度オフセット衝突が厳しくなりつつある時期、ボディを固めて、足の生存空間を力ずくで確保する傾向が出て、結果、ほとんどの車は、オフセット対応で正突傷害値は悪くなり、オフセット対応と正突傷害値の両立は、すべてのメーカーの課題となった。

2本のメインフレームだけでオフセット衝突と正突に対処しようするイメージを図7に、これに対し、前述のジャスティの経験や、複数の衝突エネルギ吸収フレームの先端をずらし、一人時間差で受ける事を考えたイメージが図8である。

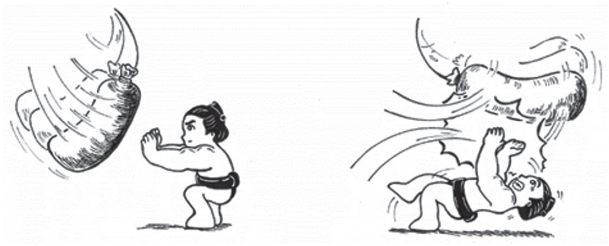


図７　オフセット衝突に力ずく対処の図

図８　当社先行開発衝突安全構造アシュラ

3.5　H戦車

平川が続いて、フレームに入った荷重がフレームを支える部分にどの様に入るかを実測したいと言い出した。

図5に示したテストピースの動的圧壊挙動と抗力を調べたかった事もあり、前輪のストラットサスの前に分厚い鉄板を2枚配置し、その間の要所に鉄の円筒を溶接してストレインゲージを貼ってみた。

坂崎の部下にHと言う者がいて、実験や試作の意見を聞いて、車体側にロールケージの様に糸を張り巡らせ、それに沿って試作部門にパイプで車体後方を固めて貰ったら、まるで戦車の様なごっついものになり、これは通称H戦車と言われた(図9)。

現在では衝突バリア側にマトリクス的にロードセルを付けて、荷重分布を把握する事も一般的になって来たが、これを先取りした取り組みだったと思う。

得られた成果は、この方法で動的抗力の測定可能な事を実証出来た事、当社では未だ不明確だったエネルギ吸収部材の静動比を明らかにする等の露払いが出来た事である。

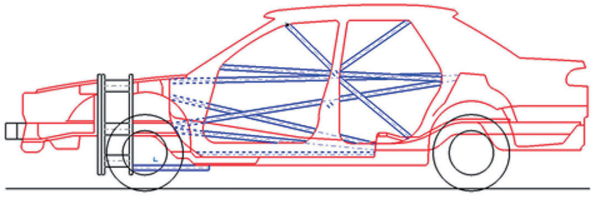


図９　衝突車体反力測定用Ｈ戦車のイメージ

3.6　設備の拡充、人材の確保

当社には当時スバル360時代からの、屋外で名人がエンジンで牽引する直線用衝突試験機1機しかなく、屋内の斜め衝突にも対応する設備にする等、数年掛かりでそれまでの年間投資の10倍以上のペースで拡充した。

同じく、衝突の試験研究に絡むマンパワーについても数年間でそれまでの10倍以上に拡充し、古川もこの時期に衝突の戦力に加わった。

従来は正突と後突がメインだったが、ロールオーバ、側突、オフセット衝突、歩行者保護等と、衝突に関する法規もどんどん複雑化して行った時代であるから、これ等は当社が時代の変化に遅れない様にするための最小限の準備であったと言う事である。

3.7　オフセット衝突への対応

以下、時系列で世界水準のオフセット衝突安全性能を持つに至ったステップアップの経緯を記す。

★'95くらい　3代目レガシィ

力ずくだが初めてオフセット64 km/hにキチント対応

画期的な車体となったが大きな重量UPを伴った。

FFへのコンプレッションメンバ追加、2枚合わせのトーボードガセット、厚板最大3.2 mmのリンフォースを重ねたFRなど。

米　IIHSのオフセット試験で総合Goodに加えて、当社で初めて車体変形でもGoodを獲得

IIHS Status Reportからの引用写真を図10に示す。

図 10　３代目レガシィのオフセット衝突 (1)

同時期、初代フォレスターの開発も並行で進めた。

初代フォレスターの開発責任者は車体構造設計出身の切れる方で、フルラップとオフセットの両立、そして、側面衝突のメカニズムとその具体的な構造対処法概案を伝えることで、1ヶ月もしないで構想図を完成させ、翌月には実車衝突実験完了、勿論狙い通りの高水準を実現、衝突開発がスピードを付けた時期でもあった。

このボディで最初の環状立骨構造を採用した。

★'96くらい　先行開発

圧壊しないフレームを持つ車両を使用し、前端位置が異なるサブフレーム取付け位置でオフセット衝突試

験を行った(図11)。

ハニカム圧壊中は、フレームとサブフレームの前端が略同じだと、大きなハニカムE/A、小さな曲げモーントとなる事を確認し、初期のフレームとサブフレームの抗力の分担比率の適値を見出した(図12)。

これは、3.3項で主として正突優先で考えたフレーム先端をずらして抗力の総和を台形化する事より、ハニカム圧壊効率と、その時のフレームの挙動制御を優先すべきと言う新たな知見であった。

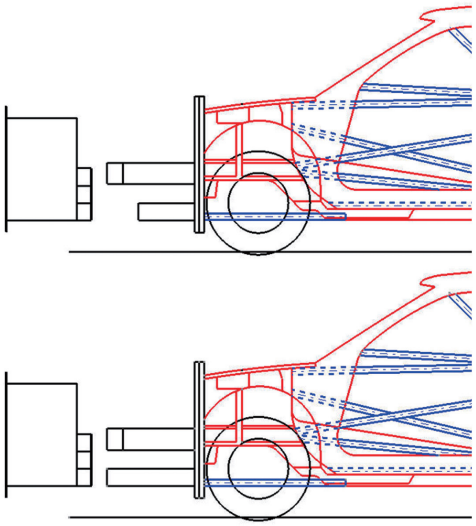


図 11　ハニカム圧壊反力測定用台車

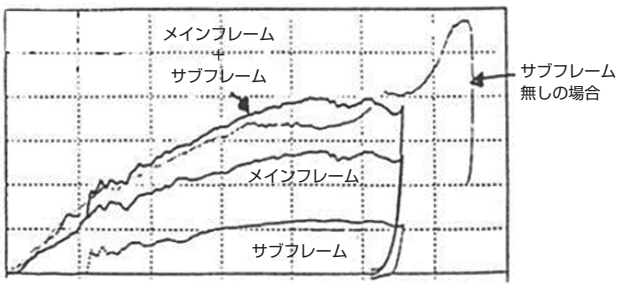


図 12　ハニカム圧壊フレームの荷重分担

★同じく'96くらい　設計構造を合理化するために当時の量産車の問題点把握

古川等は、当時の在来車のAピラーの中間付近で車両を前後に切断し、メインフレームの床下部分、サイドシル、フロントピラー、トンネル等にH戦車同様の荷重計測パイプを挿入して左オフセットの衝突試験を行った(図13)。なお、車体後部は圧壊せぬよう補強している。

オフセット衝突試験後の車両の状況を図14に、その時の各部伝達荷重を図15に示す。

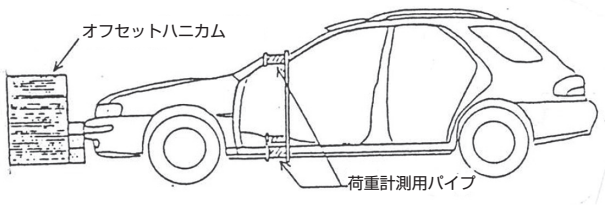
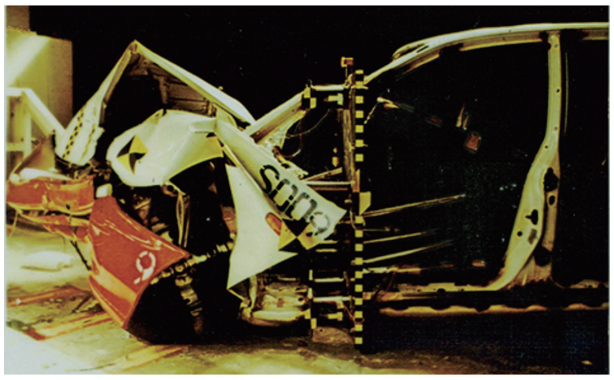


図 13　オフセット衝突試験方法



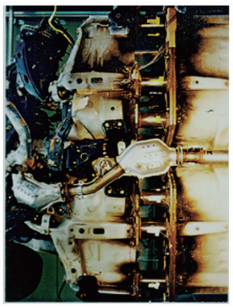


図 14　オフセット衝突試験後の車両状況

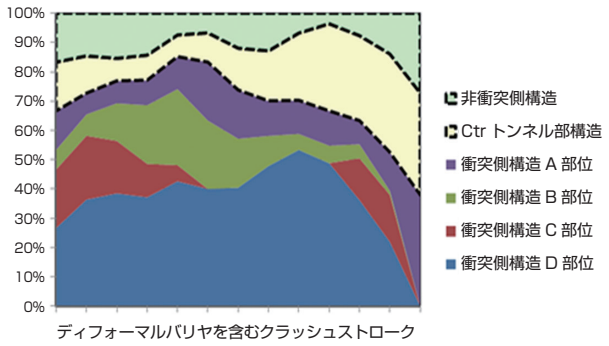


図 15　在来車のオフセット衝突各部伝達荷重

平川は、当時これを見て、その頃のボディでも30%以上も非衝突側で分担してるんだ〜 !!! と、思ったのが記憶に残っているとの事。

この試験から以下が判った。

・衝突初期の荷重は小さいが、剛性領域のためバンパービームなどを通じて非衝突側にも荷重が入る。
・塑性領域に入り、非衝突側のフレーム先端が内折れすると、非衝突側への伝達が減少し、ほとんど衝突側のフレームでエネルギー吸収している。

また、この際、FFの抗力はほとんどFRに流れてお

り、トルクボックスを使ったサイドシルへの伝達はできていない。

・エンジンがキャビンに底づくと、トンネルや非衝突側への荷重伝達が増加する。

そこから古川等は以下を提案した。

主にフレームでエネルギーを吸収している領域で、非衝突側への伝達を上げたい。

工夫すれば、40%を狙えるはずで、そのためには、前方で左右をつなぐサブフレームか、後方で左右を繋ぐトーボードクロメンの追加が必要。

又、せっかく幅が広く、早くから壁面に衝突するエンジンを、左右伝達に有効に使える構造にしたい。

★'97くらい　2代目インプレッサ

軽量化と短いストロークでのオフセットと正突との両立を狙い、新しいプラットフォームを作成。

オフセットでの非衝突側分担率を上げることが両立策とみて、エクセルによる簡易モデルで車体G波形と傷害値の関係を計算(第二のターニングポイント)。

両立点を算出し、図16に示した通り狙いの車体特性を定義した。

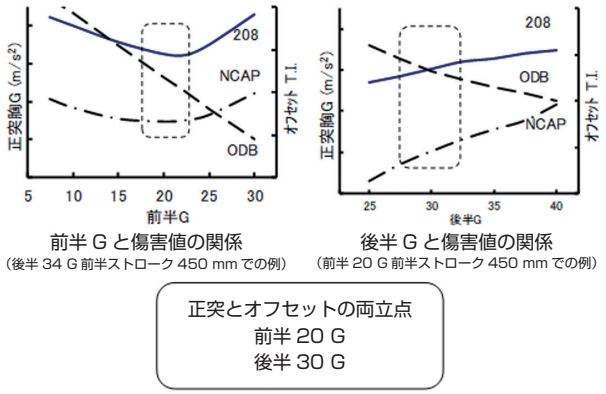


図 16　オフセットと正突の両立を狙う車体 G 特性

狙いの車体特性を効率よく実現するため、足回り部品との干渉を避ける複雑な形状をハイドロフォームで成形したサブフレーム構造を採用したが、防錆上から衝突で必要な板厚以上の板厚にせざるを得ず、軽量化に限界があった(図17)。

3代目レガシィより軽量化はできたが、それ以前のインプレッサに比べると大きく重くなっており、その後、軽量化に力が注がれる原因となった。

米　IIHSのオフセット試験で、当社で初めて下肢傷害ふくめ全項目Goodを獲得。BestPicksを受賞。

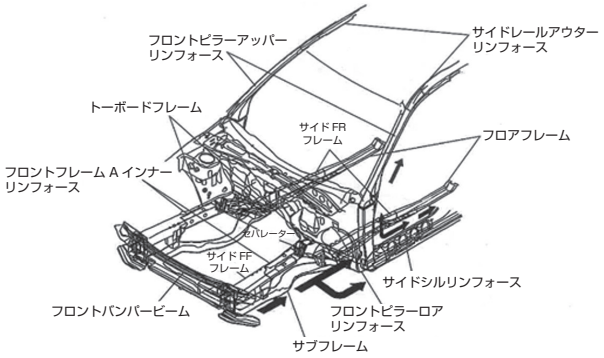


図 17　2代目インプレッサの衝突安全構造 (2)

★'00くらい　4代目レガシィ

軽量プラットフォームの開発

画期的な軽量化を狙い、590ハイテンを使用した新しいプラットフォームを開発。

ここまで、数年ごとにプラットフォームを新しく作ってきたが、この軽量プラットフォームは初代レヴォーグまでの20年近くに渡って、多くの車系で改良されつつ使われた。

開発には、部署横断のデジタル開発PTが組織され、初めて本格的にCAEで車体仕様の検討が行われた。

デジタル開発PTは、車体設計、車研実2部、CAE部から、1名ずつ出て、CAE部に机を並べた。

しかし、初期検討当時の計算能力は、フルモデルだと、正突に1週間、オフセットに2週間。月に計算できるのは合計4ケースのため、部分モデルの圧壊シミュレーションで各部の最適構造を決めていったあと、フルモデルでの確認という手番を踏んだ。

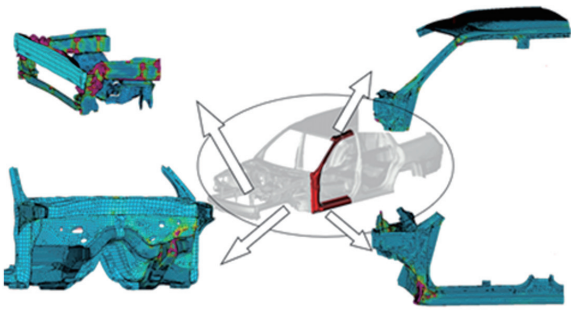


図 18　4代目レガシィの軽量衝突安全構造

軸圧壊させるフレーム前部に590 MPaハイテンを使ったのは世界的にも例がなかった。

フレーム先端は多稜線の8角形にし、セパレータ、ビード、テーラードブランクで動的な座屈モードを制御し、全幅に渡るトーボードクロメンで非衝突側分担を上げる構造とした(図18)。

このプラットフォームを使った2車種目となる3代目インプレッサはJNCAPグランプリを獲得。

★'05くらい

コンピュータシミュレーションの精度向上活動

コンピュータシミュレーションの精度向上は継続的に実施してきたが、ここで根本的に精度を上げる研究が集中的に行われた。

エンジンなど動くものの影響と板金の圧壊の抗力を分離してみるために、ボディコンにタイヤをつけた衝突試験を実施するなど、現象を分解して、シミュレーションの精度を高めていった（図19）。

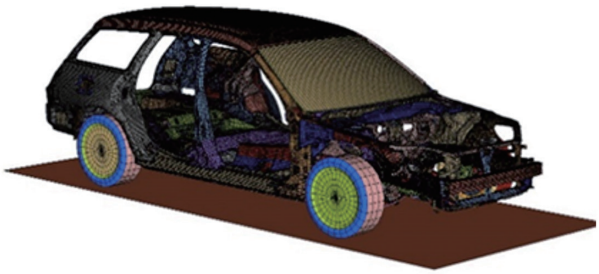


図19　CAEコリレーション用実車と3Dモデル

3.8　オフセット衝突以外への対応

衝突性能世界一を目指すに当たって、前突系だけではなく むち打ち、ロールオーバ事故のルーフクラッシュ、コンパチビリティ の3つをもテーマとして捉えて進めた。

3.8.1　むち打ち対策

後突時のむち打ちは死亡には至らないが低速衝突でも発生し治療が長引くため社会損失額が大きい事象。

当社は、地場のシートメーカと対応研究を行い、シートバック強度向上、ヘッドレストレイアウトの検討等を行っていたが画期的改善ができていなかった。

そんな折、当時提携していたA社との共同開発が行われ、多くの示唆を受け改善を進捗、重要な知見を得ることが出来、他OEMと共同開発することのメリットを感じた出来事だった（図20）。

IIHS評価で、2006年には5車種がGoodを獲得

図20　むち打ち対策の3ステップ例

3.8.2　ルーフクラッシュへの対応

米国では道路の構造上（路肩の外が低い）、道路を逸脱するとロールオーバを起こし易く、これによる死亡事故が多発していた。NHTSAのデータによると、死亡事故の内、Passenger Carでは16%、SUV（Light Truck Utility）では35%をロールオーバが占めていた（図21）。

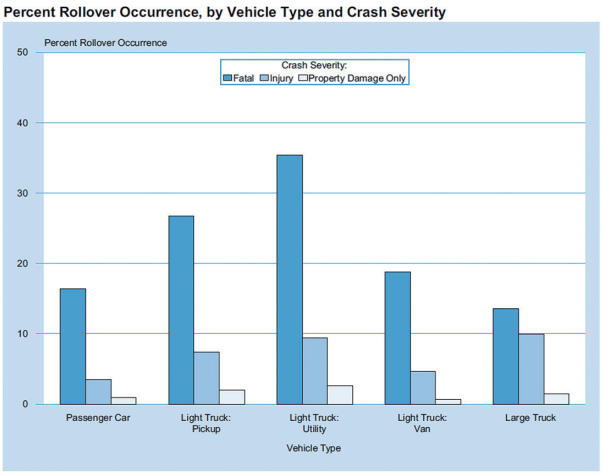


図21　米国でのロールオーバー比率 (3)

この対策としてルーフ強度のUP、ESCの装備が行われ、その後カーテンエアバッグの装備が進んだ。

当社も、早くからルーフ強度の向上に取り組み、フロントピラー、センタピラーの強化と左右連結の強化等を実施した。

正突とオフセット衝突の両立は前述したが、ロールオーバーを考慮したルーフ構造と側突構造の両立にも同様の思想を入れた。

米連邦法規に続きIIHSでもより厳しい評価が開始されたが、当社は最初の評価から最高評価のGoodを全ての車種で獲得することができた。

ESCの装備も、法規で義務化されるよりも早く標準装備化を進めていった。

それらが加わった2011年のIIHS評価で、ラインナップ全車がトップセイフティピックを獲得。

3.8.3　コンパチビリティへの対応

車対車の衝突時に相手への攻撃性を低下するコンパチビリティが1990年代から盛んに研究され出した。

当社でも、正面衝突で荷重分布を計測したり、大きなPDB（Progressive Deformable Barrier）へのオフセット衝突でハニカム変形深さを評価する等、荷重低減のための研究を行ったが、対策以前に実際の市場事故と相関のある試験方法を見出す事ができなかった。

これは世界的にも同じであり、いろいろな試験方法が盛んに研究はされだが、加害性評価はこれという試験方法に到達しなかった。

結論として、被害側が激しい衝突に耐える構造である事が最も重要であり、加害側は、大きなSUVについてのみ、乗り上げ防止で低い位置に構造物をつけることが米国自主規制で導入されるに留まり、研究は2018年以降に再び欧州で活発になるまで下火になった。

当社では被害側の定量評価のため、大型SUVを模した治具への衝突試験等の研究を行った（図22）。

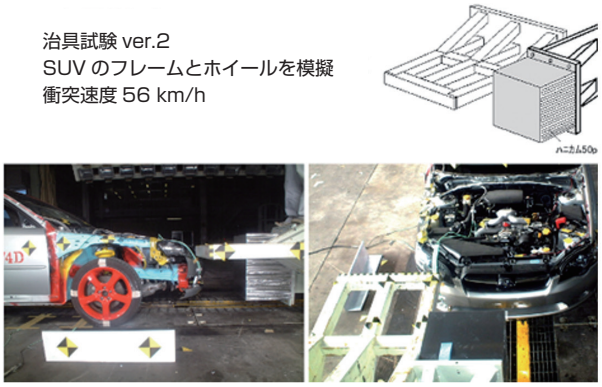


図 22　大型 SUV のフレームとホイールの模擬治具

4代目レガシィでは、約1.5倍の重量のSUVとのオフセット衝突に耐えられることを、車対車のオフセット衝突試験で確認した（図23）。

これらの被害側対策を考慮しておいた事は、2012年にIIHSでキャビンに非常に厳しいスモールオーバラップ衝突が導入された際の対応の一助となった。

4.　まとめ

何で当社が世界水準の衝突安全性能になったか改めて振り返ってみると、3項目だろう。

(1) 関連部署の協力が不可欠で、夫々の設計分野、試作部や工場部門で、安全性能を高めようとする強い意志があったこと

(2) その意志を感じ取っていた関連企業（←部品メーカさん等）が、既に生産技術面でも独自の研究開発を進めていたこと

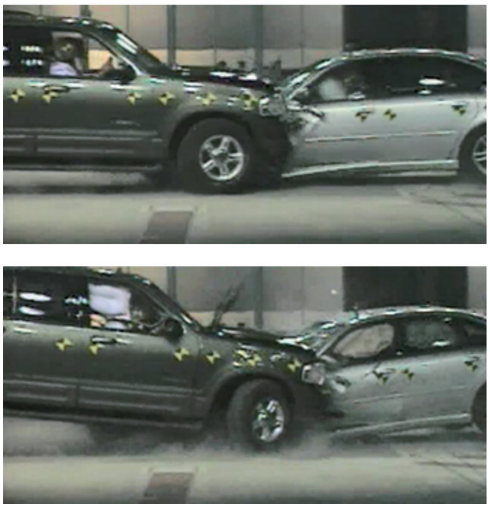


図 23　大型 SUV 対４代目レガシィの衝突

(3) 坂崎や古川を始め、関連する皆に世界一を目指そうと話をしたときに、皆が一斉に行動を起こした事は勿論、誰からも反対意見はなかったこと

これ等は当社の開発部署の風土みたいな所かも知れない。

SUBARUの衝突部門を引き継いだ古川等は、業界TOPを維持する事は当然とし、さらには公的機関とも協力して人類貢献のための新たな法規作りのお手伝いも出来る様にもなっている。

SUBARU車は、その主要市場の米国では小さなクルマの部類である。SUBARUを選んでくれたお客様にとって、小さいから安全も小さいなりでは、お客様に申し訳がない。法規制を遙かに越える高水準の衝突性能がSUBARUだからお客様に必須条件だろうと、半ば技術マーケティング的なモチベーションからスタートしたが、SUBARUの衝突関係後輩諸氏が、絶えず衝突性能に関するさらなる高みを目指し、邁進し続けてくれている。安全以外でも、脱炭素技術を始め、自動車技術者の目の前には、多くのテーマが存在します。みなさんの技術分野でも、是非　世界一を目指して欲しい。

末筆になって恐縮だが､他社と比べると対応の速さ、フレキシブルさが当社の武器だと思っている。

この論文で紹介したような研究開発もそうだが、特に、製作所の対応力（フレキシブルさ）は、他社に比べ圧倒的で、他社では製造要件が大きな足かせになって思う様に衝突対策が出来ない状況もある様だ。

効率全体では未だ業界No.1でなくても、フレキシブルさで勝っているのが当社だと思われ、逆に、このフレキシブルさを失うと当社は勝てなくなる。

効率の追求や品質への慎重さは勿論大事だが、当社はフレキシブルさも失なってはならない。

衝突安全に関し、今迄の製作所の協力に大感謝。

参考文献

(1) IIHS Status Report, Https：//www.iihs.org/
(2) 2代目インプレッサ新車解説書
(3) NHTSA, TRAFFIC SAFETY FACTS 2005

【著　者】

古川　寿也

平川　良夫

坂崎　明彦

SUBARU「フォレスター」大幅改良モデルを初公開

2021年6月14日

SUBARUは、「フォレスター」大幅改良モデル(日本仕様)を初公開しました。
今回の大幅改良では、SUBARUのデザインコンセプト「BOLDER」表現を取り入れたフロントフェイスや新デザインのアルミホイールを採用し、よりSUVらしい迫力ある仕様としました。
走行性能では、全グレードの足回りを改良し、さらにアダプティブ変速制御「e-アクティブシフトコントロール」をe-BOXER搭載車全グレードに拡大。安全性能では「新世代アイサイト」を搭載し、これまで以上に幅広いシーンで安全運転をサポートします。

フォレスター Advance (ルーフレール装着車)

特許紹介

SUBARU Patent Review

最近登録になった特許の中から代表的なものを紹介する。

巡回経路設定装置、巡回経路設定方法及び巡回経路設定プログラム

【特許番号】特許第6788540号
【発明者】板橋　直亮／岡田　悟史／佐藤　維大／
星野　智史／勝本　健史

本発明は、所定の領域内を巡回して捕捉対象を捉える移動体の移動経路を設定する手法である。

【発明の背景】

航空機による海洋パトロールの概念図を**図1**（左）に示す。この図は航空機（1）が所定の領域（PA）内で捕捉対象である船舶（W）の監視を目的とした巡回を行う例を示している。単純な方法として、領域を網羅的に巡回することが考えられるが、場所によって出現頻度が異なる場合、非効率的である。

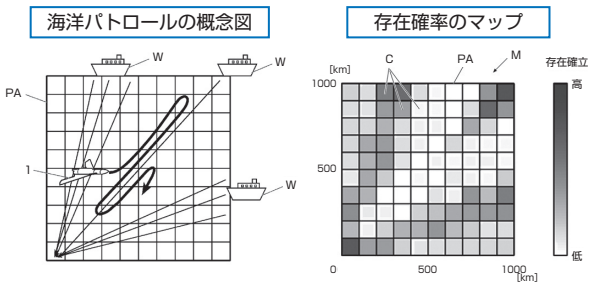


図1　航空機による海洋パトロールの概念図（左）及び
存在確率のマップ（右）

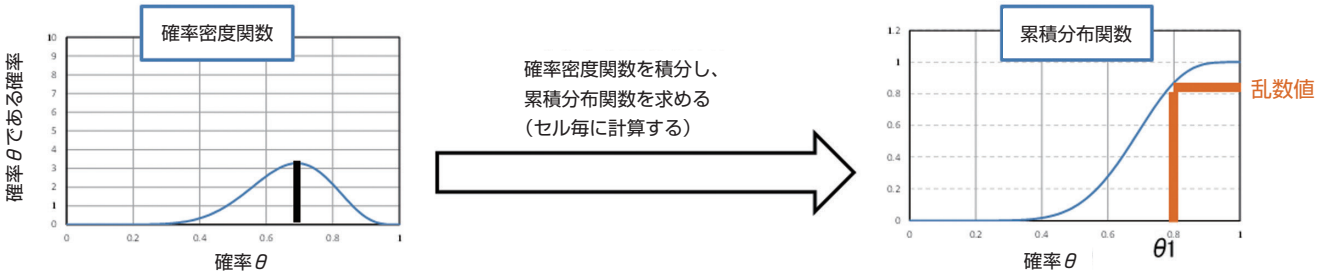
【発明の概要】

効率的な巡回を行うには、領域（PA）をセルに区切り、各セルの船舶等の捕捉対象の出現頻度（存在確率）を示すマップ（**図1**（右））を利用することが考えられる。しかし、このようなマップの生成には、領域全体を網羅的に巡回する必要があるという矛盾が生じる。そこで、この相反するマップの利用と生成を両立させるように、各セルの巡回回数及び存在確率から目的地とするセルを設定する手法を発明した。

この手法は、捕捉対象の存在確率を示すマップを更新するロジックと、航空機が向かうセル（目的地）を設定するロジックからなる。ロジック概要を**図2**に示す。

存在確率のマップは、航空機が巡回したセルにおいて捕捉対象の存否を確認し、結果に基づいて当該セルの存在確率を表す確率密度関数を更新する。

目的地とするセルは、各セルの確率密度関数及び乱数値から設定する。まず確率密度関数を積分して累積分布関数を求める。次に、累積分布関数の値が乱数値となる確率θ（**図2**θ1）を求める。この計算を全セルに対し行い、乱数値に対する確率θが最大のセルを目的地に設定し巡回を行う。これにより効率的な巡回を実現する。



巡回したセルにおいてセンサにより捕捉対象の存否を確認し、確率密度関数を更新

累積分布関数の値が乱数値となる確率θ（上図θ1）を求める。同様の計算を全セルに対し行い、確率θが最大のセルを目的地とする（乱数値は全セルで同じ値を用いる）。

図２　存在確率の更新及び目的地設定ロジック概要

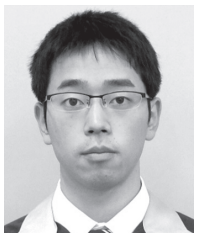
【発 明 者】

板橋　直亮

岡田　悟史

佐藤　維大

星野　智史


勝本　健史

車両の乗員監視装置

【特許番号】特許第6676084号
【発明者】中村　亮太／丸橋　雅幸／大西　恵太

本発明は、自動車に乗車した乗員を認識して、監視するために車両に設けられる乗員監視装置である。

【発明の背景】

自動車では、乗車したドライバなどの乗員を監視することが望ましい場合がある。一般的に、乗員監視装置は、乗車した乗員を認識し、乗員の脇見や居眠りを監視し、脇見や居眠りをした乗員に対して警告を与える機能を提供する。しかし、乗員によっては、乗員監視装置の警告を不要、煩わしいと感じる場合がある。このため、乗員監視装置では、乗員の操作により起動または停止に設定できるようにすることが望ましいが、乗員監視装置が停止している場合、乗員監視装置を起動したとしても、乗車した乗員を認識した後でなければ乗員の監視を開始することができない。

したがって、乗員監視装置を好適に起動停止できるようにすることが望まれる。

【発明の概要】

乗員を認識して監視する乗員監視装置(12)は、乗員を認識する認識部(33)と、認識された乗員に対応する設定データを記録するバッファ(30)と、乗員の情報が登録される記録部(34)と、認識部とは別の処理により、認識部による乗員の認識結果に応じたバッファの設定データに基づいて、乗員を監視する監視部(26)と、認識部と監視部とに対して個別に設定される起動または停止の設定に基づいて、監視部の停止状態において前記認識部を起動できるように認識部と監視部とを個別に起動停止する起動制御部(32)を有し、また、認識部は、監視部の起動状態において起動される場合には、認識した乗員の情報を記憶部に登録するとともに乗員の認識結果に応じてバッファを更新し、監視部の停止状態において起動される場合には、認識した乗員の情報を記憶部に登録し、バッファを更新しないようにする。監視部は、起動される場合には、認識部の起動停止状態にかかわらず、記憶部に登録されている乗員の情報に基づいて認識部による乗員の認識結果に応じてバッファを更新してからバッファの設定データに基づいて乗員を監視する(**図1**)。これにより、乗員の監視装置を好適に起動停止できるとともに、実際に乗車した乗員に応じて高度な乗員監視を提供できる。

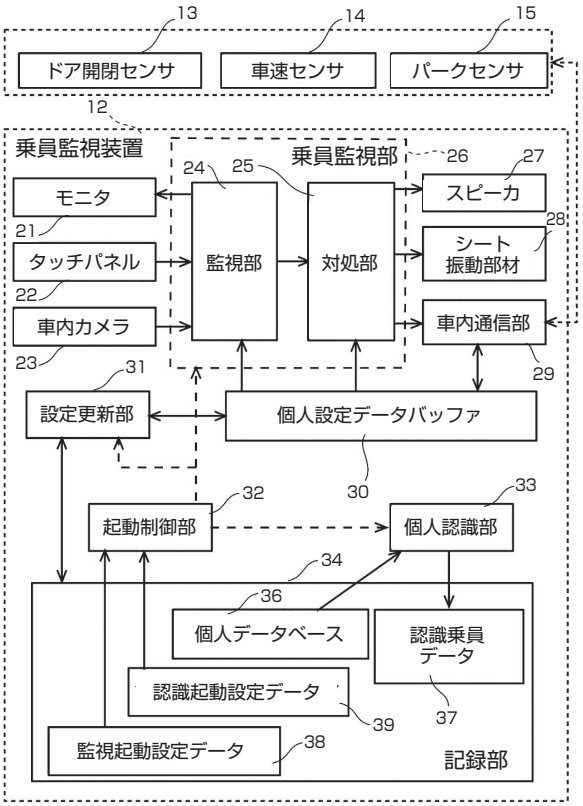
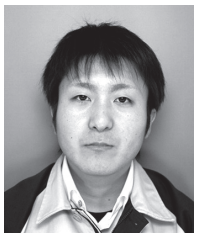


図1

【発 明 者】

中村　亮太

丸橋　雅幸


大西　恵太

車両の走行制御装置

【特許番号】特許第6654907号
【発明者】関　　淳也

本発明は、自動運転の継続が困難となった場合に、継続困難な機能のみドライバに引き継ぐことで、引継ぎ時のドライバの負荷を軽減させるものである。

【発明の背景】

自動運転制御は、センサ類の検知精度の変動や道路環境、天候などによって継続が困難になる場合がある。このとき、自動運転システムはドライバに運転操作を引き継ぐよう報知するが、ドライバは運転操作から解放されているため、急な引継ぎに対応できない場合がある。また継続困難と判断された場合でも、必ずしも全ての自動運転制御を解除する必要がない場合もある。

【発明の概要】

この課題を解決するために、各種センサ類11 ～ 17（**図1**）から、制御状態や走行環境情報をS101にて取得し、S102 ～ S103にて引継ぎ要否を判定し、S104 ～ S106にて表示装置24やスピーカ・ブザー 25を用いて、その機能の引継ぎのみドライバに報知する（**図2**）。

S102では、S201 ～ S203にて、接近するカーブ曲率と距離から引継ぎ要否を判定する。またS204 ～ S206にて、自車通行路の障害物有無と距離から引継ぎ要否を判定する。引継ぎ要と判定された場合、S207にてドライバの覚醒度を算出し、引継ぎ報知の早期実行または通常実行を判定する（**図3**）。

道路環境やドライバ状態に合わせ、必要最小限の運転操作のみ引継ぎを報知することで、運転引継ぎ時の負荷を軽減し、安全に完了させることができる。

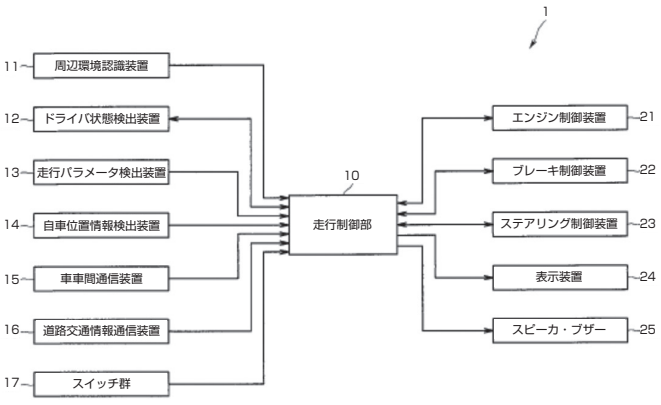


図1　システム構成図

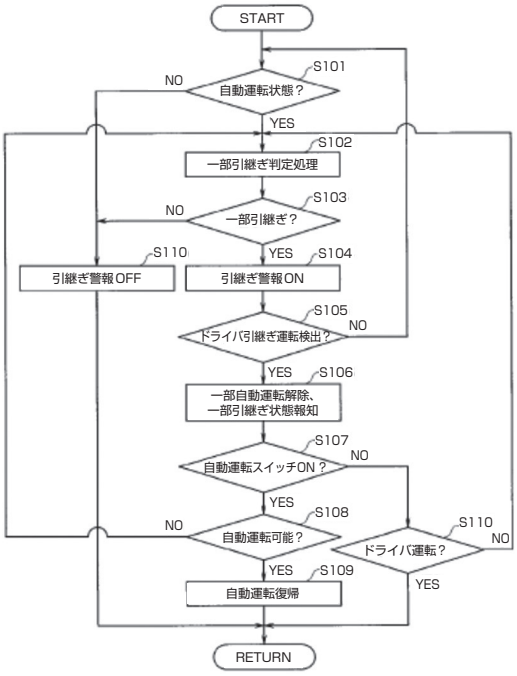


図2　引継ぎ報知フロー

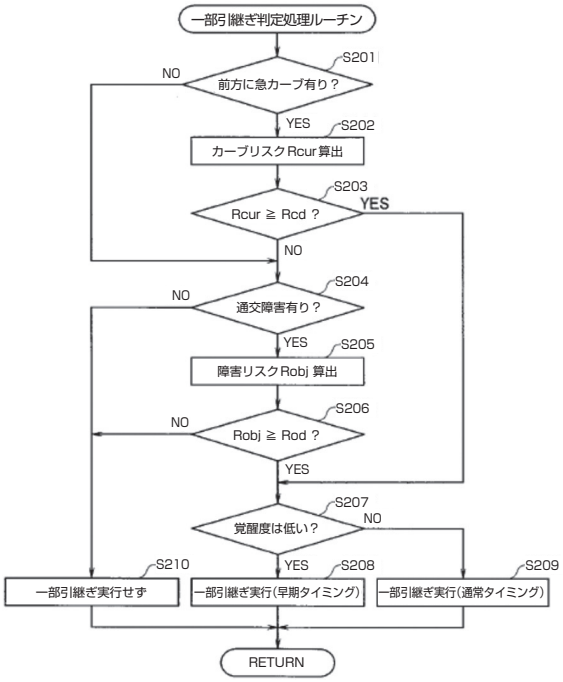


図3　引継ぎ要否判定フロー

【発 明 者】

関　　淳也

車両用制御装置

【特許番号】特許第5457495号　DE102013104331
【発明者】西田 祐之／井上 浩一／ 田中 敬樹／
鯵本 恵介／安永 慎也

本発明は、無段変速機において、通常走行に使用する自動変速モード、運転者が任意の変速段を選択するマニュアル変速モードの２つのモードを有し、かつ、一時的にマニュアルモードに移行させるテンポラリマニュアルモードを備える車両用の制御装置において、その利便性を向上させるための物である。

【発明の背景】

自動変速モードからマニュアル変速モードへ切り替える場合、切り替えた直後のマニュアル変速モードでの変速段については、自動変速モードの変速比を保持、又は最も近しい変速段へ遷移させる方法が知られている。いずれの方法も自動変速モードよりマニュアル変速モードへの遷移時に、大きな車両挙動（大きな変速）を発生させない事を主眼に置いている。

一方、ステアリングに装着された＋／－といった変速段選択SWを備える車両においては、このSWを操作する事で、一時的にマニュアルモードを作動させるテンポラリマニュアルモードを備えている場合がある。このテンポラリマニュアルモードについては、通常のマニュアルモードに対して、一時的なエンジンブレーキや加速意思がある際に使用される事が多い。例えばエンジンブレーキを期待した場合、“－”側の変速段SW操作1回ではエンジンブレーキ力が不足する。このため、複数回操作が必要となり、利便性が高いとは言い難い。

【発明の概要】

自動変速モードからダウンシフト方向の操作（“－”SW操作）にてテンポラリマニュアルモードへ移行する際、移行直前のエンジン回転速度が、車速とアクセル開度率で設定される閾値（**図1**）よりも低い場合は、変速後のエンジン回転速度が本閾値よりも高くなる変速段を選択する（**図2**）事を特徴とする制御装置である。これにより運転者は一回の操作で適切なエンジンブレーキ力を得られ、利便性を向上させる事ができる。

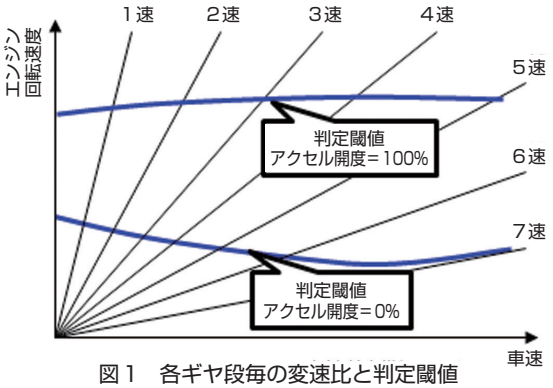


図１　各ギヤ段毎の変速比と判定閾値

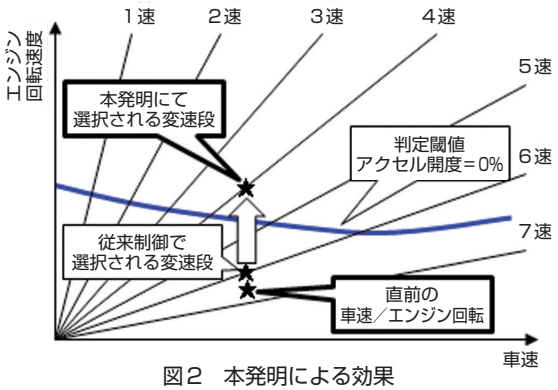
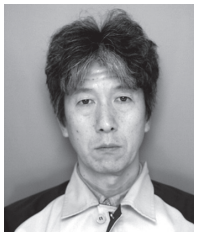


図２　本発明による効果

【発 明 者】

西田　祐之


井上　浩一

田中　敬樹

鯵本　恵介

安永　慎也

シリンダライナ、シリンダブロック及びシリンダライナの製造方法

【特許番号】特許第5107837号
【発明者】橘　　由氣／椎名　義朗

本発明は、水平対向エンジンに於ける温態時のボア変形のメカニズムを明らかにし、その発生メカニズムを考察した結果、ボア変形に影響する因子は設計・製造要件によって抑制が可能である事が判明、新形状のUN-Wライナを開発する事で温態時のボア変形を大幅に改善し、3.6L・6気筒以降、全ての水平対向エンジンに量産投入した。

【発明の背景】

SUBARUの水平対向エンジンのシリンダブロックはアルミダイカスト製であり、鋳造時に鋳鉄製のシリンダライナを鋳込む構造となっているが、ブロックとシリンダライナは異種材料のため、熱膨張差により、鋳造後に大きな残留内部応力が発生し、シリンダライナとブロックの密着性が悪いと、エンジンの暖気後にシリンダライナの真円度が悪化し、オイル消費が悪化する事が判明した（図1）。

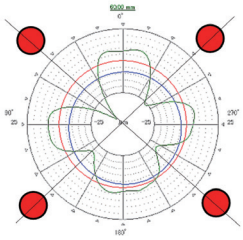


図1　ボア4次変形

従来のライナ外形形状では、アルミと密着が不十分であり、エンジン暖気後に温度が上がる事によって、シリンダライナのボア変形を増長させている事が特定出来たため、現行生産設備を流用しつつ、アンダカット効果を強化出来るUNWライナを開発した（図2）。

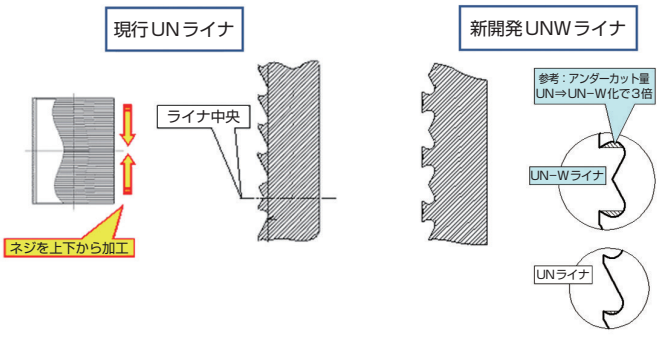


図2　ライナ外形形状

【発明の概要】

コスト、投資を抑えるため、現行設備を流用しつつ、アンダカット効果を強化したライナの外形形状を発明、全水平対向エンジンに量産投入し、オイル消費悪化の抑制とリング張力低減による燃費向上に貢献した（図3、図4）。

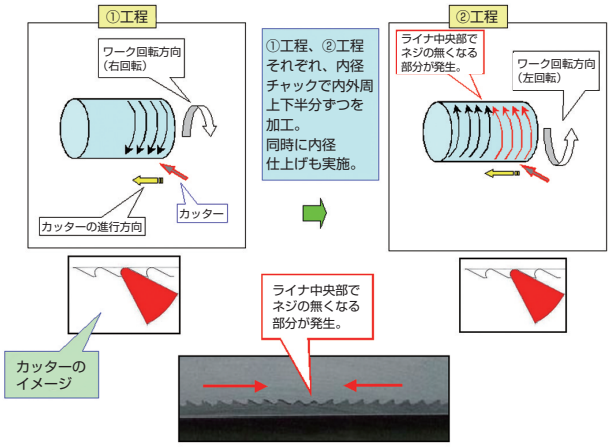


図3　現行UNライナ製造方法

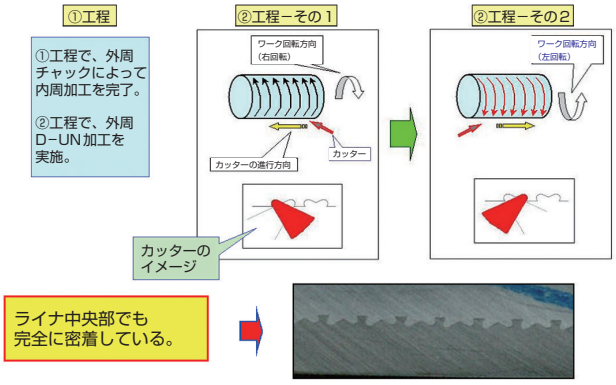
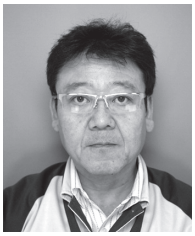


図4　新開発UNWライナ製造方法

【発 明 者】



橘　　由氣

椎名　義朗

車両の制御装置、サーバ、車両のモータ制御システム、及び車両のモータ制御方法

【特許番号】特許 第6530775号
【発明者】神田　晋一／小林　隆浩／米田　　毅／
家永　寛史

本発明は、モータの状態に応じて最大の効率をモータに発揮させることが可能な、車両の制御装置、サーバ、車両のモータ制御システム、及び車両のモータ制御方法を提供するものである。

【発明の背景】

モータで駆動される車両では、モータの効率が最大となるように電流制御が行われるが、このためのパラメータは事前の適合により決定される。一方、モータの個体差によりモータ特性にバラツキが生じる場合がある。また、故障によりモータ特性が変化する場合も想定される。このような適合時とモータ特性が異なるような条件下では、その条件における最大の効率をモータに発揮させることが困難となるという課題がある。

【発明の概要】

この課題を解決するために、車両を駆動するモータ20が予め定められた状態でモータ20に関するモータ回転数や温度といったモータ情報を取得するモータ情報取得部103と、取得したモータ情報を外部のサーバ600へ送信する通信部110と、送信したモータ情報に基づいてサーバ600が適合したモータ制御パラメータの適合値を受信する通信部110と、受信した適合値に基づいてモータ20を制御することでモータ個体毎に最大効率となるモータ制御が可能となるモータ制御部116と、を備える、車両の制御装置100が提供される（図1）。

モータ制御パラメータの適合値の算出は、車両からサーバに吸上げた誘起電圧値と電圧基準値の乖離から予想された磁力の低下箇所に基づいてサーバ内へ生成されるモータ状態モデル650（プラントモデル）を用いる（図2）。

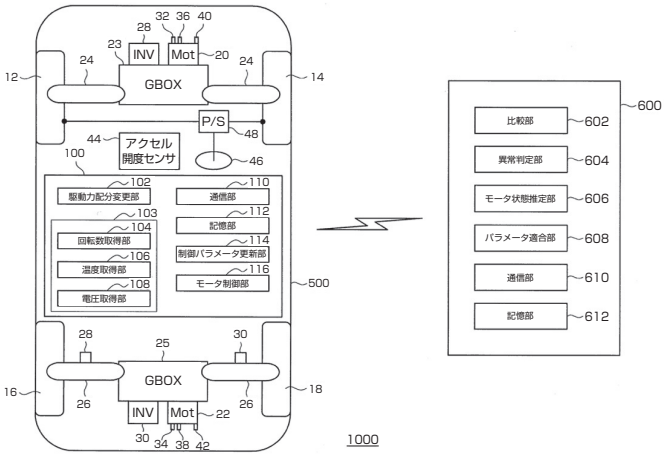


図１実施例の制御システム

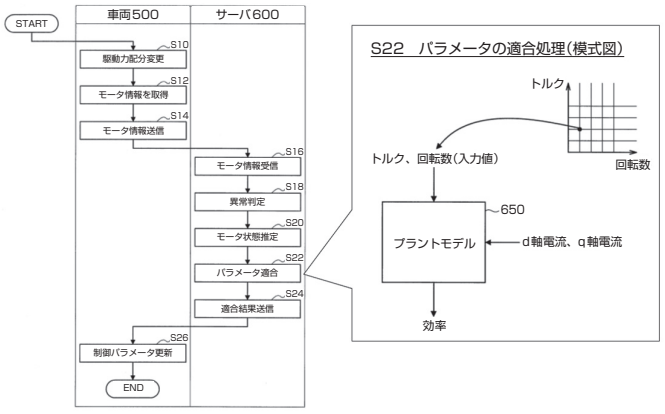
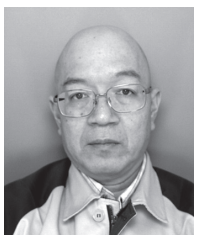


図２　実施例の制御方法

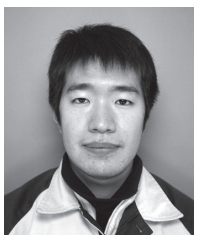
【発 明 者】

神田　晋一

小林　隆浩



米田　　毅



家永　寛史

複合構造体

【特許番号】特許第6640575号
【発明者】向中野　侑哉

本発明は、繊維強化樹脂製の構造体の孔部を金属製の部材を用いて構成しつつ、構造体の剛性及び強度を確保可能な、新規かつ改良された複合構造体を提供するものである。

【発明の背景】

近年、自動車の車体を始めとする構造体を構成する構造部材として、炭素繊維強化樹脂（CFRP）等の繊維強化樹脂からなる立体形状の構造部材が使用されつつある。繊維強化樹脂からなる構造部材は、金属製の構造部材に比べて構造部材の軽量化を図ることができる。繊維強化樹脂からなる構造体は、例えば、強化繊維に熱硬化性のマトリックス樹脂を含浸させた繊維強化樹脂シートを積層した繊維強化樹脂積層体を、オートクレーブ装置を用いて加熱及び加圧し、マトリックス樹脂を硬化させることにより製造される。

ここで、構造部材には連結具等が挿入される孔が設けられる場合がある。従来技術として、締結箇所を要する筒状部を、短繊維を含有させた溶融樹脂材料により形成される技術が存在する。しかし、一般的に短繊維からなる繊維強化樹脂は連続繊維からなる繊維強化樹脂と比較して剛性･強度が低く､サスペンションアームのように、高い剛性及び強度が要求される部品に対して、剛性及び強度が不十分となる問題がある。

【発明の概要】

この課題を解決するために、強化繊維を含む繊維強化樹脂を用いて構成される構造部材を、先端部に孔部を有するアーム部を備え、アーム部は孔部を形成する開口を有する円筒部と、円筒部の外周に連設されてアーム部に沿って延設された延在部を有する金属部材が、繊維強化樹脂に埋め込まれて構成させる。

本発明の作用を、ロアアームを実施例として説明する（**図1**）。このように構成されるロアアーム20において、筒状の第1の基部21に配置された金属部材27の円筒部は、車両の前後方向に略一致する中心軸を有し、先端部23の上下方向の揺動を可能にする。また、第2の基部22に配置された円筒部材28は、略鉛直方向に沿う中心軸を有し、先端部23の水平方向の揺動を可能にする。かかるロアアーム20には、車体への荷重や振動が伝達されるため、第1の基部21、第2の基部22、及び、先端部23には、それぞれ大きな負荷が発生し得る。したがって、第1の基部21、第2の基部22、及び、先端部23には、高い剛性及び強度が要求される。このため、本実施形態にかかるロアアーム20では、金属部材27が繊維強化樹脂に埋め込まれるとともに、孔部19b，19cの周囲に沿って連続繊維が配置されるため、孔部19b，19cの強度が高められる。

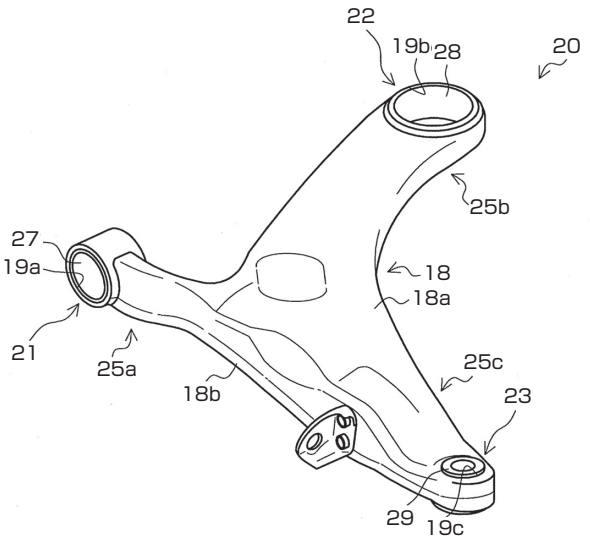


図1　複合構造体の実施例

【発 明 者】

向中野　侑哉

車両用表示制御装置

【特許番号】特許第6272375号
【発明者】佐藤 能英瑠／鳥居　武史／澄川　瑠一

本発明は、フロントウィンドシールド上のヘッドアップディスプレイ(HUD)表示と視認性を妨害する領域が重なる、かつドライバの視線がHUD表示に向けられていない場合に、HUD表示を視認性妨害領域外に移動させる車両用表示制御装置を提案するものである。

【発明の背景】

車両のフロントウィンドシールド上に、所定の画像や文字等を含む表示画像を表示させるヘッドアップディスプレイが知られている。フロントウィンドシールド上にHUD表示を表示させる際に、HUD表示と、雨、霧、日照、障害物等とが重なるとHUD表示が見えづらくなる場合がある。これに対して、既存の特許文献では、HUD表示の視認性に応じて、HUD表示の位置を制御する技術が開示されている。しかしながら、ドライバがHUD表示を見ている場合にHUD表示が移動すると、ドライバが煩わしさを感じるおそれがある。

【発明の概要】

この課題を解決するため、HUD表示と汚れなどの視認性妨害領域とが重なる、かつドライバの視線がHUD表示に向けられていない場合に、HUD表示を視認性妨害領域外に移動させる。

具体的には、HUD表示と汚れ領域とが重なった場合、ドライバの視線がHUD表示に向けられている間は、HUD表示を移動させることなく、コントラスト及びサイズのうちの少なくとも一方を調整する。これにより、HUD表示の視認性の低下が軽減される。一方、ドライバの視線がHUD表示に向けられていない場合、HUD表示許可領域内でHUD表示を移動させる(**図1**)。これにより、ドライバに煩わしさを感じさせずに、HUD表示と汚れ領域との重なりが解消される。また、汚れ領域と重ならない位置にHUD表示を移動させた上で、汚れ領域上に、汚れ領域越しの風景の画像を表示させる(**図2**)。**図2**に示した例では、汚れ領域上に、歩行者及び横断歩道の画像が重畳表示されている。これにより、汚れ領域が形成された場合であっても、ドライバの視界が補助され、車両の安全性の低下を低減することができる

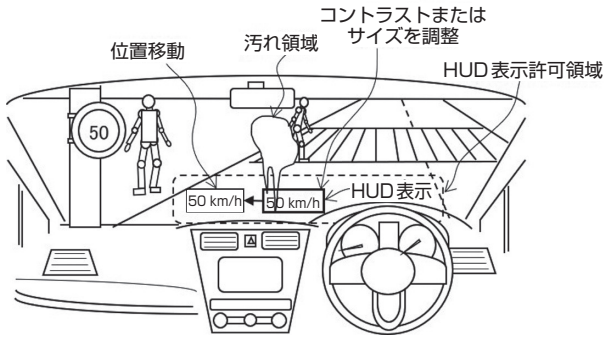


図1

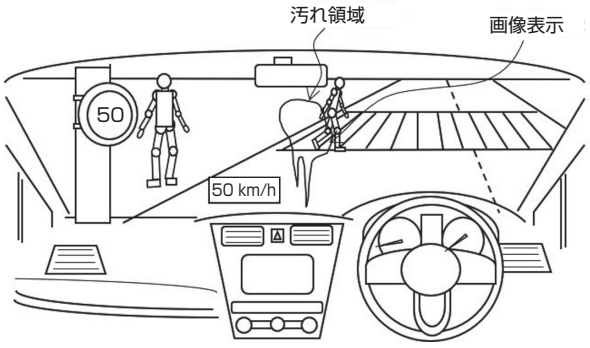
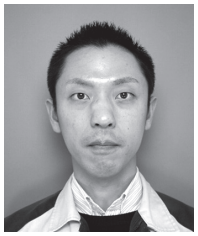


図2

【発 明 者】

佐藤 能英瑠


鳥居　武史

澄川　瑠一

締付装置及び締付方法

【特許番号】特許第6322387号
【発明者】斎藤　　学／中畑　達雄／渡邉　政雄

本発明は、ボルトやナットなどの締結部材を一度規定トルクで締め付けた後、締結部材を緩めることなく所望の設定トルク以上で締結されていることを確認することのできる締め付け装置（図1）及び締め付け方法を提供することである。

【発明の背景】

一般にボルトやナットなどの締結部材の締付精度を高めるために、締結部材に作用する締付トルクを測定し、その測定トルクが設定トルクに到達したときに締付を終了するよう数値制御された締付機が知られている。また、既に締め付けられた締結部材にさらにトルクを加えて締め付ける増締めが行なわれることがある。

増締めを締付機で行う場合、既に規定トルクがかかった状態の締結部材にさらにトルクをかけることになり、締め付けトルクがオーバーシュートすることが問題となるため、トルクレンチ等の手動締結器具を用いることが一般的であった。

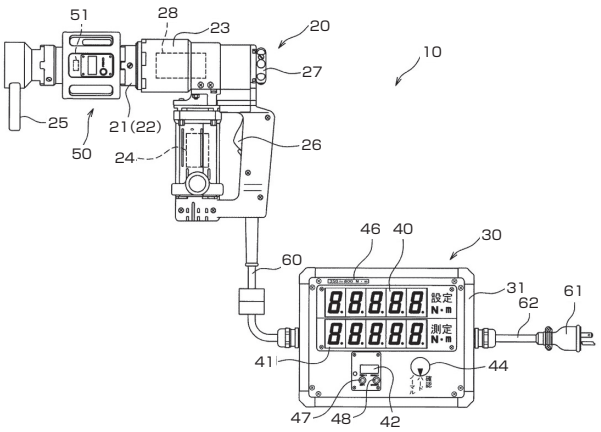


図1

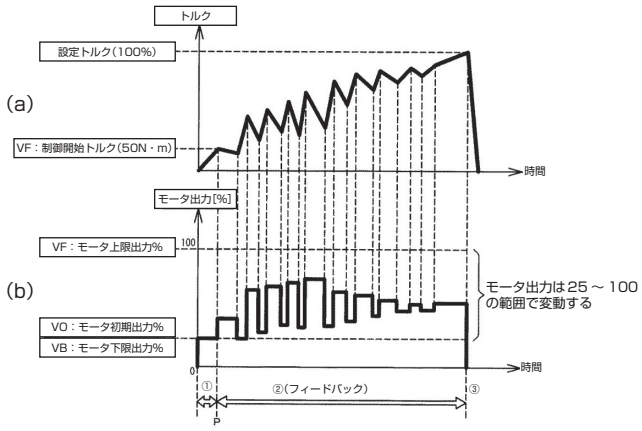


図2

【発明の概要】

この課題を解決するために、本発明の締付装置においては、数値制御（フィードバック制御）に工夫を施し、通常の締め付けモードに加え、確認締付モードを設定した。

通常の締め付けモードにおいては、締め付け時間を短縮するため、モーターの初期出力を大きく設定、かつ数値制御開始トルクを規定トルクに近い値で開始するのに対し、本発明における確認締付モードにおいては、モーターの初期出力を通常モードよりも小さい駆動力に設定することに加えて、数値制御を開始するトルク値を通常締付モードより小さくする、すなわち締め付け開始直後より制御を開始することで制御に要する時間的余裕を生み出すことにより、締め付けトルクのオーバーシュートを防止する（図2）。

上記の確認締付モードを用いれば、締結部材を緩めることなく所望の設定トルク以上で締結されていることが容易に確認できる。

【発 明 者】

斎藤　　学

中畑　達雄

渡邉　政雄

社外環境認識装置

【特許番号】特許第6741646号
【発明者】大久保 淑実

本発明は、路面を適切に特定可能な車外環境認識装置を提供することを目的としている。

【発明の背景】

一般に自車両の前方に位置する車両等の立体物を検出し、先行車両との衝突を回避したり(衝突回避制御)、先行車両との車間距離を安全な距離に保つように制御する(クルーズコントロール)技術が知られている。

自車両の進行方向に存在する立体物としては、同方向に走行する先行車両や、進行路を自車両横方向に横断する歩行者等がある。このような立体物の抽出条件の１つとして、路面より鉛直上方に高さを有することが挙げられる。

しかし、かかる立体物の抽出条件は、路面を適切に特定できていることが前提であり、路面が適切に特定できていないと、勾配のある道路自体を立体物と判定したり、本来存在するはずの立体物を抽出できなかったりすることとなる。特に、遠方の道路では、その画像(視差)が路面を示している信頼度が低くなり、路面を特定するのが困難であった。

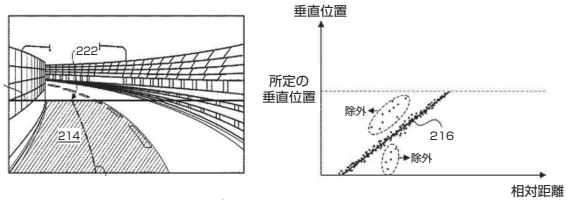


図１　第１路面領域とプロット図

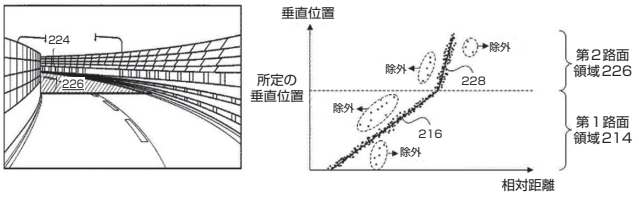


図２　第２路面領域とプロット図

【発明の概要】

この課題を解決するために、本発明の車外環境認識装置は、コンピュータが、画像中の路面に相当する第１路面領域を特定し 、第１路面領域における水平ライン毎の代表距離を、水平ラインの垂直位置に対応させてプロットして第１路面モデルを生成する第１路面特定部(**図１**)と、第１路面領域よりさらに遠方における路面に相当し、かつ、第１路面領域よりさらに遠方における路面を三次元空間に置換したときの水平方向の長さが、その領域の開始線から第１路面領域より長くなるように拡張された第２路面領域を特定し、第２路面領域における水平ライン毎の代表距離を、水平ラインの垂直位置に対応させてプロットして第２路面モデルを生成する第２路面特定部(**図２**)、として機能している。

【発 明 者】

大久保 淑実

社外発表一覧表（2020.1 ～ 2021.3）

1. 社 外 講 演

※所属は発表時点を示す。

発表時期	会 議 名 「発表タイトル」	講 演 者	所 属
2020/02	日本大学 生産工学部 自動車工学リサーチ・センター 自動車技術に関するCAEフォーラム 2020 in 東京 SUBARUにおける「ライトCAE × AI技術」活用の取組み紹介	湯村 洋典	技術開発部
2020/02	一般財団法人新潟県自動車標板協会・NPO法人交通新時代新潟 第32回産業安全講演会 スバル「アイサイト」ものがたり	柏瀬 一	技術開発部
2020/05	一般社団法人 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020 見張機と探索機による協調的な上空監視システムの提案	斉藤 成信[*1] 菊池 航矢[*1] 板橋 直亮[*2] 椛山 智貴[*2] 河野 充[*2] 星野 智史[*1]	＊1宇都宮大学 ＊2航空宇宙カンパニー 研究部
2020/06	2020年度人工知能学会(第34回)： 操作の変更修正と修正原因に着目した自動車の運転技能評価	小橋 昌明[*1] 田中 駿[*1] 塚本 祥太[*1] 佐藤 能英瑠[*2] 鳥居 武史[*2]	＊1フューチャー株式会社 ＊2技術研究所
2020/09	Society of Instrument and Control Engineers (SICE) The SICE Annual Conference 2020 (SICE 2020) Aerial Surveillance System with Multiple Agents for Moving Targets	星野 智史[*1] 勝本 健史[*2] 斉藤 成信[*1] 板橋 直亮[*3] 椛山 智貴[*3] 河野 充[*3]	＊1宇都宮大学 ＊2航空宇宙カンパニー システム設計部 ＊3航空宇宙カンパニー 研究部
2020/10	リード エグジビション ジャパン株式会社 関西 設計・製造ソリューション展 SUBARUにおける「ライトCAE × AI技術」活用の取組み紹介	湯村 洋典	技術開発部
2020/10	The Vertical Flight Society Vertical Flight Society 76th Annual Forum Experimental and Numerical Investigation of Interaction Between Rotor and Wing at High Advance Ratio	田辺 安忠[*1] 小林 航[*2] 林 大貴[*2] 佐藤 良亮[*3]	＊1国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA) ＊2航空宇宙カンパニー 回転翼機設計部 ＊3航空宇宙カンパニー 研究部

発表時期	会　議　名 「発表タイトル」	講　演　者	所　　属
2020/10	2020年度ヒューマンインターフェースサイバーコロキウム： 直線とカーブ走行時の車両挙動の変化を用いた聴覚刺激による運転行動の誘導に関する研究	澄川　瑠一 鳥居　武史	技術研究所
2020/10	名古屋オートモーティブ ワールド セミナー 2020： 自動運転開発プロセスでの仮想現実シミュレータの適用と展望	小山　　哉	技術研究所
2020/11	2020 BETA CAE Systems Japan Online Open Meeting： ANSA機能を利用したコンポジットモデル作成	伊藤　寛泰	技術研究所
2020/11	一般社団法人 日本航空宇宙学会 第58回飛行機シンポジウム 自動シーリング装置の開発	松本　洋平	航空宇宙カンパニー 生産技術部
2020/11	一般社団法人 日本航空宇宙学会 第58回飛行機シンポジウム 無人航空機の有人機に対する衝突回避技術の開発	笹本　貴宏	航空宇宙カンパニー 自律システム設計部
2020/11	一般社団法人 日本航空宇宙学会 第58回飛行機シンポジウム リフトオフセットによるコンパウンド・ヘリコプタの空力性能向上	菅原　瑛明[*1] 小林　　航[*2] 林　　大貴[*2] 中村　瑞城[*2] 佐々木 雅文[*3]	＊1国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構（JAXA） ＊2航空宇宙カンパニー 回転翼機設計部 ＊3航空宇宙カンパニー 研究部
2020/11	一般社団法人 日本航空宇宙学会 第58回飛行機シンポジウム 部品塗装の自動化・ロボット適用拡大	今泉　真人[*1] 大澤　知将[*1] 松尾　晋哉[*1] 倉持　宏明[*2] 安野　好紀[*2] 鈴木　秀紀[*2]	＊1航空宇宙カンパニー 生産技術部 ＊2航空宇宙カンパニー 製造部
2020/12	気象影響防御技術コンソーシアム WEATHER-Eyeオープンフォーラム 航空機の気象安全技術に関するSUBARUの取り組み	荻巣　敏充	航空宇宙カンパニー 企画管理部
2020/12	公益財団法人 ふくい産業支援センター 「CFRPにおけるモビリティ分野の最新動向」講演会 航空機へのCFRP の適用事例と今後の課題	荻巣　敏充	航空宇宙カンパニー 企画管理部
2020/12	公益社団法人 計測自動制御学会 第21回システムインテグレーション部門講演会（SI2020） 探索機の寄与度を考慮した見張機と探索機による協調的な上空監視システム	斉藤　成信[*1] 菊池　航矢[*1] 板橋　直亮[*2] 椛山　智貴[*2] 河野　　充[*2] 星野　智史[*1]	＊1宇都宮大学 ＊2航空宇宙カンパニー 研究部
2020/12	大学連携による産学人材育成PJ、群馬県 自動車関連産業における産学人材育成講座 次世代自動車技術研究について	岩瀬　　勉	技術開発部

発表時期	会　議　名 「発表タイトル」	講　演　者	所　　属
2020/12	公益社団法人 計測自動制御学会 第21回システムインテグレーション部門講演会(SI2020) マルチエージェントUAVによる監視飛行行動の強化学習	菊池　航矢*1 斉藤　成信*1 板橋　直亮*2 椛山　智貴*2 河野　　充*2 星野　智史*1	＊1宇都宮大学 ＊2航空宇宙カンパニー 研究部
2021/01	リード・ジャパン オートモーティブワールド　軽量化技術展 高まるマルチマテリアル化の重要性　最新事例と今後の展望	河合　功介	材料研究部
2021/02	公益社団法人自動車技術会 シンポジウムNo.03-20『新開発エンジン』 新型水平対向1.8L過給リーンバーンエンジン開発	長島　仁宏	技術開発部
2021/03	公益社団法人 日本航空技術協会 第33回航空安全シンポジウム 航空機の被雷回避技術と今後の課題	荻巣　敏充	航空宇宙カンパニー 企画管理部

（公社）：公益社団法人、（一社）：一般社団法人　（公財）：公益財団法人、（一財）：一般財団法人

2. 寄　稿

発表時期	寄　稿　先 「発表タイトル」	著　　者	所　　属
2020/06	自動車技術　第74巻6号 液封パルス鍛造法によるヘリカルギヤ成形技術	志賀　　良*1 古川　康之*1 山本　　一*2	＊1パワーユニット生産技術部 ＊2(株)アマダプレスシステム
2020/07	自動車技術　第74巻7号 AIモデルを活用したエンジン部品 研削加工工程の品質保証向上	大庭　　卓*1 渡部　　勇*2 山本　淳史*3 若杉　諒介*3 上田　涼真*3	＊1パワーユニット生産技術部 ＊2(株)富士通研究所 ＊3(株)富士通アドバンストエンジニアリング
2020/09	自動車技術　第74巻9号 塗装乾燥炉工程におけるデジタル開発の取組み	稲見　顕子	生産技術管理部
2021/01	技術情報協会 異種材料の接着・接合技術と応用事例 自動車マルチマテリアル化の動向と今後求められる技術	河合　功介	材料研究部
2021/02	株式会社三栄　モーターファン・イラストレーテッド編集部 モーターファン・イラストレーテッドCVT特集「CVTの逆襲」 最新事例　ユニットサイズや軸配置は変えず性能向上	小川　雅人*1 岸本　拓也*2 角田　嘉人*3	＊1電動駆動設計部 ＊2電動駆動開発部 ＊3パワートレインシステム性能開発部

編 集 後 記

新型コロナウイルスの感染拡大が止まない中、第48号の執筆作業が始まりました。昨年度から本格化した在宅勤務にも慣れ、執筆者や編集者もウェブを活用した相談や会議がしやすくなり、執筆や編集作業をスムーズに進めることができました。東京2020オリンピック・パラリンピックも無観客での開催となりましたが、読者の皆様も「おうち時間」の過ごし方にも慣れ、それぞれの楽しみ方ができたのではないでしょうか？その中で、最前線で新型コロナウイルスと戦う医療従事者の方々に、感謝の意を表します。

さて、第48号では、新型BRZの小特集を組んでおります。小特集では、車体やエンジンの開発、スポーツカー向けのコックピットシステム、デザインなど様々な分野から見どころを紹介させて頂きました。その他にも、研究開発や生産技術等、SUBARUが生み出した技術を本号に詰め込みました。読者の皆様がSUBARUの技術に触れる機会になっていただければ幸いです。

最後に本号の発刊にあたり、ご協力いただきました執筆者の皆様と、編集にご尽力いただいた関係各位に御礼申し上げるとともに、読者の皆様との接点としてSUBARU技報が輝き続けることを願い結びの言葉とさせていただきます。（矢作）

SUBARU技報編集委員会構成表

委員長	佐瀬　秀幸	技術開発部	
委　員	刀祢　友久	商品企画本部	
	篠塚　順三	商品企画本部	
	大関　　透	デザイン部	
	角田　　隆	技術開発部	
	塚田　剛久	ボディ設計部	
	古瀬　智広	ボディ設計部	
	山崎 研太郎	内外装設計部	
	神谷　知宏	内外装設計部	
	清水　孝則	コネクティッドカー開発部	
	野本　大志	コネクティッドカー開発部	
	中川　修一	材料研究部	
	藤川　次郎	車両開発統括部	
	林　　憲孝	車両運動開発部	
	小林　正明	車両安全開発部	
	高橋　　理	ADAS開発部	
	阿部　幸一	ADAS開発部	
	冨士　　啓	電子制御開発部	
	矢作　博道	電子制御開発部	
	斉藤　雄三	開発試作部	
	関　　竜達	パワートレイン設計部	
	大抜 由起夫	パワートレイン設計部	
委　員	松前　和伸	車両環境開発部	
	山本　光夫	車両環境開発部	
	松田　一彦	車両環境開発部	
	中山　智裕	車両環境開発部	
	岩上　祥夫	車両環境開発部	
	斎藤　　誠	CAE部	
	鳥居　武史	技術研究所	
	浅井　鉄雄	生技管理部	
	東稔　俊史	航空宇宙カンパニー	
	長田　　保	航空宇宙カンパニー	
事務局	松本　　伸	技術管理部(群馬)	
	関谷　雄一	技術管理部(東京)	
	細井 久美子	技術管理部(群馬)	
	木島　　誉	技術管理部(東京)	
	正田　篤生	技術管理部(群馬)	
	中島　宏和	技術管理部(東京)	
	正田　　茂	SUBARUテクノ株式会社	
	塚本　啓了	SUBARUテクノ株式会社	
	小杉　富雄	SUBARUテクノ株式会社	
	宮澤　則之	SUBARUテクノ株式会社	
	富岡　淑美	SUBARUテクノ株式会社	

SUBARU技報第48号(非売品)

発　　行　2021年11月
発行兼編集人　SUBARU技報編集委員会
発 行 所　株式会社SUBARU技術管理部
群馬県太田市スバル町1-1
電話　0276-26-3380
印　　刷　SUBARUテクノ株式会社
群馬県太田市金山町27-1
電話　0276-26-2626

©2021 SUBARU CORPORATION
禁無断転載

SUBARU