スバル技報

2014

SUBARU TECHNICAL REVIEW No.041

表紙デザイン

デザイン部　高松 雄輝

「革新スポーツツアラー」を表現した、レヴォーグの流麗な再度ビューをメインに「アイサイトVer.3」「ボクサーDIT」などの先進技術とスタイリングが高次元で融合している様子をデザインしました。
全体を爽やかなブルーと動きのある線使いでまとめ、スバル車の持つ走りの楽しさと躍動感を表現しました。

SUBARU TECHNICAL REVIEW

2014 No.41

巻頭言

安心と愉しさの追求

執行役員　大　抜　哲　雄

弊社は2013年度、過去最高の売上高・営業利益等を記録し、自動車部門では過去最高の販売台数を記録することができた。弊社の商品を購入して頂いたお客様に感謝するとともに、開発、生産、販売に尽力して頂いている、お取引先や社内関係者に心から感謝申し上げたい。

2013年度、特に北米でスバルの販売を牽引したOUTBACK、FORESTER、XVの3車種は、乗用車とSUVの良さを融合したXUV（クロスオーバー・ユーティリティ・ビークル）である。スバルのみならず他メーカーもXUVを数多く投入しており、今やXUVはグローバル市場で一つの商品カテゴリーを形成するまでになった。

先日、映画「ネブラスカ ふたつの心をつなぐ旅」を見た。息子が頑固な老父と一緒に、'94年式OUTBACKで米国モンタナ州から老父の生まれ故郷に立ち寄りながらネブラスカ州まで旅をする。この懐かしいOUTBACKが、XUVの魁（さきがけ）である。

スバルは長年北米でAWDのステーション・ワゴンを販売してきた。'89年からは米国インディアナ州で現地生産を開始していたが、大きなヒット商品はなかった。先の映画に登場するOUTBACK（日本名：ランカスター）は、実用的なステーション・ワゴンでありながら、車高を上げ、大径タイヤを履き、屋根には荷物を載せられるルーフラックを付け、ラギッド（Ragged：武骨な、頑丈そうな）なデザインを与えられたスバル最初のXUVである。スバルが長年磨いてきた水平対向エンジンとAWDシステムは、確かに優れた機能ではあったが、外見からは判らない。そこにAWDを上手く表現した外観デザインと実用的な機能を付加し、更にTV-CFで上手くお客様にアピールすることで、「どんな環境下でも『安心』で頼れる、アウトドアで『愉しく』使える」商品であることがお客様に伝えられ、北米のスバルの流れを変える大ヒットとなったのである。

丁度このころから、スバルは「衝突安全世界一」の取り組みをスタートさせた。約20年が経った今、北米で販売するスバル車のほとんどが第三者評価でトップクラスの衝突安全性能を達成している。もう一つの大切な技術は「アイサイト」である。本号で紹介する新型車「レヴォーグ」には、従来より革新的に性能を向上させた「アイサイトver.3」を搭載する。アイサイトも20年以上開発を続けて華を咲かせた技術である。今や衝突安全性能とアイサイトは、スバルを象徴する独自技術と評価して頂いているが、最初から独自性を目指した訳ではない。ただお客様の立場で「車の在りたい姿」を考え、それを実現する手段としての技術チャレンジであったことを強調したい。

本号では、自動車のみならず弊社の航空宇宙部門や産業機器部門が取り組んでいる技術成果を紹介する。それぞれの分野で高いレベルの研究開発を行っている。衝突安全やアイサイトのように10年後20年後に華開く技術も大切に育てて行きたいと考える。

2014年度から弊社は新中期経営ビジョン「際立とう2020」をスタートさせた。お客様のニーズ変化、厳しい環境対応など、我々が取り組むべき課題は山積しているが、2020年以降の弊社の「あるべき姿」をしっかりと置いて、そこを目指した技術開発に邁進して行く。全ては、お客様にとって「安心で愉しい」と感じて頂ける商品を目指して、我々はチャレンジを続けて行く。

目　　次

✦巻頭言

安心と愉しさの追求――――――――――――――大抜　哲雄

✦小特集「スバル レヴォーグ」

1. スバル レヴォーグの紹介 ――――――――SUBARU LEVORG 開発プロジェクトチーム … 1

2. スバル レヴォーグのデザイン ――――――小林　正彦・宮下　大輔・雲野　裕紀・斎藤　　實 …… 24

3. スバル レヴォーグの荷室開発 ――――――岡留　聖二 …… 32

4. 新開発1.6ℓ水平対向直噴ターボエンジンの開発・紹介
佐々木　礼・保阪　亮太・横山　　誠・金子　　隆・勝俣　雅人・平岡　直樹・塚本　直輝 …… 37

✦小特集「スバル 新型 WRX」

5. 新型WRXの紹介 ――――――――――――新型WRX開発プロジェクトチーム …… 43

6. 新型WRXのデザイン ――――――――――小林　正彦・宮下　大輔・雲野　裕紀・斎藤　　實 …… 65

✦小特集「スバル レヴォーグおよび新型 WRXの新技術」

7. スポーツリニアトロニック用新変速制御の開発
鯵本　恵介・田中　敬樹・山形　　進 …… 73

8. スポーティーシート開発について ――――藤岡　豊二・浅野　恵一・長谷川　拓也 …… 78

✦論文・解説

9. 運転支援システム「EyeSight（ver.3）」の開発
木戸　辰之輔・片平　　聡・伊東　　涼・加藤　寛基・小山　　哉・玉置　　健・前田　晋之介 …… 82

10. アクティブレーンキープ・AT誤後進抑制機能の開発
水谷　公一・小山　　哉・寺澤　　武・田村　悠一郎・中島　博人・白石　英一・江副　志郎 …… 89

11. 通信利用型先進安全自動車の開発(ITS世界会議東京2013)
手塚　俊介・堀部　若菜・喜瀬　勝之・
山崎　まひろ・坂口　貴浩 …… 97

12. 北米OBD規制における診断除外認可の取得プロセス
大伴　洋祐 …… 104

13. 衝突安全と軽量化を両立するホットスタンプパッチワーク技術の実用化
松崎　輝男・宮崎　高志・森　　修・
岩沼　忠士・矢島　正毅 …… 109

14. 複合材料を用いたエネルギー吸収部材の研究 ―池田　　聡・加藤　　航・長沢　　勇・
向中野　侑哉・塩崎　竜二 …… 114

15. ドライバ状態の共有による交通事故低減技術の研究
鳥居　武史・松尾　典義・内海　　章・
多田　昌裕・山本　直樹・志堂寺　和則…… 120

16. SUBARUフォレスター・XVの人間生活工学製品機能認証
松尾　典義・渡邊　常寛・荻原　　浩 …… 126

17. シャシ部品の耐食性＆疲労強度向上溶接手法の研究開発
中澤　嗣夫・小池　正俊・小暮　　崇 …… 131

18. 直交歯車箱によるハイポイドギヤ振動と放射音の基礎試験
渡辺　　健・白木　啓一郎 …… 138

19. CAEを用いた燃料タンクから発生する揺動音予測技術の開発
関　　俊一・森　　智一・伊藤　健吾・
古野　一裕 …… 145

20. 円筒形分力ロードセルの開発 ――――――――下山　　浩・永野　弘樹・坂本　昌也・
榎本　秀喜 …… 151

21. ハイポイドギヤ歯切り加工における球状化焼鈍鋼の工具摩耗予測
白石　真一・松村　　隆・日下　高至 …… 157

22. 無人航空機の一般空域での運航に関する動向 ―阪口　晃敏 …… 163

23. 航空機構造組立に対応する自動穿孔システムにおける信頼性向上開発
宮島　秀明・村上　　孝・高橋　秀治・
中畑　達雄・斎藤　　学 …… 168

24. 航空機における材料開発動向 ――――――――足立　隆史・谷嶋　真一・生出　理子・
橋本　麻由 …… 173

25. 航空機用CFRP製燃料タンク内の静電気解析手法の開発
藤澤　　浩・西　孝裕樹・津端　裕之 …… 178

26. プリプレグ積層精度計測技術 ――――――――安陪　彰児 …… 182

27. Ｔ－５型航空機用フライト・シミュレータの紹介
市島　　茂・金子　弘行・早川　正翁 …… 188

28. 産業機器用エンジン開発におけるCAEの活用　柿崎　敬一・杉浦　規郎 …… 194

29. スバルと刺身と煮魚と ――――――――――坂崎　明彦・太田　康之 …… 201

30. スバルの質量管理の現在過去未来 ――――――坂崎　明彦・占部　清和 …… 208

31. 特許紹介 ――――――――――――――――技術開発部 …… 215

✦社外発表一覧（2013.1 ～ 2013.12 講演・寄稿） …… 221

CONTENTS

✦Foreword

Pursuit of Driving Enjoyment and Peace of Mind—Tetsuo OONUKI

✦Special Issure : SUBARU LEVORG

1. Introduction of SUBARU LEVORG ——— SUBARU LEVORG Project Team ····· 1

2. Design of SUBARU LEVORG ——— Masahiko KOBAYASHI, Daisuke MIYASHITA, Yuki KUMONO, Minoru SAITO ····· 24

3. Luggage Room Development of SUBARU LEVORG
Seiji OKADOME ····· 32

4. Development of 1.6L Horizontally-Opposed Direct Injection Turbo Gasoline Engine
Rei SASAKI, Ryota HOSAKA, Makoto YOKOYAMA, Takashi KANEKO, Masato KATSUMATA, Naoki HIRAOKA, Naoki TSUKAMOTO ····· 37

✦Special Issure : SUBARU New WRX

5. Introduction of New SUBARU WRX ——— New SUBARU WRX Project Team ····· 43

6. Design of New SUBARU WRX ——— Masahiko KOBAYASHI, Daisuke MIYASHITA, Yuki KUMONO, Minoru SAITO ····· 65

✦Special Issure : New Technology SUBARU LEVORG and New WRX

7. Development of New Shift Control for Sport Lineartronic
Keisuke AJIMOTO, Hiroki TANAKA, Susumu YAMAGATA ····· 73

8. Development of Sporty Seat ——— Atsuji FUJIOKA, Keiichi ASANO, Takuya HASEGAWA ····· 78

✦Techinical Paper & Explanations

9. Development of Driving Assist System "EyeSight (ver.3)"
Shinnosuke KIDO, Satoshi KATAHIRA, Ryo ITO, Hiroki KATO, Hajime OYAMA, Takeshi TAMAKI, Shinnosuke MAEDA ····· 82

10. Development of Active Lane Keeping and Backward Throttle Management
Koichi MIZUTANI, Hajime OYAMA,
Takeshi TERAZAWA, Yuichiro TAMURA,
Hiroto NAKAJIMA, Eiichi SHIRAISHI,
Shiro EZOE ····· 89

11. Development of Communication-based Advanced Safety Vehicle
(ITS World Congress Tokyo 2013)
Shunsuke TEZUKA, Wakana HORIBE,
Katsuyuki KISE, Mahiro YAMASAKI,
Takahiro SAKAGUCHI ····· 97

12. Acquisition Processes of Test-Out on North American OBD Regulation
Yosuke OHTOMO ····· 104

13. Practical Application of Hot Stamping Patchwork Technology for
Crash Safety and Weight Reduction
Teruo MATSUZAKI, Takashi MIYAZAKI,
Osamu MORI, Tadashi IWANUMA,
Masaki YAJIMA ····· 109

14. Study of Energy Absorbing Member using Composite Material
Satoshi IKEDA, Wataru KATO,
Isamu NAGASAWA, Yuya MUKAINAKANO,
Ryuji SHIOZAKI ····· 114

15. Research and Development of Traffic Safety Mechanism Based
on Driver's Behavior and Reliability Sharing
Takeshi TORII, Noriyoshi MATSUO,
Akira UTSUMI, Masahiro TADA,
Naoki YAMAMOTO, Kazunori SHIDOJI ····· 120

16. Certification for "Human Engineering for Quality of Life"
Products and Functions for SUBARU Forester and XV
Noriyoshi MATSUO, Tsunehiro WATANABE,
Hiroshi OGIWARA ····· 126

17. Development of Welding Technology for Improving Corrosion Resistance and Fatigue Strength of Chassis Parts
Tsuguo NAKAZAWA, Masatoshi KOIKE, Takashi KOGURE ····· 131

18. Fundamental Investigation of Hypoid Gear Noise and Vibration using Gearbox Test Facility
Takeshi WATANABE, Keiichiro SHIRAKI ····· 138

19. Development of Prediction Technology of Sloshing Noise in Fuel Tank using CAE
Shunichi SEKI, Tomokazu MORI, Kengo ITOH, Kazuhiro FURUNO ····· 145

20. Development of Tubular Shaped 6-Component Force Load Cell
Hiroshi SHIMOYAMA, Hiroki NAGANO, Masaya SAKAMOTO, Hideki ENOMOTO ····· 151

21. Tool Wear Prediction of Spheroidizing Annealed Alloy Steel for Hypoid Gear Cutting
Shinichi SHIRAIHI, Takashi MATSUMURA, Takashi KUSAKA ····· 157

22. Global Movement for Unmanned Aerial Vehicles to Fly in National Airspace
Akitoshi SAKAGUCHI ····· 163

23. Reliability Improvement of Mobile Automated Drilling Equipment for Aircraft Structures
Hideaki MIYAJIMA, Takashi MURAKAMI, Hideharu TAKAHASHI, Tatsuo NAKAHATA, Manabu SAITO ····· 168

24. Metallic Material Development for Aerospace
Takafumi ADACHI, Shinichi YAJIMA, Ayako OIDE, Mayu HASHIMOTO ····· 173

25. Development of Electrostatic Analysis Method for CFRP Aircraft Fuel Tank
Hiroshi FUJISAWA, Takayuki NISHI, Hiroyuki TSUBATA ····· 178

26. Measurement Technology for Laying Prepreg Accuracy
Shoji ABE ····· 182

27. Introduction of T-5 Operational Flight Trainer — Shigeru ICHIJIMA, Hiroyuki KANEKO, Masahito HAYAKAWA ····· 188

28. CAE Analysis in Development of Engine for Industrial Equipment — Keiichi KAKIZAKI, Norio SUGIURA ····· 194

29. SUBARU, Sashimi and Boiled Fish — Akihiko SAKAZAKI, Yasuyuki OOTA ····· 201

30. Past, Current, and Future Mass Management in SUBARU — Akihiko SAKAZAKI, Kiyokazu URABE ····· 208

31. SUBARU Patent Review — Advanced Engineering Department ····· 215

✦List of Issued Reports ····· 221

スバル レヴォーグの紹介

Introduction of SUBARU LEVORG

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

抄　録

レヴォーグは1989年に初代レガシィを投入してから5世代を経た25年の節目となる本年、国内専用の新たな主力車種として投入する日本のための『革新スポーツツアラー』である。

レガシィがグローバルな建付けに進化する一方、日本専用車として日本市場にジャストフィットのサイズに凝縮し、実質のレガシィツーリングワゴン後継として、更には今後の国内販売を支える主力車種として、スバルの最新技術を全て投入して開発した新機軸商品である。

スポーツカーの走りの愉しさとツーリングカーの快適性やユーティリティを併せ持ち、『所有する悦び』を提供する“新世代のスバル”レヴォーグを以下に紹介する。

Abstract

SUBARU LEVORG is introduced as an “innovative sports tourer” only for the Japanese market in the memorable 25th year after Legacy was first launched in 1989 followed by the release of five generations.

While Legacy has evolved to be a global model, LEVORG is designed perfectly to fit into the Japanese market. As a successor to Legacy touring wagon as well as a future key model to support domestic sales, all advanced technologies of SUBARU were employed in LEVORG.

This paper introduces the “new generation” SUBARU LEVORG, which provides “pleasure to possess”, achieved with driving enjoyment of a sport car and comfort and utility of a touring car.

1.　まえがき

「日本のお客様のニーズを100%満たし、心から満足して頂けるクルマとは?」このテーマを全力で追求し、商品として提供することがプロジェクトの使命であった。

日本の交通環境で運転しやすく、扱い易いボデーサイズ、凝縮感のある引き締まった佇まい、快適で適度な居住空間と利便性の高い荷室を両立すると共に、レガシィで25年間培ってきた「グランドツアラー」としての価値を継承しながら「新世代のスポーティカー」にふさわしい走り、デザイン、質感、環境性能や最新装備をバランス良く融合したクルマの実現を目指して開発に臨んだ。

2.　開発の狙い

レガシィの延長上にあるツーリングワゴンに留まらず、一歩先を行く時代感を有したクルマ、WRXが持つスポーツカーとしての走りのポテンシャルや操る愉しみとワゴントップブランドで築いたノウハウを全て投入し、高い次元に昇華しながら、お客様の期待を遥かに超える新世代のワゴンを目指して開発した。

■ コンセプト『革新スポーツツアラー』

時代が求める走り、環境性能、快適性、安全と機能をかつてない流麗なスタイリングにまとめ、スポーツカーとユーティリティの融合を図った(Fig. 1)。

Fig. 1　Sports tourer

■ お客様に提供する価値

『レヴォーグというクルマを所有する悦び』を実現すべく下記のことを目指した。

①デザイン＆クオリティ

スタイリッシュなエクステリアと細部まで丁寧に作りこまれた「仕立ての良い」インテリア(Fig. 2)。

②ジャパンベストのパッケージング

日本の道路・交通環境にジャストフィットなサイズとワゴンとしての機能性を徹底的に追及したパッケージング。

③最新のパフォーマンス

新世代のスポーツツアラーにふさわしい環境性能を提供するパワーユニットとWRX譲りの走りのポテンシャル。

④最高の安全性

最新の運転支援システム(アイサイトver.3)による最先端のプリクラッシュセーフティと世界トップレベルのパッシブ＆アクティブセーフティを投入して最高の安全を提供。

■ パッケージ

日本市場にベストサイズとして評価が高い、4代目レガシィや現行インプレッサのサイズ感を継承し、全長と全高は5ナンバサイズとした。全幅は他銘の動向も踏まえ、あえて現行レガシィ同等の1,780 mmとし、抑揚があって立体感と力強さが際立つ側面造形を実現した。一方､幅狭路地での実用性に配慮し､ドアミラーtoドアミラーでは現行レガシィよりも20 mm狭い2,020 mmとした(Fig. 3)。

また、直接視界の良さにも最大限こだわり、Aピラーの根元や振り返り時のCピラーの死角及び後方視界の不可視長の最小化によって見晴らしが良く、車両感覚がつかみ易い快適なツーリングを愉しめるようにした。

■ 主な仕様装備

日本市場でワゴンカテゴリが縮小する中、欧州車ワゴンがシェアを拡大してきている。レヴォーグは装備面でも、これら欧州車と十分戦える仕様を備え、元気な日本車ワゴンの復権を実現できる商品設定とした(Table 1)。

Fig. 2　Exterior & interior

Fig. 3　Dimensions

Table 1　Main equipment list

主要装備アイテム	装備詳細	1.6 L			2.0 L	
		GT		GT-S	GT	GT-S
アイサイト ver.3	プリクラッシュブレーキ、追従クルコン、車線逸脱防止など		○	○	○	○
ヘッドランプ	LED	OP	OP	○	○	○
リヤコンビランプ	LED	○	○	○	○	○
エマージェンシーストップシグナル	急制動時のハザード自動高速点滅	○	○	○	○	○
ルーフアンテナ	シャークフィンタイプ	○	○	○	○	○
給油フラップ	内部樹脂カバー	○	○	○	○	○
メーター	カラー液晶	○	○	○	○	○
	ウェルカム演出（サウンド＆アニメーション）	○	○	○	○	○
パワーウインドウ	全席オートアップ＆ダウン仕様	○	○	○	○	○
エアコン	運助独立フルオート	○	○	○	○	○
室内照明	後席は左右独立リーディングライト		○	○	○	○
ワンタッチレーンチェンジャー		○	○	○	○	○
オートワイパー、オートライト、ヒーテッドミラー		○	○	○	○	○
キーレスアクセス＆プッシュスタート		○	○	○	○	○
電動パーキングブレーキ			○	○	○	○
高触感革ステアリング＆シフトノブ				○		○
オールウェザーパック（ワイパーデアイサー、リヤフォグランプ、UV カットガラス、撥水ドアガラス）		OP	OP	OP	OP	OP
ウェルカムライティング（足元照明、ポジションランプ点灯）		OP	OP	OP	OP	OP

○：標準装備　　OP：メーカオプション

3.　主要諸元・車種構成

Table 2参照。

4.　デザイン

デザインについては、本号別報[(1)]にて解説しているため、本報では割愛する。

5.　車体

5.1　開発の狙い

スポーツツアラーとしてのスタイリッシュな外観と実用性の両立、また運転を始めるとワゴンであることを忘れてしまう運動性能に加え、ロングツーリングに相応しい乗り心地の実現に向け、デザインとユーティリティの両立、高強度･高剛性ボデーによる衝突安全･走行性能向上、質感・静粛性・商品力向上を目指し下記に取組んだ。

■ デザインとユーティリティの両立

①スタイリッシュなデザインと実用性を両立させるため、リヤレール断面を最小化し、外観上はコンパクトなデザインであるが、荷室は現行レガシィ同等以上の容量を確保した(Fig. 4)

②キャビンの優れた視界を実現させるため、Aピラー下には三角窓を設定。さらに斜め後方の振り返り死角を減らすため、Cピラーの断面幅を狭くすることで直接視界の改善を図った(Fig. 5)。これらにより現行レガシィ比でも良好な視界改善を実現できた(Fig. 6)。

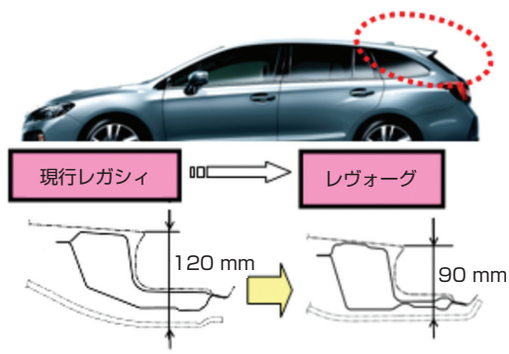


Fig. 4　Rear rail（section）

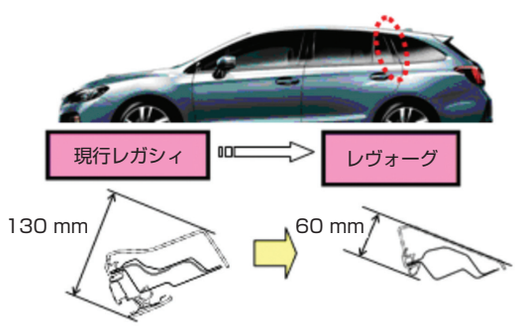


Fig. 5　C pillar（section）

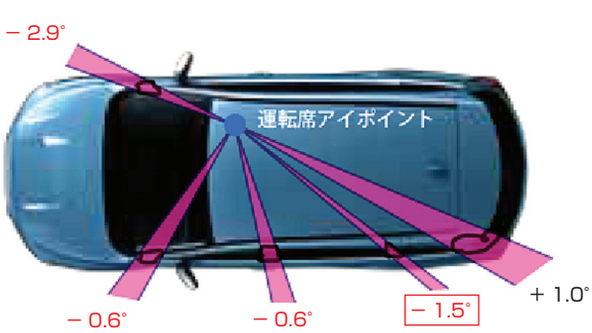


Fig. 6　Blind spot improvement

Table 2 Specifications

車名・型式		スバル DBA － VM4			スバル DBA － VMG	
車種		1.6GT	1.6GT EyeSight	1.6GT － S EyeSight	2.0GT EyeSight	2.0GT － S EyeSight
		1.6L DOHC 直噴ターボ DIT			2.0L DOHC 直噴ターボ DIT	
		リニアトロニック			スポーツリニアトロニック	
		AWD				
◆寸法・重量・定員						
全長（mm）		4690				
全幅（mm）		1780				
全高（mm）		1485		1490		
室内長（mm）		2005				
室内幅（mm）		1490				
室内高（mm）		1205				
ホイールベース（mm）		2650				
トレッド［前］(mm)		1530				
トレッド［後］(mm)		1540				
最低地上高 (mm)		130		135		
車両重量 (kg)		1520	1530	1550	1560	1560
乗車定員 (名)		5				
車両総重量 (kg)		1795	1805	1825	1835	1835
◆性能						
最小回転半径 (m)		5.4		5.5		
JC08 モード燃費		17.4		16.0	13.2	
主要燃費向上対策		アイドリングストップ装置			－	
		筒内直接燃料噴射装置／可変バルブタイミング／電動パワーステアリング／自動無段変速機／ロックアップ機構付トルクコンバータ				
◆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				
パワーステアリング		電動				
ステアリング　ギヤ比		14.5				
前輪サスペンション		ストラット式独立懸架				
後輪サスペンション		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)				
前ブレーキ		ベンチレーテッドディスク				
後ブレーキ		ディスク	ベンチレーテッドディスク			
駐車ブレーキ形式		機械式後 2 輪制動	電気式後 2 輪制動		電気式後 2 輪制動	
◆エンジン						
型式・種類		FB16			FA20	
		水平対向 4 気筒				
		1.6L DOHC 16 バルブ デュアル AVCS 直噴ターボ DIT			2.0L DOHC 16 バルブ デュアル AVCS 直噴ターボ DIT	
内径×行程 (mm)		78.8 × 82			86 × 86	
総排気量 (cc)		1599			1998	
圧縮比		11.0			10.6	
最高出力［ネット］[kW(ps)/rpm]		125 kW(170 PS)/4800 － 5600 rpm			221 kW(300PS)/5600 rpm	
最大トルク［ネット］[N·m(kg － m)/rpm]		250 Nm(25.5 kgf·m)/1800 － 4800 rpm			400 Nm(40.8 kgf·m)/2000 － 4800 rpm	
燃料供給装置		筒内直接燃料噴射装置				
燃料種類		無鉛レギュラーガソリン			無鉛プレミアムガソリン	
燃料タンク容量 (L)		60				
◆トランスミッション						
変速機形式		リニアトロニック (マニュアルモード付) 前進無段　後退 1 速			スポーツリニアトロニック (マニュアルモード付) 前進無段　後退 1 速	
D レンジ		3.581 ～ 0.570			3.105 ～ 0.482	
変速比 (第 1 速)		3.560			3.105 (S#:3.105)	
変速比 (第 2 速)		2.255			1.983 (S#:2.334)	
変速比 (第 3 速)		1.655			1.454 (S#:1.815)	
変速比 (第 4 速)		1.201			1.057 (S#:1.499)	
変速比 (第 5 速)		0.887			0.779 (S#:1.221)	
変速比 (第 6 速)		0.616			0.542 (S#:1.000)	
変速比 (第 7 速)		－			－ (S#:0.831)	
変速比 (第 8 速)		－			－ (S#:0.707)	
変速比 (後退)		3.667			2.077	
減速比		3.900			4.111	
◆環境情報						
燃料消費率	JC08 モード CO_2 排出量 (g/km)	133		145	176	
	平成 27 年度基準達成レベル	120%		121%	100%	
排出ガス	適合規制	H17 年規制				
	低排出ガス車認定レベル	75% 低減				
〈JC08H+JC08C モード諸元値〉	CO (g/km)	1.15				
〈 ↑ 〉	NMHC (g/km)	0.013				
〈 ↑ 〉	NOX (g/km)	0.013				
騒音	適合規制	平成 10 年騒音規制				
	加速騒音規制値 (dBA)	76				
エアコン	冷媒の種類	HFC － 134 a				
	冷媒使用量 (g)	475 ± 25 g				

■ 高強度・高剛性ボデー

①前部構造をWRXと共用し、その運動性能の良さを全て取り入れた(Fig. 7)。

また、ワゴンボデーの肝となるリヤゲート開口部およびCピラーの部分においては、荷重伝達の最適化により、断面を最小限に抑えながらも曲げ剛性・捩り剛性共に大きく向上させた(Fig. 8)。

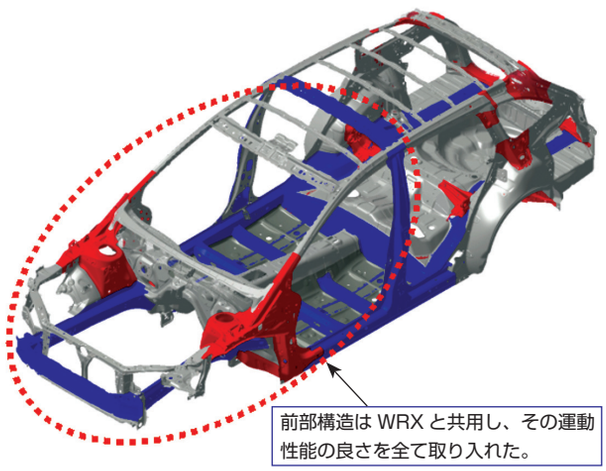


Fig. 7　Front structure

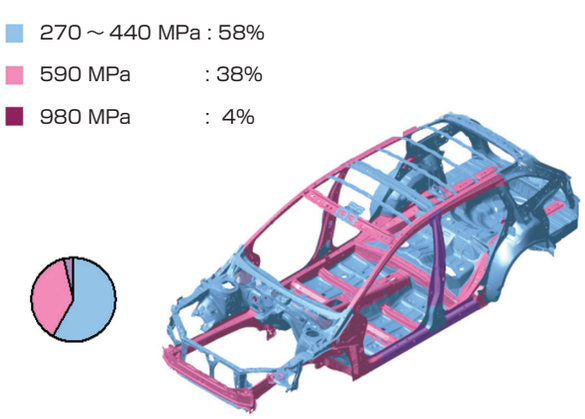


Fig. 9　Material usage for body structure

②フロント・リヤフレーム、サイドシル、ピラー等、主要骨格部材には高張力鋼板を使い、衝突安全性能向上と軽量化を両立した(Fig. 9)。

③これらの高強度化・高剛性化を行うために質量をかけたが、一方で構造の合理化・材質の変更等を行った。その結果、ボデーの質量は、現行レガシィ比で約20 kg軽量化した。

■ 質感・静粛性向上

①二次外観向上

ドアを開いた時に見えるボデーパネルの細部にまで拘った仕上がりを目指した造りとした(Fig. 10)。

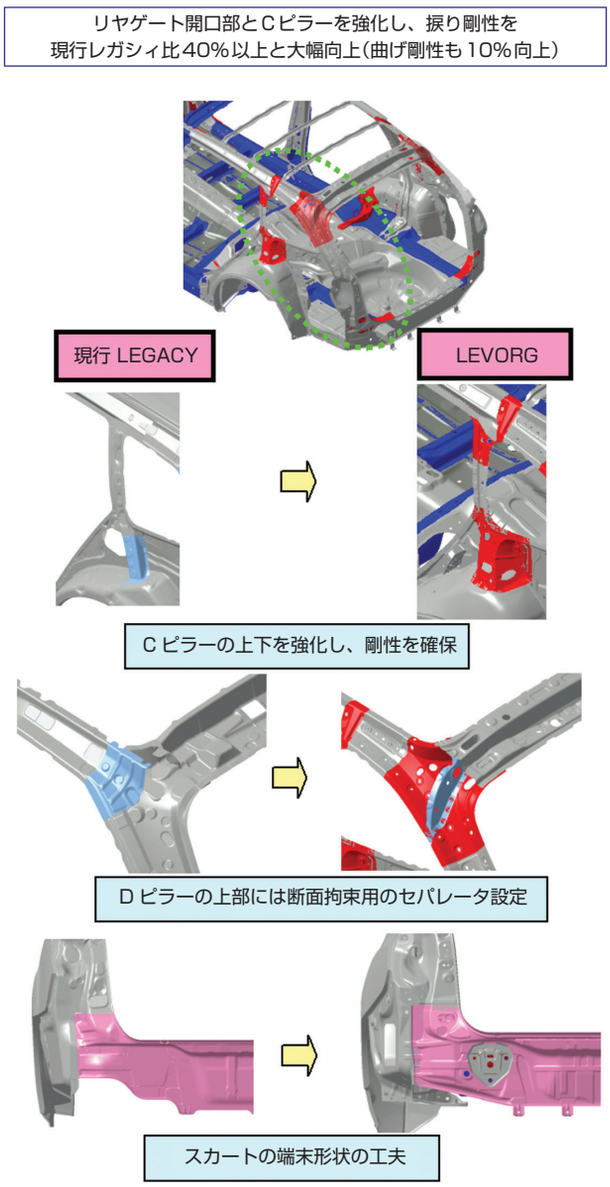


Fig. 8　Rear structure

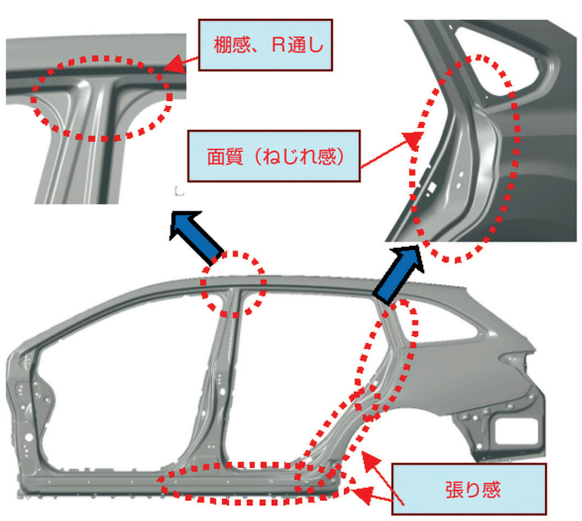


Fig. 10　Shape designed for outer panel

②静粛性向上

トーボード・フロアパンの板厚アップ及び、インシュレータを強化し、振動や騒音の低減を図った。また、ピラーの断面内部にインシュレータを採用し、埃・音の車内への侵入を防ぐことで静粛性も向上させた(Fig. 11)。

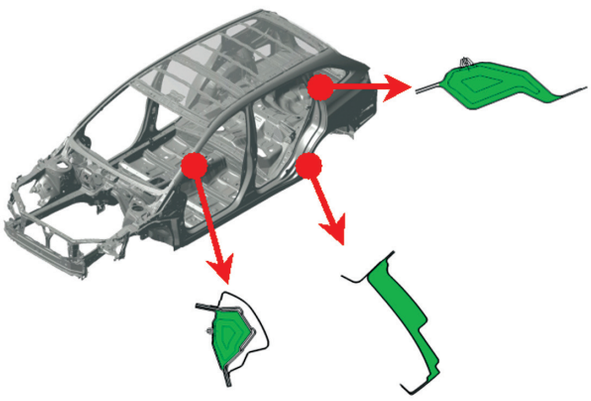


Fig. 11　Insulators

5.2　フード

■ 軽量化

アルミ化及び部品統廃合にて現行レガシィ比で約8 kgの軽量化を実現し重心高下げ・重量配分に大きく寄与した。また、歩行者保護性能にも配慮した(Fig. 12)。

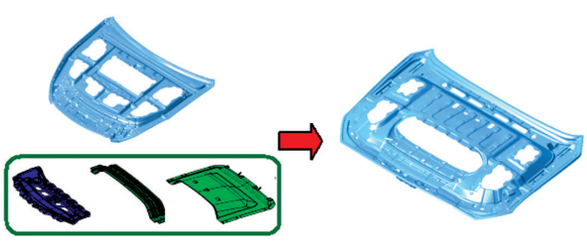


Fig. 12　Hood

■ デザインと性能の両立

ターボ用吸気口の大きさは2.0 L DITエンジンに必要十分なものとした。一方、1.6 L DITエンジンに対しては流入量が過大となるため、ダクト内部に遮蔽壁を設け、流入量の適正化と車両としての空気抵抗の低減の両立を図った(Fig. 13)。

5.3　給油口

給油口周辺構造を樹脂で一体成型することで、質感の向上を図った。樹脂化によりフラップのフランジを最小にでき、分割隙間を従来車に対し狭めた。なお、フラップのポップアップ構造も有しており、より質感を向上させている(Fig. 14)。

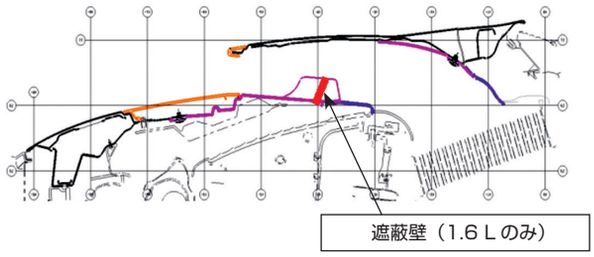


Fig. 13　Air intake for turbo

Fig. 14　Fuel flap & saucer

5.4　リヤゲート

■ 操作性向上

軽い力で女性ユーザにも使い易く、かつ確実に開け閉めできるリアゲートを実現させるため、以下の工夫・改善を織込んだ。

①リアゲート自体の重量を、現行レガシィ比で約2.3 kg軽量化し、ガスステーの反力を低く設定することで、開閉操作力を約1.5 kg低減させた。

②開閉操作点をユーザが使い易い位置に配置することで、入力荷重の伝達効率を上げた(Fig. 15)。

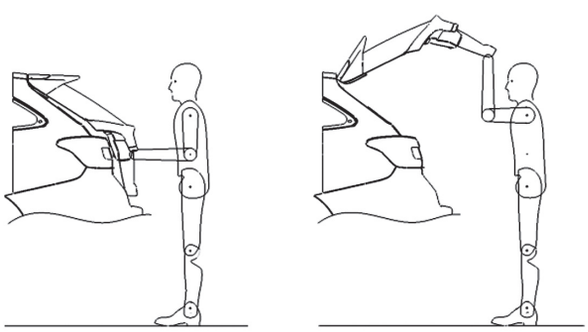


Fig. 15　Open and close operation

③ガスステーのレイアウトを最適化することで、開閉操作時の荷重が釣合う区間(角度)を2.5°縮小し、操作質感を向上させた。また、閉時直前の吸い込まれ感を得られるように設定した(Fig. 16)。

■ リヤゲートガーニッシュ

リヤゲートにはオープナスイッチ及びリクエストス

イッチを内蔵した樹脂製大型ガーニッシュを採用した。板金では成形困難な形状を成立させ、ボデー同色、かつメッキモールを施すことで、一体感をもった質感の高いデザインを実現している(Fig. 17)。

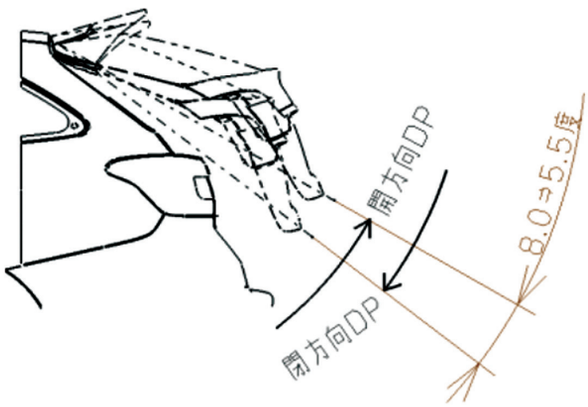


Fig. 16　Operation turning area

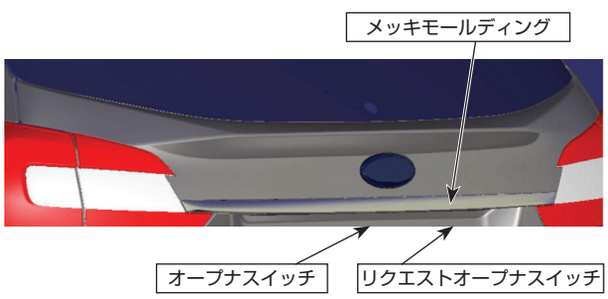


Fig. 17　Rear gate garnish

■ 後方視界

現行レガシィは後方1 m円柱の不可視長が1.1 mであるのに対し、レヴォーグは0.5 mとし0.6 mもの大幅改善の視界を実現した(Fig. 18)。

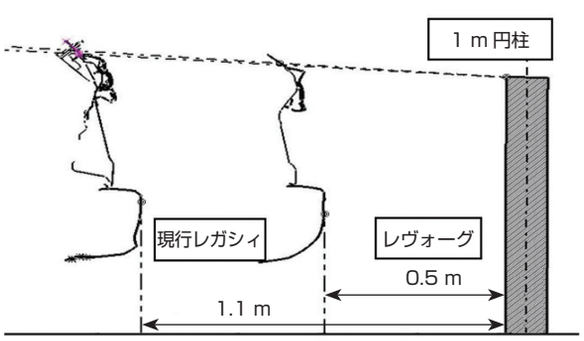


Fig. 18　Visible pole distance

■ リヤゲートの利便性向上

リヤゲートの荷室利便性向上のため、荷室フロアとリヤバンパとの段差を現行レガシィ比で15 mm縮小することで、荷室の凹凸を極力なくし、フラットで使い易い荷室とした(Fig. 19)。

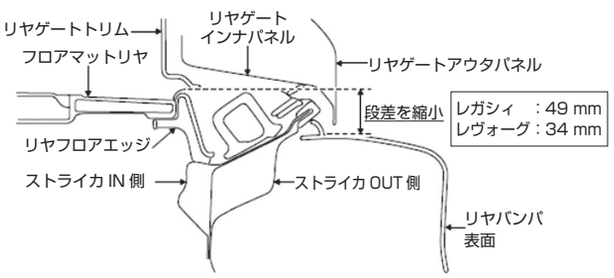


Fig. 19　Flat cargo floor

あわせて荷室スペースの拡大のため、荷室上部の内部構造を大幅に見直した。荷室詳細は、本号別報[(2)]にて解説しているため、本報では割愛する。

6.　シャシ

6.1　開発の狙い

革新スポーツツアラーとしてスポーツカーの俊敏な走りとロングツーリングでも疲れないフラットでダンピングの効いた乗り味を実現するため、下記取り組みを行った。

・トレッド剛性を高め(レガシィ比30%)、ハンドリング性能を向上させた。
・ロール剛性を高め(レガシィ比20%)、フラットな乗り心地を向上させた。

環境性能向上に対応するため、コーナリング性能と転がり抵抗低減を両立させたタイヤを新規に開発。空気抵抗低減にも取組み、エアロホイールキャップの開発を行った。

また、従来型より静粛で軽量なキャリパー体型電動パーキングブレーキを採用した。

6.2　サスペンション

車両を意のままに操り運転する愉しさと長時間運転していても疲れを感じない快適な乗り心地の両立を目指し、サスペンション開発を行った。

(1) フロントサスペンション

【構造概要】

新型インプレッサ、フォレスターと同様のマクファーソンストラット式サスペンションを採用した(Fig. 20)。

操舵に対して車両を遅れなく追従させるために、ロアアームフロントブッシュの車両横方向のばね定数を高め、トレッド剛性を向上させた。

また、ブッシュ以外にもフロントクロスメンバの高剛性化とサポートフロントの追加により、車体との取付け部剛性を高め、操舵応答性が向上した。

高速度域でも安心して運転をできるように、車体のロールを抑える目的でスタビライザの大径化、コイルスプリングのばね定数アップを行いロール剛性を向上させた。

また、スポーツパッケージ車には、WRXにも採用されているアルミ製ロアアームとピローボールブッシュを採用する事で、ばね下重量の低減と、操舵応答性､旋回時のライントレース性能向上を達成している。

【ジオメトリ】

ロアアームのリヤ支点位置を下げ、車両減速時のノーズダイブ量を増加させて、ターンインでの車両応答性・回頭性を向上させた。

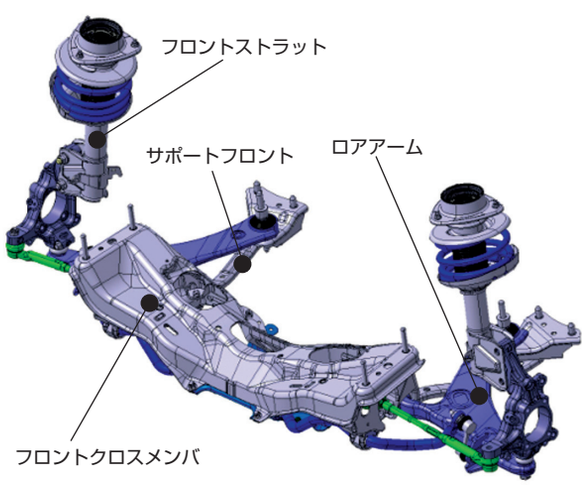


Fig. 20　Front suspension

(2) リヤサスペンション

【構造概要】

新型インプレッサ、フォレスターと同様、ダブルウィッシュボーン式サスペンションを採用した(Fig. 21)。

サブフレームブッシュは操安性能を向上させるため、従来よりも高いばね定数のものを採用したが、デフブッシュの変更・車体の剛性向上と合わせて設定したため、振騒性能と両立することができた。

操舵時にリヤの動き出しが遅れなく追従するようにするために、従来型レガシィワゴンでも採用しているサブフレーム後ろ側左右のブッシュを繋ぐ、サポートサブフレームリヤを、レヴォーグでも採用している。さらに、従来品に対して外側まで延長して車体と繋ぐことで、フロアパネルの低周波振動を低減した。

リヤサスペンションのロール剛性向上のため、スタビライザの大径化、コイルスプリングのばね定数アップを行った。

【ジオメトリ】

操舵時のリヤサスペンション追従性を高め、操舵初期からコーナーリングフォースを発生するように、イニシャルトーインをつけた。

また、旋回時の車両安定性向上のため、リンクフロントの車両内側取付け点位置を､従来より下げて､ロールステアを見直し、バンプトーイン量を適正化した。

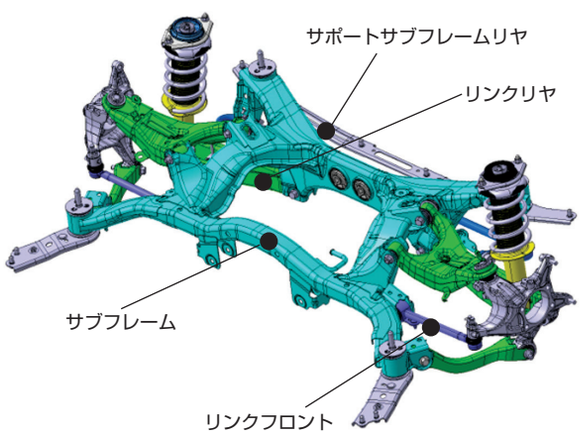


Fig. 21　Rear suspension

(3) ダンパ

フロントストラットはトレッド剛性を高め、操舵応答性を向上させるため､外筒板厚を従来から増やした。

リヤダンパはサスペンションの微小なストロークでも効率よく作動させて操縦安定性・乗り心地を向上させるため、リンクリヤとの取り付け位置を車両外側に移動し、従来よりもレバー比を改善した。

GT－Sグレードには、フロントに倒立式のBilstein製ストラットを採用しており、ストラットの曲げ剛性は標準仕様と比較して、さらに向上している。減衰力についても、GT－Sグレード専用でチューニングを行い、操安性能と乗り心地性能を高次元で両立している。

6.3　電動パワーステアリング

全車に電動パワーステアリングを採用。約2%の燃費向上、及びきめ細かなモータ制御を行うことで、自然な操舵フィーリングを実現した(Fig. 22)。

また、ハイグリップタイヤ設定に伴い、モーターと

減速機を高出力化対応した上でアシスト特性を最適化し、ドライバの思い通りに応答する、安心感のあるスポーティな走りを実現した。

さらにステアリングギヤボックスのマウントブッシュバネ定数を大幅アップ(現行レガシィ比230%)し、取付け剛性を高めた。これにより微小舵応答性を向上させ、ダイレクトな操舵フィーリングを実現した。

アイサイト装着車には、レーンキープ・車線逸脱防止機能対応制御ロジックを追加し、安全性と快適性を高次元で両立し大幅な商品性向上を図った。

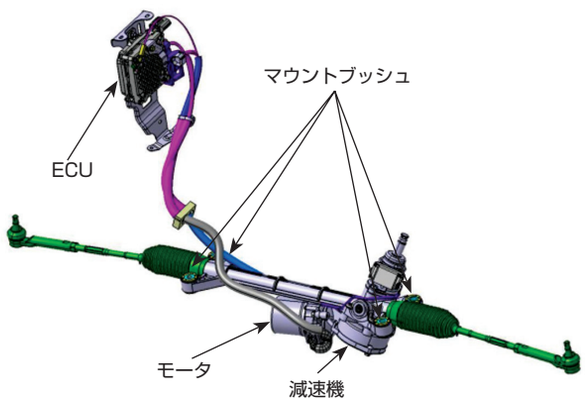


Fig. 22　Electric power steering system

6.4　タイヤ&ホイール

(1) タイヤ

転がり抵抗、乗り心地を悪化させることなく、走りの性能を大幅にアップさせたタイヤを新規開発し採用した(Table 3)。

Table 3　Tire size

	(a)	(b)
タイヤ	215/50R17	225/45R18
1.6GT	○	
1.6GT EyeSight	○	
1.6GT-S EyeSight		○
2.0GT EyeSight		○
2.0GT-S EyeSight		○

(2) ホイール

全車P.C.D.を114.3 mm化して剛性を向上させた。さらに形状を最適化することで剛性を大幅に高めながら軽量化し、操縦安定性・乗り心地の向上を達成した(Table 4)。

また、17インチアルミホイールはフルキャップと組み合わせることにより空力性能を向上し燃費の向上に寄与するとともに、新規性のあるデザインとし、意匠性を向上している(Figs. 23, 24)。

Table 4　Wheel size

	(a)	(b)	(c)	(d)
ホイール	17 × 7J 鋳造 ブラック 切削光照	18 × 7 1/2J 鋳造 シルバー 切削光照	18 × 7 1/2J 鋳造 ダークグレイ 切削光照	18 × 7 1/2J 鋳造 ブラック 切削光照
1.6GT	○			
1.6GT EyeSight	○			
1.6GT-S EyeSight			○	
2.0GT EyeSight		○		
2.0GT-S EyeSight				○

(a) 17 × 7J
ブラック切削光輝

キャップ付き

Fig. 23　17 inch aluminum wheel

(b) 18 × 7 1/2J　鋳造
シルバー　切削光輝
(C) 18 × 7 1/2J　鋳造
ダークグレイ　切削光輝
(d) 18 × 7 1/2J　鋳造
ブラック　切削光輝

Fig. 24　18 inch aluminum wheel

(3) フルエアロキャップ、センターキャップ

新開発のフルエアロキャップ及びセンターキャップを採用し、意匠の向上を図った(Table 5、Fig. 25)。

フルエアロキャップは、空気抵抗低減に有効な形状とした。

また、センターキャップについては本製品を標準品として今後の開発車へも順次展開していき、SUBARUブランドとしての統一感を図る予定である(Fig. 26)。

Table 5　Wheel cap

	(a)	(b)	(c)
キャップ	フルキャップ	アルミ調	クリアタイプ
1.6GT	○		
1.6GT EyeSight	○		
1.6GT-S EyeSight			○
2.0GT EyeSight		○	
2.0GT-S EyeSight			○

(a) 17 in フルキャップ
ダークグレー＋シルバー

Fig. 25　Full aero cap

(b) センターキャップ
アルミ調タイプ

(c) センターキャップ
クリアタイプ

Fig. 26　Center cap

6.5　ブレーキ

(1) マスタシリンダ＆ブースタ

■ 高応答性ブースタ

高応答性バルブ構造等の採用により、従来から定評のあるペダル踏み込みに応じたリニアな利き味を活かしながら、剛性感を向上。より応答性を高めて、とっさのブレーキ作動時でも高いブレーキ性能を発揮し、安心感あるブレーキを実現した。

ペダル踏み込み時にブースタへ大気を供給する流路抵抗を削減（現行レガシィ比20%）することで、ペダル踏み込み時の応答性を格段に向上させた（Fig. 27 ☆部が主な変更部位）。

■ ブースタ特性変更

車格及びキャラクタに合わせ、ブースタ特性をチューニングした。意のままに操れるコントロール性と剛性感、効き味を高いレベルでバランスさせ、クラストップレベルのブレーキ性能を実現した。

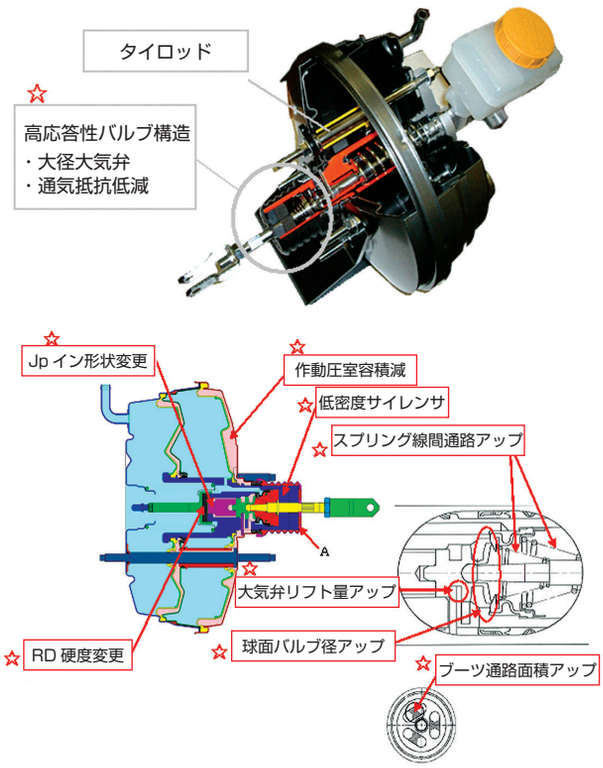


Fig. 27　Master cylinder & booster

(2) フロントブレーキ

17インチブレーキは現行仕様に対し、パッドクリップにPTFEコーティングを追加することで、ブレーキ引き摺りを低減させた（レガシィ比10%）。

16インチブレーキは車両重量増における熱負荷上昇に対応するため、ロータ厚アップ、パッド面積アップ（現行17インチ共用）により、熱容量アップを行った（レガシィ比5%）。またパッドクリップにPTFEコーティングを追加し、ブレーキ引き摺りを低減させた（レガシィ比10%）。

(3) リヤブレーキ

15インチソリッドブレーキは現行仕様に対し、ピストンシール溝を拡大し、ブレーキ引き摺りを低減させた。（レガシィ比10%）

17インチブレーキはEPB（電動パーキングブレーキ）内蔵ブレーキシステムを採用した。EPB機構をキャリパに内蔵し、モータ駆動によりブレーキパッドでロータを固定し、パーキングブレーキ保持力を確保する。また、EPBをキャリパに内蔵することで、静粛性と応答性を向上させた（Fig. 28）。パーキングスイッチ操作により、モータ駆動し、パーキング保持力を発生、解除する。

EPBの主な機能は以下の通り。

■ アクセル連動機能

ドライバの発進操作を判断し、EPBを自動的に解除する。

■ ヒルホールド機能

登坂時、車両を停車した際に、自動的にEPBを作動させることで、登坂停車時のブレーキ操作低減と坂道発進時のずり下がりを防止する。

■ アイサイト追従クルコン時の停止保持

追従クルコン時のEPBを作動・解除させることで、渋滞時のブレーキ操作低減と車両の停止保持し、安全性を向上する。

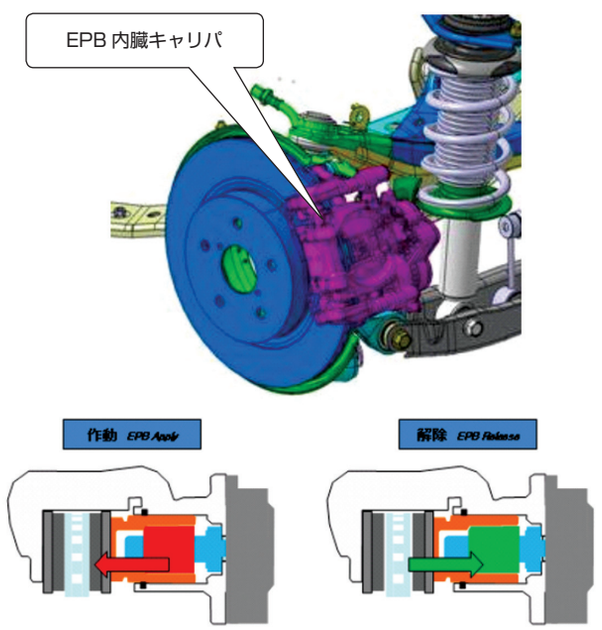


Fig. 28　Electric parking brake system

6.6　VDC

HU（ハイドロユニット）は次世代品を採用し小型化を実現した。危険回避時の限界性能を向上させるべく、ダブルレーンチェンジや18 mピッチスラロームの侵入・通過速度を向上させた。

VDCは全車に標準装備され、走行時の安全性を大きく底上げしている（Fig. 29）。

車両の挙動を常時チェックしABS（アンチロック制御）、TCS（エンジン制御、ブレーキLSD制御）、VDC（横滑り防止のためにエンジンとブレーキを制御）をフレキシブルに制御。介入タイミングの最適化により高い安全性を確保する制御とした。

OFFモードを利用することでVDC・TCS制御のエンジントルクダウン制御をキャンセルすることが可能。ぬかるみや雪道の脱出やサーキット走行などに有効である。また、アクティブトルクベクタリングを新規導入し、車両の限界旋回性能向上を行った。

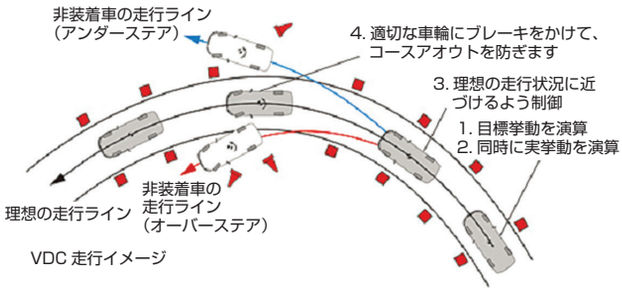


Fig. 29　VDC operation

7.　外装

7.1　ヘッドランプ

(1) LEDヘッドランプの採用

従来のHIDに替えて、省電力でより昼間に近い白色光を得ることができるLEDヘッドランプを採用した（Fig. 30）。

■ 配光性能向上

プロジェクタとパラボラリフレクタの組み合わせによる独自の光学系によって、HID並の明るさを確保し（Fig. 31）、遠方視認性と路肩視認性を両立した均一でムラのない配光を実現した（Fig. 32）。

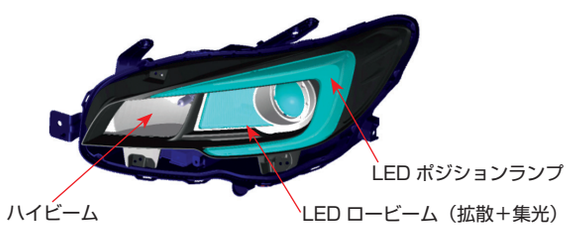


Fig. 30　LED head lamp

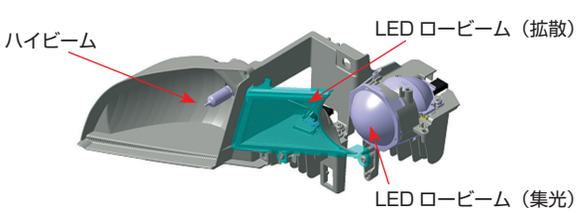


Fig. 31　LED head lamp optics unit

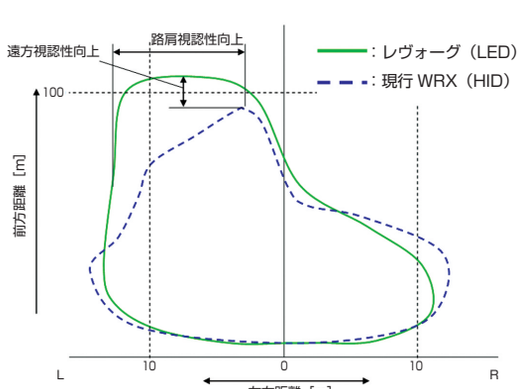


Fig. 32　Road surface illuminated image

■ 消費電力低減

LEDヘッドランプとハロゲン及びHIDの消費電力比較を以下に示す(Table 6)。HID比約40%、ハロゲン比約60%の消費電力低減を実現した。

Table 6　Power consumption

	LED	ハロゲン	HID
ロービーム	21.6W × 2	55W × 2	35W × 2
ハイビーム	21.6W × 2 ＋ 60W × 2	55W × 2 ＋ 60W × 2	35W × 2 ＋ 60W × 2

(2) コの字シグネチャーポジションランプ

ヘッドランプの共通モチーフであるコの字ポジションランプを採用した。特にLEDヘッドランプはポジションランプの光源にもLEDを採用することによって、細幅かつ均一な発光を実現している(Fig. 33)。

なお、GT－Sグレードにはエスカッション(ブラック)を設定して差別化を図っている。

LEDヘッドランプ　ハロゲンランプ

Fig. 33　Positioning lamp

7.2　フロントウインドウ

■ 広さ感の向上

搭乗者の目の位置からガラスまでの見下げ距離を拡大することで、広さ感を向上させた(Fig. 34)。

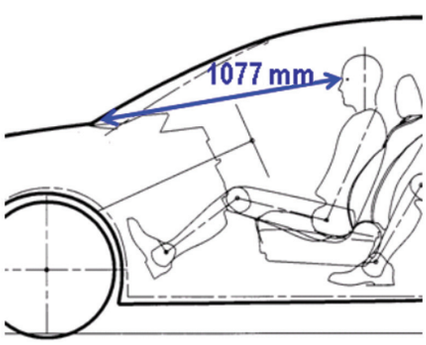


Fig. 34　Distance to front window shield

■ 外観質感の向上

デアイサーパターンをセラミックバイザーで覆うことで、目立たなくし、外観質感を向上させた(Fig. 35)。

■ 静粛性の向上

フロントガラスに遮音中間膜を採用し、板厚・質量を不変でキャビンの静粛性を向上させた。

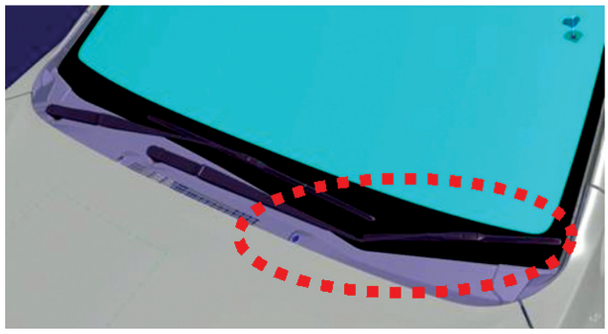


Fig. 35　Wiper deicer

7.3　フロントバンパ、フロントグリル

フロントバンパにはノーズコーン構造を採用し、グリルを起こしてヘキサゴンモチーフを強調し、力強い造形を実現した。フロントバンパコーナ部には空力性能を向上させる形状(エアロコーナ形状)を織り込んだ。

また、フロントグリルは、ヘキサゴンモチーフのメッキ枠を大型化し、フェイスの押出し感を強調した(Fig. 36)。なお、フロントグリルはGT用(ダークメタル)、GT－S用(ブラック)の2種類を設定した。

Fig. 36　Bumper and grille

また、脚部歩行者保護については、法規対応及び情報公開トップの性能を獲得できる構造とした(10.1 (3)及び、Fig. 70参照)。

7.4　フロントワイパ&ウォッシャ

■ 軽量化

小型ワイパモータの採用により、現行レガシィ比約25%の軽量化を実現した。また車体マウントゴムの硬度最適化により、キャビンの静粛性を向上させた(Fig. 37)。

■ 外観質感の向上

デザインブレードを採用し、外観質感を向上させた。

■ オートワイパ

ガラス表面に付着した水滴を検知して、ワイパを自動的に作動させ、利便性を向上させた(Fig. 38)。

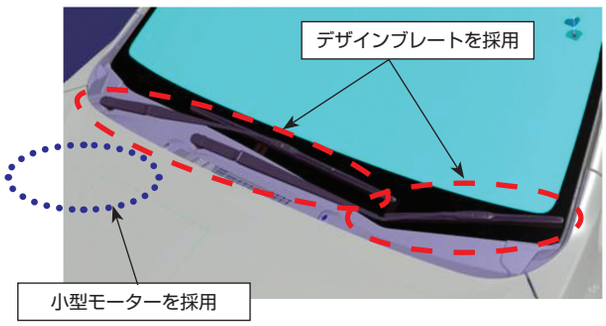


Fig. 37　Front wiper

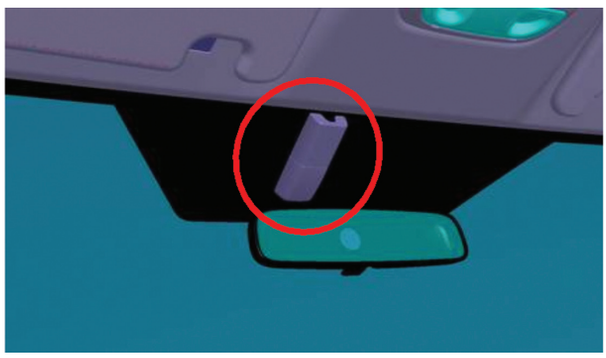


Fig. 38　Auto wiper sensor

■ ヘッドランプウオッシャ性能向上

第4世代ノズルを採用することで、以下の効果が得られる(Table 7)。

・配光回復率の向上。

・1回あたりウォッシャ噴射量の低減により、ウォッシャ液の使用量を低減。

Table 7　Headlamp washer

ノズル	第３世代		第４世代	
TEST POINT	50 V	50 R	50 V	50 R
配光回復率 (%)	70.4	73.8	74.7	77.8
噴射量	66 cm^3/s		39 cm^3/s	

7.5　ドアミラー

ドアミラーは、標準車高かつスポーティな造形に合せて、縦横比を見直し、よりスポーティで一体感のある外観とした(Fig. 39)。

あわせて、ドアミラー下面にウェルカムランプを搭載し乗降時のおもてなし感を演出した(Fig. 40)。

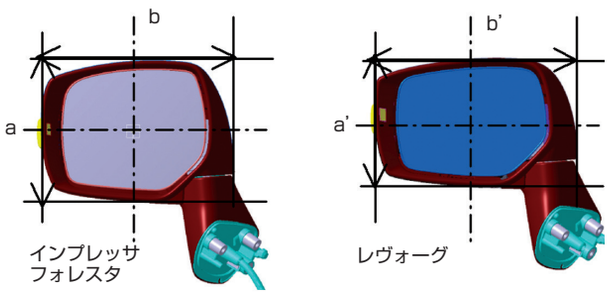
7.6　サイドドア&ウインドウ

■ サイドドア閉まり音向上

乗降時のドア閉まり音を下記アイテムにより重厚感を持たせることで、上質感を演出した。

・パネル板厚を下げて軽量化しつつ、ダンピングシートの貼り位置を最適化することで、ドア閉まり音を重低音化した(Fig. 41)。

・また、ドア開口部のボデー側ウエザーストリップ断面を最適化することで、ドアしまり音の収束を早め、より質感の高い音になるようにした(Fig. 42)。



縦：167 mm (a) ⇒ 151 mm (a')
横：231 mm (b) ⇒ 241 mm (b')

Fig. 39　Door mirror

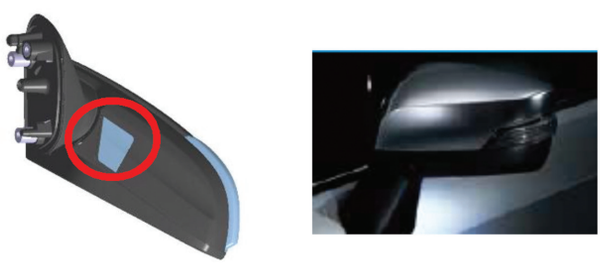
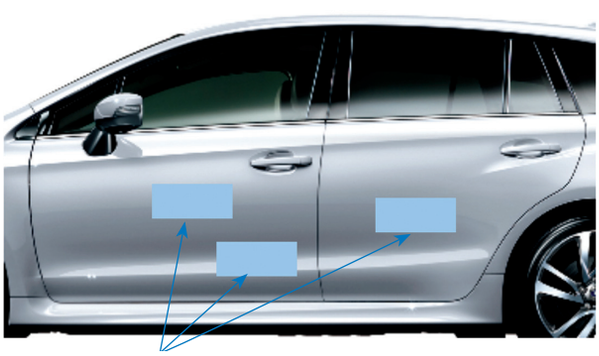


Fig. 40　Welcome lamp



ダンピングシート貼付け位置と枚数の適正化

Fig. 41　Door damping sheet

■ サイドドア 静粛性向上

高速走行時、室内から室外に空気の吸い出し現象による風漏れ音の対策として、ドアガラス周辺の窓肩部のウェザーストリップ部品における部品間の隙間を詰める構造とする事により、従来車に対して風漏れ音を減少させた(Fig. 43)。

Fig. 42　Weather-strip

Fig. 43　Noise reduction point

■ サイドドア二次外観向上

サイドドアの室内からの質感向上として、窓肩部にパッチを追加して、溶接部を見えないように設定した。場所としてはユーザが目に入りやすい、フロントドア前側、リヤドア前後にパッチを追加した（Fig. 44）。

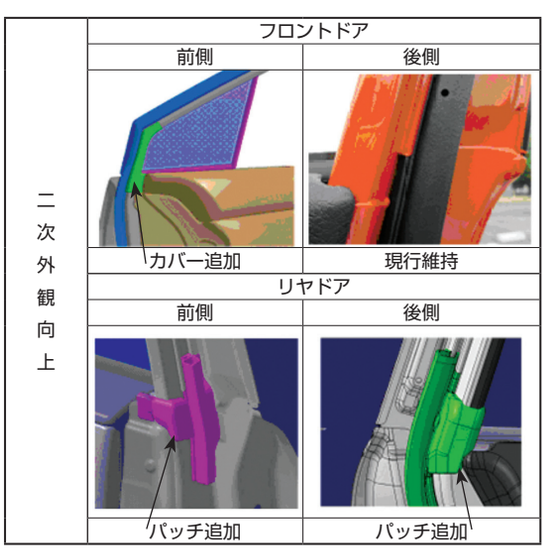


Fig. 44　Appearance improvement of inside-door

7.7　サイドシルスポイラ

前後ホイールアーチ間を一体成形品でつなぐことで、骨太で安定感のある造形としている（Fig. 45）。

また、下端を外側に張り出す事で、ボデーへの石・泥跳ねを防ぎつつ、足の当りに配慮し乗降性を確保。なお下端の張り出し形状はシャープな造形とすることで、スポーティな外観を実現した（Fig. 46）。

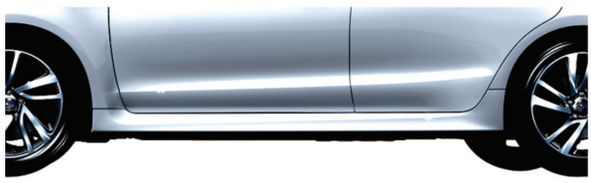


Fig. 45　Side sill spoiler side view

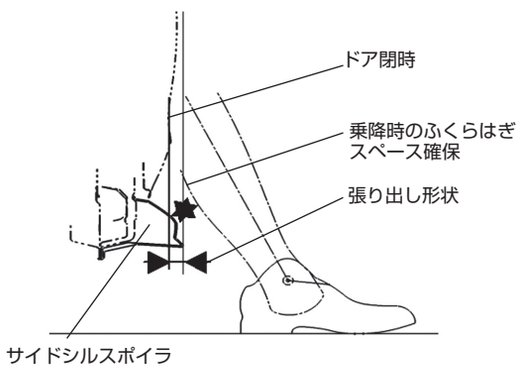


Fig. 46　Side sill spoiler section view

7.8　リヤコンビランプ＆フィニッシャ

(1) リヤコンビランプ

点灯速度、低消費電力に優れたLEDストップ＆テールランプを採用し、被視認性を向上させると共に、省電力により実用燃費向上に寄与させた。光り方はヘッドランプと同様に、コの字シグネチャを均一な光で表現している（Fig. 47）。

Fig. 47　Rear combination lamp

(2) リヤフィニッシャランプ

バックランプ、リヤフォグランプを内蔵したリヤフィニッシャランプを採用した。リヤコンビランプからつながるコの字シグネチャを強調したレイアウトを採用しつつ、ガーニッシュとの合せ形状も工夫することで、一体感、質感を高めている。

7.9　ルーフスポイラ

ルーフ後端を延長＋翼端板形状としCd値を低減した。またハイマウントストップランプを内臓しながらインナミラーからの後方視界を確保し、スポーティな意匠と単品剛性を両立させるため、樹脂アウタ・インナの二重構造を採用した。更に取付け構造を工夫することで、薄型で充分な剛性をもったスポイラとしている(Fig. 48)。

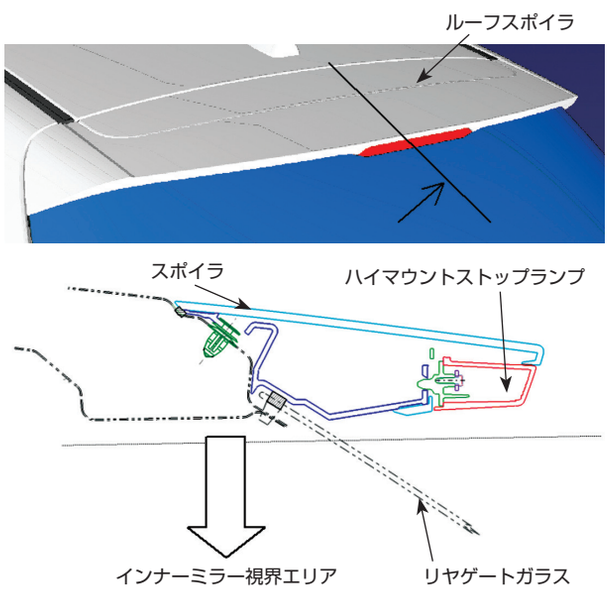


Fig. 48　Rear spoiler

7.10　フードグリル

インタクーラ冷却効率を最大とするため、フード上にグリルを設定した(Fig. 49)。特徴は以下の2点である。

・フードグリルをフード開口部へのはめ込みタイプにすることで、フードと一体感のある造形とした。
・空気流入効率向上のため、グリル開口位置をフード前方に設定、かつ開口高さを低く抑えることで視認性を確保しつつ、流入量をコントロールした。

なお、グリルは頭部歩行者保護性能にも配慮した構造としている。

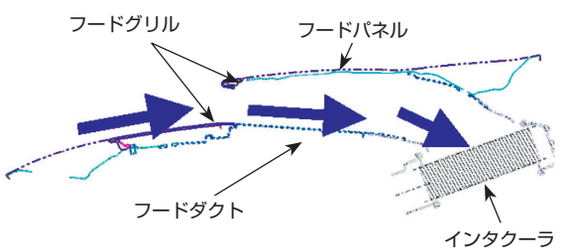


Fig. 49　Hood grille

7.11　アンテナ

ポールアンテナに対して外観向上、空気抵抗・風切り音低減を狙い、シャークフィンタイプを採用した(Fig. 50)。ボデー色対応により、車両との一体感を演出している。

Fig. 50　Shark fin antenna

8.　内装

8.1　内装質感向上の取り組み

「スバルの内装はレヴォーグから変わった」とお客様に感じていただくことを目指し、“仕立ての良いインテリア”をキーワードに、開発に取り組んだ。内装質感向上のために行った、“加飾表現の進化”、“ソフト素材とステッチの採用拡大”、“メータやライティングの演出”について以下に述べる。

■ 加飾表現の進化

“装飾を加える”を意味する“加飾”は、現代の自動車インテリアで重要な質感要素である。レヴォーグでは、インパネセンタパネル、インパネオーナメント(1.6GT Eyesight、2.0GT Eyesight)、シフトレバー周囲、後席カップホルダをピアノブラック調と金属調アクセントで統一した(Fig. 51)。

Sグレードのインパネオーナメントは、水圧転写によるシルバーカーボン柄とメッキを組み合わせた。このような2つの色・柄を近接して組み合わせる“コンビネーション表現”により、精緻な印象を与えた。なお、カーボン柄はより本物らしい表現を狙い、専用に柄の開発を行った(Fig. 52)。

ドア周りは、インナーハンドルのほか、ドアトリムモールやパワーウィンドウスイッチノブへメッキ加飾を採用し、質感を高めた。アクセスキーも、金属調加飾を施したデザインに一新した(Fig. 53)。

Fig. 51　Piano-black taste panel and metal taste accent

Fig. 52　Instrument panel ornament

Fig. 53　Access key

■ ソフト素材とステッチの採用拡大

レザー調のソフト素材は、触感の良さに加え、艶の低さにより、しっとりとした見栄えを実現できる。実際にミシンで縫製するステッチも採用を拡大し、ソフト素材に“より本物らしい質感の高さ”を実現した。

レザー調のソフト素材は、お客様がよく手に触れるインパネアッパ、ドアトリムアームレスト等のみならず、インパネセンタバイザやSグレードのセンタコンソールフロントにも採用した。コンソールのアームレストは、厚いクッション層を採用し、ひじ置き時の触感を向上した。

また、Sグレードには、シートやドアトリム、センタコンソールリッドのほか、インパネセンタバイザ、センタコンソールフロントにも、ブルーステッチを採用した(Fig. 54)。

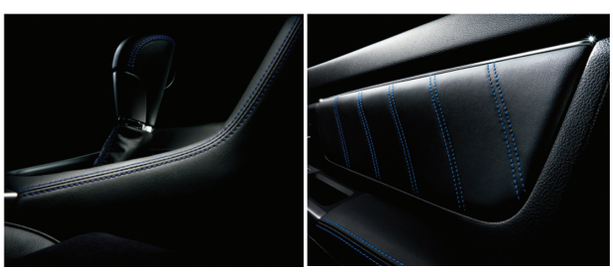


Fig. 54　Blue stitch

■ メータやライティングの演出

メータはレヴォーグ専用設計として新製した。中央にカラー液晶画面を備える4連メータを採用するとともに、アルミ蒸着リングや“アイスブルー”と名付けた青白色の照明で質感を向上させている(Fig. 55)。

Fig. 55　Combination meter

また、カラー液晶画面と内蔵スピーカを活用し、“ウェルカム演出”を実現した。お客様乗車時のドア閉を検知し、レヴォーグのサイドビューを液晶に描画するとともに、“ピアノ調サウンド”を流して、視角的・聴覚的な質感向上を狙った(Fig. 56)。イグニッションオフ時には、“グッバイ演出”も行う。

なお、オプション装備のウェルカムライティングは、アクセスキーを携帯して車両に近づくかドアを開錠すると、ドアミラーランプ、ヘッドランプのポジショニングランプ、リヤコンビランプを一定時間点灯させ、車外からお客様をおもてなしする機能である(Fig. 57)。

Fig. 56　Welcome effect

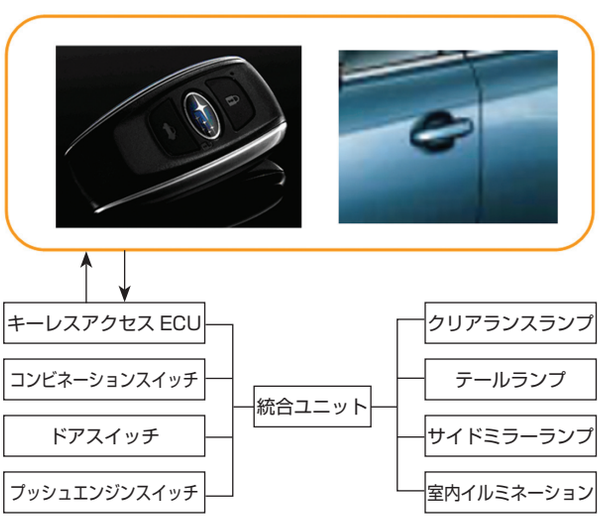


Fig. 57　Welcome lighting function

8.2　ロングドライブを満喫できる機能の拡大

ドライバのみならず助手席、後席のお客様も車内を楽しく過ごせる多くのアイテムを開発・採用した。

■ ECO（エコ）チャレンジ画面

マルチファンクションディスプレイの新機能として、レヴォーグの特徴である“低燃費”を楽しく実感いただく目的で採用した。弊社が設定した“A：目標燃費値に基づく航続可能距離”と“B：お客様の実平

均燃費に基づく航続可能距離”をバーグラフで表示し、BがAを上回った場合、“ゴールドトロフィ”を表示する(Fig. 58)。

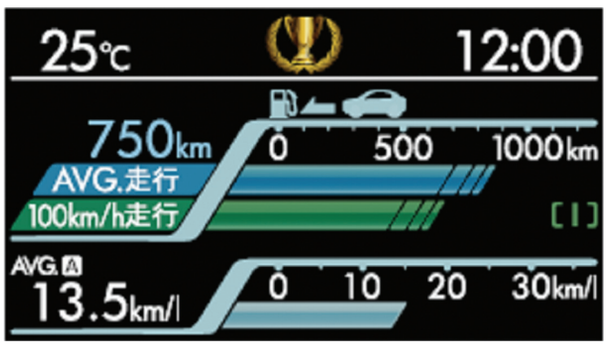


Fig. 58　Multi-funcution display (Eco challenge)

■ 4つのUSB電源ポートの採用

スマートフォンやポータブルデバイスの普及により、電源の重要性が増している。4人乗車の全員のお客様のデバイスが充電できるよう、4つのUSB電源ポートを採用した。また、ソケットを差し込む際の視認性向上のため、パネル部分をアイボリ色とした(Fig. 59)。

Fig. 59　USB power outlet

■ 後席の利便性向上

左右独立して点灯・消灯可能なスポットランプを採用した。ドライバを気にすることなく、後席のお客様のお手元のみを照らすことができる設定としている。

8.3　荷室の容量・機能拡大

“スポーツツアラーの外観とレガシィを超える荷室の両立”を狙って開発した。荷室容量･機能の拡大は、本号別報[2]にて解説しているため､本報では割愛する。

8.4　シート

⑴ フロントシート

車両の商品性にあわせ、“スタンダード”と“スポーツ”の2種類を設定。スバル最新骨格を採用し、現行レガシィに対し、1脚約10%の軽量化を実現した(スタンダードシート)。シートバックのウレタンは、メイン部とサイド部の硬度が異なる“異硬度ウレタン”を採用し、サポート性と乗心地の両立を図った。“スタンダード”の意匠は、クッション部土手及びバック部土手に帯面を設定し、質感を高めた(Fig. 60)。なお“スポーツ”の詳細は、本号別報[3]にて解説しているため、本報では割愛する。

Fig. 60　Front seat（standard shape）

(2) リヤシート

スバル最新骨格を採用し、現行レガシィに対して約20%の軽量化を実現した。フロントシート同様に､シートバックに、メイン部とサイド部の硬度が異なる“異硬度ウレタン”を採用し、サポート性と乗心地の両立を図った。シート両脇のサイドパッドにはソフト素材を巻き、見栄えと触感の向上を図った。フロントシートと同様にクッション部土手及びバック部土手の表皮に帯面を設定した(Fig. 61)。

利便機能として、5段階のリクライニング機構を採用した。レバーをサイドパッドに設定し、着座状態での角度調整を可能とした。荷室に設けたスイッチにより、ワンタッチでリヤシートが格納できる“リモート可倒機構”も採用した。

Fig. 61　Rear seat（S-grade）

8.5　電装部品の利便性・機能の向上

■ 空調

温度調整は、直感で操作しやすいダイヤル方式を採用した(Fig. 62)。触感塗装による操作性向上、メッキリングにより質感向上を図った。アイスブルーの透過照明を設け、夜間の操作性・質感を向上した。空調情報はインパネセンタのマルチファンクションディスプレイに表示し、視線移動の少ない操作を実現した。

また、左右独立温度調整を採用し、運転席・助手席それぞれで好みの温度設定が出来るようにした。

Fig. 62　Air conditioning control panel

■ 電装部品の制御

車両の操作を容易にする電装部品の制御を採用した。

・車線変更時の“方向指示レバーを動かす⇒車線変更後、方向指示レバーを戻す”操作を、方向指示レバーを軽く下げるだけで自動的に3回方向指示器が点滅する“ワンタッチレーンチェンジャ制御”を採用した。

・降雨時(フロントワイパ作動時)にリバースに入れるだけでリヤワイパが作動する“リバース連動リヤワイパ制御”を採用した。

■ ドアロック制御

外観向上のため、ドアハンドルからリクエストスイッチを廃止し、ロック・アンロック共にタッチセンサ式にした。現行レガシィで好評な「暗証コード式キーレスエントリによる解錠」は、リヤゲートのリクエストスイッチを使う仕様とした。

また、室外ブザー・警報音の音量カスタマイズ機能を追加し、お客様の好みで音量調整できるようにした(ディーラカスタマイズ機能)。

さらに、セキュリティ向上のため、アンロックした際に他のドアから進入される事を防ぐ“セレクトアンロック”機能を採用した(出荷時設定はオフで、ディーラにてカスタマイズ可能)。キーレスアクセスまたは電波式リモコンドアロックで解錠をした場合、運転席ドアまたは、リヤゲートのみアンロックされる(Fig. 63)。

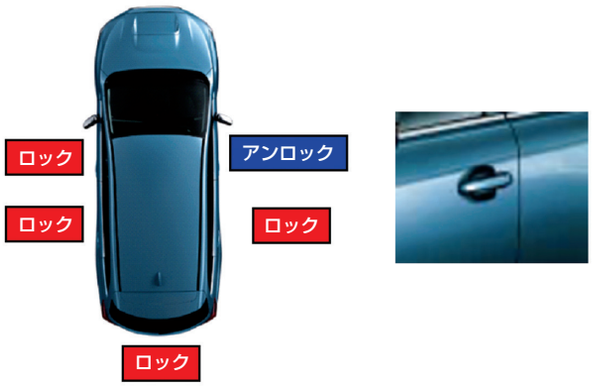


Fig. 63　Select unlock function

9.　操作系

9.1　ステアリング廻り

(1) ステアリングホイール

Dシェイプ形状をスバル初採用するとともに小径化し、かつシルバー大型ベゼルと革水平分割を採用することで、レガシィとの「別格感」から得られる所有する悦びを提供するとともに、見た目のスポーティ感・ワクワク感の具現化等で大幅に商品性を向上させた(Fig. 64)。

さらに、グリップ断面形状の拡大及びグリップ材質を低硬度のものに変更したことで、握り心地を向上させた。

GT－Sには、高触感革+ブルーステッチ化した専用品を設定し、触感を大幅に向上させ、見た目の差別化も図っている。また、エアバックモジュールとの合わせ方法を変更し、分割部の見え方を変更し質感を高めるとともに、ステアリングホイール固定式パドルシフトを採用し、利便性・操作性を向上させた。

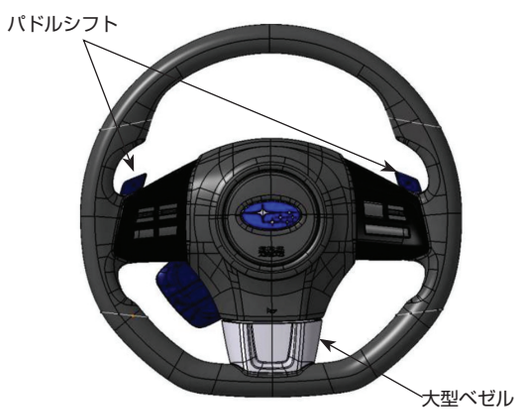


Fig. 64　Steering wheel

(2) ステアリングコラム

ステアリングコラムのチルト調整量を拡大し、ドライビングポジションの設定自由度を向上させた(Fig. 65)。

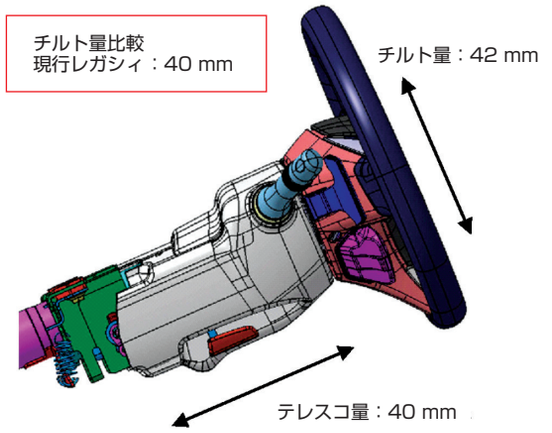


Fig. 65　Steering column

9.2　シフト廻り

内装質感向上の表現として、シフトブーツ式を採用した。

GT－S車は更に、上級感とスポーティ感を高めた表現として、専用の青ステッチをグリップとブーツに設けるとともに更に、グリップは高触感革を採用し握った時の質感を高めている(Fig. 66)。

Fig. 66　Select lever

10.　安全

10.1　衝突安全

(1) 前面衝突

衝突エネルギー吸収のため、キャビン周りの構造を強化した。キャビン骨格には440 MPa ～ 980 MPa級の高張力鋼板を使用し、衝突時の乗員の空間を確保した(Fig. 67)。

(2) 側面衝突

キャビンの変形を最小限とするため、主要骨格であるセンタピラーおよびサイドレール・サイドシルには440 MPa～980 MPa級の高張力鋼板を使用した。また、ドアビームには1470 Mpa級の鋼管を使用し、衝突時のドア侵入を防ぐ構造とした(Fig. 68)。

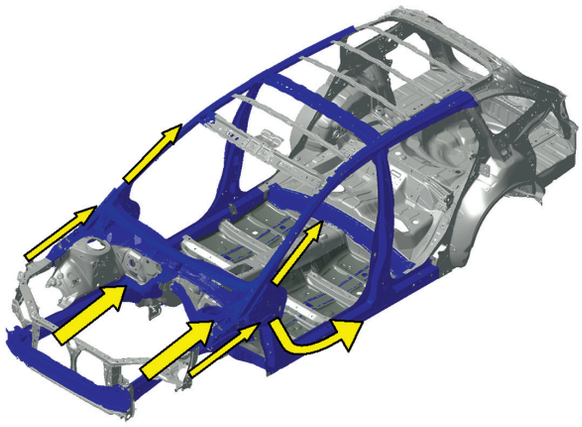


Fig. 67　Frontal collision

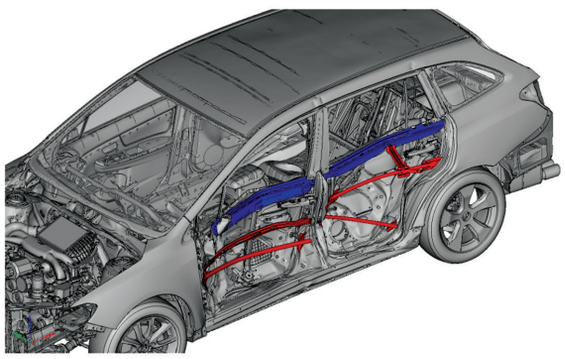


Fig. 68　Side collision

(3) 歩行者保護(頭部および脚部)

車体およびエンジンルーム内の構造を見直し、歩行者保護性能を向上させた。フード後端部およびフェンダ取付部に衝撃吸収構造を採用し、歩行者の頭部へのダメージを軽減した(Fig. 69)。情報公開もトップクラスの性能を獲得できる構造としている。

また、フロントバンパ内には、歩行者保護用の衝撃吸収部材(E/A材)を配置することで、脚部へのダメージを軽減した(Fig. 70)。

図中A ～ CのE/A材を適正配置し、各部材の抗力を最適化することで歩行者保護性能を向上させ、法規対応のみでなく、情報公開もトップの性能を獲得できる構造としている。

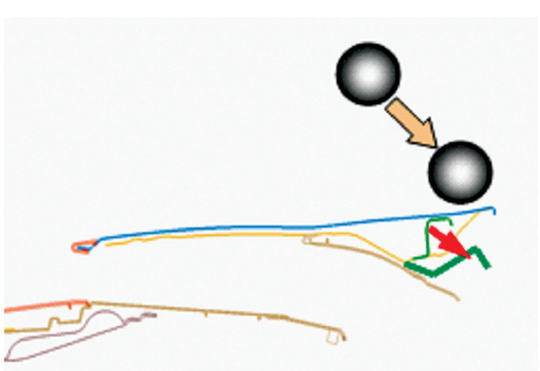


Fig. 69　Pedestrian protection (head)

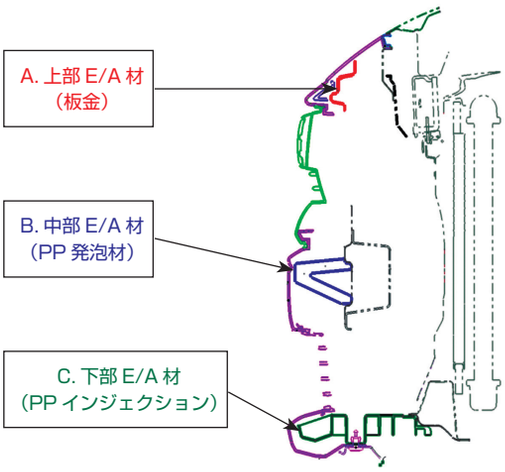


Fig. 70　Pedestrian protection (leg)

10.2　エアバッグ

運転席・助手席SRSエアバッグ、ドライバの膝部を守るSRS運転席ニーエアバッグ、側面衝突用のSRSサイドエアバッグ、SRSカーテンエアバッグ、合計7つのエアバッグを標準装備した。

SRS運転席ニーエアバッグは、国内向けスバル車として初採用した。衝突時の乗員の下肢を受け止めることで、乗員に加わる力を分散し傷害を低減している（Fig. 71）。

Fig. 71　SRS knee air bag

10.3　むちうち軽減フロントシート

“スタンダード”、“スポーツ”ともに、ヘッドレストを別体型とし、お客様の体型に合った位置に調整ができ、座り心地と鞭打ち安全性能との両立を実現した。

シートバックには、追突時の乗員の挙動をコントロールするエネルギー吸収構造を採用し、鞭打ちの低減を図った。

10.4　着座センサ付き後席シートベルトリマインダ

レヴォーグでは後席（中央席を除く）に着座センサ付きシートベルトリマインダを世界初採用した（2014年1月当社調べ）。これはお客様がシートベルト未着用の場合に時速20 km/hになると、警告音とマルチファンクションディスプレイ表示で積極的にシートベルト装着を促すシステムである。

10.5　予防安全

(1) アイサイトver3

アイサイトについては本号別報[4]にて解説しているため、本報では割愛する。

(2) アクティブトルクベクタリング

アクティブトルクベクタリングを新規導入した。内側前輪にブレーキを掛け外側前輪へのトルクを多く内側の前輪へのトルクを少なく配分することで、車両の限界旋回性能向上を実現させた（Fig. 72）。

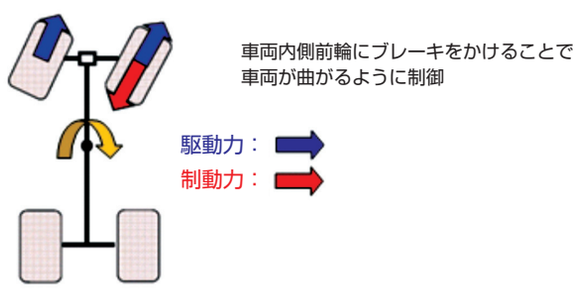


Fig. 72　Active torque vectoring

11.　エンジン

11.1　開発の狙い

新世代のスバルを象徴するレヴォーグの専用パワーユニットとして、新開発の1.6 Lインテリジェント DITと2.0 Lハイパフォーマンス DITを搭載。お客様の幅広いニーズに応えるべく、各々に明確な特徴を持たせている。

11.2　1.6 Lインテリジェント DIT

国内のニーズにマッチした、2.5 L相当以上の出力特性と高い燃費性能を両立させた。

本エンジン詳細については、本号別報[5]にて解説しているため、本報では割愛する。

11.3　2.0 Lハイパフォーマンス DIT

5代目レガシィ Dタイプ及び4代目フォレスターより搭載したFA20DITをスポーツユニットとして更に磨き上げた（Fig. 73）。

スポーツリニアトロニックとの組み合わせで、よりスポーティなエンジンとすべく、限界回転数を400 rpm引き上げ(6500←6100 rpm)、より高回転まで伸びる味付けとし、従来のFA20DITに対し、より気持ちよい走りの提供に寄与している(Fig. 74)。

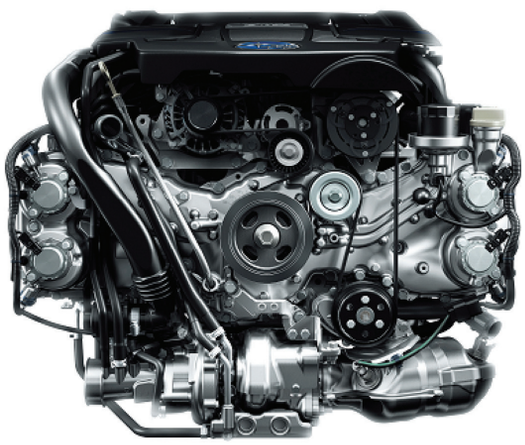


Fig. 73　FA20DIT Engine

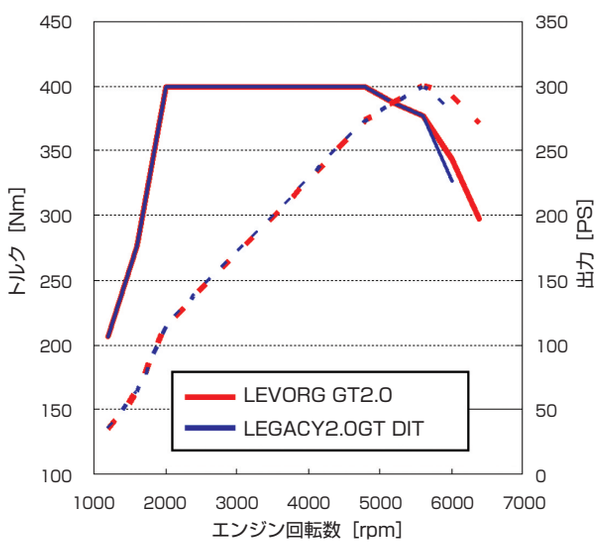


Fig. 74　Engine torque curve

本改良に伴い以下を変更した(Fig. 75)。
①バルブスプリング強化
②チェーンガイド延長
③ブローバイセパレータ形状最適化

また、バッテリの充電状態を適正に管理するためにバッテリの充放電電流、電圧、温度を計測するバッテリセンサを採用した(Fig. 76)。各種計測データはエンジンコントロールユニットに通信回路により送信され、エンジンコントロールユニットはそのデータに基づきオルタネータの発電量を制御し、バッテリの充電状態を管理している。これ以外の車両を含めたアイテムと合わせて燃費を向上させた(JC08モードで12.4→13.2 km/L)(Table 8)。

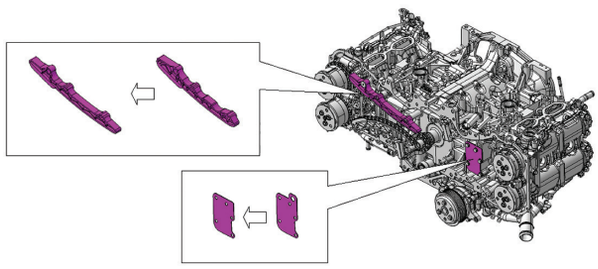


Fig. 75　Chain guide and cover of separator

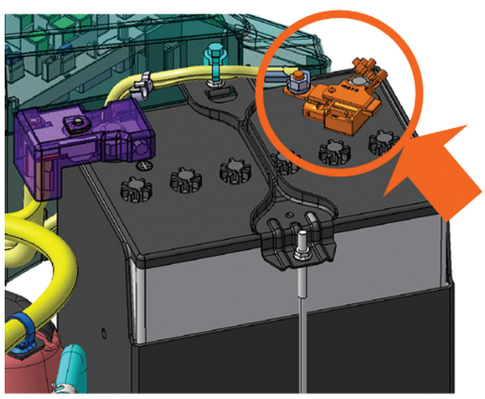


Fig. 76　Battery monitor sensor

Table 8　Engine specifications

	LEVORG	LEGACY
最高出力 kW (PS) rpm	221 (300) 5600	221 (300) 5600
最大トルク Nm (kgfm) rpm	400 (40.8) 2000～4800	400 (40.8) 2000～4800
モード燃費 (JC08CH) km/ℓ	13.2	12.4
排出ガス規制	平成17年基準 75%低減	平成17年基準 75%低減

12. トランスミッション

12.1　開発の狙い

車両のキャラクタに合わせて、燃費と走行性能の両立とワクワク、ドキドキする性能を目指して、リニアトロニックを改良し搭載した。1.6 L DITには中トルク用リニアトロニック、2.0 L DITには高トルク用リニアトロニックをベースに、それぞれレヴォーグ用に改良を加え搭載した。

12.2　1.6 L DIT用リニアトロニックの紹介

レガシィ、フォレスター、インプレッサに使用している中容量タイプのAWD用リニアトロニックをベースに、燃費向上、振騒低減、変速制御開発の3つについてレヴォーグ専用開発を行った。

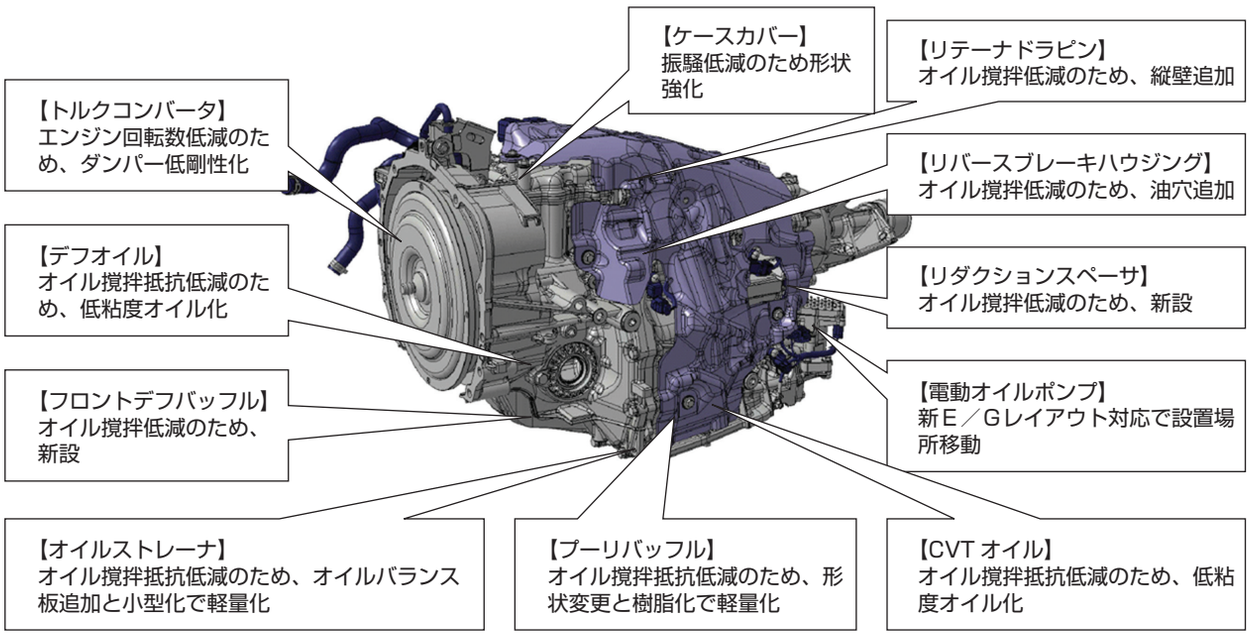


Fig. 77　Lineartronic transmission

燃費向上では、モード燃費目標達成のため、主にトランスミッション内オイルの撹拌抵抗低減に取り組んだ。大物回転体のプーリやデフギヤ下にバッフルを追加し、撹拌するオイルを低減。さらにオイル油面を下げるため、オイルバランスを見直した(Fig. 77)。

振騒面では、トランスミッションから発する振動を抑えるべく、アルミダイカストケース変更や、防振カバーの変更を実施。さらにオイルポンプやリダクションギヤにも改良を加え、車内の静寂性を向上した。

変速制御は、加速時のリニア感向上と、減速時の適正な変速比の選択により、加速に備えた制御を強調した。なおAWD方式はアクティブトルクスプリット方式を採用している。

12.3　2.0 L DIT用スポーツリニアトロニックの紹介

レガシィ、フォレスターに搭載している高トルク対応のAWD用リニアトロニックをベースに、車両コンセプトでもあるスポーティさを出すため、新たに名称をスポーツリニアトロニックとし、変速制御面でスポーティなフィーリングを出す開発をした(Fig. 78)。

特徴は、SIドライブの3モードとDレンジ、Mレンジとの組み合わせで、I(インテリジェント)は燃費重視、Sは加速重視、S#はワインディング走行と明確に分け、運転の愉しさを味わえる制御とした。その中で新たなポイントは、DレンジでI,Sモード選択時にアクセル開度に連動して、アクセル低開度時は無段変速、高開度時は変速比を固定したステップ変速に切り替える制御とした。これにより加速時のエンジン回転数、車速、音の一体感を高め、よりスポーティな感覚が味わえるようになった(Fig. 79)。

またSIドライブのS#モード選択時は、8速の固定段とした。従来のレガシィ、フォレスターにも8速固定段は採用しているが、レヴォーグは1段ごとのステップ比を小さくし、さらにクロスレシオ化した。エンジンの最大回転数アップと合わせて、様々なシチュエーションで変速比を選びやすく、高回転を維持した走りが可能で、ワインディングでの走行をより愉しくする特性とした。さらに変速のスピードも極限まで速くし、パドルシフトでのシフト感をよりスポーティにした(Fig. 80)。なお、AWD方式はバリアブルディストリビューション方式を採用。センタデフにより後輪側への駆動力配分比を大きくし、スポーティな走行に適した性能とした。

スポーツリニアトロニックの制御詳細については、本号別報[6]にて解説しているため、本号では割愛する。

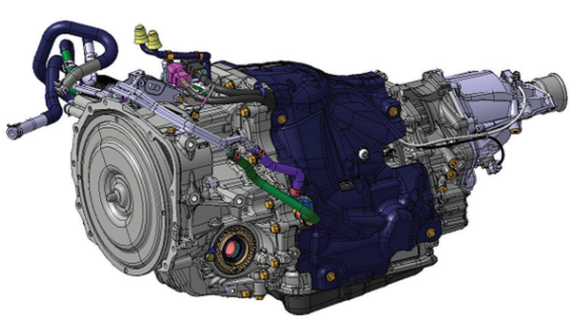


Fig. 78　Sport lineartronic transmission

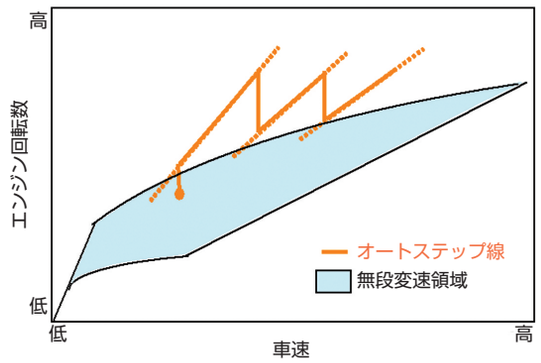
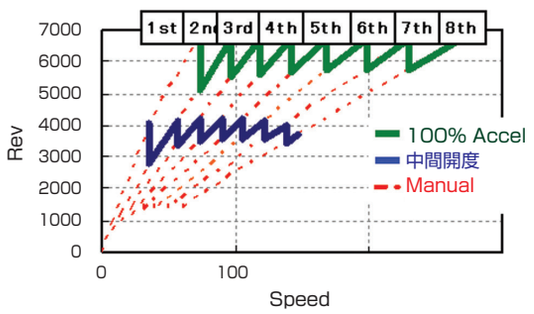


Fig. 79　Auto step control

LEVORG 2.0GT DIT



LEGACY 2.0GT DIT

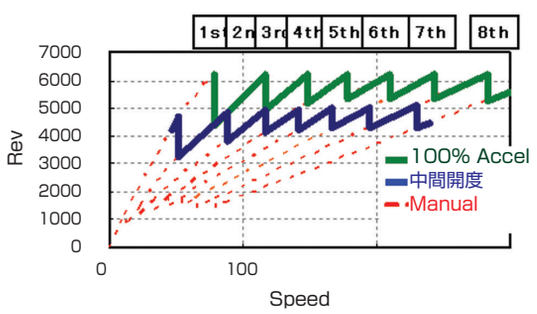


Fig. 80　Shift diagram for sport lineartronic

13.　あとがき

本質を追求し丁寧に作りこまれた一級品は、選んだ人にこの上ない満足感と、思わず一人で微笑んでしまうような「悦び」を与えてくれます。そうした一級品のように、お客様に「所有する悦び」を提供することを目指し、仕上がる姿を想い描きながら、細部まで徹底的に作りこんできた渾身の力作がレヴォーグです。一人でも多くのお客様に「レヴォーグというクルマを所有する悦び」を味わって頂きたいと願っています。

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。

参考文献

(1) 小林：スバルレヴォーグのデザイン、スバル技報、No.41 (2014)
(2) 岡留：スバルレヴォーグの荷室開発、スバル技報、No.41 (2014)
(3) 藤岡：スポーティーシート開発について、スバル技報、No.41 (2014)
(4) 木戸ほか：運転支援システム「EyeSight（ver.3)」の開発、スバル技報、No.41 (2014)
(5) 佐々木ほか：新開発1.6L水平対向直噴ターボエンジンの開発・紹介、スバル技報、No.41 (2014)
(6) 鯵本ほか：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 (2014)

【著　者】

SUBARU LEVORG開発プロジェクトチーム

[スバル商品企画本部]　熊谷　泰典
卯埜　敏雄
篠塚　順三
[車体設計部]　白　昌鎬
大津　隆
古藤　茂
[外装設計部]　福田　知弘
山岡　龍
[シャシ設計部]　長島　健
森　耕治
[内装設計部]　五島　賢
[トランスミッション設計部]　関谷　雄一
[エンジン設計部]　佐々木　礼
[電子技術部]　里村　聡
[車両研究実験総括部]　香川　穣
城井　勇二
松前　和伸
伊東　和栄
大石　広士
[パワーユニット研究実験第１部]
小池　康一
[パワーユニット研究実験第３部]
沼田　真一

スバル レヴォーグのデザイン

Design of SUBARU LEVORG

小　林　正　彦*　宮　下　大　輔*　雲　野　裕　紀*　斎　藤　　實*
Masahiko KOBAYASHI　Daisuke MIYASHITA　Yuki KUMONO　Minoru SAITO

抄　録

スバルレヴォーグは、デザインテーマを「革新スポーツツアラー」として、スポーツカーにワゴンのユーティリティを付加して機能とスタイリングを両立させたクルマである。

スバルの走りのパフォーマンスを象徴するターボエンジンの力強さや、AWDの安全と安心、また機敏なハンドリングをダイナミックな造形で表現した。内装に関しては視覚、触覚、聴覚などあらゆる面で「質感」「品格」を追及し、カラーデザインとともに「仕立ての良い」インテリア空間を実現した。

Abstract

SUBARU LEVORG accommodates both functionality and styling by adding utility of a wagon to performance of a sport car under the theme of “innovative sports tourer”.

The power of turbo engine which symbolizes Subaru’s driving performance, safety of AWD and agile handling are dynamically expressed in the exterior. In regard to the interior, “quality” and “character” were pursued in every aspect for customers to see, feel and hear the values in the well-balanced interior space in perfect colors.

1．まえがき

25年目のフルモデルチェンジと銘打って発表されたレヴォーグは日本のお客様のために専用開発された、革新スポーツツアラー。求められる本質的なニーズを満たし、見て、触れて、乗り込んで、運転して、本当に満足してもらえるクルマを追及した。ニーズにマッチした点は何と言っても国内の交通環境で扱い易いボデーサイズである。車体のアーキテクチャー（骨格造り）に拘り、デザインされ与えられた引き締まった佇まい、そして快適な居住空間と利便性の高い荷室空間。更にそこに最適な、質感の高い内外装デザインとカラーをコーディネートしてレヴォーグのデザインは完成した（Fig. 1）。

Fig. 1　LEVORG exterior and cockpit

＊ デザイン部

2. エクステリアデザイン

■ボデー側面

エクステリアデザインのコンセプトは、「**スポーツカーとワゴンユーティリティの融合**」。

外寸は4代目レガシィと同等(+10 mm)の全長と荷室寸法を維持しつつも、プロポーションはルーフ後端を低く、リアゲートガラスを寝かせた様に見せることでスポーティなフォルムを創出している。

全体にアグレッシブかつより洗練されたスタイリングを実現し、サイドシルスポイラーも大きな断面で構成され、大きく光を受けることでサイドビューをボトムで引き締め、実用的にもチッピング性能を織り込んだ形状としている(Fig. 2)。

■フロント廻り

フロントは「革新スポーツツアラー」にふさわしいアグレッシブで精悍なスポーティさを狙い、スバルの統一モチーフであるヘキサゴングリルから始まるダイナミックで立体感のある造形を、ノーズコーンを採用することで実現。より印象的な彫りの深い造形とした。

新開発のヘッドランプはターンランプを外に出して独立させることで極力薄くし、獲物を狙う猛禽類の眼の様にシャープに前方を睨みつけた「ホークアイ」と「コの字」のLEDランプを採用。また全幅をいっぱいに使って配置することでグリルの低さとともにスポーツカーのようなワイドアンドローの佇まいを感じさせるデザインとした。フードにはインタークーラー冷却用エアスクープを持ち、燃料消費の効率化とターボモデルである事を主張している(Fig. 3)。

■リヤ廻り

「革新スポーツツアラー」を最も表現しているリヤデザインは、ルーフ全体をボデー前半から後半に向けて大胆に下げることでダイナミックな印象を与えるとともに、キャビン後半のサイドプランカーブも居住空間や荷室空間を侵食し過ぎない範囲で絞り込み、そこに全幅一杯にリヤブリスターフェンダーを張り出させて動きと安定感のある立体造形を行った。

全車に標準で大型のリアスポイラーを装着し、ルーフとの一体感を持たせることでスタイリッシュなシルエットを実現するとともに優れた空力性能を実現した。下部をディフューザー風にブラックアウトしたリヤバンパーや左右2本出しのマフラーも併せて軽快で俊敏に走るためのスポーツカーとしての魅力を更に高めている(Fig. 4)。

■リヤコンビランプ、リヤゲート

リアコンビランプはリヤフェンダーの造形とインテグレートさせ、またランプ・トゥー・ランプのメッキガーニッシュと視覚的に繋ぐことでワイド感を強調した。

テール&ストップランプにはLED光源を採用し、視認性を向上させるとともにヘッドランプと同様のモチーフによりデザインの統一を図り、「コの字型」に点灯する事で夜間での存在感を高めている。

リヤゲート自体もラウンド感の強いプランカーブを用い立体的に造形されてダイナミックな印象と幅広感を感じさせるデザインとした(Fig. 5)。

Fig. 2　Side view

Fig. 3　Front view

Fig. 4　Rear quarter view

Fig. 5　Rear view

3. インテリアデザイン

インテリアデザインのコンセプトは、「**おもてなしと品格**」、および「**ひと目で分かる先進感と仕立ての良さ**」。

レヴォーグのインテリアは、『スポーティさと質感で一格上を目指す』という狙いでデザインした。

スバルが持つ走りの愉しさと、所有欲を満たす質感の高さを実現するため、細部にいたるまで造り込みを徹底。また、助手席に座った大切な人をもてなす快適な居住性・操作性にも配慮し、お客様がスバルに期待する高い機能性を実現した。また、見た瞬間伝わる情緒的な質感を大切にし、車を知り尽くした大人が満足できるクオリティの高いコクピットを目指した(Fig. 6)。

■“一格上”の仕立ての実現

・各部にメッキや金属調のシルバーアクセントを配し、ピアノブラックとのコントラスで室内に華やかさを与えた(Fig. 7)。

・室内全体にバランス良くステッチ・キルトを配置。各部に手の込んだ表情を持たせ、購入後も満足感をずっと感じていただけるようデザインした(Fig. 8)。

・ハザードスイッチはクリアーアクリルの下にダイヤカットを施し、宝石のような輝きを持つ見栄えを実現した(Fig. 12)。

■乗員をもてなす快適な操作性・居住性

・ドライバーが常に接するステアリングには、小径化且つリング下端をカットしたスポーティなDシェイプを採用。大型の金属調ベゼルを強いアイキャッチとしている。またリング断面も従来より太くして、握りこんだ際の手応えをよりスポーティにした。革の切り替え分割を水平にしDシェイプをさらに強調させる効果を狙っている。Sパッケージではさらに、素材に高触感の革を採用。オーナーが高い満足感を感じられる仕立てとした(Fig. 9)。

・革新スポーツツアラーにふさわしい快適性実現のため、シートは見た目でホールド感の良さ、高性能を満喫でき、信頼感が伝わるデザインとした。前席はスポーティなバケット風のデザインとし、特にフィット感に拘った肩まわりの形状は、この車の『らしさ』を強く表現している(Fig. 10)。

・乗り込んだ際のメーター／液晶ディスプレイのグラフィカルな演出、ウェルカムサウンド等、ドライバーの五感に訴えかける、様々なおもてなしの工夫を織り込んでいる。後席のドリンクホルダーはダッシュボード中央の艶黒パネルとコーディネートし、“前席と同じおもてなし”を表現した。

Fig. 6　Cockpit

Fig. 7　Silver accent

Fig. 8　Kilt stitch

Fig. 9　D shape steering wheel

Fig. 10　Front seat

■わかりやすい先進性の表現

・ルミネメーターの中心には大型カラー液晶を採用し、先進性をアピールすると同時に、スポーツツアラーとしての「高性能さ」「上級さ」を、上品で透明感のあるアイスブルー発光色とサテン調表面処理によって表現した。水平指針はイグニッションONとともに液晶のグラフィックと呼応して光る仕掛けとなっており、走りへの期待感を感じさせるよう工夫している(Fig. 11)。

・バージョンアップしたアイサイトや燃費表示を充実させたMFD（マルチファンクションディスプレイ）等、機能性の向上を見た目に分かりやすくデザインした。

・アイサイトカメラカバーはとにかく薄く見えるようにし､次世代にふさわしい先進感を狙っている｡フレームのようなフチを造形することで、視覚的に薄く見えるよう工夫した。

・MFDスイッチを刷新。画面の近くに置き、助手席からもアクセスできるようにすることで、インフォテイメント機能を向上させている(Fig. 12)。

■スポーティな外観と高い機能性の両立

　レヴォーグの荷室は歴代のレガシィワゴンが持つ高い積載力と使い勝手を継承し、スタイリッシュな外観と高い機能性を両立した。また実際にユーザーが使うシーンを想定し、利便性を考慮した様々な工夫を織り込んだ(Fig. 13)。

・ホイールハウス等の出っ張りを極力減らし、内部構造の最適化で、四隅までしっかり使える荷室とした。

・床下のサブトランクは前後2分割構造とし、荷物を積んだ状態でもアクセスしやすいよう工夫した。サイドポケットにネットを付け、小物の整理など日常の細やかな使い勝手に配慮した。

　レヴォーグのインテリアは、これまでの歴代レガシィが磨いてきた機能性に加え、スポーツカーの持つ走りの期待感や所有する喜びを見た瞬間感じられるような、情緒的なデザインを念頭に置き開発してきた。ユーザーがコクピットに座った瞬間、熱く昂ぶるような空間を目指している。

Fig. 11　Luminescence meters

Fig. 12　MFD switch and hazard switch

Fig. 13　Rear cargo room

4.　カラーデザイン

4.1　エクステリアカラーデザイン

エクステリアカラーのコンセプトは、革新スポーツツアラーとしての「**アグレッシブさと洗練**」。

スポーティでダイナミックな外観デザインにマッチし、立体感をより表現するための外装色とした。また同時にボデーカラーラインナップと組み合わせるパーツカラーとの抜群のカラーコーディネートを目指した。

■ボデーカラー（Fig. 14）

①スチールブルーグレーメタリック

レヴォーグのために開発した専用新色。2011年の東京モーターショーコンセプトカー「アドバンスドツアラーコンセプト」が持つ、カタマリ感と洗練さ、知的でスポーティーなイメージを具現化したブルーイッシュグレー。（新開発色）

②クリスタルホワイトパール

塗料内のパール材を新しい人工パールに切り替え、より白く、クリスタルのような強い輝きをイメージした、スバルの次世代ホワイトパール。（新開発色）

③ギャラクシーブルーシリカ

落ち着いた大人のスポーティさを演出するブルー。

④ライトニングレッド

アクティブなライフスタイルを送るお客様に乗っていただきたい、スポーティでストレートな表現のレッド。

⑤アイスシルバーメタリック

氷をイメージしたブルーイッシュでシャープなシルバー。

⑥ダークグレーメタリック

輝きが強く、シャープで精悍な表情のダークグレー。

⑦クリスタルブラックシリカ

スタイリッシュな“輝き”のあるフォーマルブラック。

① Steel blue gray metallic

② Crystal white pearl

③ Galaxy blue silica

④ Lightning red

⑤ Ice silver metallic

⑥ Dark gray metallic

⑦ Crystal black silica

Fig. 14　Body color

■外装パーツカラー

①GT−Sグレード専用パーツカラー

GTグレードはシルバー基調のパーツカラーでまとめ、GT−Sグレードではスポーティさをより際立たせるよう、ブラック基調のパーツカラーを設定した。よりコントラストを強調する事で表情を引き締め、特別なスポーティイメージを高めた。

ヘッドライトのベゼルを艶有りブラック塗装とし(Fig. 15)、フロントグリルも同様に艶有りブラック塗装を中央部に施しダークメッキの枠を組み合わせ(Fig. 16)、精悍なフロントフェイスとした。

②アルミホイールカラー

17インチホイールは、アルミホイールと樹脂製空力キャップを組み合わした形状であり、先進性を色で表現した。樹脂部分はシルバーとガンメタの2トーン塗装。アルミホイール部分の切削光輝面が空力キャップ色と組み合わさり、アルミホイールでは稀な多色使いのカラーコーディネートで先進性を表現した(Fig. 17)。

18インチホイールは3種類すべて切削光輝仕様とし、塗装部位で各グレード毎の差を表現した。

2.0GTグレードはシルバー塗装に切削光輝、1.6GT−Sグレードに今後のスバルアルミホイールに中明度グレーとなる新色ガンメタを採用。2.0GT−Sグレードではパフォーマンスに見合うようコントラストを強調させるため、ブラック塗装と切削光輝を組み合わせた(Fig. 18)。

③アルミホイール用六連星センターキャップ色

クルマ全体の六連星マークカラー統一を目的とし、レヴォーグ／新型WRXからアルミホイール用六連星センターキャップ2種類を新開発した。ブラック基調の「クリアタイプ」とシルバー基調の「アルミ調タイプ」の2種類共、六連星のブルー色とグラデーションは、トップマークの六連星に合わせ、カラー再現した(Fig. 19)。

Fig. 15　GT-S grade head lamp

Fig. 16　GT-S grade front grille

Fig. 17　17inch aluminium wheel + full aero cap

Fig. 18　18inch aluminium wheel

Fig. 19　Aluminium wheel center cap with six stars logo

4.2　インテリアカラーデザイン

インテリアカラーのコンセプトは、「革新スポーツツアラー」としての「一格上の仕立て」内装の随所に配置した金属調アクセント＋艶黒パネルや、上質な触感に拘った素材、精緻な作り込みのカバーリングやステッチワークで、スポーティーなメリハリのある一格上の内装空間を実現した。

■内装色

標準展開はスポーティーなブラック内装が基本とし、オプショングレードでアイボリーコンビネーション革内装を設定した。

①ブラック内装（Fig. 20）

ブラックトリム色を基本に、要所要所に艶黒表現や高輝度金属調シルバー表現を加え、ソリッドで引き締まったスポーティーな内装空間を表現した。さらにGT−Sグレードは現行レガシィ 2.0GTDITで好評のブルーステッチを展開しスポーツキャラクター性を明確にした。

②アイボリー内装（Fig. 21）

ブラックトリム色の中にアイボリー色を配するハイコントラストな色配置で、スポーツツアラーらしいメリハリのある上質でスポーティーな明るい内装色を表現した。

■加飾

①インパネ加飾

ワゴン専用加飾としてクロムメッキとコンビネーションパネルを設定。

GTグレードには、シルバーパネルと艶黒パネルの2種類を展開。艶黒パネルは深い漆黒感で格上の質感を実現した。GT−Sはシルバーカーボン調パネルを展開。スポーツテイストを引き立たせる加飾表現を行った（Fig. 22）。

②表皮巻き加飾

MFDバイザー、カバーフロント、ドア布加飾、コンソールリッドには、触感の良いレザー調表皮を張り込んだ。GT−Sでは更にブルーステッチを追加して、仕立ての良さとスポーティーなアクセントを強調させた（Fig. 23）。

③ステアリング

ステアリングの2Sベゼルには、高輝度な金属調塗装と鋳肌調のシボ配置で、スポーツカーの操作部位らしい骨太な骨格と塊感を演出した。

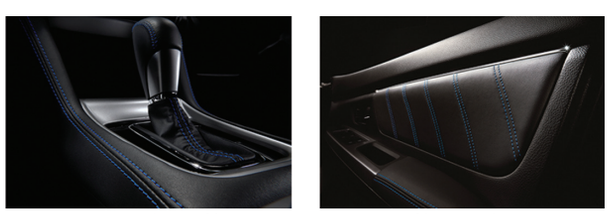
更にGT−Sでは、高触感の革を巻き、ブルーステッチのアクセントで、高品質で高性能なスポーツカーとしての佇まいを演出した（Fig. 24）。

Fig. 20　Black interior

Fig. 21　Ivory interior

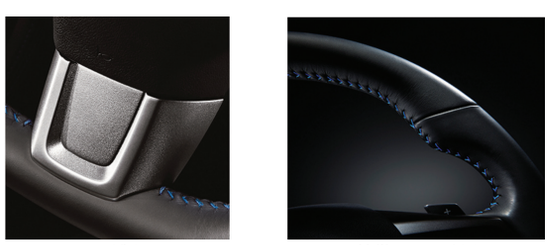
シルバー　艶　黒　シルバーカーボン

Fig. 22　Instrument panel decoration



コンソールリッド　ドアインナー

Fig. 23　Surface sheet decoration



ベゼル　革巻きハンドル

Fig. 24　Steering wheel

■シート表皮

①GTシート

カバーリングは、緩やかなラインの帯面をシート土手部に配置とシルバーステッチで格上感を演出する。表皮材は、上品な艶とカーキ色の挿し色で、張り栄えのする上質な表情の織物を開発した(Fig. 25)。

②GT−Sシート

カバーリングは、バケットタイプのアグレッシブな輪郭に沿って、帯面とステッチラインを配置しメリハリのある陰影感を強調させた。ブルー色のステッチでスポーツマインドをくすぐる演出をした。表皮材では、メイン材にグリップ性能を付加し、スポーツカーとしての機能と上質な見栄えを両立させた(Fig. 26)。

1.6GT−Sには緻密な起毛織物、2.0GT−Sにはアルカンターラを採用(Fig. 27)。

③オプション革仕様

革シートには、よりしっとりとした風合いの新規格の革を採用し、一格上の質感を実現した。

カバーリング

シート表皮

Fig. 25　GT seat

カバーリング

シート表皮

Fig. 26　GT-S seat

カバーリング

シート表皮

Fig. 27　1.6GT-S seat

5.　あとがき

SUBARUレヴォーグは「革新スポーツツアラー」というテーマの下、そのコンセプトに相応しいデザインとは何かということを徹底的に議論し、考え抜いて具現化された。二律背反する課題を解決し、また今まで我々が常識としてきた殻を破ることでプロジェクトを前進させた。我々デザイン開発チームのメンバーが妥協せず、納得のいくものが完成したと自負している。所有していただいた暁にはそのような開発に込めた思いをきっと感じていただけると確信している。

【著　者】

小林　正彦

宮下　大輔

雲野　裕紀

斎藤　實

スバル レヴォーグの荷室開発

Luggage Room Development of SUBARU LEVORG

岡　留　聖　二*
Seiji OKADOME

抄　録

スバル レヴォーグの荷室は、スポーティなスタイリングでありながら本格ツーリングカーとしての積載性、実用性を備えることを使命として開発された。

スバル伝統の使いやすさを継承し、機能性を進化させた「革新スポーツツアラー」の荷室について、特徴の紹介や構造の説明を行う

Abstract

The luggage room of SUBARU LEVORG was designed to carry out its mission of providing sufficient cargo capacity and utility suitable for the real touring car in its sporty design.

This article explains the characteristics and structure of the luggage room developed for the “innovative sports tourer”, LEVORG, while inheriting the Subaru’s traditional utility and further evolving its functionality.

1.　まえがき

車を購入する際、「荷室」はお客様にとって重要な購買要素の1つである。ライフスタイルによっては車両選びにおける最優先の項目となる。荷室を活用した「ライフスタイルの充実」は車を所有する喜びの1つと言える。

特に、スバルを購入されるお客様は、人生のパートナーとして車を選び、共に過ごす充実した時間に価値を見出している方が多いと感じる。つまり、お客様がスバルの荷室に求める期待値は高く、その期待に応えるためにも、スバルが提供する荷室に妥協は許されないと考える。

2.　開発の狙い

これまで、スバルの荷室は、「シンプルで使い勝手が良い」とお客様から好評を頂いている。

特に、レガシィツーリングワゴンは走りの良さとユーティリティの高さでワゴンのトップブランドとしての時代を築き上げてきた。レヴォーグは、そのレガシィツーリングワゴンの次の時代を担っていく車である。お客様からは「どんなにスタイルや走りが良くても、荷物が積めなければスバルのワゴンとは言えない。」と厳しく評価されてしまう。そのため、レヴォーグの開発では、レガシィツーリングワゴンからの「継承」と「進化」を実現する荷室を狙いとした(Fig. 1)。

Fig. 1　Luggage room of SUBARU LEVORG

3.　開発のキーワード

荷室の開発には、「空間」「機能性」「質感」の3つのキーワードがある。それぞれの開発について、以下に述べる。

＊ 内装設計部

3.1　空間

「空間」については、スバル伝統のシンプルで使いやすい荷室空間を狙いとした。

限られたボディ枠の中で最大限の空間を確保するために、各部位の張り出しを最小限とする工夫を織り込んだ。

荷室開口高さについては、ルームミラーからの視界確保と最大限のスペース確保のために、ルーフ部の張り出しを最小限にする開発を行った。車体断面を最小化し、内部ハーネスを2分割化した。そして、ルーフトリムを固定するクリップも高さの低い物を採用し、バラツキの精査や異音防止のクッションを追加することで、徹底的に部品同士の間隔を詰めた。結果、5代目レガシィツーリングワゴンと比べても格段に張り出しの少ないルーフを実現した(Figs. 2, 3)。

また、ホイールハウスの張り出しを最小限とするため、内部防音材の構成を遮音材と吸音材の2部品構成とした。吸音に加え、遮音を効果的に組み合わせることで高い室内静粛性を実現しながら、防音材の厚みを抑えることが出来た(Fig. 4)。

従来ホイールハウスにあったキャニスタもフロア下へ移動させたことで、高さ方向の張り出しを大幅に縮小出来た(Fig. 5)。

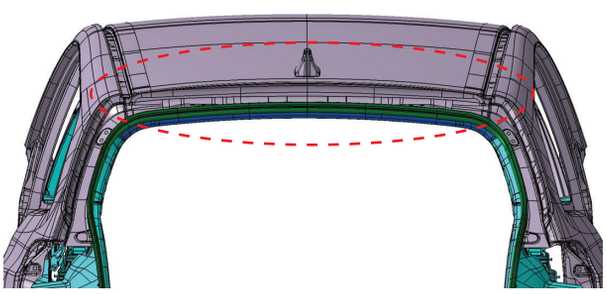


Fig. 2　Roof

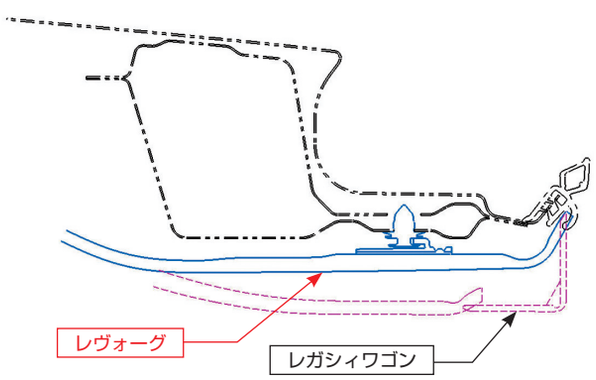


Fig. 3　Section of roof

荷室の使い勝手で最も重要な「フロア奥行き」と「フロア幅」については5代目レガシィツーリングワゴンと同面積を確保した。

フラットでフロアの隅々まできっちりと使える荷室としたことで、サブトランクも含めたVDA容量(※1)は522Lの大容量を実現した。

荷室開口部のトリムの張り出しを抑え、無駄な凹凸のない、すっきりとしたシンプルな造形とすることで、一目見て広さの感じられる荷室空間となっている(Table 1)(Fig. 6)。

(※1) ドイツの自動車工業会による測定方式

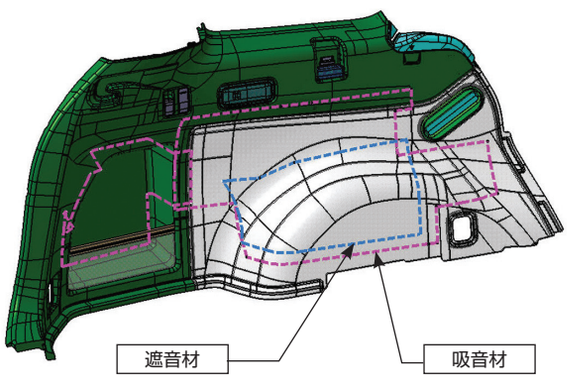


Fig. 4　Insulator of side trim

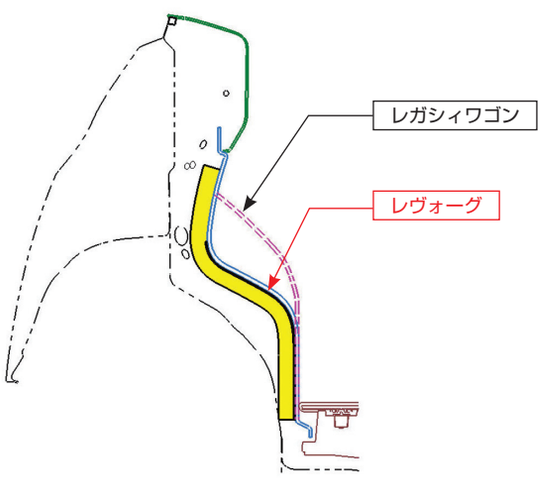


Fig. 5　Section of side trim

Table 1　Comparison of space dimension

	レヴォーグ	5代目レガシィ
荷室 フロア長 (5名乗車時)	1070 mm	1070 mm
荷室 フロア幅 (ホイールハウス間)	1080 mm	1080 mm
荷室高 (リヤシート直後)	770 mm	815 mm
VDA 容量 (5名乗車時・サブトランク含む)	522 L	520 L

※数値は全て社内計測値

Fig. 6　Luggage space dimensions

3.2　機能性

「機能性」については、5代目レガシィツーリングワゴンと同じ積載性を確保するだけでなく、更なる進化を狙いとして取り組んだ。

スバル伝統のシンプルで使いやすい荷室の利便性を更に高めるために「収納機能」を充実させるアイテムを盛り込んだ。荷物の仕分け、整理を可能とすることでメインの荷室ボード上の空間を有効利用出来、日常ユース、レジャーユース共に使い勝手の幅を広げることが出来た。

3.2.1　サブトランク

スペアタイヤのパンク修理キット化に伴い、荷室ボード下に前後2つの収納空間を設けた大容量のサブトランクを設定した(Fig. 7)。前側の収納空間は、ジャッキ等の工具類を下に配置し、その上に浅底空間を設定した。後ろ側の深底空間には、100 mmピッチで3パターンの区分けが可能な仕切り板も備えた。転がりやすい荷物や、不定期に使う趣味の道具、普段使わないがいざという時に使う道具など収納しておくのに重宝する。

Fig. 7　Sub trunk

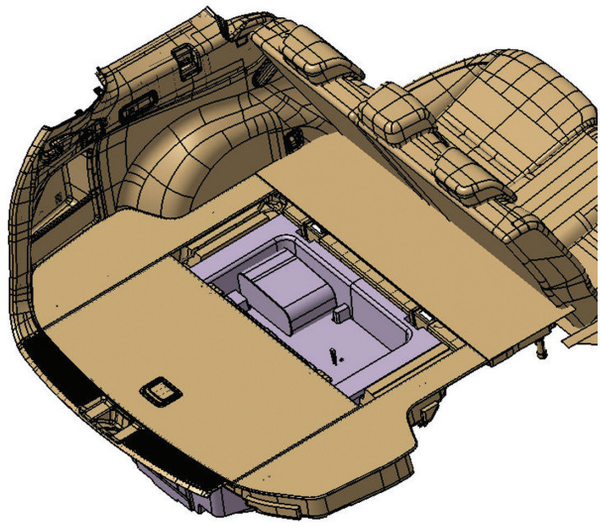


Fig. 8　Front space of sub trunk

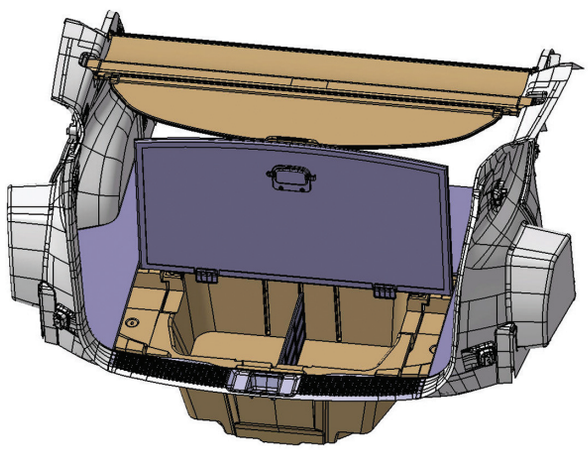


Fig. 9　Rear space of sub trunk

また、サブトランクの機能性を高めるために荷室ボードも前後2分割構成とし、荷物を載せた状態でもサブトランクの前後収納空間への独立したアクセスを可能とした(Figs. 8, 9)。

リヤの荷室ボードは、サイドスペーサーの溝へ差し込み、トノカバーへ立て掛けることで、ボードを開けた状態を維持できる。

サブトランクの深底を活用することで、観葉植物等の背高物の荷室収納も可能とした。

荷室ランプもサイドトリム上方に配置することで、開いた荷室ボードに光が遮られることなく、夜間での使い勝手にも配慮した。ランプの光源部にはリフレクタを使用して荷室全体が照射出来るようにしている。

3.2.2　ネットポケット

サイドトリムの左右にはスバル初となるネットポケットの収納空間を設定した。1Lのペットボトルや薄型のティッシュボックス、その他小物類を見える形

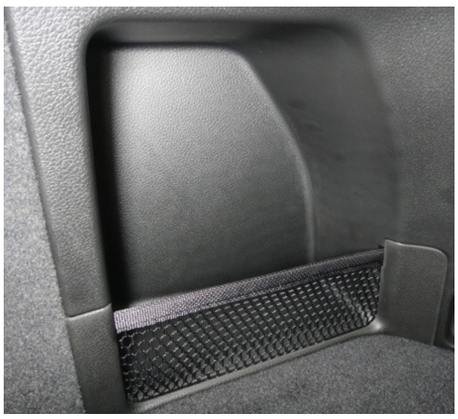


Fig. 10　Net pocket of side trim

で収納することが出来る。ネットフレームには弾性のあるSUS材を使用し、収納物への追従性と適度な剛性、耐久性を備える(Fig. 10)。

3.2.3　荷室フック

荷室フロア前後には4ヶ所の荷室フックを備えた。リングの鉄製化、内部受け構造の変更による剛性向上によって従来使用していたフックに対し耐荷重を2.5倍引き上げている(Fig. 11)。

サイドトリムには伝統のワンタッチ格納式コンビニフックを設け、買い物袋を倒さずに固定できるよう配慮している。隣には、荷室から指一本で操作出来る電磁式のリヤシートフォールディングスイッチも備える(Fig. 12)。

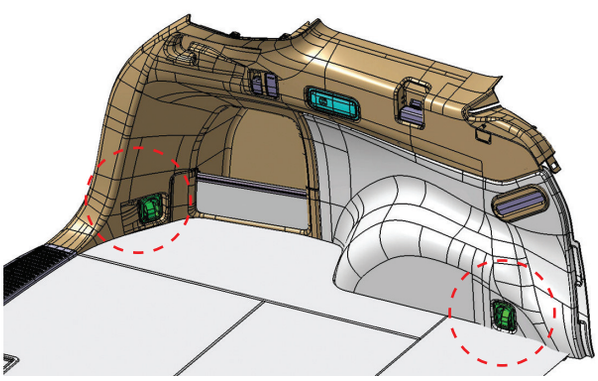


Fig. 11　Hook luggage

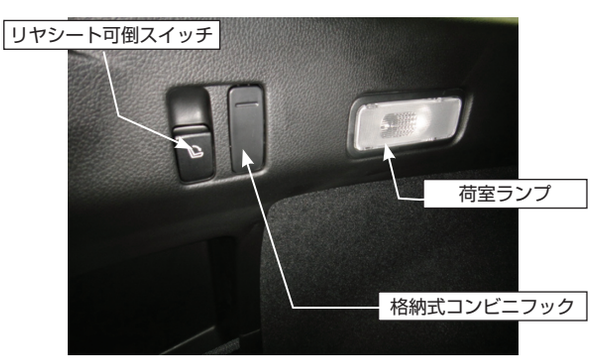


Fig. 12　Function parts

Fig. 13　Storing of suit case

Fig. 14　Storing of golf bag

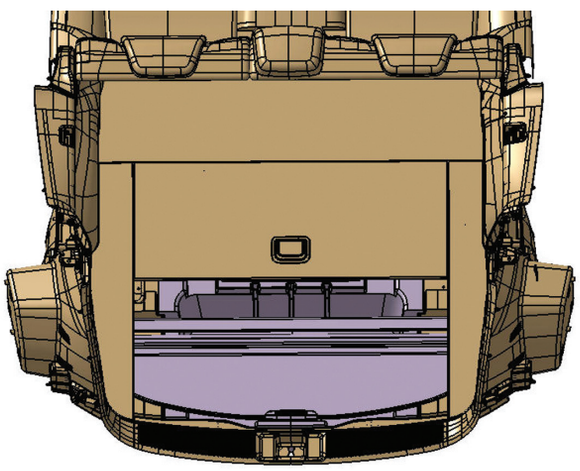


Fig. 15　Storing of tonneau cover

その他、5代目レガシィツーリングワゴン同様に、大型スーツケースと46インチシャフトの入る9インチゴルフバックをそれぞれ4個積載可能とし、荷室ボード下にはトノカバー収納も可能としている(Figs. 13, 14, 15)。

3.3　質感

「質感」については、欧州ワゴンからの乗り換えユーザーの期待にも応えられる質感を狙いとした。

ディロアニードルパンチ表皮を荷室ボード、サイドトリムに採用し、ソフト素材の面積を充分に確保した。トノカバーのアルミケースにはブラックのカラーアルマイト処理を施し、色調の統一された荷室空間を提供した(Fig. 16)。

Fig. 16　Tonneau cover

4.　あとがき

昨年の東京モーターショウで発表して以来、様々なお客様やジャーナリストの方々から、「想像を超える使い勝手の良い荷室に驚いた」という声をたくさん頂いている。

前後の寸法を切り詰め、ルーフを傾斜させたスポーティな外観から想像される使い勝手のイメージを遥かに超えているからだと考える。

荷室の使い方はお客様の自由であり、カーライフを楽しむ無限の可能性を秘めている。我々が提供する商品を通じてお客様が充実した時間を過ごすための力添えが出来れば本望である。レヴォーグの荷室にたくさんの思い出を積んで頂きたいと思う。

最後に、荷室開発は自部品だけの努力では実現出来ない。車体、ハーネス等の関連部品設計やデザイン、実験部門、製造部門、サプライヤの協力によって、高いハードルの目標達成に向けて課題解決を繰り返し、1ミリづつの地道な改善努力の積み重ねにより実現する。

レヴォーグの荷室開発において多大なる協力を頂いた関係者の方々に深く感謝する。

【著　者】

岡留　聖二

富士重工業株式会社

スバル自動車事業の拡充と世界進出――拡大期のスバル紹介

スバル レックスGSR（初代レックスシリーズ 1972年～ 1977年）

全長/全幅/全高(mm)　2,995/1,295/1,255
エンジン　水冷2サイクル直列2気筒　356 cc
最高出力　37 PS/6,500 rpm
最大トルク　4.2 kg-m/6,000 rpm

レックスシリーズはR-2の後継車として、ウェッジシェイプの躍動感あふれるスタイルで登場した。その後、4サイクル化、SEEC-T車投入(51年度排ガス規制適合)、軽枠拡大などを経て、1981年、RRからFFへ大転進したFFレックスシリーズ、さらには、1989年、4気筒エンジンが搭載されるなど四世代を変遷したシリーズとなった。

新開発 1.6ℓ水平対向直噴ターボエンジンの開発・紹介

Development of 1.6L Horizontally-Opposed Direct Injection Turbo Gasoline Engine

佐々木　　礼[*1]
Rei SASAKI

保　阪　亮　太[*2]
Ryota HOSAKA

横　山　　誠[*2]
Makoto YOKOYAMA

金　子　　隆[*3]
Takashi KANEKO

勝　俣　雅　人[*4]
Masato KATSUMATA

平　岡　直　樹[*5]
Naoki HIRAOKA

塚　本　直　輝[*5]
Naoki TSUKAMOTO

抄　録

スバルが新しい価値を創造すべく2014年に『革新スポーツツアラー』としてデビューした、レヴォーグ専用エンジンとして1.6リッタ水平対向直噴ターボエンジン『FB16DIT』を開発した。2012年に市場導入したFA20DITエンジン[(1)(2)]と2011年にインプレッサに搭載したFB16エンジン[(3)]を融合させ、2.5リッタエンジン相当以上の出力性能と圧倒的な環境性能を両立。既存のFB16エンジンに対して、クランクシャフトを除くほぼ全ての部品を刷新した。

Abstract

A new 1.6L horizontally-opposed direct injection turbo gasoline engine (FB16DIT) was developed exclusively for SUBARU LEVORG.

This new engine has integrated FA20DIT and FB16 to achieve higher power and better fuel economy compared to 2.5L engine (FB25). All the parts of the current FB16 engine were redesigned except the crankshaft.

1.　まえがき

『革新スポーツツアラー』の名に恥じないロングツーリング性能と、スバルに期待される“AWD+ターボ”の走りを高次元で両立させながら、国内専用ユニットの象徴といえるレギュラガソリン専用に拘ったFB16DITエンジンを新開発した。『新しいスバル』を象徴する1.6リッタ水平対向直噴ターボエンジンを本稿で紹介をする。

2.　FB16DIT エンジン開発コンセプト

国内専用車レヴォーグに相応しい圧倒的な環境性能と、スバルに求められる走りの性能をレギュラガソリンで実現。同じく排出ガス性能についても触媒仕様の最適化を行い、平成17年基準75%低減に対応。燃費・出力とともに高次元でバランスさせたスバルの新時代を象徴する全性能を進化させたエンジンである(Fig. 1)。

Fig. 1　FB16DIT engine

出力性能はLEGACY2.5リッタ相当以上の特性を持ち、ターボエンジン独特の低回転(1800 rpm)から高回転(4800 rpm)までのフラットなトルクによる乗りやすさと、それ以降の馬力をフラットにすることによる伸びのある気持ちのよいフィーリングを実現

＊1 エンジン設計部
＊2 パワーユニット研究実験第1部
＊3 CAE部
＊4 技術本部PGM（環境対応）
＊5 パワーユニット研究実験第2部

し、幅広いお客様のニーズに応えるものとなっている（Fig. 2）。

エンジン諸元をTable 1に示す。

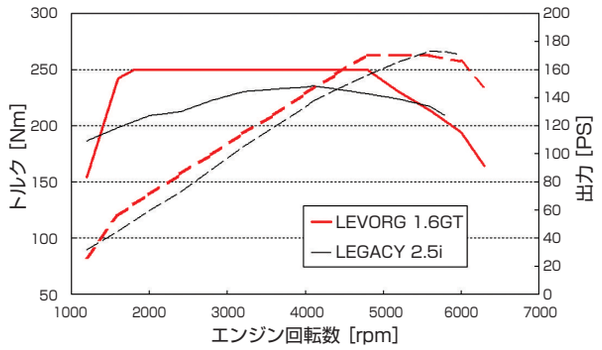


Fig. 2　Engine torque curve

Table 1　Engine specifications

■エンジン	LEVORG 1.6GT	LEGACY 2.5i
型式・種類	FB16	FB25
	水平対向４気筒 turbo	水平対向４気筒
	1.6L DOHC 16バルブデュアル AVCS	2.5L DOHC 16バルブ AVCS
内径×行程 (mm)	78.8 × 82.0	94.0 × 90.0
総排気量 (cc)	1599	2498
圧縮比	11.0	10.0
最高出力［ネット］(kW(PS)/rpm)	125(170)/ 4800～5600	127(173)/5600
最大トルク［ネット］(N·m(kgf·m)/rpm)	250(25.5)/ 1800～4800	235(24.0)/4100
燃料供給装置	筒内直接燃料噴射装置	マルチポイントインジェクション
燃料種類	無鉛レギュラ	無鉛レギュラ
排出ガス	平成17年基準75%低減	平成17年基準75%低減
燃料消費率［JC08］(km/ℓ)	17.4 (16.0（1540 kg以上))	14.4 (12.4（1540 kg以上))

3.　燃焼設計

3.1　TGVのコンセプト

吸気ポートや燃焼室設計は、FA20DITの思想を継承しているが、FB16DITでは、TGV（タンブル・ジェネレーション・バルブ）を更に進化させた。

FA20DITで採用したTGVは、吸気ポートの内側を閉じる事で、吸気ポート外側に強い気流を発生させ、筒内にタンブル流を生成している。これを順TGVと呼ぶ。また吸気ポート内に設置した隔壁は、4：6の比率である。

一方、FB16DITのTGVは、吸気ポートの外側を閉じる事にした。更なる燃費性能向上を狙い吸気ポート形状を検討する過程で、TGVを逆向きに設置した方が、これまで以上に混合気の均一性が向上する事が判った。これを、逆TGVと呼ぶ。また、より広い運転領域で燃費性能向上を図るため、隔壁は5：5の比率とした（Fig. 3）。

隔壁比率5：5における順TGV閉と逆TGV閉における吸気バルブ中心断面の流れをCFD（流体解析）[4] [5] [6]で示す（Fig. 4）。順TGV閉が形成する流れは、筒内に流入した後、やや蛇行する傾向があった。逆TGV閉は、吸気ポートから排気側ペントルーフ面まで直線的でスムーズな流れが形成されている。

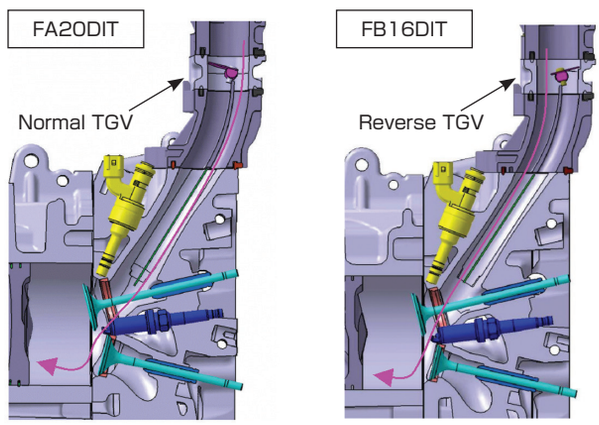


Fig. 3　Air flow process

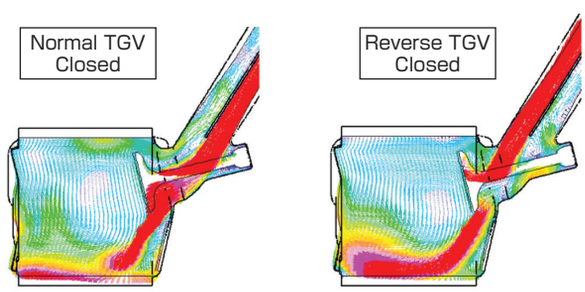


Fig. 4　Comparison of CFD analysis (1200 rpm,120 deg)

3.2　TGVの混合気分布

順TGV閉と逆TGV閉におけるCFDの混合気分布をFig. 5に示す。吸気行程中で噴射した燃料は、タンブル流に乗って筒内を移動しながら拡散する。この時、逆TGV閉の方が混合気の移動速度が速く、より短時間で筒内に拡散していく様子が把握できた。

同じ条件におけるLIF（Laser Induced Fluorescence）可視化計測による混合気分布を、Fig. 6に示す。CFD結果と同様に、逆TGV閉の方が、混合気の移動速度が速い事を確認した。

3.3　TGVの実験結果

同一吸気ポート形状において、燃費代表点（1200 rpm,IMEP=300 kPa）でファイアリング試験した結果を、Fig. 7に示す。順TGV閉よりも、逆TGV閉の方が、図示燃料消費率（ISFC）、図示平均有効圧変動率（COV）、排ガス性能（THC）が改善した。以上の結果から、CFD、LIF可視化計測、ファイアリング試験の3種類で、逆TGVの優位性が確認できた。

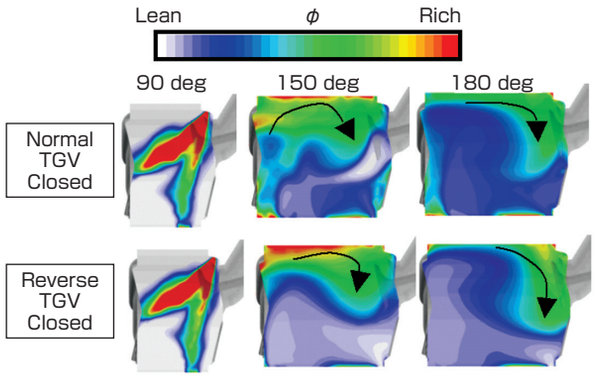


Fig. 5　Comparison of CFD analysis (1250rpm)

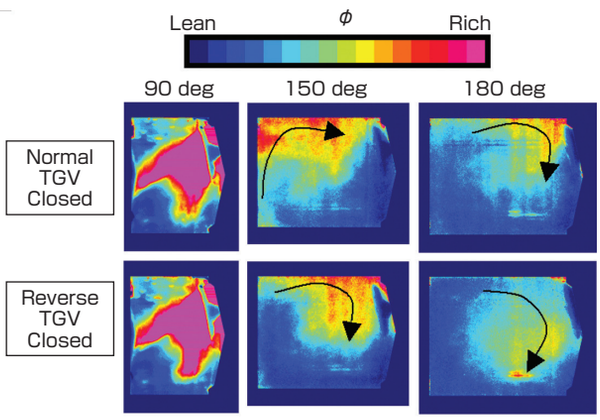


Fig. 6　Comparison of LIF experiment (1250 rpm)

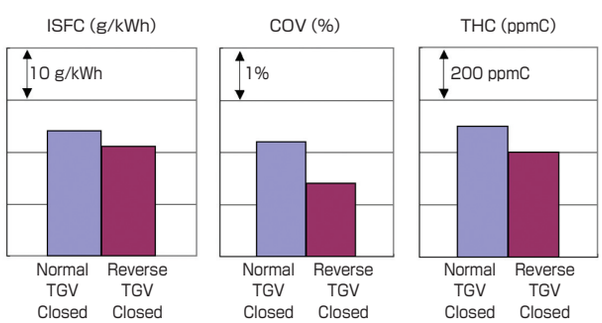


Fig. 7　Comparison of experimental results

3.4　ピストンのコンセプト

FA20DITの燃焼コンセプトを継承して、マルチホールインジェクタを採用している。また、混合気形成は、ウォールガイド方式とエアガイド方式を融合させた思想である。

ファストアイドル条件での2段噴射制御の混合気分布の様子を、Fig. 8に示す。吸気行程で1回目の噴射を行い、混合気を筒内全体に拡散させた後、圧縮上死点前で2回目の噴射を行う。この噴霧は、ピストン冠面に設置した浅皿型キャビティのステップをきっかけに、ピストン上方に向きを変える(ウォールガイド方式)。その後、ガス流動を利用する事で更に巻き上がり、スパークプラグ近傍に混合気を形成する効果がある(エアガイド方式)。

また、CFDとLIF可視化計測は良く一致しており、コンセプトの妥当性を検証しながら、ステップ形状の選定に貢献した(Fig. 9)。

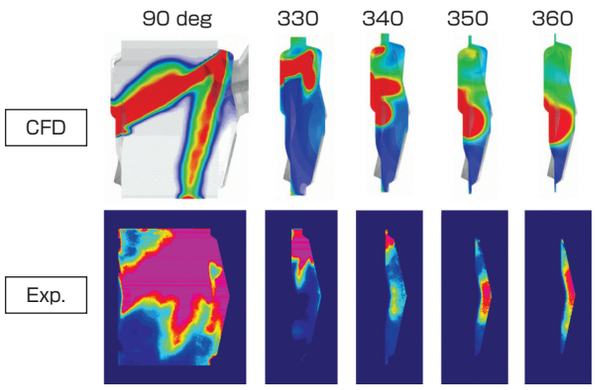


Fig. 8　Comparison between CFD and experiment (Fast idle condition)

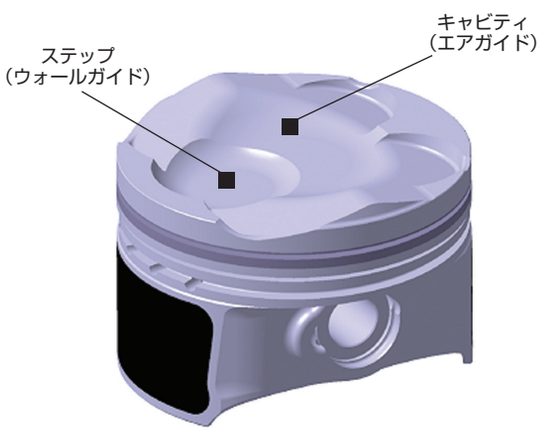


Fig. 9　FB16DIT piston

4.　燃費性能向上技術

4.1　圧縮比の選定

FB16DITのコンセプトである燃費性能を追求するため、ハイオクガソリン仕様のFA20DIT(ε = 10.6)に対して、レギュラガソリン対応させながらも、高圧縮比化に取り組んだ。

まずノック抑制を狙い、シリンダヘッド内の冷却回路を見直し、スパークプラグや排気バルブ周りの冷却改善を行った。さらに圧縮比を変えた試験を行い、最適解を導いた。

圧縮比を変更した場合のISFCと出力の関係をFig. 10に示す。高圧縮比(ε = 11.0,11.5)とすることでISFCは改善するが、圧縮比を11.5まで上げるとISFC改善効果は少なくなる。

最終的には、出力と燃費のバランスから圧縮比11.0を採用した。

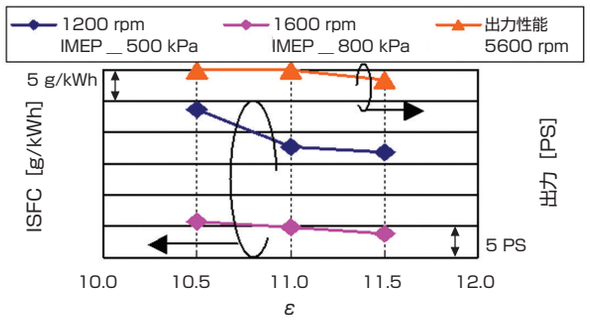


Fig. 10　Effect of compression ratio

4.2　多段噴射領域の拡大

FB16DITは燃費改善を狙いファストアイドルに加えて走行中も多段噴射（吸気行程、圧縮行程で各1回噴射）を実施している。

同一噴射量の条件で単段から多段噴射にすると、吸気行程中の噴射量が減るため、気化潜熱による混合気温度低下がし難くなり、壁面からの受熱量が抑制される。更に、圧縮行程で2回目の燃料を噴射する事で気化潜熱を再度利用でき、圧縮上死点での筒内の混合気温度が低下する（Fig. 11）。

噴射回数と噴射時期をエンジン回転数と負荷などの運転条件に応じ最適制御させ、均質度の向上、等容度改善、ISFC改善の効果が得られた（Fig. 12）。

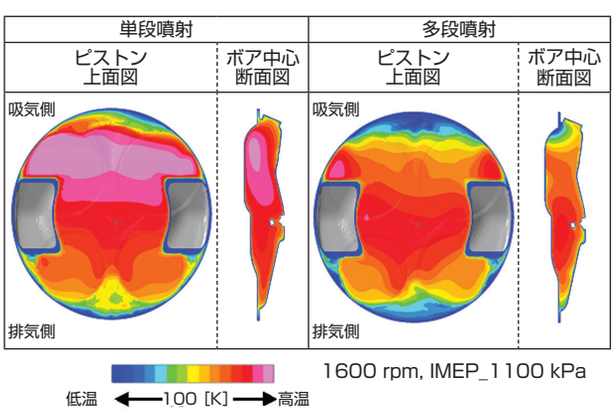


Fig. 11　Comparison of temperature distribution (TDC)

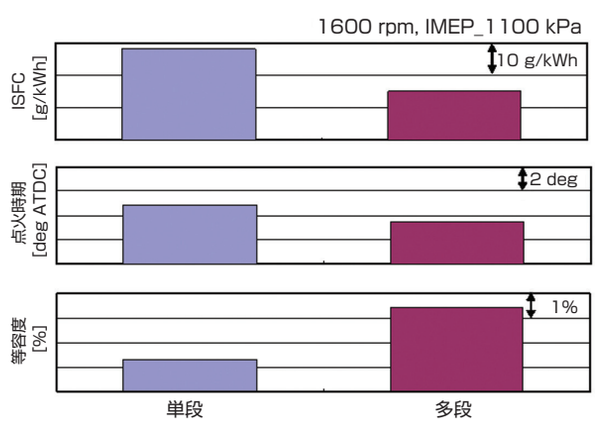


Fig. 12　Effect of multiple injection

4.3　EGRシステム

FA20DITで採用したEGRシステムをベースに、EGRパイプ管径や形状、クーラの見直しを行った（Fig. 13）。EGRパイプの形状変更による燃費改善効果をFig. 14に示す。

EGR分配が改善し各気筒に均等で高流量のEGRを取り込むことが可能となり、FB16DITはFA20DITに対し、EGR率を最大で5%向上させた。ポンピング損失が低減することで燃費性能向上を図っている。

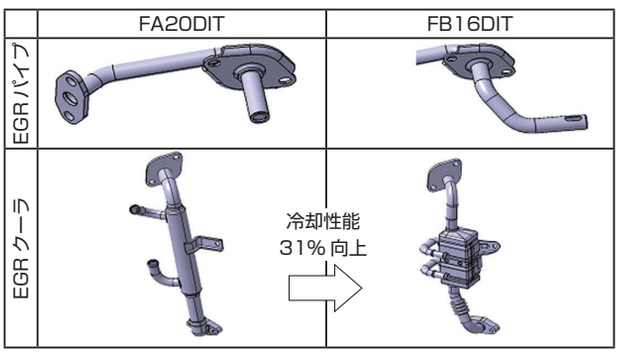


Fig. 13　EGR pipe and cooler

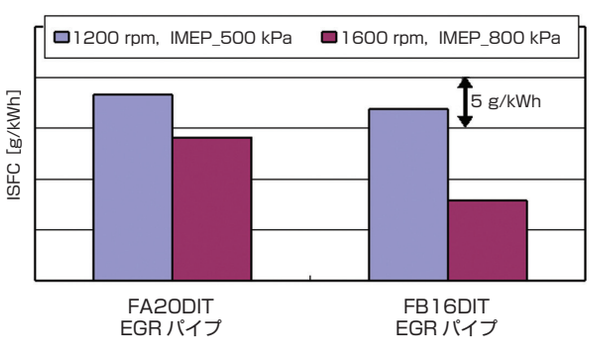


Fig. 14　Effect of EGR pipe

4.4　フリクション低減

燃費性能の向上においてエンジン各部のフリクション損失を低減させることが不可欠である。FB16DITではFA20DITの技術を継承しつつ、更なる新しいフリクション低減技術を採用した（Table 2）。

Table 2　List of low friction items

1	エンジンオイル低粘度化による摺動抵抗減
2	ピストン・コンロッド軽量化による慣性質量減
3	ウォータジャケットスペーサ（WJS）によるピストンリング摺動抵抗減
4	摺動部鏡面仕上げによる動弁系摺動抵抗減

4.4.1　エンジンオイル低粘度化による摺動抵抗減

オイル粘度を全温度域でFA20DITより低減させることで、撹拌抵抗および摺動部の摩擦抵抗低減を図っ

た。油温と油粘度の相関をFig. 15に示す。高粘度指数基油を採用することで必要な摩耗耐力を確保した。

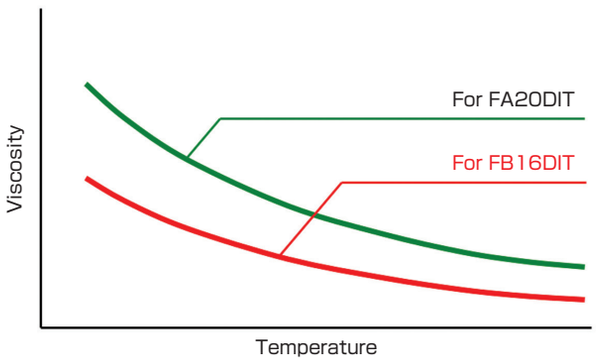


Fig. 15　Viscosity properties of engine oil

4.4.2　ピストン・コンロッド軽量化による慣性質量減

ピストン・コンロッドはFB16DITの性能特性に合わせた新設計とし、ダウンサイジング効果も併せてFA20DIT比▲28%の軽量化を実現した。

4.4.3　ウォータジャケットスペーサ(WJS)によるピストンリング摺動抵抗低減

シリンダブロックのウォータジャケット内にボア上部に開口部を設けた樹脂スペーサを追加(Fig. 16)。これによりFig. 17に示すとおり、ボア中央～下部の水流速を抑制して同部壁温を上昇させることで下記メカニズムによるピストンリング摺動抵抗低減を実現した。

①ボア壁面に付着する油膜粘度と油膜厚さ低減によるオイルせん断抵抗低減
②ボア上下間の温度差を減らしてフリクション悪化要因となるボア変形抑制

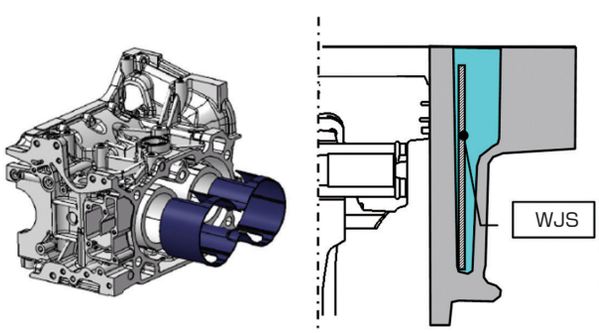


Fig. 16　Water Jacket Spacer (WJS)

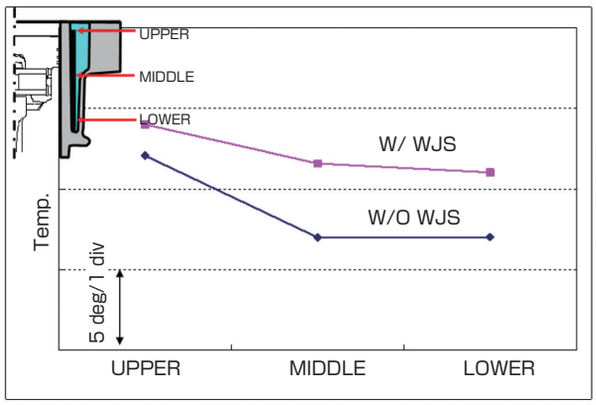


Fig. 17　Temparature of cylinder bore

4.4.4　擦動部鏡面仕上げによる動弁系摺動抵抗減

Fig. 18で示す吸排気バルブのステム部及びカムシャフトのジャーナル部において、加工面を鏡面レベルまで磨きこんだ“鏡面仕上げ”とすることで摺動部の摩擦抵抗を低減させた。

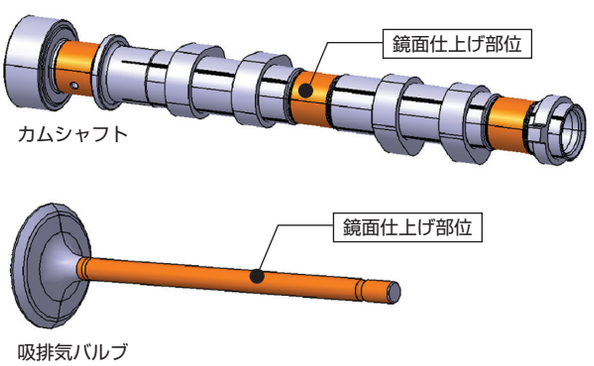


Fig. 18　Area of mirror finish

上述アイテム以外にも細部にわたるフリクション低減策を織り込むことでFig. 19に示すとおりFA20DIT比▲18%のフリクション低減を実現した。

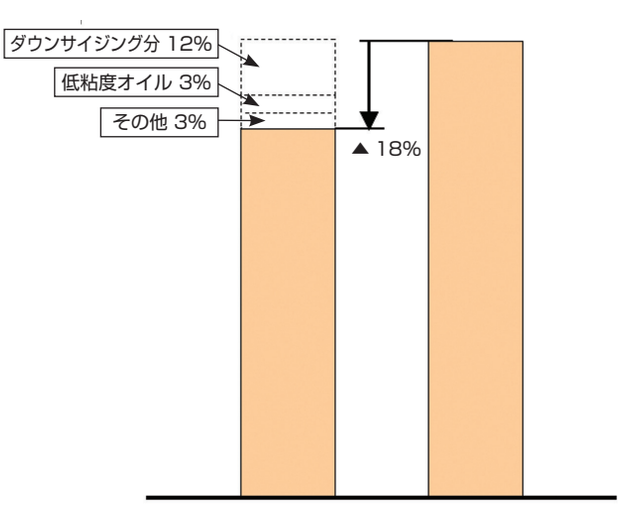


Fig. 19　Friction comparison between FB16DIT and FA20DIT

5. まとめ

スバルの新時代を象徴するLEVORGに相応しい、国内専用パワーユニットとして、水平対向直噴ターボエンジン『FB16DIT』を開発した。

2010年より導入された第三世代水平対向エンジンから一貫して取り組んだ環境対応技術とスバルが得意とするターボ技術、先に導入した直噴ターボ技術を融合させ、2.5リッタ相当以上の出力性能と圧倒的な燃費性能を高次元で両立させ、且つレギュラーガソリンに対応させ、革新スポーツツアラーの名に恥じない最高のパワーユニットを提供できた。

最後に、本エンジンの開発に多大な協力を頂いた社内外の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

(1) 永野ほか：水平対向直噴ターボガソリンエンジンの開発（第1報）、スバル技報、No.39（2012）
(2) 二神ほか：水平対向直噴ターボガソリンエンジンの開発（第2報）、スバル技報、No.39（2012）
(3) 竹内ほか：新型インプレッサの紹介、スバル技報、No.39（2012）
(4) 石田ほか：非定常筒内流動ライトCAEの開発とPIVによる精度検証 第二報、スバル技報、No.36（2009）
(5) 石田ほか：レーザー計測を用いた筒内非定常流動CAE解析の精度検証、第20回内燃機関シンポジウム,20090040（2009）
(6) 中山ほか：ガソリン直噴エンジンの混合気濃度分布の解析、スバル技報、No.38（2011）

【著　者】

佐々木　礼

保阪　亮太

横山　　誠

金子　　隆

勝俣　雅人

平岡　直樹

塚本　直輝

新型 WRX の紹介

Introduction of New SUBARU WRX

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

抄　録

WRXは、世界中のお客様から、その突出したスポーツ・パフォーマンスに高い評価を頂き、愛されてきた。その4代目となる新型WRXでは、歴代WRXが追求してきた本物のスポーツセダンのみが実現する、絶対的な速さと操ることの愉しさを提供しつつ、時代の求める先進技術を加える事で、より多くのお客様に、スバル最高峰の走りを知って愉しんで頂ける車を目指して開発した。

Abstract

WRX has established a high evaluation for its outstanding sports performance and has been loved by customers all over the world. The 4th generation New SUBARU WRX provides absolute driving speed and pleasure which can only be achieved by a real sports sedan. This is what WRX has constantly pursued for generations. In the development, the New SUBARU WRX also aimed to engage more customers by employing advanced technologies to meet the demand of the times.

1. まえがき

WRXの3文字は、スバルのスポーツスピリットの象徴であり、突出したスポーツ・パフォーマンスを持つモデルに冠せられる記号である。その誕生以来、WRCやニュルブルクリンク24時間レース等のモータースポーツシーンにおいて、常にトップレベルの戦闘力を発揮し、世界の名だたるスーパースポーツを相手に、健闘を続けている。

新型WRXは、そのスポーツスピリットを受け継ぎ、走りを進化させ、環境技術や先進安全などの時代性も取り入れる事で、新提案のスバルスポーツセダンとして開発した。

2. 開発の狙い

■ パワーとコントロールの追求

歴代のWRXが追求してきたもの、それは本物のスポーツセダンのみが実現する、絶対的な速さと操ることの愉しさである。新型WRXの開発では、本物のスポーツセダンの資質を、パワーとコントロールという二つの要件を高次元で両立させることと位置づけた。

パワーとは単にスペックの数値だけではなく、速く走るための理想的な特性を備えたエンジンパワーであり、また、そのパワーをロスなく路面に伝える駆動システム、コーナリング時の限界Gの高さ等、絶対的な速さを生み出すための全ての要素である。そして、コントロールとは、そのパワーをドライバの意思のままに、いかなるシーンでも発揮し、自在に操ることができることを意味する。クルマが運転操作に対して遅れることなく、ドライバのイメージするとおりに反応することがポイントである。

このパワーとコントロールという二つの要件を、極限まで追求することを新型WRXのコア・コンセプトとして、“Pure Power in Your Control”というコンセプトワードの下で開発した(Fig. 1)。

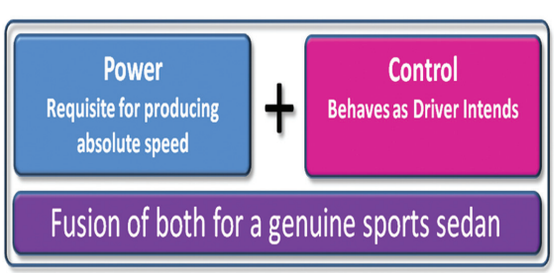


Fig. 1　Pure Power in Your Control

BOXERターボを核とする　Symmetrical AWDの熟成、ボデーの軽量化と剛性向上、そしてシャシー性能の徹底的な強化など、細部にいたるまで入念な見直しを図ることで、新型WRXは、その理想を余すことなく実現して、本物のスポーツセダンとしての進化を遂げた。

■ 先進技術の取り込み

スバル最高峰の走りの性能に加えて、環境性能、イージードライブ、アイサイトVer.3等の先進技術を取り込んで、新提案のスポーツセダンへと昇華した（Fig. 2）。

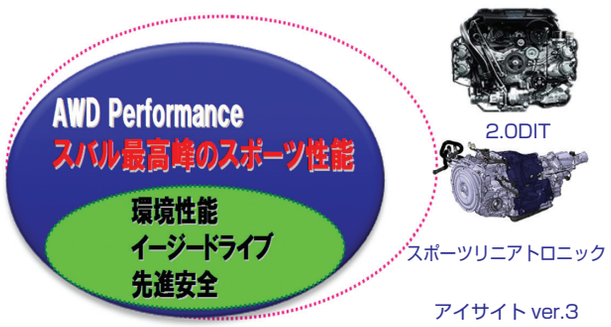


Fig. 2　Performance items

Fig. 3　WRX S4 exterior

■ スタイリング＆パッケージング

スタイリングは専用デザインのボデーを与えることで、スバルの走りのフラッグシップにふさわしい、速さと強さを表現。同時にひとクラス上の車格感を持たせることで、所有する喜びをストレートに感じられるものとした。

パッケージングは、どのようなシーンにもマッチする4ドアセダンパッケージに、高度な走りの性能を凝縮することで、走りの愉しさと快適な移動性を高いレベルでバランス。さらに、走りのパフォーマンスを損なうことなくセダンとしての利便性も確保し、ファミリーユースにも対応するマルチパーパス性を実現した（Figs. 3, 4, 5）。

Fig. 4　WRX STI exterior & interior

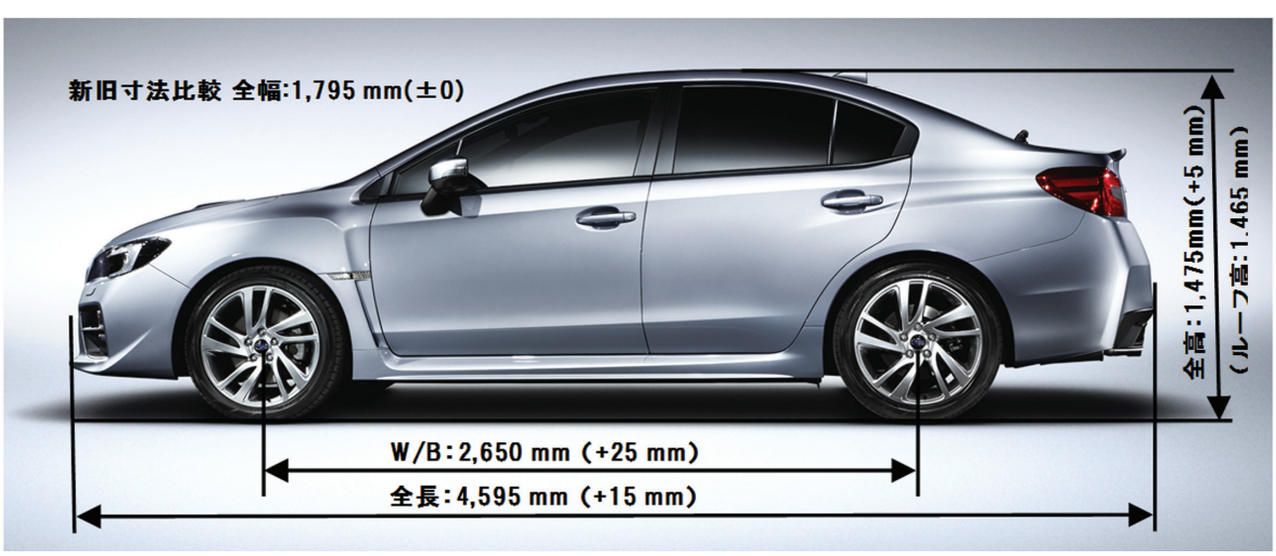


Fig. 5　Dimensions

3. 主要諸元・車種構成

Table 1 Specifications

車名・型式		スバル CBA－VAB		スバル DBA－VAG	
車種		STI	STI－S	S4 EyeSight	S4－S EyeSight
		2.0L DOHC ツインスクロールターボ		2.0L DOHC 直噴ターボ DIT	
		6MT		スポーツリニアトロニック	
		AWD			
◆寸法・重量・定員					
全長（mm）		4595			
全幅（mm）		1795			
全高（mm）		1475			
室内長（mm）		2005			
室内幅（mm）		1490			
室内高（mm）		1205			
ホイールベース（mm）		2650			
トレッド［前］(mm)		1530			
トレッド［後］(mm)		1540			
最低地上高 (mm)		140		135	
車両重量 (kg)		1480	1490	1540	1540
乗車定員 (名)		5			
車両総重量 (kg)		1755	1765	1815	1815
◆性能					
最小回転半径 (m)		5.6		5.5	
燃料消費率（km/l）	JC08 モード燃費	9.4		13.2	
主要燃費向上対策		－		筒内直接燃料噴射装置／電動パワーステアリング／自動無段変速機／ロックアップ機構付トルクコンバータ	
		可変バルブタイミング			
◆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			
パワーステアリング		油圧		電動	
ステアリング　ギヤ比		13		14.5	
前輪サスペンション		ストラット式独立懸架			
後輪サスペンション		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)			
前ブレーキ		ベンチレーテッドディスク			
後ブレーキ		ベンチレーテッドディスク			
駐車ブレーキ形式		機械式後 2 輪制動		電気式後 2 輪制動	
◆エンジン					
型式・種類		EJ20		FA20	
		水平対向 4 気筒			
		2.0L DOHC 16 バルブ デュアル AVCS ツインスクロールターボ		2.0L DOHC 16 バルブ デュアル AVCS 直噴ターボ DIT	
内径×行程 (mm)		92.0 × 75.0		86 × 86	
総排気量 (cc)		1994		1998	
圧縮比		8		10.6	
最高出力［ネット］[kW(ps)/rpm]		227 (308)/6400		221 (300)/5600	
最大トルク［ネット］[N·m(kg-m)/rpm]		422 (43.0)/4400		400(40.8)/2000-4800	
燃料供給装置				筒内直接燃料噴射装置	
		EGI			
燃料種類		無鉛プレミアムガソリン			
燃料タンク容量 (L)		60			
◆トランスミッション					
変速機形式		6MT 前進 6 速　後進 1 速		スポーツリニアトロニック (マニュアルモード付) 前進無段　後退 1 速	
D レンジ		－		3.105 ～ 0.482	
変速比 (第 1 速)		3.636		3.105 (S# : 3.105)	
変速比 (第 2 速)		2.375		1.983 (S# : 2.334)	
変速比 (第 3 速)		1.761		1.454 (S# : 1.815)	
変速比 (第 4 速)		1.346		1.057 (S# : 1.499)	
変速比 (第 5 速)		1.062		0.779 (S# : 1.221)	
変速比 (第 6 速)		0.842		0.542 (S# : 1.000)	
変速比 (第 7 速)		－		－ (S# : 0.831)	
変速比 (第 8 速)		－		－ (S# : 0.707)	
変速比 (後退)		3.545		2.077	
減速比		3.900		4.111	
◆環境情報					
燃料消費率	JC08 モード CO_2 排出量 (g/km)	247		176	
	平成 27 年度基準達成レベル	－		100%	
排出ガス	適合規制	H17 年規制			
	低排出ガス車認定レベル	50% 低減		75% 低減	
〈JC08H+JC08C モード諸元値〉	CO (g/km)	1.15		1.15	
〈　↑　〉	NMHC (g/km)	0.025		0.013	
〈　↑　〉	NOX (g/km)	0.025		0.013	
騒音	適合規制	平成 10 年騒音規制			
	加速騒音規制値 (dBA)	76			
エアコン	冷媒の種類	HFC-134 a			
	冷媒使用量 (g)	475 ± 25 g			

4.　デザイン

デザインについては、本号別報[1]にて解説しているため、この報告では割愛する。

5.　車体

5.1　開発の狙い

本物のスポーツセダンとしてスタイリッシュなデザインと実用性の両立、またどんな場面でも意のまま操れる走行性能の実現に向け、居住空間の最適化とデザイン向上、高強度・高剛性ボデーによる衝突安全・走行性能向上、質感・静粛性・商品力向上を目指し、次の取組みを行った。

■ 居住空間の最適化とデザイン向上

・Aピラー付け根部分の約200 mm前出し、及び断面の最小化により、インプレッサと同レベルの運転し易い広い視界を確保し死角を低減した(Fig. 6)。

・サイドシルの高さを20 mm下げつつ、車両外側に15 mm出すことで、室内幅を拡大し、室内空間を拡大した。

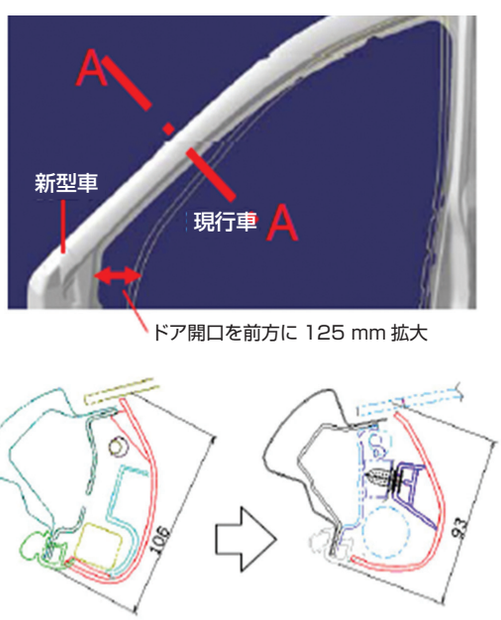


Fig. 6　A pillar

・フロントフード廻りを一新させノーズコーン化し、スポーティーな外観を実現した。また歩行者保護等の安全性能にも十分配慮した構造とした(Fig. 7)。

・サイドパネルの張り出しと、リヤコンビランプとの一体造形により、迫力のある力強い外観とした。またフューエルフラップは小型(丸形)とし、デザイン向上を図った(Fig. 8)。

Fig. 7　Nose cone design

Fig. 8　Fuel flap

■ 高強度・高剛性ボデー

・前後サスペンションからの荷重をスムーズに伝達させるため、フロント廻りはAピラーとフロントバルク周辺を中心に、リヤ廻りはリヤフロアとリヤバルク周辺を中心にそれぞれ補強した(Fig. 9)。

・主要構造部同士の結合部を強化したことで、曲げ剛性および捩り剛性共に大幅に向上し、俊敏な走りと優れた乗り心地を実現した。

・フロントフレーム、リヤフレーム、サイドシル、およびピラー等には高張力鋼板を使い(Fig. 10)、衝突安全性能を効果的に向上させ、軽量化と両立させた。

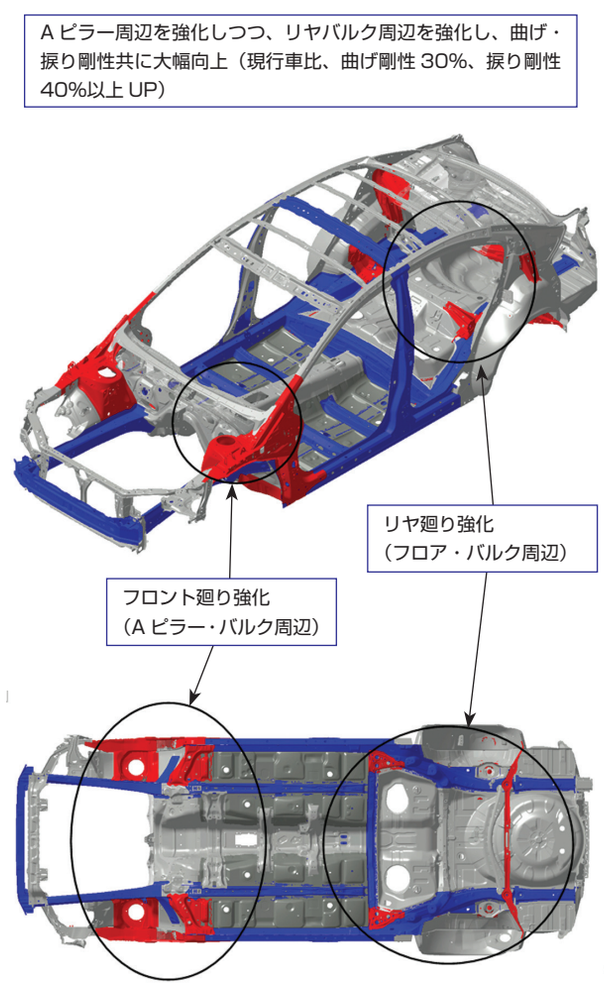


Fig. 9　Reinforced body structure

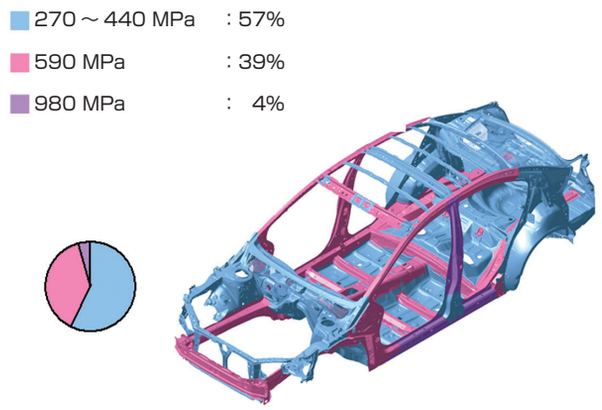


Fig. 10　Material usage for body structure

■ 質感・静粛性向上

・ドアを開けた時に見えるボデーパネルの細部まで拘った造り、仕上がり(Fig. 11)とした。

・トーボードとフロアパンの板厚アップ､及びインシュレータの強化にて、静粛性を向上(Fig. 12)させた。

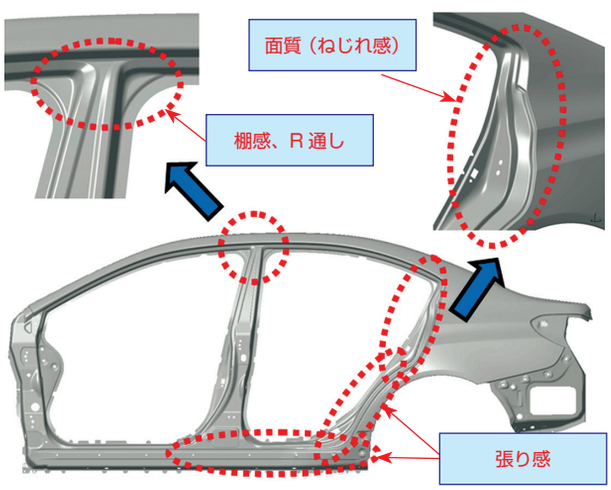


Fig. 11　Shape designed for outer panel

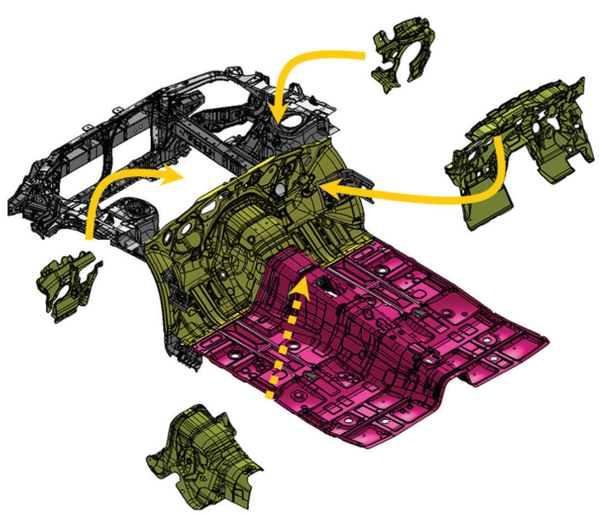


Fig. 12　Insulators

5.2　フード

■ 軽量化

アルミ化及び部品統廃合にて約10 kg軽量化(Fig. 13)し、ドア・トランク等の艤装品や、ボデー上部構造の軽量化等と合わせて、重心高下げ(Fig. 14)、及び前後重量配分の適正化に大きく貢献した。また、歩行者保護性能等の安全性能にも配慮した構造とした。

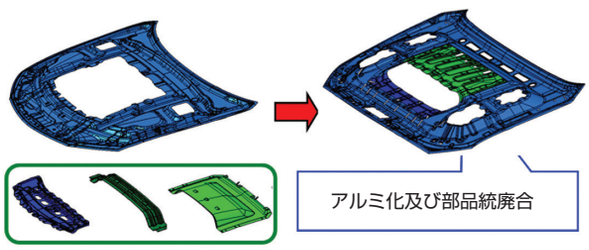


Fig. 13　Hood panel

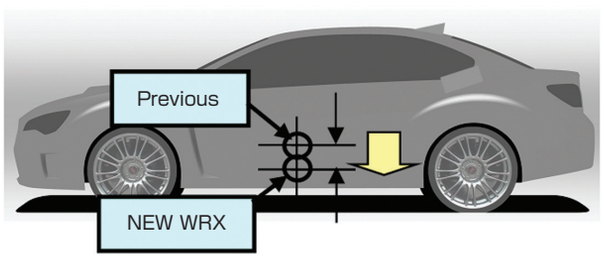


Fig. 14　Center of gravity

■ エアスクープのデザイン及び空力性能向上

エアスクープの高さを下げ、フードと一体感のあるデザインにした。同時に、空気流入効率を向上させるため、開口位置を従来車より前方に設定した。これにより、風の流入量を制御し、効率よく流すことで、車速利用率を上げた(Fig. 15)。

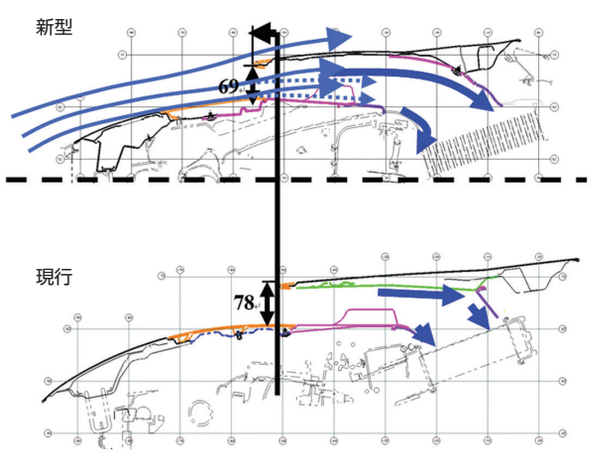


Fig. 15　Air intake for inter cooler

6.　シャシ

6.1　開発の狙い

開発のキーワードである、PURE POWER IN YOUR CONTROLを実現すべく、パワーとコントロールの究極を目指して下記取り組みを行った。

・トレッド剛性を高め（フロントサスで現行車比14%アップ、リヤサスでWRXは現行車比35%アップ、WRX STIは同じく38%アップ）、ハンドリング性能を向上させた。

・ロール剛性を高め（WRXは現行車比43%アップ、WRX STIは同じく24%アップ）、コーナリング時の安定性を向上させた。

・アクティブトルクベクタリングの採用により危険回避速度を向上させた。

また、スポーツマインドを向上させるため、MTシフトレバーの操作性を改善し、Dシェイプハンドル、CVTシフトレバーブーツ、サウンドクリエータ®※（北米STIのみ）を採用した。

6.2　サスペンション

新型WRXでは、車両を意のままに操る愉しさと、誰でも安心して運転することができる限界性能の高さ・安定性を実現するサスペンション開発を行った。

(1) フロントサスペンション

【構造概要】

従来モデルと同様にマクファーソンストラット式サスペンションを採用した（Fig. 16）。

『車両を意のままに操る』ために必要な、操舵に遅れなく車両が反応する応答性、及び回頭性・ライントレース性の向上のため、従来モデルではSTIにだけ設定されていたアルミ製ロアアームとピロボールブッシュを、全車に標準装備とした。ピロボールブッシュのスグリは廃止し、ばね定数を高めた。また、全モデルでフロントクロスメンバを剛性アップし、STIモデルでは、さらに従来モデルのspec.C相当に補剛した。補剛部位は、エンジンマウント取付け部、及び車体取付け部である。

サーキット走行など、高速度域でも安心して運転をできるように、車体のロールを抑える目的でスタビライザ径サイズの大径化、コイルスプリングのばね定数を高めロール剛性を向上させた。

これらの変更により、新型WRXは全グレードで従来モデルのSTI以上の操安性能を実現した。

※サウンドクリエータ®は株式会社マーレフィルターシステムズの登録商標。

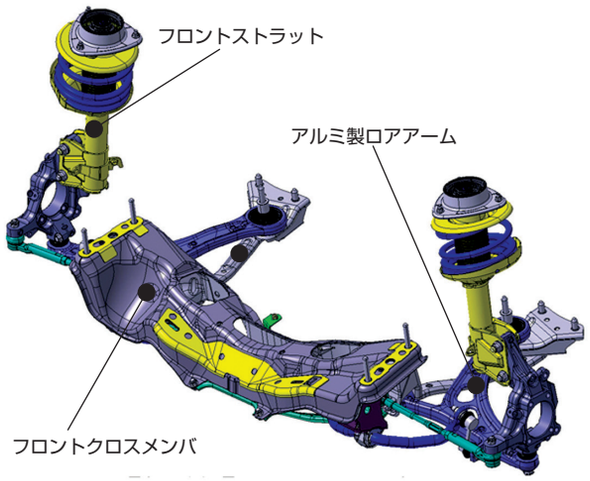


Fig. 16　Front suspension

【ジオメトリ】

ロアアームのリア支点位置を下げ、車両減速時のノーズダイブ量を増やし、ターンインでの車両応答性・回頭性を向上させた。

(2) リヤサスペンション

【構造概要】

従来モデルと同様のダブルウィッシュボーン式サスペンションを採用した（Fig. 17）。

操舵時に、フロントに対してリヤコーナーリングフォースを遅れなく発生させるため、サブフレームブッシュのばね定数を高め、サブフレーム動きを抑えた。また、レヴォーグでも採用しているサポートサブフレームリヤ（サブフレーム後ろ側左右のブッシュと車体外側までを繋ぐサポート）を採用し、車体との取付け部剛性を向上させた。

車両のロールを抑えるため、スタビライザ径サイズを大径化し、コイルスプリングのばね定数を高め、ロール剛性を向上させた。

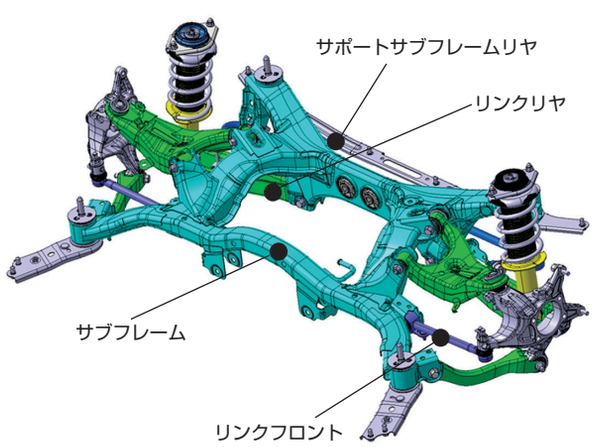


Fig. 17　Rear suspension

【ジオメトリ】

操舵時のリヤサスペンション追従性を高め、操舵初期からコーナーリングフォースを発生するように、イニシャルトーインをつけた。

また、旋回時の車両安定性向上のため、リンクフロントの車両内側取付け点位置を、従来よりも下げて、ロールステアを見直し、バンプトーイン量を適正化した。

(3) ダンパ

フロントストラットは、トレッド剛性を高め、操舵応答性を向上させるため、新型STIモデルは、従来から採用している倒立式ストラットを標準装備とした。その他モデルは従来通り正立式複筒ストラットを標準装備としているが、ストラット外筒の板厚を増やしトレッド剛性を向上させた。

リヤダンパはサスペンションの微小なストロークでも効率よく作動させて操縦安定性・乗り心地を向上させるため、リンクリヤとの取り付け点を車両外側に移動し、従来よりもレバー比を改善した。

新型STI・WRX S4モデルには、スポーツパッケージ車が設定されており、倒立式のBilstein製ストラットを採用している。操安性能と乗り心地性能を高次元で両立するため、スポーツパッケージ車専用のチューニングを行っている。

6.3 パワーステアリング

(1) 電動パワーステアリング

2.0DIT搭載車に電動パワーステアリングを新設定。約2%の燃費向上、及びきめ細かなモーター制御により、自然な操舵フィーリングを実現した(Fig. 18)。

ハイグリップタイヤ設定に伴い、モーターと減速機を高出力化対応した上でアシスト特性を最適化し、ドライバの思い通りに応答する、安心感のあるスポーティーな走りを実現した。

ステアリングギヤボックスのマウントブッシュバネ定数を大幅アップ(レガシィ比230%)し、取付け剛性を高めた。これにより微小舵応答性を向上させ、ダイレクトな操舵フィーリングを実現した。

アイサイト装着車には、アクティブレーンキープ対応制御ロジックを追加し、安全性と快適性を高次元で両立し大幅な商品性向上を図った。

(2) 油圧パワーステアリング

WRX STI全仕向けに、クイックステアリングギヤを採用し、常用域の回頭性を向上した。アシスト特性を最適化し、ドライバの思い通りに応答する安心感のあるスポーティーな走りを実現した(Fig. 19)。

ステアリングギヤボックスのマウントブッシュバネ定数大幅アップ(現行車比400%)、及びトーションバー剛性アップ(現行車比125%)により、微小舵応答性を向上させダイレクトな操舵フィーリングを実現した。

国内向けには、現行Spec.C専用の流量UPポンプASSYを採用し、急操舵時のアシスト追従性を向上した。

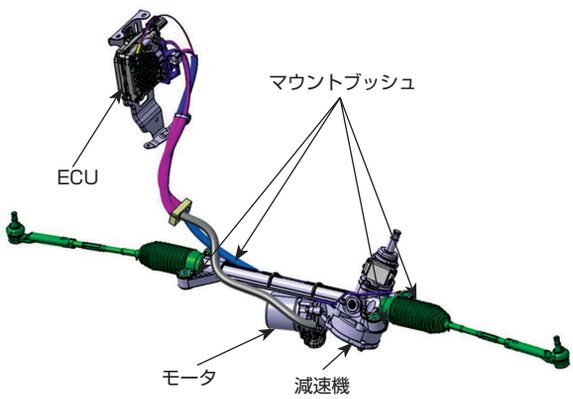


Fig. 18 Electric power steering system

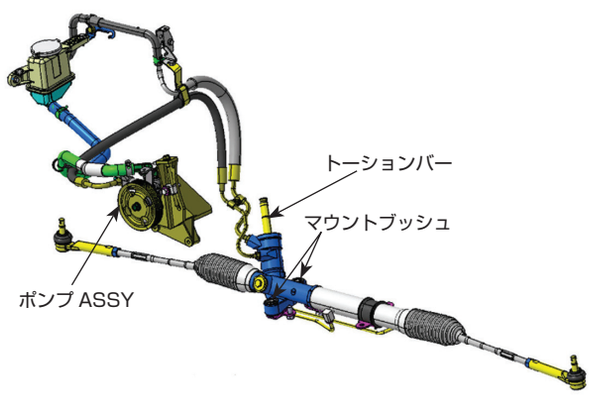


Fig. 19 Hydraulic power steering system

6.4 タイヤ&ホイール

(1) タイヤ

転がり抵抗、乗り心地を悪化させることなく、走りの性能を大幅にアップさせたタイヤを新規開発し採用した(Table 2)。

Table 2 Tire size

	タイヤ	235/45R17	225/45R18	245/40R18
国内	WRX STI			○
	WRX S4		○	
北米・欧州一般	WRX	○		
	WRX STI			○

(2) ホイール

全車P.C.D.114.3を採用し剛性を向上させた。さらに形状を最適化することで剛性を大幅に高めながら軽

量化し、操縦安定性・乗り心地を向上させた。また、空力性能も考慮したデザインとし、燃費の向上にも寄与している（Table 3, Fig. 20）。

Table 3　Wheel specifications

		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
	ホイール	17 × 8J 鋳造 ダークガンメタリック	18 × 7 1/2J 鋳造 ダークガンメタリック	18 × 7 1/2J 鋳造 ハイラスター	18 × 7 1/2J 鋳造 ダークガンメタリック	18 × 8 1/2J 鋳造（BBS） ハイラスター
国内	WRX STI				○	S グレード
	WRX S4		○	S グレード		
北米・欧州一般	WRX	○				
	WRX STI				○	LTD（北米） OP（欧州・一般）

(a) 17 × 8J　鋳造
ダークガンメタリック

(b) 18 × 7 1/2J　鋳造
ダークガンメタリック
(c) 18 × 7 1/2J　鋳造
ハイラスター

(d) 18 × 8 1/2J　鋳造
ダークガンメタリック

(e) 18 × 8 1/2J　鍛造
（BBS 製）ハイラスター

Fig. 20　Aluminum wheel

(3) センターキャップ

STIは現行同等のSTIキャップを採用し、STIモデルの特別感を演出する。その他モデルは、新開発のセンターキャップを採用し、意匠の向上を図った。また、本製品をFHI標準品として今後の開発車へも順次展開していき、SUBARUブランドとしての統一感を図る（Fig. 21）。

6.5　ブレーキ

(1) マスタシリンダ＆ブースタ

■ 高応答性ブースター

高応答性バルブ構造等の採用により、従来から定評のあるペダル踏み込みに応じたリニアな利き味を活かしながら、剛性感を向上。より応答性を高めて、とっさのブレーキ作動時でも高いブレーキ性能を発揮し、安心感のあるブレーキを実現した。

ペダル踏み込み時にブースタへ大気を供給する流路抵抗を現行車比20%削減することで、ペダル踏み込み時の応答性を格段に向上させた（Fig. 22☆部が主な変更部位）。

		(a)		(b)	
	キャップ	クリアタイプ（六連星）		クリアタイプ（STI）	
国内	WRX STI			○	S グレード
	WRX S4		○		
北米・欧州一般	WRX	○			
	WRX STI			○	LTD（北米） OP（欧州・一般）

(a) センターキャップ
クリアタイプ
（六連星）

(b) センターキャップ
クリアタイプ
（STI）

Fig. 21　Center cap

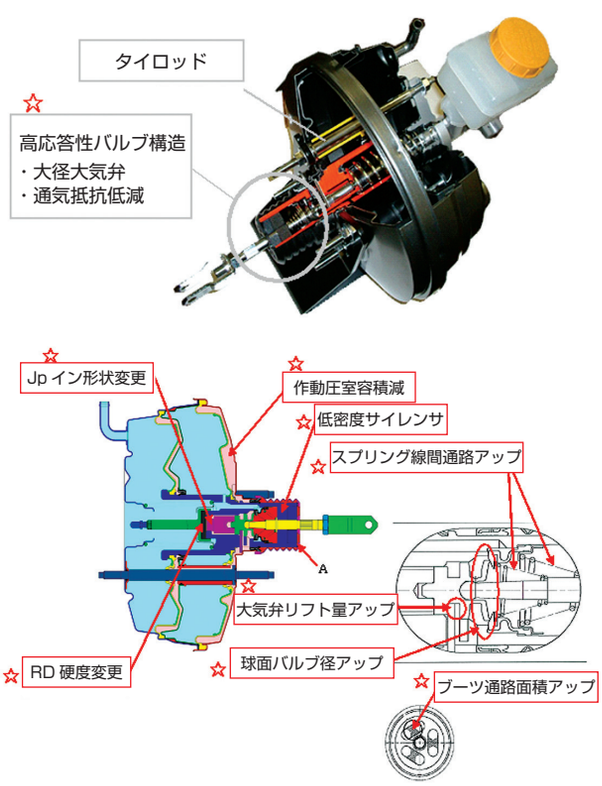


Fig. 22　Master cylinder & booster

■ ブースタ特性変更

車格、キャラクタに合わせ、ブースタ特性をチューニング。WRX STI・WRX共に新開発の1インチマスタシリンダの採用と合わせ、意のままに操れるコントロール性と剛性感、効き味を高いレベルでバランスさせ、クラストップレベルのブレーキ性能を実現した。

■ マスタシリンダサイズ変更

ペダル踏込時の剛性感、ブレーキフィーリング向上のため、マスタシリンダサイズを15/16インチから1インチにサイズアップした。

(2) フロントブレーキ

17インチブレーキを採用し、パッドクリップにPTFEコーティングを追加することで、ブレーキ引き摺りを現行車比で10%低減させた。

(3) リヤブレーキ

17インチ EPB(電動パーキングブレーキ)内蔵ブレーキシステムを採用した。EPBシステムをキャリパに内蔵し、モータ駆動によりブレーキパッドでローターを固定し、パーキングブレーキ保持力を確保する。また、EPBをキャリパに内蔵することで、静粛性と応答性を向上させた(Fig. 23)。

パーキングスイッチ操作により、モータ駆動し、パーキング保持力を発生、解除する。

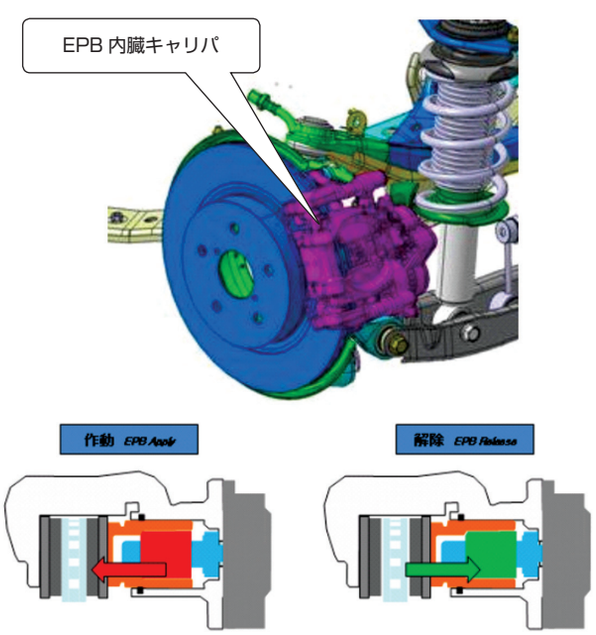


Fig. 23　Electric parking brake system

EPBの機能は以下の通り。

■ アクセル連動機能

ドライバの発進操作を判断し、EPBを自動的に解除する。

■ ヒルホールド機能

登坂時、車両を停車した際に、自動的にEPBを作動させることで、登坂停車時のブレーキ操作低減と坂道発進時のずり下がりを防止する。

■ アイサイト追従クルコン時の停止保持

追従クルコン時のEPBを作動・解除させることで、渋滞時のブレーキ操作低減と車両の停止保持し、安全性を向上する。

6.6　VDC

HU(ハイドロユニット)は次世代品を採用し小型化を実現した。危険回避時の限界性能を向上させるべく、ダブルレーンチェンジや18 mピッチスラロームの侵入・通過速度を向上させた。

VDCを全車に標準装備し、走行時の安全性を大きく底上げした(Fig. 24)。

■ 各種制御

車両の挙動を常時チェックしABS(アンチロック制御)、TCS(エンジン制御、ブレーキLSD制御)、VDC(横滑り防止のためにエンジンとブレーキを制御)をフレキシブルに制御。介入タイミングの最適化により高い安全性を確保する制御とした。

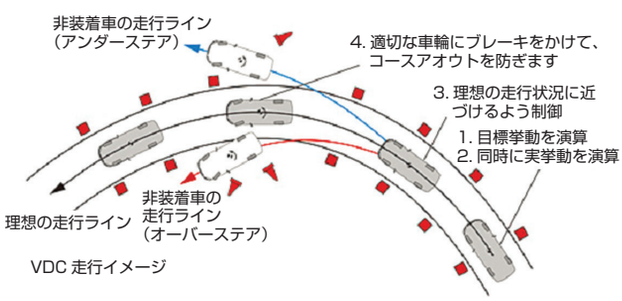


Fig. 24　VDC operation

■ マルチモードVDC

全車にマルチモードVDCを採用し、多様な走行条件に対応させることができる。

・OFFモードを利用することで、VDC制御とTCS制御をキャンセルすることが可能。ぬかるみや雪道の脱出やサーキット走行などに有効である。

・TRACTIONモードを利用することでVDC・TCS制御のエンジントルク抑制機能のみキャンセルすることが可能。ブレーキ制御は残存しているため、安全性を残しつつエンジンパワーを最大限に活かしたドライブが可能であり、サーキット走行などに有効である。

■ アクティブトルクベクタリング

アクティブトルクベクタリングを新規導入し、車両の限界旋回性能を向上させた。

Fig. 25にアクティブトルクベクタリングによる前輪制御の様子を示す。旋回内輪を制動することにより、旋回外輪側の駆動力による車両旋回性能を相対的に高めている。

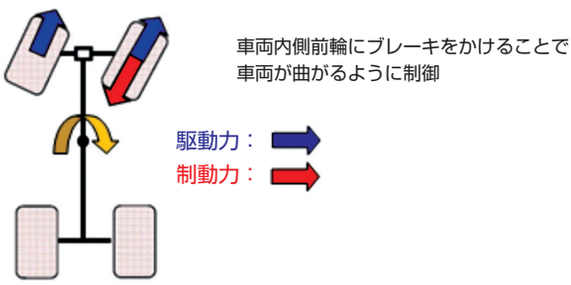


Fig. 25　Active torque vectoring

6.7　吸気システム

走りの愉しさをより高めるために、吸気サウンドを演出するデバイス（サウンドクリエータ®※）を新規開発し、中高回転域における力強い加速感を演出した（Fig. 28）。北米向けWRX STIに装備する。

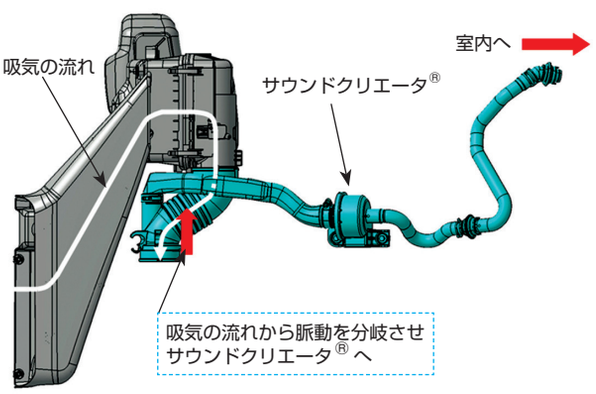


Fig. 26　Air intake system

6.8　排気システム

従来車同様、ツインマフラーとしテールパイプ4本出しを踏襲。車両後方床下、左右に配置した。テールパイプは従来車比約45 mm延長し、後方からの外観見栄えの向上を図った（Fig. 27）。

6.9　エンジンマウント

エンジンマウント中間板位置の変更およびバネ特性を最適チューニングすることで、パワーユニットの挙動をコントロールし、操舵に対する応答性を向上（現行WRX STI比20%）させた（Fig. 28）。WRX STIに装備される。

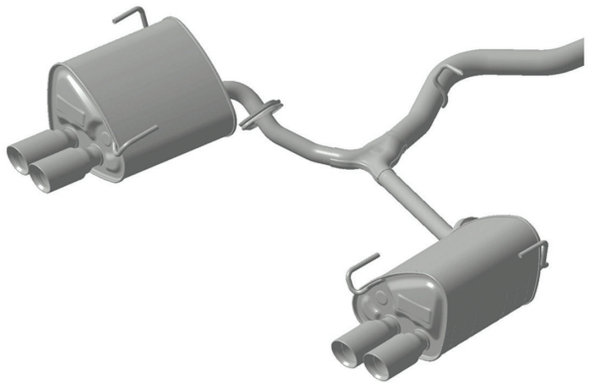


Fig. 27　Muffler

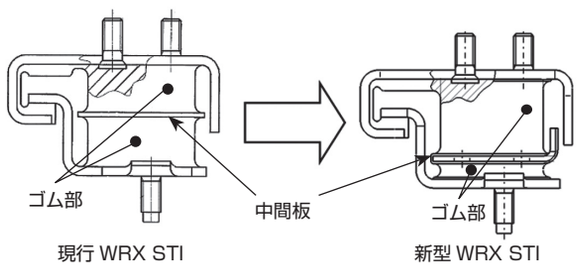


Fig. 28　Engine mounting

7.　外装

7.1　ヘッドランプ

(1) LEDヘッドランプの採用

従来のHIDに替えて、省電力でより昼間に近い白色光を得ることができるLEDヘッドランプを採用した（Fig. 29）。

Fig. 29　LED head lamp

■ 配光性能向上

プロジェクタとパラボラリフレクタの組み合わせによる独自の光学系によって、HID並の明るさを確保し、遠方視認性と路肩視認性を両立した均一でムラのない配光を実現した（Figs. 30, 31）。

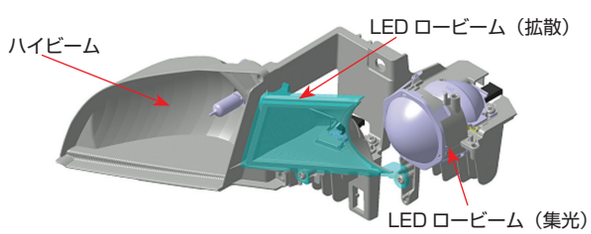


Fig. 30　LED head lamp optics unit

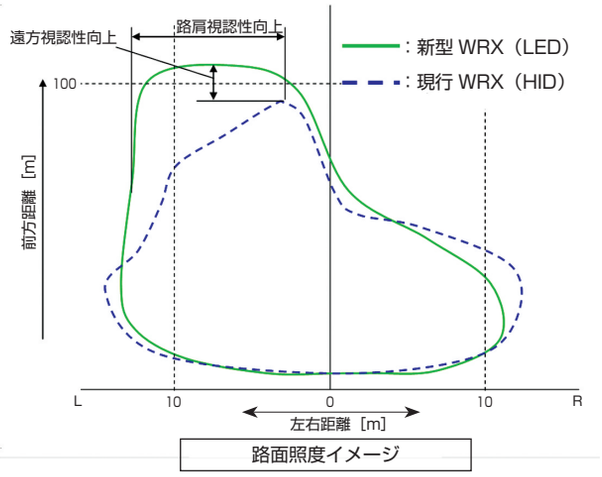


Fig. 31　Road surface illuminated image

■ 消費電力低減

LEDヘッドランプとハロゲン及びHIDの消費電力比較をTable 4に示す。HID比約40%、ハロゲン比約60%の消費電力低減を実現した。

Table 4　Power consumption

	LED	ハロゲン	HID
ロービーム	21.6W × 2	55W × 2	35W × 2
ハイビーム	21.6W × 2 ＋ 60W × 2	55W × 2 ＋ 60W × 2	35W × 2 ＋ 60W × 2

(2) コの字シグネチャーポジションランプ

ヘッドランプの共通モチーフであるコの字ポジションランプを採用した。特にLEDヘッドランプはポジションランプの光源にもLEDを採用することによって、細幅かつ均一な発光を実現している(Fig. 32)。

LEDヘッドランプ　　ハロゲンランプ

Fig. 32　Positioning lamp

7.2　フロントバンパ、フロントグリル（ノーズコーン）

ノーズコーン構造の採用により、フロントグリルを起こしてヘキサゴンモチーフを強調し、立体的で力強い造形を実現した。また、フロントバンパコーナー部に空力性能を向上させる形状(エアロコーナー形状)を織り込んだ。

フォグカバーは大型タイプを採用し、ハイパフォーマンス感を表現した(Fig. 33)。

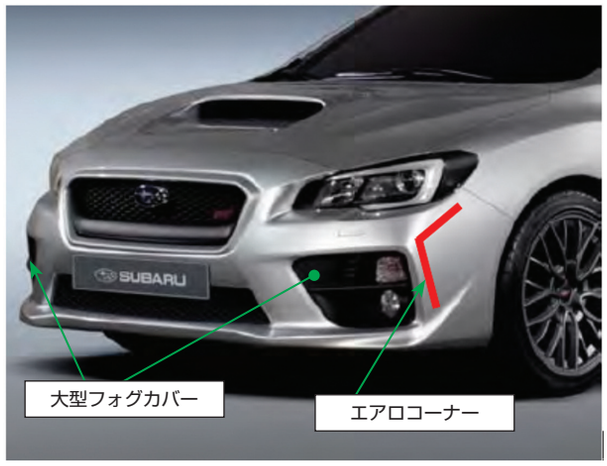


Fig. 33　Bumper & fog cover

フロントグリルは、市場ニーズに合わせ、北米用、日本・欧州用の2種類を設定した(Figs. 34, 35)。北米用は、ウイングモチーフを設定し、さらに幾何学シボでモチーフを強調した。日本・欧州用は、全面をピアノブラック塗装とすることでヘキサゴンモチーフをより引き立たせる造形としている。

またフロントグリルの仕様差により、冷却性能、衝突性能等に影響が出ないよう配慮した。

Fig. 34　STI for North America

Fig. 35　WRX for Japan & Europe

■ 脚部歩行者保護

ノーズコーン構造により生じたスペースを活用し、歩行者保護用のエネルギー吸収(E/A)材(Fig. 36 A部)を配置することで、大腿部への加害性を低減した。

Fig. 36に示すA～CのE/A材を適正配置し、各部材の抗力を最適化することで脚部の歩行者保護性能を向上させ、法規対応のみでなく、情報公開もトップの性能を獲得できる構造としている。

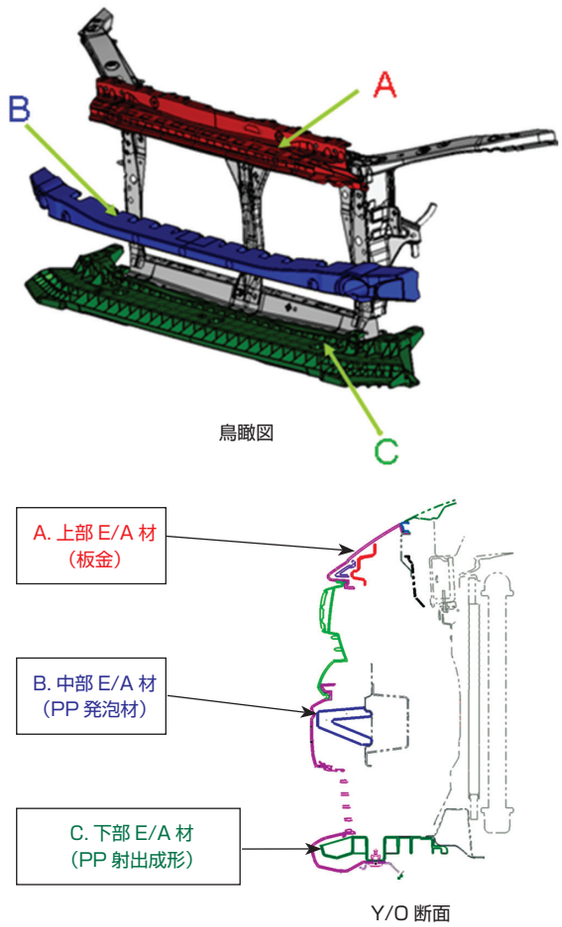


Fig. 36　Energy absorbing structure

7.3　サイドドア及びウインドウ

■ サイドドア閉まり音向上

乗降時のドア閉まり音を下記アイテムにより重厚感持たせることで、上質感を演出する。

・パネル板厚を下げて軽量化しつつ、ダンピングシートの貼り位置を最適化することで、ドア閉まり音を重低音化した(Fig. 37)。

・ドア開口部のボデー側ウエザストリップ断面を最適化することで、ドア閉まり音の収束を早め、より質感の高い音になるようにした(Fig. 38)。

■ サイドドア 衝突性能向上

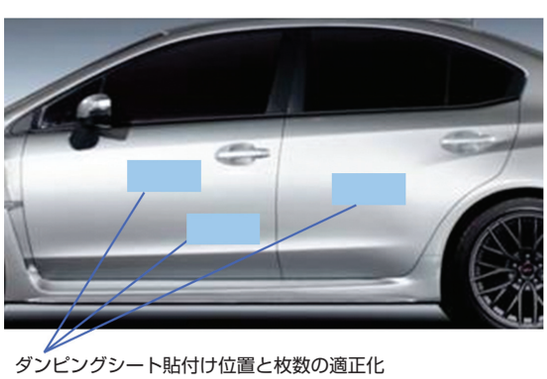


Fig. 37　Damping sheet

Fig. 38　Weather-strip

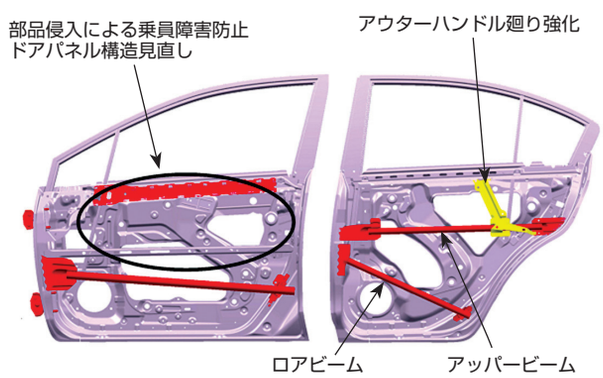


Fig. 39　Side door structure

フロントドアは衝突時のドアパーツ類室内侵入による乗員傷害を軽減させるため、ドアパネルを新規設計した。

リアドアには衝突時の進入量を抑制するため、従来車同様にアッパービームを追加した。

更なる衝突性能向上のため、変形モードをコントロールするリインフォースメントを追加することで、障害値を低減させた。また、アウタハンドル取付け面廻りを強化することで、衝突時のドア開放ロバスト性を向上し、より市場に即した安全性を提供している(Fig. 39)。

7.4　サイドシルスポイラ及びフェンダガーニッシュ

(1) サイドシルスポイラ

前後ホイールアーチ間を一体成形品でつなぐことで、骨太で安定感のある造形としている(Fig. 40)。

断面の上端を削ることで乗降時の足の当りに配慮した設定としながら、下端は外側に張り出す事で、ボデーへの石・泥跳ねを防ぎつつ、抑揚のある造形を実現、更に従来設定していた、リヤクォータ廻りのチッピングプロテクタ(透明フィルム)も全廃し、すっきりとした外観とした(Fig. 41)。

Fig. 40　Side sill spoiler (outer view)

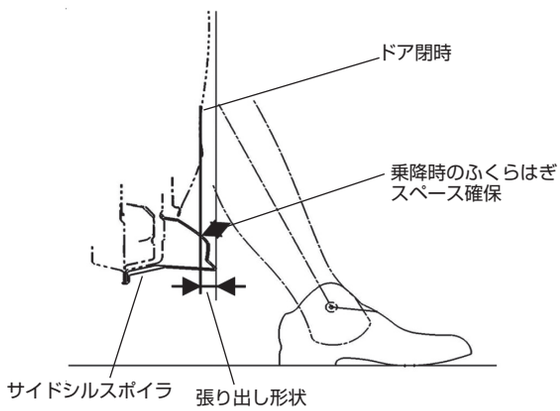


Fig. 41　Side sill spoiler（section view）

(2) フェンダガーニッシュ

・フェンダ下部にモールディング内蔵ガーニッシュを設定した。ガーニッシュ後部にメッシュを施した開口部を設け、高性能、スポーティーさを強調する造形とした。

・モールディングはFig. 42に示すメッキ仕様とした。

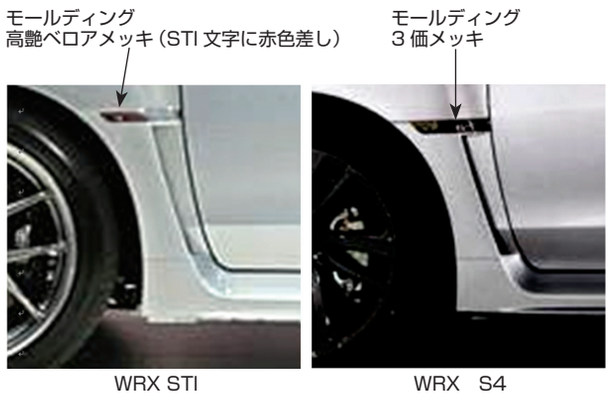
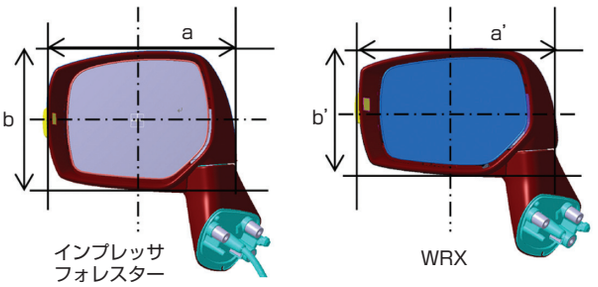


Fig. 42　Fender garnish

7.5　ドアミラー

ドアミラーは、標準車高かつスポーティーな造形に合せて、縦横比を見直し、よりスポーティーで一体感のある外観とした(Fig. 43)。

ドアミラー下面にウェルカムランプを搭載し乗降時のおもてなし感を演出した(Fig. 44)。



縦：167 mm (b) ⇒151 mm (b') 横：231 mm (a) ⇒241 mm (a')

Fig. 43　Door mirror

Fig. 44　Welcome lamp door mirror

7.6　リヤスポイラ

迫力ある造形を具現化し、インナミラー視界、室内置きハイマウントストップランプ視認性、空力性能等にも配慮した構造,レイアウトとしている。

(1) 大型リヤスポイラ

現行STIに対し0.4 kg軽量化し、車両の低重心化、ヨーモーメント低減に寄与している。

更に、位置、形状を最適化することで、リフトを抑えつつCd値の悪化を0とし、STIの特徴的な迫力ある造形を実現している(Fig. 45)。

Fig. 45　Rear spoiler for STI

(2) 小型リヤスポイラ

現行車に対し、新たにリップタイプのリヤスポイラを開発した。形状・取付け方法を工夫することで、

ラインでの取り付け作業性を確保しつつ、実用剛性、後方視界を確保した軽量スポイラとしている。本スポイラ装着によりCd値を下げることが可能である(Fig. 46)。

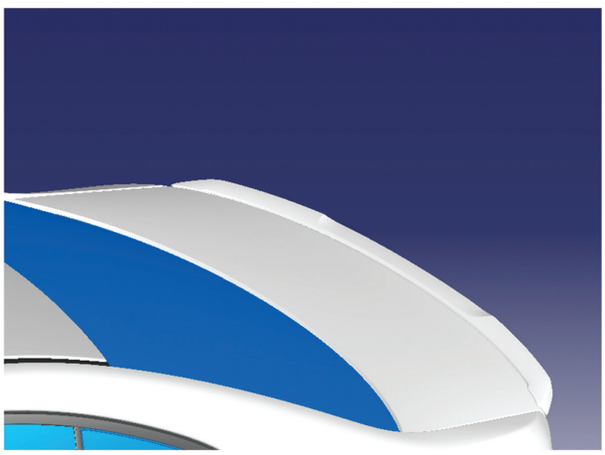


Fig. 46　Lip type rear spoiler

7.7　フードグリル

インタークーラー冷却効率を最大とするため、フード上にフードグリルを設定した(Fig. 47)。

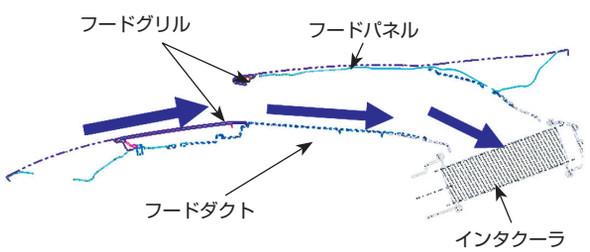


Fig. 47　Hood duct

・フードグリルをフード開口部へのはめ込みタイプにすることで、フードと一体感のある造形とした。
・空気流入効率向上のため、グリル開口位置をフード前方に設定、かつ開口高さを低く抑えることで視認性を確保しつつ、流入量をコントロールしている。

頭部歩行者保護性能にも配慮した構造としている。

7.8　リヤランプ

(1) リヤコンビランプ

点灯速度、省電力に優れたLEDをストップ＆テールランプの光源に採用した。外形は内部構造の最適化により、現行WRX STI品に対して約30 mm薄型化し、ワイド＆ローなデザインを具現化している。光り方はヘッドランプと同様に、コの字シグネチャーを均一な光で表現している(Fig. 48)。

Fig. 48　Rear combination lamp

(2) ハイマウントストップランプ

ハイマウントストップランプは、現行車(バルブ式)に対して、高輝度で点灯速度の速いLEDを採用することで、被視認性を向上させると共に、省電力化により燃費向上に寄与している。

7.9　フロントワイパ及びウォッシャ

■ 軽量化

小型ワイパモーターの採用により、現行車比約25%の軽量化を実現している。また車体マウントゴムの硬度最適化により、キャビンの静粛性を向上している(Fig. 49)。

■ 外観質感の向上

国内・欧州向けにデザインブレードを採用し、外観質感を向上させている(Fig. 49)。

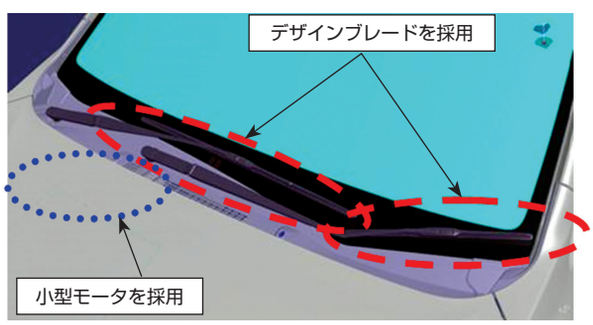


Fig. 49　Front wiper

■ オートワイパ

ガラス表面に付着した水滴を検知して、ワイパを自動的に作動させ、利便性を向上させている(Fig. 50)。

■ ヘッドランプウオッシャ性能向上

第4世代ノズルを採用することで、配光回復率の向上、及び1回あたりウォッシャ噴射量の低減によるウォッシャ液の使用量低減等の効果が得られる(Table 6)。

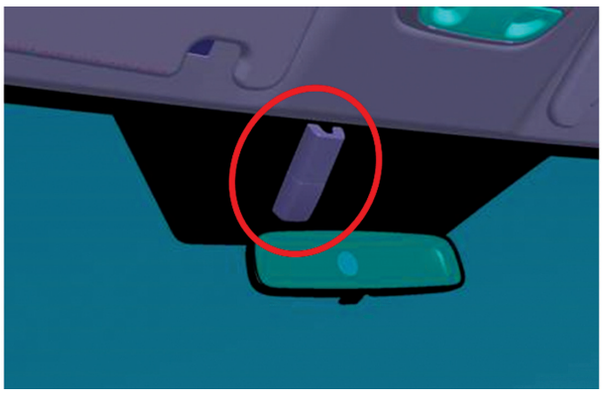


Fig. 50　Auto wiper sensor

Table 6　Window washer

ノズル	第３世代		第４世代	
TEST POINT	50 V	50 R	50 V	50 R
配光回復率 (%)	70.4	73.8	74.7	77.8
噴射量	66 cm^3/s		39 cm^3/s	

7.10　アンテナ

シャークフィンタイプを採用。ポールアンテナに対して外観向上、空気抵抗・風切り音低減を狙った。ボデー色対応により、車両との一体感を演出した(Fig. 51)。

Fig. 51　Shark fin antenna

8.　内装

8.1　内装質感向上の取り組み

WRXらしいスポーティーかつ質感の高い内装を目指し、開発に取り組んだ。

■ カーボン調パネルやシルバーベゼル、ステッチなどの加飾

インパネセンターパネル、インパネオーナメントは、スポーティー感を演出する、水圧転写によるカーボン柄を採用した。シフト周りのパネルや外側の空調吹き出し口、エアコン操作ダイヤルに、シルバー加飾を採用し、高級感を演出した。特にSTIには“スポーティーな本物感”を演出できるステッチを、シートやアームレスト部のみならず、ドアトリムサイド部にも採用した(Fig. 52)。

Fig. 52　Instrument panel

Fig. 53　Combination meter

Fig. 54　Multi-funcution display (boost meter)

■ メータの質感向上

メータは、燃料計・水温計も針で表示する4連メータとし、WRX伝統の赤照明のルミネセントメータとした。立体感のある文字盤を実現するため、成形工程を追加した。

中央の液晶画面は3.5インチの高精細カラー液晶を採用した。“デジタルスピード計”や“SIドライブ”や“DCCD”の設定状況など、スポーティーな走行に必要な情報の瞬読性を高めた(Fig. 53)。お客様乗車時のドア閉を検知し、WRXのサイドビューを描画する“ウェルカム演出”も採用した。

■ マルチファンクションディスプレイの機能向上

4.3インチの高精細カラー液晶をインパネセンタに採用した。“オーディオ(輸出のみ)”、“燃費”、“時計・外気温”“バックビューモニタ(輸出のみ)”などのコンテンツを表示する。

WRXらしいコンテンツとして、“大型ブースト計”

を採用した。メータと同じ赤・白のモチーフの意匠とし、“ピークホールド機能”やアクセル開度同時表示を採用し、スポーティー感を演出した(Fig. 54)。

8.2　ユーティリティの向上

WRXは伝統的に、“スポーティーな走り”と“ユーティリティ”の両立がお客様に受け入れられており、新型でも開発に注力した。

■トランク容積の拡大

トランク容量はVDA法で旧型車を40リットル超える460リットルを確保した。積載できるゴルフバック(9インチサイズ)も3から4個へと増やせた。

リヤシートを60：40分割可倒機構とし、さらに長尺の荷物の積載も可能とした(Fig. 55)。

Fig. 55　Utility

■ ウェルカムランプの採用

乗車／降車時にロービーム(クリアランスランプを含む)を点灯させて、お客様の自宅から車両までの視界と安全確保を行う機能を採用した(北米向け)。乗車時は、周囲が暗く、ライティングスイッチがAUTOの時、アクセスキー／リモコンキーから開錠した際に点灯する。降車時は、周囲が暗く、オートライトでヘッドランプ点灯中にイグニッションをオフすると点灯継続する。

8.3　シート

WRXのスポーティーな走りを支える新開発のスポーツシートは、本号別報[(2)]に詳細を掲載する。

9.　操作系

9.1　ステアリング廻り

(1) ステアリングホイール

ホイールの小径化、Dシェイプ形状、シルバー大型ベゼル、及びグリップ革水平分割を採用し、レガシィやインプレッサとの「別格感」から得られる所有する悦びの提供や見た目のスポーティー感・ワクワク感の具現化等、大幅に商品性を向上した(Fig. 56)。

グリップ断面形状の拡大及びグリップ材質を低硬度のものに変更、ディンプル加工革を部分的に採用(WRXは除く)したことで、握り心地及び操作性を向上した。

WRX STIには、STI文字入りサテンメッキ大型ベゼルを採用し、質感・スポーティー感を向上させ、特別感を持たせた。

エアバックモジュールとの合わせ方法を変更し、分割部の見え方を変更し質感を高めた。

ステアリングホイール固定式パドルシフトを採用し、利便性・操作性を向上した。

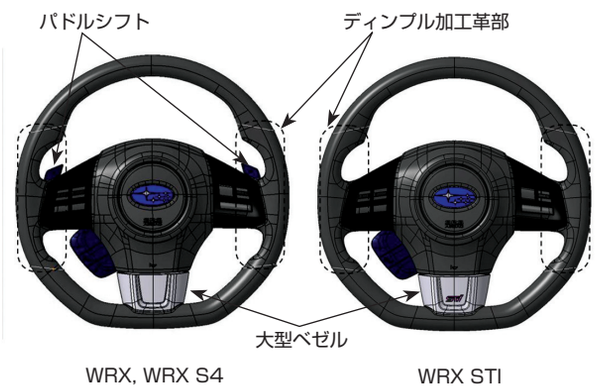


Fig. 56　Steering wheel

(2) ステアリングコラム

ステアリングコラムのチルト調整量を拡大し、ドライビングポジションの設定自由度を向上した(Fig. 57)。

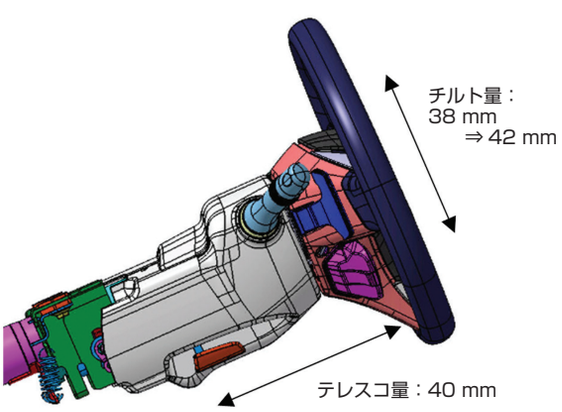


Fig. 57　Steering column

9.2　シフト廻り

(1) スポーツリニアトロニック車

WRXにふさわしい上級感ある内装表現として、シフトブーツ式を採用した。ツヤ黒パネルにレザーブーツの足元を引き締めるクロームメッキリングをあしらった。

ブーツとグリップにはWRX専用の赤ステッチを採用しスポーティーさを表現した。

北米向は、夜間照明と連動して点灯するポジション位置ポインタを設けた(Fig. 58)。

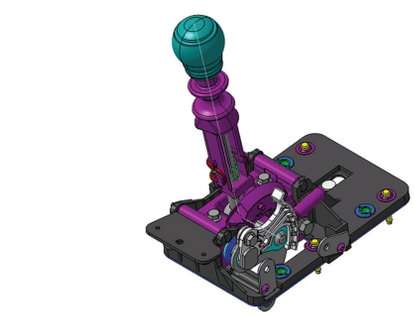
(2) WRX　6MT車

ギヤシフトレバー ASSYのパターン6MT化を採用し、WRXにふさわしい、セレクト方向にクリック機構を設けたショートでスポーティーな操作性を演出した(Fig. 59)。

(3) STI 6MT車

STIのスポーティーで上級感ある内装表現としてノブ加飾パネルを赤色新設した。

Fig. 58　Select lever



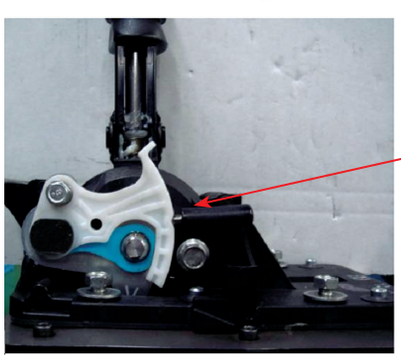


Fig. 59　Shift lever for WRX 6MT

10.　安全

10.1　衝突安全

(1) 前面衝突

衝突エネルギーの吸収のため、キャビン周りの構造を強化しつつ、キャビン骨格には440 MPa ～ 980 MPa級の高張力鋼板を使用し、乗員の空間を確保した(Fig. 60)。

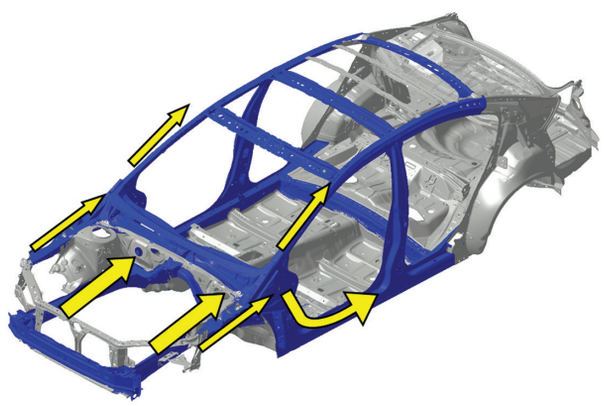


Fig. 60　Frontal collision

(2) 側面衝突

キャビンの変形を最小限とするため、主要骨格であるセンターピラーおよびサイドレール・サイドシルには440 MPa ～ 980 MPa級の高張力鋼板を使用した。また、ドアビームには1470 Mpa級の鋼管を使用し、衝突時のドア侵入を防ぐ構造とした(Fig. 61)。

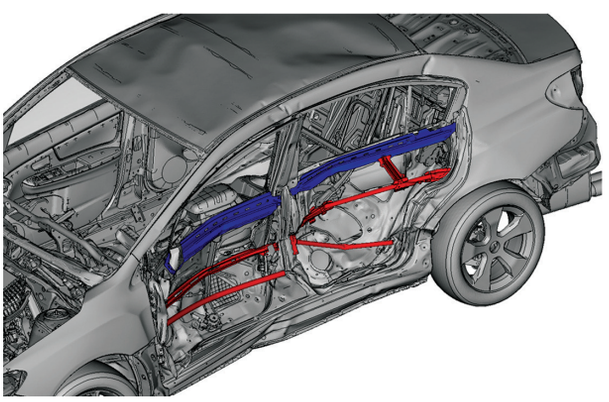


Fig. 61　Side collision

(3) 歩行者保護(頭部および脚部)

車体およびエンジンルーム内の構造を見直し、歩行者保護性能を向上させた。フード後端部およびフェンダ取付部に衝撃吸収構造を採用し、歩行者の頭部へのダメージを軽減した。また、フロントバンパの内部にも3つの衝撃吸収部材を採用し、脚部へのダメージを軽減した(Figs. 62, 63)。(フレックスインパクタ対応)

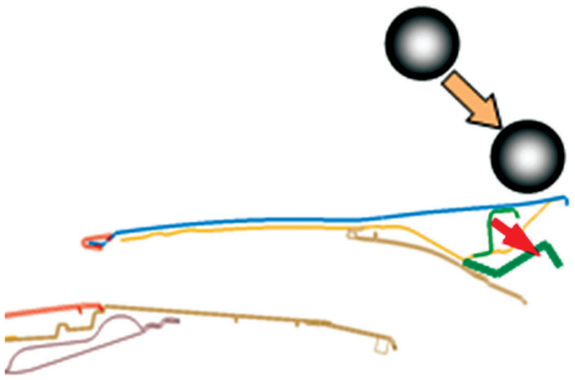


Fig. 62　Pedestrian protection (head)

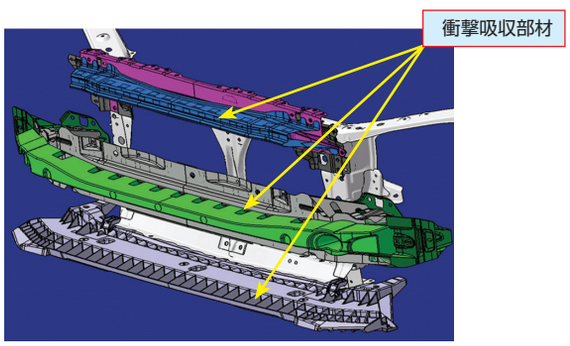


Fig. 63　Pedestrian protection (leg)

10.2　エアバッグ

運転席・助手席SRS エアバッグ、ドライバの膝部を守るSRS 運転席ニーエアバッグ、側面衝突用のSRS サイドエアバッグ、SRS カーテンエアバッグ、合計7つのエアバッグを標準装備した(Fig. 64)。

Fig. 64　Air bag

運転席SRSエアバッグは、インフレータをラバーでフローティングさせるダイナミックダンパ構造を採用した(Fig. 65)。走行時に発生するステアリング振動を低減する効果がある。

10.3　むち打ち対応

フロントシートはスポーティー形状を採用したが、ヘッドレストを別体化し、むち打ち安全性能の向上を図った。シートバックには、追突時の乗員の挙動をコントロールするエネルギー吸収構造を採用し、むち打ちの低減を図った。詳細は本号別報[(2)]に記載する。

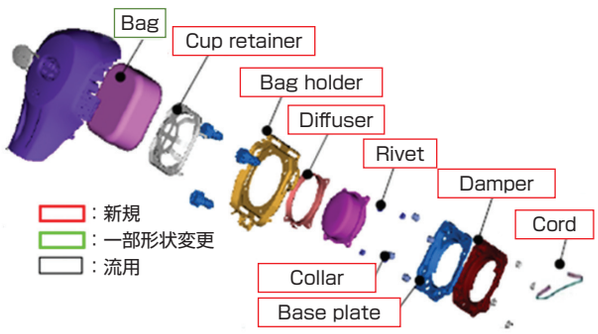


Fig. 65　Inflator dynamic damper

10.4　シートベルトリマインダ

国内向け車については、旧型車で採用していた運転席に加え、助手席・後席にも採用し、シートベルトの装着率の向上を図った。

10.5　予防安全

予防安全装備としてアイサイトver3を採用した。アイサイトver3については、本号別報[(3)]にて解説しているため、ここでは割愛する。

11.　エンジン

11.1　開発の狙い

「Pure Power in Your Control」のコンセプトワードに則り、WRXにはレガシィ向けエンジンFA20DITを改良し搭載。大人の目に適う馬力と燃費の両立したエンジンとした。一方WRX STIには、スバル最高峰のスポーツパワーユニットEJ20ハイパワーターボ(日本仕向)、EJ25ハイパワーターボ(日本仕向以外)を搭載。車体の進化にあわせ大幅に軽快感を向上させる制御を加え、圧倒的なパフォーマンスと走りをお客様に提供できるパワーユニットとした。

11.2　FA20DITエンジン

先代STI A-LINE(日本仕向)及びWRX(日本仕向以外)のEJ25ターボの後継ユニットとして、環境時代におけるスポーツセダンに見合ったパワーユニットとした。出力性能は従来と同等ながら環境性能は大幅に向上させた。また、レガシィ向けのFA20DITに対し、限界回転数をMT車で6700 rpm、リニアトロニック車で6500 rpmとそれぞれ600 rpm、および400 rpm向上させ、より高回転まで気持ちよく回りスポーティーな走りを愉しめるようにした(Fig. 66)。各仕向けの

ガソリン・排出ガス規制に応じ適合を行い、グローバルのニーズにも応えている。

限界回転数の引き上げに伴う変更は以下の通り。

・バルブスプリング強化
・チェーンガイド延長(Fig. 67)
・ブローバイセパレータ形状最適化(Fig. 67)

各仕向け毎の性能はTable 6、及びFig. 68に示す。

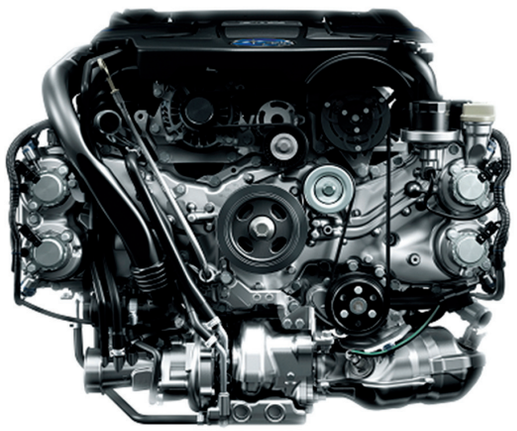


Fig. 66　FA20DIT engine

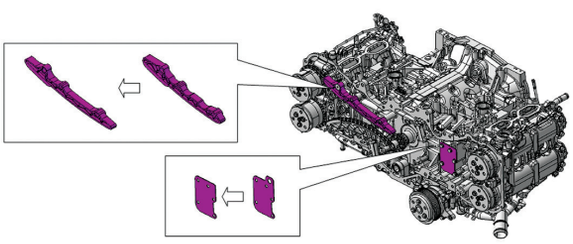


Fig. 67　Chain guide and cover of separator

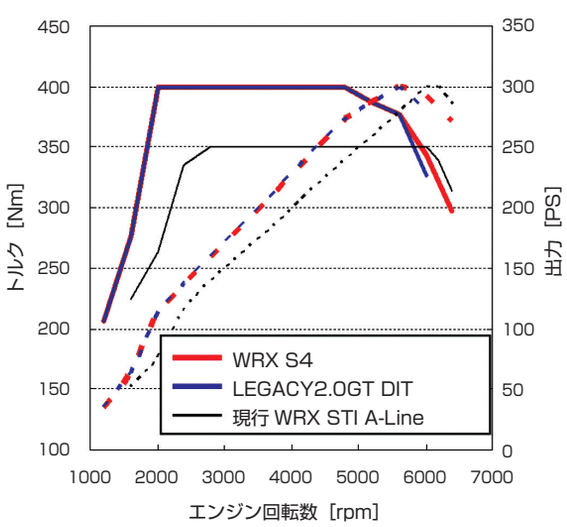


Fig. 68　Engine power characteristics (domestic model)

Table 6　Engine specifications

使向地	エンジン		新 WRX	現行 WRX
国内	S4/2.0GT	最高出力 kW (PS) rpm	221 (300) 5600	221 (300) 6200
		最大トルク N (kgfm) rpm	400 (40.8) 2000～4800	350 (35.7) 2800～6000
北米	WRX	最高出力 kW (PS) rpm	268 (271) 5600	265 (269) 6000
		最大トルク N (kgfm) rpm	258 (35.7) 2000～5200	244 (33.7) 4000
欧州	WRX	最高出力 kW (PS) rpm	197 (268) 5600	195 (265) 6000
		最大トルク N (kgfm) rpm	350 (35.7) 2400～5200	343 (35.0) 4000

環境対応性能は、国内仕向を例に挙げると、排出ガスを、平成17年基準値50%低減から同75%低減に、燃費を、9.0 km/l から13.2 km/lに、それぞれ大幅に向上させた。

また、バッテリの充電状態を適正に管理するためにバッテリの充放電電流、電圧、温度を計測するバッテリセンサを採用した(Fig. 69)。各種計測データはエンジンコントロールユニットに送信され、エンジンコントロールユニットはそのデータに基づきオルタネータの発電量を制御し、バッテリの充電状態を管理する。

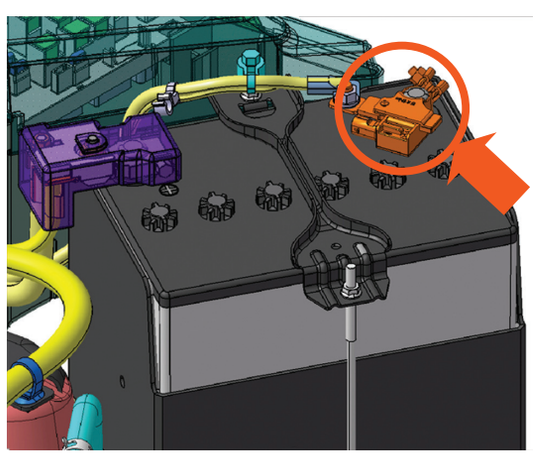


Fig. 69　Battery monitor sensor

新型エンジン搭載に当たって、エンジンカバーを刷新。シボを多彩に使い分けることで、ボンネットを開けた際の存在感を際出させた(Fig. 70)。

11.3　EJエンジン

STIに搭載するエンジンは、スバル最高峰の圧倒的なパフォーマンスと走りを提供すべく、EJエンジンを選択。従来モデルから最高出力とトルク特性は不変ながら、SIドライブの何れのモードでも加速軽快感を大幅に向上させ、よりワクワク感を向上させた(Fig. 71)。

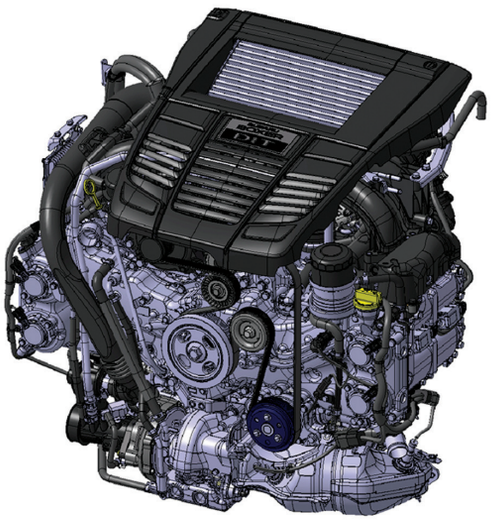


Fig. 70　New engine cover

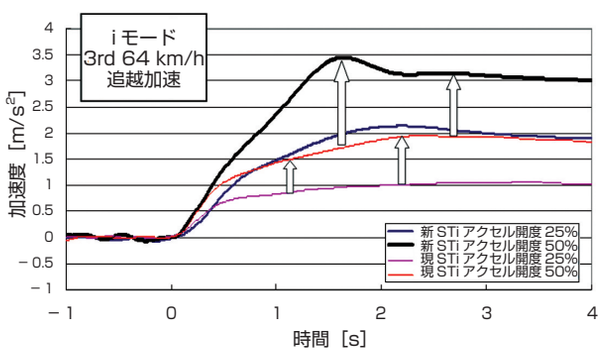


Fig. 71　Acceleration improvement

12.　トランスミッション

12.1　開発の狙い

燃費と走行性能の両立とワクワク、ドキドキする性能を目指して、マニュアルトランスミッション、リニアトロニックを改良し搭載した。2.0 L DITには高トルク用リニアトロニック、中トルク用マニュアルトランスミション（輸出のみ）を、2.0 L STI（国内）、2.5 L STI（輸出）には高トルク用マニュアルトランスミッションをベースに、それぞれ新型WRX用に改良を加え搭載した。

12.2　2.0 L DIT用スポーツリニアトロニックの紹介

レガシィ、フォレスターに搭載している高トルクタイプのAWD用リニアトロニックをベースに、車両コンセプトでもあるスポーティーさを出すために、新たに名称をスポーツリニアトロニックとし、変速制御面でスポーティーなフィーリングを出すべく開発した（Fig. 73）。

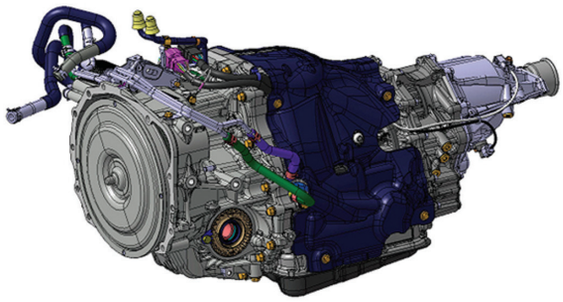


Fig. 72　Sport lineartronic transmission

特徴は、SIドライブの3モードと、Dレンジ及びMレンジとを組み合わせ、I（インテリジェント）は燃費重視、Sは加速重視、S#はワインディング走行を重視した制御に明確に分け、運転の愉しさを味わえるようにした。その中で新たな制御として､Dレンジで､I,Sモード選択時にアクセル開度に連動して、アクセル低開度時は無段変速、高開度時は変速比を固定したステップ変速に切り替えるようにした。これは加速感の向上で、エンジン回転数、車速、音の一体感を狙い、よりスポーティーな感覚が味わえるようにした（Fig. 73）。

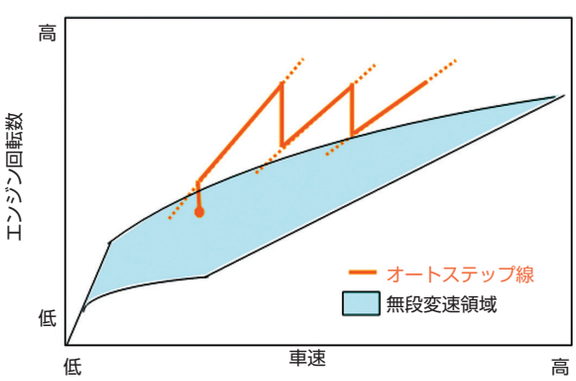
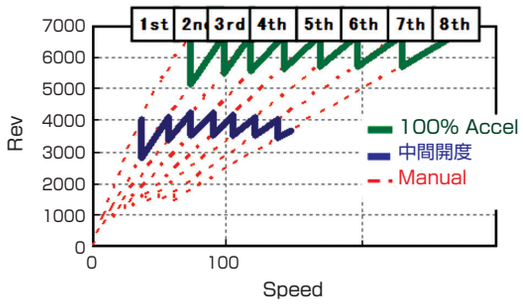


Fig. 73　Auto step control

またSIドライブのS#モード選択時は、8速の固定段とした。従来のレガシィ、フォレスターにも8速固定段は採用しているが、WRXは1段ごとのステップ比を小さくし、さらにクロスレシオ化した。エンジンの最大回転数アップと合わせて、様々なシチュエーションで変速比を選びやすく、高回転を維持した走りが可能で、ワインディングでの走行をより愉しくする特性とした。さらに変速のスピードも極限まで速くし、パドルシフトでのシフト感をよりスポーティーにした（Fig. 74）。AWD方式はバリアブルディストリビューション方式を採用。センターデフにより後輪側への駆動力配分比を大きくし、スポーティーな走行に適した性能とした。

WRX



LEGACY 2.0GT DIT

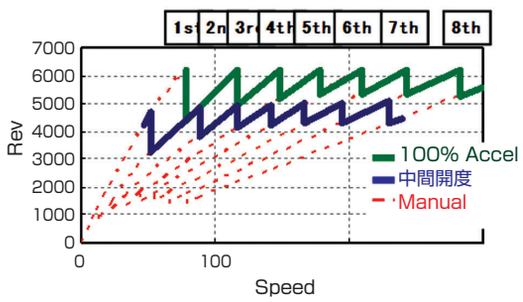


Fig. 74　Shift diagram for sport lineartronic

12.3　2.0 L DIT用マニュアルトランスミッションの紹介

定評のあるケーブルシフトタイプの6速マニュアルトランスミッションをベースに、よりスポーティーなシフト操作性を開発。シフトレバー比をショートストローク化し、1速、2速のシンクロにカーボンシンクロを採用。節度感、吸い込み感、シフト荷重ともにバランスのとれた、シフト操作性に仕上げた(Fig. 75)。

12.4　STI用マニュアルトランスミッションの紹介

高トルク対応の6速マニュアルトランスミッションをベースに、より上質なシフト操作性を目指してWRX STI用に改良を加えた。シフトレバーのニュートラルポジションのより明確化のため、メインロッドにデテント機構を追加し、ニュートラルポジションでのガタツキを抑えた。これによりシフト操作と同時にシフト荷重が立ち上がり、節度感の向上と吸い込み感のアップを図った(Fig. 76)。

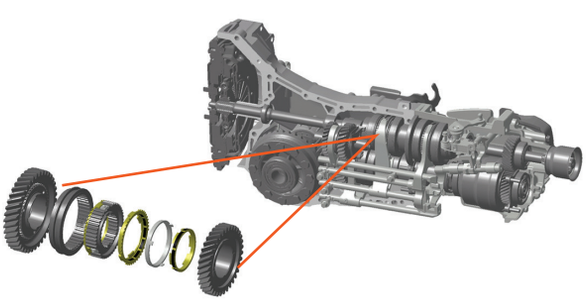


Fig. 75　Manual transmission for WRX

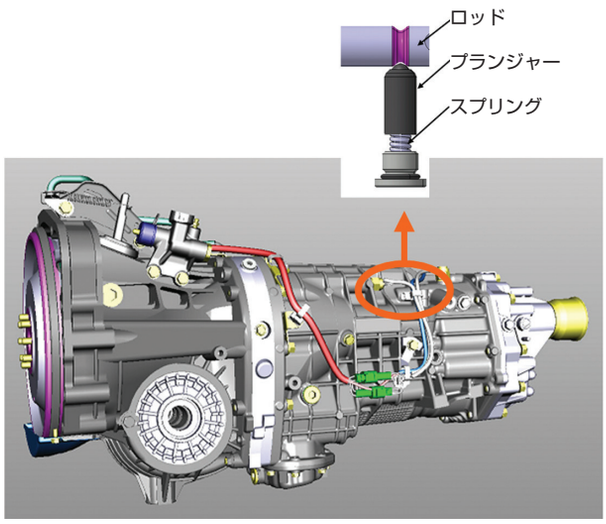


Fig. 76　Manual transmission for STI

13.　あとがき

一人でも多くのお客様に、新型WRXの走りの世界を体感していただくことで、クルマを意のままに運転することの愉しさに触れていただき、スバルのブランド価値である「安心と愉しさ」を知っていただきたいと願います。

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。

参考文献

(1) 小林ほか：新型WRXのデザイン、スバル技報、No.41 (2014)
(2) 藤岡：スポーティーシート開発について、スバル技報、No.41 (2014)
(3) 木戸ほか：運転支援システム「EyeSight (ver.3)」の開発、スバル技報、No.41 (2014)

【著　者】

新型WRX開発プロジェクトチーム

[スバル商品企画本部]　高津　益夫
千田　　淳
舟橋　　悟
[車体設計部]　白　　昌鎬
大津　　隆
古藤　　茂
[外装設計部]　福田　知弘
山岡　　龍

［シャシ設計部］ 長島 健
森 耕治
［内装設計部］ 五島 賢
［エンジン設計部］ 佐々木 礼
［トランスミッション設計部］ 関谷 雄一
［車両研究実験総括部］ 香川 穣
松前 和伸
伊東 和栄
塚越 弘
大石 広士
［パワーユニット研究実験第１部］
小池 康一
［パワーユニット研究実験第３部］
沼田 真一
［電子技術部］ 里村 聡

富士重工業株式会社

スバル自動車事業の拡充と世界進出――拡大期のスバル紹介

剛力サンバー（1973年～ 1976年）

全長/全幅/全高(mm) 2,995/1,295/1,610
エンジン 水冷2サイクル直列2気筒 356 cc
最高出力 28 PS/5,500 rpm
最大トルク 3.9 kg-m/5,000 rpm
乗車定員 2名＋350 kg

1973年2月、サンバーシリーズはフルモデルチェンジし三代目「剛力サンバーシリーズ」として登場。当時の人気力士、初代の貴乃花を起用し、“剛力”イメージをアピールした。このシリーズ以降、消防車、冷凍車、アルミバンなどの特装車の開発生産も盛んになっていった。

新型 WRX のデザイン

Design of New SUBARU WRX

小 林 正 彦* Masahiko KOBAYASHI
宮 下 大 輔* Daisuke MIYASHITA
雲 野 裕 紀* Yuki KUMONO
斎 藤 實* Minoru SAITO

抄 録

新型WRXは、スバルの走りのフラッグシップとして、強さと完成度を融合させた究極のドライビングパフォーマンスカーとしてデザインされた。従来のインプレッサの造形をベースとして拡幅する手法から進化し、専用デザインのボデーにより更にアグレッシブかつ洗練されたスタイリングが表現されている。

内装は「安心と愉しさ」を基本に、見れば誰もが走らせたくなるスタイリングと、意のままにコントロールするための機能性を併せ持つ、「その気にさせるコクピットを表現し、本物のハイパフォーマンスカーとしての“らしさ”の表現に拘ってデザインされた。

Abstract

New WRX is a flagship product designed to express its ultimate driving performance with strength and integrity combined. The previous design approach of widening the Impreza's outer shape was evolved into a new design technique, which created a more aggressive yet refined body style.

The interior provides both attractive style and easy-to-operate functionality for everyone. Especially the cockpit was designed with the intention of “making you feel like driving” this real high performance vehicle.

1. まえがき

今回のWRXシリーズの開発テーマは、「**Pure Power in Your Control**」。

そして提供する4つのベネフィットは、Brand（ブランド）、Performance（性能）、Package & Design（パッケージとデザイン）、Safety（安全性）である。このことからも分かるように、今回のフルモデルチェンジでは走りと安全などの優れたパフォーマンスに加え、高いデザイン質感と使い易いパッケージなどを付加しその価値を高めたのが特徴である。特に今回は4代目であるということもあり、シリーズの究極の姿を目指した開発過程の中、「完成度」と走りを予感させる「質感」に徹底的にこだわり、デザイン開発を行った。新型WRX S4の外観およびコクピットをFig. 1に示す（WRX S4は国内専用の呼称）。

Fig. 1 New WRX S4 exterior and cockpit

＊ デザイン部

Fig. 2　Side view

Fig. 3　Side sill spoiler

Fig. 4　Front fender

Fig. 5　Rear fender

2.　エクステリアデザイン

エクステリアデザインのコンセプトは、「**強さと完成度の融合**」。

■ ボデー側面およびフェンダー

現行車に比べて下端を約200 mm前方へ移動させAピラー、そしてトランクへとスムーズにつながるCピラーにより、流れるようなシルエットを実現した(Fig. 2)。

全体にアグレッシブかつより洗練されたスタイリングを実現し、サイドシルスポイラーは大きな断面で構成され、非常に立体的な造形で押し出し感の強さと、その面積により大きく光を受けることでサイドビューをボトムで引き締め、実用的にもチッピング性能を織り込んだ形状としている(Fig. 3)。

基本断面から全幅いっぱいに大きくフェンダーを張出し、左右に配置したヘッドランプとリヤコンビランプからも面を連続させることでボデーのワイド感を強調。WRXシリーズの低重心で力強い走りを表現した。フロントフェンダーガーニッシュの後部にはメッシュの開口部を設けて走りの良さとスポーティーさを感じさせるデザインとした(Figs. 4, 5)。

■ フロント廻り

フロントはスポーツモデルにふさわしいアグレッシブで精悍な顔つきとするために、スバルの統一モチーフであるヘキサゴングリルから始まるダイナミックで立体感のある造形を、ノーズコーンバンパーにより実現した。また新開発のヘッドランプはターンランプを外に出して独立させることで極力薄型化し、獲物を狙う猛禽類の眼のように鋭く前方を睨み付けた「ホークアイ」と「コの字」のLEDランプを採用。また全幅をいっぱいに使って配置することで、グリルの低さとともにワイドアンドローの佇まいを感じさせるデザインとした(Fig. 6)。

Fig. 6　Front quarter

■ フード

フードにはインタークーラー冷却用のエアスクープを持ち、ターボモデルであることを主張する一方で極力フード側を彫りこむことで、視界を確保できるように形状デザインの最適化を行った。フロントグリルメッシュタイプを採用し、奥行感とスポーティーさを強調するデザインとした。フォグカバーは大型タイプのものを採用。ブラックの樹脂部には幾何学シボを施し、形状は正面方向からスタビリティを感じるようデザインした(Fig. 7)。

■ リヤ廻り

リヤについては全体にスタビリティを感じる安定感のある佇まいを実現した。更にリヤフェンダー上にリヤコンビランプを配置し、ワイド感を強調する共に、

リヤバンパー下端は横基調のディフューザーを配置してパフォーマンスカーとしてのプレゼンスとアグレッシブさを強調した。マフラーカッターには4本出しのツインデュアルタイプのものを採用。高性能なドライビングマシンであることをその存在感共に端的に表現するデザインとした(Fig. 8)。

Fig. 7　Front end

Fig. 8　Rear quarter

■ WRX STI

WRX STIに関してWRXとの外観上の違いは専用の大型リヤスポイラー(Fig. 9)。そしてフロントグリル内、サイドガーニッシュ、トランク後面には「STI」のレターマークが配置される(Fig. 10)。他にはSTI専用デザインの18インチホイールが標準とオプションで2種類用意される。

Fig. 9　Large size rear spoiler

Fig. 10　STI letter marks on body exterior

3.　インテリアデザイン

インテリアデザインのコンセプトは、本物のハイパフォーマンスカーとしての「“らしさ”の表現」である。

■ コックピット

車を知り尽くしたユーザーが期待する“走り”をカタチにし、見れば誰もが走らせたくなるスタイリングと、意のままにコントロールするための機能性を併せ持つ、『その気にさせる』コクピットを表現した。ドライバーを包み込むような、室内全体をグッと黒く引き締めたキャビン、見た目にもホールド性の高そうなスポーティシート、鮮烈で精緻な印象のメーター、そして太くガッチリとした手応えのDシェイプステアリングが、『走りの期待感』を与える。各部に配置されたシルバーリングは所有する満足感を与えるだけでなく、操作部の場所を瞬時に見つけられる機能的役割も考慮し、デザインした(Fig. 11)。

■ ステアリング、シフト廻りおよびシート

インテリア全体の中での見せ場であるステアリング・シフト周り・シートについては、ハイパフォーマンスカーとして特にこだわって造りこんでいる。

ステアリングは小径化した上で、リング下端をカットしたDシェイプを採用。大型の金属調ベゼルを強いアイキャッチとした。またリング断面も従来より太くし、握りこんだ際の手応えをガッシリとさせた。また、革の分割ラインを水平にすることでDシェイプを視覚

Fig. 11　Cockpit design

Fig. 12　D shape steering wheel

的にさらに強調し、走りの愉しさが見た目から伝わるようデザインしている(Fig. 12)。

走りのイメージの象徴として、シフト周りには特に注力した。大きなシルバーリングでシフトを強調し､走りを訴求する車としての機能感を表現している。WRX S4ではシルバーリングに加え表皮巻きにステッチを施した上質なデザインを採用。シフトブーツの採用に加え、赤ステッチをノブに施すことで質感アップを狙った(Fig. 13)。STIでは2本の太いシルバーの柱がダッシュボードに突き刺さるような構成とし、骨太な構造がダッシュボードを支えるような、剛性感を感じるデザインとした｡またシフトブーツリング前側に、照明付きのSTI文字を配置。シフト前ポケットの照明と合わせ、夜間においてもスポーティーさをアピールする(Fig. 14)。

シートはハイパフォーマンスカーらしく見た目でホールド感の良さ、高性能さ、信頼感が伝わるバケット形状を採用した。特にフィット感に拘った前席の肩まわりは、特徴的なステッチワークも見所とし、この車の『らしさ』を強く表現している。更にSTIではヘッドレストの刻印も採用し、特別で高性能であることが一目見て判るような本物の質感を表現している(Fig. 15)。

Fig. 13　WRX S4 gear shift lever

Fig. 14　WRX STI gear shift lever

Fig. 15　Seat

■ 一格上の質感と仕立て

以上の、走りの記号性を表現するアイテムに加え、『一格上の質感と仕立て』を目標に、各所にユーザーの所有する喜びをもたらすアイテムを採用している。サイドベンチレーショングリル外周をはじめ、ヒーターコントロールダイヤル、メーターリング、シフト周り等各所に配置されたシルバーベゼルが黒いインテリアの中でキラッと光る効果的なアクセントになるようデザインした。

新型WRX S4そしてWRX STIは、ドアを開けた瞬間ユーザーの気持ちを日常から切り離し、はるかワインディングのかなたへ向かわせる空間づくりを目指した。細部に渡るスポーティー表現･質感表現にこだわったことで､目の肥えた世界中のWRXファン･スバルファンの期待に応えるインテリアデザインが実現できた。

4. カラーデザイン

4.1 エクステリアカラーデザイン

スバルの“走りのフラッグシップ”として「**強さと完成度を融合**」させた、究極のドライビングパフォーマンスカーのためのカラーデザインを狙った。

■ ボデーカラー（Fig. 16）

①WRブルーパール

力強く進化させたスバルの走りを牽引する、次世代のWRブルー。（新開発色）

②クリスタルホワイトパール

塗料内のパール材を新しい人工パールに切り替え、より白く、クリスタルのような強い輝きをイメージした、スバルの次世代ホワイトパール。（新開発色）

③ギャラクシーブルーシリカ

落ち着いた大人のスポーティーさを演出するブルー。

④ライトニングレッド

アクティブなライフスタイルを送るお客様に乗っていただきたい、スポーティーでストレートな表現のレッド。

⑤アイスシルバーメタリック

氷をイメージしたブルーイッシュでシャープなシルバー。

⑥ダークグレーメタリック

輝きが強く、シャープで精悍な表情のダークグレー。

⑦クリスタルブラックシリカ

スタイリッシュな“輝き”のあるフォーマルブラック。

① WR blue pearl

② Crystal white pearl

③ Galaxy blue silica

④ Lightning red

⑤ Ice silver metallic

⑥ Dark gray metallic

⑦ Crystal black silica

Fig. 16 Body color

■外装パーツカラー

①フロントグリルカラー

色は「グロスブラック」塗装。深味あるブラック塗装により、スポーティーな表情と高い質感を演出。“ヘキサゴン形状”をカラーでも更に引き立てる効果も狙った(Fig. 17)。

Fig. 17　Front grille color（North America model）

②アルミホイールカラー

新色「ダークガンメタリック色」を17インチ・18インチに設定。ダークなアルミホイール色は車体全体を引き締め、パフォーマンスカーの足元を演出。スバルの次世代スポーツホイール色として開発した(Fig. 18)。

BBS製鍛造アルミホイールは「ブラックハイラスター色」、北米専用LAUNCH EDISION仕様は「ゴールド色」を設定した(Fig. 19)。

国内S4用18インチアルミホイールは、標準をSTIと同色の「ダークガンメタリック色」とし、Sパッケージ用に「ブラックハイラスター色」も設定した(Fig. 20)。

<17 inch>　<18 inch>

Fig. 18　Dark gun metaric color aluminium wheel

<ハイラスター色>　<北米LAUNCH EDISION用 ゴールド色>

Fig. 19　18 inch forged aluminum wheel colors (made by BBS)

<ダークガンメタ色>　<ブラックハイラスター色>

Fig. 20　18 inch aluminum wheel colors for domestic S4

③アルミホイール用 六連星センターキャップ色

クルマ全体の六連星マークカラー統一を目的とし、レヴォーグ／新型WRXからアルミホイール用六連星センターキャップを新開発した。WRXはブラック基調の「クリアタイプ」とし、六連星のブルー色とグラデーションを、トップマークの六連星に合わせたカラー再現をした(Fig. 21)。

Fig. 21　Color of aluminum wheel center cap with six-star logo

④フェンダーモールディングカラー

STIは「高艶ベロアメッキ」をスバル初採用。7部艶のメッキで、スポーティーさと上質感の両立を表現した。STI文字部にチェリーレッド色を色挿しし、存在感を高めた。

S4は「ダークメッキ」。スポーティーなダーク色メッキで、サイドを引き締める効果を狙った(Fig. 22)。

Fig. 22　Fender molding color

4.2　インテリアカラーデザイン

スバルのハイパフォーマンススポーツカーとしての卓越した性能を存分に堪能できるスポーティーで凝縮

感のある内装を仕立てて、お客様を『その気にさせる』内装空間の演出に取り組んだ。

○ハイパフォーマンスな機能を強調する見栄えの実現

操作系部位を中心に、骨太で塊感のある金属と、しっとりとした革とのコンビネーションで、凝縮された強い見栄えを演出した。

○スポーツマインドをくすぐるレーシーなアクセント表現

赤い挿し色やカーボン調パネルを配置して、スポーツキャラクターを演出した。

■ 内装色

ルーフからフロアまで室内全体を引き締まった統一感のあるブラック内装とした。お客様が走りに集中できるレーシーな空間と、ドアを開けたときから「その気になる」演出をした(Figs. 23, 24)。

■ 加飾表現

・操作系を中心に、金属調シルバーとカーボンの加飾を施し、操作部位を際立たせた。ドアのスイッチパネルは、黒内装に同調しながら凄みを醸し出す金属調ダーク色とした。

・STIではさらに、シフトノブの表示パネルと、ヒートコントロールダイヤルに赤の挿し色を置き、ドアトリムの布加飾とアームレストには、アルカンターラ素材と赤いステッチラインを施して、価格に応じた仕立てと際立つキャラクターの両立を図っている(Fig. 25)。

■ シートカバーリングと表皮材の狙い

・スポーツカーらしいメリハリのある形状とホールド性を持ったシートに、ハードな運転でも体をしっかりサポートする滑りにくい表皮材をWRX S4用に新開発。艶の有るサイド材と赤いWステッチとのコンビネーションで機能感を高めた(Fig. 26)。

・STIでは、定番のアルカンターラと革のコンビネーション+赤ステッチで価格に見合った仕立てとすると共に、スポーツキャラクターをより際立たせた(Fig. 26)。

Fig. 23　WRX S4 interior color

Fig. 24　WRX STI interior color

<Shift knob>

<Heat control dials>

<Door trim>

Fig. 25　Decorations

<WRX S4>

<WRX STI>

Fig. 26　Seat covering

5.　あとがき

WRXシリーズはAWDスポーツカーの代名詞であり、長年にわたりその技術は磨かれてきた。

今回は「Pure Power in Your Control」のテーマの下、車両全体の完成度向上を目指していく中で、デザインのクオリティについても徹底的に拘り、その名に

恥じない内外装デザインとカラーデザインが完成したと自負している。性能面はもちろん、進化したデザインの力によってこのWRXシリーズは、今後多くの方に支持していただけるものと確信している。

【著　者】

小林　正彦

宮下　大輔

雲野　裕紀

斎藤　實

富士重工業株式会社

スバル自動車事業の拡充と世界進出――拡大期のスバル紹介

レオーネ SEEC-T 1600（1975年～ 1979年）

51年度排出ガス規制適合SEEC-T採用
全長/全幅/全高(mm)　3,995/1,500/1,435
エンジン　水平対抗4気筒OHV　1,595 cc
最高出力　80 PS/5,600 rpm
最大トルク　11.9 kg-m/3,600 rpm

1975年1月、50年度排出ガス規制に適合するSEEC-Tシステムを発表。10月、51年排出ガス規制に適合するレオーネSEEC-Tシリーズを、業界に先駆けて発売。SEEC-Tは、触媒を用いずに燃焼改善のみで排出ガスを処理するシステム(2次空気導入式燃焼制御方式)である。12月には、軽初の51年度排出ガス規制適合車のレックスSEEC-Tシリーズを投入した。

スポーツリニアトロニック用新変速制御の開発

Development of New Shift Control for Sport Lineartronic

鯵本恵介*1　田中敬樹*2　山形進*2
Keisuke AJIMOTO　Hiroki TANAKA　Susumu YAMAGATA

抄　録

WRX、レヴォーグ2.0L DIT車より初搭載となる、スポーツリニアトロニック用変速制御を開発した。

従来のリニアトロニックに対し、環境性能と走りの性能を両立するため、全ての基本となるCVT変速制御を見直し、ステップ変速制御の採用や、アダプティブ制御の最適化により、スバルの新型車に相応しいドライバビリティを実現した。

本稿では本CVTの特徴となる走りの性能に関わる制御の開発について紹介する。

Abstract

A new shift control system was developed for the Sport Lineartronic to be mounted in WRX and LEVORG 2.0L DIT.

To meet both environmental requirements and driving performance target, CVT shift control, the base to determine the entire vehicle performance, was reviewed. In addition, step shift control was employed and the adaptive control was optimized to provide driveability suited for Subaru's new models.

This paper introduces the development of shift controls which would affect the driving performances characterized by CVT.

1.　まえがき

5代目レガシィDITより、高トルク対応リニアトロニックを順次展開しており、お客様より高い評価を頂いている。

今回、WRX・レヴォーグへの展開に際し、CVTの持つ環境性能、滑らかさはそのままに、ハイパフォーマンス車向け変速機に対するスバルの考えを具現化するため、これまでのCVT制御を基に、スポーツ性能を向上させるための開発に臨む事とした。

2.　開発目標

WRXの「Pure Power in Your Control」、レヴォーグの「革新スポーツツアラー」という商品コンセプトに相応しい性能を実現するため、以下4点を開発目標として設定した。

①エンジン音と加速度が織り成す“加速感”の改良
②無段変速のドライバビリティ向上
③8段ステップ変速制御の性能向上
④その他関連機能の性能向上

次項より、これらを達成する機能の構成を紹介する。

3.　制御機能の紹介

3.1　制御機能構成

弊社独自技術であるSI－Driveによる走行モード切替制御を土台とする事で、無段変速を基本とした制御体系([I]、[S])と、ステップ変速を基本とした制御体系([S#])をお客様が選択可能な構成としている(Fig. 1)。

その他に関連する機能の性能向上のため、メータ高応答制御、マニュアルモード時自動アップシフト停止等を組み込んだ。

＊1 電子技術部
＊2 パワーユニット研究実験第3部

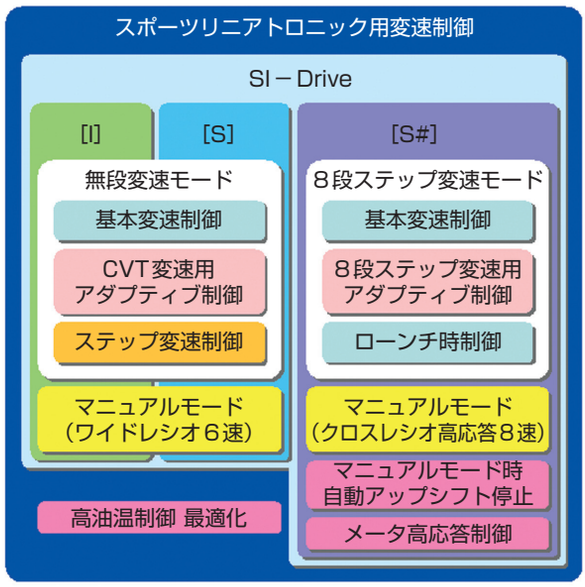


Fig. 1　Sport Lineartronic shift control configuration

3.2　SI－Drive

SI－Driveは、ドライバーの要求した性能を実現するために、出力特性や制御パターンを切り替える制御システムである。

本システムをハイパフォーマンスDIT＋スポーツリニアトロニックに適用するにあたり、既販車の構成を踏襲しつつも設定思想を進化させ、“3 Power units in one car”を具現化する変速制御構成とした。

・Intelligent［I］

十分な出力を確保しながらもスムーズなエンジン特性とし、市街地走行などでの扱い易さを重視。更にステップ変速制御やCVTアダプティブ制御を組み合わせることで、扱い易さとスポーティさをバランスさせた。

・Sport［S］

アクセル操作に対し忠実なエンジン特性とし、幅広い使用状況下においてハイパフォーマンスDITの性能を使いきれる素直さを両立。ステップ変速制御やCVTアダプティブ制御は[S]の思想に合わせて、よりスポーティさを感じられるようにチューニング。これにより、山岳路を気持ち良く走れる特性とした。

・Sport Sharp［S#］

エンジン特性は、[S]の特性を軸に、レスポンスを高めたセッティングとしている。8段ステップ変速＋アダプティブ制御との組み合わせにより、変速比が固定される事で得られるダイレクトな感触を愉しめる特性とした。

3.3　CVT変速の見直し

次に、CVT独特の走行感の払拭に取り組んだ。モーターボートエフェクトや、ラバーバンドエフェクトと言われる根本原因は、アクセル操作に対して過敏に変速しすぎる事である。この対極となるのがマニュアルモードで、変速をドライバー自身がコントロールすることが出来、更に変速比が固定されているため、再加速時の初期応答性や、回転速度上昇と加速度変化が有段ATでお客様が慣れている感覚と一致している（Fig. 2）。

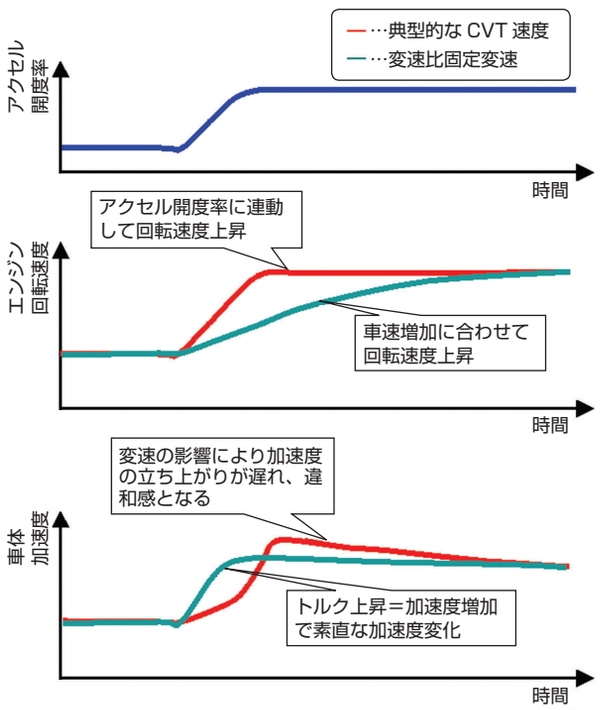


Fig. 2　Behavior difference between CTV shift and fixed transmission gear ratio shift

3.3.1　基本変速制御の改良

このような感覚が得られる変速フィーリングを実現すべく、スポーツリニアトロニックでは、先ず基本となるCVT変速制御を見直した。

アクセル操作に対する変速量の割付けを変更し、これまでアクセル操作に追従させていた変速について、一般道走行中等アクセル操作量が少ない場合の変速量を抑えることで、CVTの良さである滑らかな変速を生かしたスムーズな走行性と、マニュアルモードのようにギヤ比が固定されているようなダイレクト感を両立した。 一方で、加速が必要な操作に対してはドライバーの意思に沿う様、レスポンス良く追従する特性とした。これにより、有段ATに慣れたお客様にも違和感のないフィーリングを実現した（Fig. 3）。

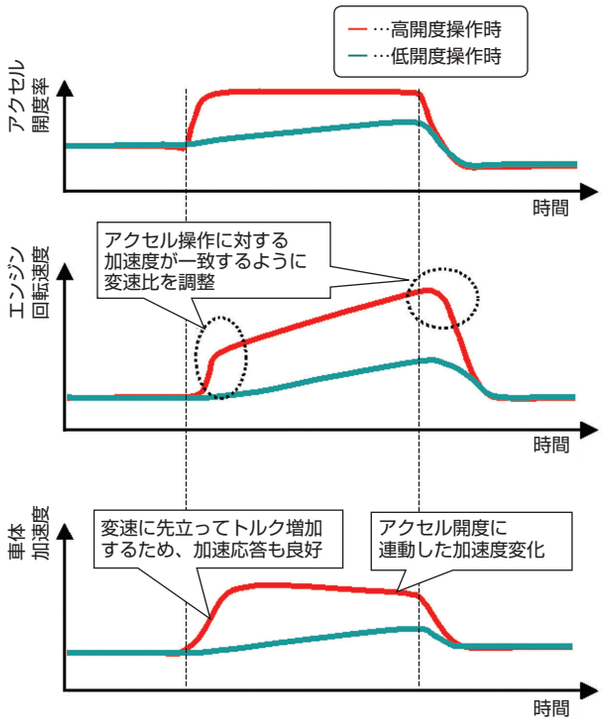


Fig. 3　Example of shift behavior after improving the basic shift control

3.3.2　ステップ変速制御の採用

CVT変速制御の見直しにより殆どの走行条件における変速フィーリングは向上したが、アクセルの踏み込み量が大きい状況では、無段変速故の連続した回転上昇によるエンジン音や加速度、動きの少ないメータ挙動により、変速の間延び感が払拭出来ていない。改めて、スポーツ車と言われる車両の自動変速機について調査した結果、積極的な走りを愉しむには車両から与えられるインフォメーションも重要だと再認識させられた。

そこで、スポーツリニアトロニックでは、有段変速機が持つ変速によるエンジン音、加速度の変化に着目し、従来の無段変速領域と両立させる改良を実施した。制御の動きとしては既にボクサーディーゼルリニアトロニックで採用したステップ変速制御[(1)]に近いが、より様々な走行条件に合わせるために独自の変更を織り込んだ。スポーツリニアトロニックのステップ変速制御の回転速度変化例を次に示す(Fig. 4)。

特徴となるのは図中①～③で示す通り、従来のステップ変速とは異なり、車速とエンジン回転で予め決められた固定変速比を持たないことである。この制御改良と合わせて、[I]、[S] それぞれのキャラクタや、各走行状況に合わせた最適な特性を使用出来るようにチューニングしたことで、ドライバーの選択肢を広げ、且つ要求に対して過不足なく応答することを可能とした。

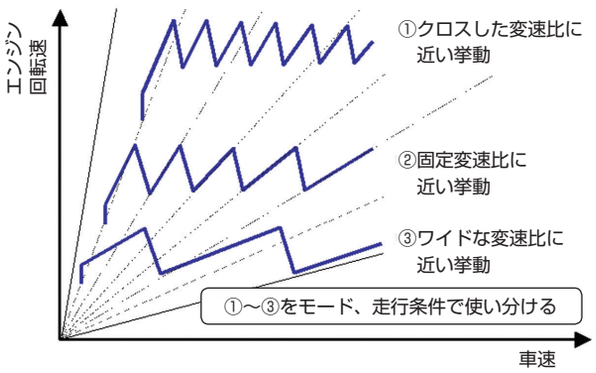


Fig. 4　Example of step shift revolution speed

3.4　CVTアダプティブ制御の見直し

ステップ変速制御の採用に合わせ、CVTアダプティブ制御についても改良を施した。エンジン回転速度、加速度変化等の走行状況を精度良く検出することで、ドライバーの操作に忠実な回転速度制御を実現した。これに合わせて、積極的な回転速度保持や、ブレーキング時のダウンシフトを採用する事で、よりダイナミックな特性とした。

3.5　8段ステップ変速[S#]の見直し

通常の使用条件下での主モードになると考えている[I]、[S]の性能向上に合わせて、より高い走行性能が期待される[S#]の8段ステップ変速についても見直した。

・ステップ比のクロスレシオ化

変速の応答性を向上させると共に、狙いとする回転を使い易くするため、ステップ比を縮小した(Fig. 5)。

これにより、コーナリング中や低μ路上での変速における車両挙動への影響が抑えられたことから、変速自体を高速化することが可能となり、他銘スポーツ車同等レベルを確保することが出来た(Fig. 6)

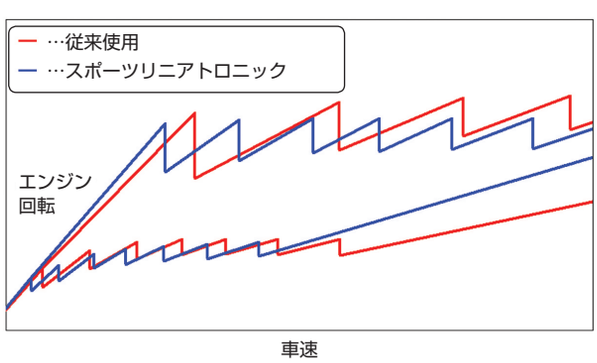


Fig. 5　Step ratio reduction

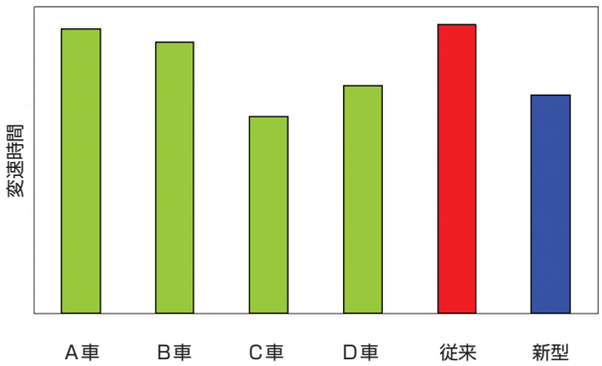


Fig. 6　Comparison of shift time

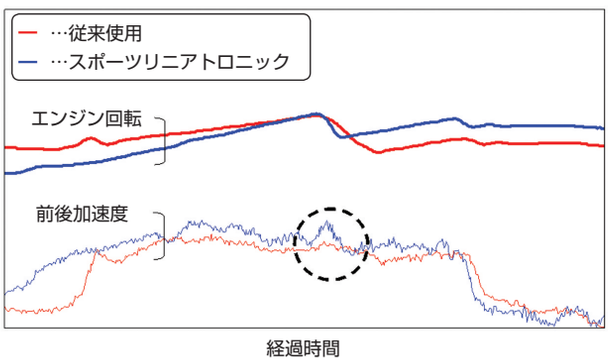


Fig. 7　Comparison of shift speed and acceleration speed

・変速品質の見直し

クロスレシオ化に合わせて、変速中の加速度の作り込みを実施した。従来は変速ショックを無くす様にしてきたが、スポーツリニアトロニックではドライバーの操作に対するインフォメーションとして、車両挙動に影響を与えない範囲での加速度変化を意図的に残した(Fig. 7)。

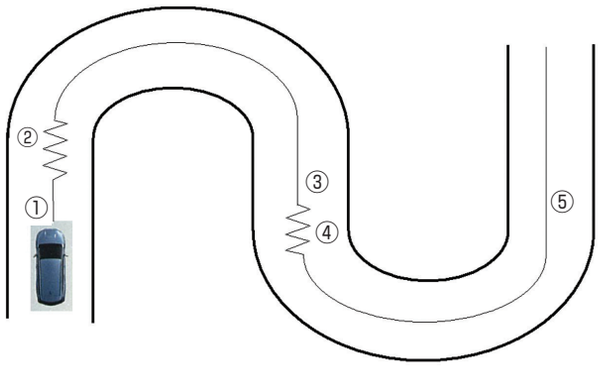
3.6　8段ステップ変速用アダプティブ制御の見直し

変速に関連する基本性能の向上に合わせて、より最適な走行環境を提供するため、アダプティブ制御の作動判定を行う領域を見直した。CVTアダプティブ制御同様、エンジン回転速度、ブレーキ操作等の走行状況を精度良く検出出来るように改良することで、従来は変速を制限し、同一ギヤ段を保持し続けていた状況でも積極的な変速を可能とした。

これらの変更により、ドライバーの運転操作に対して、より忠実な回転速度保持性、変速タイミングを提供し、操る悦び、走りの愉しさを向上した(Fig. 8)。

3.7　その他関連機能の性能向上

様々なお客様を想定し、実際に色々な状況を走り込むことで浮き彫りになった課題への対策や、更なる性能向上を求めて、以下の仕様を織り込んだ。



シチュエーション		①	②	③	④	⑤
変速段	従来仕様	5	5→3	3	3	3→4
	改良仕様	5	5→2	2→3	3→2	2→3

Fig. 8　Shifting image of adaptive control

・高油温時制御判定の最適化

走りのリズムを乱すCVT高油温時の保護制御について、外気温センサ等、既存のセンサの情報を基に、CVT保護制御に用いる推定温度の精度を高めた。これにより保護制御が入らない走行時間を拡大した。

・ローンチ時制御[S#]

高開度発進時は一時的に無段変速に移行させる専用変速制御を行い、パワーバンドを保持する事で最大パフォーマンスを発揮可能とした。

・メータ高応答制御[S#]

メータレスポンスを見直し、ドライバーが変速機を操作する愉しさを向上した。実際の加速度変化とメータ挙動に違和感が出ないように設定した。

・マニュアルモード時自動アップシフト停止[S#]

従来の8段ステップ変速制御と同様に、マニュアルモード選択時はドライバーの意思を最優先とし、レッドゾーン域での自動アップシフトは行わない設定とした。

4.　まとめ

ここまでの仕様変更により、当初設定した4点の開発目標を全て達成し、環境性能と走りを両立する狙い通りの車を仕上げることに貢献した。

5.　あとがき

今回、スバルのスポーツという名を冠するCVTとして、あるべき姿とは何か、という命題に挑戦し、WRX・レヴォーグに相応しいスポーツマインドあふれる変速機を提供することが出来たと確信している。

一方で、この開発を通してCVTという変速機が持

つ可能性を再認識し、まだまだ使いこなしきれていない事を実感させられたのも事実である。

今後、このエッセンスを順次リニアトロニック制御へ取り入れ、スバルのCVT変速制御を磨き上げていきつつも、この開発で見えてきた次世代のCVT変速制御について探求を続けたい。

この場をお借りして、関係各位のご尽力に対し厚く御礼申し上げます。

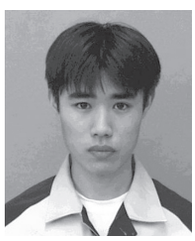
参考文献

(1) 熊谷ほか：アウトバックボクサーディーゼルリニアトロニックの紹介、スバル技報、No.40 (2013),p120－123

【著　者】

鯵本　恵介

田中　敬樹


山形　　進

富士重工業株式会社

スバル自動車事業の拡充と世界進出――拡大期のスバル紹介

スバル ブラット（1977年～ 1987年）

全長/全幅/全高(インチ)　　164.8/61.0/56.7
エンジン　　水平対抗４気筒OHV　1,590 cc
最高出力　　67 PS/5,200 rpm
最大トルク　　81 lb･ft/2,400 rpm
乗車定員　　２名(＋荷台２名)

レオーネ4WDをベースに北米で人気の高かったピックアップスタイルとした多目的ビークル。北米市場専用モデルとして開発され、アメリカ、オーストラリア、ヨーロッパで販売。月平均2000台を売り上げる人気モデルとなった。

スポーティーシート開発について

Development of Sporty Seat

藤　岡　豊　二*1　浅　野　恵　一*2　長谷川　拓　也*2
Atsuji FUJIOKA　Keiichi ASANO　Takuya HASEGAWA

抄　録

ＷＲＸ及びレヴォーグの高い動力性能に対応したスポーティーシートを開発するにあたり、座り心地性能と衝突安全性能との両立に主眼を置いた開発を行ってきた。以下に詳細を報告する。

Abstract

Sporty seats were developed to be compatible with the highly dynamic performance of WRX and LEVORG, with key focuses placed on their ride comfort and collision safety. The development details are reported in this paper.

1.　はじめに

シートとして相応しい座り心地とは何か。それは乗員を支持し快適な座り心地を提供するだけでなく、ドライバーが車の動力性能を引出せる様、走行時の加速度変化の中でも安心して身体を委ねられる高いホールド性が必要である。一方で衝突時の安全性能の確保も必要不可欠である。

今回開発したシートは高いホールド性を有した座り心地と、その性能と相反する鞭打ち安全性能をインプレッサの基本骨格をベースとしながら構成部品の変更及び追加をすることで両立させている。

2.　開発の狙い

■ WRX及びレヴォーグの高い動力性能に対応した座り心地性能の実現
■ スポーティーシートと鞭打ち安全性能との両立

3.　技術紹介

3.1　座り心地性能

スポーティーシートに相応しい荷重特性、体圧、形状などの指標を数値に落とし込み目標設定を行った。又、腰椎の負荷軽減のため、ランバー支持感の向上も図っている。

以下にポイントを記す。

■ ホールド性の確保
■ ランバー支持圧の向上

(1) ウレタンパッドの異硬度化

メイン部は軟らかめに設定し坐骨を一定量沈み込ませることで前後ホールド性とフィット感の確保を行った。またサイド部のウレタンパッド硬度は硬めに設定することで横Gが加わった際は身体をしっかりサポートしホールド性を確保している(Fig. 1)。

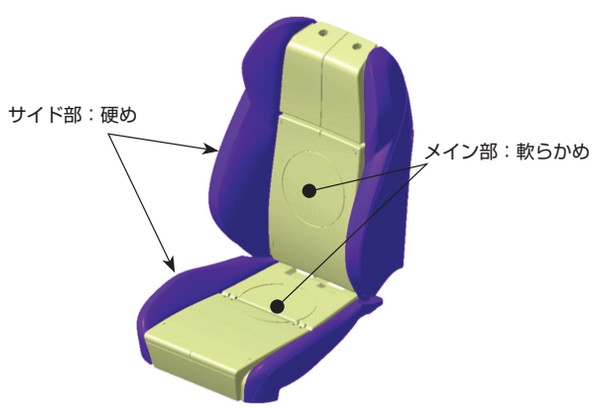


Fig. 1　Urethane pad

＊1 内装設計部
＊2 車両研究実験第2部

(2) クッションインサートワイヤの採用

目標とするサイド部の荷重特性を実現するためウレタンパッドのみでは補完できない剛性をインサートワイヤの設定により確保した(Fig. 2)。インサートワイヤ有無での荷重-撓み線図の比較を(Fig. 3) に示す。

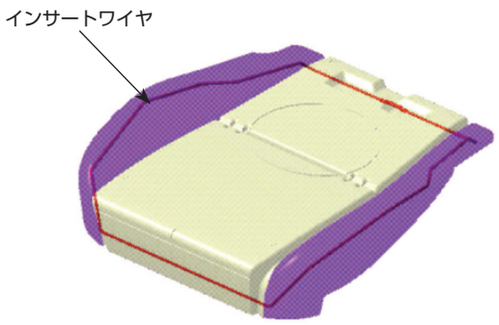


Fig. 2　Inserted wire

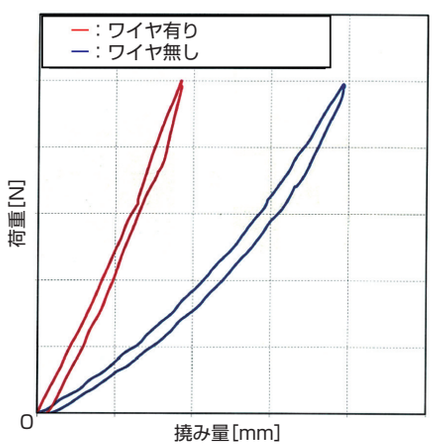


Fig. 3　F-S curve comparison of inserted wire

(3) バックレスト肩部サポートワイヤの採用

肩部のサポートワイヤは横Gが掛かった際、上体が左右に振れるのを防止するために設定している(Fig. 4)。しかし、背反として側面衝突時にサイドエアバックが作動する際、ワイヤにより展開速度を阻害する懸念がある。そこでエアバック展開状態でも接触しないレイアウトにした(Fig. 5)。又、後面衝突時はワイヤにより上体がシートへ沈み込み難くなり鞭打ち傷害リスクの懸念がある。こちらは実機試験より、ダミーのシートへの最大沈み込み量を計測・図面化し、ワイヤとダミー間で一定のクリアランスを確保した(Fig. 6)。結果、車両旋回時発生する横Gでも上体を保持できる高いホールド性と衝突安全性能を両立している。

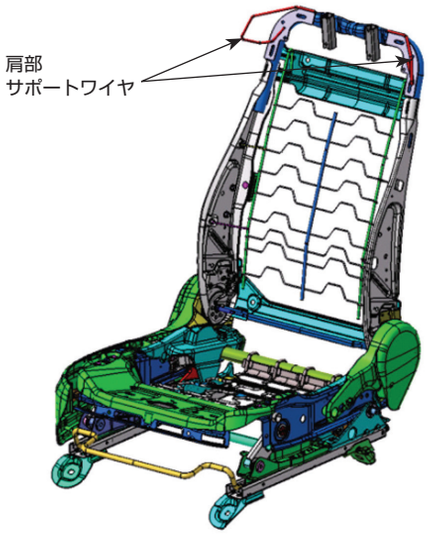


Fig. 4　Shoulder support wire

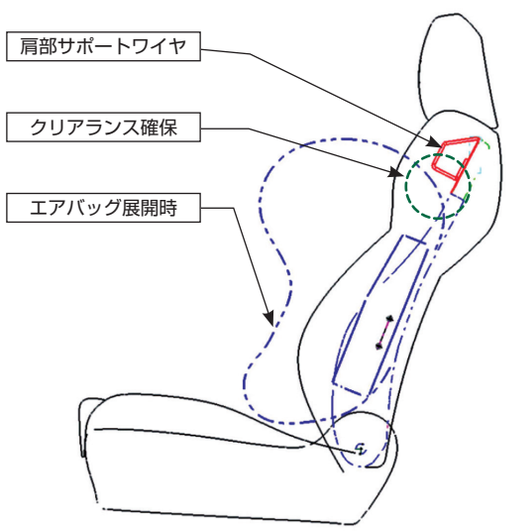


Fig. 5　Opened side air bag

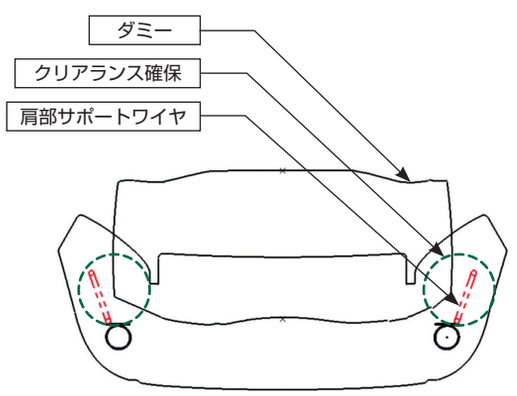


Fig. 6　Seat section where dummy sank

(4) ランバー支持材追加

ランバー支持感向上のため、支持圧と位置の最適化を図った。ランバーのピーク圧とピーク位置の目標を設定し、それをウレタンパッドの中にランバー支持材(Fig. 7)を追加することで実現しており、長時間運転でもS字姿勢を保持し腰椎への負担が掛かり難いシートとした。 Fig. 8にランバー支持材追加品と5代目レガシィーの体圧線図を示す。

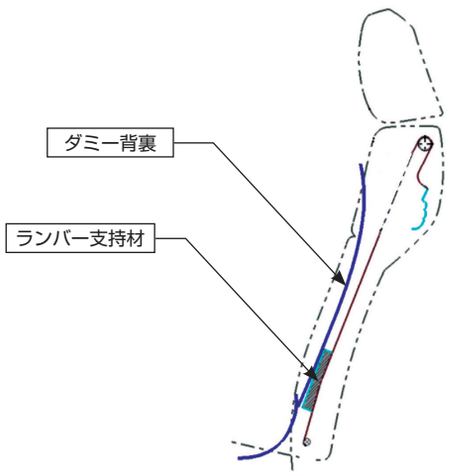


Fig. 7　Center section of backrest

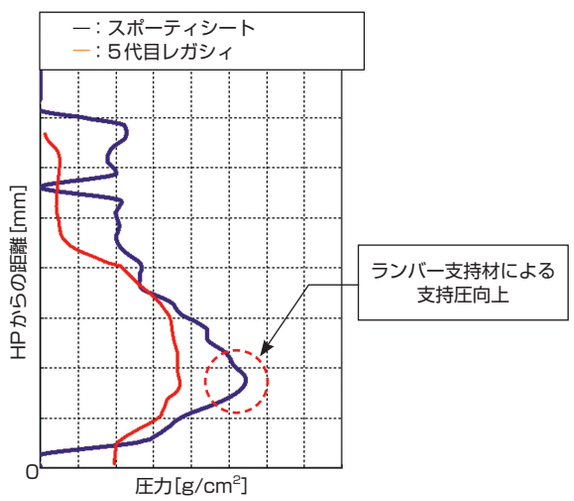


Fig. 8　Pressure curve of backrest

(5) 摩擦係数の高い表皮の採用

姿勢を保持するためには滑り難い表皮を採用するのも有効である。摩擦係数の低い表皮ではシートの形状が適正であっても走行中の振動やGで骨盤が前に滑り猫背姿勢になり腰痛や、座り直しが発生する。

今回、起毛加工を追加したファブリック表皮(Fig. 9)を採用することで静摩擦係数アップを図った。結果、BRZ比で＋33%の向上をしており(Fig. 10)姿勢保持性にも寄与する表皮としている。

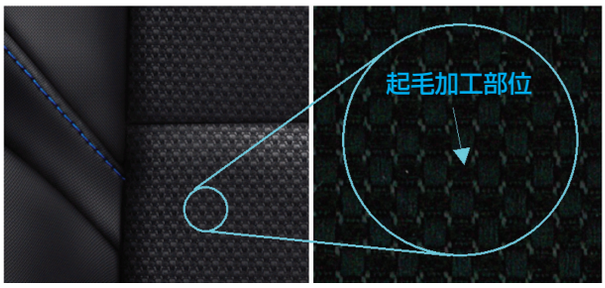


Fig. 9　Detail of fabric

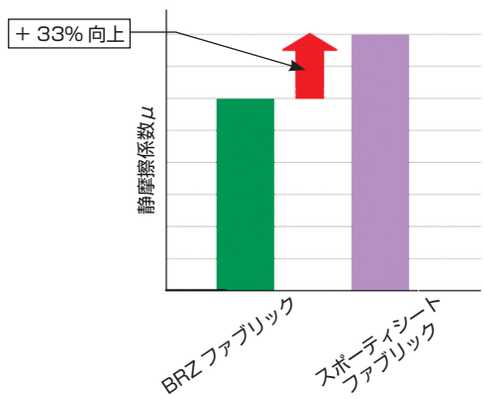


Fig. 10　Comparison of fabric friction

3.2　鞭打ち安全性能との両立

動力性能の高い車のシートは硬めの座面、剛性の高いサイドサポートが一般的である。しかしそれは後面衝突時、上体に高い反力が発生し頭部との加速度の差が発生しやすくなり頚椎への負荷が掛かり鞭打ち傷害のリスクが高まる懸念がある。この二律背反の性能を、背面フレーム内に脱落式フックを採用することで両立させている(Fig. 11)。衝突時の大荷重でフックを外す設定にし、上体を積極的にシートに沈みこませヘッドレストと頭部の距離を近づけてやり、頭部Gの立上りを早めて鞭打ち安全性能を向上している。

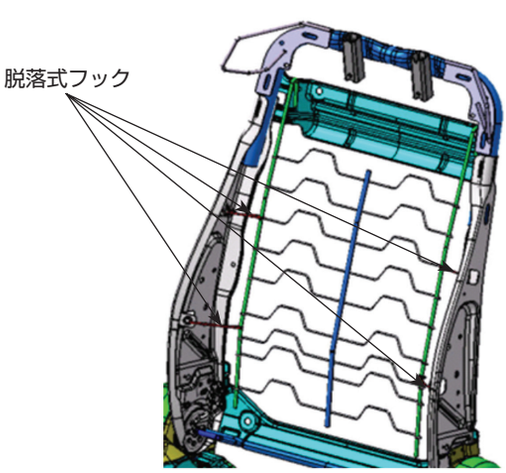
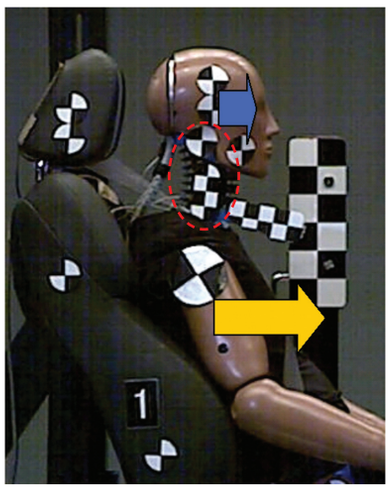
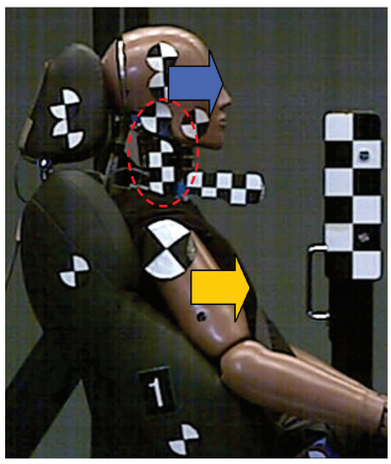


Fig. 11　Detachable hook



上体と頭部の相対加速度が大きくなると頸部で発生する剪断・曲げ荷重も大きくなり、鞭打ちリスクが高まる

Fig. 12　Dummy behavior with conventional seat



上体をシートへ積極的に沈み込ませることで上体Gが抑えられ頭部Gの立上りが早くなる。結果、相対加速度が小さくなり頚椎への負荷が減る。

Fig. 13　Dummy behavior with detachable hook seat

後面衝突時における脱落式フックによるダミーの挙動の違いをFig. 12とFig. 13に示す。

4.　まとめ

座り心地開発については、完成したシートをパネラー評価し、ホールド感、ランバー支持感について大変好評なコメントが得られ目標の確からしさを確認できた。

一方で相反する性能とされた鞭打ち安全性能も社内目標を達成し、IIHSでの公式評価も最高評価である“Good”を獲得できた。スポーティーシートと鞭打ち安全性能を高い次元で両立できたといえる。

5.　おわりに

スポーティーシートの開発に多大な御協力を頂いたサプライヤーの皆様、関係部署の皆様に深く感謝申し上げます。

【著　者】

藤岡　豊二

浅野　恵一

長谷川 拓也

運転支援システム「EyeSight（ver.3）」の開発

Development of Driving Assist System “EyeSight（ver.3）”

木　戸　辰之輔[*1] Shinnosuke KIDO
片　平　　聡[*1] Satoshi KATAHIRA
伊　東　　涼[*1] Ryo ITO
加　藤　寛　基[*1] Hiroki KATO
小　山　　哉[*1] Hajime OYAMA
玉　置　　健[*2] Takeshi TAMAKI
前　田　晋之介[*3] Shinnosuke MAEDA

抄　録

スバルは、ステレオカメラシステムを全面刷新した運転支援システム「EyeSight（ver.3）」を開発し、レヴォーグに搭載した。本システムでは、ステレオカメラの視野角・視認距離の約40%拡大により、物体認識性能を向上させた。また、新たにカラー画像を用いてブレーキランプ点灯・赤信号の認識を可能とした。これらにより、プリクラッシュブレーキ、全車速追従機能付クルーズコントロール機能の安全性・利便性を向上させた。さらに、新機能としてアクティブレーンキープ、プリクラッシュステアリングアシスト、AT誤後進抑制機能制御を搭載し、スバルが目指す「自動車による事故をゼロにすること」に向け、更なる安全性の向上と運転負荷の軽減を実現した。

Abstract

Subaru has developed the “EyeSight（ver.3）” with a totally new stereo camera equipped. This new EyeSight is mounted in SUBARU LEVORG. This stereo camera system has improved the object recognition performance by expanding the view angle and recognition distance by about 40%. This system was also revised to recognize brake lamps and red traffic signals by using color images. The completed “EyeSight（ver.3）” has improved pre-crash braking and adaptive cruise control performances. The “EyeSight（ver.3）” has some new additional functions and they are described in detail in this paper.

1．まえがき

近年、車両の安全性能向上やドライバの運転負荷軽減を目的とした、レーダやカメラなどのセンサによる、先進運転支援システムの開発が盛んである。先進運転支援システムには、アダプティブクルーズコントロール（ACC）、前方衝突回避など様々な機能が搭載される。2013年には米国IIHSにより先進運転支援システムを用いた前方衝突回避の評価が行われるなど、世間の関心も高まっている。

この流れに先駆け、スバルは、1999年に世界で初めてステレオカメラによる運転支援システムを発売した。このシステムでは、ステレオカメラで先行車と白線を検知することによって、ACCと車線逸脱警報（LDW）を実現している。2003年にはミリ波レーダとステレオカメラを統合したシステムを発売している。これは、運転支援機能をより充実させるためのものであった。

しかし、ステレオカメラとレーダを組み合わせたシステムはコストが高い。この問題を解決するため、ステレオカメラのみによりプリクラッシュブレーキや全車速ACCなどを実現したシステム「EyeSight」を、2008年に発売した。2010年には、プリクラッシュブレーキでの完全停止を実現した「EyeSight（ver.2）」を発売している。

ステレオカメラは、レーダと比較して物体の形状、大きさ、位置を正確に検出できる。その結果、歩行者やその他の物体に対する衝突を正確に判定することができる。このため、スバルのステレオカメラによる運転支援システムは、レーダによるシステムと比較してプリクラッシュブレーキの性能が高い。これは、IIHSの評価結果からも明らかである。

＊1 先進安全PGM
＊2 車両研究実験第一部
＊3 電子商品設計部

安全性能向上とさらなる運転負荷軽減のために、スバルは、ステレオカメラの視野角・視認距離の40%拡大、センサのカラー化などを行った全く新しいステレオカメラを開発した。このステレオカメラでは、先行車のブレーキランプや赤信号の認識を行うことが可能である。そして2014年、この新しいステレオカメラを中心とした運転支援システム「EyeSight（ver.3）」を量産化することができた。このシステムでは、ハードウェアの変更と、新しいアルゴリズムの開発などにより、ACCおよびプリクラッシュの性能を向上し、スバルが目指す「自動車による事故をゼロにする事」に向け、さらなる安全性の向上と運転負荷の軽減を実現した。

本稿では、運転支援システム「EyeSight（ver.3）」の機能とメカニズムについて述べる。

2. システム全体概要

システムの概要をFig. 1に示す。新型ステレオカメラは大きく「撮像部」「認識制御部」及び、「車両制御部」に分かれ、制御対象物を捕捉・認識後、車両制御部にて制御目標値を決定する。また、各ECUとの通信はCANバスを通じて行われるシンプルな構成としている。

EyeSight（ver.3）では「安心・安全」を追求していくため、従来の“走る”“止まる”制御に加えて、“曲がる”制御を実施することでクルマの基本性能全てを制御可能とした。具体的には新たに電動パワーステアリング（EPS）ECUと協調制御することで「車線逸脱抑制制御」「車線中央維持制御」を実現した。また従来の前方への踏み間違い事故防止技術に加え、後方への踏み間違い事故防止対策として「後退飛出し抑制」「後退速度リミッタ」、トルクベクタリング機能を応用した「危険回避アシスト」を実現した。

加えて認識範囲の望遠化、広角化及び、カラー化により従来機能である「プリクラッシュブレーキ」「追従機能付全車速クルーズコントロール」の高性能化を実現した。

3. ステレオカメラ

本システムに搭載した、新規開発のステレオカメラは第4世代品となる。第4世代ステレオカメラの外観をFig. 2に示す。

本章ではまず、従来までのステレオカメラからの代表的な変化点の概要、次に、第4世代ステレオカメラのハードウェアについて、最後に、画像認識処理について、順に説明していく。

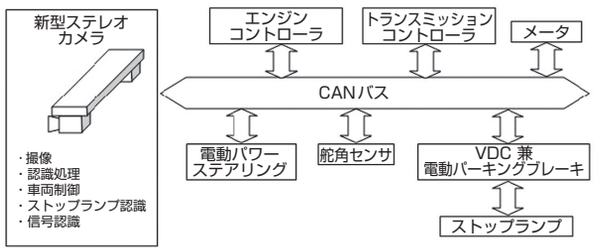


Fig. 1　System outline

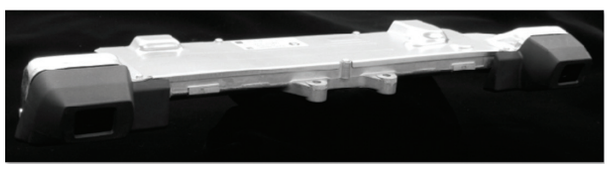


Fig. 2　Appearance of stereo camera

3.1　従来のステレオカメラからの変化点概要

今回全面的に刷新したステレオカメラにおける、従来からの代表的な変化点は以下となる。

まず1つ目は、センサである。従来のEyeSightで採用されていたモノクロCCDセンサから、カラーCMOSセンサに変更した。これにより、CCDカメラ固有の問題であったスミアが無くなり、逆光時の性能が改善されている。また、望遠化・広角化のためにセンサを高解像度化している。

センサの変更に伴い、3D画像処理エンジンを刷新し、カラー化および高解像度化に対応したのが2つ目の代表的な変更点である。ブレーキランプの認識や信号機の認識など、カラー画像を用いた画像認識処理を高速化するための、カラーの特徴量を抽出する回路も、この3D画像処理エンジンに搭載されている。

3つ目は、画像認識処理の性能向上と、ブレーキランプ認識、信号機認識処理の追加である。カメラの望遠化、広角化に加えて、画像認識処理を高性能化する事で、プリクラッシュブレーキや全車速ACCの性能向上に大きく貢献している。

3.2　第4世代ステレオカメラのハードウェア

第4世代ステレオカメラは、Fig. 3に示すようなハードウェア構成としており、第3世代と基本構成は同じである。撮像、認識、制御演算部をすべてステレオカメラ内部に集約しているという特徴は、そのまま引き継がれている。

左右のカメラから出力された映像信号は、3D画像処理エンジンにおいて、感度補正、幾何補正処理を経てステレオマッチング、信頼性判定、カラー特徴量抽出を実施し、距離画像、信頼性判定出力、カラー特徴量を画像認識マイコンへ転送、画像処理する。その後、画像処理の結果を制御マイコンへ転送し、制御演算を

実施。最終的に、制御マイコンからエンジンコントローラなどの各構成部品へCAN通信で制御情報を出力している。

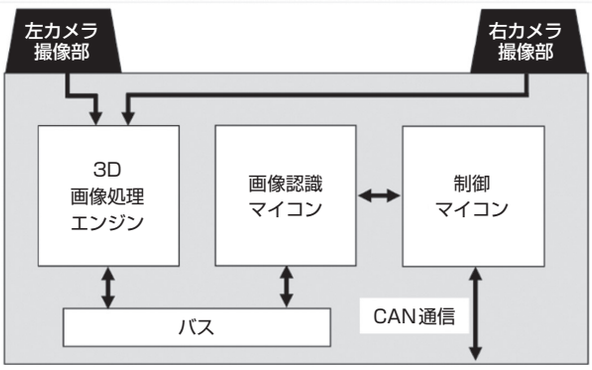


Fig. 3　Stereo camera hardware configuration

3.2.1　3D画像処理エンジン

3D画像処理エンジンの外観をFig. 4に、内部ブロックをFig. 5に示す。

従来の3D画像処理エンジンと大きく異なるのは、カラー特徴量の抽出回路が加わった事と、感度補正回路に左右カメラのカラーバランスを調整する処理が加わった事である。

カラー特徴量の抽出回路では、画像上の全画素について、1画素ごとに、認識対象物体の色であるかを判定し、その結果を出力している。例えばブレーキランプを認識したい場合は、その画素が赤色であるかを判定し、ブレーキランプの色であることを出力する。このカラー特徴量評価により、処理不可の大きなカラー画像処理を高速化し、ブレーキランプや赤信号の認識を可能としている。Fig. 6において、赤く塗りつぶされている部分が、ブレーキランプのカラー特徴量が出力されている領域の例である。

3.3　画像認識処理

3D画像処理エンジンから出力される距離画像、信頼性出力、カラー特徴量出力は、画像認識マイコンに転送され、画像認識処理が実行される。

全車速ACCやプリクラッシュブレーキに用いている、距離画像による制御対象物の検出手法の基本的な処理は、従来通りである。本章では、新規に開発されたカラー特徴量出力を用いた、ブレーキランプおよび赤信号の認識について述べていく。また、EyeSight（ver.3）の代表的な新機能であるアクティブレーンキープにおける車線認識処理についても簡単に述べる。

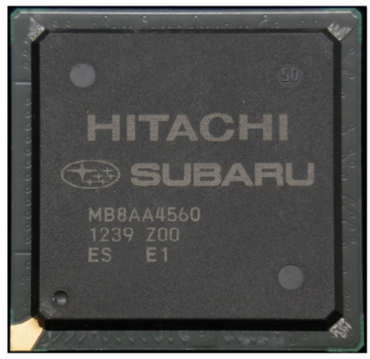


Fig. 4　Appearance of 3D image processor engine

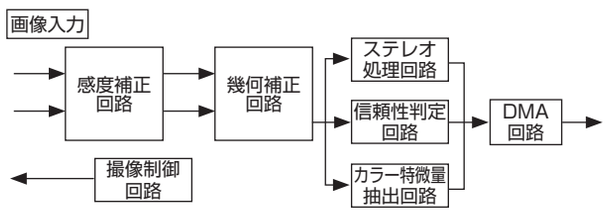


Fig. 5　Interior block of 3D image processing engine

3.3.1 ブレーキランプ認識

ブレーキランプ認識には、距離画像、およびカラー特徴量出力が用いられている。

ブレーキランプ認識では、まず初めにカラー特徴量出力のグルーピングを行う。画像内のブレーキランプのカラー特徴量が出力されている画素から、同じカラー特徴量が抽出されている隣接した画素同士をグループ化していく。そして、グループ化されたブレーキランプのカラー特徴量は、ブレーキランプの候補とされる。

次に、ブレーキランプ候補を立体物の情報と関連付ける。そして、それがハイマウントストップランプであるか、左右対称に設置されているかなど、ブレーキランプらしさの判定を行う。

ブレーキランプであると確定した場合は、関連付けられた立体物がブレーキを踏んでいると判定し、制御マイコンに出力する。

3.3.2　赤信号認識

信号認識においても、カラー特徴量出力のグルーピングを初めに行う。信号機のカラー特徴量が出力されている画素から、同じカラー特徴量が抽出されている隣接された画素同士をグループ化していき、信号機の候補とする。

次に、その信号機候補の形状、大きさを計算し、信号機の特徴と合致するかを判定する。

信号機の特徴と合致していれば、それが信号機であると判断し、信号機までの距離と信号機の色を制御マイコンに出力する。認識した信号機が赤信号である場

合は、矢印信号の認識処理を行う。矢印信号の認識は、赤信号の周辺の矢印信号が存在しうる領域の中で、矢印信号らしき青緑の模様と信号機の背景部分と考えられる暗い領域とを合わせて検出した際に、矢印信号として検出するものである。

信号機の色情報などと同様に、判定から得られた矢印信号の点灯状態を制御マイコンに出力する。

先述のブレーキランプ認識及び、信号認識の認識結果の例をFig. 7に示す。図中に赤色の十字が描かれている部分が、赤信号およびブレーキランプの認識結果である。

Fig. 6　Example of color feature output

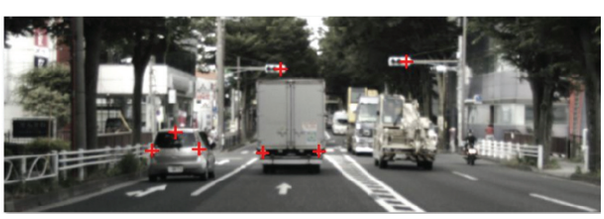


Fig. 7　Example of recognition results of brake lamp and red traffic signal

3.3.3　車線認識

車線認識は大きく分けて、白線候補点の検出、車線形状データの算出、特殊な車線形状への対応、車線認識結果によるシステム動作／停止判断、という処理に分かれており、これらの処理により道路環境上の様々な問題へ対応している。詳細は本号別報[9]を参照して頂きたい。

4.　運転支援機能

4.1　運転支援機能概要

EyeSight（ver.3）では、以下に挙げる複数の運転支援機能を実現している。

・プリクラッシュブレーキ
・プリクラッシュブレーキアシスト
・プリクラッシュステアリングアシスト（新機能）
・全車速ACC
・アクティブレーンキープ（新機能）
・AT誤発進抑制制御
・AT誤後進抑制制御（後退速度リミッタ）（新機能）
・車間距離警報
・車線逸脱警報
・ふらつき警報
・先行車発進お知らせ

本稿では、EyeSight（ver.3）において特徴的である、プリクラッシュブレーキ、全車速ACC、アクティブレーンキープについて記載する。尚、アクティブレーンキープ及びAT誤後進抑制制御については、本号別報[9]を参照して頂きたい。

4.2　プリクラッシュブレーキ

従来のアイサイトと比較し、新しいアイサイトシステムでは下記の三点を改善し、安全性を向上した。

一つ目は、衝突回避が可能な速度範囲を約50 km/hまで引き上げたことである。従来は30 km/hであった。これは、望遠性能の向上と物体認識物体認識アルゴリズムが強化されたことにより、より早い段階から障害物を識別し、プリクラッシュブレーキが必要な対象物かどうか判断することが可能になったため、実現した。

また、ブレーキ制御の継続時間が長い場合、減速度を変化させ、よりドライバへの警告を実施している。この例をFig. 8に示す。

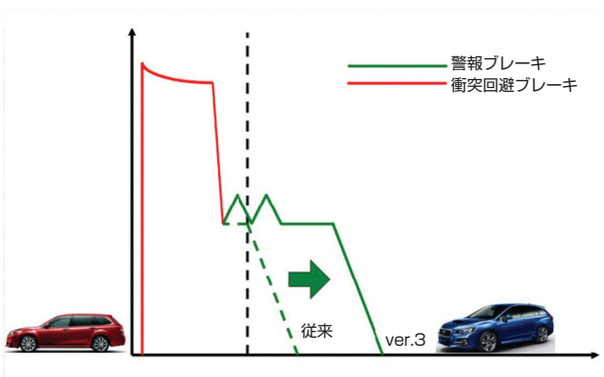


Fig. 8　Example of deceleration speed of pre-crash brake

二つ目は、歩行者の横断への対応性能が上がっていることである。これは、ステレオカメラの視野角が40%拡大したことにより、横位置検知領域が拡大すると共に、横位置、横速度の精度を向上させた。その結果から衝突予測を推定し、プリクラッシュブレーキを実施している。

三つ目は、先行車の減速中への衝突回避性能の向上である。これは、ブレーキランプを認識することで、

ドライバ干渉が起こりにくいことを考慮し、プリクラッシュブレーキの介入を早める。その結果速度低減量が向上することで、性能向上を実現している。Fig. 9に、この例を示す。

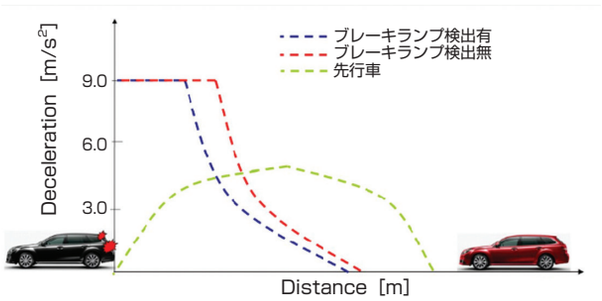


Fig. 9　Example of deceleration speed of pre-crash brake when brake lamp is recognized

4.3　全車速ACC

ステレオカメラがカラー化したことにより先行車ブレーキランプ検知、信号検知が可能となり、より交通環境に即した安全性に優れる性能を実現した。また高い望遠性能を備えたことで遠方から先行車を検知することが可能となり、スムーズに追いつき出来るようになった。

4.3.1　先行車ブレーキランプ制御

先行車が減速を開始したときに車両挙動が現れるタイミングとブレーキランプが光るタイミングは、車両挙動＜ブレーキランプ、となるため車両挙動に現れるのを待ってから減速するより早い応答が可能となり、よりスムーズで安全な減速フィーリングを実現した。

Fig. 10で示すとおり先行車のブレーキランプを検知している場合は検知後に先行車の減速に合わせ緩やかに減速していることがわかる。

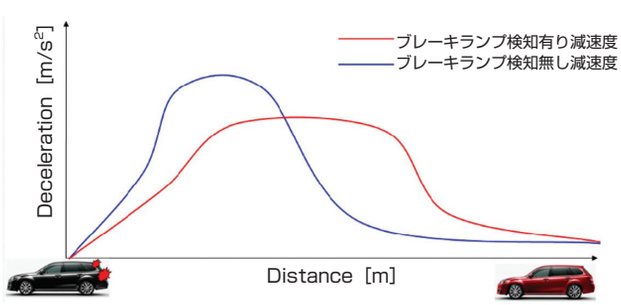


Fig. 10　Example of deceleration speed when brake lamp is detected

4.3.2　赤信号検知による加速抑制

減速中に信号を検知した場合、加速を抑制することで危険を減らすことが出来る。例えば先行車に追従中、離脱し右折レーンに単独で進入した場合、加速を抑制することで余計なブレーキ操作や飛び出しを防止できる。Fig. 11で示すとおり信号を検知している場合は加速が緩やかとなり、不用意な加速を抑制していることがわかる。

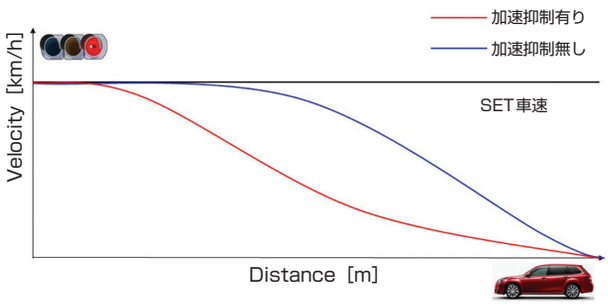


Fig. 11　Example of acceleration suppression effect when red traffic light is detected

4.3.3　望遠性能向上による効果

遠方から先行車を検知することで余裕を持った減速が可能となり、スムーズな追いつきを実現した。Fig. 12で示すとおり、遠方より先行車を検知することで速やかに減速を開始させ最大減速度を抑えることでスムーズなフィーリングを実現していることがわかる。

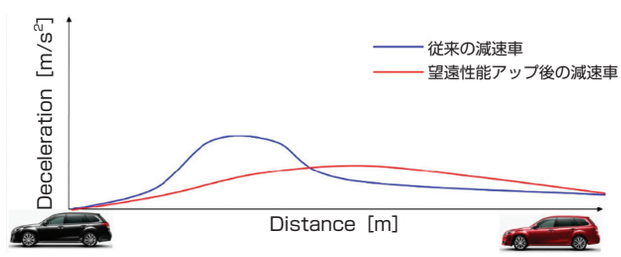


Fig. 12　Change in deceleration after telescopic performance is improved

4.4　アクティブレーンキープ

EyeSight（ver.3）では横方向の安全向上、利便向上をはかるため、アクティブレーンキープを導入した。これらはEyeSightによる白線認識機能を用い、EPSをアクティブに操舵することで、高速道、自動車専用道での運転負荷の軽減と車線逸脱による事故の抑制を図った。「車線中央維持」（Fig. 13）と「車線逸脱抑制」（Fig. 14）の2機能を持ち、車線内走行でのドライバとの操作干渉を考慮しドライバにより選択できる構成とした。

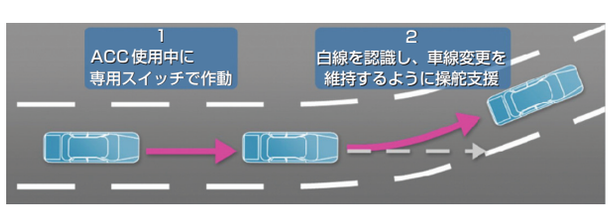


Fig. 13　Lane center keeping function

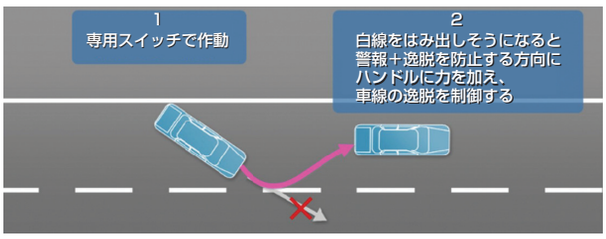


Fig. 14　Lane departure prevention function

4.4.1　車線中央維持機能

車線中央維持機能は車線中央を走行できるよう、ステアリングにトルクを連続で付加する。積極的な運転負荷軽減機能として機能するため、ACC作動中に連動して作動させることで、ドライバへの支援イメージを統一した。

車線中央維持支援機能は車速65 km/h以上、直線および緩曲線、両側の白線が充分に検知できている、これらすべてを満たしているときに作動する。

4.4.2　車線逸脱抑制機能

車線逸脱抑制機能は運転者が意図しない車線逸脱による事故低減を図るため、車線からはみ出しそうになると、ステアリングに短時間トルクを発生することで、逸脱を抑制する機能である。

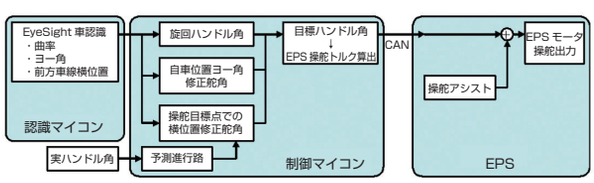


Fig. 15　System configuration diagram
(Lane center keeping)

4.4.3　システム概要

アクティブレーンキープのシステム構成図をFig. 15に示す。EyeSightカメラにより車線位置検知、制御指示を行う。

EyeSightによる白線認識機能から、アクティブレーンキープ制御に必要な自車と車線位置関係を検出する。検出された曲率、前方車線位置、対車線ヨー角を基に、カーブ旋回制御、対車線ヨー角修正制御、車線内自車横位置修正制御を行い、それぞれに必要な付加操舵力を算出する。

車線維持に必要な付加操舵トルクはカメラ内の制御マイコンからCANによりEPSに指示される。操舵アクチュエータはEPSであり、EPSは通常の操舵力アシスト制御に加え、外部指示により付加操舵力を出力できるよう専用開発した。

5.　HMI（ヒューマンマシンインターフェース）

本システムの表示類は全てコンビネーションメータ内に組込んだ。これはドライバの視線移動を最小限に抑えることが可能であり、安全上最も優れた配置と考える。構成はマルチインフォメーションディスプレイ及び、表示灯（インジケータ）である（Fig. 16）。

EyeSight（ver.3）では操舵支援機能の追加に伴い表示アイコンが増えるため、マルチインフォメーションディスプレイのレイアウトを最適化し、ドライバにとって更に分かり易い表示を実現した（Fig. 17）。

ドライバは運転操作中という緊張状態であるため、マルチインフォメーションディスプレイ情報の確認は瞬時に行う必要がある。求められる表示仕様は“明瞭明確”であり、使用アイコン、文字及び、数値のレイアウトに配慮した。新たに追加した「車線中央維持制御」、「後退速度リミッタ」の主な表示例をFig. 18に示す。

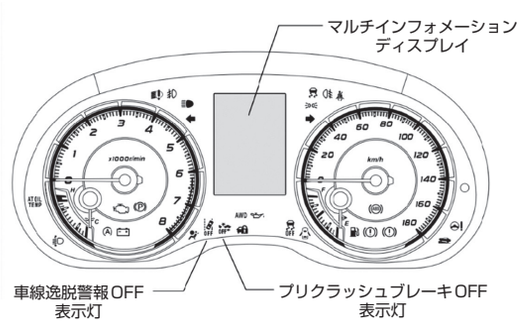


Fig. 16　Combination meter

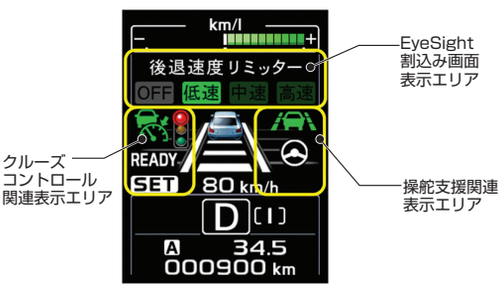


Fig. 17　Multi-information display

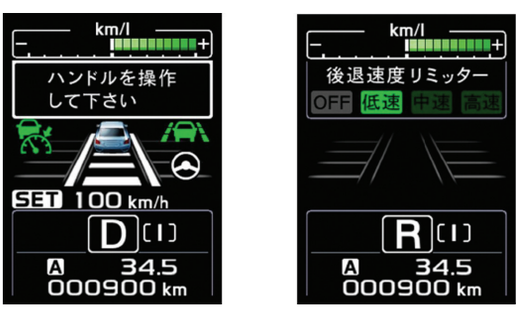


Fig. 18　Example of lane center keeping control (Left),
backward speed limiter (Right)

6. まとめ

EyeSight（ver.3）では、ステレオカメラの全面刷新を行い、ステレオカメラとしての基本性能の向上に加え、ブレーキランプ、信号機と言った、従来以上に高度な走行環境の検知を可能とした。これらにより、従来からの機能の性能向上に加え、複数の新機能を搭載し、更なる安全性、運転負荷の軽減を実現し、スバルが目指す「自動車による事故をゼロにする事」に向け、歩を進めた。

7. 謝辞

最後に、本製品の開発に多大なるご協力を頂きました関係者の皆様に、心より御礼申し上げます。

参考文献

(1) 実吉ほか：三次元画像処理による道路形状と障害物の認識、自動車技術、Vol.46、No.4（1993）、p23-27
(2) 実吉ほか：自動車用予防安全システムのためのステレオ画像認識システム、スバル技報、No.24（1997）、 p.10
(3) K.Hanawa. *et al.*：Development of Stereo Image Recognition System for ADA, IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2001
(4) 十川ほか：ステレオ画像認識による道路形状と障害物の認識、自動車技術、Vol.56（2002）、p.34-39
(5) 村松ほか：走行環境理解のための画像認識技術、自動車技術、Vol.61 No.2（2007）
(6) S.Katahira. *et al.*：Development of an Advanced Stereo Camera System, 14th Asia Pacific Automotive Conferrence（2007）
(7) 関口ほか：新開発ステレオカメラによる運転支援システムの開発、スバル技報、No.35（2008）、p.109-119
(8) T.Saito. *et al.*：Next Generation Driving Assist System Using New Stereo Camera, FISITA（2008）
(9) 水谷ほか：アクティブレーンキープ・AT誤後進抑制機能の開発、スバル技報、No.41（2014）

【著　者】

木戸 辰之輔

片平　　聡

伊東　　涼

加藤　寛基

小山　　哉

玉置　　健

前田 晋之介

アクティブレーンキープ・AT誤後進抑制機能の開発

Development of Active Lane Keeping and Backward Throttle Management

水谷公一[*1] Koichi MIZUTANI
小山哉[*2] Hajime OYAMA
寺澤武[*2] Takeshi TERAZAWA
田村悠一郎[*2] Yuichiro TAMURA
中島博人[*2] Hiroto NAKAJIMA
白石英一[*3] Eiichi SHIRAISHI
江副志郎[*3] Shiro EZOE

抄録

新型車レヴォーグにEyeSight（ver.3）の新機能としてアクティブレーンキープとAT誤後進抑制機能を搭載した。

アクティブレーンキープはステレオカメラの白線認識機能を用い①車線中央を走行するようにステアリングにトルクを連続的に付加する車線中央維持機能、②車線からはみ出しそうになった時に車線中央に戻すようステアリングにトルクを短時間付加する車線逸脱抑制機能、の2つの機能があり、ユーザにより選択できる。

AT誤後進抑制機能は追加センサなしで後退時のアクセル踏み間違い事故の被害軽減を図った機能であり①アクセルが必要以上に踏み込まれたとシステムが判断したときに急な後退を抑制する後退飛び出し抑制、②ドライバがあらかじめ設定した値に車速を制限し、必要以上に加速しないように制御する後退速度リミッターの2つの機能を有する。

Abstract

SUBARU developed active lane keeping and backward throttle management system as new functions of the EyeSight (ver.3) for SUBARU LEVORG.

Active lane keep-ing, by utilizing the lane mark recognition of stereo cameras, provides two functions: lane center keeping (to help the vehicle stay in the center of driving lane) and lane departure prevention (to help the vehicle stay in the same lane). Drivers can choose which function to use.

Backward throttle management reduces damage when the driver intends to go backward but mistakenly presses accelerator pedal. Without additional switch installation, backward throttle management provides two functions: throttle management (to suppress sudden backward acceleration) and speed limiter (to limit the car speed to the speed preset by the driver.)

1. まえがき

「自動車による事故をゼロにすること」を目指し、事故防止に有効な安全技術として、ドライバを積極的にアシストする先進安全システムの開発を進めてきた。

今回レヴォーグに搭載したEyeSight（ver.3）では、EyeSight（ver.2）までに実現してきたプリクラッシュブレーキ、全車速追従機能付クルーズコントロール（ACC）等の前方向の予防安全・利便機能に加え、横方向および後方向の予防安全・利便機能の進化を図った。今回、新たな横方向の支援システムとして車線内走行を支援するアクティブレーンキープ、後方向の支援システムとしてAT誤後進抑制機能を導入した。

本稿では前半でアクティブレーンキープ、後半でAT誤後進抑制機能を紹介する。

＊1 電子商品設計部
＊2 先進安全PGM
＊3 シャシ設計部

2. アクティブレーンキープ

2.1 概要

アクティブレーンキープは高速道路・自動車専用道路での使用を意図し、よそ見や注意散漫による高速域での路外逸脱を未然に防止することが目的である。

ステレオカメラの白線認識機能を用い①車線中央付

近を走行するようにステアリングにトルクを連続的に付加する車線中央維持機能、②車線からはみ出しそうになった時に車線内に戻すようステアリングにトルクを短時間付加する車線逸脱抑制機能、の2つの機能が選択できる。

これらはドライバの運転操作による干渉を考慮し、車線中央付近でのアシストの有無で機能を分離し、ドライバにより選択可能な構成とした。

アクティブレーンキープはステアリングに用意されたアクティブレーンキープスイッチをONにすることにより、作動スタンバイ状態となる。

このとき以下の状態が満たされた時、アクティブレーンキープが作動する。

○車速65 km/h以上
○両側白線が認識できている
○直線または緩い曲線である

(i) 車線中央維持機能

車線中央維持機能は車線中央付近を走行するようにステアリングにトルクを連続で付加する機能である。本機能はACCが作動中のみ使用可能である(Fig. 1)。

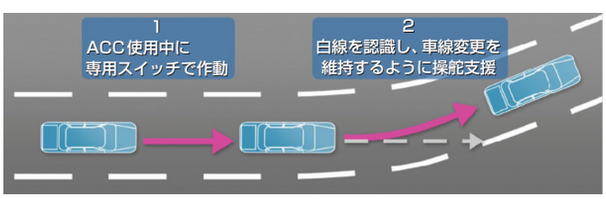


Fig. 1　Active lane keep（Lane center keep）

(ii) 車線逸脱抑制機能

車線逸脱抑制機能は運転者が意図しない車線逸脱による事故低減を図るため、車線からはみ出しそうになると、ステアリングにトルクを発生することで、逸脱を抑制する機能である(Fig. 2)。

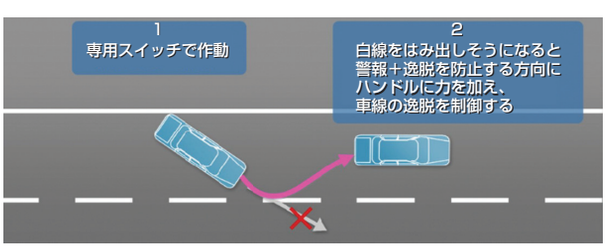


Fig. 2　Active lane keep（Lane departure prevention）

2.2.　システム構成

システムはステレオカメラ、電動パワーステアリング(EPS)、メータ、メインスイッチから構成される(Fig. 3)。

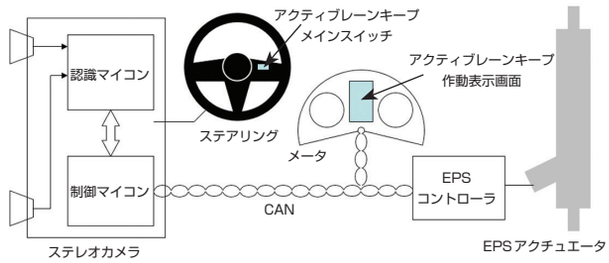


Fig. 3　System configuration

本システムはステレオカメラがセンサとコントローラの役割を持つ。ステレオカメラで撮像した前方画像から、認識マイコンにより白線を抽出する。抽出された白線は自車座標系に変換され、制御に必要な白線状態量として制御マイコンに引き渡される。制御マイコン内では自車の白線との位置関係から車線維持ができるよう付加操舵力が算出される。付加操舵力はステレオカメラからCAN経由でEPSコントローラに指示される。

EPSコントローラは通常の操舵力アシスト制御に加え、外部からの指示トルクが受けられるよう機能が追加され、ステレオカメラからの指示によりアクティブレーンキープをおこなうための操舵力を出力する。

ステアリングに設置されたメインスイッチ状態を判断し、制御状態等のユーザへの通知はCAN経由でメータ中央のディスプレイに表示する。

またEPSのトルクセンサ入力や車線位置情報からドライバの操作状態を検知し、車線変更などの意図的な操舵や、ドライバがステアリングを充分に保舵していないときは、アクティブレーンキープ機能を停止する。

ステレオカメラとEPSコントローラ間は相互作動状態の確認をおこなっており、どちらかのユニットが失陥した場合は、アクティブレーンキープは速やかに停止する。

2.3　車線認識処理

車線認識の概要について紹介する。

2.3.1　カメラ座標系

カメラ座標系をFig. 4のとおり定義する。

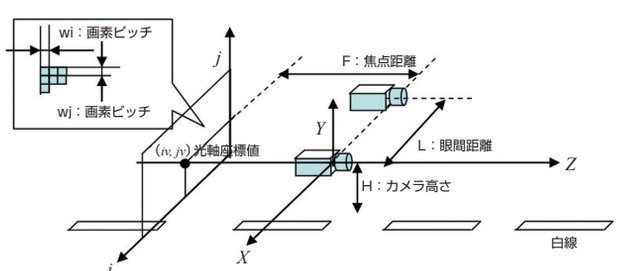


Fig. 4　Camera coordinate system

2.3.2　白線候補点検出

車線認識は、ステレオカメラ内の認識マイコン内で処理される。右カメラで撮像された画像上において、車線中央から路肩側に向け輝度が急激に変化する画素を探索する。

Fig. 5のように路面と白線との境界を白線候補点として検出する。検出した白線候補点の画像上座標値(i, j)と、視差値Dをそれぞれ算出する。

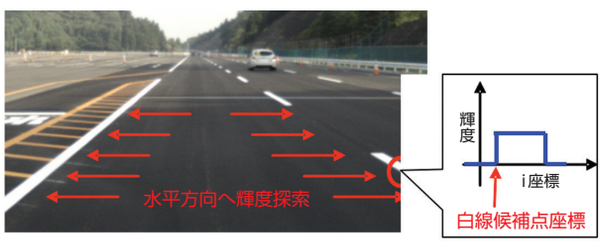


Fig. 5　Image filmed by right camera

2.3.3　車線形状データの算出

算出された画像上の座標値から、白線候補点を実空間座標平面へ変換する。

$$X = \left\{X_{offset} + L(i_n - i_v)\right\} / D \quad \cdots (1)$$

$$Z = LF / W_j D \quad \cdots (2)$$

なお、X_{offset}は車両中心位置と右カメラ取り付け位置との距離、i_nは白線候補点の画像上の座標値、i_vは水平方向の光軸の座標値を示す。次に、白線候補点の実空間座標値を元に車線モデルの生成を行なう。近似式を(3)、(4)のように設定し、未定定数であるa、b、cを最小二乗法により同定することで生成する。

$$X_{ml} = a_l Z_m^{\,2} + b_l Z_m + c_l \quad \cdots (3)$$

$$X_{mr} = a_r Z_m^{\,2} + b_r Z_m + c_r \quad \cdots (4)$$

ここでaは車線形状の曲率成分、bは車線との傾き成分、cは車線横位置に相当する。上記、車線形状モデルによって、車線曲率、対車線ヨー角、車線横位置、先方横位置を算出する(Fig. 7参照)。なお、これらは、左右の平均値に処理し、制御マイコンへ転送している。

2.3.4.　特殊な車線形状への対応

白線は、実線、または破線で描いたものが一般的だが、車線区画線の内側に破線を描いた二重となった車線も存在する。本システムでは、これら特殊な車線に対応している。Fig. 8のように、内側の白線の候補点(赤)と、外側の白線の候補点(青)とに分離し、車線近似モデルを生成する。これによって大部分の特殊白線においてFig. 9(緑線)のように正確な車線認識が実現できている。

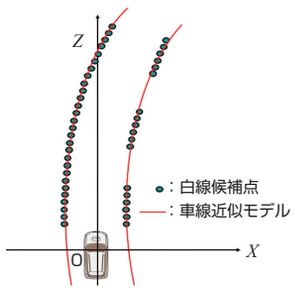


Fig. 6　Lane proximity model

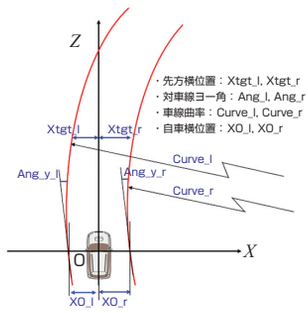


Fig. 7　Various lane data

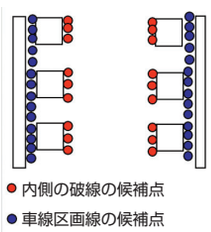


Fig. 8　White lane candidate point

Fig. 9　Recognition result of special white lane

2.3.5　車線認識結果によるシステム停止判断

下記のように認識が十分に行えない場面では、システムの動作停止判断を実施している。

①白線が路面に存在しない場合

②認識した車線形状モデルが安定しない場合

③検出している線が白線ではない場合

例えば、雪筋を線として検出する場面においても、操舵制御が誤って作動しないよう、路面のコントラストやエッジ値等を用いて、白線との違いを判定し、アクティブレーンキープの動作を停止するようにしている。

2.4　車線中央維持機能

ステレオカメラより得られた車線位置情報から、車線中央を連続して維持するのに必要な操舵角、操舵トルクを算出する(Fig. 10)。本システムは、カーブを旋回するためのフィードフォワード(FF)制御と、前方車線位置・自車ヨー角から車線中央の走行維持を行なうフィードバック(FB)制御を組み合わせ、車線中央維持走行を実現した。

フィードフォワード項はカーブを旋回するための操舵角を算出する。曲率に対応する旋回操舵角は実車計測の値をベースに車速ごとに設定した。

フィードバックは、下記3種の項を持つ。

ヨー角FB：自車対車線ヨー角を車線と平行にする操舵角。

横位置FB(遠方)：先方車線目標位置から自車予測進行横位置の偏差を0にする操舵角。

横位置FB(近傍)：先方車線目標位置から白線曲率

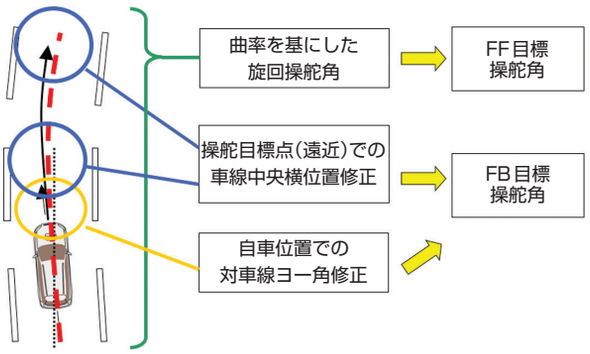


Fig. 10　Calculation of target control steering angle

分の横位置の偏差を0にする操舵角。

これらの各項から算出された操舵角を合算してFF目標操舵角、FB目標操舵角として算出する。

2.4.1　EPS指示値の算出

算出された目標操舵角より、目標となるEPSへの指示トルクを算出する（Fig. 11）。目標操舵角と指示トルクとの関係は、定常旋回時の実測値を基に変換マップを作成した。

この目標操舵角－目標トルク変換マップは車両の状態（車重、タイヤ）により変化する。そのため、舵角-トルクの関係を逐次学習し、補正を行っている。

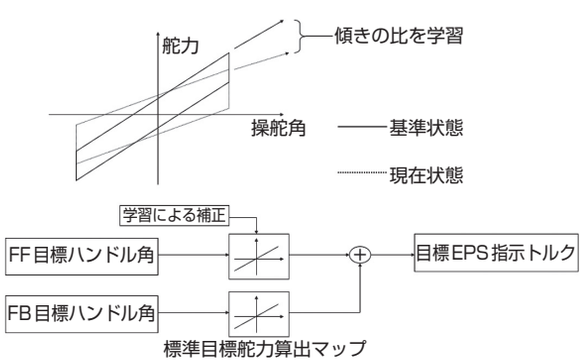


Fig. 11　Calculation of target indicated torque

FB目標操舵角の目標トルクはFFでの算出と同等であるが、直線部では摩擦補償を行い、曲線部では摩擦補償を行わない構成とした。

目標操舵角を実現する当制御は、実操舵角によるフィードバックを行わないオープンループの制御系となるよう構成した。このためドライバによる修正舵操作を受け入れることのできる構成となっている。

下記に実車での車線横位置データを示す。

補正の効果により、タイヤ差があっても車線維持制御が行われていることが確認できる（Fig. 12）。

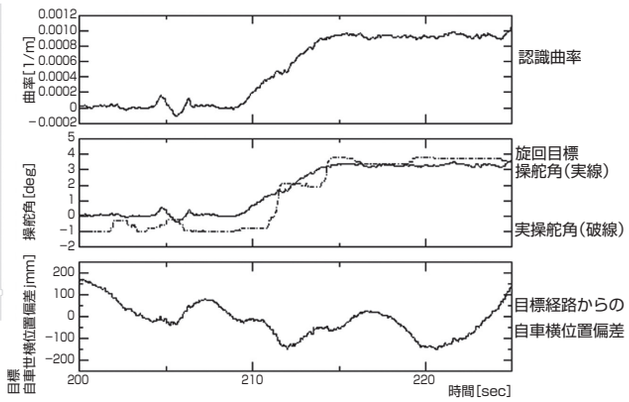


Fig. 12　Example of lane keep control
(straight line → slow curve, studless tire)

2.4.2　アクティブレーンキープ中の操舵感

通常EPSは、ドライバーの操作（操舵トルク）に応じ、EPSモータを動作させることで操舵アシストを実現している。アクティブレーンキープ中は、ドライバー操作とは別入力でEPSモータがアシストするため、通常時のステアリング操舵感と異なる。アクティブレーンキープでは、基本的にEPSモータ電流指示値にステレオカメラからの指示トルクを付加することで実現する（1入力状態）。ステレオカメラで算出された目標操舵角となる指示トルクのため、1入力状態では操舵力リサージュ波形（操舵力－操舵角特性）が舵角方向に移動する（Fig. 13）。この状態では入力値変化（Fig. 13のA⇔B）に伴い操舵力ヒステリシス幅やリサージュ波形が変化する。入力値変化による時々の状況で操舵力・保舵力等が変化し、操舵感に違和感を感じる可能性がある。Fig. 13の赤線部はステアリング切り返し時にステレオカメラからの指示値がAからBまたはBからAへ変化した際の操舵力リサージュ波形を示している。

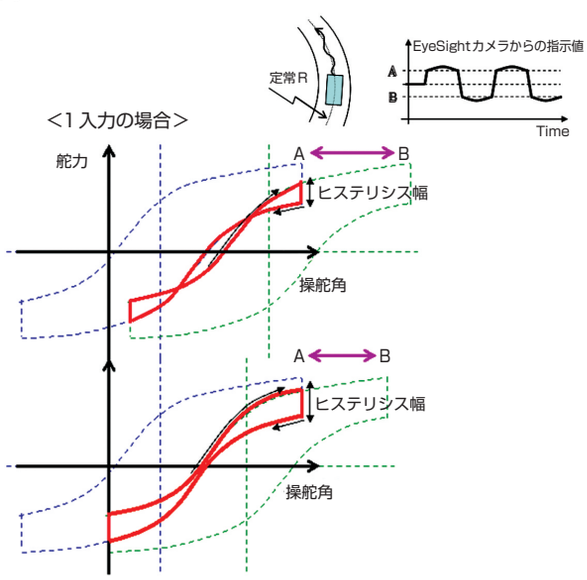


Fig. 13　Steering force Lissajous curve in single input system

操舵感の違和感を緩和するためには、ヒステリシス幅が一定になる様にリサージュ波形を移動させる必要がある。ステレオカメラからの付加モータ電流指示値を基本のモータ電流指示値に加えて、付加操舵トルク指示値をEPSモータ電流演算上流の操舵トルク値に加算し(Fig. 14)、リサージュ波形を操舵力方向へ移動させる(Fig. 15)。

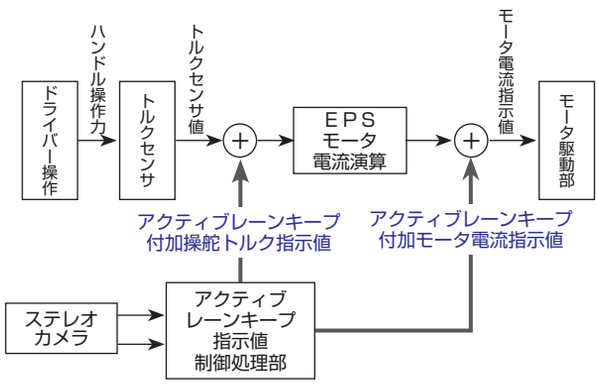


Fig. 14　Two input system block diagram

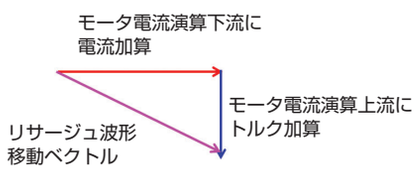


Fig. 15　Vector of Lissajous wave

入力の2系統化(Fig. 14)により、モータ電流指示値による操舵角方向移動分に応じた付加操舵トルク指示値を設定することで、ヒステリシス幅を一定に保つよう設定し、操舵感の違和感を緩和している(Fig. 16)。

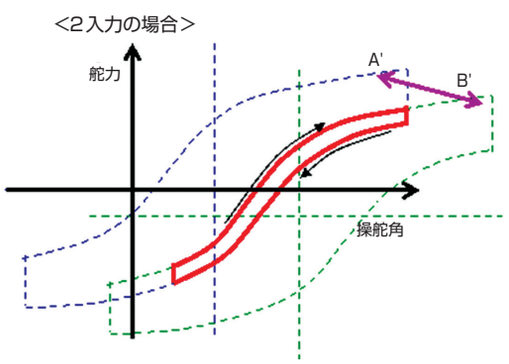


Fig. 16　Steering force Lissajous curve in two input system

2.5　車線逸脱抑制機能

車線逸脱抑制機能の狙いは、通常は運転者の運転操作を邪魔せず、運転者の意図しない車線逸脱による事故被害の低減を行うことである。そのため、システムは将来的に車線逸脱に至りそうな状況を認識し、運転者のステアリング操作が通常時より切り遅れた状況において支援を開始する。車線に対する車両の逸脱時の姿勢角(逸脱ヨー角)に対して、運転者が対応するまでの余裕時間を多く取るため、最終的な目標姿勢角(復帰目標ヨー角)に至るまで操舵制御を行い支援終了する(Fig. 17)。

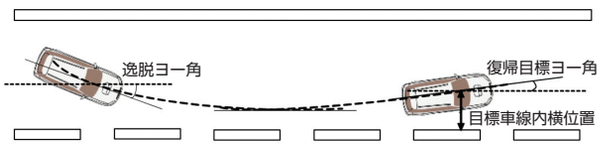


Fig. 17　Behavior of lane departure prevention function

逸脱抑制支援終了後、運転者は自らステアリングを操作することで、意図する車線内の横位置に復帰できる。

このような車両挙動を発生させるための制御系をFig. 18のような構成とした。

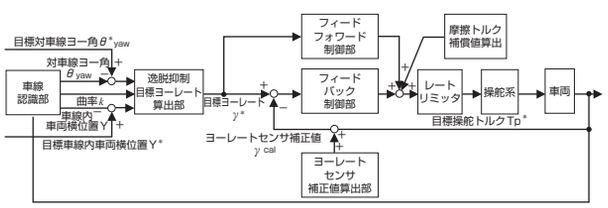


Fig. 18　Control block diagram

車線情報として、車線曲率・対車線ヨー角・車線内の車両横位置を取得する。

次に車両速度Vと車線端と車幅端との距離Y及び対車線ヨー角θ_{yaw}から、車線から車両逸脱が予想される時間(車線逸脱時間)t_{tlc}を(5)式を用いて算出する。車線逸脱時間が所定時間に到達した際に支援開始する。

$$t_{tlc}=Y/V\sin(\theta_{yaw}) \quad \cdots(5)$$

旋回目標値として目標ヨーレートを次式のようにフィードフォワード項と2通りのフィードバック項からセレクトハイで最終目標ヨーレートとして設定される。

$$\gamma^*_{ff}=\kappa V \quad \cdots(6)$$

$$\gamma^*_{tlc}=-\theta_{yaw}/t_{tlc} \quad \cdots(7)$$

$$\gamma^*_{ctrl}=(\theta^*_{yaw}-\theta_{yaw})/t_{ctrl} \quad \cdots(8)$$

$$\gamma^*=\gamma^*_{ff}+\gamma^*_{tlc}(\text{or}\ \ \gamma^*_{ctrl}) \quad \cdots(9)$$

ここで、

κ　：車線曲率

γ^*_{tlc}　：車線逸脱抑制目標ヨーレート

θ^*_{yaw}：目標姿勢角

t_{ctrl}　：目標制御時間

γ^*_{ctrl}：復帰角制御用目標ヨーレート

目標ヨーレートは支援範囲を超えないよう、規定横

加速度Aycから車両速度Vを用いて算出される値で制限される。

$$\gamma^*_{lim} = Ayc / V \quad \cdots (10)$$

目標ヨーレートに対し、フィードフォワード制御項、及び実ヨーレート値をセンサより取得し、PID制御によって目標操舵トルクを決定する。目標操舵トルクは、付加操舵トルクとしてCAN経由でEPSモータに指示され操舵系のピニオン周りのトルクを発生させる。

支援の結果一例を示す(Fig. 19)。制御が作動することにより車線からの逸脱を抑制できていることがわかる。

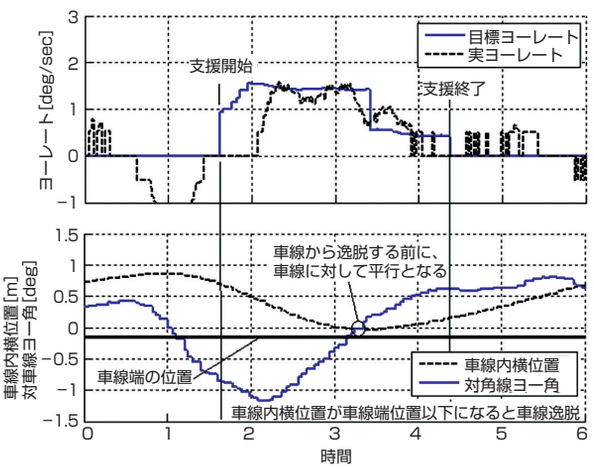


Fig. 19　Example of lane departure prevention support result

3.　AT誤後進抑制機能

3.1　概要

AT誤後進抑制機能は、①ペダルの踏み間違いなどによりアクセルペダルが必要以上に踏み込まれたとシステムが判断したとき、エンジン出力を制限し急な後退を抑制する後退飛び出し抑制機能、②ドライバがあらかじめ設定した値に車速を制限し、必要以上に加速しないように制御する後退速度リミッター、の2つの機能を有する。

本機能は追加の外部環境認識センサを使わずに、後退時のアクセルペダルの踏み間違い事故全体に効果のある事故被害軽減機能を提供するとともに、後退時の運転負荷を軽減することを狙いとしている。

3.2　事故統計調査

近年、特に日本においてペダルの踏み間違い事故に関する注目が高まっている。ペダル踏み間違い事故には以下の特徴がある[(1)]。

①高齢運転者に多く発生している。

②踏み間違い事故の死亡率は高く、全ての交通人身事故平均の約17倍にもなる。

ペダル踏み間違い事故に対応する自動車安全技術は高齢化が進む先進国、特に日本ではさらに重要となっていく。ペダル踏み間違い事故の行動類型別分類[(2)]をFig. 20に示す。緊急回避をしようとしたときにブレーキと間違えてアクセルを踏み込んでしまったケースが全踏み間違い事故の約半分を占めている。この場合、通常のアクセル開度、アクセル速度を超える操作をしているものと考えられる。次に大きな割合を占めるのが、ドライバが普通操作でブレーキを踏もうとしてアクセルを踏み込んでしまったケース(24.6%)である。この場合は、通常のアクセル操作と同等な操作をしているものと考えられる。クラッチもしくはブレーキの誤操作(23.0%)、アクセル踏み過ぎ(4.9%)と続く。アクセルの誤操作に起因するアクセル踏み間違い事故は、全体の77.0%に及ぶ。

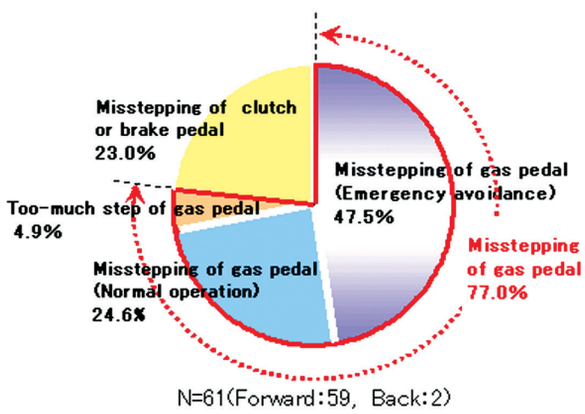


Fig. 20　Accidents classified by miss-stepping types

3.3　システム構成

本システムはステレオカメラ、エンジンECU、VDC、メータ等で構成される(Fig. 21)。

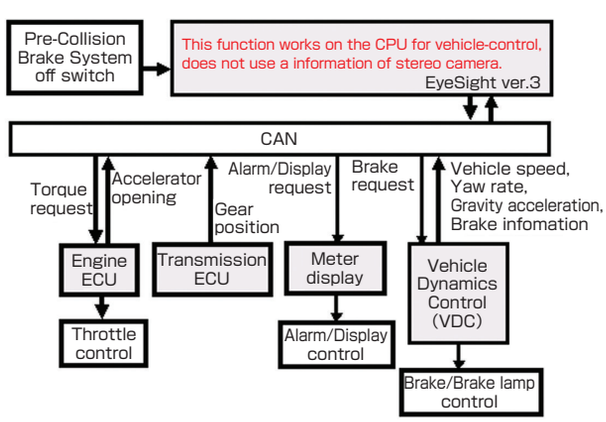


Fig. 21　System configuration

最初にエンジン制御について説明する。自車速とドライバがあらかじめ設定した速度リミッター設定値の

偏差から目標加速度を算出する。目標値を得るのに必要なエンジントルクを推定走行抵抗を考慮して計算し、エンジンECUに指示する。目標加速度と自車加速度の差分をFBにより補正する。

ブレーキ制御側は、FF項としてスロットルオフ時の推定減速度を使うことがエンジン制御側との相違点である。

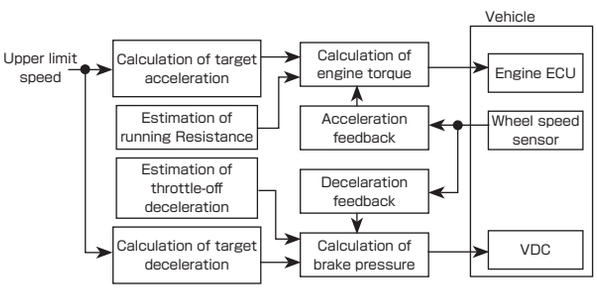


Fig. 22 Block diagram

3.4 後退飛び出し抑制機能

本機能は、踏み間違い形態で最も多く発生しているブレーキと間違えてアクセルペダルを急に踏み込んでいると考えられるケースに対応する(Fig. 20)。

アクセル開度とアクセル速度から通常のアクセル操作であるか否かを判定する。必要以上に踏み込まれたとシステムが判断したとき、急な後退を抑制し平地でのクリープ加速度相当となるように車両を制御する。同時にFig. 23に示す警報をすることによってドライバに危険回避操作を促す。ただし、プリクラッシュブレーキがオフされた場合や急踏み状態が3秒以上継続した場合には、抑制制御を徐々に解除する。

Fig. 23 Backward jumping out control HMI

3.5 後退速度リミッター機能

急踏み込み以外のアクセル踏み間違い(Fig. 20)では、アクセル操作量が通常操作の範囲にあり、アクセル操作だけでは踏み間違いを判定できない。ドライバ状態を高精度に推定する方法は各種提案されているが、ここでは後退時の運転操作の特徴に注目し、後退時の車速を常用域に制限する方法を採用した。必要以上に加速しないことで事故被害を軽減するとともに後退時の運転負荷を軽減する。ただし、プリクラッシュブレーキがオフされた場合や、アクセル開度が通常操作域と比較して大きいと判断した場合には徐々に抑制制御を解除する。

後退速度リミッター作動時には、Fig. 24(a)に示す警報によりドライバに制御作動中であることを通知する。速度リミッター設定値は、低速(約10 kph)、中速(約15 kph)、高速(約20 kph)、オフから選択できる(Fig. 24(b))。

(a) Speed limiter (b) Speed limiter setting

Fig. 24 Backward speed limiter HMI

3.6 AT誤後進抑制の効果

後退飛び出し抑制と後退速度リミッターにより、アクセルペダルの踏み間違いに起因する事故全体に効果のある被害軽減機能を提供する。

評価結果の一例をFig. 25に示す。(1) AT誤後進抑制機能なしと、(2) 後退飛び出し抑制ありの各設定において停車状態からアクセルを100%急踏み込みし続けたときのデータ、(3) 後退速度リミッターあり(低速)の設定において通常操作を模擬して停車状態からアクセルを50%程度踏み続けたときのデータである。後退飛び出し抑制制御により急踏み込みから3秒間はクリープ程度の加速度を維持し、その後抑制制御を徐々に解除している。また後退速度リミッターにより車速が設定値に安定して制限されている。狙い通りの動作を確かめることができた。

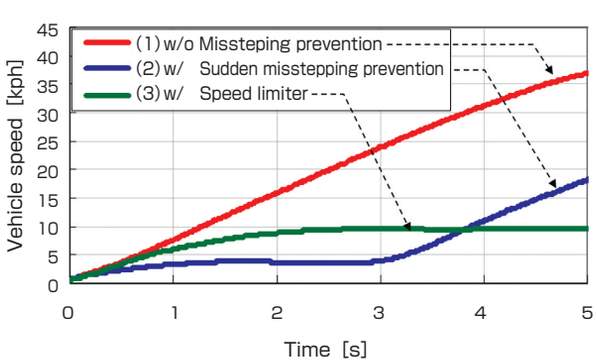


Fig. 25 Result of evaluation

4. まとめ

従来よりお客様にご好評を頂いていたEyeSight（ver.2）にアクティブレーンキープ機能を追加することにより、車の基本性能である「走る、止まる、曲がる」の全てに制御領域を広げ、ドライバーの「安心」の最大化を図ることができた。また、従来から搭載しているAT誤発進抑制機能に加えてAT誤後進抑制機能を追加することにより、前後方向でのペダル誤操作による事故被害を軽減することができ、さらなる安全性の向上を図った。

これらの新機能はスバルが目指している「自動車による事故をゼロにすること」に向けた着実な歩みである。

5. 謝辞

最後に、本製品の開発に多大なる御協力をいただきました、カヤバ工業株式会社、日立オートモティブシステムズ株式会社（順不同）他、関係者の皆様に心より御礼申し上げます。

参考文献

(1) 財団法人 交通事故分析センター： 運転操作の誤りを防ぐ、イタルダ・インフォメーション、No.86（2010）
(2) 平松ほか：ペダル踏み間違い、踏み外し事故の分析、交通事故例調査・分析報告書（平成22年度）
(3) 石田真之助：インテリジェントドライバサポートシステムの開発、自動車技術、Vol.60、No.12（2006）、p.39-44
(4) 関口ほか：新開発ステレオカメラによる運転支援システムの開発、スバル技報、Vol. 35（2008）、p.109-119
(5) 野口ほか：運転支援システム「EyeSight ver.2（アイサイト ver.2）」の開発、スバル技報、Vol.38（2011）、p.33-37

【著　者】

水谷　公一

小山　　哉

寺澤　　武

田村 悠一郎

中島　博人

白石　英一

江副　志郎

通信利用型先進安全自動車の開発（ITS 世界会議東京 2013）

Development of Communication-based Advanced Safety Vehicle (ITS World Congress Tokyo 2013)

手塚 俊介*1 Shunsuke TEZUKA
堀部 若菜*1 Wakana HORIBE
喜瀬 勝之*1 Katsuyuki KISE
山崎 まひろ*2 Mahiro YAMASAKI
坂口 貴浩*3 Takahiro SAKAGUCHI

抄 録

スバルは「自動車による事故をゼロにすること」をめざし、交通事故防止に有効な安全技術として、ステレオカメラによる認識技術を軸とした先進安全機能の開発に取り組んできた。今回さらなる安全性能の向上のためITS（高度道路交通システム）を活用し、無線による車車間通信で、死角から接近する他車との衝突回避を支援する機能や、他車と協調して追従走行を行う機能を実現した「通信利用型先進安全自動車」を開発した。

この車両を2013年10月に東京で開催された第20回ITS世界会議2013に出展し、デモンストレーションを実施したので概要を報告する。

Abstract

We have been working on the development of advanced safety system which uses object recognition technology with stereo cameras in order to prevent car accidents. This time we have developed "communication-based advanced safety vehicles", which are expected to improve safety on the road via vehicle-to-vehicle communication through radio. These vehicles assist the drivers to avoid collision with a vehicle approaching from dead angle and activate adaptive cruise control in cooperative with other vehicles.

This paper describes the outline of the demonstration carried out in the 20th ITS World Congress held in Tokyo in October, 2013.

1. まえがき

日本における交通事故の死者数は、自動車の安全対策をはじめ道路行政や救助救急などの各分野の努力により、平成25年までに13年連続で前年を下回る結果となっている[(1)(2)]。しかしながらその減少率は鈍化しており、これまでの交通事故ゼロに向けた取り組みの更なる強化が求められている。

スバルは「自動車による事故ゼロ」に向け、アイサイトのステレオカメラによる認識技術を軸とした先進安全機能の開発を進めてきており、今後も更に進化を継続させていく計画である。その一方で、車同士の事故の中でも特に死亡重傷事故につながりやすい出会い頭衝突などは、カメラを含む車載センサの見通し外から相手車両が接近してくる事が多いため、車載センサを補完する対応が求められている。

無線通信によって車と車が互いの位置（緯度・経度）や移動情報（方位・速度・加速度等）を交換する技術は、車車間通信と呼ばれる。車車間通信に用いる電波は物かげに回りこむ性質があるため、出会い頭事故などのドライバから認識しづらい死角に位置する車両との事故や、不注意で見落としてしまう車両との事故を防止するため有効である。そのため、スバルは国土交通省が自動車メーカー各社とともに推進しているASV（Advanced Safety Vehicle：先進安全自動車）プロジェクトに参画し、車車間通信を初めとした通信利用型の安全運転支援システムの開発を進めてきた[(3)]。

今回、2013年10月に東京で開催されたITS（Intelligent Transport Systems：高度道路交通システム）世界会議2013において、この通信を利用した先進安全自動車を出展し、各種デモンストレーション実施したので、その概要を紹介する。

＊1 先進安全PGM
＊2 電子商品設計部
＊3 車両研究実験第二部

2.　ITS世界会議

2.1　開催概要

ITS世界会議は、日米欧の世界3地域のITS団体が共同で毎年開催する産官学国際会議であり、専門家会議、展示会、ショーケース（デモンストレーション）が併催される。2013年は日本で10/14 ～ 18の日程で開催され、東京ビッグサイトおよびその周辺を主会場に計69カ国、2万人を超える参加者を迎え成功裏に終了した。

ショーケースでは安全及び渋滞解消のための取り組みとしてITSを活用した各種デモンストレーション走行が実施され、スバルは「通信利用型先進安全自動車」と「高速道路サグ部における交通円滑化サービス」の2つのショーケースに参加した。

2.2　「通信利用型先進安全自動車」ショーケース

本ショーケースでは、東京都江東区青海の日本科学未来館周辺の市街地（Fig. 1）を会場として、ドライバが認識しづらく見落としがちな車両との事故の回避を支援するために、車車間通信を利用して他車両の接近情報の提供機能をデモンストレーションした。また、日本で被害者が多い歩行者の事故防止のため、歩車間通信を利用して歩行者の存在情報を提供する機能もデモンストレーションした。

実施主体は国土交通省自動車局およびASV推進検討会と、ASVメンバーの自動車メーカーを始めとする16社である。今回スバルは後述する6つの支援システムを車両実装し、ショーケースに参加した。

Fig. 1　Showcase course of communication-based advanced safety vehicle

2.3　「高速道路サグ部における交通円滑化サービス」ショーケース

本ショーケースでは、首都高速湾岸線の臨海副都心出入口－空港中央出入口間（Fig. 2）を使用して、サグ部での渋滞緩和を目的とした交通円滑化走行のデモンストレーションを実施した。サグ部とはFig. 3のように勾配が下りから上りに切り替わる箇所で、速度低下

Fig. 2　Showcase course of traffic flow facilitation service at sag section on expressway

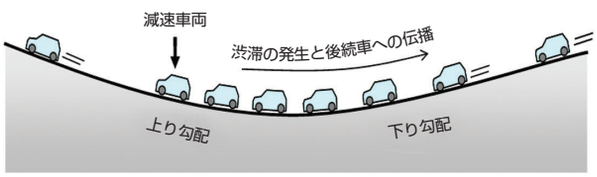


Fig. 3　Traffic congestion at sag section

により渋滞が発生しやすい特徴がある。サグ部において、スバルは既に実用化されているACC（Adaptive Cruise Control）に対し車車間通信による協調制御を加えて、CACC（Cooperated ACC：協調型ACC）のデモンストレーションを実施した。

3.　通信利用型先進安全自動車の概要

3.1　車両

開発した通信利用型先進安全自動車の外観をFig. 4に示す。ベース車はSUBARU XVであり、アイサイト（Ver.2）を搭載している。今回の改修に関わる機器は、すべて荷室床面の下に格納することで居住性への影響を最小限に抑えた。

Fig. 4　Communication-based advanced safety vehicle

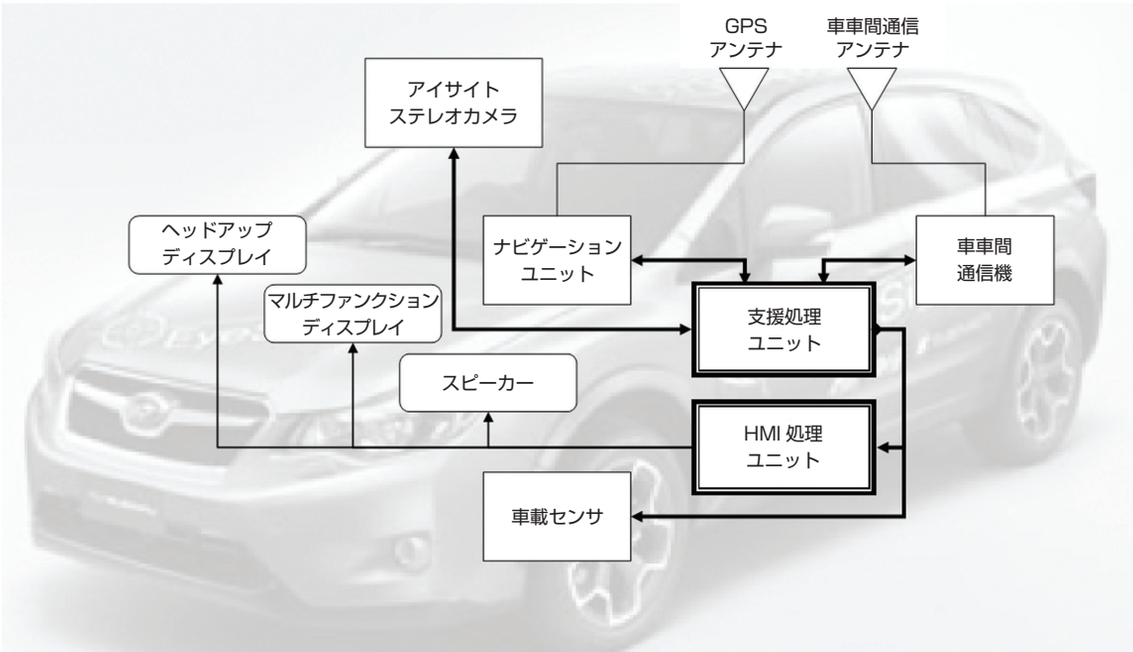


Fig. 5　System configuration diagram

3.2　システム構成

システム構成図をFig. 5に示す。以下主な機器について説明する。

3.2.1　車車間通信機

車車間通信用として760 MHz帯の通信機を搭載している。760 MHz帯はアナログテレビの停波を受け、総務省が自動車の安全運転支援システム用途に新たに割り当てた周波数である。同じく自動車用に既に割り当てられETCやITSスポット通信に使用されている5.8 GHz帯と比較して、見通し外への回り込み特性に優れているとされている[(4)]。今回は出会い頭衝突防止などの用途を考慮し、760 MHzを採用した。この通信機によって自車位置と車両運動情報を周囲に送信するとともに、他車の位置と車両情報を受信する。通信可能距離は、市街地環境で数百メートル程度である。

3.2.2　処理ユニット

車両には用途別に2つの処理ユニットを搭載している。ひとつは、車車間通信で得た他車情報を元に自車と衝突の可能性のある対象を抽出し、支援の内容を判断する支援処理ユニットである。支援処理ユニットはまた、ナビゲーションユニットから得た自車位置情報と車載センサから得た自車情報を統合し、100 ms毎に送信する役割を担っている。もう一つのユニットは、支援処理ユニットからの情報を元にドライバに対する視覚および聴覚による支援処理を行うHMI（Human-Machine Interface）処理ユニットである。

3.2.3　ナビゲーションユニット

ナビゲーションユニットは自車位置の測位を行う他、自車前方の直近交差点の位置情報（緯度・経度）をデータベースから検索することで、他車との衝突危険性の判断に使用することができる。さらに、デモンストレーション用として、通信中の他車の位置を地図上に表示することができる。Fig. 6に画面を示す。中央の大きな円および三角形が自車位置、その周囲の小さな円が他の通信車両である。

3.2.4　HUD（ヘッド・アップ・ディスプレイ）

ドライバに様々な種類の注意対象物をわかりやすく伝え、事故回避のための適切な行動を促すために、HMIは直感的に理解できることが必要である。視覚情報は短時間で比較的多くの情報量を伝達することができることから有効なHMIであるが、ドライバの視線を拘束する時間が長くなれば逆に不安全状態となってしまうという相反が生じる。

Fig. 6　Navigation unit screen

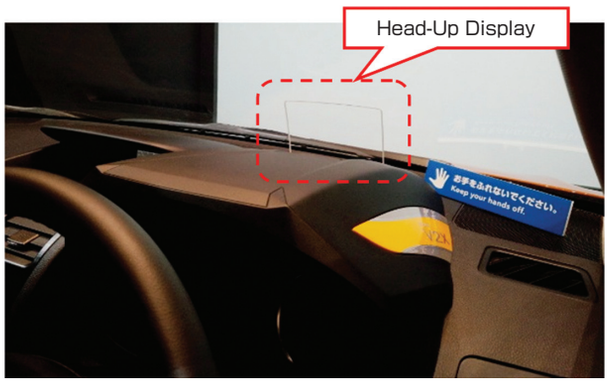


Fig. 7　Head-up display

Table 1　Head-up display specifications

Image distance		1.8 m
Image size	Horizontal	3.5 deg
	Vertical	1.5 deg

そこで、今回はHUD（Head-Up Display）をメーターバイザー上部にベース車形状と一体となるよう搭載し、透過型のコンバイナ上に支援コンテンツを投影表示することで、運転中の視線移動量を抑えてスムーズにHUD表示を視認できるようにした[5]。加えて、投影像の焦点距離を遠方に伸ばすことで、ドライバが車外を見ている状態からHUDを見た際の焦点調節の負荷を抑え、視線拘束時間の低減を図っている。Fig. 7にHUDの搭載状況、Table 1にHUDの主な仕様を示す。詳細なコンテンツについては後述する。

4.　搭載機能

4.1　通信利用型先進安全機能

4.1.1　支援レベル

安全機能として、国土交通省のASV（先進安全自動車）プロジェクトの成果に準じて以下の「情報提供」「注意喚起」「警報」の定義[6]を採用し、このうち「情報提供」「注意喚起」を実装した。

(1) 情報提供：運転者がシステムから提供された情報により安全運転を行なうための客観情報を伝える。
(2) 注意喚起：特定のタイミング、特定の場所、運転者による特定の操作または特定の状況が生じた時に注意を喚起する。
(3) 警報：検知した情報から事故の可能性を予測し、運転者に対して即座に適切な行動・操作を促す。

4.1.2　支援システムの種類

支援シーン毎に、以下の6つの安全機能を搭載した。

(1) 右折時衝突防止支援システム
交差点右折時に対向直進車との衝突防止のための情報提供および注意喚起を行う。
(2) 歩行者情報提供システム
自車前方を横断する歩行者がいる場合に、その存在を情報提供する。
(3) 出会い頭衝突防止支援システム
交差点進入時に交差車両との衝突防止のための情報提供及び注意喚起を行う。
(4) 工事車両情報提供システム
前方で工事車両が路上作業中であることを情報提供する。
(5) 左折時衝突防止支援システム
交差点左折時に後方から接近する二輪車の巻き込み防止するため、情報提供及び注意喚起を行う。
(6) 緊急車両情報提供システム
緊急走行中の車両が接近してきた際、その存在を情報提供する。

このうち、歩行者情報提供システムは、歩行者が持つ無線端末から車両と同様に位置情報を送信するものである。将来的には防犯ベルや携帯電話に同様の機能が内包されることが期待されている。

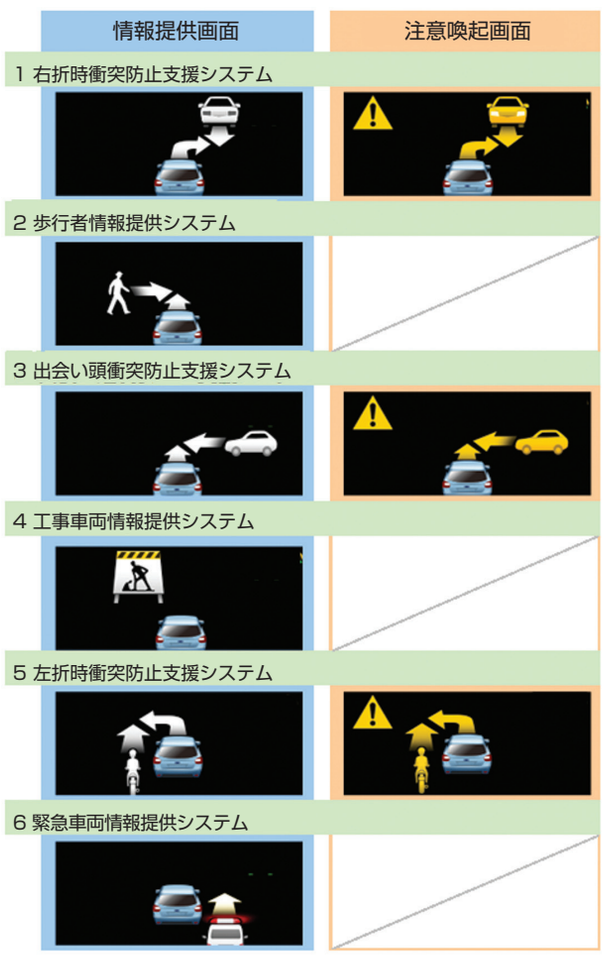


Fig. 8　HUD display when assistance is offered

4.1.3　HUD表示

各支援機能作動時にHUDに表示される画像をFig. 8に示す。ドライバが対象の支援レベルを容易に理解できるように、情報提供は白色を基調としたデザインとする一方、注意喚起では黄色を基調としている。 また注意喚起の際は、画面内に三角形に「！」の“Caution”マークを表示するとともに相手車両アイコンを点滅させることでも、支援レベルの差を直感的に理解できるようにした。

4.1.4　音および音声による支援

HUDへ支援表示が行われた場合には、同時にドライバに対して報知音が提供される。情報提供の場合には「ポン」、注意喚起の場合は「ポンポン」と提示し分けることで、聴覚的にも支援レベルの差を把握できるように配慮した。

更に、ドライバが何らかの理由で視線をHUDに向けることができない場合にも状況把握を可能とするために、音声による情報提供および注意喚起も同時に行っている。音声は、脅威対象の方向、種別および状況の3情報に区切って発話され、運転中でも理解しやすいように配慮した。

例えば、「右からの／車に／注意！」や、「後方から／緊急車両が／来ます」、などの音声が出力される。

4.1.5　支援レベル判定アルゴリズム

対象物に関する情報提供および注意喚起の実施を判断するアルゴリズムの概要を述べる。

出会い頭および右折時の衝突防止支援システムでは、まず、自車で電波を受信した周辺車両の中から、自車前方かつ一定距離内にある交差点に向かっている対象を抽出する。自車直近の交差点座標はナビゲーションユニットから得ており、これにより通信圏内に複数の車両がいた場合にも効率的に対象を絞り込むことが可能となっている。

次に、対象車両が該当交差点に到達するまでの余裕時間によって、自車のドライバに対して情報提供または注意喚起を提供する。出会い頭衝突防止支援システムの場合、余裕時間が約7秒を切った時点で情報提供を行い、さらに約5秒を下回った場合に注意喚起を行うように設定した。Fig. 9に出会い頭衝突防止支援システムの例を示す。

左折時衝突防止支援システムでは、自車が交差点から一定距離内にいることに加え、後方から二輪車が接近していること、および自車がウインカーを使用していることを条件として情報提供および注意喚起を行う（Fig. 10）。

また、緊急車両と工事車両、および歩行者情報提供

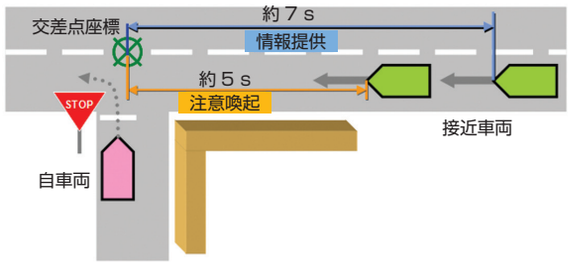


Fig. 9　Support level of head-on collision prevention assist system

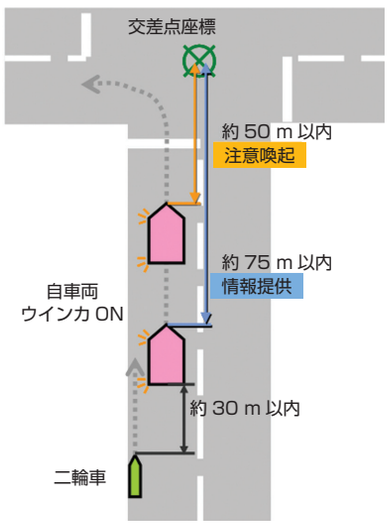


Fig. 10　Support level of collision prevention assist system when making a left turn

Fig. 11　Support level of emergency vehicle information providing system

システムにおいては、自車に対する相対距離に基づいて支援実施を判断する。Fig. 11に緊急車両情報提供システムの例を示す。

工事車両および緊急車両情報提供システムは、それぞれ送信側の通信情報に「路上作業中」および「緊急走行中」の状態示す情報を載せることで識別する。また、通信相手が四輪車か二輪車か、あるいは歩行者かという種別も通信情報から取得する事ができる。

4.2　通信利用型車車間協調機能

4.2.1　協調型ACC

安全機能の他に、通信を利用したもう一つの機能として、協調型ACC（CACC：Cooperative Adaptive Cruise Control）を搭載した。今回開発した車両では、アイサイトのステレオカメラによる追従制御をベースとして、通信で得た先行車速度および加速度を利用してCACCを実現している（Fig. 12）。

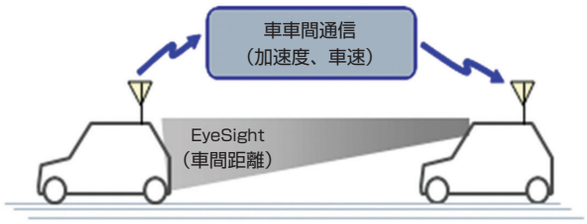


Fig. 12　CACC configuration

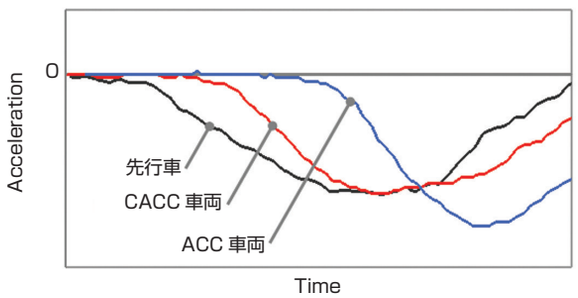


Fig. 13　Comparison of deceleration response between ACC and CACC

CACCは従来の車載センサを利用したACCに対して、車車間通信によって得られる先行車の挙動情報を制御入力とすることで、車間制御性能を向上させるものである。Fig. 13に先行車減速時のACCとCACCによる後続車の減速応答性の違いを示す。先行車の減速に対する反応時間をより短くすることで、先行車に接近し過ぎて強い減速をすることなく追従していることがわかる。サグ部では特に、渋滞の要因の一つである車列による加減速波の増幅を抑えることで渋滞抑制に効果が期待できる。また、結果的に遅れのない加減速はドライバにとってより安心感のある追従走行を提供することにもつながった。

5.　デモンストレーション結果

世界会議期間中に試乗された方々は、Webサイトから予約をした一般参加者であるが、アンケートによるとその大半が自動車業界関係者であった。参加者のコメントを抜粋する。

ポジティブなコメント

・情報提供、注意喚起表示のタイミングがわかりやすい。
・わかりやすい表示だった。
・安全のため通信対応車の普及が進むことを期待する。
・視界が悪い時にも有効と思われる。

ネガティブなコメント

・ドライバの過信が生じないか心配だ。
・通信対応車と非対応車が混在した場合に混乱しないか。
・注意喚起タイミングを煩わしくない範囲で更に早められないか。
・位置情報の精度が十分か不安だ。

表示および音による情報提供と注意喚起については、直感的に状況をわかりやすく伝達できていることに好意的な意見が多かった。一方、支援が充実することによってドライバの安全確認が疎かになるのでは、と過信を指摘する意見があった。これは他の自律型を含む全ての先進安全機能に共通することであるが、注意喚起が提供されない事を危険が無いと誤認されないような配慮が必要であることを示している。

また、支援の効果を高めるために、通信対象車両の普及に期待する意見がある一方、現実的には通信非対応車との混在環境で作動するシステムであることを指摘し、ドライバに混乱を生じさせない配慮を求める意見が多く寄せられた。これもまた前述の過信の問題と同様に、自車にとって脅威となる車両を通信ですべて検知できるわけではないことを考慮する必要があることを示している。

さらに、今回は通信利用機能に特化したデモンストレーションであったため、通信のみですべての安全利便機能を成立させると思われている方も多かった。そのため、試乗説明の際は、通信技術は車載センサを利用した自律型の機能がベースとして装備されていることが前提であると補足する必要があった。このことから、通信利用機能の実用化にあたっては、車載センサを利用する機能との連携や役割分担について、お客さまにとって特に分かりやすい仕様であることが必須であると考えている。

6.　まとめ

東京で開催されたITS世界会議2013において、通信を利用した先進安全自動車を出展し、実用化が間近の通信利用型の安全機能として6つの衝突防止支援システムと、車車間協調型ACCのデモンストレーションを行った。

本稿では、開発した車両のシステム構成、機能、およびHMIについて説明し、デモンストレーションにおける試乗者のコメントについて述べた。

スバルはアイサイトを軸とした自律型の先進安全機能において各種第三者評価において高い評価を頂いている。今後も、車載センサによる先進安全機能の性能向上を図ることはもちろんのこと、今回紹介した通信技術により更なる拡張を実現することで、自動車による事故ゼロに向けた取り組みを着実に進めていく。

謝辞

本車両開発およびショーケース参加において、関係省庁、関係団体、ならびに各自動車メーカーと自動車部品メーカー各位のご協力を頂いたことを深く感謝いたします。

参考文献

(1) 警察庁交通局：平成25年中の交通事故の発生状況、2014、p.1
(2) 内閣府：交通安全白書（平成25年版）、2013、p.5
(3) 関口ほか：インフラ協調型安全運転支援システムの開発、スバル技報、Vol.36 (2009)、p.206-212
(4) 総務省：「ITS無線システムの高度化に関する研究会」報告書(2009)、p.18
(5) 田内ほか：通信利用型運転支援システムにおける支援情報の提示位置に関する実験的検討、デンソーテクニカルレビュー Vol.15 (2010)、p.146-152,
(6) 国土交通省自動車交通局：先進安全自動車（ASV）推進計画報告書－第4期ASV計画における活動成果について－、2011、p.99

【著　者】

手塚　俊介

堀部　若菜

喜瀬　勝之

山崎 まひろ

坂口　貴浩

北米OBD規制における診断除外認可の取得プロセス

Acquisition Processes of Test-Out on North American OBD Regulation

大　伴　洋　祐*
Yosuke OHTOMO

抄　録

スバルは、XV Crosstreck Hybrid（北米仕様）のエンジン・ストップ・スタートシステムについて、北米規制当局であるCalifornia Air Resources BoardよりOBD診断除外（Test–Out）の承認を得た。本稿の目的は、この認可プロセスの経験をシェアすることである。本稿では、「Test–Out」承認に必要な「エンジン・ストップ・スタートシステム故障時に排気ガスの増加幅が最悪となる走行条件」の定義の方法、および、妥当性の証明方法について示した後、実際にエンジン・ストップ・スタートシステム故障を模擬した場合の排気ガスデータを示し、システム故障により、排気ガスの総量が増加していないことを示す。

Abstract

The purpose of this paper is to share Subaru's experience of requesting "Test-Out" on OBD monitors related to the engine stop start system for a SUBARU hybrid electric vehicle.

In this paper, the worst case driving cycle for the "Test-Out" is shown and research and analysis to determine the worst case driving cycle are described.

Using the identified worst case driving cycle, Subaru demonstrated that the emission was not adversely affected by possible component malfunction in the engine stop start system.

1. 背景

1.1 法的立脚点

XV Crosstreck Hybridのエンジン・ストップ・スタートシステム（以下、ESSシステム）に関わるOBD法規は、北米排気ガス法規CCR Chapter 1 S1968.2に規定されている。

ESSシステムは、近年出てきたシステムであるため、法規条項には特別の記載がなく、2014年の時点では、(e)(15)項の「Comprehensive Component Monitoring」項で規制されるものと解釈される。

この条項の序文である(15.1.1)では、故障診断の監視対象を、「システム故障中に、リアルワールドで合理的にあり得る走行をした場合、排気ガス総量が増加するもの(any electronic powertrain component/system …中略…that…中略…can affect emissions during any reasonable in-use driving condition)」としている。つまり、対象とするシステムがOBD対象かどうかを判断するためには、FTP（Federal Test Procedure）等のモード走行ではなく、「対象システムの故障時に、リアルワールドであり得る合理的な走行で、排気ガス総量が最悪となる走行条件（以下、ワーストケース）」を、車両メーカ側で設定した上で、排気ガス試験を実施し、OBD対象か否かの判断をする必要がある。

上記の「ワーストケースの定義や、OBD対象部品の範囲の切り分け」について、規制当局であるCalifornia Air Resour-ces Board（以下、CARB）との解釈の違いが生じて、法規不適合と認定された場合は、出荷停止やリコール、罰金などの重大なペナルティが課せられる場合があるため、技術的にも調整上も難しい判断となる。

1.2 動機と目的

今回XV Crosstreck Hybridでは、ESSシステムがスバルとして初めて採用された。

＊ HEV研究実験部

ESSシステムは、低車速域でエンジンを停止し、モータで走行することで、エンジンの運転時間を減らし、燃費を向上させようとするシステムである。

このESSシステムは直接、排気ガスを生成する機関であるエンジンの運転／停止をコントロールする。したがって、ESSシステムが故障し、エンジンが自動停止しなくなった場合、“直感的には”、排気ガス総量が増えることが予想された。

一方、排気ガスの生成メカニズムに着目すると、始動時燃料増量制御等の影響により、エンジンの始動時にスパイク的に高い濃度のガスが生成される傾向がある。つまり、“理屈的には”、エンジンの始動回数を減らし、可能な限り、エンジンを連続運転するほうが、排気ガスの総量が少なくなることが予想された。

上記、2点の相反する予想と、1.1項に述べた法規の性格を鑑み、スバル初のハイブリッド車を、日程通り、確実に立ち上げるため、本開発では、ESSシステムが故障した場合の排気ガス影響を厳密に評価するワーストケース、および結果について、CARBと合意することを目的とした。

2. 排気ガスに関わるワーストケースの定義

2.1 オリジナルワーストケースの必要性

排気ガス試験をする際に、標準となるのは、排気ガス認証試験にも使われる、FTP、SFTP（Supplemental Federal Test Procedure）等の走行条件であるが、これらの走行条件は、高速走行の比率が高いため、低車速領域で動作するESSシステムに対しては、必ずしも、前述の「リアルワールドであり得る合理的な走行」において「ESSシステム故障時に排気ガスの増加幅が最悪となる走行条件」を模擬できているとは言えないと判断した。

一方、ファーストフードのドライブスルーのように、常時、EV走行するような状況では、システム正常時の排気ガス総量がゼロとなり、システム故障によりエンジンが掛かり続けになった場合の排気ガス増加量の影響が大きくなる。しかしながら、稼動距離に制限のあるEV走行のみを、北米の大多数のユーザが、大部分の車両使用状況でしているとは考え難いため、このような走行パターンも「リアルワールドであり得る合理的な走行」とは言えないと判断した。

したがって、ESSシステムが故障した場合の排気ガス影響を評価するためには、各種モード試験用の走行条件に拘らない、リアルワールドであり得る、合理的に最も厳しい「オリジナルのワーストケースの定義」が必要、との判断に至った。

2.2 オリジナルワーストケースの構成要素

ワーストケースを定義するためには、「1.定性的に排気ガスを悪化させる要素」、「2. 正常時／異常時で動きが異なる制御モード」、「3.その他、対象システムの動作を制限する要素」の3つの要素を考える必要であると考えた。

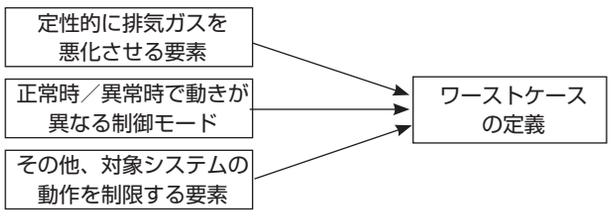


Fig. 1 Definition of worst case

2.2.1 定性的に排気ガスを悪化させる要素

「定性的に排気ガスを悪化させる要素」とは、対象システムの故障の有無に係わらず、車両のメカニズム上、発生してしまう排気ガスの悪化要素の事を指す。

今回の例でいうと、ESSシステムでは、エンジンを掛けているか／掛けていないか、掛けているならどれくらいの時間掛けているのか、という2つのパラメータがある。この2つのパラメータから導かれる、「定性的に排気ガスを悪化させる要素」は、①：エンジンを始動する回数が多いほど、スパイク的な排気ガスが発生する、こと及び、②：エンジンを掛けている時間に比例して、排気ガスの量は増える、ことである。

2.2.2 正常時／異常時で動きが異なる制御モード

「正常時／異常時で動きが異なる制御モード」とは、システムが正常な場合と、故障した場合とで差異のある制御モードを明らかにする事を指す。

すなわち、対象とするシステムの動作モードを、全て明らかにした上で、そのシステムの故障時に、どのモードに変化が現れるかを明確にし、その変化が生じるモードから、ワーストケースの走行パターンの構成要素を抽出する。

例えば、XV Crosstreck Hybridでは、ESSシステムが正常な場合、Fig. 2の様なM1 ～ M7の7つの制御モードを持つ。

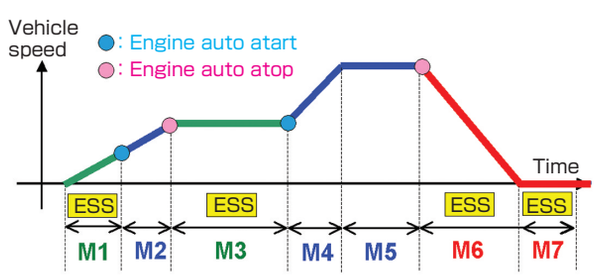


Fig. 2 Seven driving patterns when ESS is properly operated

M1：停車状態からはモータで発進する。すなわち、エンジンは停止状態となっている。
M2：中速域への加速には、エンジンを使用する。このとき、モータへの指示は0トルクとしている
M3：中速域での車速維持は、モータのみでまかなう。エンジンは停止している。
M4：高速域への加速にはモータのトルクとエンジンのトルクを併用する。
M5：高速域での車速維持にはエンジンを使用する。このとき、モータはエンジンのパワーを使って発電を行う。
M6：減速の際はエンジンを停止し、車輪の回転から回生発電を行う。
M7：車両が停止すると、エンジン、モータ共に停止する。

ここで、ESSシステムが故障し、エンジンが掛かり続けになった場合、差異がどこに現れるかを考えると、M1、M3、M6、M7の4つのモードで、本来エンジンが停止するべき状態で、エンジンが掛かり続けることになる。つまり、ESSシステム正常時に対して、ESSシステム故障時の排気ガス影響を考える場合、両者の差が発生する、M1、M3、M6、M7の4モードを、できるだけ多く織り込んだ走行パターンを構成すればよいことになる。

2.2.3　その他、対象システムの動作を制限する要素

「その他、対象システムの動作を制限する要素」とは、対象となるシステムが正常であっても、故障時と同じ動作モードになってしまう例外条件を明らかにすることを指す。

今回のESSシステムでは、冷態時には、暖房要件からエンジン水温を上げることが優先され、エンジンが掛かり続けになる。つまり、ESSシステムは正常にもかかわらず、車両としては、ESS故障時と同様の挙動となる。したがって、ESSシステム正常時と故障時の排気ガス総量の差異を考える場合は、「エンジンが温まっている状態でのESSシステム正常時」を基準に、故障時との差異を考える必要がある。

また、同様に高電圧バッテリの充電量（State Of Charge, 以下SOC）が一定以下に低くなると、SOC保持のため、やはり、ESSシステムが正常でもエンジンが掛かり続けになる。したがって、ESSシステムが正常な場合に対する、故障時の排気ガス増加量を考えるにあたっては、正常状態の走行で、「高圧バッテリのSOCを、エンジン始動に至らないようなレベルで保つこと」が考慮すべきポイントとなる。

2.3　オリジナルワーストケースの構成

以上の構成要素を基に、ESSシステムの故障時に、正常時に対して、最も排気ガスに対する影響が大きくなるような走行条件を考える。考え方としては、排気ガスに関して、「システム正常時に対して、システム故障時が最も不利となる」条件を設定する、あるいは、逆の見方として、「システム正常時に対する、システム故障時の優位さが最も少なくなる」ように、条件を設定する。

今回のESSシステムの場合、制御モードの差異から、M1、M3、M6、M7を多く含むような走行パターンが、2.2.1項の定性的要素の②である「エンジン稼動期間」に関し、最も差が開くことになるので、「ESSシステム正常時に対して、ESSシステム故障時が最も不利となる」条件となる（Fig. 3）。

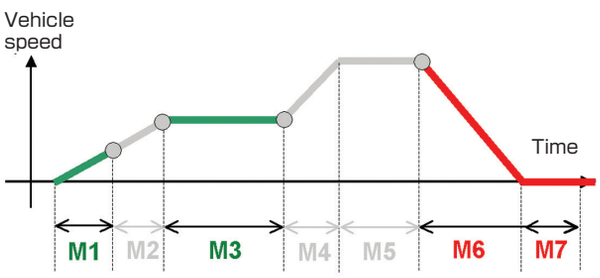


Fig. 3　Driving patterns when ESS breakdown affects the most

一方、2.2.1項の定性的要素①のエンジンの始動回数に関しては、ESSシステム故障時のエンジン始動は初回のみで、スパイク的な排気ガス発生が、正常時に対して、むしろ優位となる見通しだったため、Fig. 4の様な走行パターンの組み合わせ方をすることで、「正常時に対する、故障時の優位さが最も少なくなる」ようにした。

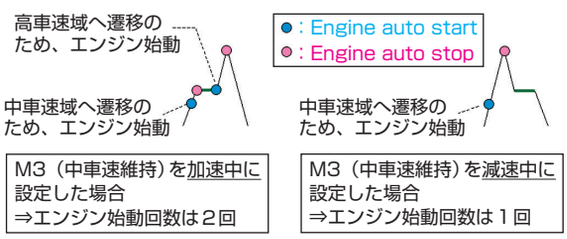
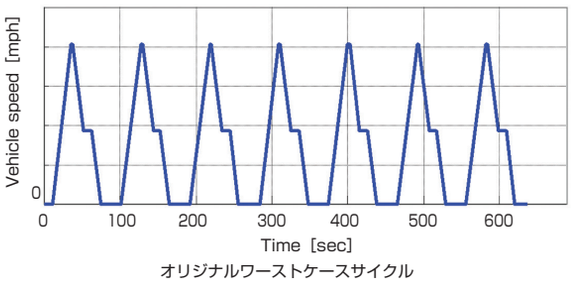


Fig. 4　Worst driving patterns when ESS breaks down

上記の検討に、2.2.3項の要件を加味し、エンジン暖機完了状態で、SOCの収支が合うように車速等の条件を認定した次の走行パターンを、ESS正常時／ESS故障時で走行し、排気ガス総量を比較するのが、ワーストケースであるとの結論に至った。



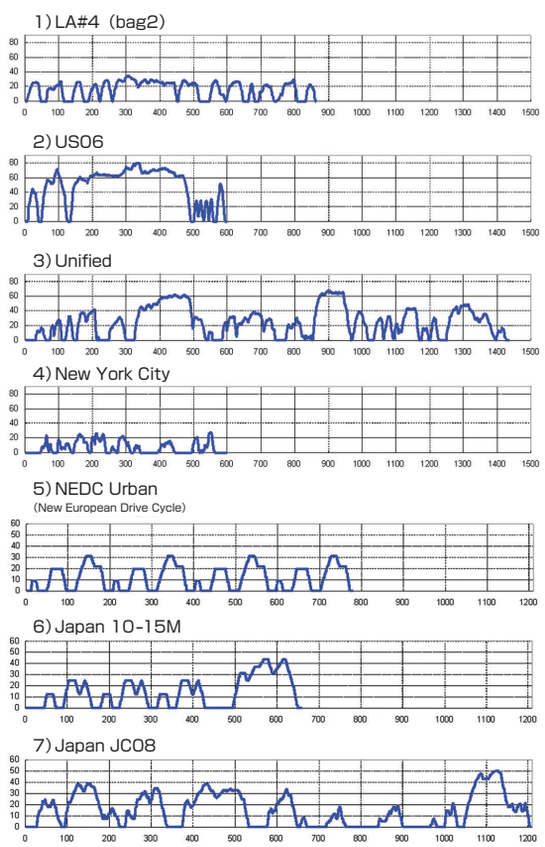
オリジナルワーストケースサイクル

Fig. 5　Original worst case cycle

3.　オリジナルワーストケースの正しさの証明

3.1　証明方法

前節で理屈的に構成したワーストケースの正しさは、各国で実施されている代表的な排気ガス評価の走行パターンと、オリジナルの走行パターンを比較することで担保した。これは、各国の排気ガス評価のための走行パターンが、その国の代表的な走行パターンを模擬している、という前提から、北米の認証走行パターン以外も網羅して比較することで、「リアルワールドで合理的にあり得る走行」をカバーできると考えたためである。なお、比較した走行パターンは、LA#4, US06, Unified, New York City Cycle, New European Driving Cycle（NEDC）Urban, 10-15, JC08である。



（縦軸：mph、横軸：秒）

Fig. 6　Representative driving patterns for emission evaluation in each country

3.2　オリジナルワーストケースの評価

Table 1に、オリジナル走行条件と各国の評価走行パターンを走行した際の、走行パターン総時間に占めるM1,3,6,7の比率、すなわち、ESSシステム故障時に増加するエンジン稼働時間の比率、1マイルあたりのエンジン再始動回数、各走行パターン開始時と終了時のSOC変化量を示す。

Table 1　Evaluation of driving patterns

No.	走行パターン	総時間 [sec]	総時間に占めるM1,3,6,7の比率 [%]	エンジン再始動回数 [times/mile]	SOCの変動 [%]
1	LA#4	864	44.8	4.9	−6
2	US06	600	12.1	1.0	1
3	Unified	1435	33.4	3.8	0
4	New York City	600	69.6	15.0	−16
5	NEDC Urban	780	64.4	3.9	−18
6	Japan 10−15M	660	68.0	3.6	−7
7	Japan JC08	1204	59.9	4.4	−12
8	オリジナルワーストケース	637	75.9	2.7	+1

まず、走行パターン総時間に占めるM1,3,6,7の比率は、オリジナルの走行パターンが一番多くなっているため、ESSシステムが正常なときと、故障したときでエンジンの稼働時間が最も大きく変動する。

走行パターン中の、1マイルあたりのエンジンの再始動回数については、US06の走行パターンが1回で最も少ないが、US06はESS正常時でもほとんどエンジン停止をしないため、検討から除外すると、この項目でも、やはりオリジナルの走行パターンが最も再始動回数が少ないことになる。

次に、SOCの変動に注目すると、＋1%で、高いSOCを保てていることがわかる。

以上より、今回設定したオリジナルの走行パターンは、各国の実用走行を模擬した走行パターンに比較しても、ESSシステムの故障の影響が、正常時に対して、大きく出る条件になっていることがわかる。これをもって、今回設定したワーストケースは妥当だと判断した。

4.　オリジナルワーストケースでの排気ガス試験結果とCARB交渉

4.1　オリジナルワーストケースでの排気ガス測定結果

前節でワーストケースの設定を妥当と判断したので、実際に、試験車を用いて、このケースで排気ガス試験を実施した。Fig. 7にその結果を示す。

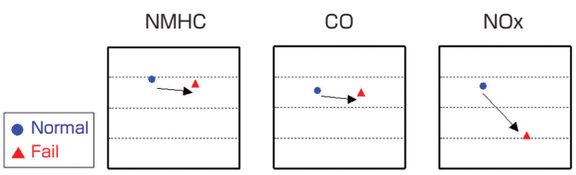


Fig. 7　Emission test results of original worst case

グラフより、ESSシステム故障時には、NMHC、CO、NOxの全ての規制成分が、ESSシステム正常に対して少なくなっている（排気ガス総量が減少している）ことがわかる。

これにより、ESSシステムは「リアルワールドで合理的にあり得る“最悪の”走行」をした場合でも、排気ガスの増加がないことを示せた。

4.2　CARB交渉

実車での排気ガス試験に先立ち、CARBに対して、2節および3節の説明を行い、「ワーストケースとしての走行条件」と、「その妥当性の証明方法」について合意を得た。このプロセスは非常に重要で、事後に説明してCARBが納得しない場合、ワーストケースの再検討や、排気ガス試験の再試験が必要となるため、開発日程へのインパクトが大きくなる。

続いて、4.1項の排気ガス試験結果を、他の7つの走行パターンの排気ガス試験結果と共にCARBに提示し、「どの走行パターンでもESS故障時の排気ガス総量が減少していること」、また、「その中でもオリジナルのワーストケースの減少幅が最も少ないこと（故障の優位さが最も少ないこと）」を説明し、ESSシステムの故障が、排気ガスの増加をもたらさないことの理解を得て、ESSシステム全体を

OBD診断範囲から除外すること（Test-Out）の承認を得た。

また、OBD申請書提出直前に量産相当車を使って、再度、排気ガス試験を行い、4.1項で示したデータに変動がないことをCARBに対して提示し、上記の承認の念押し確認を実施した。

5.　おわりに

OBD対象部品か否かを切り分ける手法は、法規に明確な記載がなく、そのプロセスには不明な点が多かった。

今回、スバル初のハイブリッド車であるXV Crosstreck Hybridの開発にあたり、規制当局であるCARBとの連携を強化し、このプロセスを明らかにした。本報告の内容は、CARBもオーガナイザーとなっているSAE OBDシンポジウム2013でも発表された。本報告が今後開発されるシステムにおいて、OBD対象か否かを判定する際の一助になれば幸いである。

【著　者】

大伴　洋祐

衝突安全と軽量化を両立する ホットスタンプパッチワーク技術の実用化

Practical Application of Hot Stamping Patchwork Technology for Crash Safety and Weight Reduction

松　崎　輝　男[*1]
Teruo MATSUZAKI
宮　崎　高　志[*1]
Takashi MIYAZAKI
森　　修[*2]
Osamu MORI
岩　沼　忠　士[*3]
Tadashi IWANUMA
矢　島　正　毅[*3]
Masaki YAJIMA

抄　録

近年、車体の衝突安全と軽量化を両立する手段として、ホットスタンプ部品が多く採用されてきている。

今回、工法の応用として、パッチワークの実用化に取り組んだ。開発の狙いとその効果、実用化に向けた基礎研究について紹介する

Abstract

In recent years, hot stamped parts have been widely adopted to solve two contradictory challenges of vehicle crash safety and weight reduction.

This time, a patchwork technology was developed as a hot stamping method. This paper introduces the objective and effect of the developed technology and fundamental study for its practical application.

1.　まえがき

近年､衝突安全の期待は世界的に一層高まっており、当社も多様な形態での安全確保を研究し続けている。

一方で、スバルが掲げる「安全と愉しさ」における愉しさ、そして環境における燃費向上の観点から、軽量化が車体開発の大きな課題となっている。

これらを両立する手段としてホットスタンプ(熱間プレス)が実用化されているが、ホットスタンプの高強度という特徴をより際立たせるため、パッチワークの実用化を確立した。

2.　工法の特徴

ホットスタンプは、加熱した材料をプレス成形と同時に冷却焼入れするものであり、従来の冷間プレス以上の高強度が得られる工法である(Fig. 1)。

しかし、冷間プレスに対し、生産効率が低いため、コスト高であった。

今回、実用化したパッチワークとは、従来のホットスタンプ工程の前に予め材料同士を接合し、2枚の材料(2部品)を同時に加工するものである(Fig. 2)。

これにより、必要最低限の部位だけを、より高強度化しながら､同時にコストを抑えることが可能となる。

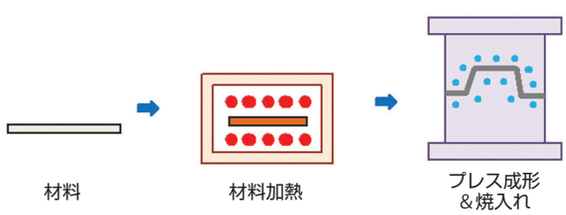


Fig. 1　Hot stamping method (Previous)

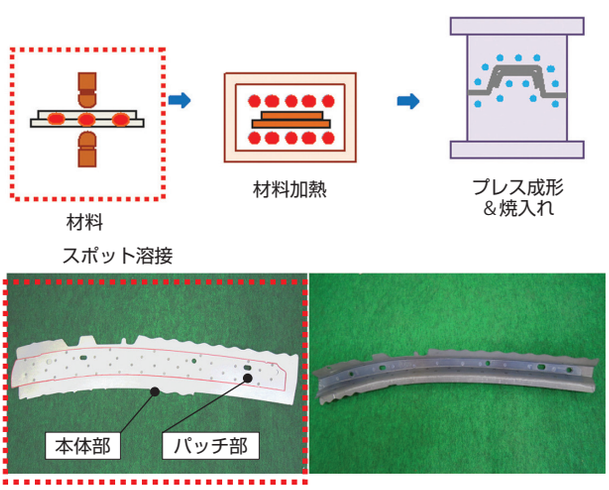


Fig. 2　Hot stamping patchwork method (Newly established)

＊1 車体設計部
＊2 製造品質管理部
＊3 東亜工業(株)　開発営業部

3. 採用事例

主に、前面衝突におけるキャビンの生存空間を確保するため、フロントピラーにパッチワークを採用した(Fig. 3)。

フロントピラーは、視界を妨げる原因となるため、断面を大きくすることは避けなければならない。ホットスタンプを採用しつつ、更なる高強度を狙う場合、使用材の板厚アップも考えられるが、材料の製造限度を超えてしまう場合、部品追加を余儀なくされる。この様な時、パッチワークが有効である。

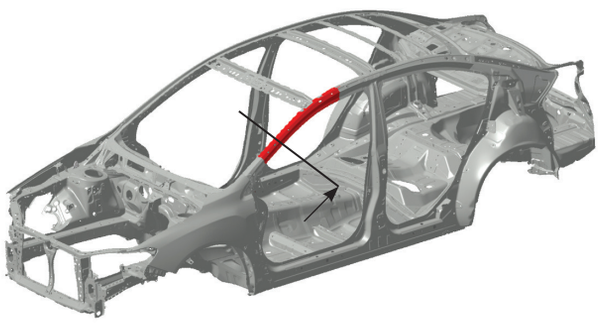


Fig. 3 Application area

3.1 効果検証

フロントピラー内の補強部材の組み合わせ例を以下に示す(Fig. 4)。

パッチを、従来の冷間プレス部品からホットスタンプパッチワーク部品に変更した場合の質量、部品費、金型費を比較した。

パッチ 590MPa t3.2（冷間プレス）
→1470 MPa t1.4（ホットスタンプパッチワーク）
本 体 1470 MPa t1.6（ホットスタンプ）

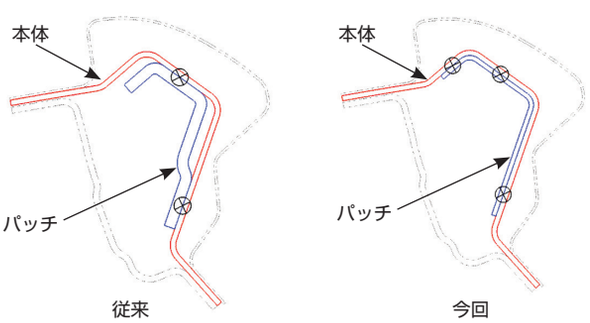


Fig. 4 Example of reinforcing member combination

3.1.1 質量比較

高強度化によりパッチの板厚が下げられるため、軽量化の効果が大きいことが分かる(Fig. 5)。

3.1.2 部品費比較

パッチワークでは、2部品を同時に加工するため、加工費が大幅に低減できる(Fig. 6)。

また、スポット溶接も溶接機の姿勢を変える必要が無いため、生産効率が高く、部品費低減に貢献している。

3.1.3 金型費比較

パッチは本体と同時に成形するため、パッチの専用金型が発生しない(Fig. 7)。

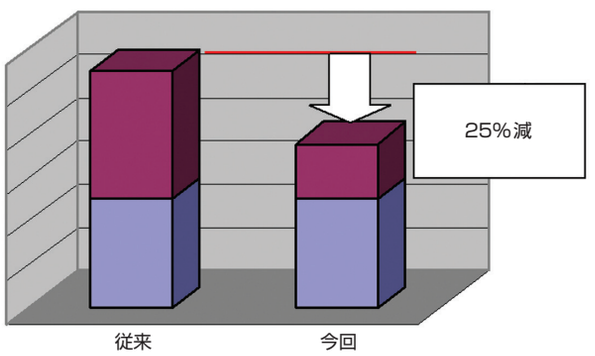


Fig. 5 Mass comparison

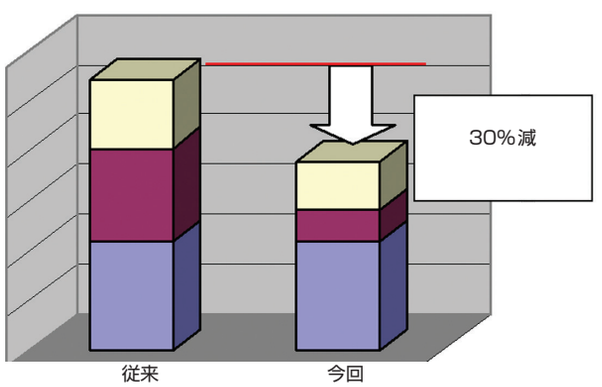


Fig. 6 Parts cost comparison

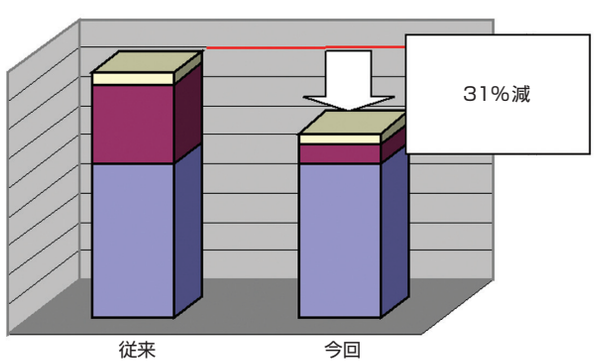


Fig. 7 Die cost comparison

4. スポット溶接におけるメリット

パッチワークは成形前の平坦な板の状態で溶接するため、従来の様な溶接機が干渉するスペースの小さい部位でもスポット溶接が可能である(Fig. 8)。

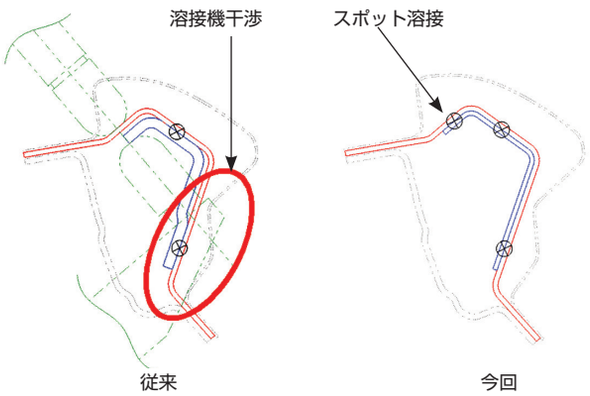


Fig. 8 Welder interference

5. パッチワーク工法の生産課題

5.1 課題抽出

従来の1枚製品のホットスタンプとは大きく異なる条件下でも、メッキ層や強度(硬度)が安定した品質で得られることが必要である。このため下記の課題抽出を行った。

①加熱による熱膨張を考慮した金型の逃がし形状が、収縮する際に隙間が生じるため、形状不良や焼入れ不良とならないか。

②1枚部分と2枚部分の温度上昇速度差により加熱保持時間の適正範囲を逸脱しないか。

③パッチのスポット溶接が所定の強度を有しているか、また成形による剥がれ等の不良が生じないか。

5.2 課題の確認と対応

5.2.1 金型逃がし部の影響

金型のパッチ端部に当たる部分には熱収縮とバラツキを考慮した逃がし(Fig. 9)が必要であるが、理論値通りに設定すると隙間が大きく、稜線部が0.89 mmと大きく引けてしまうことを確認した(Fig. 10)。

しかし、実際の熱収縮は金型に拘束されて理論値より少なく、また成形中は多少の干渉があっても下死点時に部材の端末が段差に収まっていれば品質影響がほとんど無いことがわかった。これらを考慮して逃がし寸法を極限まで詰めた結果、パネルの引けは性能上も影響の無い0.3 mmレベルに抑える事ができた。

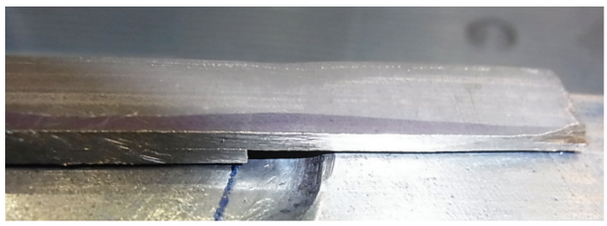


Fig. 9 Die relief area

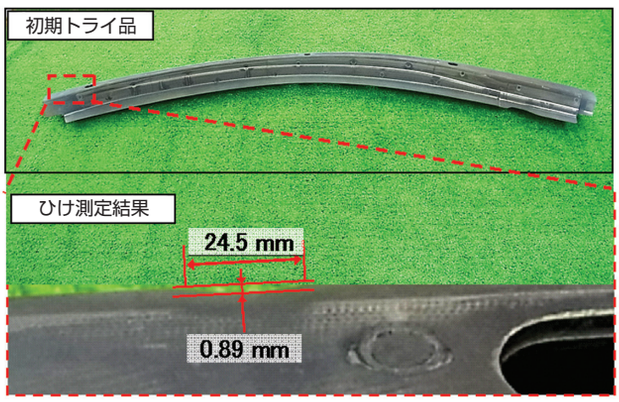


Fig. 10 Sink mark

5.2.2 加熱条件

1枚部とパッチ部がそれぞれどのように昇温するかテストを行ない、メッキ層が良好な合金化層に変化するための保持時間が確保できるか確認した(Fig. 11)。

さまざまな条件でテストを行った結果、既存の遠赤外線炉でも本体部、パッチ部が同時に良好な合金化層を得ることができる加熱条件を見出す事ができた(Fig. 12)。

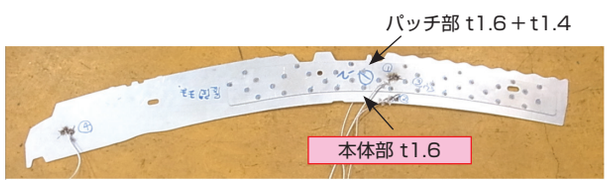


Fig. 11 Temperature sensor installed for temperature rise test

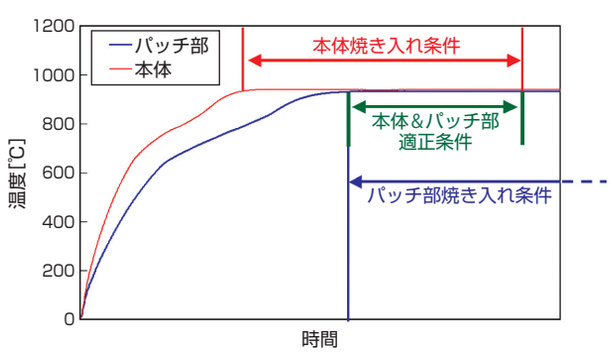


Fig. 12 Result of temperature rise test

5.2.3　スポット溶接部の強度

今回、各部の材料強度は、断面のビッカース硬度を測定することにより換算している。

一般的に、ホットスタンプ後にスポット溶接を実施した場合は、ナゲット部周辺のHAZ部が溶接時の熱により軟化することが知られている（Fig. 13）。

パッチワーク部のスポット溶接打点のホットスタンプ後の断面硬度（Hv）を測定した結果、ナゲット内、HAZ部ともに母材部と同等の硬度となっており、ほぼ均一な硬度（強度）を有していることを確認した（Fig. 14）。

また、今回トライを行った部品形状と板厚の組み合わせでは、プレス成形によるスポット溶接の剥がれ等の不良は発生しないことも確認した。

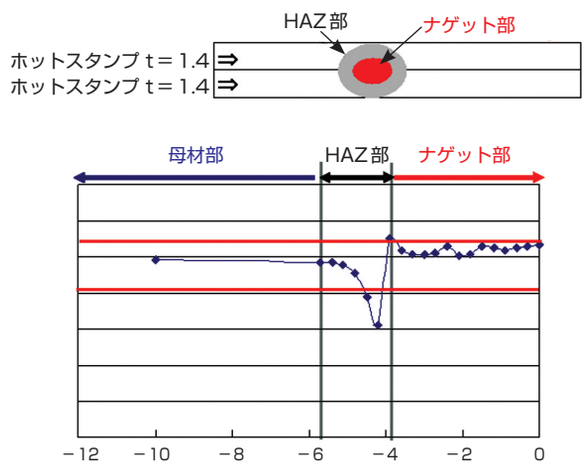


Fig. 13　Material hardness around spot welding area (Previous)

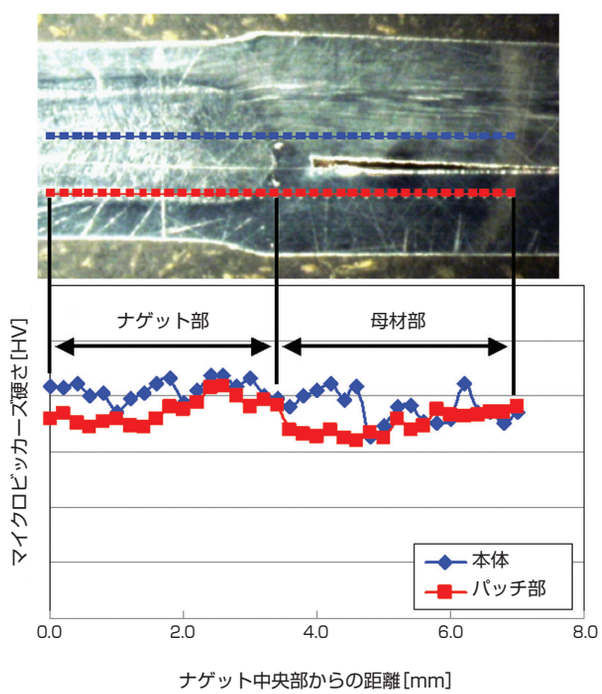


Fig. 14　Material hardness around spot welding area (Newly established)

5.3　品質検証結果

加熱条件および金型形状を最適化した条件を織り込み、実部品による硬度およびメッキ層の品質確認を行った。

その結果、本体部、パッチ部、および稜線引け部いずれも焼き入れ後の適正な硬度（Fig. 15）ならびに適正な合金化層（Fig. 16）が得られていることが分かった。

これらにより、ホットスタンプでのパッチワークが量産適用可能な工法であることが検証できた。

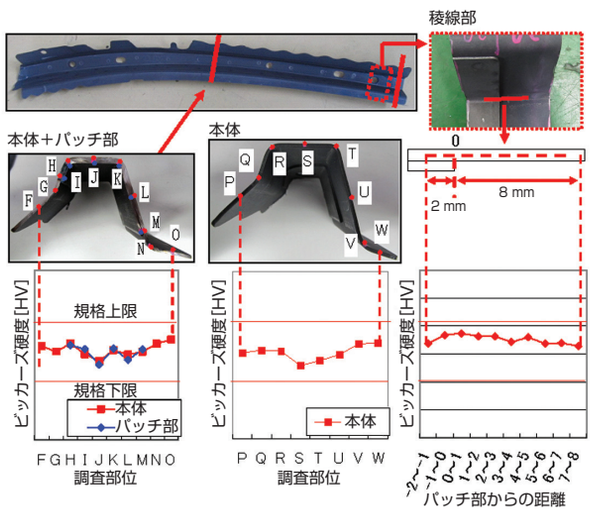


Fig. 15　Material hardness of each cross-section

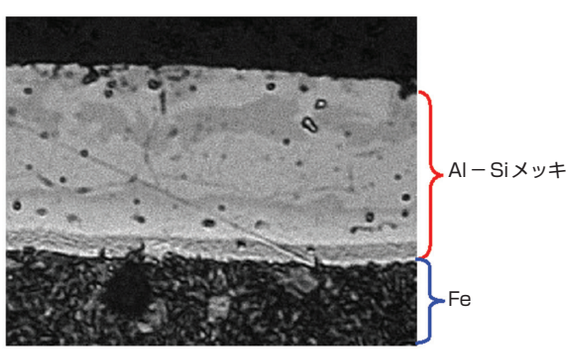


Fig. 16　Alloyed surface generation (Representative cross-section)

6.　あとがき

ホットスタンプ工法を応用し、更なる高強度化を図ると共に、軽量化とコストを両立させたパッチワーク工法の実用化に成功することが出来た。

これは、開発の初期段階から、部品製造メーカーをはじめ、富士重工業の関連部署が一体となり取り組んだ成果であると言える。

この開発で得られた多くの知見は、今後のスバル車に広く活かされていくものである。更なる魅力のある車造りを目指して、車体開発に取り組んでいきたい。

【著　者】

松崎　輝男

宮崎　高志

森　　修

岩沼　忠士

矢島　正毅

富士重工業株式会社

スバル自動車事業の拡充と世界進出――拡大期のスバル紹介

ザ・ニューレオーネ 4Dr セダン（1979年～ 1984年）

全長/全幅/全高(mm)　　4,270/1,615/1,365
エンジン　　水平対抗4気筒OHV　1,781 cc
最高出力　　100 PS/5,600 rpm
最大トルク　　15.0 kg-m/3,600 rpm

二世代目レオーネ「ザ・ニューレオーネ」は6月に4ドアセダンが発売。10月までにハードトップ、エステートバン、スイングバックを追加した。低公害化、省資源・省エネルギー、安全性、卓越した走行性等を高い次元で調和させた、国際水準をいくハイレベル小型車として、国内、海外とも好評を博し、米国では年間13万～ 15万台の販売となった。

複合材料を用いたエネルギー吸収部材の研究

Study of Energy Absorbing Member using Composite Material

池田　聡[*1]　Satoshi IKEDA
加藤　航[*1]　Wataru KATO
長沢　勇[*2]　Isamu NAGASAWA
向中野　侑哉[*1]　Yuya MUKAINAKANO
塩崎　竜二[*1]　Ryuji SHIOZAKI

抄　録

近年、環境問題としての軽量化や、車体の衝突安全の向上が求められている。上記要求を背景に、複合材料を用いたエネルギー吸収部材に着目し研究を行った。本取組では、クラッシュボックスを例に挙げ、円筒形クラッシュボックスを試作し、試験室で圧潰試験を行った。結果、十分なエネルギー吸収量を発現すると共に、発現荷重を制御する設計因子を抽出する事が出来た。また、設計可能な材料として、技術提案をするため、CAEによる平均荷重の再現性確認を行ったので併せて報告する。

Abstract

In recent years, vehicle weight reduction to address environmental challenges and vehicle body reinforcement to ensure collision safety, are both demanded. Against this background we conducted a study on energy absorbing members which have high energy absorption property and yet weigh less. We tested a cylindrical crush box prototype and analyzed the test result via CAE.

This paper reports the test and monitoring results of the average load repeatability.

1. まえがき

1.1　背景

近年、環境対応に対する要求が高まり、走行時のエネルギー消費を低減し燃費を向上させる事を目的とした車体の軽量化、車両の電動化に伴う重量増を低減させる事を目的とした車体の軽量化が求められている。一方で、衝突時安全性の向上と併せて、衝突時の補修性や歩行者保護の要求からフロントオーバーハングが長くなる傾向にある。フロントオーバーハングの増加は旋回時のヨー慣性モーメントの増加を伴い、操縦安定性の低下につながる。上記の要求、すなわち環境への配慮、衝突時の安心と、走りの愉しさそれぞれ両立させスバルらしいパッケージを実現させるため、複合材料のエネルギー吸収部材への適合に着目した。本報告では、クラッシュボックスを例にして研究を行った。

1.2　クラッシュボックスとは

前節で述べたように、欧州では軽衝突(15 km/h以下)での補修性を考慮した車体の構造設計が必須となっている。ダメージャビリティを考慮した車体構造として、フロントフレームとバンパービームの間にクラッシュボックスを設け、フロントフレームに対しボルト締結する構造がとられる(Fig. 1)。すなわち、衝突のエネルギーをバンパービームとクラッシュボックスで吸収させ、これらの2部品のみを交換し補修が完了する構造となっている。また大衝突時には、フロントフレームに対し荷重を伝達し、安定的なフロントフレームの変形の引き金となることが求められる。つまり、エネルギー吸収量だけでなく、圧潰に伴い発現する荷重・変位を制御することが要求される。

1.3　複合材料製クラッシュボックス

複合材料をクラッシュボックスへ応用する取組は、2000年代初頭から高級スポーツ車を中心に欧州で採用されてきた。近年では、トヨタ自動車のLFAにCFRP製のクラッシュボックスが採用されている(Fig. 2)。また、複合材料のクラッシュボックスは、F1やGTなどの競技車への採用も見受けられる。いずれも、複合材料のコスト高から、大衆車向けの製品は、ほとんど

＊1 スバル技術研究所
＊2 車両研究実験2部

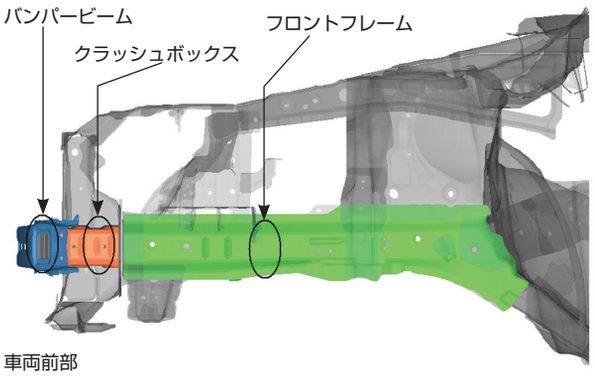


Fig. 1　Crush box

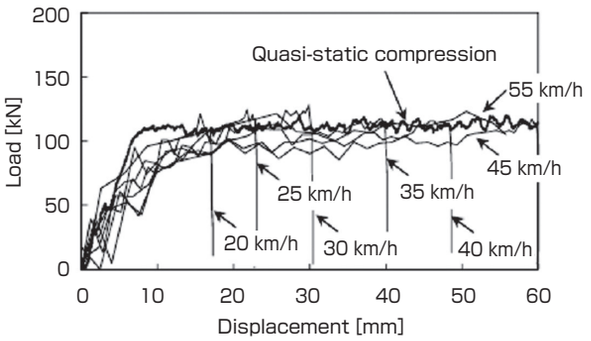


Fig. 3　Load-displacement curve of CFRP crush box [2]

Fig. 2　LFA crush box [1]

Fig. 4　CFRP tube after dynamic crush test of 35 km/h [2]

存在しないが、材料自体の衝突への応用可能性の高さが伺える。

一方、学術的な報告も多い。その一例として、Tsujiらは、複合材料の動的試験時の基本的な圧潰時の荷重変位特性について報告している[2]。この報告では、複合材料を用い、円筒形状で圧潰試験を行っている。破壊速度は、20 km/hから55 km/hの範囲で実施。結果をFig. 3に示す。速度域の増加に伴い、多少の荷重のばらつきは発現するものの大きな荷重の低下・増加は認められない。圧潰後の様子をFig. 4に示す。試験体が外方向へと裂けながら進展していることが伺える。金属とは異なり細かい座屈破壊の連続から、荷重が発現している。つまり、金属材料とは異なり、座屈由来の荷重変動がなく安定した、高いエネルギー吸収が実現している。

これら、車メーカの技術動向、学術的な知見双方を背景に、フロント重量の軽減による走りの愉しさ、安定的にエネルギーを吸収する事による衝突時の安心、これらを実現するため、複合材料のクラッシュボックスの研究を行った。

2.　目的

前節でも述べたとおり、クラッシュボックスには、衝突時のエネルギーを吸収するだけでなく、フロントフレームへの影響等、変位に応じた荷重の発現を制御することが求められる。そこで試作パラメータを変化させ,その荷重・変位をコントロールする手段の取得を目的とした。

また、近年の車両開発において、CAEを用いた机上での検討は不可欠である。しかし、複合材料の軸圧潰現象では様々な位置での微小破壊が連続的に発現し、その現象の再現は非常に困難である。そのため、現在の車両開発に適合できるよう複合材料軸圧潰のCAEでの再現を目的にモデル構築を行った。

3.　実験・解析実施の検討

3.1　材料検討

本検討では圧潰時のエネルギー吸収性能だけでなく、発現荷重の制御可能性・量産の実績も含めた材料の調査・選択を行った。その結果、熱硬化性樹脂と炭素繊維を用いた、組み物を用いた複合材料を選択する事とした。本材料は組紐(Braiding fiber)と縦紐(Middle-end-fiber)によって構成される複合材料である(Fig. 5)。

特徴として、組紐のなす角度を可変に設計することができる点が挙げられる。組紐のなす角度を変更する事で、材料自体の弾性率を変更できることから、組角度変更が発現荷重の設計因子になり得る事が考えられ

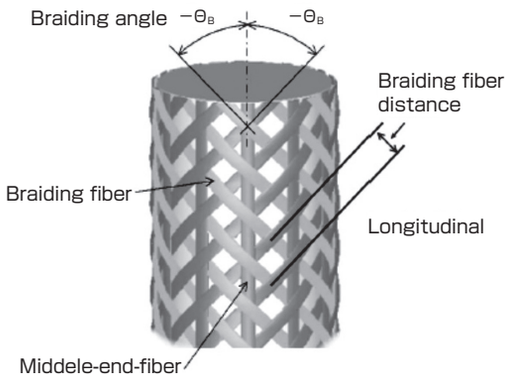


Fig. 5　Braided composite [3]

る。また、ゴルフシャフト等での採用実績があり、量産を見据えた際に、製造工程の自動化が確立されている事(Fig. 6) から、他の複合材料と比べ製造コストを抑える事が可能と考えた。本試験では、組角度を30°60° の物を試作し、その組角度に対する荷重応答性を検討・検証する事とした。

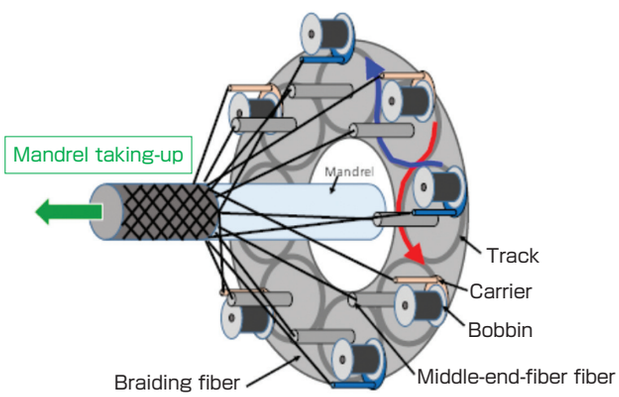


Fig. 6　Manufacturing method for braiding [3]

3.2　形状検討

初期の検討として、稜線等を設ける事等による応力集中を避け材料自体の性能把握を目的とし、円筒形状を選択した。また、安定破壊荷重への、荷重の立ち上がりをリニアにすることを目的としたテーパを設けた。また、そのテーパの効果を切り分けて考察するため、テーパの長さを3水準設けた(Fig. 7)。また、内径･板厚に関しては､張り剛性を現行の金属クラッシュボックスと同等程度にするため、内径・積層数を決定した。

Table 1に試作したクラッシュボックスのパラメータと、本報告における試験体の表記を示す。

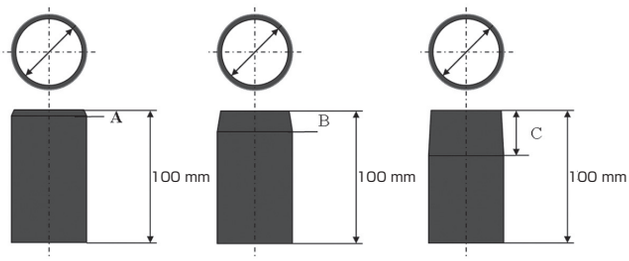


Fig. 7　CFRP tube

Table 1　Prototype parameters

		テーパタイプ		
		A	B	C
組角度	30°	30 − A	30 − B	30 − C
	60°	60 − A	60 − B	60 − C

3.3　試験・解析方法

3.3.1　静的圧潰条件

Tsujiの報告[2]から、動的圧潰時の荷重変化は少ないとし、静的試験での荷重設計を第一のステップとした。試験は(株) 島津製作所製オートグラフAG25TBにて実施した。試験環境として、圧潰用の下面治具に溝を設け、試験体を固定した。上面は平面治具を設け圧潰した(Fig. 8)。試験速度は過去の文献より、10 mm/minとし、静的圧潰試験を実施した。

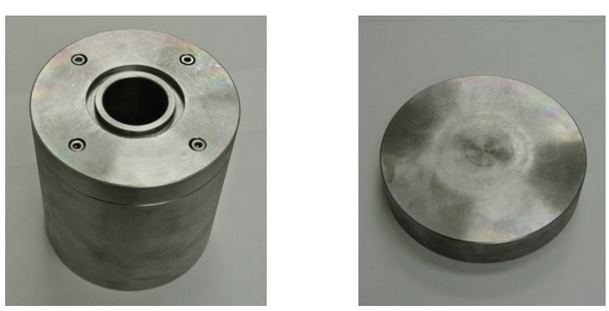


Fig. 8　Jig shape

3.3.2　CAEモデル検討

本検討では安定破壊領域(荷重が安定し破壊が進行する領域) の平均荷重を再現する事を目標とした。平均荷重はデータ点の平均を取ることで算出した。また、計算コスト・計算安定性の観点より、複合材料の積層表現に関しては1つのシェルで表現する事とした。テーパに関しては、板厚の設定を各部位で変更する事で表現した(Fig. 9)。

また、物性値に関しては円筒形状より試験片を切り出した(Fig. 10)。その試験片に対し静的引張試験を行う事で物性値取得し、等価介在物法を用い、モデルへ織り込む事とした。

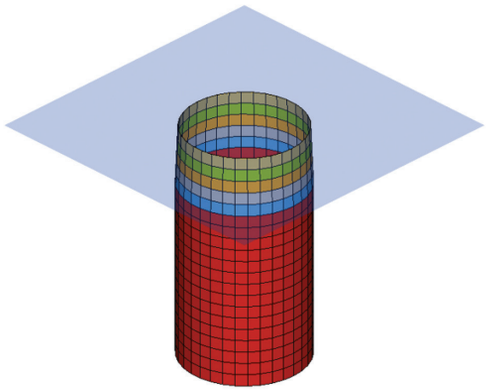


Fig. 9　CAE model

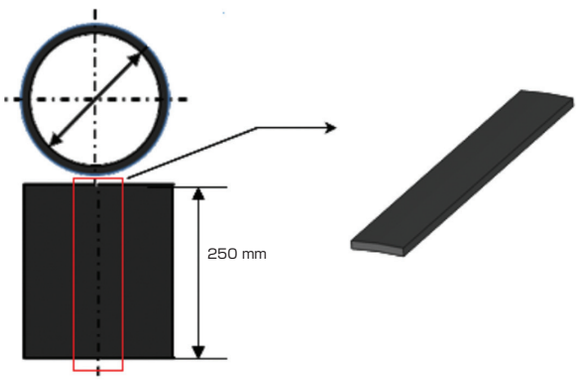


Fig. 10　Cut-out test piece

4.　結果・考察

4.1　静的圧潰試験

4.1.1　30°組角度試験結果

30°組角度に関し軸圧潰を行った。結果をFig. 11に示す。連続的な細かい圧潰現象が発現した。どのテーパ長の物に関しても、圧潰後の試験体の様子から、内側への巻き込みと外側への巻き込み双方が発現し圧潰が行われた。また、安定的な破壊が発現するまでの荷重の立ち上とテーパ長に相関がある事を確認した。テーパ長を長くとることで、荷重の立ち上がりの傾きが小さくなった。

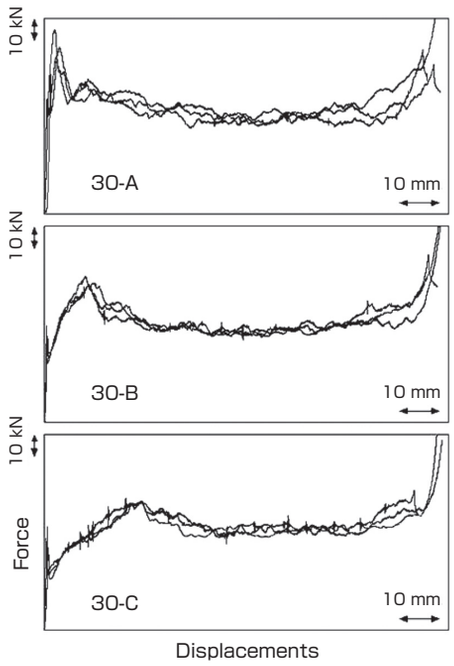


Fig. 11　Test results at 30° angle

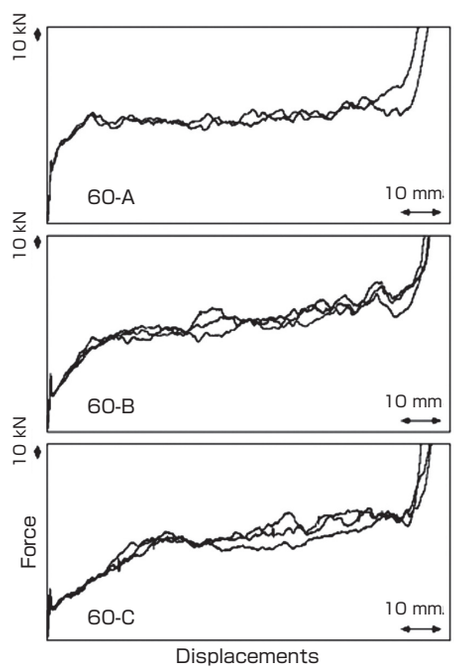


Fig. 12　Test results at 60° angle

4.1.2　60°組角度試験結果

60°組角度に関しても圧潰試験を行った。結果をFig. 12に示す。60°組角度の試験体に関しても、30°組角度と同様な連続的な細かい圧潰現象が発現した。またテーパ長に関しても、30°組角度の試験体と同様、テーパ長を長くとることで、荷重の立ち上がりの傾きが小さくなることを確認した。

4.1.3　試験結果　まとめ

(1) 組角度依存性

まず、組角度に対する依存性に関して検討したい。60°と30°を比較すると、組角度の低い30°組角度の試験体の方が安定破壊領域の発現荷重が低く、60°組角度の試験体の方が安定破壊領域の発現荷重が高い。圧潰後の試験体を観察すると、30°組角度の試験体よりも、60°組角度の試験体の方が細かく繊維破断している。これらより、繊維をより細かく破断させ圧潰を発現した60°組角度の試験体の方が、30°組角度の試験

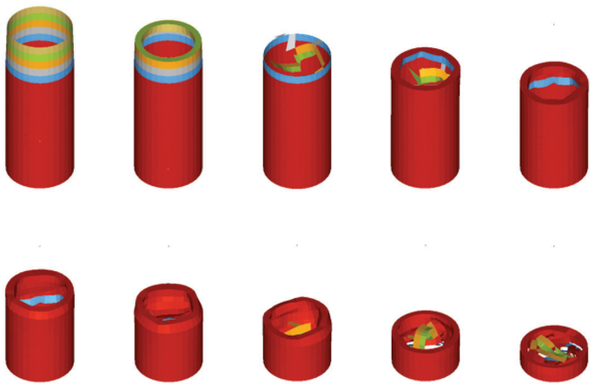


Fig. 13　Crush mode

体より荷重が高く発現したことが示唆される。

(2) 形状依存性

次に、形状に対する依存性に関して検討する。組角度に依存せず、テーパ長を長く設計する事で、安定破壊までの荷重の立ち上がりの傾きが緩やかになることが分かった。このことから、板厚が荷重の立ち上がりに優位に寄与していることが考えられる。

設計因子の荷重への影響を以下にまとめる。

■ 組角度の効果：組角度が高いほど繊維破断が細かくなり、安定破壊時の発現荷重が高くなる。

■ テーパの効果：初期の荷重から、安定破壊領域に達するまでの荷重の立ち上がりに効果を発揮する

4.2　CAE解析

本報告ではタイプ30－Cについて報告する。圧潰のモードをFig. 13に、CAE結果と実験結果の比較をFig. 14に示す。

圧潰モードに関しては、実際の試験は内側への巻き込みと、外側への巻き込みが双方発現しているのに対し、解析では、一層のシェルでモデルを構築したため、外側への開きが表現できず、内側へ巻き込むモードのみが発現している。

発現荷重の比較であるが、高ストローク側では平均荷重の一致が見られた。一方テーパを含む低ストローク側での平均荷重の再現が課題となった。モデル上では、高ストローク側での荷重に、安定的な座屈モードが発現している。一方、低ストローク側では、テーパ部分に、要素の消失や分離による、荷重の飛び（スパイク）が発現している。

本検討より、安定破壊時の平均荷重に関しては5%以下の誤差で再現する事が出来た。今後は、テーパ部分の再現検討と、破壊のモードに関しても検討を進める。

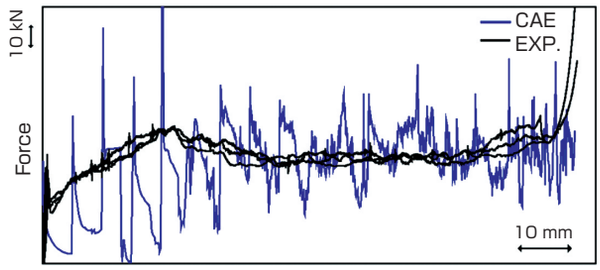


Fig. 14　Analysis result

5.　まとめ

クラッシュボックスの技術動向・学術的な報告から、複合材料製クラッシュボックスに着目した。設計パラメータの抽出とCAEでの平均荷重の再現を目的として検討を進めた。

本検討から、クラッシュボックスとして十分なエネルギー吸収を発現した。また、形状・組角度というパラメータから圧潰時に発現する荷重を設計する事が可能であることが分かった。

また、CAEモデルでは一層のシェルモデルで、安定破壊領域の平均荷重に関しては、再現可能であることが分かった。安定破壊領域に達するまでの解析の再現性が課題となった。

最後に、富士重工業は航空機メーカとして、複合材料を扱ってきた歴史がある。今後、本取組を通じ、複合材料を用いた車づくりを行い、富士重工業としてのブランド形成に繋げたい。

6.　謝辞

本研究の遂行に当たり多大なご助言、ご協力を頂いた、日本大学理工学部青木義男教授に謝意を示します。

参考文献

(1) 林達彦：CFRPで車を作る、日経Automotive technology, 2012.05, p.40

(2) T.Tsuji *et al.*：Characterization of energy absorption of unidirectional CFRP using a new plug, 17th International conference on composite materials (2009)

(3) Y.Kakita *et al.*：Fabrication and flexural properties of braided CFRP rectangular tube, 13th JAPAN International sampe symposium and exhibition

【著　者】

池田　　聡

加藤　　航

長沢　　勇

向中野 侑哉

塩崎　竜二

富士重工業株式会社

スバル自動車事業の拡充と世界進出――拡大期のスバル紹介

レオーネ4WDツーリングワゴン（1981年）

全長/全幅/全高(mm)　　4,275/1,620/1,470
エンジン　　水平対抗4気筒OHV　1,781 cc
最高出力　　100 PS/5,600 rpm
最大トルク　　15.0 kg-m/3,600 rpm

1981年7月、乗用ワゴン「レオーネ4WDツーリングワゴン」を発売。4WDの卓越した走行踏破性とセダンの快適性を備え、さらに二段ルーフによる大きなスペースユーティリティを作り出した多目的四輪駆動ツーリングワゴンであった。二段ルーフはエステートバンとの差別化を図る象徴的な造形である。

ドライバ状態の共有による交通事故低減技術の研究

Research and Development of Traffic Safety Mechanism Based on Driver's Behavior and Reliability Sharing

鳥居武史[*1] Takeshi TORII
松尾典義[*2] Noriyoshi MATSUO
内海章[*3] Akira UTSUMI
多田昌裕[*4] Masahiro TADA
山本直樹[*3] Naoki YAMAMOTO
志堂寺和則[*5] Kazunori SHIDOJI

抄　録

ドライバの状態を他者と相互に共有することで交通事故を低減することを目的として研究開発を行なった。従来の運転支援システムのほとんどは周囲の状況やドライバの状態をドライバ本人に提示して危険運転の防止を図るものであり、その効果はドライバ本人の能力・認知状態に依存している。本研究では、車載センサによってドライバの状態(注意の程度・方向など)を検知し、検知された情報を周囲のドライバ、歩行者と共有することにより、早期の危険予測を可能とし事故回避につなげることを目指した。本稿では、ドライバ状態の検知、ドライバ状態提示装置及びその効果、社会的受容性に関する研究プロジェクトの概要を述べる。

Abstract

In this paper, we describe our project to develop a collaborative safety mechanism which is based on mutual sharing of driver's information (such as attention level and performance while driving). Most conventional safety driving approaches have aimed at assisting individual drivers by providing various types of safety information to them in vehicles. However, the effect of such systems highly depend on driver's response (performance). In our approach, we intend to share information on driver's current performance level with other drivers and pedestrians on the road. Using this information sharing mechanism, people in the traffic environment will be able to better predict driver's behaviors and take proactive actions to prevent accidents.

1. はじめに

これまでの運転支援システムのほとんどはドライバ本人の支援を目的としたものであった。例えば、車間距離警報装置やナビゲーションシステム、リヤビューカメラなどにより、従来は得られなかった多くの情報がドライバに提示されている[(1)(2)(3)]。これらは周囲の状況やドライバ自身の状態をドライバに提示することで危険運転の防止を図るものであり、実際多くの場面で注意喚起･周囲状況の把握に役立っている。しかし、これら情報提示の効果はドライバの能力・認知状態に依存しており、疲労・加齢等によって認知状態の低下したドライバに対しては十分な効果を期待できない。

そこで、ドライバの状態(注意の程度、方向など)を周囲の交通参加者(他車両のドライバ、歩行者)と共有することにより事故の回避・低減を図る方法の検討を進めている。ドライバ状態の共有により他の交通参加者(ドライバ、歩行者)は、例えば相手のドライバの注意が自分に向いていないことを把握し、早期の危険予測･回避行動を行うことなどが可能となる。「初心運転者標識」「高齢運転者標識」など従来から行われているドライバ状態の表示は免許保有年数やドライバの年齢によって一律に表示を行うものであり、実際のドライバの能力・認知状態を直接反映したものではない。そのため、周囲の交通参加者から見て標識の有無が必ずしもそのドライバの運転行動の予測にはつながっていないのが現状である。本研究では、ドライバの運転・認知状態を動的に検知し、検知した状態を周囲の交通参加者と共有することを目指した(Fig. 1)。

＊1 スバル技術研究所
＊2 車両研究実験第2部
＊3 株式会社国際電気通信基礎技術研究所
＊4 近畿大学
＊5 九州大学

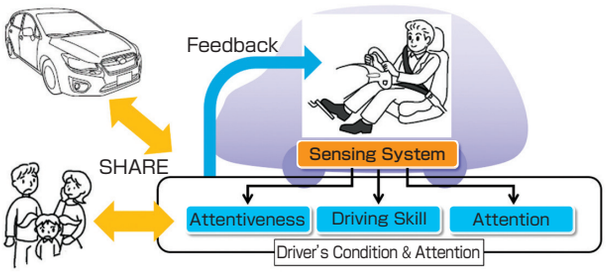


Fig. 1　Sharing driver's condition and attention with surrounding pedestrians and drivers

2.　ドライバ状態の検知

ドライバ状態の検知は、車載センサ等により得られる自車両周辺の道路状況と視線・操舵情報より得られる運転行動からドライバの注意方向・運転状態を検知するシステムとした。日常の運転時における利用を考慮すると、できるだけ負荷の少ない方法でドライバの状態を検知する必要がある。そのため、ドライバに非装着のセンサによる運転行動の取得技術について開発を進めた[4][5][6]。

その結果をFig. 2 ～ Fig. 4に示す。Fig. 2は顔画像を撮影するために実験車両に設置したカメラであり、Fig. 3は、車載カメラによる頭部姿勢の検出例である。眼鏡や手・マスクなどによって部分的な隠蔽が生じている場合でも頭部姿勢の推定が可能である。Fig. 4上は、顔画像から推定された運転中の頭部姿勢(水平方向)の例を示している。図中、横軸は時間を示す。また、縦軸の正方向の動きが右向きの顔向き変化、負方向が左向きの変化をそれぞれ示している。同図下はジャイロセンサによる頭部姿勢(水平方向)の計測結果を示す。両者を比較すると、ほとんどの時間で両者に対応した動きが見られることが分かる。図中の矢印区間は映像を人が見て判断した結果、ドライバの確認行動が見られた時間帯を示す。画像処理、ジャイロいずれの結果も確認行動の発生時刻とよく一致しており、頭部運動が適切に検出できていることが分かる。なお、ジャイロセンサから得た頭部姿勢(同図下)はドリフト誤差により徐々に正方向にシフトしているが、画像による推定結果ではこのようなドリフトは見られない。

さらにドライバの運転状態は、顔姿勢とペダル操作に基づいて判定するようにした。700人以上のドライバの運転挙動データを取得し、指定自動車教習所指導員の評価に基づいた解析結果とともにデータベース化しており[7]、運転状態の評価は、センサによって観測されるドライバ挙動をこのデータベースに含まれる“望ましい安全確認行動”と比較することによって行なう。

具体的には、交差点等の要注意地点でドライバがなすべき事故予防動作を①安全確認すべき方向(左側／右側)、②安全確認の回数、③安全確認の深さ、④安全確認の持続時間、⑤安全確認を行うタイミング、⑥要注意地点における車両速度、⑦右足のブレーキ操作行動、という7つの評価項目を用いて各々定義し、その達成度を評価する[8]。

Fig. 2　On-vehicle camera

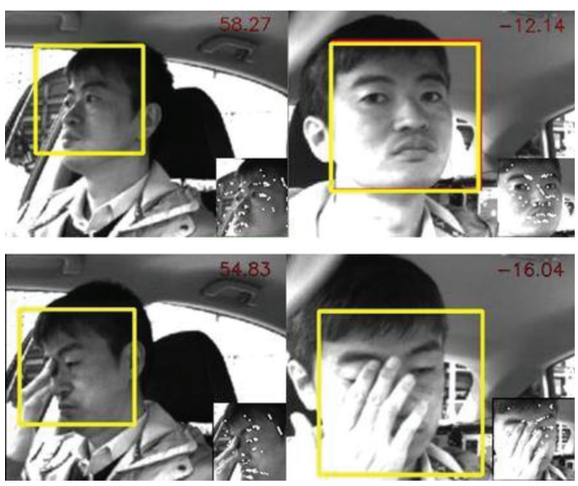


Fig. 3　Example of head pose detection results

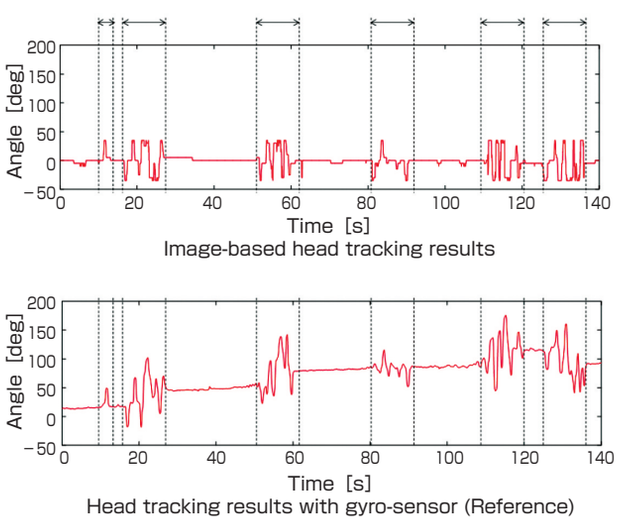


Fig. 4　Driver's scanning behavior

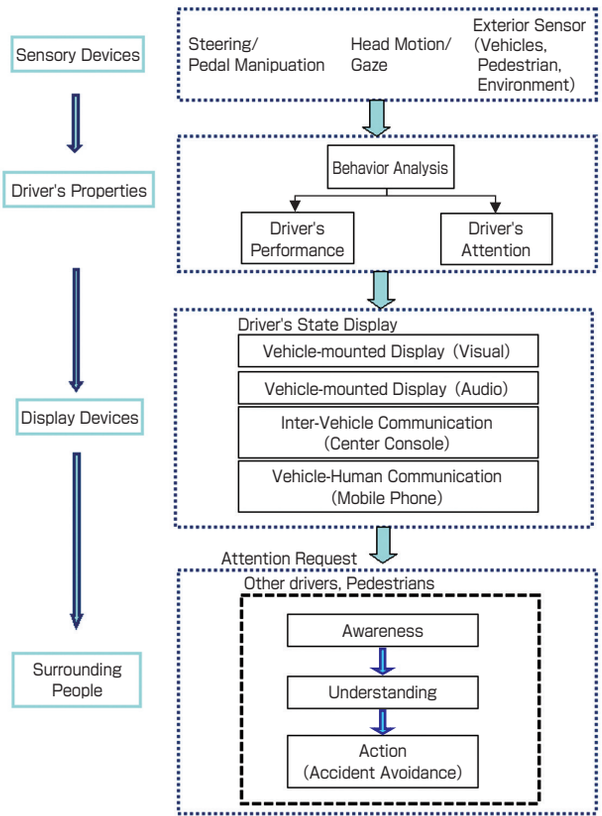


Fig. 5　System configuration diagram

3.　ドライバ状態の提示装置

ドライバ状態の車外提示については、提示情報を「ドライバの注意方向」、「ドライバの状態」の2種類に集約して検討を進めた[9]。「ドライバの注意方向」は、主にドライバのリアルタイムの顔向き・視線方向からドライバの注意がどこに向いているかを示すものである。当該情報の提示を受けた周囲のドライバ・歩行者は、当該車両のドライバの注意方向と自身の関係を注意のタイミングを含めて知ることができる。「ドライバの状態」は、より長い時間の幅（過去数分～数十分程度）の評価を反映したドライバの現在の運転状態の良否を示す。運転スキル等の本人の定常的なパフォーマンス、眠気・疲労等による注意力の低下、脇見等による注意の偏りなどを反映する。「ドライバの状態」の提示を受けることによって周囲のドライバ・歩行者は当該車両の持つ危険の程度について予測することが可能になる（Fig. 5）。

Fig. 6 ～ 8は試作した提示装置の例を示している。高輝度LEDパネルをヘッドランプ下部およびリアウィンドウ内に組み込む方法を検討し、試作を行なった（Fig. 6）。試作した装置では「ドライバの注意方向」をLEDの点灯位置で「ドライバの状態（低下）」をLEDの点滅でそれぞれ表現した（Fig. 7）。また、危険度の高い車両については無線通信を利用して他車両の車載装置や歩行者の持つ携帯端末に音声および画像で危険情報を提示することを想定している（Fig. 8）。これにより周囲のドライバ、歩行者が当該車両に気づくことを容易にし、車載装置による情報提示につなげる。

Fig. 6　Vehicle-mounted display system

Fig. 7　Example of driver's attention displays

Fig. 8　Display methods through wireless communication
(left: on-board display, right: mobile device)

4.　ドライバ状態共有の効果

提案手法によるドライバ状態共有の効果について確認するため、実車およびシミュレーションによる実験を実施した。

4.1　実車実験

上記車両（Fig. 6）を使用し実車による実験を行なった。実験では、実験参加者は横断歩道の手前に立ち接近車両を観察する（Fig. 9）。ドライバ状態が通常であることを示す白色の表示とドライバ状態の低下を示す

Fig. 9　Experimental environment

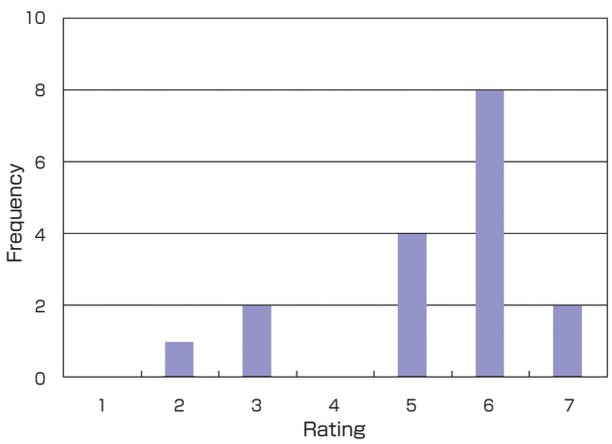


Fig. 10　Subjective usefulness of displayed information

青色の表示の2種類の条件で、横断タイミングに関して接近車両に対する歩行者(実験参加者17名)の反応を調べた。なお、実験参加者には、ドライバ状態の低下を示す青色LEDを点灯した車両が蛇行運転する様子などを見せ、表示の変化(青色、白色)がドライバの状態と関連することを事前に説明した。横断タイミングに関する解析の結果、ドライバ状態の低下を表示することで参加者に慎重な行動を促す効果があることを示唆する結果が得られた。Fig. 10は実験参加者に対して横断タイミングの判断においてドライバ状態の表示が参考になったかを尋ねた結果を示している。参考になった程度は、7点満点中平均で約5.3点であり、危険情報の呈示が横断時における歩行者の判断に寄与することが示された。

4.2　シミュレーション実験

4.2.1　追従走行

シミュレーション実験では、実車での環境再現が難しい情報提示による他車両のドライバの行動変容について調べた。Fig. 11は、ドライバ状態を表示している車両の後続車両を運転した場合の表示装置の有無、表示状態の違い(通常、ドライバ状態低下)による車間距離の違いを示したものである(実験参加者10名)。20 Km/h台、30 Km/h台、40 Km/h台で走行した時に分類してデータを整理した。ここに見られるように、ドライバ状態の低下を表示した条件が最も車間距離が長く、走行速度が大きくなるほどその傾向が顕著になることが分かった(3つの運転条件、3つの走行速度の全ての間で有意差あり)。これは、走行速度が高いほど、先行車のドライバの認知状態が低下した時に通常の状態よりも大きな車間を取るような運転を後続のドライバがすることを示唆していると考えられる。

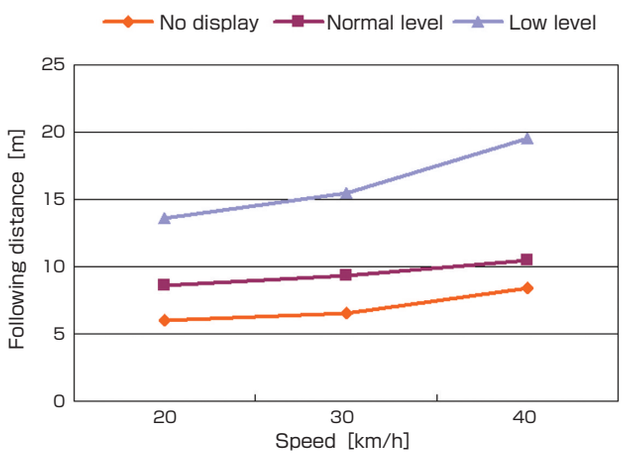


Fig. 11　Following distance to proceeding vehicle

4.2.2　すれ違い走行

ドライバ状態を表示している対向車とすれ違う際の運転挙動について実験を行なった(実験参加者61名)。実験では、対向車として通常状態を表示する車両3台、ドライバ状態低下を表示する車両3台を交互に配置し、実験参加者の運転する車両とすれ違いをさせた。Fig. 12は実験参加者車両と対向車が横に並んだ際の距離を、Fig. 13はすれ違い時の自車両の速度をそれぞれ示している。ここに見られるようにいずれの条件においてもドライバ状態低下の表示により有意にすれ違い時の距離が広がり、速度が低下することが確認できた。

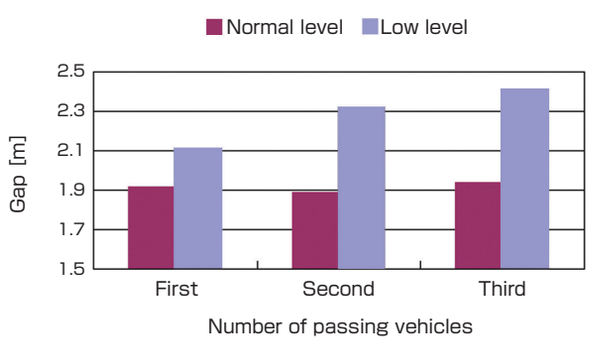


Fig. 12　Gap between vehicles in passing

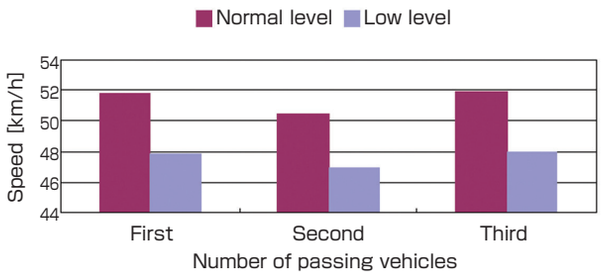


Fig. 13　Traveling speed in passing

4.2.3　追い越し走行

ドライバ状態を表示している先行車両を追い越す際の運転挙動について実験を行なった（実験参加者61名）。実験では、先行車両として対向車の実験と同様に通常状態を表示する車両3台、ドライバ状態低下を表示する車両3台を交互に配置し、実験参加者に追い越しを指示した。Fig. 14は実験参加者車両と追越し対象の先行車両が並んだ際の距離を示している。いずれの条件においてもドライバ状態低下の表示により有意に距離が広がることが確認できた。

また、追越し開始時の車間距離は通常の状態で23.8 m、ドライバ状態が低下している状態で29.5 mであった。追い越し終了時の距離は通常の状態で17.6 m、ドライバ状態が低下している状態で19.9 mであった。いずれも統計的に有意な差であり、先行車両がドライバ状態の低下を表示している場合には距離的に余裕を持った追い越し運転が行われていることが確認できた。

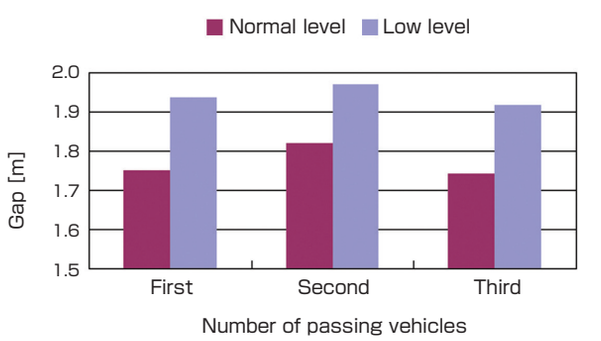


Fig. 14　Gap between vehicles in overtaking

5.　社会的受容性

提案手法はドライバ自身の状態を他者に対して開示するものであり、そのような方法を一般のドライバに受け入れてもらうことが可能かについて検討する必要がある。そこでドライバ状態の共有によって交通事故を低減するアプローチの社会的受容性を評価するために、日米で日常的に運転を行なっている者に対して、インターネット上で大規模なアンケート調査を実施した（日本：回答者数約1,500名、米国：回答者数約500名）[(9)(10)]。

その結果、日本において「周囲に提供してもよい」と回答した者の割合は、a：車両の挙動情報（車両の速度、加速度、進行方向に関する割合の平均）で88%、b：ドライバ状態（注視方向、覚醒度、集中度、安全運転度に関する割合の平均）で82%、c：ドライバの個人情報（性別、年齢に関する割合の平均）で61%であった。システムが有用であると感じている者、運転に自信がある者は、認知状態の情報提供について肯定的な回答をする傾向があった。また、米国において「周囲に提供してもよい」と回答した者の割合は、a：車両の挙動情報で81%、b：ドライバ状態で76%、c：ドライバの個人情報で66%であった（Fig. 15）。

日米でのこれらの結果を考慮すると、ドライバ状態を周囲に提供することについて回答者の75%以上が肯定的な回答をしており、社会的に受け入れられる可能性があることを示唆する結果と考えられる。また、システムが有用であると感じている者は情報提供に受容的であったことから、情報提供システムの有用性を適切に宣伝することにより、社会全体での情報提供に対する受容度の増加が期待できる。

以上により、提案手法の社会的受容性について一定の確認ができたと考えられる。

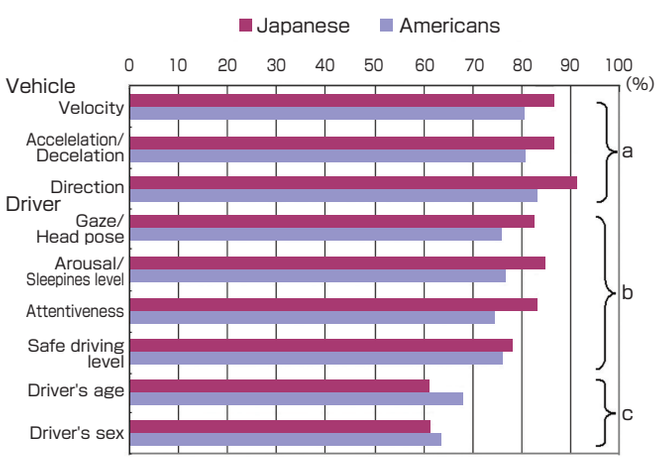


Fig. 15　Acceptance rate of self-information disclosure

6.　おわりに

ドライバの状態を互いに共有することで交通事故低減を図ることを目的に進めた研究開発プロジェクトの概要について述べた。同プロジェクトでは、ドライバ状態の検知技術の開発、ドライバ状態の提示技術の開発及びその効果検証、ドライバ情報の共有に関する社会的受容性の評価を行なった。ドライバ状態の検知では非装着型のセンサから得られる情報をもとに、観測

される運転挙動をモデルデータと比較することでドライバ状態を評価した。検知されたドライバ状態は周囲のドライバや歩行者に車載型の提示装置によって提示し、実車実験とシミュレータ実験によって、その効果を確認した。提案手法の社会的受容性に関して日米で行なった大規模なアンケート調査では、75%を超える回答者からドライバ状態の共有に肯定的な回答が得られた。

提示情報は社会的な共通認識が必要だと考えられ、実際に社会に適合可能な効果的な情報共有のあり方については、さらなる検討が必要である。

本研究は総務省の戦略的情報通信研究開発推進制度（SCOPE）の研究委託として、2011 ～ 2013年度に株式会社国際電気通信基礎技術研究所、国立大学法人九州大学と共同で実施したものである。

参考文献

(1) 国土交通省：ASV（先進安全自動車）、http：//www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/
(2) United States Department of Transportation Research and Innovative Technology Administration, http：//www.its.dot.gov/
(3) European Commission, http：//ec.europa.eu/information society/activities/esafety/index_en.htm
(4) 乗富修蔵、内海章、篠沢一彦、萩田紀博、高橋和彦：局所的な画像特徴を利用した投票に基づく高速顔位置・姿勢推定、電子情報通信学会技術研究報告、IE2012-88、p.35-40、(2012)
(5) Akira Utsumi, Kotaro Okamoto, Norihiro Hagita, and Kazuhiko Takahashi, Gaze tracking in wide area using multiple camera observations, In Eye Tracking Research and Applications, p.273-p.276, (2012)
(6) 乗富修蔵、多田昌祐、内海章、山本直樹、松尾典義、鳥居武史、志堂寺和則：画像による顔姿勢推定を利用したドライバの運転挙動評価、電子情報通信学会技術研究報告、ITS2012-67、p.65-69、(2013)
(7) 多田昌裕、瀬川誠、岡田昌也、蓮花一己、小暮潔：装着型センサを用いた運転技能自動評価システムの開発と講習現場への導入の試み、電子情報通信学会技術研究報告、PRMU-108（263）、p.1-6、(2008)
(8) Masahiro Tada, Haruo Noma, Akira Utsumi, Makoto Segawa, Masaya Okada, and Kazumi Renge, Elderly driver retraining using automatic evaluation system of safe driving skill, In 19th ITS World Congress, (2012)
(9) 志堂寺和則、内海章、多田昌裕、山本直樹、松尾典義、鳥居武史：Webアンケート調査によるドライバの認知状態共有に関する社会的受容性の検討、自動車技術会学術講演会前刷集、No.126-13、p.19-24、(2013)
(10) 立花宏教、志堂寺和則、内海章、多田昌祐、山本直樹、松尾典義、鳥居武史：Webアンケート調査によるドライバの認知状態共有に関する社会的受容性の検討～北米での調査結果～、電子情報通信学会技術研究報告、ITS2013-73、p.31-35、(2014)

【著　者】

鳥居　武史

松尾　典義

内海　　章

多田　昌裕

山本　直樹

志堂寺 和則

SUBARU フォレスター・XV の 人間生活工学製品機能認証

Certification for “Human Engineering for Quality of Life” Products and Functions for SUBARU Forester and XV

松 尾 典 義[*1] Noriyoshi MATSUO
渡 邊 常 寛[*2] Tsunehiro WATANABE
荻 原 浩[*3] Hiroshi OGIWARA

抄 録

2014年より 一般社団法人 人間生活工学研究センター（HQL）による人間生活工学製品機能認証がスタートした。人間生活工学製品機能認証とは、その製品が人間に与える効果や影響が科学的に適切な開発プロセスを経ているかどうか、またその機能が適切に記述・表示されているかどうかを審査し、認証するものである。スバルではオール・アラウンドセーフティとして多くの機能・システムを対外訴求しているが、その証明のひとつとして、フォレスターとXVを対象に安全・安心に関わるこれらの機能についてプレ認証を受け、2014年4月に内定を得ることができたのでその概要を報告する。

Abstract

Certification system for “Human Engineering for Quality of Life” started in April, 2014. Research Institute of Human Engineering for Quality of Life assesses whether a product has undergone scientifically appropriate development processes or the functions are properly described.

SUBARU has promoted various “All Around Safety” features and systems. To support the validity, we had SUBARU Forester and SUBARU XV certified for its safety features. This paper reports the certification outline.

1. 人間生活工学認証とは

「見やすい」、「使いやすい」といった表現・表示は、製品の購入要素として重要であるが、定性的であり、さらに必ずしも科学的な要素に基づいていないケースがあるため、類似する製品との価格競争となった場合に機能が伴っていない低価格の製品をユーザが購入するようなケースも想定される。

これに対処するため、電機、アパレル、輸送機器などのメーカが主な会員となって、「安心・安全・快適・健康・便利」な生活を実現するための“ものづくり”の考え方と技術の質的向上に産学官で取り組んでいる一般社団法人人間生活工学研究センター（HQL）において、人間生活工学ガイドラインが設定された[(1)]。さらに、このガイドラインに沿った開発プロセスに該当する製品についてディスクリプション（記述、説明）が適切であることを認証する制度を2014年から開始している。認証の概要をFig. 1に示す。

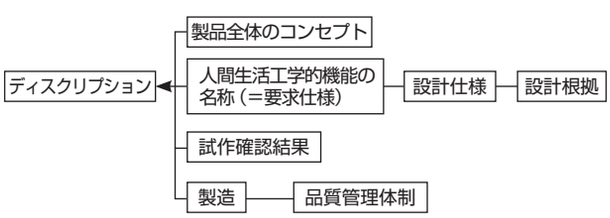


Fig. 1 Outline of Human Engineering for Quality of Life certificate

例えば、「良好な視界」というディスクリプションを認証対象とする場合、「良好さ」が、直接視界か間接視界か、を前後・斜め方向視界かなどを規定し、規定した中で良好さを数値化しなくてはならない。その数値に基づいて図面化して試作評価、最終的にはユーザに視界が良好であると感じていただく必要がある。そのためには他銘を含めた寸法データなどの物理値と

＊1 車両研究実験第2部
＊2 車両研究実験総括部
＊3 技術開発部

感覚値との対応を探る必要がある。

認証は、HQLが認証事務局となり、外部委員による審査委員会により審査され認証可否が決定される。認証可となった製品(認証製品)のディスクリプション、人間生活工学的機能の名称には、Fig. 2に示すマークの表示が認められる[(2)]。さらに、認証製品は、人間生活工学認証ホームページで、ディスクリプションへの意見・感想、またこれらの活用についての意見、感想と合わせて公開される[(3)]。

Fig. 2　Certificate logo of Human Engineering for Quality of Life [(2)]

2.　SUBARUの取り組み

2.1　認証の対象範囲

2012年HQLから会員企業にプレ認証の募集があり、SUBARUでは、Fig. 3に示すようなオール・アラウンド・セイフティとして車両トータルでの認証取得を目指し応募した。オール・アラウンド・セイフティとは、普段の運転シーンでの安全性から事故発生時までの乗員及び歩行者の被害低減までを示しており、ディスクリプションも多岐にわたっている。

Fig. 3　SUBARU All Around Safety

2.2　ディスクリプションの設定

本認証事業開始時点である2012年末段階で、最新車種であったフォレスター及びSUBARU XVの2車種を選定した。

これらの車種において、目標設定段階に遡り、0次安全性能(視界、表示・操作系、空間)、アクティブセーフティ(走行性能)、パッシブセーフティ(潜在的事故回避、顕在的事故回避)、プリクラッシュセーフティー、衝突安全に関するディスクリプションを11個選定した。

2.3　人間生活工学的機能と設計仕様の設定

それぞれに関わる人間生活工学的機能(要求仕様)を18個抽出し、設計仕様をまとめた(Table 1)。ただし、設計仕様においては具体的な数値は記載していない。

これらの人間生活工学的機能(要求仕様)と設計仕様を構成する設計根拠について4例を示す。

(以下の説明中、[] 内の番号は、Table 1中の人間工学的機能の名称欄中の番号を示す。)

(1) 視界:「安全運転をサポートする良好な視界」のケース

「[1] 全方位の直接視界のよさ」を人間生活工学的機能とした上で設計仕様を下記の3点とした。

・各ピラーで発生する死角を低減している。
・ドアミラーとピラーで発生する塊のある死角を低減している。
・左右方向への進行を適切に視認できる三角窓を設定。

これらの設計仕様のうち「左右方向への進行を適切に視認できる三角窓を設定」においては、運転中のドライバーの視線が常に自分が想定する走行軌跡の数秒先を見ているというドライバーの視線計測の結果から得られたものである。このことは右左折やコーナーでも同様であり、想定した走行軌跡が死角となると運転視界の評価が低下することからコーナー形状と走行速度を規定し、視認エリアを設定した。

(2) 空間:「広々と感じられる室内空間」のケース

「[3] 数値以上に広く感じられる室内空間」を人間生活工学的機能とした上で設計仕様を下記の6点とした。

・前席:頭まわり、腿周り寸法の拡大
・後席:膝周りの拡大、視界エリアの拡大
・視界に入る部品は、遠く、低く設定
・上肢、下肢が自由に動けるスペースの拡大
・インパネ上面の平坦化
・内装部品の分割や色分けで邪魔感の低減

車室内の広さについては、エクステリアで決定する要素が大きいため、全ての寸法を確保することは困難である。そのため特に訴求される部位の空間を確保することとした。

米国及び日本で他銘評価との結果に基づき米人、日本人が特に広さ感を要求する部位を明確にし、車室内部位の寸法・角度に関連する複数の数値の重回帰式で、相関の高い車室内部位の寸法・角度を確保した[(2)]。

Table1　Functions and design specifications of Human Engineering for Quality of Life

ディスクリプション		人間生活工学的機能の名称	設計仕様
視界	安全運転をサポートする良好な視界	[1] 全方位の直接視界のよさ	・各ピラーで発生する死角を低減する ・ドアミラーの取付構造とピラーから構成される塊部分の死角を低減する ・左右方向への進行を適切に視認できる三角窓を設定
		[2] 車両感覚が掴みやすい視界	・フロントフードの一部を視認できる
空間	広々と感じられる室内空間	[3] 数値以上に広く感じられる室内空間	・前席：頭まわり、腿周り寸法の拡大 ・後席：膝周りの拡大、視界エリアの拡大 ・視界に入る部品は、遠く、低く設定 ・上肢、下肢が自由に動けるスペースの拡大 ・インパネ上面の平坦化 視界を遮らない 曲面形状で突出感、圧迫感を減らす 必要以上な厚みは 取らない ・内装部品の分割や色分けで邪魔感の低減
表示・操作系	少ない視線移動で操作できる	[4] ブラインド操作ができるステアリングスイッチ（安全装置 ON/OFF、情報表示）	・手のサイズに関わらず操作可能なサイズ ・SW を見ることなく操作できる明確なクリック感、剛性感 ・ステアリング操作時に邪魔感がない配置 ・瞬読可能な文字寸法、コントラスト
	運転に必要な情報に気づきやすい	[5] 緊急性の高い情報を割り込み表示するマルチインフォメーションディスプレイ	・マルチファンクションディスプレィ設置位置は、全乗員が視認できるインパネセンターで運転者の周辺視野内とする
		[6] 乗員で共有できる情報を表示するマルチインフォメーションディスプレイ	・表示内容は次のとおりとする ① エアコンの作動状態 ② 全席のベルト着用状態 ③ アイサイト（先進予防安全装置）、VDC、X-MODE の状態 ④ エコドライブの状態 ⑤ 車両のメンテナンス項目と点検時期 ⑥ オーディオの作動状態 ・使用する背景色と文字・図形サイズ 背景色と文字・図形色のコントラストを十分にとる 文字、図形サイズは、ISO の推奨サイズとする。 ・マルチインフォメーションディスプレィへの割込み警報内容は、瞬読できる図形、文字サイズで、文字は 2 行以内
走行性能	高速走行でも安定した回避行動	[7] 高い速度で障害物の回避可能なシンメトリカル AWD	・シンメトリカル AWD システムを採用 ・競合車よりも高いハンドリング性能 ・低い車両重心
	路面を選ばない走行性能	[8] 滑りやすい路面や荒れた路面でもふらつきが少なく、安定して走行できるシンメトリカル AWD	・シンメトリカル（左右対称）AWD システムを採用 ・ふらつきを感じにくい安定した直進性能
潜在的事故回避	うっかり（気が付かない危険）や誤操作から乗員を守る	[9] カメラ監視により、前方に障害物があると認識した場合、急発進を制御するシステム	・ステレオカメラによる自動監視 & 制御システム（EyeSight）の採用 ・システムの 1 機能としてペダル踏み間違い事故防止を導入
		[10] カメラ監視により、左右の白線を認識し、その白線に対するふらつきや逸脱時に警報するシステム	・ステレオカメラによる自動監視 & 制御システム（EyeSight）の採用 ・その機能に疲れや居眠りなどによる高速走行時のフラつき警告、脇見などによる車線逸脱警告を導入
	運転操作や周囲確認の補助を行いドライバの負担を軽減する	[11] カメラ監視により、先行車を認識し、先行車との車間距離を自動的に保持して追従するシステム	・ステレオカメラによる自動監視 & 制御システム（EyeSight）の採用 ・その機能に先行車自動追従クルーズコントロールを導入
		[12] カメラ監視により信号待ち停車時に先行車の発進を知らせるシステム	・ステレオカメラによる自動監視 & 制御システム（EyeSight）の採用 ・その機能に先行車発進おしらせを導入
顕在的事故回避	衝突を回避、軽減することで安全運転をサポートする.	[13] カメラ監視により、前方車の危険を検知すると警報を出し、さらに危険が高まると自動的に停止させるシステム	・ステレオカメラによる自動監視 & 制御システム（EyeSight）の採用 ・日常多用速度域での前方衝突回避 ・日常多用域を超える速度での前方衝突被害軽減
衝突安全	万一の衝突時でも乗員の被害を軽減する	[14] 衝撃を効果的に軽減する新環状力骨構造ボディと水平対向エンジン	・安全ボディ（新環状力骨構造）を採用 ・衝突時は水平対向エンジンが床下に潜る構造 ・JNCAP　新総合評価 5 ☆
		[15] 乗員を保護するエアバッグなどを効果的に配置した衝突安全デバイス	・むちうち軽減シート ・シートベルトつけ忘れ防止機能 ・JNCAP　新総合評価 5 ☆
	万一の衝突時でも歩行者の衝撃を軽減する	[16] 歩行者のダメージを軽減するエンジン構造とその搭載位置、およびフード・バンパの形状	・ボンネットフードとエンジンの間に適切な隙間を設ける ・フードや周辺部品の形状と合わせて衝撃を吸収する ・JNCAP　歩行者保護　レベル 5

(3) 走行性能

「[7] 高い速度で障害物の回避が可能」、「[8] 滑りやすい路面や荒れた路面でもふらつきが少なく安定して走行できる」とした上で設計仕様を下記の2点とした。

・シンメトリカルAWD

・低い車両重心

などとした。水平対向エンジン・トランスミッションとシャシー・車体の低重心レイアウト設計により実際に他銘に対し、低重心であることを示した(Fig. 4)。

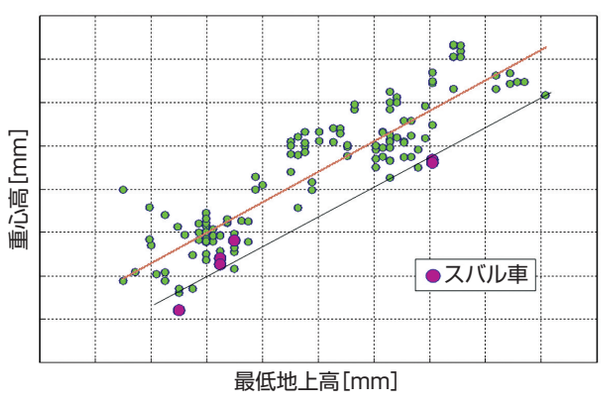


Fig. 4　Relation between minimum ground clearance and height of center of gravity

(4) 潜在的事故回避：「うっかり（気が付かない危険）や誤操作から乗員を守る」のケース

「[9] カメラ監視により、前方に障害物があると認識した場合、急発進を制御するシステム」、「[10] カメラ監視により、左右の白線を認識し、その白線に対するふらつきや逸脱時に警報するシステム」の2種類を人間生活工学的機能とした上で設計仕様をそれぞれ下記の3点とした。

・ステレオカメラによる自動監視＆制御システム

（EyeSight）の採用
・システムの1機能としてペダル踏み間違い事故防止を導入
・その機能に疲れや居眠りなどによる高速走行時のフラつき警告、脇見などによる車線逸脱警告を導入

運転支援システムであるEyeSightついては、潜在的事故回避と顕在的事故回避の両者について個別システムごとに記述した。本例として挙げた潜在的事故回避は、「飛び出さない技術」、「注意してくれる技術」として訴求しているが、顕在的事故回避技術としてディスクリプションに記載したより具体的な内容とした。

3. 認証内定経緯

2012年末に提出した申請書類に基づき非公開で審査ヒアリングが開催され、より具体的な内容なディスクリプションに一部修正した。2014年4月に開催された人間生活工学製品機能認証オープンシンポジウムにてプレ認証製品としてディスクリプションと製品説明を実施した(Figs. 5, 6, 7, 8)。

Fig. 5　Product introduction at open symposium

Fig. 6　SUBARU Forester and XV

Fig. 7　Vacuum cleaner（Toshiba）

Fig. 8　Back support wear
(Morita Holdings Corporation))

4. まとめ・今後の課題

個別の製品やシステムでの認証が主体となる中、オール・アラウンド・セイフティとして車両トータルの性能として2車種のプレ認証の内定を得ることができた。対外的に訴求してきた機能が、HQLと言う第三者機関より、「科学的に適切な開発プロセスを経て適切に記述、表現されている」ことを認められた意義は大きい。今後、ディスクリプションの有効活用を検討すると共に、次期車種開発においても本認証を念頭に置き業務を遂行していきたい。

参考文献

(1) 一般社団法人人間生活工学研究センター：人間生活工学ガイドライン、http：//www.hql.jp/information/hql_guideline.pdf（2013）
(2) 認証とマーク：人間生活工学認証ホームページ：http：//hql.jp/certification/about/
(3) 人間生活工学認証ホームページ：

http：//hql.jp/certification/
(4) 松尾、藤本、長谷川：車室内広さ感の定量評価手法の開発、スバル技報、No.37（2010）、p.87-91
(5) 荻原：「2014：次世代自動車と技術開発」、東北6県高度ITビジネスマッチングin盛岡、郡馬県次世代産業研究シーズカンファレンス2014

【著　者】

松尾　典義

渡邊　常寛

荻原　　浩

富士重工業株式会社

スバル自動車事業の拡充と世界進出――拡大期のスバル紹介

FFレックスコンビ（1981年～ 1986年）

全長/全幅/全高(mm)　　3,195/1,395/1,370
エンジン　　水冷4サイクル直列2気筒　544 cc
最高出力　　31 PS/6,000 rpm
最大トルク　　4.4 kg-m/3,500 rpm

1981年、スバル360以来受け継がれてきたRRレイアウトを止めて、FFレイアウトを採用。まずはFFレックスコンビを9月に、FFレックスセダンを10月に投入。この時代、一家に1台のファーストカーから安価で使い易いセカンドカーを保有する潮流の中、FFレックスシリーズは先行他社を追撃する形で販売を伸ばした。

シャシ部品の耐食性＆疲労強度向上溶接手法の研究開発

Development of Welding Technology for Improving Corrosion Resistance and Fatigue Strength of Chassis Parts

中　澤　嗣　夫[*1]　Tsuguo NAKAZAWA
小　池　正　俊[*1]　Masatoshi KOIKE
小　暮　　崇[*2]　Takashi KOGURE

抄　録

シャシ板金部品は耐食性を確保するために電着塗装を施しているが、早期に溶接部に赤錆が発生し、防錆力を低下させている。又、シャシ部品の溶接部は強度耐久性確保において重要な部位となるが、溶接ビード止端部の応力集中により疲労強度が低下し、防錆力の低下と共に、シャシ部品の破損が懸念されるため、厚板を使って強度設計しており、軽量化が進んでいない。そこでシャシ部品の耐食性と疲労特性を改善するため、溶接継ぎ手周りの錆欠陥を無くし、又、同時に応力集中緩和が期待されるプラズマ・アークハイブリッドとレーザ・アークハイブリッド溶接法の適用検討を行ったので結果を報告する。

Abstract

Chassis parts are covered with electro deposition coating in order to ensure corrosion resistance. However, rust occurs on welded portions at early stages and corrosion resistance is reduced. Welded portions are vital in chassis parts to ensure fatigue strength durability. Fatigue strength decrease is caused by corrosion or stress concentration of welded bead portions. Damage to chassis parts is concerned along with the reduction in rust preventive performance. Hence, thicker steel sheet is required on chassis parts while weight reduction remains as another challenge.

To improve corrosion resistance and fatigue characteristics of chassis parts, plasma-arc hybrid and laser-arc hybrid welding method were examined to reduce rust defect around welded joints and ease stress concentration.

This paper reports the examination results.

1.　まえがき

シャシ鋼板溶接構造部品は、耐食性を確保するために、溶接後に電着塗装を施すが、アーク溶接部は電着塗装後でも溶接以外の一般部と比較し、早期に錆が発生し、腐食が進行しやすい。

アーク溶接部に錆が発生しやすい原因は、溶接ビードの止端部に発生するスラグや酸化皮膜、或いは溶接ヒュームの付着により、化成皮膜が形成されず、電着塗装皮膜の欠陥が発生し易いためである。又、腐食原因のうち、溶接スラグによる塗膜欠陥が錆発生の主要

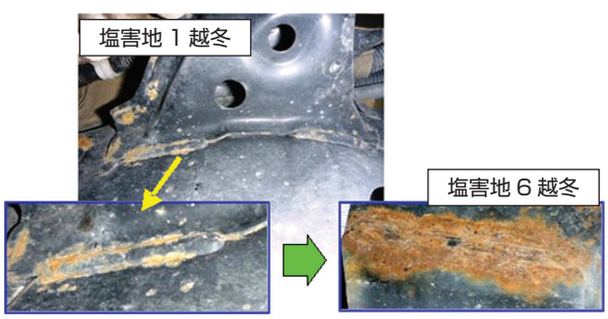


Fig. 1　Examples of initial corrosion and corrosion progress of chassis parts in deicing salt usage area

因であることが分かっている[(1)]。

スラグは一般に使用するCO_2を含むシールドガスがアーク中で解離反応を起こし、解離した酸素と溶接ワイヤ中のSi、Mn、Tiなどの元素が反応し、形成され

＊1 材料研究部
＊2 シャシ設計部

た酸化物である。溶接部の耐食性を向上させるには、このスラグ低減に取組む必要がある[2]。

一方、シャシ部品に要求される重要特性の一つとして溶接継手の疲労特性がある。シャシ板金部品の耐久性に及ぼす影響要因の一つとして、溶接部の疲労強度があり、溶接ビード止端部の応力集中や溶接部の残留応力が問題となる事がある。この対応策として、1）溶接ビード止端部の応力集中緩和、2）溶接部の引張残留応力低減、が挙げられる。溶接ビード止端部の応力集中は機械加工やTIGなめ付け処理などの平滑処理で緩和でき、又、溶接部の引張残留応力は、応力除去焼鈍やショットピーニングなどで疲労強度低下を改善できるが、いずれも、工程の追加を伴い、生産性を損なう欠点がある。

そこで、生産性を維持しながら、溶接継手の疲労強度の改善を図ると共に、耐食性向上のため溶接スラグ低減に取組んだので結果を報告する。

2.　溶接プロセスの検討

耐食性と疲労強度の改善及び生産性の良い施工法の3つの条件を同時に満たす溶接プロセスを検討した。

追加（後）工程なしに溶接継手の平滑化或いは引張残留応力低減により疲労強度向上を達成可能な溶接プロセスとしてプラズマ・アークハイブリッド溶接[3]とレーザ・アークハイブリッド溶接[4]がある。

又、プラズマ・アークハイブリッド溶接とレーザ・アークハイブリッド溶接は使用するシールドガスの組成から錆発生の起点となる溶接スラグを低減できる可能性もある。

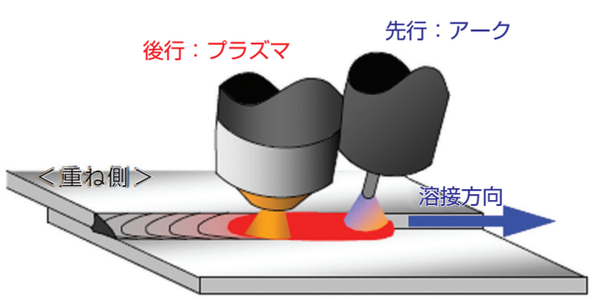


Fig. 2　Schematic illustration of plasma-arc hybrid welding

プラズマ・アークハイブリッド溶接は、Fig. 2に示す様に先行極にアーク溶接、後行極にプラズマ溶接を配置し、このプラズマ溶接電極をオフセットすることで溶融金属の流れを制御し、オフセット側の溶接ビード止端形状をより滑らかに制御する[3]溶接プロセスである。又、プラズマ溶接は、シールドガスに100%Ar、プラズマガスにArとH_2の混合ガスを使用することで新たなスラグの発生がない。さらに、プラズマにより溶融池に浮遊するスラグを押し退ける現象が報告[3]されており、スラグの分布と大きさを変える効果が期待される。

一方、アーク溶接の数倍の高速溶接と入熱・熱変形の大幅な抑制が可能な溶接プロセスとしてレーザ・アークハイブリッド溶接[4]がある。

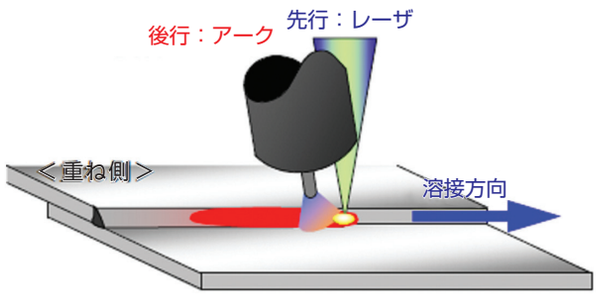


Fig. 3　Schematic illustration of laser-arc hybrid welding

レーザ・アークハイブリッド溶接は、Fig. 3に示す様にレーザ照射点の後方にアーク溶接を配置し、レーザ溶接の高速溶接性を維持しつつその課題である隙間余裕度と亜鉛めっき鋼板の溶接性をアーク溶接（シールドガス：Ar－20%CO_2）により補完させる[4]溶接プロセスである。溶接入熱の低減によりシールドガス中のCO_2（アーク中で解離：$CO_2 \rightarrow C + O_2$）ガスによる溶接金属の酸化とスラグ生成を抑制することが可能である。また、溶接変形が小さく[4]、溶接部の引張残留応力の低減による継手疲労強度の改善が期待される。

以上の特性からプラズマ・アークハイブリッド溶接およびレーザ・アークハイブリッド溶接を選定し、溶接継手の耐食性と疲労強度の向上について検討した。

3.　実験方法

プラズマ・アークハイブリッド溶接及びレーザ・アークハイブリッド溶接のシャシ部品への適用を想定して、重ねすみ肉溶接での耐食性及び疲労強度改善効果を調査した。供試鋼板としてシャシ部品に一般的に用いられる合金化溶融亜鉛めっき鋼板（記号GA、目付量片面45 g/m^2）と普通鋼（記号SP）、板厚は2.3 mmを使用した。溶接用ワイヤの種類はTable 1に示す。

Table 1　Type of welding wire used in this experiment

分　類	JIS-Z-3312	用　途
薄板490 MPa鋼用	YGW16	MAGパルス溶接に使用
薄板490 MPa鋼用	YGW17	レーザ・アーク ハイブリッド溶接に使用
厚板490 MPa鋼用	YGW11	プラズマ・アーク ハイブリッド溶接に使用

又、溶接試験片は、腐食試験と疲労強度試験を同一溶接ビードから切出した試験片で行なうため、Fig. 4に示す継手形状、構成とした。

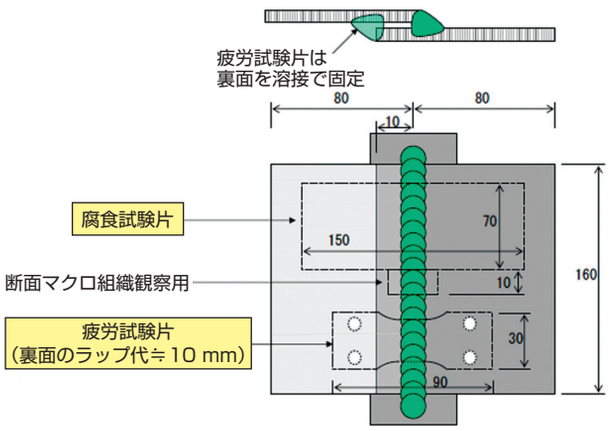


Fig. 4　Schematic illustration of weld joint test specimen

腐食試験は、溶接強度試験片から切り出した試験片に、化成処理及び電着塗装を施し、複合サイクル試験(CCT)で行なった。CCTの条件は、塩水浸漬、乾燥、湿潤のサイクルを1サイクル2時間で繰り返し、1000サイクルまで実施した。

疲労強度試験は溶接試験片から切り出した疲労試験片を、周波数20 Hzの平面曲げ片振り条件で行なった。

4.　実験結果

4.1　腐食試験

4.1.1　腐食試験片の塗装後表面状態

溶接試験片作成後に電着塗装を行なった試験片の表面状態をFig. 5に示す。

この結果、溶接止端部に発生した溶接スラグには塗装不良が発生しており、塗装欠陥はGA材がSP材より少なく、又、(少)レーザ≧プラズマ>MAG(多)であった。

溶接スラグ上に塗装不良が生じる原因は、スラグがSi、Mnを主成分とした酸化物で、電気抵抗が高く電着塗膜が析出しないためと考えられる[(1)]。

4.1.2　耐食性試験結果

耐食性試験後の表面状態をFig. 6に示す。この結果、(錆少)プラズマ＝レーザ>MAG(錆多)であり、プラズマ・アークハイブリッド溶接とレーザ・アークハイブリッド溶接が優れることが分った。さらに、各溶接方法のスラグ発生形態が耐食性に及ぼす影響を調査した。Fig. 7aにSP材の溶接後、塗装後及び耐食性試験後の試験片表面状態を示す。MAGパルス溶接は溶接時に発生した大きなスラグの上に電着塗装が密着しておらず、赤錆の起点及び錆進展の大きな要因となっている(Fig. 7a 赤枠内)。一方、プラズマ・アークハイブリッド溶接とレーザ・アークハイブリッド溶接はMAG溶接の最大58 mmに対し、プラズマ11 mm、レーザ溶接5 mmと短く、又、耐食性試験後に発生した錆長さもMAG溶接の8 mmに対し、プラズマ0 mm、レーザ2 mmと少ない結果であった(Fig. 7b)。

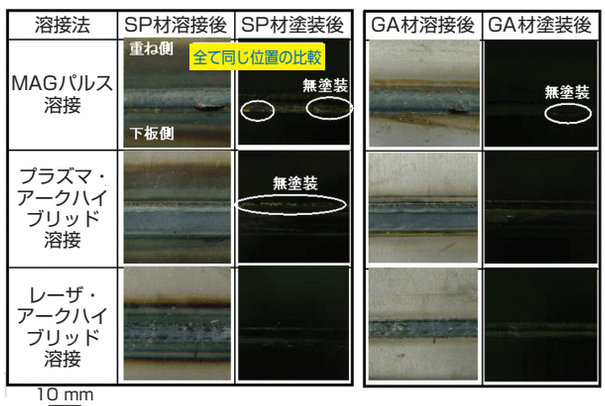


Fig. 5　Surface appearance of specimens before and after electro deposition coating

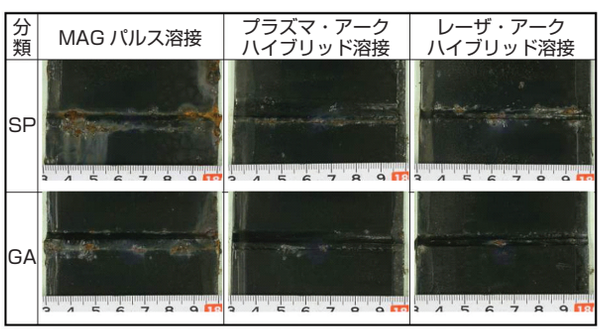


Fig. 6　Appearance of welded joints of specimens after accelerated corrosion test

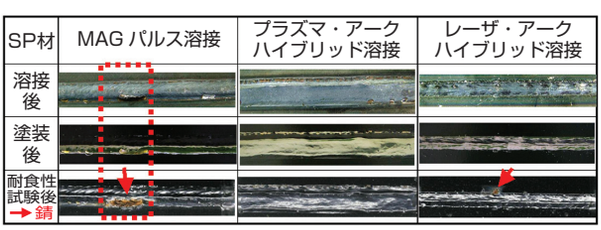


Fig. 7a　Appearance of welded joint specimens in each welding method, after welding, electro deposition coat and accelerated corrosion test

Fig. 8に耐食性試験の腐食量の調査結果を示す。腐食深さは試験片の単位区画の最大腐食深さを計測し、極値統計解析により求めた。

この結果、(優)プラズマ≧レーザ>MAG(劣)で、プラズマ、レーザー共、現行MAGパルスより耐食性

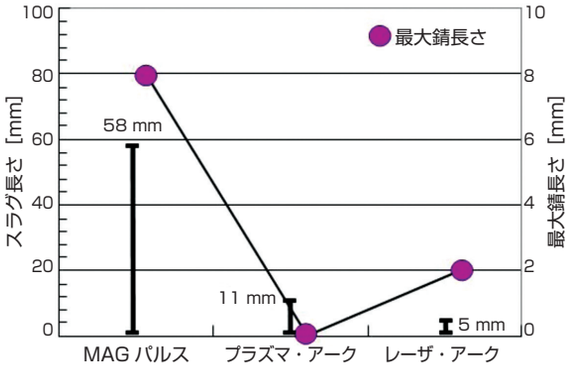


Fig. 7b　Slag length and corrosion length of specimens in each welding method

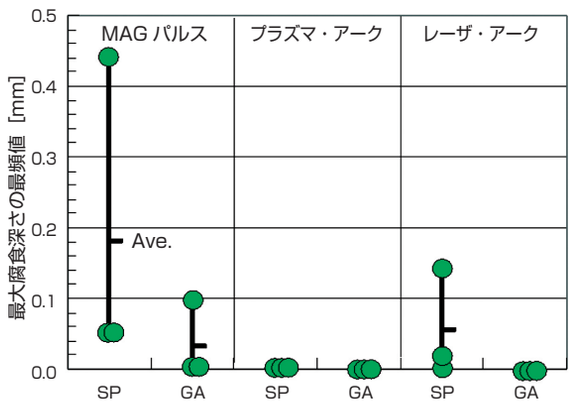


Fig. 8　Mode of maximum corrosion depth of specimens in each welding method

は良好で表面観察の結果と同様であった。又、SP材でもプラズマ、レーザ共、GA材と同等の性能であることが分った。

GA材がSP材より錆の進展が遅い原因は、一般に亜鉛の犠牲防食性[(1)]や腐食生成物の効果が知られている。但し、溶接部近傍では熱によるめっき損傷もあり、腐食抑制効果が低くなることも考えられる。しかし、本試験ではGA材の効果が顕著に現れる結果となった。錆進展箇所を観察すると、塗膜下腐食の進行が認められる。このことから、GA材がSP材より良好となる原因として、単に上述の犠牲防食等の効果だけでなく、塗膜密着性などの要因があるものと考えられる。そこで、実際のシャシ部品の溶接ビード周りを観察し、GA材とSP材を比較した（Fig. 9）。

SP材は溶接ビード止端部から約10 mm離れた場所でも酸化が認められるが、GA材の酸化域は止端部から2～3 mmの範囲に留まっている。さらに、溶接後の製品に化成処理を施し、化成結晶を観察すると、SP材は溶接ビード止端部から6 mm離れた位置まで結晶が生成しておらず、8 mm離れた位置でようやく

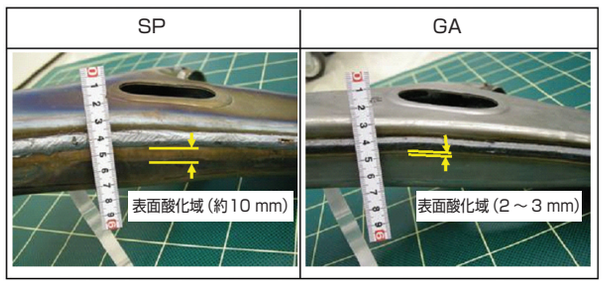


Fig. 9　Appearance of welded joints in chassis parts after phosphating

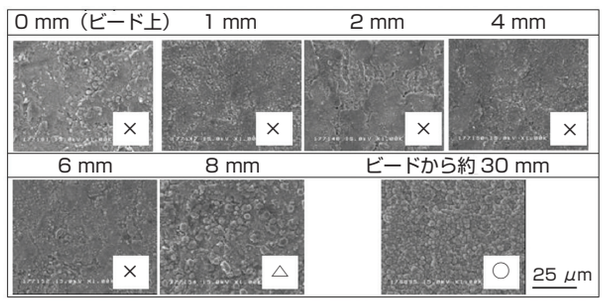


Fig. 10a　Phosphate crystal morphology on welded joints in chassis parts of SP

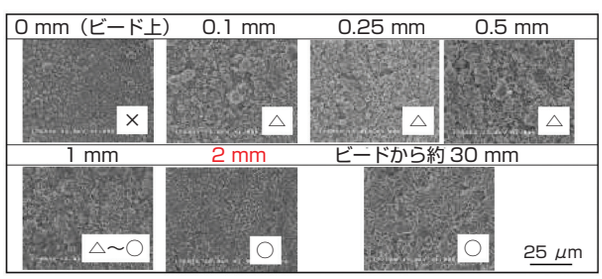


Fig. 10b　Phosphate crystal morphology on welded joints in chassis parts of GA

不完全な結晶が生成している（Fig. 10a（図中○は化成結晶が正常、×は異常であることを示す））のに対し、GA材では、Fig. 10bに示す様に、0.1 mm離れた位置で不完全ながら結晶が認められ、2 mmの位置で正常な皮膜が観察された。

このことから、GA材は化成皮膜結晶が溶接ビードにより近い位置まで生成し、結果的に、SP材と比較し高い密着性を有する電着塗膜が形成される。このことが、SP材と比較し高い耐食性を示す一要因であると考えられる。

さらに溶接ビードの極近傍までGA材に化成皮膜結晶が生成する理由を調査するため、断面観察を行なった（Fig. 11）。

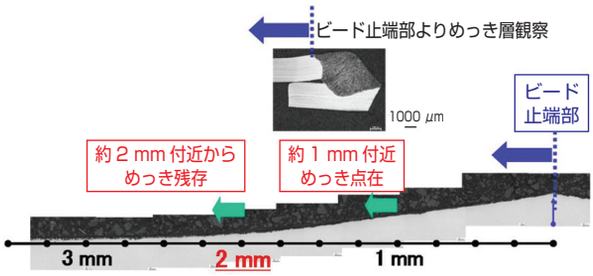


Fig. 11　Cross section of chassis showing distribution of GA layer after welding

この結果、GA材は溶接後もビードから1 mm近くまで亜鉛めっきが点在しており、さらに約2 mm付近からはめっき層が残存し、地鉄を被覆した状態を維持していることが分かる。このことから、GA材は溶接時の熱により止端部近傍の亜鉛めっきは消失又は損傷するが、一方で地鉄表面の酸化を抑制する結果、ビード止端部の近傍まで化成結晶が生成したものと推定される。

プラズマ・アークハイブリッドやレーザ・アークハイブリッド溶接法は錆発生の起点である溶接スラグを抑制し、一方、GA材は溶接ビード止端部の塗装密着力により錆の進展(塗膜下腐食)を抑制するという点で、各々、防食メカニズムは異なるが、プラズマやレーザはSP材でもGA材同等の防錆力を示す事が明らかとなった。

4.2　疲労強度試験結果

4.2.1　テストピース疲労試験

Fig. 12に重ねすみ肉溶接継ぎ手のプラズマ・アークハイブリッド溶接とレーザ・アークハイブリッド溶接の断面マクロ組織とフランク角の調査結果を示す。

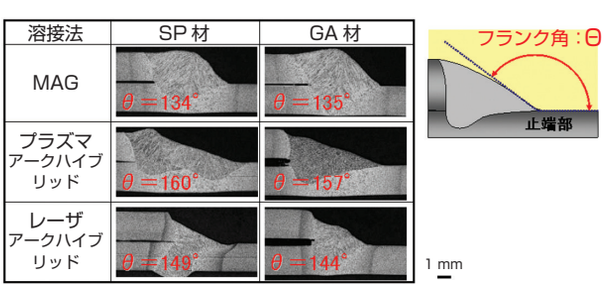


Fig. 12　Macrostructures in transverse section of weld joints for MAG welding, plasma-arc hybrid welding and laser-arc hybrid welding at flank angle of each welding method

フランク角は(広)プラズマ>レーザ>MAG(狭)で、プラズマ・アークハイブリッド溶接が最も平滑で良好であった。

Fig. 13に疲労強度試験の結果を示す。ここで、疲労強度は繰返し数10の7乗回での疲労限とした。プラズマ・アークハイブリッド溶接の疲労強度は、MAG溶接の200 ～ 250 MPaに対し、1.5倍の350 ～ 380 MPaとなり、プラズマ・アークハイブリッド溶接は、疲労強度の改善効果があることが分かった。

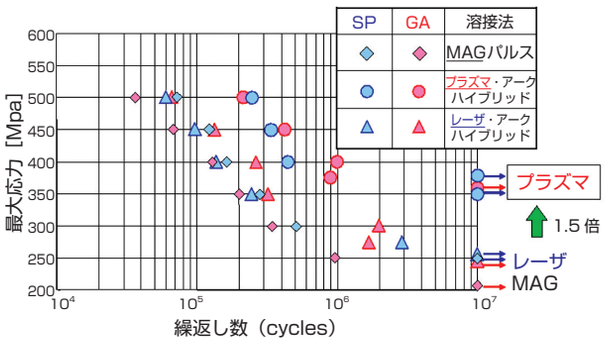


Fig. 13　Results of fatigue test for weld joints

一方、レーザ・アークハイブリッド溶接は、フランク角はMAG溶接と比較すると疲労に有利であると推定されたが、疲労限において明確な改善効果が見られなかった。本評価は、シャシ部品を想定した板厚2.3 mmの重ねすみ肉溶接で検討しているため、レーザ・アークハイブリッド溶接を適用した場合には溶接ビード幅が狭くなり、応力集中が生じ易い溶接部形状になったためと考えられる。

4.2.2　テストピース試験結果のまとめ

テストピース試験の結果をTable 2に示す。プラズマ･アークハイブリッド溶接が疲労強度、耐食性共に、現行MAG溶接より優れる結果であった。又、レーザ･アークハイブリッド溶接は耐食性に優れるものの、疲労強度は向上しなかった。

Table 2　Results of test piece examination

溶接法	疲労強度		耐食性	
	SP	GA	SP	GA
MAG	△	△	△	○
プラズマ “アークハイブリッド”	◎	◎	◎	◎
レーザ “アークハイブリッド”	△	△	○	◎

4.2.3　実部品強度試験

テストピースで現行MAG溶接よりも疲労強度試験及び耐食性試験で良好な性能を発揮したプラズマ・アークハイブリッド溶接について、実際のシャシ部品での改善効果を検証した。但し、実部品の溶接に際し

ては、アーク溶接部の止端部をプラズマ溶接にて再溶融させることにより、プラズマ・アークハイブリッド溶接のビード形状を模擬的に実現する方法を採用した。部品はシャシ部品の中で部品重量があり、溶接部周りの板厚低減により軽量化を見込めるリヤ・サブフレーム（Fig. 14）を使用し、アッパ・アーム取付けブラケットの溶接部（Fig. 14 赤枠内）に施工し、疲労強度試験を行なった。

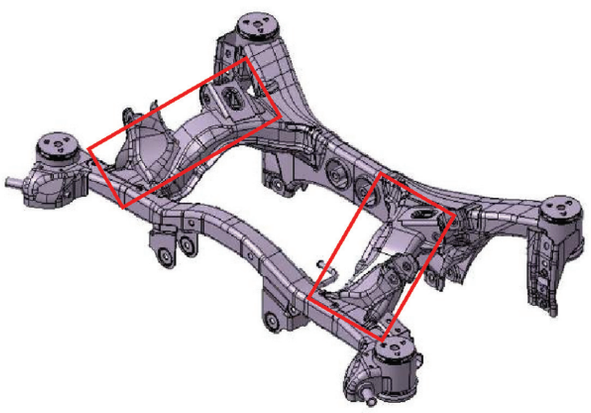


Fig. 14　Rear subframe

実際のプラズマ・アークハイブリッド溶接（模擬）施工状況と仕上がり溶接外観をFig. 15に示す。

Fig. 15　Condition of weld execution of plasma-arc hybrid welding and surface condition of weld joint

疲労強度試験は、疲労入力の大きいアッパ・アーム取付け部に上下方向の加振入力を与えて行った（Fig. 16）。

Fig. 17に疲労強度試験の結果を示す。プラズマ・アークハイブリッド溶接は現行MAG溶接と比較し、3倍以上の寿命を有し、実部品でも疲労強度の改善効果があることが分かった。

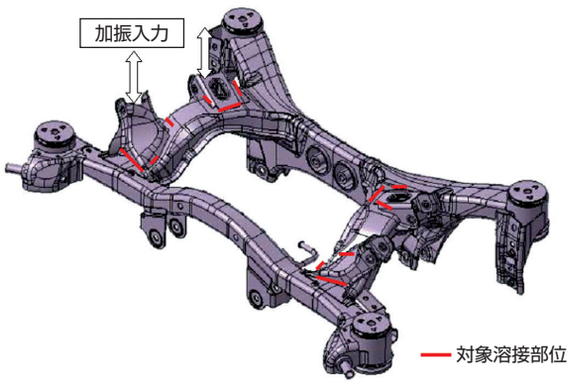


Fig. 16　Condition of fatigue strength examination

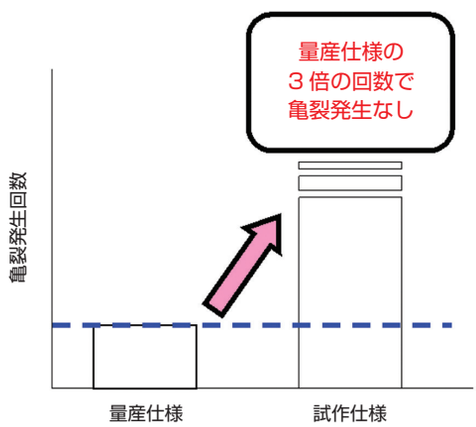


Fig. 17　Results of fatigue test of rear subframe

5.　まとめ

・プラズマ・アークハイブリッド溶接は、現行MAG溶接と比較し、耐食性、疲労強度共に優れ、SP材でもGA同等の耐食性を有することが分かった。
・プラズマ・アークハイブリッド溶接は、実際のシャシ部品でも疲労強度が向上することが分かった。
・レーザ・アークハイブリッド溶接は耐食性は優れるが、 疲労強度は現行MAG溶接と差は無かった。

6.　謝辞

最後に、調査にご協力を頂きましたJFEスチール株式会社殿に厚く御礼申し上げます。

参考文献

(1) 高橋通泰、内原正人、迫田章人、植木光彦、新里文明：アーク溶接部の塗装後耐食性-第1報：溶接部腐食挙動の解明、自動車技術会論文集 Vol.28,No.2（1997）,p.143-148

(2) 池上祐一、中田実雄、中原雄治、宮内秀樹、内原正人：ガスシールドメタルアーク溶接用シールドガス“エルナックス”について、第145回溶接アーク物理研究委員会 2008改訂
(3) 松下宗生、片岡時彦、池田倫正、遠藤 茂：プラズマ・アークハイブリッド溶接技術の開発、溶接学会論文集 第30巻第1号(2012)、p.77-85
(4) 小野守章、真保幸雄、吉武明英、大村雅紀：レーザ・アークハイブリッド溶接技術、NKK技報 No.176 (2002.3)、p.70-74

【著　者】

中澤　嗣夫

小池　正俊

小暮　　崇

富士重工業株式会社

スバル自動車事業の拡充と世界進出――拡大期のスバル紹介

ドミンゴ フルタイム 4WD（1983年～ 1994年）

全長/全幅/全高(mm)　　3,425/1,430/1,900
エンジン　　水冷4サイクル直列3気筒OHC　1,189 cc
最高出力　　52 PS/4,800 rpm
最大トルク　　9.7 kg-m/3,200 rpm
乗車定員　　7名

1983年、国産初の7人乗り1Lワンボックスワゴンとして登場。フロント回転対座シートやフルフラットになるシートなど多彩なシートアレンジが特徴の多目的コンパクトワゴンだった。1986年6月には、1.2Lエンジン搭載車を追加、8月にはフリーランニング式4WDを採用したフルタイム4WDを投入。シティユースからアウトドアまで幅広く使用できるモデルとして人気を集めた。

直交歯車箱によるハイポイドギヤ振動と放射音の基礎試験

Fundamental Investigation of Hypoid Gear Noise and Vibration using Gearbox Test Facility

渡　辺　　健*　　白　木　啓一郎*
Takeshi WATANABE　　Keiichiro SHIRAKI

抄　録

ハイポイドギヤ単体の運転性能(振動・放射音・効率など)を評価するため、オフセットや減速比など任意の諸元のハイポイドギヤを運転できる直交歯車箱を製作し、モータリングにより実車と同じトルク、回転数で振動・騒音の基礎試験を行なっている。

本報では直交歯車箱と試験装置を用いてハイポイドギヤの騒音現象について考察する。

また噛み合い1次だけでなくハイポイドギヤの特徴である2､3次の振動･騒音計測結果や､伝達誤差の違い、オフセット違い、負荷の違いによる騒音レベルの変化を捉えることができたので報告する。

Abstract

Hypoid gear's running performance (vibration, noise, efficiency, etc.) is evaluated on a gearbox test facility. This gearbox test facility operates under the same torque and speed as for automotive drivelines. Various hypoid gears are available with different dimensions.

Using the gearbox test facility hypoid gear meshing noise can be measured not only in 1st order but also in 2nd and 3rd orders. And, the relation between hypoid gear meshing noise and transmission error, hypoid gear pinion offset and transfer torque has been studied. This paper reports some results of investigation.

1. まえがき

スバル縦置きAWDの駆動系には前輪と後輪の各々にハイポイドギヤ(Fig. 1)を用いて回転とトルクを伝達している。ハイポイドギヤには高強度、軽量、高効率、低振動が求められており、その基盤技術は重要である。

そこでハイポイドギヤ単体の運転性能(振動･放射音･効率など)を評価するため、オフセットや減速比など任意の諸元のハイポイドギヤを運転できる直交歯車箱を製作し、モータリングにより実車と同じトルク、回転数で各種性能の基礎試験を行なっている。効率に関してはオフセットの影響が大きいことを報告済みで[(1)]、今回は背反性能の振動と放射音を調査する。

はじめに、ハイポイドギヤを単体で運転し、振動・騒音を評価できる直交歯車箱と試験装置について説明し、モータリング試験による振動現象の実測結果と放射音のメカニズムについて考察する。次に、2種類のオフセットのハイポイドギヤを製作して振動と放射音を試験し、噛み合い1次だけでなく2次、3次のハイポイドギヤ特有の高次ピークや、オフセットによるレベルの違いを分析する。更にドライブ、コーストの運転条件や負荷トルクの影響、供試ギヤの噛み合い伝達誤差との相関を調査した結果を述べる。

＊ CAE部

2. 試験装置

2.1　試験装置の概要

試験装置全系をFig. 2に示す。直交歯車箱は軸角90度で配置した2本のダイヤフラムカップリングによって入出力モータに接続され駆動運転される。

入力モータ(Motor1)と出力モータ(Motor2)の容量は75 kWであり、入力をピニオンギヤ軸として最高回転数±6000 rpm、出力をクラウンギヤ軸として最大吸収トルク±900 Nmで実車相当の連続負荷運転が可能である。トルクメータと回転検出器はダイヤフラムカップリングと入出力モータの間に配置し、試験歯車箱から十分離して配置している。この配置により、

Fig. 1 Tested hypoid gears

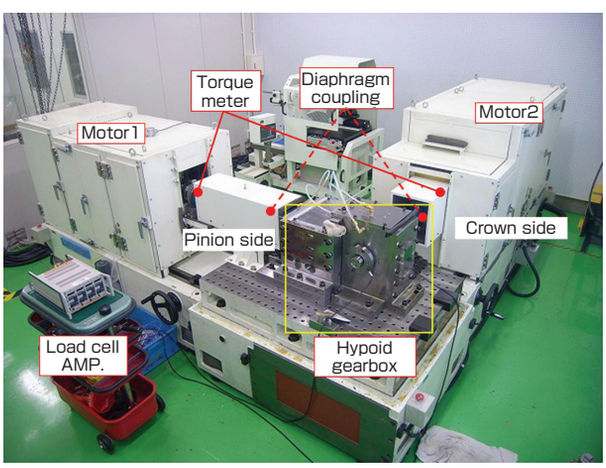


Fig. 2 Hypoid gear motoring test apparatus

装置の回転慣性が試験歯車の噛合振動挙動にできるだけ影響を及ぼさない設計となっている。

入力モータは軸高さを±50 mmまで上下可能な構造とし、種々のオフセットのハイポイドギヤ試験に対応できる。組付誤差は水平方向と垂直方向に各々−0.1 deg～+0.1 degの範囲で設定でき組付誤差の再現が可能な構造としている。

試験歯車の放射音を計測するため、装置の騒音は75 dB(A)以下に抑え、歯車放射音の計測を可能としている。試験装置の主な騒音源であるモータは油冷式を採用して空冷のファン騒音を排除し、さらに防音箱を設置してモータ騒音やカップリング等の風切り騒音を遮断している。

2.2 試験装置のねじり振動モード

本試験装置の設計思想は、評価対象の歯車の重要な振動特性である、歯車本体を質量として歯をバネとする歯の撓み共振周波数に対して、装置全体のねじり振動固有値を十分低く設定する事にある。装置設計にあたっては、ねじり振動モード解析を行って妥当性を確認している。Fig. 3に解析結果を示す。代表的な試験歯車の歯の撓み共振周波数は4758 Hzと予測され、装置全体のねじり振動1次モードに対し十分大きい設計としている。

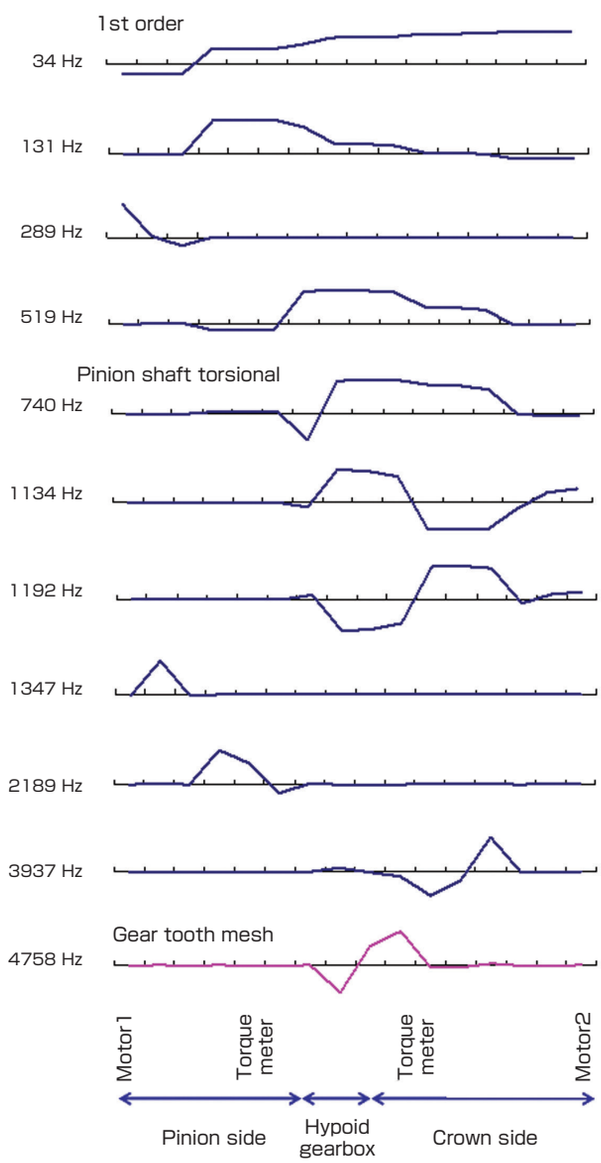


Fig. 3 Torsional vibration analysis (Test apparatus driveline)

2.3　直交歯車箱

直交歯車箱をFig. 4に示す。歯車箱はピニオンギヤ軸とクラウンギヤ軸を支持する軸受台と側板および天板で構成し、箱形状としてボルト結合し剛性を高めている。歯車箱はシムにより軸高さ方向、軸前後方向に調整が可能でハイポイドギヤに重要な歯当りの詳細な設定が可能である。

軸受と歯車噛み合い部には潤滑油を強制給油しており、供給油温は120℃まで温調可能、各部への供給油量は流量計で実測し適量を供給している。

ピニオンギヤ軸はフロント側をダブルテーパーローラベアリング、リヤ側をボールベアリング、クラウンギヤ軸は左右をテーパーローラベアリングで支持し軸受と軸受スパンは実機と同じとしている。テーパーローラベアリングは予圧により剛性、フリクションが変化し、振動や効率計測に重要なため、中空ロードセルによる実測で予圧を管理した。

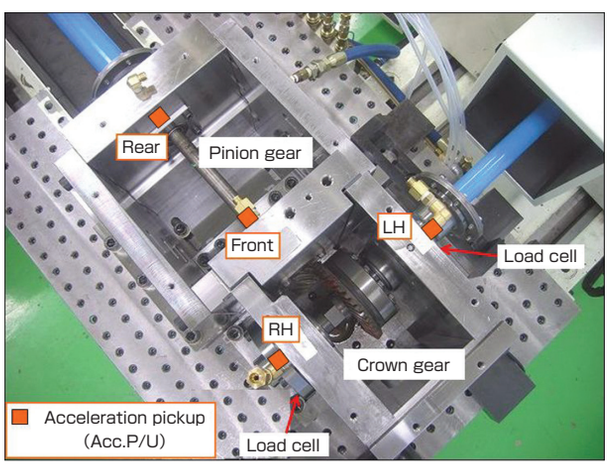


Fig. 4　Hypoid gearbox

2.4　振動・騒音の計測システム

直交歯車箱のハイポイドギヤ噛み合い点の直上1 mに騒音計を設置し、またFig. 4に示すように4ヶ所の軸受近傍に3軸加速度計を貼り付け、ハイポイドギヤの振動と放射音を計測した。

はすば歯車の振動については、歯車本体の振動計測によってその回転、半径、軸、傾きの4方向成分の振動挙動が振動と放射音のメカニズム解明に重要である事が知られているが[2]、ハイポイドギヤ本体の振動現象については実測例がない。

そこで、はすば歯車の経験を基に、クラウンギヤ本体に加速度計を直接取り付け、スリップリングにより歯車回転中の加速度信号を取り出し、アナログ演算器によって歯車の実動時の振動挙動の計測を試みた。計測システムと演算器をFig. 5に示す。

3.　直交歯車箱の振動と放射音

3.1　振動と放射音の実測結果

計測対象のハイポイドギヤは以下の通りである。歯数はピニオンZp＝9枚、ギヤZg＝40枚、オフセットE＝23 mm、ギヤの大端ピッチ径は170 mmである。潤滑油は75 W－90のハイポイド油を用い油温60℃、軸受予圧は実機条件と同じ2 kNとした。

ピニオンギヤ軸の入力回転を0～6000 rpmまでスイープ運転しクラウンギヤ軸の吸収トルクを90 Nmとしてトルクメータでのトルク変動、回転変動および直交歯車箱の直上1 m放射音と4ヶ所の軸受近傍振動を実測した。さらにクラウンギヤ本体に取り付けた加速度計のアナログ演算によってクラウンギヤの回転、軸、傾き方向の振動挙動を求めた。

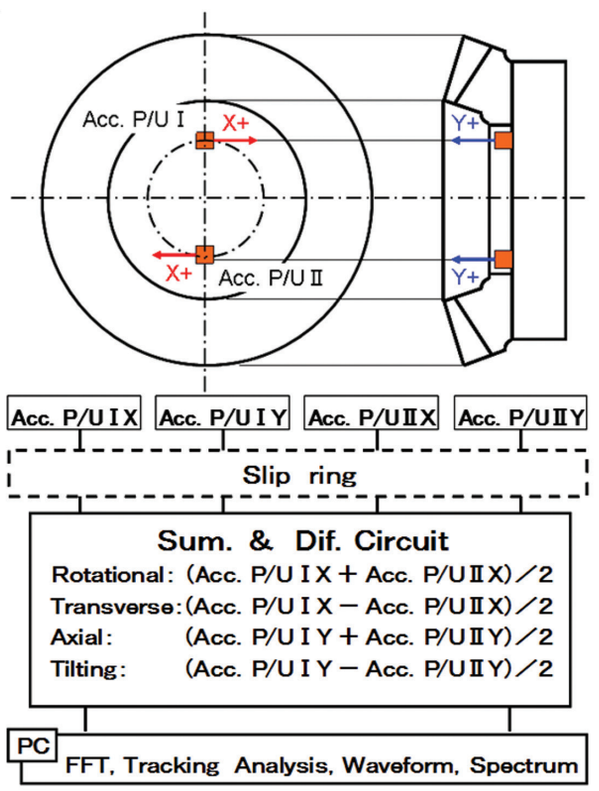


Fig. 5　Treatment process of acceleration signal

Fig. 6は横軸をピニオンギヤ軸回転数とし、歯車噛み合い1次（ピニオンギヤ軸回転9次）について、上図にピニオンギヤ軸とクラウンギヤ軸のトルク変動を、下図に回転変動を示したものである。トルク変動および回転変動には2つのピークが発生しており、トルク変動のピークレベルからA：2350 rpm（353 Hz）はクラウンギヤ軸のねじり振動に起因するピーク、B：3330 rpm（500 Hz）はピニオンギヤ軸のねじり振動に起因するピークと考えられる。Fig. 3に示した試験装置軸全系のねじり固有値に加え、ピニオンギヤ軸、ク

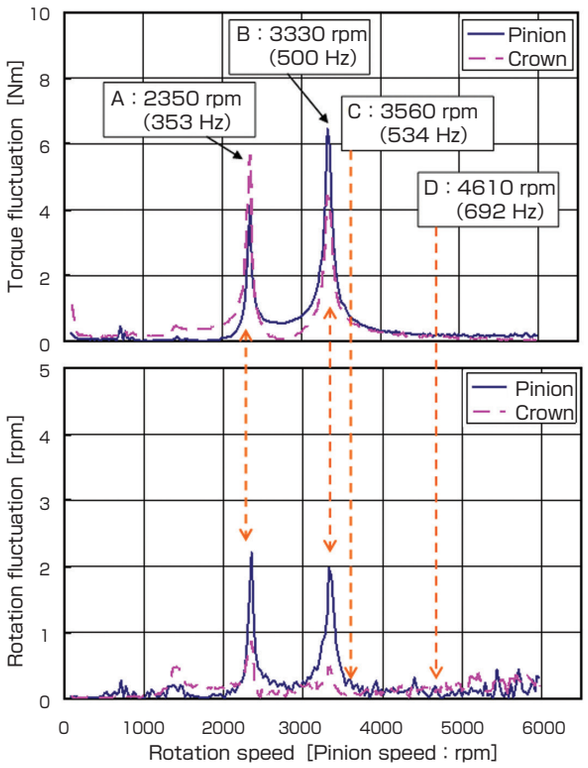


Fig. 6 Torque and rotation fluctuation

ラウンギヤ軸単独の固有値を持つと考えられ、この現象ははすば歯車対の振動試験でも確認されている[(2)]ものである。Fig. 7にピニオンギヤ軸とクラウンギヤ軸の各軸単独でのねじり振動モード解析結果を示す。歯車噛み合い点を振動の腹とし、モータを節とする振動モードがクラウンギヤ軸：318 Hz、ピニオンギヤ軸：464 Hzで発生しており実測のピーク周波数に近い。はすば歯車は噛み合い作用線方向にトルクを伝達し強い拘束力を持つが、作用線直角方向の拘束力は弱く軸が自由に振動するため、各軸単独の曲げ固有振動が発生する。ハイポイドギヤの噛み合い点の拘束条件はより複雑であると考えられるが、これら周波数においては歯車噛み合いを加振力とし、噛み合い点を振動の腹として各軸単独でねじり振動する現象が発生していると考えられる。

Fig. 8はFig. 6と同様に横軸をピニオンギヤ軸回転数として放射音と振動の歯車噛み合い1次成分を示したものである。上から歯車箱の直上1 m放射音、ピニオンギヤ軸のフロント側とリヤ側の軸受近傍の左右方向振動、クラウンギヤ軸の左右軸受近傍の左右方向振動、クラウンギヤ本体の回転、傾き、軸方向振動成分である。放射音と軸受近傍振動とにはよい相関があり、直交歯車箱の振動・騒音の特徴を捉えており、Fig. 6およびFig. 8に示すA、B、C、およびDのピークについて考察する。

A：2350 rpm（353 Hz）は放射音と4ヶ所の軸受近傍振動にピークがあり、またクラウンギヤ本体の回転方向振動ピークとも一致している。B：3330 rpm（500 Hz）は放射音と4ヶ所の軸受近傍振動にピークがあるがクラウンギヤ本体の振動ピークとは一致しない。これらより前述のとおりAはクラウンギヤ軸のねじり振動に起因し、放射音と振動ピークを生じており、Bはピニオンギヤ軸のねじり振動に起因した放射音と振動ピークと考えられる。C：3560 rpm（534 Hz）は放

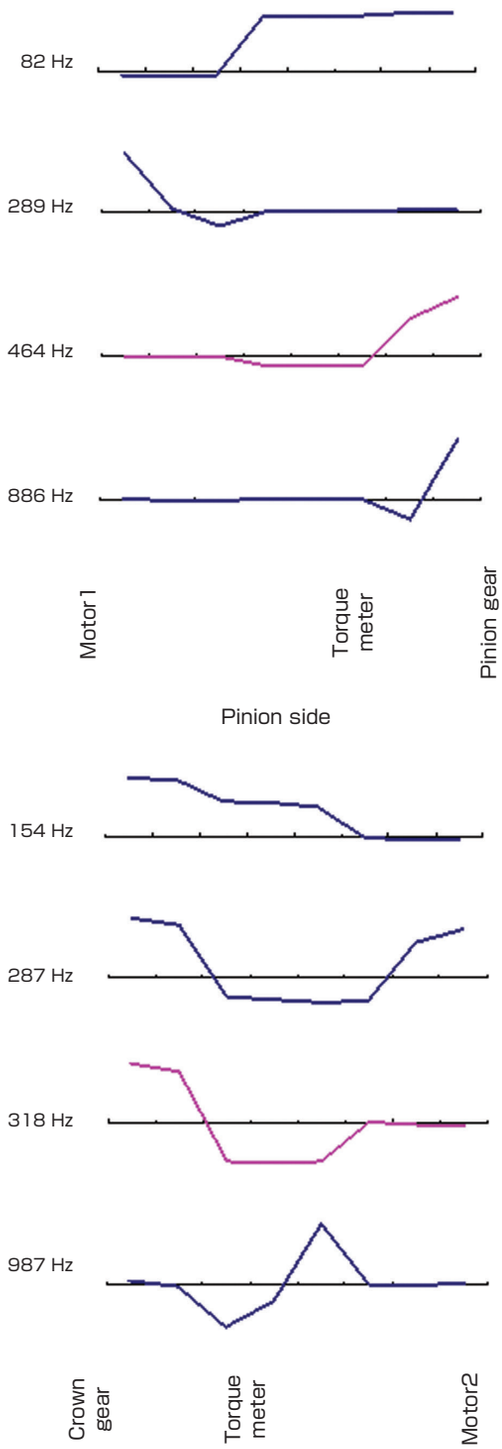


Fig. 7 Torsional vibration analysis
(Pinion side and crown side)

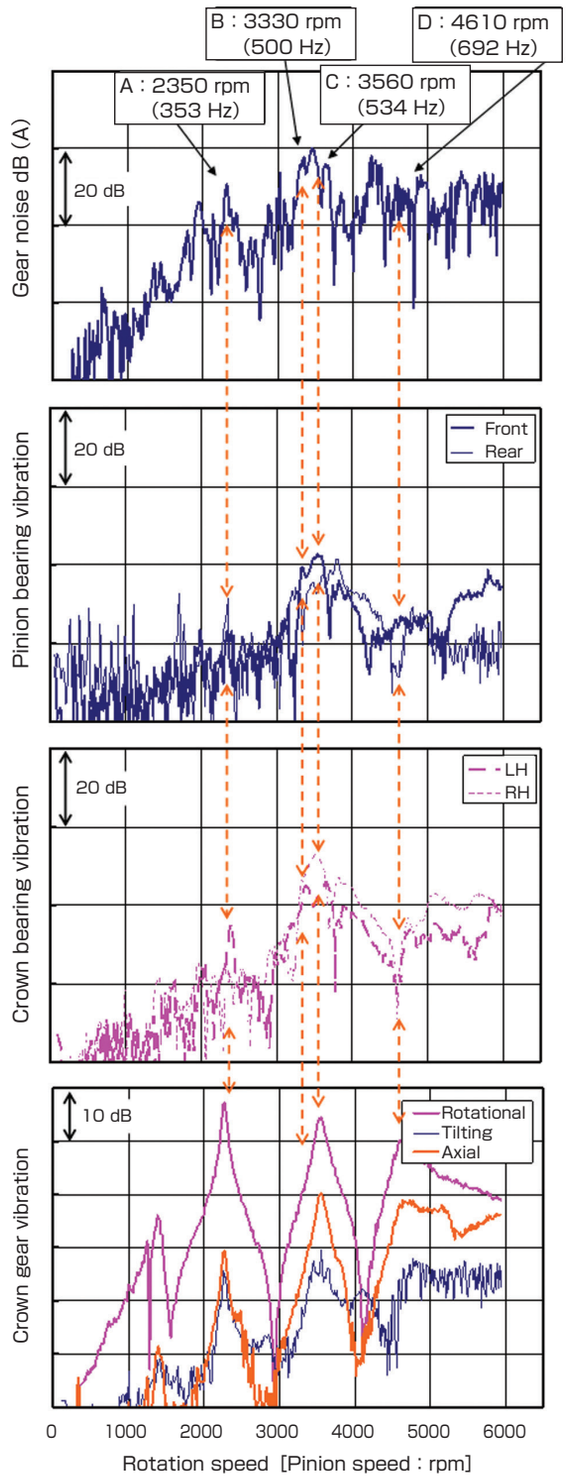


Fig. 8 Gear noise and vibration

射音と軸受近傍振動に顕著なピークが現れているが、トルクメータのトルク変動、回転変動には該当するピークがなく軸のねじり振動の影響ではない事がわかる。クラウンギヤ本体の振動には、軸方向の振動ピークが発生しており、クラウンギヤ軸をマスとし、テーパーローラベアリングの軸方向剛性をバネとする固有振動であると考えられる。クラウンギヤ本体の振動が軸受を通し、直交歯車箱左右方向（クラウンギヤ軸方向）を加振し振動となるとともに、直径の大きいクラウンギヤが放射面となって大きな放射音ピークを生じさせていると推察される。本試験では軸受スパンや軸受は実機と合わせており、実機においても同様の現象が予測される。またテーパーローラベアリングの剛性は予圧の影響が大きく本試験ではロードセルによる予圧管理を行っているが、実機においては振動ピークや周波数などのばらつき要因となると考えられる。

D：4610 rpm（692 Hz）は放射音と軸受近傍振動のピークは顕著ではないが、クラウンギヤ本体の回転方向振動ピークは大きい。これはFig. 3の解析結果からクラウンギヤを振動の腹としピニオンギヤ軸がねじれる振動モードと考えられる。ピニオンギヤ軸のローカルなねじり振動のため、歯車箱の振動・騒音への影響が小さいと推察される。

3.2 振動と放射音のメカニズム

以上のように、ハイポイドギヤと直交歯車箱の振動現象は歯車の噛み合いを起振力としながら、各軸単独のねじり振動、クラウンギヤ軸の軸方向振動、ピニオンギヤ軸のローカルなねじり振動と様々なメカニズムにより引き起こされている。振動・騒音の評価には各要因を把握した上で影響因子の条件を合わせるなど注意する必要がある。

4. ハイポイドギヤの放射音

2種類のオフセットのハイポイドギヤを製作して放射音を計測し、伝達誤差や歯車諸元の違い、負荷トルクの影響などを調査した。

4.1 ハイポイドギヤ仕様

試験用にピニオン歯数Zp＝16枚、ギヤ歯数Zg＝28枚、オフセットE＝0 mmの、いわゆるベベルギヤを製作、伝達誤差100 μradと50 μradの2水準について放射音を計測した。また、ピニオン歯数Zp＝9枚、ギヤ歯数Zg＝40枚、オフセットE＝23 mm、伝達誤差20 μradのハイポイドギヤを同様に計測し比較した。

4.2 伝達誤差、オフセット、負荷の影響

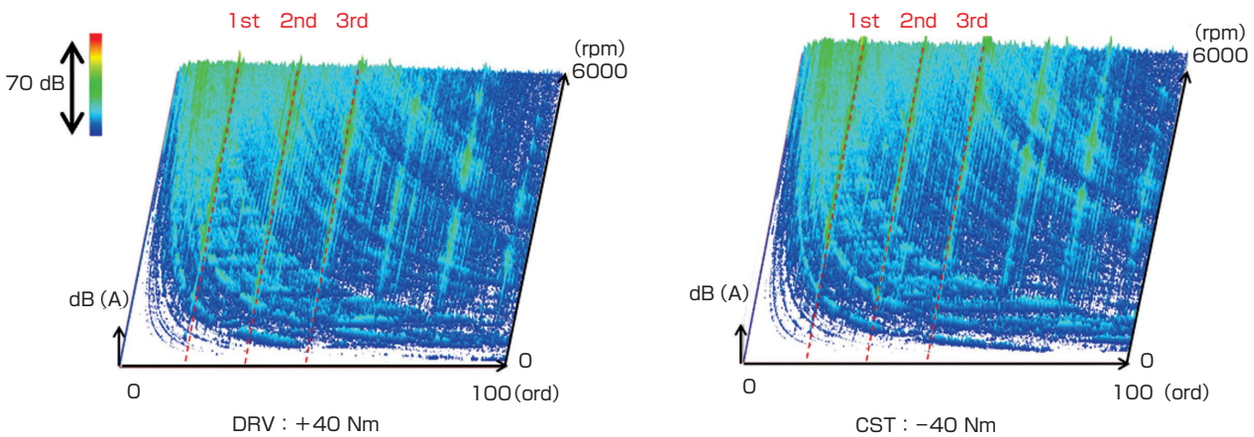
横軸を次数、縦軸を騒音レベルとし、奥行き方向を回転数として3Dグラフで表した計測結果をFig. 9に示す。0～6000 rpmまでスイープ運転し、負荷はドライブ運転＋40 Nm、コースト運転－40 Nmである。噛み合い1次に加えてハイポイドギヤの特徴である2次、3次の高次成分が発生している事がわかる。今回の試験歯車ではドライブに対しコーストの放射音が大きくなっており噛み合い歯面の違いによる影響が現れ

ている。

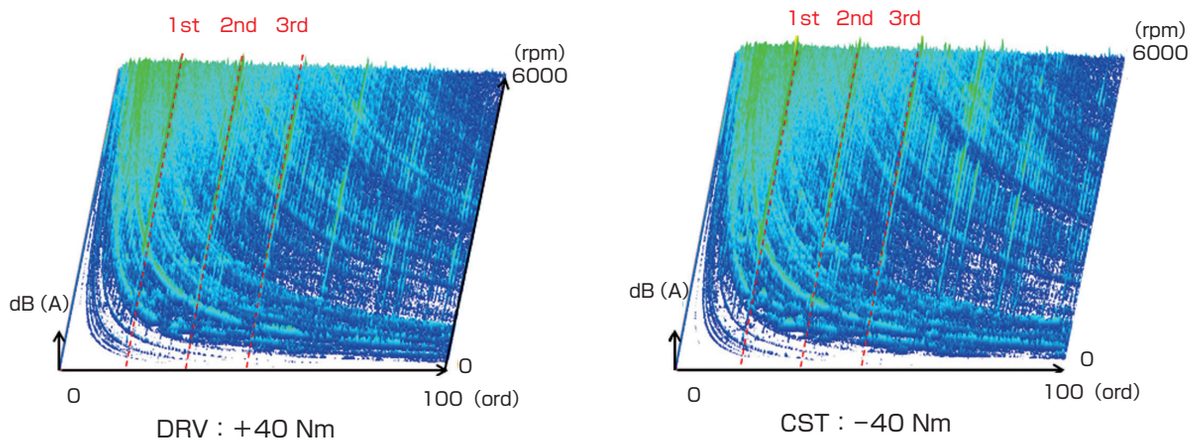
Fig. 9①と②のベベルギヤ同士の比較では、伝達誤差50 μradの放射音は100 μradに対して低く、伝達誤差と放射音との相関が確認できた。

Fig. 9③のハイポイドギヤの伝達誤差は20 μradと小さく噛み合い成分の放射音は低い。一般にオフセットのあるハイポイドギヤはベベルギヤに対し歯面のすべりにより伝達効率は低いが、振動・騒音が低い利点があり本試験からも同様の結果が得られている。

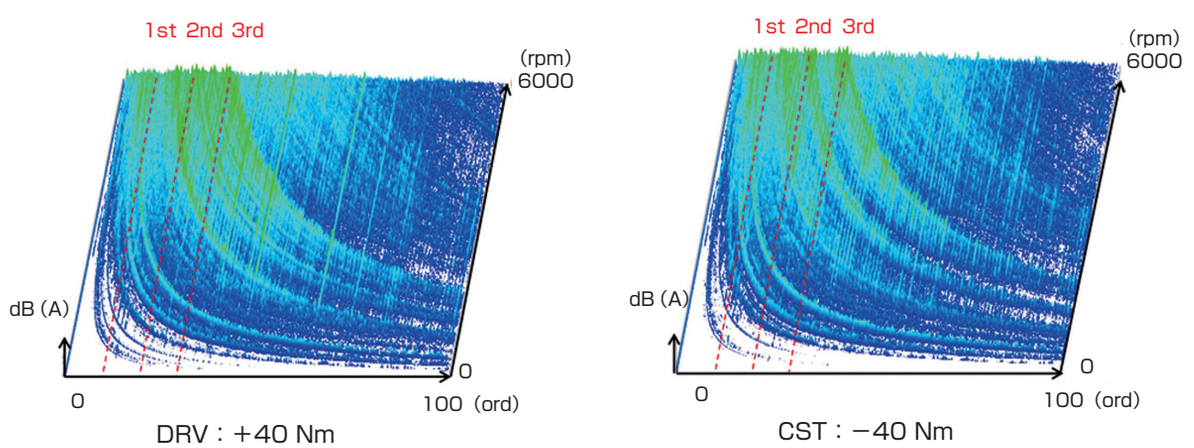
さらに伝達誤差50 μradのベベルギヤについて負荷トルクを−20、−40、−60 Nmと増加させその影響を計測した。Fig. 10に示すように高負荷ほど放射音レベルは低減しており、負荷による変化も捉えられている。



① E＝0, D＝130　　Transmission error：100 μrad

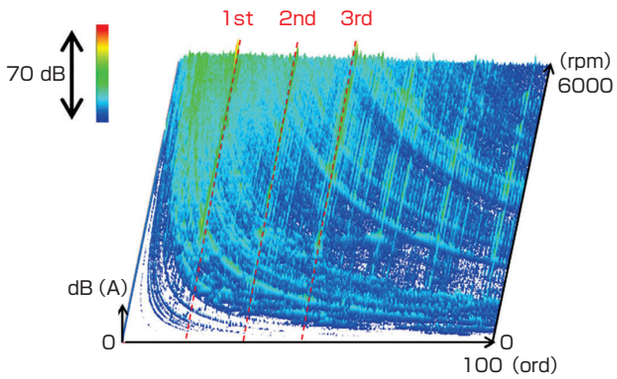


② E＝0, D＝130　　Transmission error：50 μrad

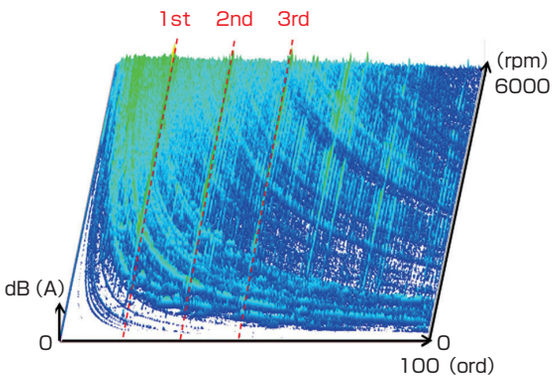


③ E＝23, D＝170　　Transmission error：20 μrad

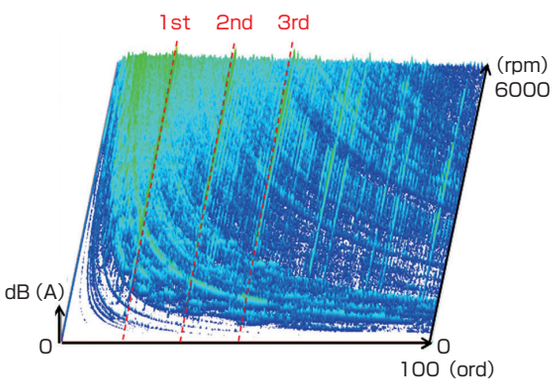
Fig. 9　Gear noise of various hypoid gears



CST：−20 Nm



CST：−40 Nm



CST：−60 Nm

Fig. 10　Gear noise of various torque

以上のように、様々なハイポイドギヤ諸元や運転条件など、基礎的試験によってハイポイドギヤの特性を調査している。

5.　おわりに

直交歯車箱と試験装置を製作し、実車と同じ負荷・回転数で運転しハイポイドギヤの振動・騒音の基礎試験を行った。

ハイポイドギヤと直交歯車箱の振動現象は歯車の噛み合いを起振力とし、各軸単独のねじり振動、クラウンギヤ軸の軸方向振動、試験装置の軸全系でのピニオンギヤ軸のローカルなねじり振動などいくつかのメカニズムが推察できた。

種々のハイポイドギヤの放射音試験で、歯車諸元や伝達誤差など仕様差やドライブ、コースト、負荷など使用条件の影響を評価できた。

今後も基礎試験を重ねてハイポイドギヤの特性をよく理解し、自動車の動力伝達系の技術力向上に活用していく。

参考文献

(1) 斎木ほか：自動車用ハイポイドギヤの高効率化、自動車技術会論文集、Vol.44、No.1（2013）、p.63-68
(2) 渡辺ほか：変速機用はすば歯車の放射音と関係する3次元歯車振動挙動の研究、自動車技術会論文集、Vol.38、No.1（2007）、p.71-76

【著　者】

渡辺　　健

白木 啓一郎

CAEを用いた燃料タンクから発生する揺動音予測技術の開発

Development of Prediction Technology of Sloshing Noise in Fuel Tank using CAE

関　俊一[*1]　森　智一[*1]　伊藤健吾[*1]　古野一裕[*2]
Shunichi SEKI　Tomokazu MORI　Kengo ITOH　Kazuhiro FURUNO

抄　録

CAEを用いて燃料タンク内液面のスロッシング現象の再現および圧力挙動、液体流速のシミュレーション技術を開発した。

透明タンクを用いた燃料液面挙動の可視化、さらにレベルセンサを用いた液面挙動の定量データなどを実験的に求め、CAEの精度向上を図った。その結果、燃料が強く壁面にあたる現象や、流れの乱れがCAEで予測できるようになり、揺動音の予測が可能となった。

Abstract

We have developed a simulation technology to predict fluid flow velocity, pressure behavior and sloshing phenomenon of fuel surface in fuel tank using CAE.

The accuracy of CAE was improved by visualizing the movement of fuel surface using a transparent tank and obtaining quantitative data on fuel surface movement using a level sensor. As a result, the phenomenon in which fuel strongly hits the inner wall of a tank or fuel flow disturbance occurs can be predicted by CAE, and the sloshing nose can be predicted.

1.　はじめに

車両の快適性向上のためには低騒音化が課題であるが、作動音や異音は車の質感を損ねる音であり、これらの音の抑制、撲滅は急務となっている。燃料タンク内の燃料の動きに起因する揺動音は、車の質感を損なう異音である。また、主に発進停止時に聞こえ易いため、昨今普及しているアイドルストップ車やハイブリット車のエンジン停止時には、より目立つ音となっている。

揺動音の発生メカニズムは、燃料がタンクの内壁に当たる時や、燃料と気体が入れ替わる時に発生する音と考えられる。金属性燃料タンクではタンク内部に波消しのためのバッフルプレートを設置することで揺動音を抑制してきた。しかし、樹脂燃料タンクの普及にともない、バッフルプレートの設置など、従来の実験をもとにした対策は難しくなってきており、燃料タンクの設計初期段階で揺動音抑制形状を織り込むことが必要となってきている。

本研究では、燃料タンクの揺動音を抑える最適な形状を提案できることを目指し、音源となる燃料タンク内の液面挙動をCAEを使いながら再現し、さらに揺動音を予測、最終的には揺動音抑制のための最適形状を導き出すことを目的としている。

2.　解析手法

2.1　解析対象

解析は量産形状と開発形状のタンク二種類で行った。まず、Fig. 1のような量産タンクにて実験と解析のタンク内燃料の挙動が一致するか確認し、解析手法の妥当性を確認した。結果の妥当性を確認した上で、開発形状のタンク揺動音を予測した。

＊1 車両研究実験第3部
＊2 富士テクノサービス株式会社

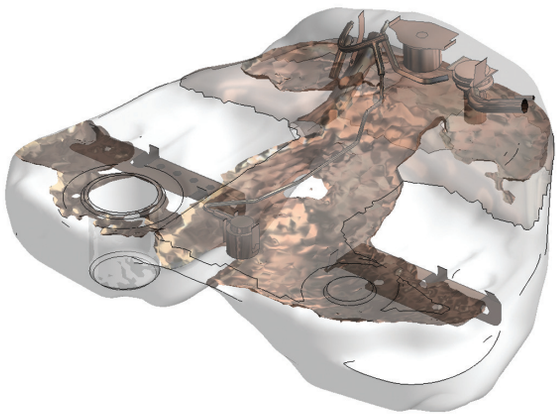


Fig. 1　Shape of mass-produced tank

2.2　解析手法[1]

本研究では、解析に際しVOF法（Volume of Fluid）を用いた。VOF法は自由表面流れを解析する手法である。界面の移動を直接計算するのではなく、流体充填率 F という量を定義してその値にて自由表面流れを解いている。この時使用される流体充填率 F は次式で定義される。

F ＝ 計算セル中の流体体積（面積）／計算セルの体積（面積）

ここで決められた流体充填率Fにより各計算セルは以下の用に分類される。

・F＝0：気体セル（計算セルには流体が存在しない）
・F＝1：流体セル（計算セルは流体に満たされている）
・0＜F＜1：表面セル（計算セルには気液界面が存在する）
　＊例えばF＝0.5は気液の界面をさす。

○構成方程式

支配方程式は以下の連続の式を用いた。

今回のモデルは混相流モデルであるが、一流体モデルなので運動方程式は一組（x、y、zの三方向）だけを解いている。解として得られる流速および圧力は1種類だけである。

また、界面付近の物性値は、各相で重み付けしたものを使用している。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u)+\nabla\cdot(\rho \vec{u}\vec{u})=-\nabla p+\nabla\cdot\left[\mu\left(\nabla\vec{u}+\nabla\vec{u}^{T}\right)\right]+\rho\vec{g}+\vec{F}$$

$$\rho=\Sigma\alpha_q\rho_q \qquad \text{ここでαは体積分率}$$
$$\mu=\Sigma\alpha_q\rho_q$$

同様に質量保存の法則の式も1種類のみ取り扱う。

○体積分率輸送方程式

$$\frac{1}{\rho_q}\left[\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q\rho_q\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_q\rho_q\vec{u}_q\right)=S_{\alpha_q}\right]$$

$\alpha_q=0$　あるセルにq相は存在しない
$\alpha_q=1$　あるセルはq相で完全に満たされている
$0<\alpha_q<1$　あるセルはq相と他の組で満たされている つまり界面が存在する

$\sum_{\alpha=1}^{n}\alpha_q=1$　すべての相を足すと1となる

体積分率の分布は二相間の界面位置を決めている。この方程式により解析精度が決定付けられる。

基礎式は非構造格子有限体積法を用いて離散化した。速度と圧力のカップリングにはFractionalStep法を用いた。

○体積分率輸送方程式の離散化手法

運動方程式の対流項離散化は通常一次風上、二次風上といったものを使用する。この際、流れ場の計算では通常大きな問題はない。しかしVOF輸送式では界面の数値拡散が大きくなりやすいため、その数値拡散を抑制するために種々のスキームが用意されている。そのスキームを大きく分けるとExplicit型（陽解法）、Implicit型（陰解法）の2種類になる。以下にその式をあげる。

Explicit型（陽解法）

$$\frac{\alpha_q^{n+1}\rho_q^{n+1}-\alpha_q^{n}\rho_q^{n}}{\Delta t}V+\sum_f\left(\rho_q U_f^{n}\alpha_{q\cdot f}^{n}\right)=0$$

Implicit型（陰解法）

$$\frac{\alpha_q^{n+1}\rho_q^{n+1}-\alpha_q^{n}\rho_q^{n}}{\Delta t}V+\sum_f\left(\rho_q^{n+1}U_f^{n+1}\alpha_{q\cdot f}^{n+1}\right)=0$$

○Courant数

今回のモデルでの計算スキームはExplicit型を用いた。Explicit型の場合、使用される時間ステップ（Δt_{VOF}）は流れ場計算のもの（Δt_{Global}）とは異なる。

VOF法での計算の発散原因は計算回数が多くなりすぎることに起因する。これを回避するためには（Δt_{Global}）の値を小さくして計算を行う。今回の計算でもクーラン数は2以下になるようにして計算を行った。

$$\Delta t_{VOF}=\Delta x_{cell}/u_{fluid}\times \text{Courant Number}$$

2.3　解析モデル

2.3.1　量産タンクモデル

解析が実現象をどの程度表現できるか確認するために量産タンクを用いて確認解析を行った。Fig. 2、Fig. 3は量産タンクの外観と内部の構成部品の図である。内部構造がタンク内の燃料の流れに影響するのは明らかなため、バッフル板、パイプ等は可能な限り形状の再現性を高めたモデルとした。

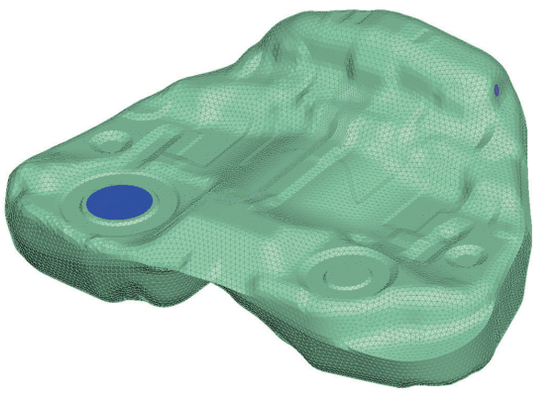


Fig. 2　Analytical model (Appearance)

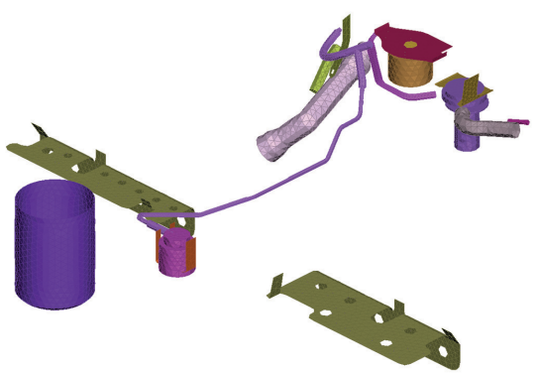


Fig. 3　Analytical model (Tank inside)

2.3.2　開発タンクモデル

Fig. 4は開発タンクの対策前後の部分的なモデルである。機密上、タンクの全てをここであげることは出来ないが、この二種類のモデルにてタンク内の流れ・揺動音についての評価および対策・検証を行った。

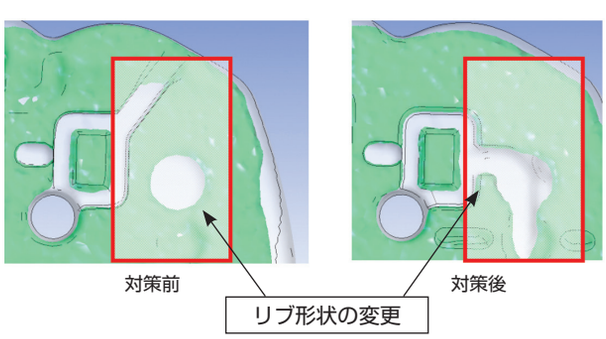


Fig. 4　Before and after countermeasure is taken to development tank

2.4　解析条件

解析に用いた物性値は、空気と疑似燃料それぞれの密度と粘度を実計測したものを使った。

今回の解析では気相には空気、液相には疑似燃料を用いた。この疑似燃料は燃料関連の実験によく用いられる物質であり、実際の燃料と非常によく似た性質を持っている。

また主な解析条件をTable 1に示す。タンク内の燃料の量は実験時に音の評価として最も悪いとされた燃料量とした。

解析時間は実際の実験において、タンク内の液面が収束するまでの時間をあらかじめ測定しておき、その時間(＝30s)を用いた。また、解析における最小のタイムステップは0.001(s)とした。

解析では8CPUを用いて計算を行った。この時の計算時間は約8時間であった。

Table 1　Main analysis conditions

タンクサイズ	70.5(L)
タンク内の燃料量	音ワースト燃料量
解析上の計算時間	30(s)
タイムステップ⊿t	0.001(s)

2.5　結果評価方法

これまでの実験から、タンクより発生する揺動音の中で最も影響が大きい音は、燃料がタンクの壁面に接する時の圧力によって起こされることがわかっている。つまりこのことは、単位時間当たりにおいて燃料がタンク壁面に与える圧力の上昇が揺動音に最も影響あることを意味している。よってこの圧力上昇を解析により求め、揺動音を予測することとした。

この時、全モデルを対象に圧力を評価しても、微小な空気の振動による圧力を同時に評価してしまい、結果の評価が難しくなってしまう。よって､今解析では、液がタンクに当たった箇所だけに着目し、その箇所における圧力の大小で評価を行った。以下にその評価方法をまとめる。

①燃料がスロッシング現象によりタンク上面に接すると予測される箇所をグループ化する(Fig. 5青部分)。
②グループ化した箇所の中で燃料が接する箇所に分ける。Fig. 6緑の箇所が任意時間においてタンク上面の燃料が接する箇所になる。
③②の箇所に対して圧力のコンターを表示する(Fig. 7)。

以上の方法で燃料がタンクに接する時の圧力上昇を評価した。また、それ以外にも流体解析では一般的なベクトル図や液面の動きを可視化することで多面的に解析結果の評価を行った。

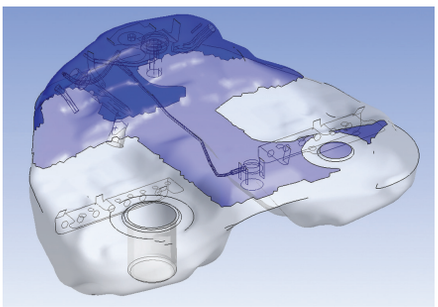


Fig. 5　Grouping of tank upper surface

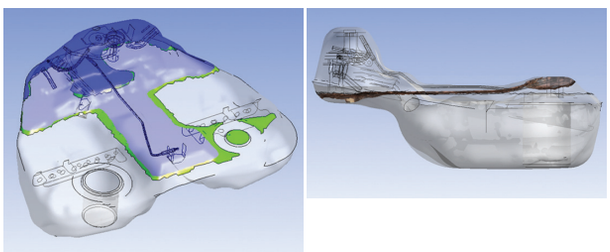


Fig. 6　Areas where tank makes contact with fuel

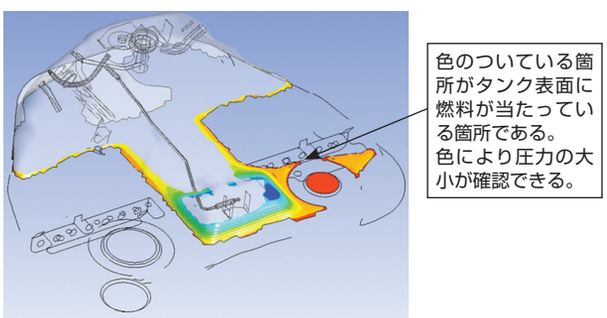


Fig. 7　Pressure distribution only on areas where fuel is in contact with tank

3.　解析精度検証

燃料タンクを実車の荷室に乗せて発進･停止を行い、その時の液面挙動を以下の2つの方法を使って確認し、CAEの精度を検証した。

3.1　可視化タンクでの液面挙動の見える化

金属製燃料タンクの一部を加工することで、液面の挙動が見えるタンクを作成した。揺動中の液面挙動を撮影し、CAE結果と比較した。

以下、Fig. 8とFig. 9は実験時と解析時での任意時間における液面の動きである。各時間の液面の動きを確認することで、解析は実験を表現できていることを確認した。

Fig. 8　Movement of tank fuel surface at experiment

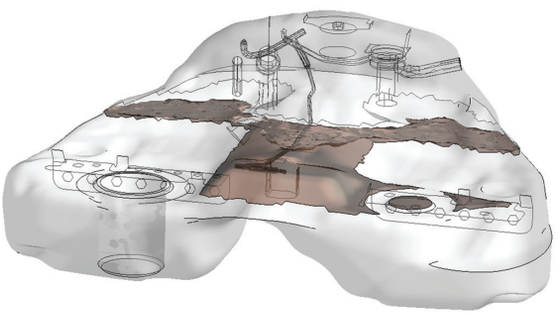


Fig. 9　Movement of tank fuel surface at analysis

3.2　レベルセンサを使っての液面高さの見える化

燃料システムには、燃料メータに利用するため液面高さを測定できるレベルセンサが存在する。このレベルセンサには、アームの先端にフロート、アームの根本には抵抗基盤がついており、アームの上下に合わせて抵抗値の出力が変化する構造となっている。このレベルセンサを用いてタンク内の液面の時間における高さ測定した。

Fig. 10は実験と解析での液面高さを比較した結果である。それぞれの液面高さはほぼ一致していることがわかる。この結果から、今回の解析手法は、実験を表現できていることが確認された。

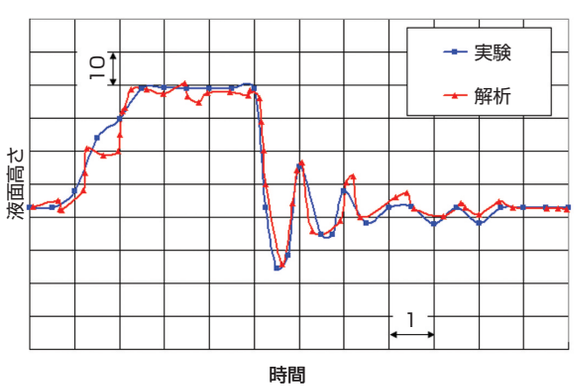


Fig. 10　Comparison of fuel surface height by experiment and analysis

4. 結果評価

今回実施した解析の結果から主に以下の3つの現象を確認することが可能となった。

4.1 単位時間当たりの圧力分布

2.5で示した方法で揺動音に大きな影響がある時間当たりの圧力を評価することが可能となった。Fig. 11は任意時間当たりの圧力分布図である。

このようにタンク内の圧力分布を評価することで、燃料がタンクの“どの位置”に“どの程度”の強さで接するかが確認され、結果、どの箇所に揺動音が出るかを評価することが可能となった(Fig. 12)。

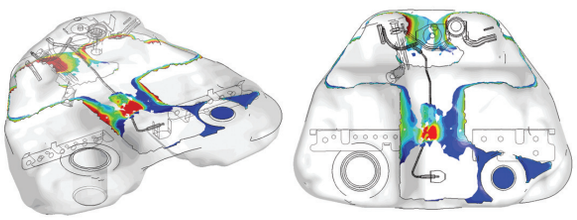


Fig. 11 Pressure distribution on areas where fuel is in contact with tank

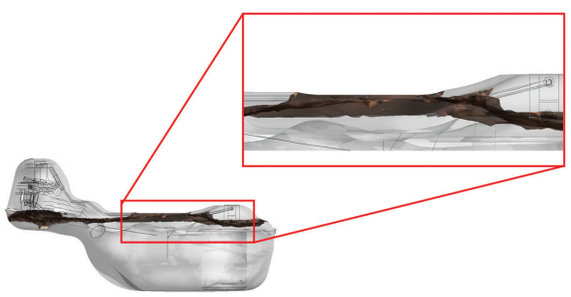


Fig. 12 Status where fuel is in contact with tank

4.2 ベクトル図による流れの可視化

Fig. 13はタンクの液面の動きをベクトルで示したものである。燃料の流れが速く、かつ流れが干渉しあうところでは燃料同士の衝突による音が発生すると予測される。よってこのベクトル図から揺動音が起こる箇所を特定するひとつの指標を得られると考えられる。

4.3 液面の動きの可視化

Fig. 14は任意時間の燃料の液面の動きを各方向から見たものである。これらの図を時系列にまとめ動画にすることで燃料の収束性など液面の動きを確認することが出来る。

揺動音による最も大きな音は、燃料がタンクに接する際に発生する音だということがわかっていた。CAEを用いて、その音が発生する箇所を圧力を使って評価することで音の発生を予測することが可能となった。

それ以外の音の要因についても、ベクトルによる流れの干渉や燃料の動きの収束性の評価など、多面的に確認することが可能となった。

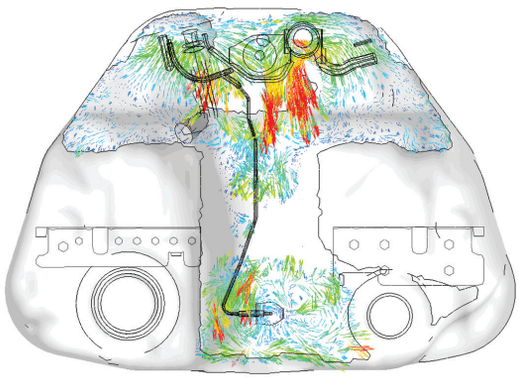


Fig. 13 Vector diagram of fuel surface

Fig. 14 Movement of fuel surface

4.4 新規タンクでの予測

試作段階のタンクの問題点を解析により事前に洗い出し、再試作をする前にCAEをベースとして形状変更を提案した例を挙げる。開発タンクのため、以下、結果を比較した図は部分的な図とする。

試作段階のタンクでは燃料の動きによる圧力が高くなり、結果、揺動音が大きくなることが予測された。(Fig. 15左)CAEを用いて形状変更案を提案し、形状変更前後での圧力の大小を比較した。以下、Fig. 15は圧力コンターの比較図である。試作段階のタンクに比べ形状変更後の方が圧力が小さくなることが確認された。これはこの箇所において液がタンクをたたく時の圧力が小さくなったことを示している。

また、Fig. 16にタンクの液面のベクトル図をあげる。試作段階のタンクは流れが乱れ、燃料同士が干渉しているが、形状変更後は流れが乱れず、スムーズに流れていることが確認された。

この結果を基に、形状変更後のタンクにて再度タン

クを試作し、音の評価を行った。変更後のタンクでは試作段階のタンクに比べ揺動音が小さくなることが確認された。

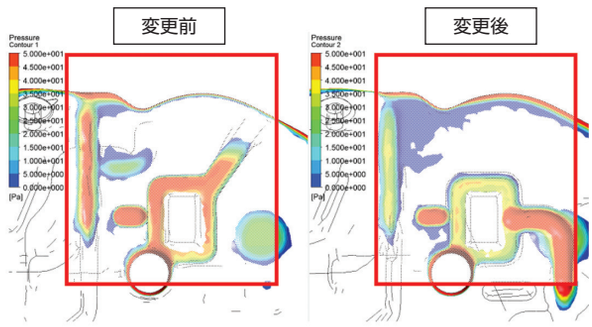


Fig. 15　Difference in pressure distribution before and after shape is changed

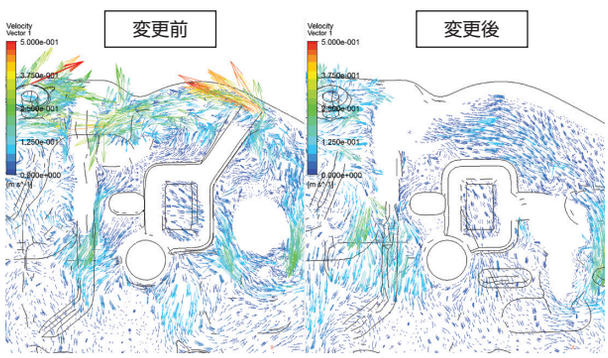


Fig. 16　Difference in vector diagram before and after shape is changed

5.　おわりに

開発期間のさらなる短縮の中で、低コストで軽量な燃料タンクを開発するためには、揺動音を開発初期から精度良く予測できる技術が求められていた。今回開発したCAE技術を用いることで、従来よりも素性の良いタンク形状の提案を設計前段階で行うことが可能となった。

今後、CAEを用い、様々な形状のタンクの揺動音を予測することで、CAE精度の向上とさらなる詳細な揺動音の予測を可能とする技術を確立していきたい。

参考文献

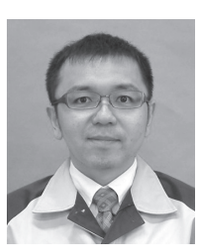
(1) ANSYS Fluent ユーザーズガイド

【著　者】

関　　俊一

森　　智一

伊藤　健吾


古野　一裕

円筒形分力ロードセルの開発

Development of Tubular Shaped 6-Component Force Load Cell

下　山　　浩[*1]　永　野　弘　樹[*2]　坂　本　昌　也[*1]　榎　本　秀　喜[*2]
Hiroshi SHIMOYAMA　Hiroki NAGANO　Masaya SAKAMOTO　Hideki ENOMOTO

抄　録

車両に搭載し各構造間の分力を計測する従来の技術として、十字式感受体を使用した単焦点式6分力ロードセルがあり、これは主にタイヤ6分力計として、車両運動計測では一般的な装置である。しかし、構造的に複雑であり、円盤状であるため、その適用範囲は限られている。そこで、円筒の応力斑の対称性に注目し、円筒形感受体を用いた単焦点式6分力ロードセルの開発を行っている。本稿では、その原理を解説し、車両計測への応用構造、足廻りブッシュ圧入部、ハブユニット、と車両計測事例について紹介する。

Abstract

Traditionally, cross-shaped 6-component single focused load cells that are built in vehicles, mostly as tire force sensors, have been a general method for measuring component forces in order to study vehicle dynamics. However, the application has been limited by its complicated structure and disk shape. Therefore, due to the symmetrical response pattern of a tube, the development of a tubular-shaped 6-component single focused load cell is currently in progress.

This paper presents the principle of the cylindrical load cell and introduces build-in sensor, suspension bush and hub unit structure for force measurement. Furthermore, measurement case studies will be presented.

1. はじめに

1.1　背景

力の計測においてロードセルによる計測は一般的なものであるが、車両、特に足回りの内外力の計測には歪ゲージによる計測が手早く、計測する力の方向が既知である場合には有効な手法である。近年のシミュレーション技術の進歩により、車両運動についても机上での予測精度が精査されるようになり、特に足回りの内外力の計算値その構造接点周りの6分力、タイヤの諸特性値等の妥当性が問題となってきている。同様に、空力による車両運動への影響についても従来の風洞試験やCFDによる静的な係数評価から、運転者の感じる車両の質感において重要である動的な外力評価へとその計測精度への期待値が上がって来ている。そのためには未知分力の精度の良い同定と計測時間の同時性が重要であり、再現性の高い分力計測装置の開発が期待されている。

1.2　分力ロードセルの原理と構造

ある質点に作用する力の状態は6つの分力がすべて既知となって初めて同定できる。この事は力の計測が現実世界で困難である2つの理由を暗示している。一つは質点の存在が一つのモデル、理想状態、であると言う事。もう一つは同時にこれら6つの成分、3つの力と3つのモーメント、を同定しなければならない事の工学的難度にある。そのために、分力の計測手法には質点（＝計測焦点）が厳密に管理された、「天秤」が一般的であり、原理的に分力を正確に計測できる唯一の方法である。一方で、ロードセルとは原理的には「ばね秤」であり、厳密には力の計測時にその作用点の移動、つまり計測装置自身の変位・変形を伴う。この事から分力ロードセルには排除できない分力間の誤差が伴い、それは、計測値／定格値により悪化していく事になる（これは測定原理的な問題であり、構造的問題

＊1 技術開発部
＊2 CAE部

である分力クロストークとは性質が異なる事に注意を要する）。

車両計測で使用されるロードセルは、その検出原理により幾つか種類があるが、圧電素子を使用した電気容量式と、歪ゲージや半導体、光学素子による歪検出式の2つが一般的であり、それぞれの性質により使い分けがなされている。分力ロードセルは、その構造に大きく2種類あり、単軸のロードセルを必要軸力分重ね合わせた多焦点式（組み合わせ式）と、一つの歪感受体による単焦点式がある。前者においては、構造焦点に合わせた幾何的分力補正が必要となるため何らかの演算素子が不可欠である。このために、6分力の検出に必ずしも6つのロードセルが必要というわけではなく、ロードセルの特性とその配置構造に様々な組み合わせが存在する。それに対し、後者は単焦点でありこのような焦点補正が必要でない。このことは演算に必要な時間おくれ（ジッタ）がない事を意味し、その性質から特に、ロボット等の高性能な動的姿勢制御用のセンサとして重用されている。一般的には、広く十字式として知られるものであり[(1)]、そのクロストークの少なさと出力の線形性とのバランスの良さから、製造上の欠点である構造の複雑さと、円盤の中心と外周といった拘束点の制限、強度上の脆弱さ等のネガがあるにも関わらず、市販されている単焦点式の分力ロードセルとしてはほぼ唯一の構造となっている。

1.3 車両の分力計測とその問題

車両の分力計測において、先ず最初に考慮しなければならないのは使用する検出装置の定格と分解能である。特に歪ゲージ式ロードセルにおいては、その歪単位がマイクロストレインで表されるように、1/1,000,000であり、ゲージの負荷容量制限によって、最大でも1/1,000を超える事はない。これは例えば、車両の風洞試験などでその揚力を計測する際に、1トンの車重量でグラム単位の揚力差を同定するにはその定格から測定ダイナミックレンジの低いロードセルの使用は現実的でない事を示している。これが風洞計測で天秤が使用される事の、先に述べた変位誤差以上の、最大の理由である。

一方で、動的計測においては、天秤の応答性が問題になる。最新の高速アクチュエータを使用したつりあい錘装置で、20 Hz以上の応答を実車スケールで実現するのは困難であろう。さらに、ムービングベルト等の質量増と変動増要因から、結局のところ、測定対象の軽量化が促進される事になり、スケール風洞での動的計測に開発手段が移る要因ともなっている[(2)(3)]。

車両運動の計測において、外力である空力と重力、運動力としてタイヤ接地点にかかる拘束力の他は、すべて構造内力であると見なされている。しかし、過渡的に見ると、空力中心、重心、接地中心等も結局のところ仮想点、つまりモデルに過ぎない。どのような手法によってこれらを計測するにしても、何らかの設計目的に沿った物理モデルを外挿しその作用焦点に換算する必要がある。例えば、車両運動モデルとの整合を考えるならば、測定力としては、バネ下、バネ上それぞれの完全力を計測したい処であろうが､現実的には､サスペンションのプッシュロッドに1軸のロードセルを組み込み、接地反力（バネ上下間相対力）を計測する事で、バネ上下に架る空力成分を同定する事が一般的に行われている[(4)]。

また、市販車においては、サスペンションのリンク部にゴムブッシュが多用されている。これはゴムによるバネ結合であり変位に伴った非線形性を有している。このブッシュの開発において、入力を同定することは重要な意味を持つ。歪ゲージにて計測するのが手早い手段であるが、理想的な位置に貼る事が出来る場合は稀であり、各成分の相互クロストークを完全に排除できない。このため、取付側を改修し、ピエゾ式のディスク型分力センサをブッシュ内筒との間に挟みこむ事で分力やモーメントを測定する事が広く行われているが、直流成分を安定して計測する事が困難であり、プリロード等の調整には専用の検具を用意しなければならない等その取り扱いに難がある。

2. 円筒形分力ロードセル

2.1 着想に至る経緯

十字式分力ロードセルには、先に挙げたデメリットの他に検出感度や壁面の影響による角柱の歪の対象性の悪化を避けるために､一般的にはフレキシャ（Flexor Holes）と呼ばれる構造が必要である[(5)]。そのために、強度上の問題がその廻りに発生する事になる。また、構造としては4柱のスポークとなり、組み込みロードセルとして回転体に利用する場合に、周方向に90度の周期的剛性分布を持つ事になる[(6)]。

これらの構造的な問題を解決する方法として、構造体を解析し各分力への感度特性の良い場所にピエゾ式センサを埋め込む手法がある[(7)]。難点は製作工数が膨大になり、実質的に一品対応となる事と、分力同定に高速演算が必要であることである。

十字式の優れた点は対向的に組み合わせた角柱の構造対称性を利用して相互干渉を極力排除していることである。一方で、一つの感受体ではあるものの、製造上は4つの角柱それぞれの工作精度、少なくとも10の切削パス、に依存する事になる。

円柱は対向軸方向と円周方向に周期的対称性を持つ

幾何構造である。さらに感受体に円筒を使用すれば、切削パスが表と裏の2つで済み、曲率を持った表面に歪ゲージを実装する事による精度悪化さえ制御できれば、十次式と同等の精度も確保できるだろう。構造的にも円柱／筒であれば強度的にも優れ、組み込みロードセルとして適用範囲はさらに広がると期待できる。

2.2　円筒応力斑と測定原理

先に述べたように、円筒上の歪の対称性とその誤差（特にクロストーク成分）の厳密な解析では、楕円関数の対称性の問題となる。ここでは、その数学的問題に立ち入らずに構造解析（FEM）によってその検出原理を説明する事を試みる。ここでは、実際の実装例として、歪ゲージ式を仮定しているが、歪検出の手法についてはどのような物でも原理は同じである。

Fig. 1 に円筒のFEM解析例を示す。簡便的に軸方向に4分割、円周方向に12分割した領域をとり、各入力状態でその表面が圧縮場、伸張場であるかを方向と共にマトリックス表示する（Fig. 2）。

ここで市松模様が現れているものは、厳密にはせん断場であるが直感的にわかりやすいように2色にしてある。この円筒上で赤を圧縮場、青を伸張場として、Fx、Fyの検出例をゲージを白枠で置いてある（Z系については、直感的に解ると思うが、主軸に対し、Fzが一様圧縮、Mzが一様せん断となる）。なおこの例では、表面のみでマトリックスを作ったが、内径側も利用する事が可能である。

この例から各入力のみに平衡が崩れるように検出場所とゲージ極性を選ぶ事が可能である事が解るだろう。実際例の歪検出回路とゲージ極性の関係をFig. 3に示す。ここでは、Fx荷重時のFxとFyのひずみ検出の素子と回路の様子を取り上げて相互干渉排除の原理が説明できる。

必要出力に対し最低1つのブリッジ出力が対応する事が解る。4ゲージ法を選択すると最低で24枚のゲージが必要であるが、2素子の組み合わせゲージを利用する事で枚数としては24枚以下で実装可能である。

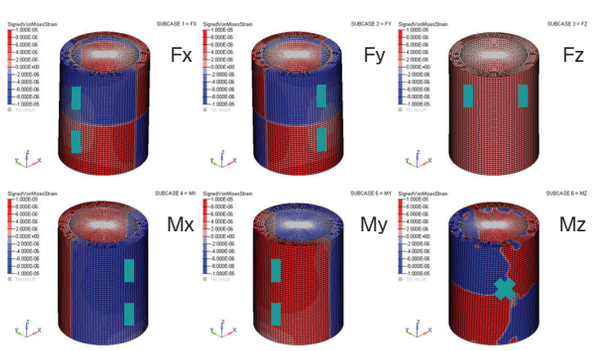


Fig. 1　Von Meses stress plot on tube

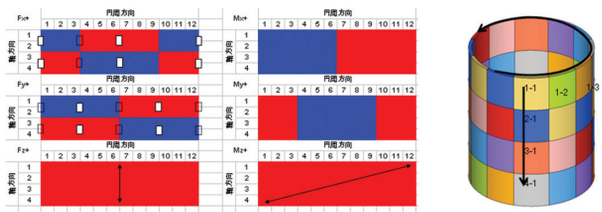


Fig. 2　Matrix image of strain field on the surface

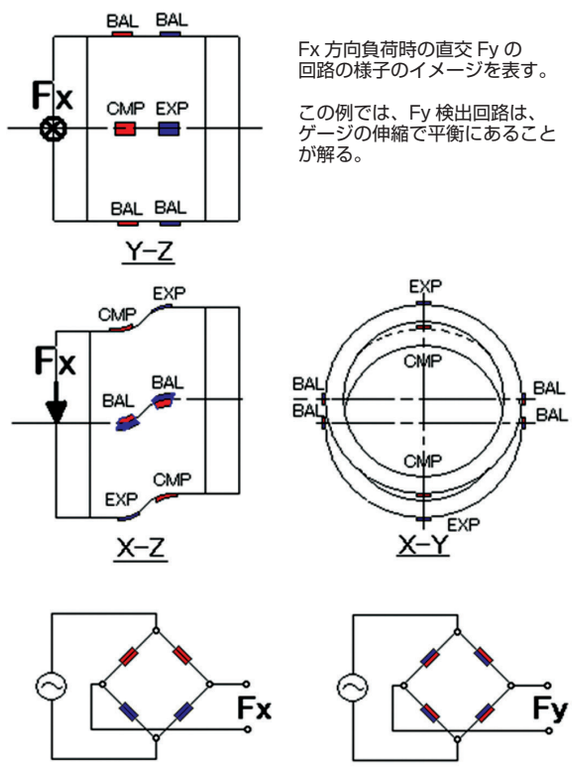


Fig. 3　Polor image and gauge circuits under load Fx

2.3　ロードセル構造

上記原理に基づいて感受体を設計しロードセルとして機能させるためには、最低限、感受体の両端に、入力部と固定部が必要となる。なお、組み込みロードセルであれば、実構造にこの2つの機能を含める事は可能であるが、検定は感受体のみで行うことになり実構造搭載での出力不足などの問題が排除できない可能性が残る。

円柱では分力焦点は感受体のゲージ貼り付け面の鉛直中心になる（感受体を円錐とした場合は側面視で大径側中心よりになる）。代表的な汎用ロードセル構造をFig. 4に示す。これは、インプレッサのフロント用ハブユニットと互換性を持っている。

円筒を利用し鉛直方向の剛性が高いことから、直径と軸寸法の関係によって、出力バランスは十字式よりも悪くなる場合がある（これは中実の円柱を使用するとより悪化する事を意味する）。また、先に述べたように曲面に検出素子を実装するために、その面積が小

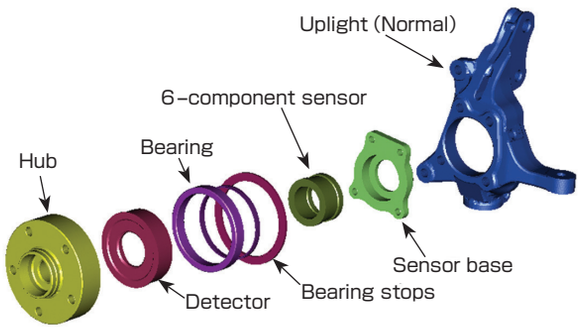
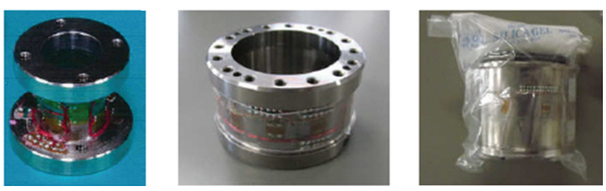


Fig. 4　Structure of built-in load cell in hub unit



種　別	Ⅰ　群	Ⅱ　群	Ⅲ　群
用　途	風洞モデル車軸	ハブユニット	ブッシュ
仕　様	歪ゲージ式共通励起5分力	歪ゲージ式独立励起6分力	←/3分力
コア概寸(mm)	φ17×L15×t0.6	φ57×L16×t6.0	φ50×L31×t0.9
コア質量(kg)	0.064	0.471	0.102
コア断面係数	120	11120	1670
F定格：感度	0.2 kN : 0.15 mv/V	20 kN : 0.4 mv/V	1 kN : 0.17 mv/V
干渉(最大) ＊軸方向をZ	My→Fx 15% （単方性）	Mz→Fy 2% （単方性）	Mz→Fx 19% （単方性）

Fig. 5　Figure of a series of tubular cells（Type Ⅰ on the left, Type Ⅱ and Type Ⅲ on the right）

さいほど、曲率が大きいほど性能優位になる。このように円筒の寸法関係にその性能の多くが依存しているために、組み込みロードセルとして目標性能を達するためには構造解析による机上予測設計が重要である。必要剛性と強度を確保する際には必然的にその感度を犠牲にしなければならない。

結果としてS/Nの高い高性能な歪アンプと組み合わせ、必要な測定値の範囲に絞った最適化設計が必要となる。Fig. 5に寸法関係の異なる開発例を示す。その円筒の寸法関係と断面係数により3群に分類する。

開発Ⅰ群は、初期の小型の事例であり、出力バランスを揃えるために、ボビン型の感受体となっている。この事例では回転体に架かる外力の検出を固定側で行うために、5分力の出力となっている。M系->F系への干渉があるが、線形かつ単方向性なため簡単な回路で除去可能である（実用上は計測後に取得データ上で除している）。

開発Ⅱ群は円筒形であり、車両のハブユニットに組み込む用途として開発したものである。特徴として軸方向に寸法を取る事が容易でなく、計測精度を上げるための回路の工夫や、出力バランスを向上するための肉抜きが行われる場合もある。

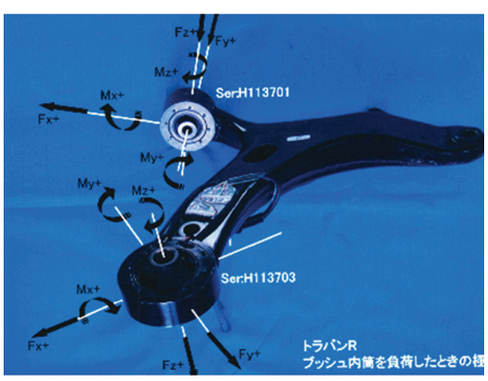
開発Ⅲ群は、サイズとしては、Ⅰ、Ⅱ群の中間になり、薄型の円筒である事と、円周方向に寸法を取る事が困難なブッシュ廻りへの実装を前提に開発したものである。寸法上の制限から固定側への締結をネジ込みにしている場合もある。

3.　応用事例

車両開発における、計測の応用事例を2例簡単に紹介する。実際の組み込みロードセルとしての設計には、従来の歪ゲージ貼り付けによる試験条件での構造負荷の計測データとFEMによる構造解析から条件を絞りこみ、歪アンプの実S/N性能と必要分解能を満たすように最適化されている。強度的にも計測器としての目標であるマイレージ保証（当社テストコース3,000 km通常走行）をクリアしている。

3.1　ブッシュ組み込みロードセル

Fig. 6に、フロントサスペンションのロアアーム車体側取付部に適用した写真を示す。



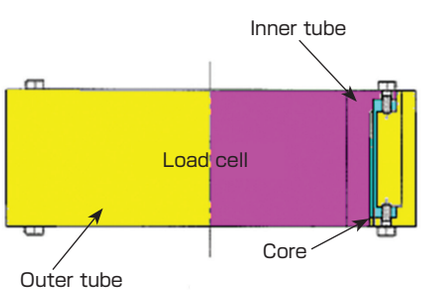


Fig. 6　Lower arm bushing load cells

ブッシュ周りではその変形の様子から解るように、歪ゲージ添付による出力では横力の出力にねじりの出力が重畳され反力方向を検出する事が難しい。このモーメント干渉成分が大きい場合は実際の入力との乖離が大きくなることで、歪ゲージ出力のみに頼った場合は、ブッシュの異方性の設計に瑕疵を生ずる危険性

がある。Fig. 7、Fig. 8に、リアサスペンションのラテラルリンク部での歪ゲージ出力とロードセル出力の比較を示す。

Fig. 7　Strain gauges around bushing of lateral link body side end

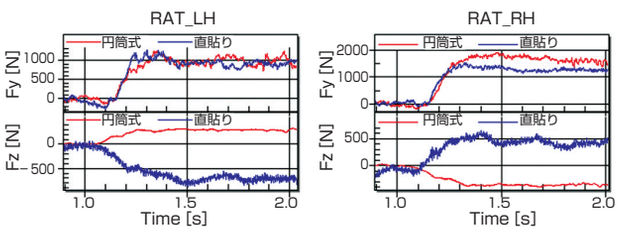


Fig. 8　Comparison of load cell & strain gauge outputs

Fig. 9にリアサブフレームブッシュのセンサ組み込みの状態を示す。一見何も組み込まれていないように見えるが、円筒の中に6分力ロードセルが実装されている。ブッシュはねじ込み式の外筒を採用している。設計検証に便利なように、取り外しが容易な構造となっている。

Fig. 9　Sub frame load cell without bushing

3.2　ハブユニット組み込みロードセル

車両運動制御において、その開発黎明期より続く主要な課題の一つが、タイヤのμ推定の収束性である。フラットベルト試験機でのタイヤ特性(横力、前後力、セルフアライニングトルク)と実路との不整合は広く知られている。過渡的特性ではより顕著であり、従来のホイール6分力センサでは、そもそも演算等の要因があって最大で20 ms程の時間遅れが存在していた 。これは制御用センサとしては致命的である。測定用としても、その重量となによりも専用のホイール形状とスリップリング等の車外突起物が、計測の際に排除できない大きな誤差要因として残っていた。

Fig. 10に、円筒形分力ロードセルをハブユニットに組み込んだ事例の写真を示す。量産ハブユニットとの互換性を確保し、焦点をホイールセンタと一致させる事が可能であるため、出力をそのまま、同時に搭載した従来式のホイール分力センサの出力と比較する事ができる。Fig. 11にA社の最新のホイール分力センサとの出力を時系列で比較した事例を示す。

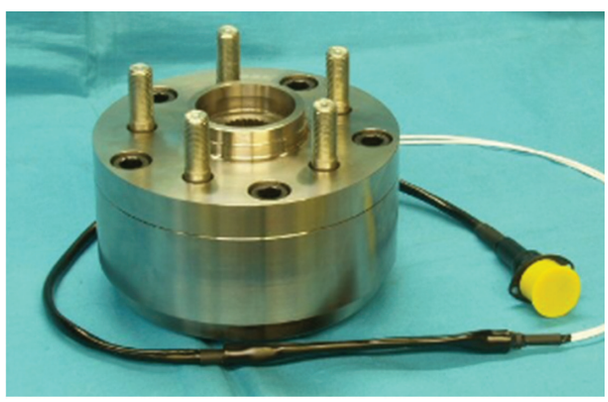


Fig. 10　Hub unit sensor

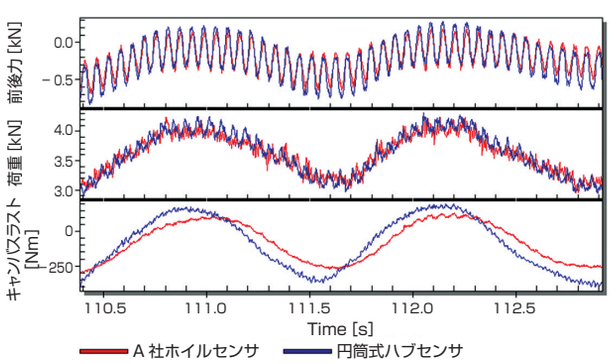


Fig. 11　Comparison of general wheel force sensor & hub unit sensor outputs

以上は、車体固定型の事例であるが、参考までに回転側に適用した事例(ホイールに組み込み)をFig. 12に示す。これも、従来式はスポーク側に組み込む方式に対し、リム側に円筒を組み込む事で、焦点をホイールセンタに一致させる事が可能である。出力はホイール固定座標系で出力され、スリップリングか無線通信／テレメータで引き込む必要がある。

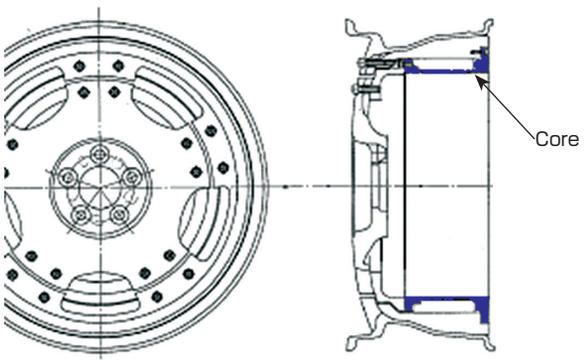


Fig. 12　Example of wheel force sensor using tubular load cell

4.　まとめ

円筒の応力斑対称性に着目し、円筒形感受体を用いた単焦点式6分力ロードセルを開発した。サスペンションロアアームやハブユニットなどにロードセルを埋め込み、実走行時の動的な内外力計測が可能であることを確認した。

操縦・空力安定性、振動騒音、乗心地など、動的な力の計測により得られる情報は有益である。開発した6分力センサは、未知分力、計測の同期性、適用範囲の拡充を考慮して開発したものである。事実を正しく把握することに拘ることでメカニズム解明、性能開発が更に前進するであろう。実走行時に発生する、真の力の大きさ、方向、伝達特性等を明らかにして、動的現象の理屈、性能進化を更に究めていきたいと考えている。

5.　謝辞

株式会社昭和測器殿*には、本開発の性能実現に多くの協力をいただきました。特に同社の挑戦意欲と正確な試作技術に対し、我々開発者一同ここに謝意を表します。

＊本社住所　東京都足立区西保木間１－17－16

参考文献

(1) Akihiko Yabuki：“Six-Axis Force/Torque Sensor for Assembly Robots”, Fujitsu Sci. Tech. J., 26, Apr. 1990, p.41-47

(2) 佐野 学、長久 太郎、小林 俊樹：「近接して運動する2物体の干渉によって生ずる非定常空気力：高速走行する自動車の不安定現象に関連して」、日本機械学會論文集、B編 49（444）、1630-1640、1983-08-25

(3) Theissen,P.,Wojciak,J.,Heuler,K.,Demuth,R. *et al.*：Experimental Investigation of Unsteady Vehicle Aerodynamics under Time-Dependent Flow Conditions - Part 1, SAE Technical Paper 2011-01-0177, 2011, doi：10.4271/2011-01-0177

(4) Beckwith, Thomas, Roy Marangoni, and John Lienhard： Mechanical Measurements. 6th ed. Upper Saddle River, NJ：Prentice Hall, 2007

(5) 林　純一：多分力ロードセル、日本国特公昭和63-61609、(1988-11-29)

(6) 林 祐一郎、辻内 伸好、小泉 孝之、大島 裕子、伊藤 彰人、土屋 陽太郎：ロボット指用薄型4軸力覚センサの構造最適化(機械力学、計測、自動制御)、日本機械学會論文集、C編 76（772)、3309-3315、2010-12-25

(7) 福原 輝幸、渡邊 洋、荒川 智之、玉置 肇：MASS車による冬期路面のすべり摩擦計測、福井大学地域環境研究教育センター研究紀要「日本海地域の自然と環境」、No.10、59-66（2003）

【著　者】

下山　　浩

永野　弘樹

坂本　昌也

榎本　秀喜

ハイポイドギヤ歯切り加工における球状化焼鈍鋼の工具摩耗予測

Tool Wear Prediction of Spheroidizing Annealed Alloy Steel for Hypoid Gear Cutting

白　石　真　一*1　Shinichi SHIRAISHI
松　村　　隆*2　Takashi MATSUMURA
日　下　高　至*1　Takashi KUSAKA

抄　録

ハイポイドギヤ歯切り加工において、生産性向上を目的とし、被削材の結晶組織を球状化する球状化焼鈍処理が適用されている。しかし、製造コスト低減のため、球状化焼鈍未処理鋼の使用において工具損耗の軽減を狙い､工具形状や切削条件の改善が望まれている。本報では、球状化焼鈍廃止を目的とし、工具の摩耗特性を切削シミュレーションに基づいて比較し、その解析結果の妥当性を実機試験により検証した。

Abstract

Spheroidizing annealing which spheroidizes the crystal structure of work piece is applied to improve the productivity in hypoid gear machining. However, we have to review the cutting processes to reduce the production cost.

In our study, an analytical model was applied to predict cutting processes of work piece material in hypoid gear cutting. To stop using the spheroidizing annealing, cutting tool wear characteristics were simulated for comparison and the analysis results were verified by actual machining test.

1．まえがき

ハイポイドギヤ(Fig. 1)は自動車において重要な動力伝達機構部品の一種であり、ハイポイドギヤの精度は、ギヤ音や伝達効率に影響があることから、高い加工精度が要求されている。また、ギヤの加工精度は、歯切り加工時に生じる工具摩耗を主因とした工具輪郭形状の変化に強く依存しており、工具摩耗量の管理はハイポイドギヤ歯切り加工において重要な課題の一つである。

一般的に工具摩耗量は、工具材種、工具形状、被削材種、加工条件をパラメータとして管理されている。特に被削材における工具摩耗量低減対策としては、被削材の結晶組織を微細球状化することで被削性を向上させる球状化焼鈍処理が適用されているが、球状化焼鈍処理を採用することで製造コストが増加している。製造コスト低減のためには､球状化処理をしない焼鈍鋼を採用可能とする工具形状や加工条件の改善が望まれる。

＊1 生産技術研究部
＊2 東京電機大学

Fig. 1　Hypoid gear

工具寿命は、工具摩耗に起因する加工精度から加工数量を設定することで決定され、工具、被削材及び切削加工パラメータに依存する。工具寿命の予測手法としては、切削速度と工具寿命の関係を数式化した、金属切削加工分野において最も有名な式であるTaylorの寿命方程式があげられる。しかしながら、Taylorの寿命方程式の使用においては多くのデータベースが必要であることから、解析効率向上のため、いくつかの摩耗解析モデルが提案された。竹山等は、工具摩耗を拡散効果によるものとし、温度特性への依存性のみ考慮したモデルを提案した(1)。しかしながら、工具摩

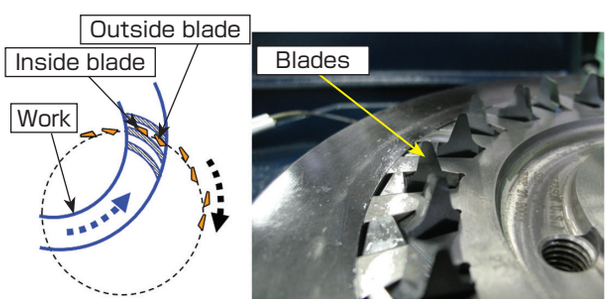
耗は、工具と被削材の境界面で発生する物理的現象であることから、境界面で生じる応力と温度に依存しており、工具摩耗の進行は応力及び温度を基とした予測が必要である。臼井等は、工具すくい面と逃げ面[(2)]の応力分布と温度分布を用いた摩耗特性方程式を提案した。応力分布と温度分布を用いた摩耗特性方程式とすることで熱的な摩耗が支配的であるすくい面の摩耗と、機械的な摩耗が支配的である逃げ面摩耗が同一の式で解析可能となり、実験的に摩耗特性方程式の妥当性を立証した。

本研究では、上記工具摩耗モデルをハイポイドギヤ歯切り加工に適用し、球状化焼鈍処理廃止に向け、球状化焼鈍綱と焼鈍鋼の工具摩耗特性を比較する。

2.　歯切り加工における工具摩耗

2.1　ハイポイドギヤの加工方法

Fig. 2 (a) は、ハイポイドギヤの歯切り加工メカニズムを示している。被削材と工具が同期回転しながら工具が被削材側へ切り込まれることでギヤ形状が形成される。工具はFig. 2 (b) に示すように、内刃と外刃が工具ホルダー上に交互に取り付けられている。



(a) Configuration　(b) Tool holder

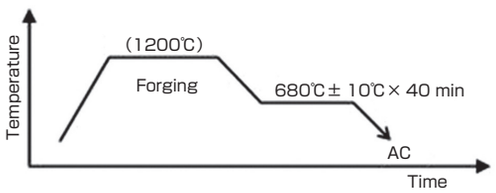
Fig. 2　Hypoid gear machining

2.2　被削材について

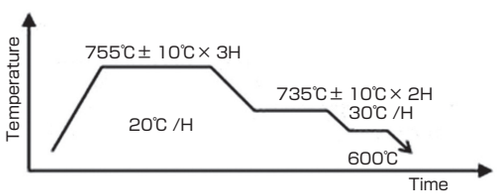
被削材については、焼鈍処理及び球状化焼鈍処理されたクロムモリブデン鋼(SCM420) にて工具摩耗特性の比較を行った。Fig. 3は、被削材の熱処理条件を示しており、Fig. 4は熱処理後の被削材を光学顕微鏡によって観察した金属組織を示している。球状化焼鈍鋼は焼鈍鋼と比較して、セメンタイト相が球状化及び微細化されていることがわかる。また、焼鈍鋼及び球状化焼鈍鋼の硬度は、それぞれ158 HV及び142 HVである。

2.3　工具摩耗試験

球状化焼鈍鋼と焼鈍鋼を加工した際の工具摩耗量を比較するため、ハイポイドギヤ加工機による加工試験を実施した。摩耗量の比較については、加工精度に強く影響のある逃げ面摩耗量にて比較を行う。逃げ面摩耗の計測位置はFig. 5 に示す通り、切粉流出方向の影響から摩耗幅が最大となる刃先より1.2 mmの位置で計測した。また、工具及び加工条件はTable 1の通りである。Fig. 6は焼鈍鋼と球状化焼鈍鋼の逃げ面摩耗幅を比較しており、焼鈍鋼の逃げ面摩耗幅は球状化焼鈍鋼と比較して5倍程大きいことがわかる。



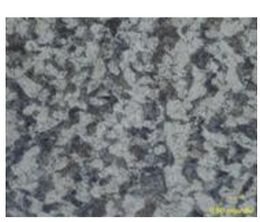
(a) Forged isothermal annealing



(b) Spheroidizing annealing

Fig. 3　Annealed processes

(a) Forged isothermal annealed steel



(b) Spheroidizing annealed steel

Fig. 4　Microstructure

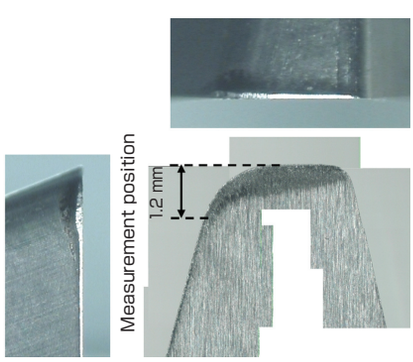


Fig. 5　Tool wear

Table 1　Cutting conditions

Workpiece		Cutting parameters	
Material	25CrMo4	Cutting speed	180 m/min
Annealing	Forged isothermal	Feed rate	0.18 mm/min
	Spheroidizing	Lubrication	dry
Tool			
Material	Carbide K10	Coating	AlCrN

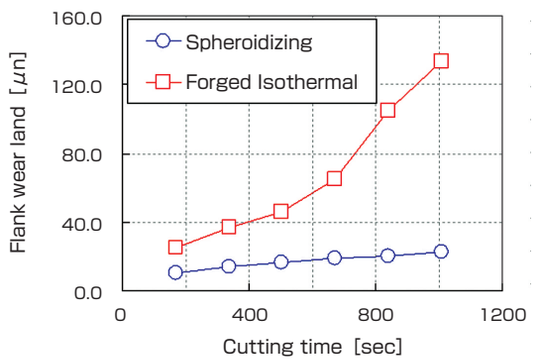


Fig. 6　Flank wear progress

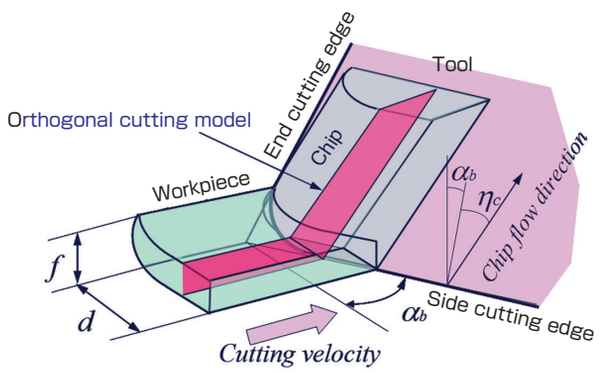


Fig. 7　Three dimensional cutting model

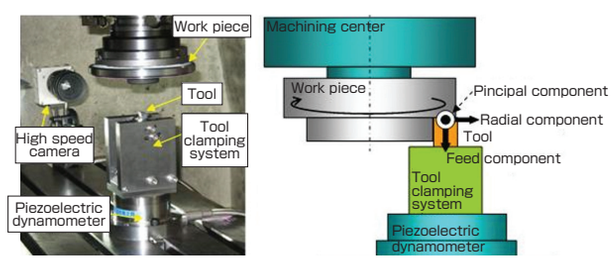
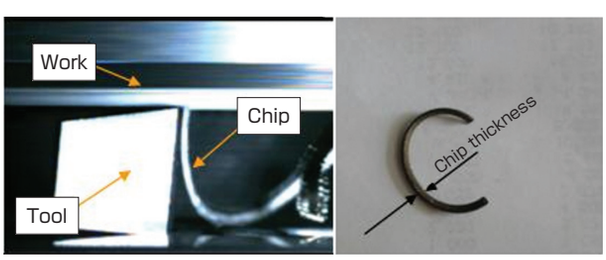


Fig. 8　Orthogonal cutting test



(a) Chip flow　　(b) Measurement of chip thickness

Fig. 9　Chip formation

3.　二次元切削試験

工具摩耗予測を行うためには、切削力を算出し応力分布を求める必要があり、切削力はエネルギ解析法[3]を用いて算出する。エネルギ解析では、三次元切削モデルを切削方向と切りくず流出方向を含む二次元切削の重ねあわせとしてモデル化している(Fig. 7)。そのため、二次元切削力を求めるための基礎データとして、工具と被削材の組合せに対して、二次元切削データの取得が必要となる。

二次元切削試験は、旋削加工と同様の加工形態とするため、被削材の形状を考慮し、Fig. 8の試験装置で実施した。被削材は、マシニングセンタの主軸に固定され、回転しながらZ軸方向に送られる。切削工具は動力計上の工具固定治具に保持され、加工時の切削力を測定する。また、高速度カメラにより工具側面から切粉形成状況も併せて観察した。

被削材は焼鈍鋼及び球状化焼鈍鋼の2種類を用いて、AlCrNがコーティングされた超硬工具にて加工を行った。二次元切削試験は、切削幅0.5 mm、切削速度130 m/min、180 m/min、230 m/min、送り速度0.05 mm/rev、0.1 mm/rev、0.2 mm/rev、すくい角0°、5°、10°、5°、逃げ角7°での条件で実施した。

Fig. 9(a)は、切削速度130 m/min、送り速度0.2 mm/rev、すくい角10°で加工時の切粉流れを示しており、切粉が連続的に形成されていることが確認できる。また、Fig. 9(b)に示すようにせん断角を算出するため、切粉厚さを計測した。せん断角ϕは、切削厚さt_1、切粉厚さt_2、すくい角αによって式(1)のように与えられる。

$$\tan\phi = \frac{(t_1/t_2)\cos\alpha}{1-(t_1/t_2)\sin\alpha} \tag{1}$$

Fig. 10は切削力計測結果の一例を示している。せん断面せん断応力τ_s及び摩擦角βは、切削力水平成分F_H及び切削力垂直成分F_Vによって式(2)及び式(3)のように与えられる。

$$\tau_s = \frac{(F_H\cos\phi - F_V\sin\phi)\sin\phi}{bt_1} \tag{2}$$

$$\tan\beta = \frac{F_V + F_H\tan\alpha}{F_H - F_V\tan\alpha} \tag{3}$$

上記式において、bは切削幅である。二次元切削データは、切削厚さ等を基に、式(4)、(5)で近似される。

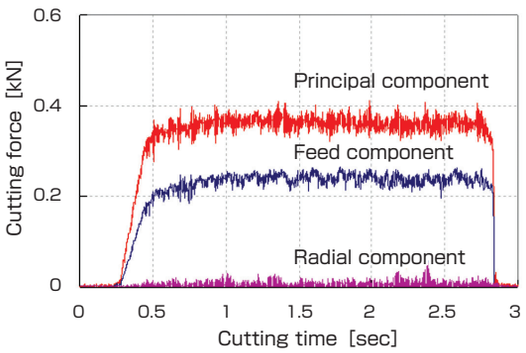


Fig. 10　Measured cutting force

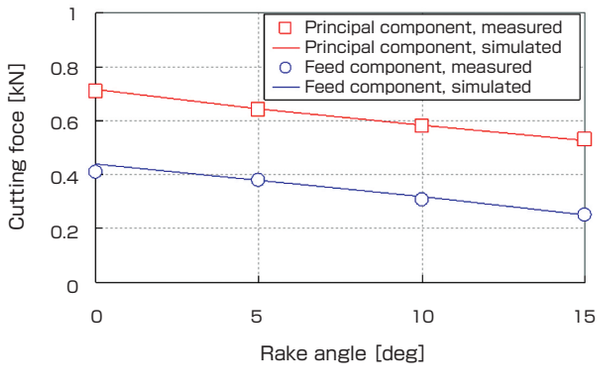


Fig. 11　Comparison in cutting force between simulation and measurement

焼鈍鋼：

$$\begin{cases}\phi = \exp(0.03V + 1706.55\alpha + 1.07t_1 + 1.73)\\ \tau_s = \exp(0.01V + 326.00\alpha - 0.21t_1 + 20.34)\\ \beta = \exp(0.02V - 76.51\alpha + 0.73t_1 - 0.58)\end{cases} \quad (4)$$

球状化焼鈍鋼：

$$\begin{cases}\phi = \exp(0.04V + 2763.51\alpha + 0.68t_1 - 1.99)\\ \tau_s = \exp(0.04V + 587.71\alpha - 0.09t_1 + 20.18)\\ \beta = \exp(0.02V - 1203.78\alpha + 0.78t_1 - 0.37)\end{cases} \quad (5)$$

上記、二次元切削データを用いて、切削力は式(6)で与えられる。

$$\begin{cases}F_H = \dfrac{\tau_s b t_1 \cos(\beta - \alpha)}{\sin\phi\cos(\phi + \beta - \alpha)}\\ F_V = \dfrac{\tau_s b t_1 \sin(\beta - \alpha)}{\sin\phi\cos(\phi + \beta - \alpha)}\end{cases} \quad (6)$$

Fig. 11は、焼鈍鋼の切削加工において、切削力の実測結果と解析結果を比較している。実測結果と解析結果がほぼ一致していることから二次元データの妥当性を確認できた。

4.　摩耗予測モデル

4.1　応力分布

応力分布は、二次元切削モデルにおける切削力を基に算出される。せん断面上には、均一なせん断面せん断応力が分布し、すくい面上には三角形または台形形状の摩擦応力が分布する。逃げ面上には逃げ面応力が分布し、逃げ面の摩耗予測に用いられる。逃げ面摩耗予測に関しては4.3項にて述べる。

4.2　温度解析

加工温度は、工具、切粉、被削材を格子状に区分して数値解析を行う。発熱量Sで、熱移流速度$\boldsymbol{v}$となる材料の温度上昇$\partial\theta/\partial t$は式(7)となり、熱伝導、熱移流、発熱による温度変化に依存する。

$$\rho c\frac{\partial\theta}{\partial t} = \mathrm{div}\left(k\,\mathrm{grad}\,\theta\right) - \mathrm{div}\left(\rho c\mathbf{v}\theta\right) + S \quad (7)$$

ここで、ρ、c、kは、それぞれ、密度、比熱、熱伝導率である。式(7)において$\partial\theta/\partial t = 0$とすることで式(8)に示す定常状態となる。

$$\frac{\partial\left(\rho c v_x\theta\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\rho c v_y\theta\right)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial\theta}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial\theta}{\partial y}\right) + S \quad (8)$$

式(8)において、v_x と v_yは流速成分であり、格子点温度は緩和法(SOR)[4]を用いて求められる。

4.3　逃げ面摩耗予測

本研究では、機械加工精度に影響する工具の逃げ面摩耗について解析を行う。摩耗速度は垂直応力σ_t及び温度θに依存しており、Rabinowiczの解析[5]を基とした式(9)で与えられる。

$$\frac{dW}{\sigma_t dL} = C\exp\left(-\frac{\lambda}{\theta}\right) \quad (9)$$

式(9)において、dW/dLは単位面積当たりの摩耗量、C及びλは、被削材と工具の組合せによって決定される摩耗特性定数である。式(9)より、逃げ面の摩耗速度dV_B/dtは、逃げ面摩耗幅上の垂直応力σ_fと温度θ_fからなる式(10)で与えられる。

$$\frac{dV_B}{dt} = C\sigma_f\exp\left(-\frac{\lambda}{\theta_f}\right)\cdot\left(\frac{1}{\tan\gamma} - \tan\alpha\right)V \quad (10)$$

式(10)において、V、α、γは、それぞれ、切削速度、すくい角、逃げ角である。式(10)の摩耗速度より切削時間Tにおける逃げ面摩耗V_Bは式(11)で予測される[6]。

$$V_B(T) = V_{B0} + \int_0^T \left(\frac{dV_B}{dt} \right) dt \qquad (11)$$

式(11)において、V_{B0}は初期摩耗量で、$T = 0$における逃げ面摩耗幅である。

5. 逃げ面摩耗速度

5.1 摩耗試験

Fig. 6と同様の試験装置を用いて、式(10)の摩耗特性定数を同定するため、工具摩耗試験を実施した。二次元切削試験と同様に、被削材は焼鈍鋼及び球状化焼鈍鋼の2種類を用い、工具はAlCrNをコーティングした超硬工具を用いた。加工条件は切削幅0.5 mm、切削速度180 m/min、230 m/min、送り速度0.2 mm/rev、すくい角3°、逃げ角7°である。

5.2 摩耗特性定数

摩耗特性定数は、摩耗速度の解析値と実測値の差が最小となるように値が同定される。

$$E = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \left[\left(\frac{dV_B}{dt} \right)_{i,j}^{*} - \left(\frac{dV_B}{dt} \right)_{i,j} \right]^2 \qquad (12)$$

式(12)において、$(dV_B/dt)^*$及び(dV_B/dt)は、摩耗速度の解析値及び実測値であり、m及びnは、摩耗経過曲線上の摩耗速度サンプル数を示す。式(10)における逃げ面摩耗幅上の応力分布及び温度分布は摩耗特性定数と共に変化するので、最急降下法を用いて摩耗速度の解析値と実測値間の誤差が最小となる摩耗特性定数を探索する。

Fig. 12は、焼鈍鋼と球状化焼鈍鋼を加工した摩耗試験において、逃げ面摩耗幅の実測値と解析値を比較している。解析値に関しては、実測値を基に式(10)における摩耗特性定数C及びλをTable 2の様に同定し、式(11)より逃げ面摩耗量を算出している。結果、実測結果と解析結果がほぼ一致していることから解析結果の妥当性が確認できた。

また、式(10)において摩耗特性定数Cは応力依存項であり、摩耗特性定数λは温度依存項となっている。Table 2より、焼鈍鋼と球状化焼鈍鋼についてCとλの差を比率で比較すると、λの差は10%程度に対してCの差は60%程度であることからCはλと比較して素材間の差が大きいといいえる。従って、焼鈍鋼と球状化焼鈍鋼を加工した際の工具摩耗速度差は応力への依存性が高く、機械的な摩耗の影響が大きく影響していると推察される。

Fig. 13は焼鈍鋼と球状化焼鈍鋼を加工した際の工具逃げ面温度を比較している。逃げ面温度はほぼ同等であるので、逃げ面の摩耗速度差について温度の影響が少ないことが確認できる。

以上より、焼鈍鋼の摩耗量を低減するためには、機械的な摩耗を抑制する加工諸元の改善が有効であると考える。

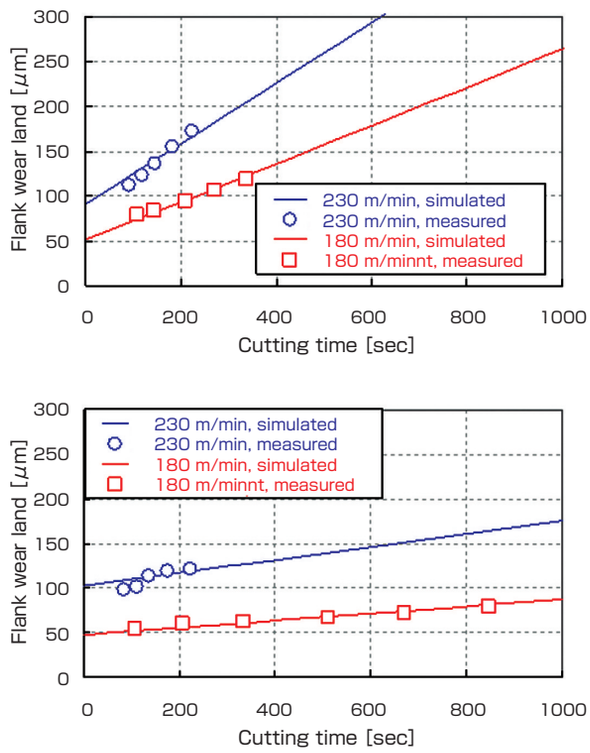


Fig. 12 Comparison in wear progress between simulation and measurement

Table 2 Wear characteristic constants

	C [m²/N]	λ [K]
Forged isothermal annealed alloy steel	4.48×10^{-12}	13664
Spheroidizing annealed alloy steel	2.74×10^{-12}	14837

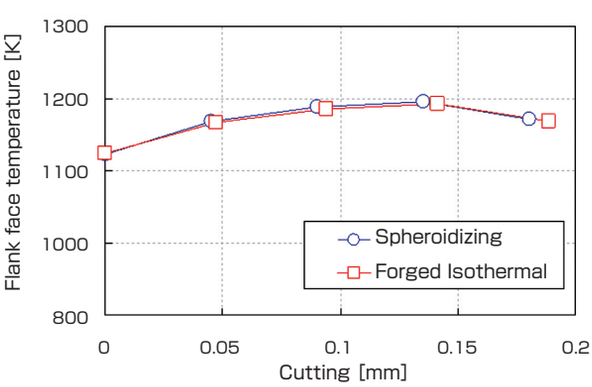


Fig. 13 Temperature distribution on rake face

6. 結論

ハイポイドギヤ歯切り加工における被削材熱処理の工具摩耗への影響を検討するため、工具摩耗モデルを適用した。

球状化焼鈍鋼と焼鈍鋼を加工した際の工具逃げ面摩耗速度について、実機試験及び数値解析により比較した結果、解析値と実測値が一致していることから解析精度の妥当性が確認できた。

球状化焼鈍鋼と焼鈍鋼の摩耗速度差の要因について解析結果より考察した結果、温度の影響は少なく、応力への依存性が高いことを確認した。焼鈍鋼の摩耗速度を抑制するためには、機械的な摩耗を抑制することが必要である。

参考文献

(1) Takeyama, H., Murata, T.：Basic investigations on tool wear. Trans. of the ASME - J. Eng. Ind. 85（1963）p.33-38.
(2) Usui, E., Shirakashi, T., Kitagawa, T.：Analytical prediction of tool wear. Wear 100（1984）p. 129-151.
(3) 臼井栄治：現代切削理論、1990年（共立出版）、p. 104-128.
(4) Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation 1980.
(5) Rabinowicz, E., Dunn, L.A., Russell, P.G.：A study of abrasive wear under three-body conditions. Wear 4（1961）p. 345.
(6) Matsumura, T., Obikawa, T., Shirakashi, T., Usui, E.：Autonomous turning operation planning with adaptive prediction of tool wear and surface roughness. Journal of Manufacturing Systems, 12, 3（1993）p. 253-262.

【著　者】

白石　真一

松村　　隆

日下　高至

無人航空機の一般空域での運航に関する動向

Global Movement for Unmanned Aerial Vehicles to Fly in National Airspace

阪　口　晃　敏*
Akitoshi SAKAGUCHI

抄　録

無人航空機については、近年目覚ましい進歩を遂げており、活躍の場面が広がりつつある。従来は、アメリカを中心とし、軍用での活用が大部分であるため、無人機の飛行空域は、戦場や、無人地帯など限られた空域であったが、世界の各国で、通信・観測・輸送などの民間用途に無人航空機を活用しようとする動きがでてきている。

しかしながら、民間の航空輸送を管理する現行の航空法などの法令は、新しい技術である無人航空機に対して十分対応がとれているとは言い難い。

そこで、ICAO（国際民間航空機関）を中心として、無人航空機を有人の航空機と同様に運用するためのルール作りの議論が進められている。議論が順調に進めば、日本国内においても、2020年ころには、法令の整備が進み、無人航空機を通常の航空機と同様に運行することが可能となる。

本論文では、現在進められている無人航空機の国際的なルール作りの状況について概説し、今後、それらのルールに対応するために必要な技術的な課題について、その動向と当社の取り組みについて報告する。

Abstract

The technologies of UAV (Unmanned Aerial Vehicle) are rapidly in progress and the area of the operation is expanding. Conventionally the main usage of UAV was for military purposes in US, hence the flight area was limited to the battle fields or uninhabited areas. However, there has been a global movement for UAV to be used for civil purposes such as communication, observation and transportation.

On the other hand, the existing laws have not sufficiently addressed the application of UAV. Hence, ICAO (International Civil Aviation Organization) has started discussion on rulemaking procedures to operate UAV in the same way as for manned aircrafts. If this discussion proceeds smoothly, UAV would be allowed to fly in Japanese national airspace in 2020.

1. まえがき

近年、無人航空機は、軍事用途だけでなく、民間用途としての活用も期待されており、様々な無人機の開発が世界中で進められているが、実は、Fig. 1に示すように、無人航空機の歴史は非常に古く、もっとも古い無人航空機は、1917年に製造されたSperry航空魚雷である。当時は、無線操縦ではなく、自動操縦装置を追加したのみであり、地上からの操作はできないものであった。その後、電子技術の急速な進歩に伴い、特に軍事用途において、無人機の実用化が進められてきた。当初は、訓練用の標的が主な任務であったが、カメラを搭載した偵察任務、さらに近年では、武器を搭載した無人航空機も出現している。

Fig. 2に、米軍での無人航空機の運用実績を示す(1)。2000年代に入り、10年間で10倍以上に飛行時間が増加しており、現代の米軍の作戦において、無人機はもはや必要不可欠の存在となっている。

＊ 航空宇宙カンパニー　航空機設計部

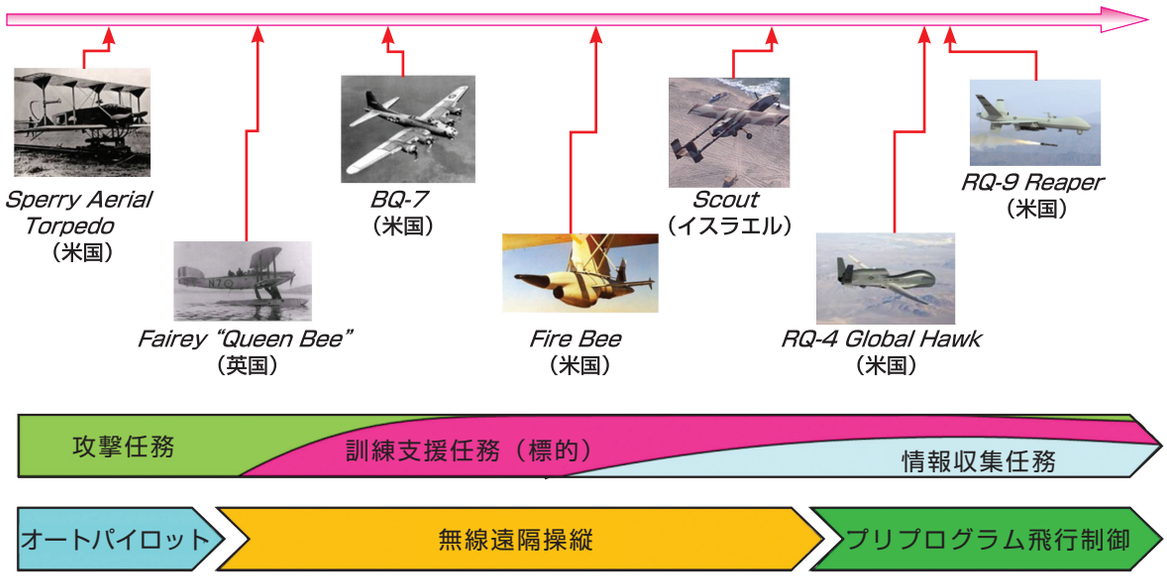
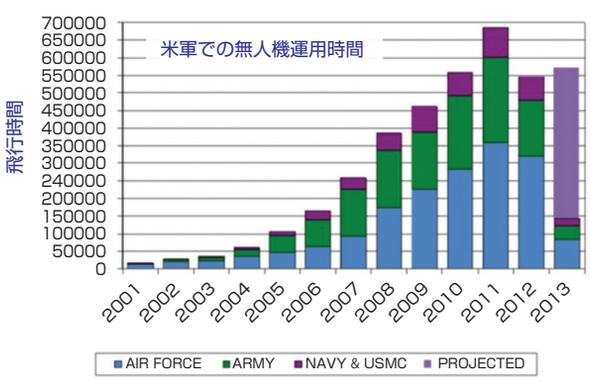


Fig. 1　History of Unmanned Aerial Vehicle



Dose not include Group 1 UAS

Fig. 2　Total flight hours of UAV of US military

Fig. 3　Unmanned reconnaissance system

一方、日本においても、防衛用途の無人機が運用されており、当社が陸上自衛隊向けに製造している無人偵察機システムFig. 3は、2013年4月に石垣島での自治体防災訓練に参加するなど、その運用範囲を拡大している[(2)]。

また、日本の無人機の運用で特徴的なのは、農業分野での無人ヘリコプターの活用である。日本の田畑は面積が小さいため、有人のヘリコプターでの農薬散布には不向きであるため、約2000機の無人ヘリコプターが全国で運用されている。

2.　航空法上の無人航空機の位置づけ

このように、無人航空機の運用は技術的な進歩とともに、今後、益々拡大することが期待されているが、一方で、法律の整備が不十分という課題もある。

現在の日本の航空法において、無人機は以下の2つのカテゴリに整理される。

・無操縦者航空機
・模型飛行機

前者は、基本的に航空機として取り扱われるが、本来航空機に搭乗しなければいけない操縦者がいないケースである。

日本においては、当社が製造したJAXAの定点滞空型飛行船Fig. 4が、唯一の例であるが、実験的な運用のみで飛行範囲は限定的あった。

一方、後者は、基本的には航空機ではなく、航空法上は、花火の打ち上げなどと同じで、他の航空機の運航に支障を与えないということだけが要求されており、それ以外については、機体の安全性などに法的制約がないものである。

上記の区分については、基本的には、人が乗れるサイズかどうかで、判断されており、現在、農薬散布で使用されるような小型の無人ヘリコプターは、模型飛行機として扱われており、また、有人機と同様の大型の無操縦者航空機は、国内では、未だ実用化されていない。

Fig. 4　Stratospheric Platform Unmanned Airship

しかし、近年の技術的な進歩のため、有人機レベルの大型の無人航空機の実用化や、小型であっても、有人機と同等の飛行能力を有する無人航空機も開発されつつあり、現状の航空法では、それらに十分対応できるとは言い難い。

3.　国際的な法整備の取り組み

そこで、無人航空機に対する法整備について、国際的に議論され、ICAO（International Civil Aviation Organization；国際民間航空機関）を中心に、無人航空機を一般の有人航空機と同様に運用するためのルール作りが進められている。

Fig. 5に示すように、現在、具体的な要件を示すSARPs（Standard and Recommendation Practices）が順次発行されており、2018年までには、すべての要件が明確になる計画である。

それが定まった段階で、日本をはじめ各国の航空法が順次改定され、2020年から2025年頃には、世界的に無人航空機の運航に関して、有人機と同様の取り扱いができるように法整備が整う見通しである。

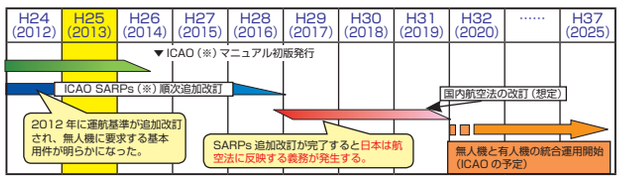
4.　法整備上の課題

無人航空機に関する法整備に関しては、主に、以下のような課題があり、今後、上記のICAOでの議論で明確化されるものと考えられる。

(1) 操作員の資格

従来、航空機に搭乗するパイロットの資格は法律で定められており、加えて、定期的な身体査も義務付けられている。

一方、航空機から遠く離れた地上で、高度に自動化された無人航空機を操作する操作員に対して、どういった能力や要件が必要になるかについては、大きな課題の一つである。また、無人航空機は、従来の有人機では考えられないような長時間飛行が実現できるため、操作員も途中で交代することが考えられる。そういった場合の引き継ぎや、権限の委譲についても、議論が必要となっている。



※1：ICAO 国際民間航空機関、

※2：SARPs（Standard and Recommendation Practices）＝国際基準であり、18分冊から構成されており、順次追加改訂が進められている。

Fig. 5　UAV integration roadmap by ICAO

(2) 地上装置の耐空性

航空機は、航空法に基づき耐空性（飛行に十分な安全性）を持つことを義務つけられており、航空機の設計・製造・整備・改造などすべてにおいて、細部が規定され、安全性を保証している。

しかし、無人航空機の場合は、航空機だけでなく、地上におかれた操作装置も含めて、全体として一つのシステムであるため、耐空性を確保するには、航空機のみの要件だけでなく、地上装置についても、新たな要件を整理する必要がある。

また、万が一、無人航空機と地上装置の間の無線中継が途絶した場合に、無人機運航の安全性をどうやって守るかも、無人航空機独自の課題である。

(3) 衝突回避能力の付与

航空法においては、機長（航空機に乗り込んで、飛行の全責任をもつ人）に、飛行中、周囲への見張りと衝突の回避が義務つけられている。無人航空機には、機長は乗り込まないため、この義務をどうやって実現するかが、無人航空機と有人航空機を一緒に運用する場合の大きな課題である。

現在、この衝突回避については、大きく以下の2つの方式が検討されている。

・GBSAA（Ground Based Sense and Avoid
：地上装置を主とした衝突回避）

　地上にあるレーダーなどを活用して、無人航空機の周辺を監視し、無人航空機の衝突を回避する方式である。無人航空機に頼らないため信頼性は高いが、無人航空機と地上装置の間の電波が途絶えた場合に対処できない欠点がある。

・ABSAA（Airborne Based Sense and Avoid
：機上装置を主とした衝突回避）

　無人航空機に搭載されたレーダーやカメラなどのセンサを用いて衝突を回避する方法である。GBSAAと異なり、電波が途絶しても、無人航空機独自で衝突を回避することが可能となるが、人が介在しないため、高い信頼性を確保することが課題となる。

現実的には、上記の両方の方式をうまく組み合わせて、衝突回避を実現することになると思われる。

5. 各国の取り組み

5.1 米国の例

米国は、世界で最も無人航空機の運用実績の多い国であるが、その大部分は、米国外の紛争地帯等が中心であり、米国本土内での無人航空機の運航については、未だ例外的な処置で対応している。

一方で、米国では、航空交通全般のシステムを近代化するために、FAA（FAA：Federal Aviation Administration：米国連邦航空局）により、NextGenと呼ばれる計画が進められており、この計画の中で、無人航空機も、有人機と統合して運用しようという検討が進められている。

しかし、FAAは、現状では、無人航空機を有人航空機と混在して行うためにはまだ多くの課題があると考えており、そのために、Fig. 6に示すように、技術的な評価を行うための大規模なテストサイト（開発,運用評価実験施設）を2013年末までに全国で6か所設置するとしている[3]。その一方で、2013年秋にはアラスカで地理的に限定した空域において,特別許可を発行し,商業用の小型無人航空機二機種の運用を認可した。

5.2 欧州の例

欧州では、現状、150 kg以上の重量を持つ民間用途の無人航空機を一般空域で運用することは認められていない。また、150 kg未満の機体の耐空性及び運用基準は運用する国が設定することになっており,欧州全域に適用する統一した基準はない。

しかし、将来的には、欧州連合は統一した空域統合及び運用（SES：Single European Sky）を目指しており、EU加盟国内で無人航空機の統一運用基準案等の検討が、2009年から行われており、2013年6月、欧州空域での統一した運用に向けた施策を取りまとめたロードマップが、策定された。この中で、欧州では2028年までの時間枠の中で段階的に、無人航空機と有人航空機の運用統合を図って行くとしている。

それに伴って、欧州でも、Fig. 7に示すように、9つのプロジェクトで、無人航空機と有人航空機を同一の空域で運航する技術実証が開始されている。これらのプロジェクトには,無人航空機の運用者のみならず、空港、管制官、メーカなど様々な立場の組織が参加している[4]。

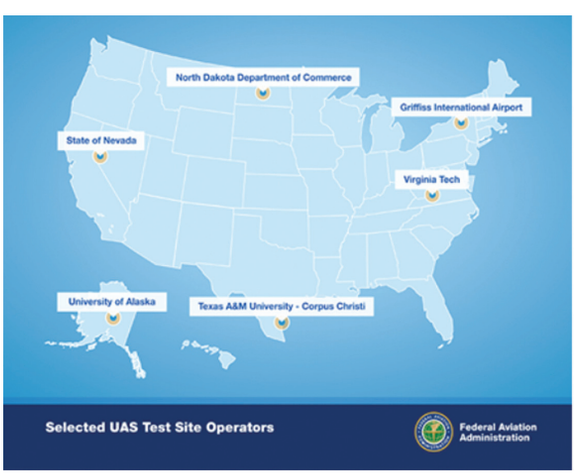


Fig. 6 UAV test site in US

5.3 日本の例

我が国においても、将来的な一般空域運航にむけての様々な検討が実施されており、当社でも、防衛省向けの無人航空機の開発を中心として、様々な技術実証に取り組んでいる。

5.3.1 滞空型無人機要素技術研究

2008年に、滞空型無人機の研究において、ABSAAに関する飛行実証が実施された（Fig. 8）。ここでは、旅客機などのように、トランスポンダーと呼ばれる位置自動応答装置を搭載した航空機に対する協調式自動衝突回避と、トランスポンダーを搭載していない航空機を対象とした、ミリ波レーダーやステレオカメラを用いた非協調式自動衝突回避の実証飛行が実施された[5]。

Fig. 7 UAV test site in Europe

Fig. 8 Long endurance UAV research program

5.3.2　無人機研究システム

無人機研究システム（Fig. 9）においては、航空交通管制への対応として、トランスポンダー、衝突警報装置、航空灯火の搭載を始め、管制官とUASの地上装置の捜査員との通話を、上空の無人機経由で中継するなど、将来の一般空域運航で想定される基本的な技術の飛行実証を実施した[6]。

Fig. 9　UAV Research System

6.　まとめ

以上のように、無人航空機の技術的進歩に伴い、世界的に今後10年以内に、法的整備が整い、無人航空機の実用化は大きな進展を遂げると予想される。

特に我が国は、狭い国土、空域の中で、安全に無人航空機を運用する必要があるため、当社では、積極的に無人機の安全性向上の技術開発に取り組み、より実用的な無人機の開発を推進していく。

参考文献

(1) 米国国防省：Unmanned System Integration Road map
(2) 八重山新聞ホームページ
http://www.yaeyama-nippo.com/
(3) FAAホームページ
http://www.faa.gov/
(4) SESAR ホームページ
http://www.sesarju.eu/node/1627
(5) 小柳、佐藤、阪口：滞空型無人機の研究　自動衝突回避技術について、2008年 第46回飛行機シンポジウム
(6) 千坂、黒柳、永山、平木、粂川、阪口：無人機研究システムの開発　ミッション系統技術について、2012年　第50回飛行機シンポジウム

【著　者】

阪口　晃敏

航空機構造組立に対応する自動穿孔システムにおける信頼性向上開発

Reliability Improvement of Mobile Automated Drilling Equipment for Aircraft Structures

宮島秀明[*1] Hideaki MIYAJIMA
村上孝[*1] Takashi MURAKAMI
高橋秀治[*2] Hideharu TAKAHASHI
中畑達雄[*2] Tatsuo NAKAHATA
斎藤学[*2] Manabu SAITO

抄録

航空機構造組立の穿孔作業に適用される可搬式自動穿孔装置の作業監視機能を強化することにより、穿孔作業の無人化を実現した。

穿孔状況を確認するために従来オペレータが行っていた自動穿孔作業の監視行為を、データ計測と機構に置き換え装置制御との連携を行った。これにより、装置構成を大きく変更することなく可搬式自動穿孔装置の信頼性を向上させた。

本稿では、可搬式自動穿孔装置の無人稼働のために行った開発事例を紹介する。

Abstract

The authors achieved unmanned drilling operation to build aircraft structures with the enhanced process monitoring system mounted in the right-sized mobile automated drilling equipment.

Drilling status monitoring by the system operator was eliminated by adding functions to monitor drilling status and control drilling process. As a result, reliability of the automated drilling equipment was improved with minor changes made to the original system configuration.

This paper introduces the development example of automated drilling equipment for aircraft structures to ensure its reliability in the process and achieve unmanned aircraft operation.

1. まえがき[(1)(2)(3)]

航空機構造組立(以下、航空機組立)は、骨格となる桁、リブ等と表面形状となる外板を組合せた上で通し穿孔した多数の結合孔へファスナ(リベット等)を取り付けることで形成される(Fig. 1)。

その製造分割サイズが長さ10 mともなれば孔数は数万にも及び、その大きさや求められる穿孔精度を満たすため自動穿孔設備は大がかりなものとなり大きな投資を必要とする。

航空機組立は年産1機から最大でも月産40機程度であり生産レートは高くないため、航空機組立に対する自動穿孔設備投資と生産性向上の費用対効果を十分見込むことができず、自動穿孔設備の導入は限定的であった。

このような背景を考慮し、設備投資をおさえた可搬式自動穿孔装置(以下、本装置)を開発し、実際に長さ7 mクラスの中規模航空機組立の穿孔作業を自動化したことで穿孔品質の安定化と生産性向上の効果を上げている(Fig. 2)。

一方で、穿孔状況の監視はオペレータが行うことを前提として初度開発項目から外し、本装置への監視機能の装備は次ステップの課題としていた。

2. 開発の狙い

航空機組立において本装置での自動穿孔中は、オペレータによる以下項目の監視をする必要がある。

(1) ドリルの破損・摩耗
(2) 切削粉吸塵状態
(3) 穿孔案内治具の仮止めボルト固定位置

本開発では、これらの各種データを計測・検知する機能の付与と自動穿孔装置制御と関連付けを行い、品質安定化、生産性の最大化、ヒューマンエラー防止を狙った。

＊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

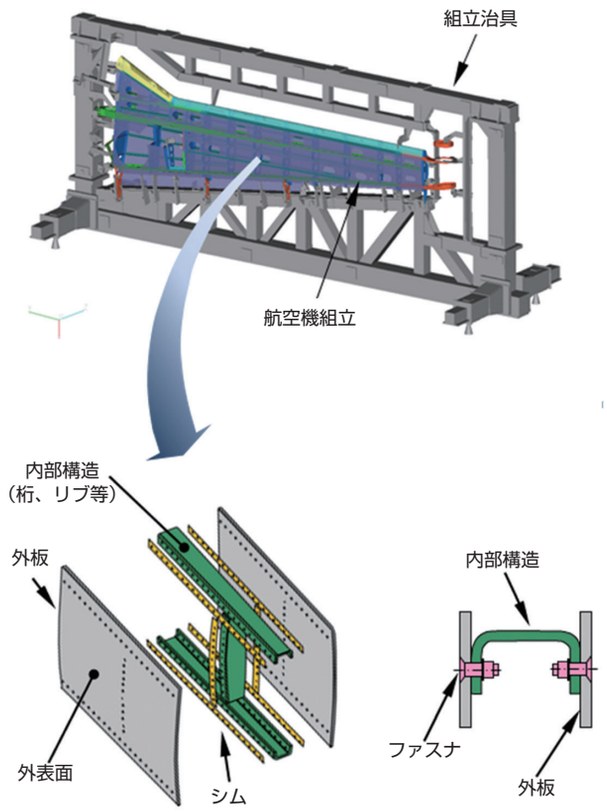


Fig. 1　Aircraft structure overview

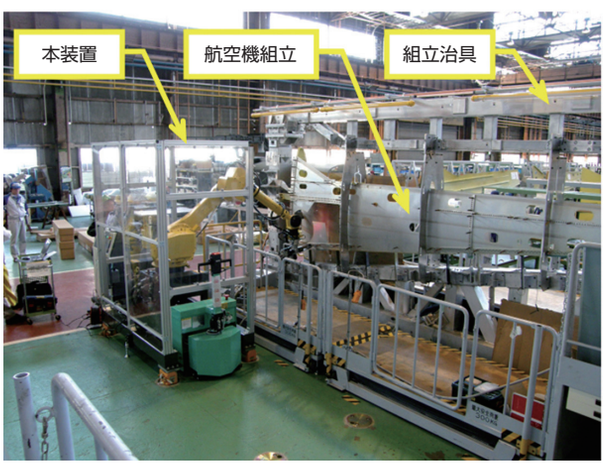


Fig. 2　Automated operation on actual processing

3.　本装置の信頼性向上開発

2項に記載した監視項目について、熟練作業者が行う穿孔作業と本装置のオペレータが行う監視との関係を整理し、本装置の信頼性を高めるために必要な機能を導き出した。

3.1　ドリル健全性監視系統[4][5]

航空機組立を形成するCFRP、チタン材等の難削材への穿孔はドリル刃先を著しく摩耗させる。

ドリル刃先の摩耗が進行するとドリル刃先が穿孔対象物を切削しきれずに前進することになり、穿孔対象物に過大なストレスを与え穿孔対象物の変形を引き起こす。

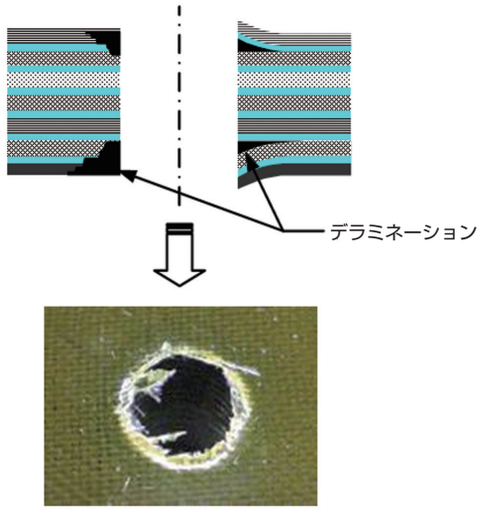


Fig. 3　Example of CFRP delamination by drilling

Fig. 4　Drill bits blade damage by drilling

このような過度なストレスは、CFRPへの穿孔の場合、穿孔した孔の周囲にデラミネーション(材料層間のはがれ。Fig. 3) 発生や、ドリル刃先欠損(Fig. 4) 発生要因となる。

また、摩耗した状態のドリル刃先が切削面をこすり続けると穿孔対象物及びドリルの温度が上昇し、過度な温度上昇は穿孔対象物材料への悪影響を増大し、ドリル摩耗を進行させる要因となる。

そのため、本装置で行う自動穿孔作業中はオペレータが穿孔状態の監視を行い、何らかの異常察知した場合は穿孔動作を停止させ、種々確認及び対策の上で再稼働する必要があった。

本開発では、ドリル刃先の物理的な破損とドリル刃先の摩耗状態を検知する二系統を本装置へ搭載した。この機能付加により、穿孔直前のドリル刃先形状チェックと穿孔中の切削力チェックを行い、刃先欠損が生じたドリルや過度に摩耗したドリルによる穿孔不良を予防することを可能とした。

3.1.1　ドリル刃先形状チェックシステム

ドリル中心軸と交差する線上に送受光部を設置し、送光部が発信する光に対する受光部の受光状態によりドリル刃先に極端な物理的な破損が発生していないことを確認するシステムとした。

本開発で設置した送受光部でのドリル刃先の有無検知のみでは、穿孔ユニット内部の送受光部間に切削粉等の残置異物があるとドリル刃先が破損していてもドリル刃先は健全とみなされてしまうので、以下に示すような2ステップに分けてドリル刃先の状態確認を行い(Fig. 5)、左記双方のチェック条件を満たす場合に限り穿孔許可信号を発信し穿孔可能と判断する方式とした(Fig. 6)。

・STEP1

送受光部間の異物有無の確認とシステムチェックのため、ドリル初期位置で送受光チェックを行う。

・STEP2

ドリル先端部が送受光部間にかかるようにドリルを一定値前進させ、ドリル先端部に極端な物理的破損(ドリル折れ)が無いことを確認する。

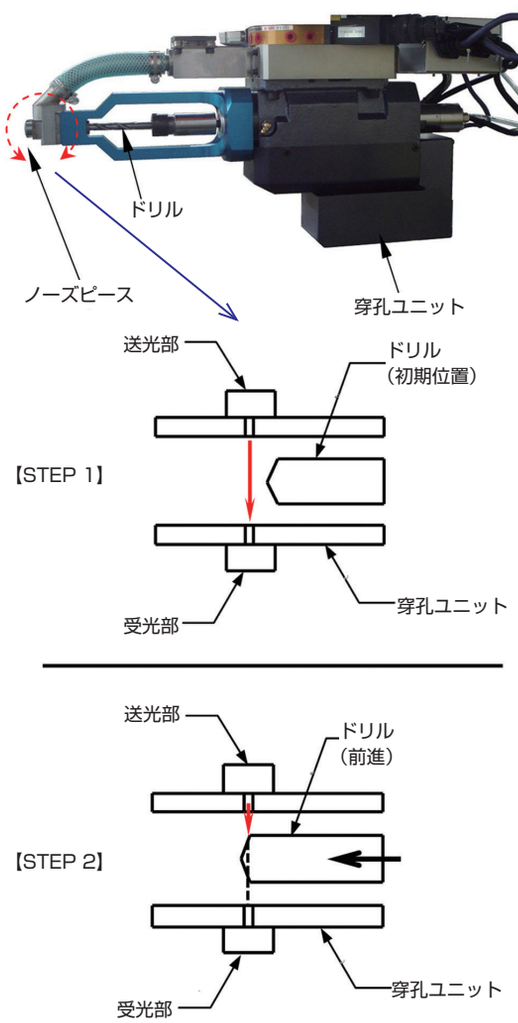


Fig. 5　Drill bit check system overview

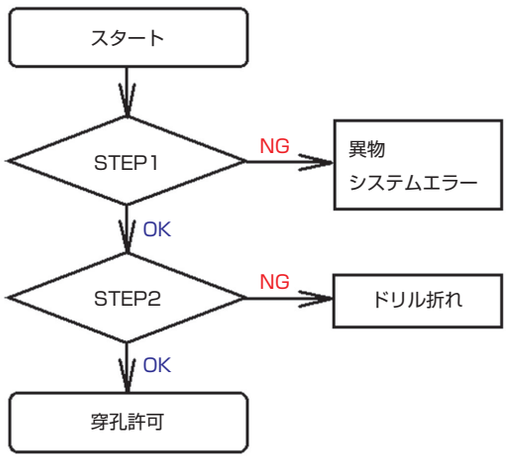


Fig. 6　Drill bit shape check flow chart

3.1.2　ドリル摩耗検知システム

ドリル摩耗による切削負荷の増加に対応して穿孔ユニットの主軸回転モータとドリル送りモータに流れる電流値が増加する。本開発では、上記各モータの動力線に電流計測センサを設け、穿孔する孔毎に各モータに流れる電流値をモニタすることで、ドリル刃先摩耗による切削力増加を推定しドリル摩耗検知する方式とした。

孔径やデラミネーション有無等の穿孔品質を満たすために超えてはならない上限電流値は穿孔実験により導き出し、本装置稼働における各モータに流れる電流の許容上限値として設定した。

穿孔毎の電流値計測結果が設定上限値に達した時点で、ドリルの寿命と判断し本装置の穿孔を中止し、ドリル交換を促すシステムとした。

Fig. 7は、本装置による自動穿孔で取得された送りモータ電流値と穿孔回数の関係を示す。穿孔回数が積み重なるにしたがい、送りモータ電流値が増加していることからドリル摩耗が進行していることが推察される。

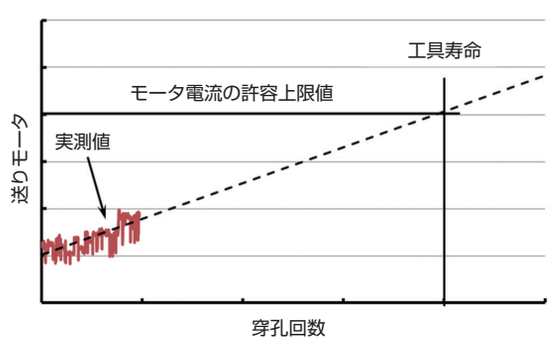


Fig. 7　Drilling load measurement result with drilling motor status monitoring system

3.2　切削粉吸塵系統

穿孔案内治具とブッシュにより形成される空間に切削粉が残置すると、穿孔時に切削粉がドリルに絡みつ

きながら回転するため穿孔する孔まわりの品質悪化やドリルの異常摩耗を引き起こす。

本装置では、工場据え付けの共用吸塵機器から付加される吸引力によって、本装置の穿孔作業により発生する切削粉をドリルとブッシュの隙間を通して除去する方式としている(Fig. 8)。

自動穿孔以外の作業を行なう工程ではその作業を容易にするために可搬式の本装置は稼働エリア外へ撤収させ、自動穿孔を行う工程のみ本装置を稼働エリアに据え付け稼働させることができる(Fig. 9)。その際、本装置と共用吸塵装置の接続・作動はオペレータの作業と確認に頼っていた。

本装置を吸塵機器へ接続した後から穿孔作業終了までの間は吸塵経路が開いたままのため、本装置が穿孔作業を行なう前後の待機状態では吸塵機器の吸引ロスとなり、他作業場の吸引力低下の要因となっていた。しかし、本装置に接続する吸塵機器は工場据え付けの共用設備であり本装置稼働の都合に合わせ吸塵機器のON/OFFをすることはできない。

そこで、下記に示す吸塵系統開閉機構と吸塵経路監視系統の二系統を合わせ持つことで、吸塵系統の信頼性向上、ドリル異常摩耗の防止、吸引ロスの低減、オペレータによるモニタを不要とした。

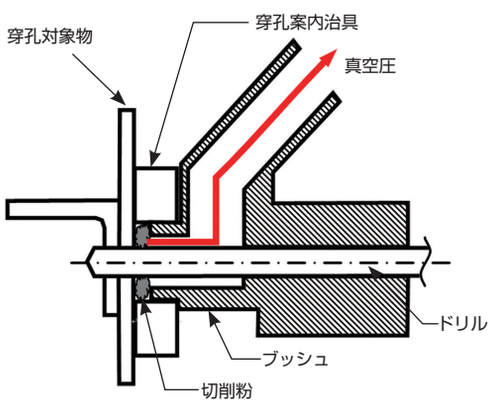


Fig. 8　Chip generation in process

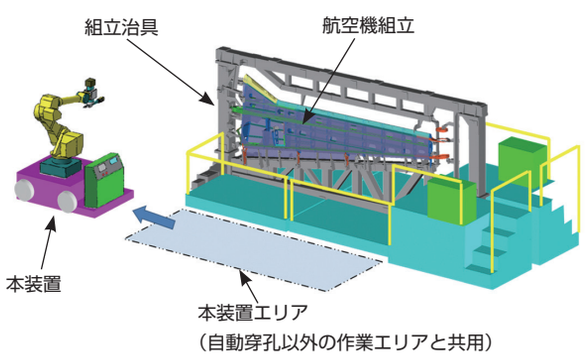


Fig. 9　Work area view

3.2.1　吸塵系統開閉機構

吸塵経路の開閉は遮へい板を用いて機械的に行う機構とし、本装置の制御機から穿孔動作と連動して吸塵経路の開閉を行う(Fig. 10)。

3.2.2　切削粉吸塵系統監視系統

切削粉吸塵系は、吸塵経路内に圧力センサにより、経路内の真空圧を監視できる方式とした。圧力センサは、切削粉の影響を受けないように吸塵経路から分岐した経路に設置し、稼働の安定性を確保した(Fig. 10)。

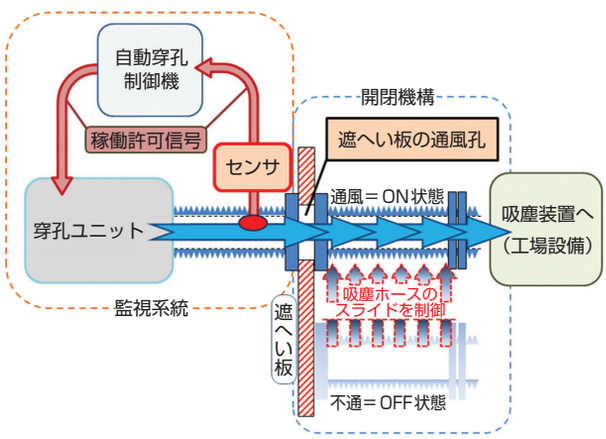


Fig. 10　Vacuum status monitoring overview

3.3　仮止めボルト固定位置判定システム

本装置による自動穿孔では、穿孔対象と穿孔案内治具を仮組み付けする(Fig. 11)。

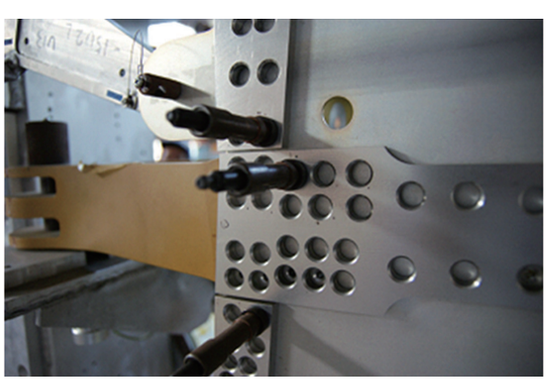
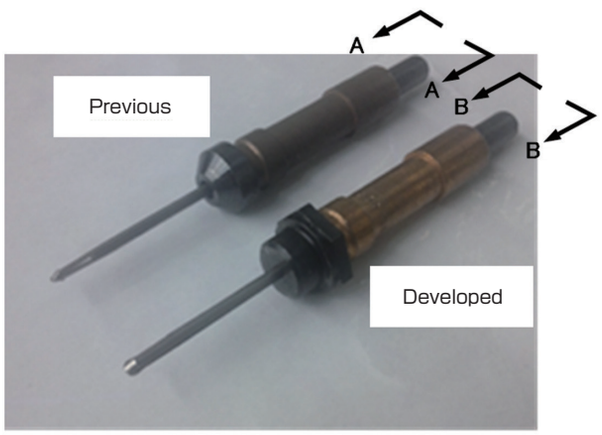


Fig. 11　Drilling plates on aircraft structure joined with temporary fasteners

このときに使用する仮止めボルトが、所定の位置にないと、装置稼働中に穿孔ユニット部と仮止めボルトが干渉し、加工物を傷める。これを防ぐにために、従来は、オペレータによる仮止めボルトの位置確認、穿孔作業中における仮止めボルトと穿孔ユニットとの干渉監視が必要であった。これらの作業を自動化すべく、仮止めボルト、およびボルト取り付け位置判定システムを新たに開発した。

3.3.1　仮止めボルト

当初の仮止めボルトは、その断面が円筒形状(Fig. 12 VIEW A-A)のため、画像認識によりボルトの位置を判定しようとすると、穿孔案内治具に設けられている穿孔ガイド孔との区別が困難であった。これを避けるため、ボルト断面を(Fig. 12 VIEW B-B)に示す形状に変更した。この形状により、仮止めボルトの確実な画像認識が可能となった。



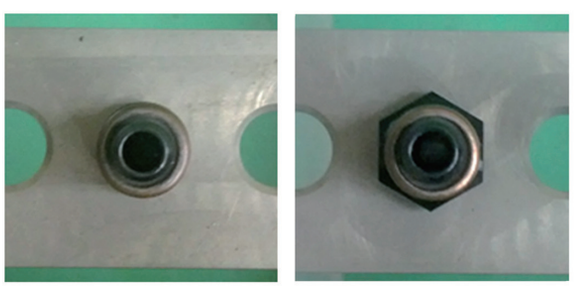


Fig. 12　Temporary fasteners for automated drilling

3.3.2　仮止めボルト取付け位置判定システム

穿孔工程の前に、仮止めボルトが所定の位置にあることを自動判定する工程を新たに設定した。仮止めボルトの位置は、新形状のボルトの画像認識により検出される。

4.　まとめ

自動穿孔装置における監視の自動化により、人の関与を最小限に抑え、穿孔システム自体の信頼性を大きく向上させた。今後は適用拡大に向け、各作業対象への最適化へとブラッシュアップを進めていく。

ここで開発した各自動化要素は、他の自動機械に対しても応用可能である。現有機械や今後導入する機械の自動化レベルや信頼性の向上に活用していく。

参考文献

(1) 高橋秀治、中畑達雄、村上孝、宮島秀明：ロボットによる自動穿孔システム、(一社) 日本航空宇宙学会第47回飛行機シンポジウム講演集CD-ROM、3H5 (2009)
(2) 小島裕登：CFRPの高能率加工技術の最前線、(一社) 日本工作機械工業会第15回国際工作機械技術者会議論文集(2012)
(3) 高橋秀治、中畑達雄、村上孝、宮島秀明、斎藤学、渡邉政雄：航空機構造組立に対応した可搬式自動穿孔装置の開発、スバル技報、No.40 (2013)
(4) 斎藤学、中畑達雄、高橋秀治、小島裕登：重ね部材への穿孔技術、(一社) 日本航空宇宙学会第48回飛行機シンポジウム講演集CD-ROM、3C6(2010年)
(5) 斎藤学、中畑達雄、高橋秀治、小島裕登、渡邉政雄：重ね部材への穿孔技術(その2)、(一社) 日本航空宇宙学会第49回飛行機シンポジウム講演集CD-ROM、3E4 (2011)

【著　者】

宮島　秀明

村上　　孝

高橋　秀治

中畑　達雄

斎藤　　学

航空機における材料開発動向

Metallic Material Development for Aerospace

足立隆史* Takafumi ADACHI　谷嶋真一* Shinichi YAJIMA　生出理子* Ayako OIDE　橋本麻由* Mayu HASHIMOTO

抄　録

本稿では、航空機に過去から現在に至るまでに使われてきた金属材料の歴史に加えて、現在注目されている将来有望な材料について紹介する。アルミリチウム合金は、純アルミよりも低密度でありながら、7000系並みの高強度を有し、航空機の軽量化に寄与している最新アルミ合金である。実用金属中最大級の比強度と耐食性を有するチタン合金は、低コスト化に関わる合金系や素材成形技術、加工プロセスの開発が進められている。マグネシウム合金は、実用金属中最も軽量であり、資源が豊富な金属である。強度、耐火性といった従来からの課題を克服すべく研究されている熊大マグネシウム合金や、更なる軽量化を目指したマグネシウムリチウム合金について紹介する。

Abstract

The history and recent trend of studies on metallic materials for airframes are presented.

Aluminum-lithium alloys show strength comparable to 7000 series aluminum alloys with lower density. Titanium alloys, which have specific strength among structural metals, have been increasingly used in airframes. Some efforts have been made to reduce the cost. Magnesium alloys, which are the lightest among structural metals, are expected to be introduced in aircraft structures because the ignitability has been proofed in recent years. The efforts to use these new materials are introduced in this paper.

1. まえがき

近年、慢性的な燃料コスト高騰によるエアラインからの航空機構造の軽量化要求は強い。ボーイング 新型機787旅客機ではこれまでの主構造材料であったアルミニウム合金よりも軽い炭素繊維強化複合材料の機体構造への適用重量比率を50%まで急増させ、軽量化による大幅な燃費改善を実現している。またその一方で、航空機の新たなユーザとしてLCC（Low-Cost Carrier）が近年躍進してきており、軽量化だけでなく、機体価格低減や高レート生産、整備／修理しやすさといった要求についてもこれまで以上に強くなってきている。

航空機分野ではこれら多様なニーズに対応すべく、様々な材料の研究開発がこれまでに増して盛んに行われている。しかしながら、航空機は確固たる安全を維持するために、新しい技術の適用については他業界以上に慎重であり、適用を実現するためには、これまでの実績及び統計的手法に基づく膨大なデータが必要である。但し、一度その技術の有効性が実証されると、その技術は非常に長きにわたって使われ続けることになる。

本稿では航空機に過去から現在に至るまでに使われてきた金属材料の歴史に加えて、現在注目されている、将来有望であるものに焦点をあてて、世界の動向及び航空宇宙カンパニーが取り組んでいる研究について紹介する。

2. 航空機に適用されてきた金属材料の流れ

1903年に初飛行したライト兄弟によるライトフライヤー号から航空機の歴史は始まる。この時の構成材料は木材が1/6、鉄鋼が1/3、布が1/6であったと言われている。その後、1907年にドイツのAlfred Wilmに

＊航空宇宙カンパニー　研究部

より時効硬化性アルミニウム合金であるジュラルミンが発明されると、急速に航空機構造材料への適用が広がった。また日本においても住友金属工業が1936年に7000系の超々ジュラルミンを開発し、第2次世界大戦時には多くの機体に適用された。比強度（密度あたりの強度）、加工性に優れるといった利点からこれらをベースとした改良合金がこれ以降長く航空機の基幹材料として適用されてきた。

米国のボーイング社（The Boeing Company）が747型機以降に開発した各機体の構成材料の変遷をFig. 1に示す。1990年代に開発された777型機まではアルミニウム合金が重量比で70%以上使われ続けてきたが、777型機では、炭素繊維複合材料の適用比率がそれまでの数%レベルから10%超まで増加している。これは、炭素繊維複合材料の適用部品が動翼などに限られていたものが、777型機では尾翼構造パッケージに拡大したためである。そして炭素繊維複合材料は、787型機ではその適用比率が50%まで増加し、アルミニウム合金にかわる主構造材料として成長していった。またそれと同時にチタニウム合金の適用比率も急増しているが、これについては4章にて詳しく述べる。

近年はまさに材料変遷期であり、様々な材料開発が行われている。以降の章ではその中で注目されているアルミリチウム合金、チタニウム合金、マグネシウム合金にスポットを当てて、それぞれの特徴や動向、研究事例について紹介する。

3. アルミリチウム合金

現在航空機に多用されているアルミニウム合金には、先述した2000系合金（超ジュラルミン）及び7000系合金（超々ジュラルミン）があげられるが、さらなる軽量化が可能なアルミニウム合金としてアルミリチウム合金が注目されている。

アルミリチウム合金は、金属中最も軽いリチウム（0.52 g/cm^3）を添加した合金で、リチウムを1 wt%添加することで剛性は6%上昇し、かつ密度は3%低下するという優れた特徴を有する。さらに密度は純アルミ（2.7 g/cm^3）よりも軽い2.5 g/cm^{3}程度でありながら、7075合金と同等以上の剛性を有した非常に魅力的な材料である。アルミリチウム合金は1920年代から開発が始まり、1950年代には米国のアルコア社（Alcoa Inc.）で第一世代と呼ばれる2020合金が開発され、米海軍偵察機第RA-5Cシリーズの主翼に適用された。その後1980年代には第二世代と呼ばれるリチウムを2～3%添加したAl-Li-Cu系の2090、Al-Li-Cu-Mg系の2091などが開発された。さらにより靱性を向上させた2195なども開発され、スペースシャトルの燃料タンクとして適用された[2]。しかしこれら第一、第二世代のアルミリチウム合金は機械特性の異方性や低い耐食性、コストの観点で課題があるなど、航空機への大規模な適用には至らなかった。このような状況の中、2000年代に第三世代となるアルミリチウム合金の開発が開始された。第一世代および第二世代のアルミリチウム合金よりもリチウムをやや減らして（2%以下）添加元素を最適化させたことにより、靭性や伸び、耐食性が向上したアルミリチウム合金が開発された。例えばアルキャン社（Rio Tinto Alcan Inc.）が開発した第三世代アルミリチウム合金2196押し出し材は、リチウム元素を1.7%含有しており、Fig. 2に示すように現有の7175押し出し材と比較して、降伏応力（Fty）、最大応力（Ftu）ともに高い特性を有しており、かつ密度は低く抑えられている材料である。さらに耐食性も向上している。この合金はエアバス社（Airbus）A380機のフロアビームに適用され、重量軽減に大きく寄与した[3]。

このように様々な特長を有したアルミリチウム合金であるが、極めて活性で水分と強い反応を起こすリチウムを高温で溶解・鋳造させる高度な製造技術が必要となるため、コストが従来のアルミニウム合金の2～4倍かかる。アルミリチウム合金を適用する際には、アルミリチウム合金適用による軽量効果と材料のコストアップ率をトレードスタディする必要がある。

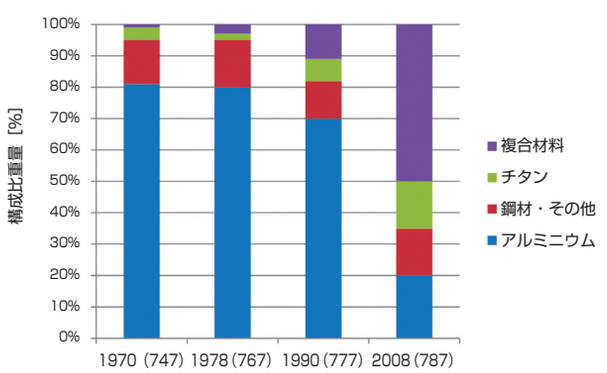


Fig. 1 Structural material change for Boeing aircraft [1]

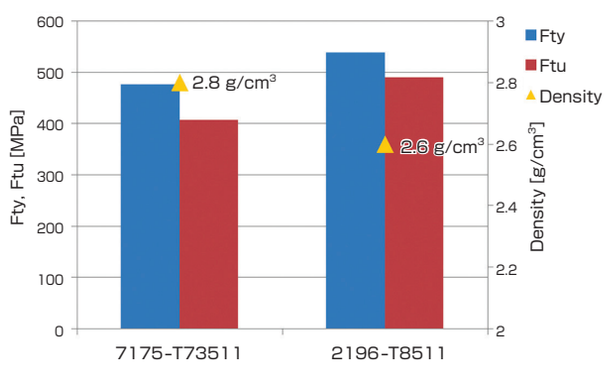


Fig. 2 Tensile properties of 7175-T73511 and 2196-T8511

4. チタン合金

チタン合金は、高張力鋼に近い引張強度(約900 MPa)を持ちながら比重はその60%程度と軽量で、その比強度は、実用となる金属中で最大級である。さらに非常に高い耐食性を示すことも特徴である。これは表面の酸化被膜が作る不動態が安定なためで、自然環境下では腐食で厚さが1 mm減少するのに要する時間は数万年間と予測されるほどである[4]。

これらの特徴を併せ持つことから、チタン合金は航空機構造用材料として魅力的な材料である。近年は特にBoeing社の787型機等の機体構造に複合材料が多く使われたことで、複合材料と接触しても局部電池腐食が発生しないチタン合金の使用量が大幅に増加した。航空機の需要は今後も順調に伸びると予想されており[5]、それに伴ってチタン合金の需要も拡大傾向と想定される。

一方で、チタン合金は価格が高いことが大きな問題である。例えば2014年3月の時点で材料1トン当たりの市中価格は溶融亜鉛メッキ鋼板が約15万円[6]であるのに対し、チタン合金は圧延加工する前のインゴットですら200万円近くに達する[7]。このため、チタン合金部品の各製造プロセスに対して多くの低コスト化の取り組みがなされてきた。近年の低コスト化に関わる合金系の開発、素材の成形技術の開発、加工プロセス開発について概説する。

4.1 合金系の開発

Table 1に低コスト化を主目的として近年開発されたチタン合金の例を示す。バナジウム等の高価な合金元素を使用しない、冷間での加工性を向上させて材料の切削加工性を向上させる等の取り組みがなされている。軽量化が要求される航空機は小さい安全余裕で設計されるため、航空機用材料には統計的に信頼性の高いデータが求められており、そのためのデータベース構築が実用化の課題となっている。

Table 1 List of low cost titanium alloys

Alloys	Characteristics
Timetal 54M	Improved machinability
Timetal LCB	Low cost alloying element
ATI 425	Cold formable
KS Ti-9	Cold formable
KS EL-F	Improved forgeability
Super-TIX523AFM	Low cost alloying element

4.2 素材成形プロセスの開発

素材の成形技術開発としては、鋳造、焼結の他、最近3Dプリンターとして知られる付加成形(AM：Additive Manufacturing)などが挙げられる。これらは、素材をニアネットシェイプ形状に成形することでチタン合金の使用量と切削加工を削減しようとする技術である。チタン合金は鉄鋼やアルミニウム合金と異なり急冷する熱処理が不要であり、これらのニアネットシェイプ成形技術への適合性が高いため、これらの技術の実用化が期待されている。また、AMによる金属の直接成形についても、現状では成形時間が掛かるため試作品の製造にとどまっているが、今後積層速度が向上すれば実用化が期待される技術である。

4.3 部品加工プロセスの開発

部品加工プロセスとしては、近年は切削加工技術の改善が活発になされている。チタン合金部品はそのほとんどが鍛造あるいは厚板からの切削加工品であるため、切削加工技術の向上は直接的な低コスト化効果が期待できる。近年、各工作機械メーカーからチタン合金加工に適した高剛性で回転軸を通して刃先に直接高圧の切削液を供給可能なチタン合金向けの切削加工機が多く上市されている。また、切削加工中の刃先の温度や応力、切削抵抗等のシミュレーション技術により、適切な切削条件の設定が効率的に行える様になってきている(Fig. 3)。また、経済産業省の他、大学や富士重工業を含む国内外の航空機メーカーなどが共同で発足させ、東京大学生産技術研究所に設置されたCMI(Consortium for Manufacturing Innovation)においてもチタン合金の切削加工技術の効率化が主要テーマとして取り組みが進められている[8]。

チタン合金部品の低コスト化が実現できれば、今後の航空機製造における競争力が大きく向上できるチャンスである。富士重工業では、素材成形プロセスとしてチタン合金の焼結技術の開発を進めている他、切削加工プロセスの改善にも継続的に取り組んでいる。

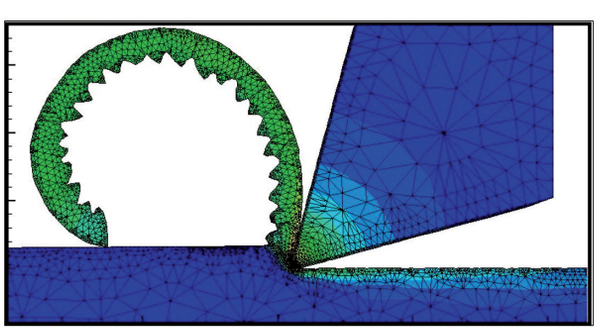


Fig. 3 Simulation result of temperature around cutting tool for machining of titanium alloy

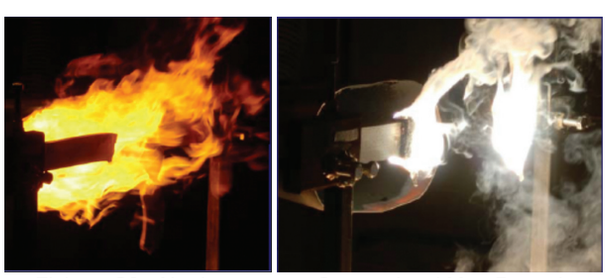
5. マグネシウム合金

マグネシウムは、密度が鉄の1/4、アルミニウムの2/3と実用金属中最も軽量であり、地球上に存在する量が多く資源が豊富な金属である。また、人体・環境にやさしく、リサイクル性にも優れた材料である。このような特徴を持つマグネシウム合金は、輸送機器の軽量化材料として注目されており、特に軽量化が強く求められる航空機においては非常に有望な材料である。1950年代頃、マグネシウム合金は航空機の主要構造部材に適用されており、例えばConvair社（The Consolidated Vultee Aircraft Corporation）のB36の胴体やLockheed社（Lockheed Corporation）のF-80Cの全機に適用されていた[9]。しかし、強度や耐食性の問題から、徐々に適用されなくなり、現在はヘリコプターのエンジンケースなどに使われるのみで、構造材としては適用されていない。また、マグネシウム合金は可燃性が高いことから、FAA（米国連邦航空局）により航空機機内での使用が禁止されている。

強度、耐食性の課題に対しては多数の研究が行われており、例えば英国のMEL社（Magnesium Elektron）において、降伏強度が既存アルミニウム合金と同等レベル（310 MPa）のElektron 675や、耐食性がアルミニウム合金鋳物と同等のElektron 21が開発されている。

耐火性については、1990年代後半に、日本の独立行政法人 産業技術総合研究所においてカルシウム添加による発火温度の上昇が見いだされ、その後英国や韓国において耐火性を向上した材料が開発された（Fig. 4）。これらの材料が開発されたことにより、前述のFAAの使用禁止項目について、近々耐火基準をクリアした材料に限定し機内での使用が認められる予定である。

マグネシウム合金は、航空機や自動車の軽量化材料として期待されており、各国で適用を検討したプロジェクトが行われている。例えば、航空機胴体の35%軽量化を目指した「AeroMAG」プロジェクト（欧州）や、2020年に自動車へのMg合金の使用量を約100 kgとすることを目標にした「マグネ性駆動系鋳造部材プロジェクト」（米国）が挙げられる。



Elektron21：Not burn　Conventional Mg：Burned

Fig. 4　FAA preliminary Mg burning characteristics [10]

日本においても平成25年度から27年度に、「次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発プロジェクト」（財団法人 素形材センター）において、航空機構造部材へのマグネシウム合金の適用を目指した開発が行われており、富士重工業も三菱重工業株式会社、国立大学法人 熊本大学、独立行政法人 宇宙航空研究開発機構とともにこのプロジェクトに参画している。

本プロジェクトで適用する熊大マグネシウム合金は、平成15年度から19年度に同プロジェクトで開発された合金で、Fig. 5に示すように、航空機の構造部材に適用されている7000系アルミニウム合金と同等以上の強度・耐食性を持つ材料である。また、耐火性についても前述のFAAの耐火基準を容易にクリアしており[11]、航空機構造材料として適用し機体の軽量化に貢献するポテンシャルを有している。

本プロジェクトでは、上記マグネシウム合金の大型化と量産化を目標に、量産化に向けた低コストな製造プロセス開発と、軽量低コストな組立プロセスとして摩擦撹拌接合（FSW）のプロセス開発を行っている。平成25年度は前プロジェクトに比べて高い押出速度での製造が可能であること、および上記マグネシウム合金のFSWが可能であることを確認した。

マグネシウム合金には、リチウムを添加し更なる軽量化を実現したマグネシウムリチウム合金がある。マグネシウムリチウム合金は、密度が787型機に軽量材として適用されている炭素繊維強化複合材料より軽量な材料であり、そのため比曲げ剛性（単位重量当たりの曲げ剛性）が高く、複合材料を上回る軽量化を得られる可能性を有している。

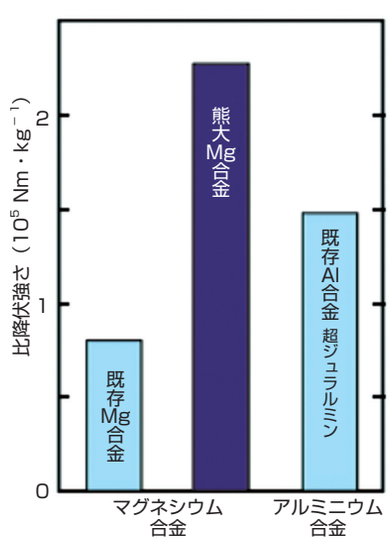


Fig. 5　Specific yield strength of Mg alloy and Al alloy [12]

マグネシウムリチウム合金はNASA（National Aeronautics and Space Administration）を中心に開発された材料で、大幅な軽量化が可能な材料として注目されたが、強度・耐食性が従来のマグネシウム合金より劣ることから適用には至らなかった。しかし近年、強度が6000系アルミニウム合と同程度、耐食性が既存のマグネシウム合金と同等の特性を持つマグネシウムリチウム合金が開発され、パソコンの筐体として実用化されるまでとなった。今後、更なる強度・耐食性の向上により、航空宇宙機機構造材料としての適用が期待できる。

上記プロジェクトにおいて、マグネシウムリチウム合金の航空機構造材料への適用に向けた合金開発・プロセス開発も合わせて行っており、平成25年度は、従来材に比較して25%強度向上した材料を得ることができた（Fig. 6）。

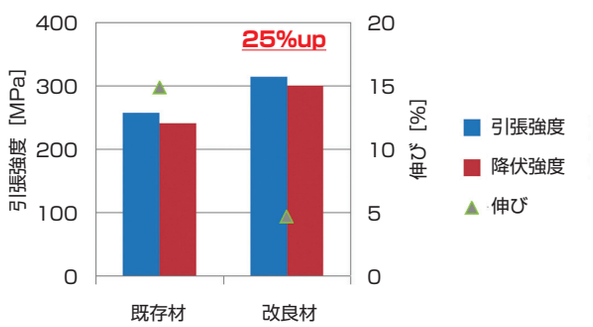


Fig. 6　Tensile properties of development Mg-Li alloy

参考文献

(1) 山崎文徳：アメリカ民間航空機産業における航空機技術の新たな展開－1970年代以降のコスト制御要求と機体メーカーの開発・製造－、立命館経営学、第48巻第6号(2009)、p.217-244
(2) 中村俊哉：航空機の構造材料技術における最近の開発動向、軽金属、第62巻 第6号(2012)
(3) (公財) 航空機国際共同開発促進基金：航空機に於けるアルミリチウム合金の開発動向
(4) 中村有夫ほか：TRU廃棄物地層処分におけるC－14 の長期閉じ込め型パッケージの開発 その2 チタン合金を用いた金属容器、原子力バックエンド研究 Vol.15（2008）、p.13-26
(5) (一財) 日本航空機開発協会：民間航空機に関する市場予測　2013-2032, (2013)
(6) 日刊鉄鋼新聞：鉄鋼・非鉄市中相場詳細、http://www.japanmetaldaily.com/market/details/index.php#this_market
(7) "Free Titanium Price Charts", MetalPrices.com, http://www.metalprices.com/p/TitaniumFreeChart
(8) 帯川利之：CMIの技術開発、第1回 CMIシンポジウム、2013
(9) I.Ostrovsky：Present State and Future of Magnesium Application in Aerospace Industry、International Conference "New Challenges in Aeronautics" ASTEC' 07（2007）
(10) Bruce Gwynne：Magnesium Alloys in Aerospace Applications, Past Concerns, Current Solutions、Triennial International Aircraft Fire & Cabin Safety Research Conference (2007)
(11) 熊本大学：KUMADAIマグネシウム合金がFAAで策定中の燃焼試験に合格！～航空機への応用に大きな弾み～、熊本大学プレスリリース、平成25年4月18日発表
(12) 熊本県ほか：次世代耐熱マグネシウム合金の基盤技術開発、独立行政法人化学技術振興機構 地域イノベーション創出総合支援事業 熊本県地域終結型研究開発プログラム資料(2009)

【著　者】

足立　隆史

谷嶋　真一

生出　理子

橋本　麻由

航空機用 CFRP 製燃料タンク内の静電気解析手法の開発

Development of Electrostatic Analysis Method for CFRP Aircraft Fuel Tank

藤　澤　　浩*　　西　　孝裕樹*　　津　端　裕　之*
Hiroshi FUJISAWA　　Takayuki NISHI　　Hiroyuki TSUBATA

抄　録

航空機用CFRP製燃料タンク内の静電気の挙動を解析する手法を開発した。

近年の航空機は軽量化のために構造の多くにCFRPが採用されつつある。その結果燃料タンクもCFRP製となるが、CFRPは金属材料に比べ電気的特性が複雑であり設計段階では帯電特性や効果的な帯電防止性能の評価が行えず、燃料タンク内の静電気放電に対する安全性確保に多大なコストを要している。

当社は航空機の複雑な燃料タンク構成においても静電気の挙動を数値解析できるシミュレーション技術と燃料の帯電と除電を再現する実験手法を開発している。

本稿では開発中のシミュレーション方法と実験方法を紹介する。

Abstract

We have developed a method to analyze the behavior of static electricity of CFRP aircraft fuel tank. For the purpose of weight reduction, aircrafts in recent years have shown the trends of adopting CFRP to most structures including fuel tanks. Since CFRP is composed of insulated material, explosion could be caused by static electricity. This issue should be solved, but anti-static performance and effective charging characteristics could not be evaluated during design phase due to its complexity. Aircraft manufacturers have spent a great deal of cost to ensure the safety against static electricity.

This paper introduces developed test method and simulation method under development.

1．まえがき

当社が開発、製造に参画している米ボーイング社の新型旅客機である787では主要構造の多くにCFRPを採用し、大幅な軽量化を達成した。当社が担当している中央翼（主翼－胴体の結合部）もCFRP製のパネルと前後の桁をボルト／ナットで結合したFig. 1のように複雑な箱型の構造であり、燃料タンクとして使われている。

長距離を飛行する必要のある航空機の燃料タンクは非常に大きく、10万リットルを超える燃料はインテグラル・タンクと呼ばれる主翼構造を利用した燃料タンクに収められている。この大量の燃料を着陸から次の離陸までのわずかな時間で給油するために燃料に圧力をかけて高速で給油するが、この際、燃料に静電気が帯電するリスクがあることが報告されている[2][3]。給油時の様子をFig. 2に示す。

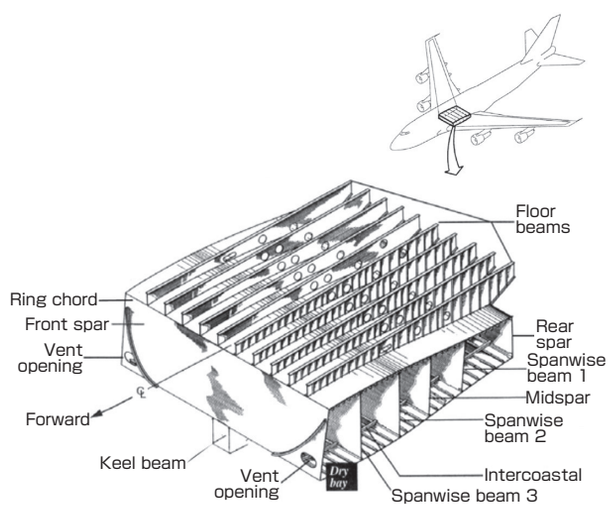


Fig. 1　Example of center wing tank structure [1]

＊ 航空宇宙カンパニー　システム設計部

Fig. 2　Aircraft refueling [4]

航空機の静電気防止規定(米国連邦航空法14CFR §25.899) 及び燃料タンクの防爆規定(同 §25.981) では静電気放電で可燃性蒸気が引火しないことを要求している。CFRPの電気特性は金属とは違い複雑であり、航空機のように巨大なCFRP構造おける静電気の挙動を解析する手法に未だ世界標準はない。各国の航空機メーカーは規定を順守するために膨大な量の試験を通して安全性を証明しているが、このことはコストと開発期間の増加に繋がり、各国の航空機メーカーを悩ませている。そのため、当社では平成22年度より燃料タンク内での静電気分布のシミュレーション技術や燃料の帯電／除電の実験方法の開発を開始した。

2.　シミュレーション手法

2.1　シミュレーション方法

給油時に配管に燃料を流すと配管と燃料の間で電荷分離が起こり、一方極性の電荷が過多となり燃料は帯電する。多大に帯電した燃料がタンク内に入ると静電気放電を起こすことがあり、このとき放電したエネルギーが燃料蒸気の着火エネルギーより大きいと引火し、爆発する。

もし、燃料タンク内の電荷の挙動をシミュレーションしてその分布を求めることができれば、静電気放電の危険性を評価することができる。

燃料タンク中の電荷の挙動は燃料の対流がない準静的状態を考えると、マクスウェルの方程式から導かれる電荷保存の式及びポアソン方程式の2つの式により求めることができる。

・電荷保存の式

$$\frac{d\rho_i}{dt} + \nabla(-D\nabla\rho_i + \mu E\rho_i) = 0 \quad \cdots\cdots (1)$$

ただし、ρ_i：電荷密度、D：拡散係数、
μ：移動度、　E：電界強度

・ポアソン方程式

$$\nabla E = \frac{\rho_i}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

ただし、ε_r：媒質の比誘電率、ε_0：真空の誘電率

2.2　シミュレーションモデル

シミュレーション手法の有効性を検証するために航空機の燃料タンクを簡易化したモデルにて帯電電荷の除電特性と電荷分布を解析し、実証実験と比較した。シミュレーションに使用したモデルは実際の航空機の燃料タンクと同様の箱型構造であるが、実験用の供試体と比較するために大きさは300 * 300 * 200 mmとした。シミュレーションモデルをFig. 3に示す。

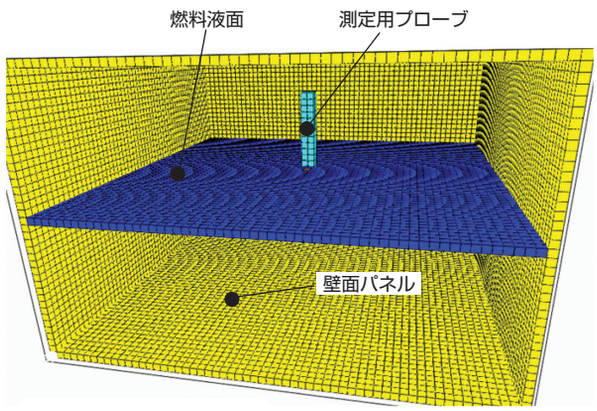


Fig. 3　Simulation model of simplified fuel tank

Fig. 3に示したように外側の黄色のセルは燃料タンクの壁面に相当するパネル、中央の青のセルは航空機燃料の液面、水色の角柱は表面電位測定用プローブを表している。パネル外側の空間は解析空間の境界で、ここでは電界が0になるように計算することで境界が接地電位となり、パネルを通じて接地電位に達した電荷が除電される。なお、シミュレーションモデルの計算領域は一片が5 mmの立方体で区切り実施した。

2.3　シミュレーション結果

初期条件として燃料中に電荷を一様に分布させた状態からシミュレーションを開始した。Fig. 4、Fig. 5にシミュレーション結果を示す。

Fig. 4はシミュレーションモデルに示したプローブで計測している液面上中央部分である。シミュレーション開始直後に急激に電位が下がり、そのあと緩やかに電荷が除電していく様子がわかる。

Fig. 5は液面上の電位分布であり、(a) では山のような形の分布となっている。これは、境界を電位ゼロとして解いたためであるので,境界から最も離れた液

面の中心の電位が最も高い。また、(b) から (c) に時間が経過するにつれて電荷が壁面を通じて除電した結果、全体の電位が下がっている。

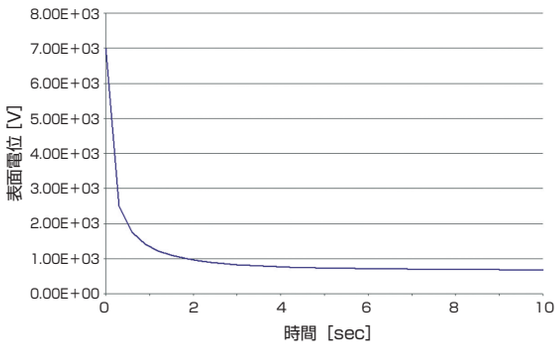


Fig. 4　Electrical potential at center of fuel surface

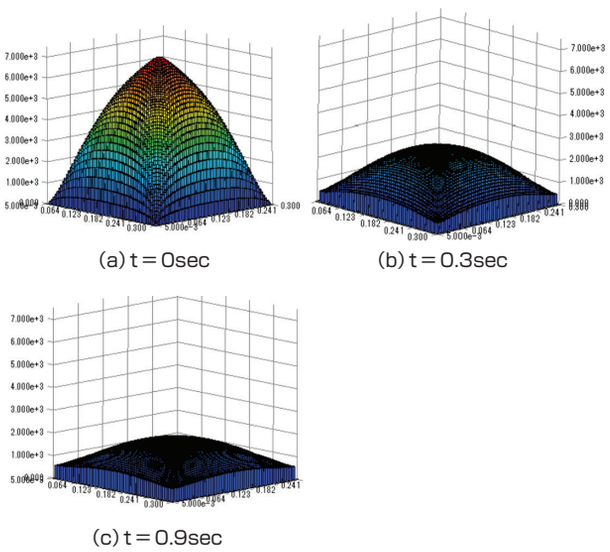


Fig. 5　Electrical potential distribution at fuel surface

3.　実験

3.1　実験方法

シミュレーションの妥当性を確認するため、供試体を製造し実証実験を行った。実験系の概要図を Fig. 6 に示す[(5)]。

実証実験はコロナ放電により電荷を降り注ぐことによって供試体に入れた試料を帯電させ、接地したフレームから電荷が除電する様子を表面電位計と吸引式ファラデーカップを用いて計測する。

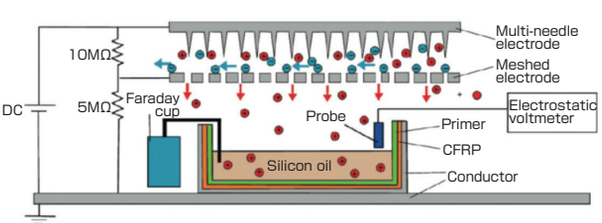


Fig. 6　Experiment setup conditions outline [(5)]

試料は解析対象である航空機燃料を用いる事が好ましいが、航空機燃料は実験室内での取り扱いに危険が伴う。そのために航空機燃料と導電率が近いシリコンオイルを試料として用いた。

コロナ放電は針電極に直流高圧電源をつなげ、針の先端から放電を発生させる。コロナ放電で発生した正・負両極性の電荷は中間のパンチングメッシュを通ることで負極性の電荷が除去されて正極性の電荷のみが試料に降り注ぐ。

試料が充分帯電した後にコロナ放電を止め、試料の帯電量を吸引式ファラデーカップにて計測し、その値を電荷密度の初期値とした。また、試料の液面上を表面電位計にて計測し、除電していく過程を観察した (Fig. 7)。

Fig. 7　Experiment setup conditions

3.2　供試体

供試体はシミュレーションモデルと比較検討できるよう同じ形状に設計・製造を行った。Fig. 8 に製作した供試体の図を示す。

供試体は航空機用CFRP製のパネルと金属フレームで構成される。パネルとフレームは組み立て用ボルトを用いて結合していて、すべてのパネルとフレームが電気的に導通するよう考慮した。

また、シミュレーションをより正確に行うため、事前にパネルの体積抵抗及び表面抵抗を測定し、シミュレーションモデルのパラメータに使用した。

3.3　結果

実験時の表面電位の測定結果とシミュレーション結果を比較した一例を Fig. 9 に示す。

実験において試料が充分に帯電し、コロナ放電を停止した時点の時間を0として計測を開始した。

シミュレーションにおいては実験時に吸引式ファラデーカップで計測した電荷を初期値として使用し解析

した。なお、時間が負の領域は実験時にコロナ放電を行っている時間であるため、シミュレーションでは省略した。

シミュレーションと実験のどちらの表面電位も指数関数的に減少しており、よく一致していることがわかる。

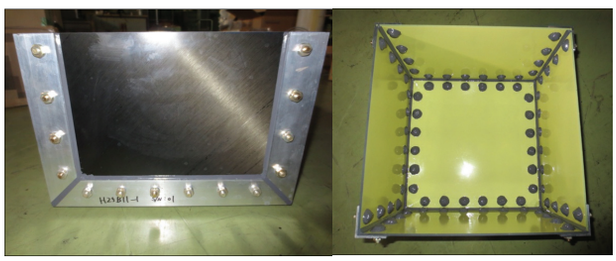


Fig. 8　Simplified fuel tank model

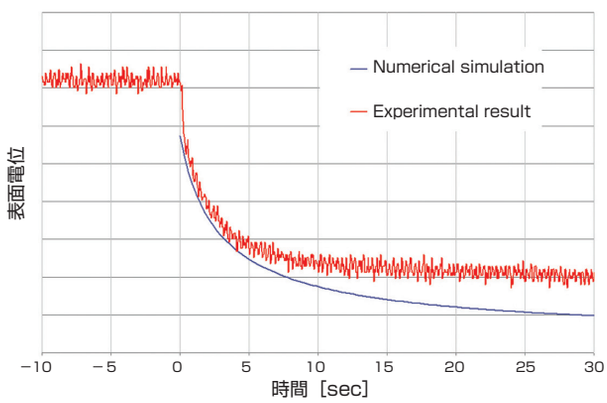


Fig. 9　Comparison between numerical similation and experimental result

4.　まとめ

航空機用燃料タンクの防爆設計を効率的に行うために静電気挙動のシミュレーション技術の開発と実証実験を行った。

・シミュレーションは実験と比較して定性的な傾向が一致することを確認した。
・開発した実験手法では再現性のある実験が可能で、試料に任意の量の帯電量を与えることができた。

上記の成果より、シミュレーション手法の妥当性が確認でき、本シミュレーション手法が静電気防爆設計に適用できる見通しを得た。平成26年度は今年度に得た成果を活用し燃料タンク全体のシミュレーションの実施と実証を行う計画である。

謝辞

本研究開発は平成22年度から経済産業省より受託している「航空機用先進システム基盤技術開発(耐雷・帯電特性解析技術開発)」の一環として実施したものである。経済産業省及び技術委員会の方々のご指導・ご協力に心より感謝の意を表します。

また、シミュレーション技術及び実験手法の開発に当たり東京大学日高邦彦教授と熊田亜紀子准教授より貴重なご意見を頂きました。また、東京大学の後藤氏には実験の実施に際し、多大なるご尽力を頂きました。この場を借りて感謝の意を表します。

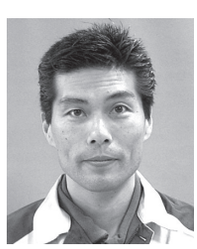
参考文献

(1) National Transportation Safety Board Aircraft Accident Report PB2000-910403 NTSB/AAR-00/03 DCA96MA070
(2) James E. Johnson , “Investigation of Electrostatic Charge in Hose Lines,” INTERIM REPORT, TFLRF No. 384 (2006)
(3) J.E. Leonard , “Generation of Electrostatic Charge in Fuel Handling Systems,” NRL REPORT, 8484 (1981)
(4) 三愛石油、航空燃料取扱い事業について、https://www.san-ai-oil.co.jp/biz/aviation/about/ (2014-3-1)
(5) 後藤隼紀、CFRPを用いた航空機模擬燃料タンクの帯電電荷の緩和、平成26年電気学会全国大会論文集、(2014)

【著　者】

藤澤　　浩

西　孝裕樹



津端　裕之

プリプレグ積層精度計測技術

Measurement Technology for Laying Prepreg Accuracy

安　陪　彰　児*
Shoji ABE

抄　録

近年の航空機におけるCFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics）適用率の増加に伴い、プリプレグ（炭素繊維に熱硬化性樹脂を含浸させたシート状の成形材料）の積層作業、及び積層精度検査の自動化が急速に進められている。

自動積層工程においては、主にプリプレグ・テープ材が使用され、隣り合う各プリプレグは一定の距離を保ち、且つ重なりが無いよう、設計上定められている。作業効率化、機械稼働率向上のために積層と同時に計測･判定ができる自動計測技術の確立が必要となった。

複数の計測方式を比較検証した結果、光学カメラとラインレーザーを用いた計測方式を採用し、高さ変位センサとそれに連動するラインレーザーの位置決めと出力調整を組み合わせることで、連続的に変化する積層面に追従し、高速、高精度な計測・判定が可能となり、本研究で得られた成果を自動積層機に実装するに至った。

Abstract

Recently, with the increase in CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) application rate for aircraft, automation of laying prepreg (sheet material impregnated with thermosetting resin to carbon fiber) and accuracy inspection is pushed forward rapidly.

Automatic laying is regulated by design specifications to keep constant distance between adjacent prepregs and prevent overlap. It is necessary to establish an automatic measurement technology which allows for measurement and determination at the same time for improving work efficiency and machine utilization rate.

As a result of comparison and verification of multiple methods by adopting a measuring system using line laser and optical camera and combining height displacement sensor, output adjustment and interlocking positioning line laser, continuously changing laying surface is followed and high speed and high accuracy measurement and judgment are made possible. The results obtained through this study was implemented in automatic laying machines.

1. まえがき

航空機部品に使用される複合材パネルは、成形型上にプリプレグを定められた方向に複数枚、積層し、加熱硬化させたものである。

自動積層作業は、通常、12インチ（約300 mm）幅、または6インチ（約150 mm）幅のロール状プリプレグを自動積層機にセットし、成形型上をNC制御にて積層ローラーで押しつけながら積層することにより、設計通りの複合材パネルを製造する作業である。近年では、積層作業の自動化が急速に進められており、作業効率、機械稼働率向上のために積層と同時に積層位置の計測・判定ができる自動計測技術の確立が急務となった。

本稿は、プリプレグ積層精度の自動計測における技術的課題、複数の計測方式の比較検証及びその結果を踏まえた自動積層機への実装に至った過程についての報告である。

＊ 航空宇宙カンパニー 生産技術部

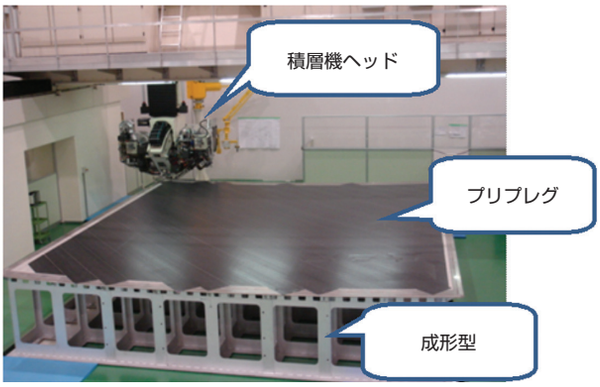


Fig. 1　Automatic prepreg laying

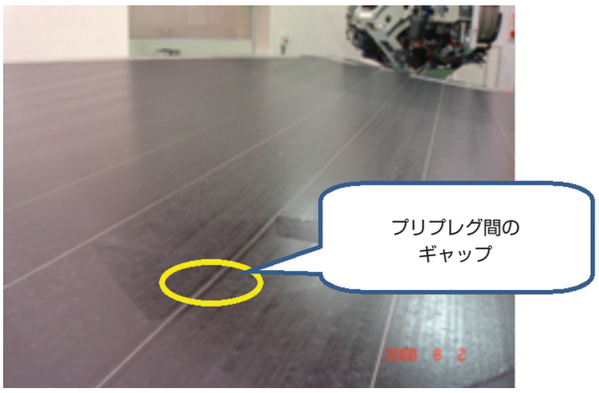


Fig. 2　Gap between prepregs

2.　プリプレグ積層精度計測の概要

成形型上に積層されたプリプレグの間隔は、パネル強度を得るため、重なりがなく、設計上定められた一定の距離以内であることが必要である。

プリプレグの間隔(ギャップ)と重なり(ラップ)の有無は、積層される全プリプレグの全長に渡り、検査対象である。例えば、3 m × 3 m × 50層の複合材パネルを12インチ(約300 mm)幅プリプレグで製作する場合、1層に10枚のプリプレグを貼ることになり、計測する場所は9列となる。その1列を100 mmピッチで検査すると、1列当たり30ヶ所となり、単純計算で13,500ヶ所(9列／層 × 30ヶ所／列 × 50層)の検査が必要である。自動積層において、積層精度検査を最も効率的に、かつ確実に実施するためには、積層と同時に実施すること、すなわち積層ローラーのすぐ近くに計測機器を取り付けることが理想である。

Fig. 1は自動積層機の外観、Fig. 2はプリプレグを積層した時のプリプレグ間のギャップを示したものである。

3.　積層精度計測の課題

自動積層精度計測においては、以下の課題を解決しなければならない。

(1) 材料、製品への配慮

材料となるプリプレグは、製造過程から積層に至るまで、温湿度管理されている。また、それを扱う加工室においても、浮遊塵埃量が定められており、且つプリプレグに接触できる材質も、細かく制限、規制されている。このように、製造環境による品質影響を受けやすい材料であること、及び材料の損傷、及び異物混入を防止するため、計測方式は非接触計測を前提条件とした。

(2) プリプレグ材の特性

計測するプリプレグの隙間下には、同色(黒)のプリプレグ材が積層されており、色識別、濃淡の区別が非常に困難であるため、プリプレグの端部(エッジ)の検出が容易でない。また、プリプレグの表面は、炭素繊維により微小な凹凸形状となっており、含浸された樹脂により光沢を持っている。その点についても、計測結果に影響を与えないか、十分な対策が必要である。

(3) 自動積層機の取付けスペース

計測機器の取付け場所である自動積層機の積層ローラー付近には、本来の積層機構である様々な付属機器が多く装備されており、それらの動作を妨げることのないシンプル、かつコンパクトであることが必要である。

(4) 計測器と計測対象との距離、角度変化

自動積層における積層面は通常、複曲面となっており、曲面上にはいくつかの凹凸が形成されている。すなわち、積層面のギャップ(ラップ)を計測する上で、計測器と計測対象の位置関係(距離、角度)は、常に変化することになる。この位置関係の変化に対応できなければならない。

(5) 自動積層機の振動

自動積層時には、積層面形状に合わせて、積層機の走行速度が変化し、加速、減速、停止を繰り返し行うため、計測器の耐振動性についても、十分な対策が必要である。

4.　計測方式の比較検証

前述の課題に対応できると思われる計測方式は次の3つである。

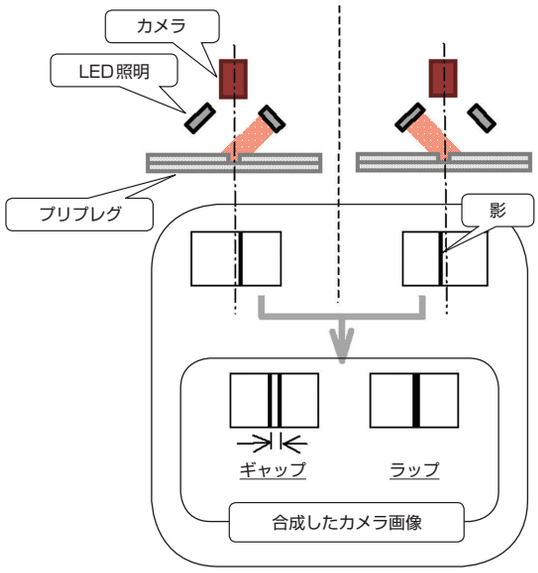


Fig. 3-1　Camera and lighting system

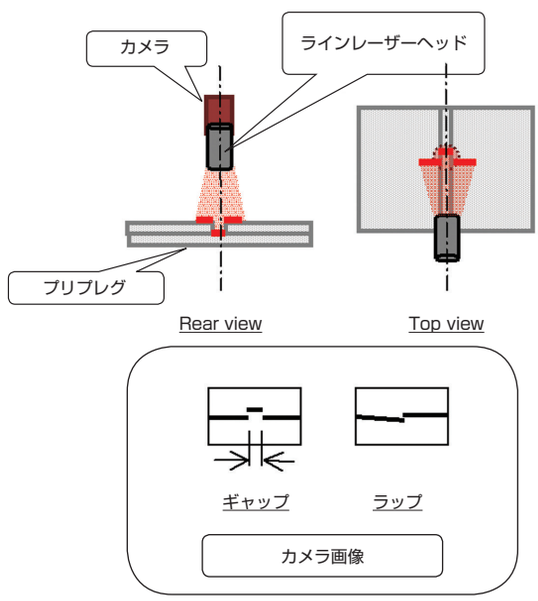


Fig. 3-2　Camera and laser system

(1)〔カメラ＋LED照明〕方式(A方式)

本方式は、1つのギャップ(ラップ)に対し、左右片方ずつ斜め上方より照明をあて、それぞれのエッジの影をカメラで撮影するものである。ギャップ量は、左右それぞれの画像を合成して計算される2本の影の距離である。ラップの判定は、影が1本の場合、あるいは2本の影が重なった場合である(Fig. 3-1 参照)。

(2)〔カメラ＋ラインレーザー〕方式(B方式)

本方式は、ギャップ(ラップ)に対し、積層方向後方、斜め上方より照射されたレーザー光を真上からカメラで映し出すことで、ギャップ(ラップ)の段差により、変化したレーザー光形状を画像処理するものである(Fig. 3-2参照)。

(3)2次元レーザー変位センサ方式(C方式)

本方式は、ギャップ(ラップ)の上方に、2次元レーザー変位センサを配置し、一定範囲内の高さ変化を検出することにより、ギャップ量の算出、ラップの判定を行うものである(Fig. 3-3参照)。

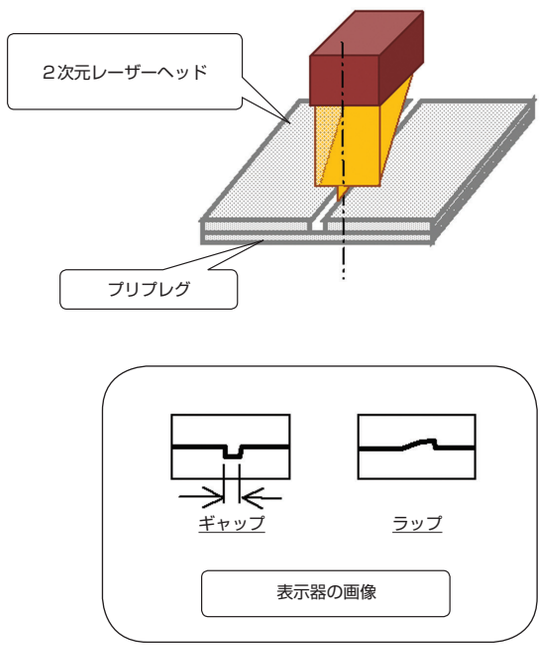


Fig. 3-3　2D laser system

以下は、各方式を比較検証した過程、及び結果である。

4.1　自動積層機への計測機器取付けの検証

計測機器は、12インチ幅プリプレグの両端(左右)と6インチ幅の両端(左右)の合計4式装備することになる。

カメラを使用したA、Bの2方式においては、積層機ヘッドに干渉することなく取付けが可能である。しかし、C方式においては、市販のものでは、センサヘッドが大きく自動積層機のヘッド内に収まらず、積層機の改造が必要である。Fig. 4は、各計測方式の取付け状態を示したものである。

4.2　計測条件変化への対応、耐振動に関する比較

C方式による計測は、積層面に照射されたレーザーの中央を基準にし、左右のプリプレグ厚さ分の段差を検出し、ギャップ量を算出するものである。すなわち、プリプレグ間のギャップの中心線は、常に照射されたレーザーのほぼ中心になくてはいけないことになる。自動積層においては、プリプレグの伸縮、プリプレグロールの巻取り精度、積層機の積層精度、振動などによる横方向の変化があるため注意が必要である。

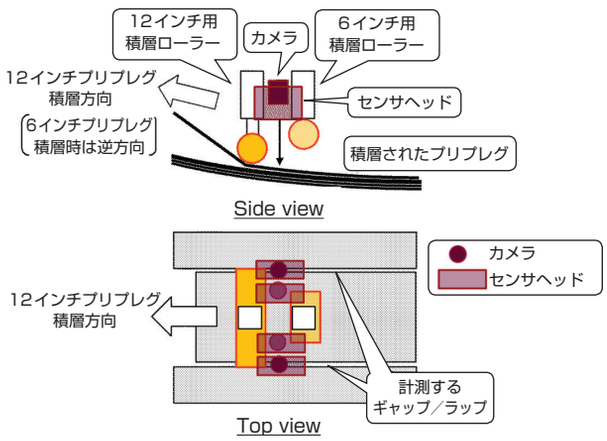


Fig. 4　Installation of measuring system

Fig. 5は、C方式によるギャップ検出時の波形である。異常波形1は、横方向変化により、計測できない箇所が発生する例である。

また、プリプレグの表面は、炭素繊維による微小な凹凸があり、Fig. 5のように計測波形にも高さ変化として現れている。ここに積層時の振動が加わると波形はさらに乱れ、異常波形2のように正しいプリプレグのエッジが検出できない。

以上のように、C方式計測は、積層機の振動や、プリプレグの表面状態など、微小で急激な変化が、計測精度に影響を与えてしまうことがある。

一方、カメラを使用するA、B方式の場合、ギャップ(ラップ)を平面で捉えることができ、プリプレグが持つ表面の凹凸に影響されない滑らかな波形が現れる。

A方式は、左右の照明を同時に使用できないため、積層機走行時においては、それぞれの撮影点がずれ、真のギャップ(ラップ)を計測することはできない。また、走行時に生じた振動による照明機器やカメラの揺れなどにより、ギャップ(ラップ)の影がずれ、十分な計測精度の確保が困難である。より正確に計測するには、走行を停止しなければならない。

B方式は、積層機走行時の振動を受けても、ラインレーザーによって作られるレーザー光の位置が変化するだけでギャップ(ラップ)によるレーザー形状は変化しない。カメラも撮影範囲からレーザー光が外れるほど位置が変化しないため支障なく画像を取り込み処理できる。

読み取れる最少ギャップ量については、A方式ではそれぞれの影幅の和ということになり、B、C方式に比べて大きくなる。

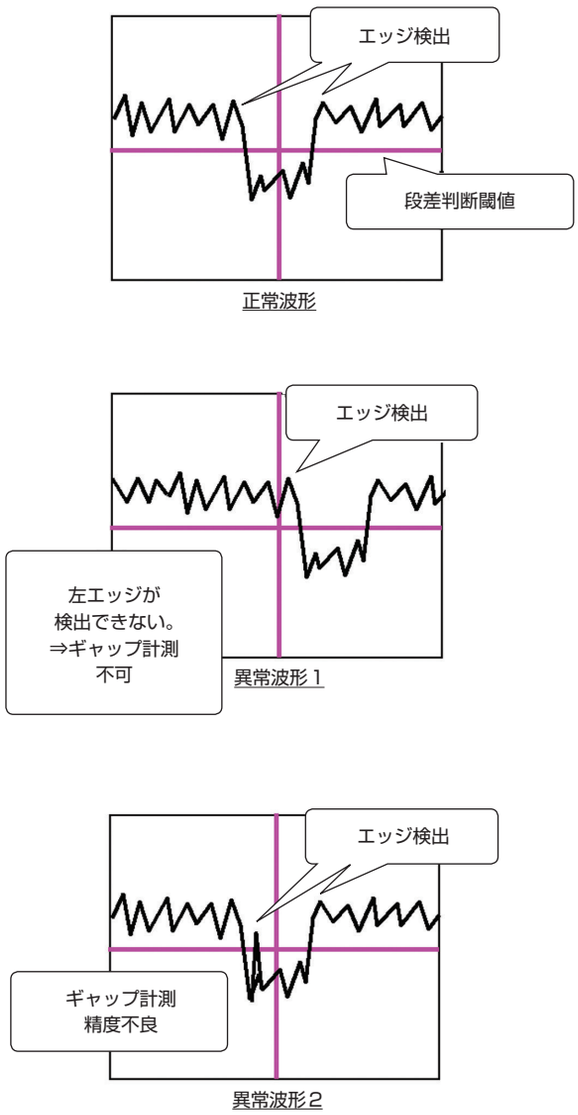


Fig. 5　Waveform of 2D laser

4.3　比較検証結果

Table 1は、前述までの検証による各計測方式の比較表である。結果、B:〔カメラ＋ラインレーザー〕方式が最も有利である。

5.　自動積層機への実装

検証した3方式のうち、自動積層機への取付け、計測精度、計測速度などで最も有利である〔カメラ＋ラインレーザー〕方式の計測装置を自動積層機へ実装することとした。

Fig. 6は、〔カメラ＋ラインレーザー〕方式計測装置の自動積層機への(12インチ用)機器取付け概要図である。

Table 1　Comparison of measurement methods

○：他方式に比べ、有利
△：他方式に比べ、不利

	A 方式	B 方式	C 方式
	〔カメラ+LED照明〕方式	〔カメラ+ラインレーザー〕方式	2次元レーザー変位センサ方式
積層機への取付け	○	○	△
プリプレグ表面による計測への影響	○	○	△
耐振動性	△	○	△
計測速度	△	○	○
最少ギャップ読取り	△	○	○

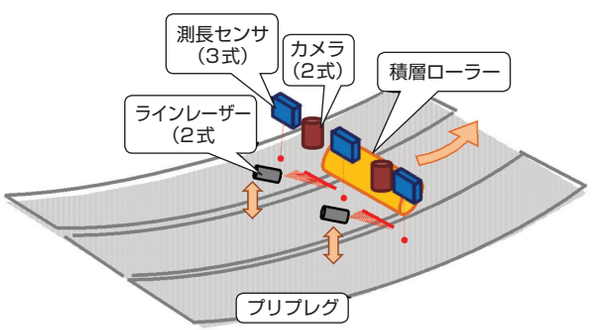


Fig. 6　System overview

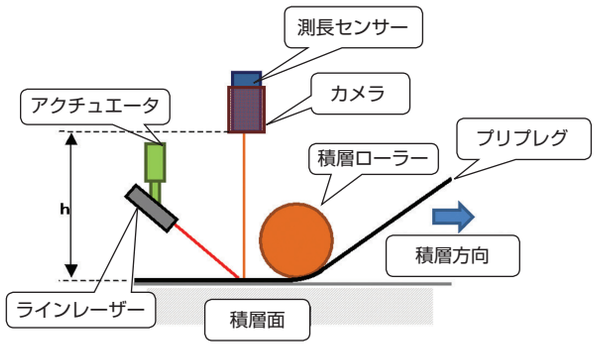
カメラ（レンズ）は、高速で移動し、且つ被写体との距離が変化しても、鮮明な画像が撮影できるよう、シャッタースピード、撮影画素数、被写界深度など適切なものを選定した。

ラインレーザーについても、積層面の高さ変化による焦点不良に対応するため、測長センサを設け、高さ変化に応じてラインレーザーを上下移動させるアクチュエータを装備している（Fig. 7）。

更に、積層面の角度が変化すると、カメラに入射するラインレーザーの反射光に強弱が発生し、計測結果に影響を及ぼす。そのため、測長センサより算出された角度に応じて、ラインレーザー出力を自動的に調整するシステムとした[(1)]（Fig. 8）。

測長センサは、ローラー中央部とローラー両端部の合計3ヶ所で積層面までの距離を測定することで、複雑な積層面においても、より高精度な計測を可能にしている。

6インチ用カメラとラインレーザーの取付けにあたっては、自動積層機のヘッド内の付属機器との干渉



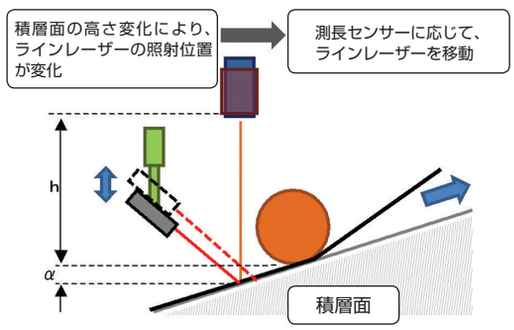
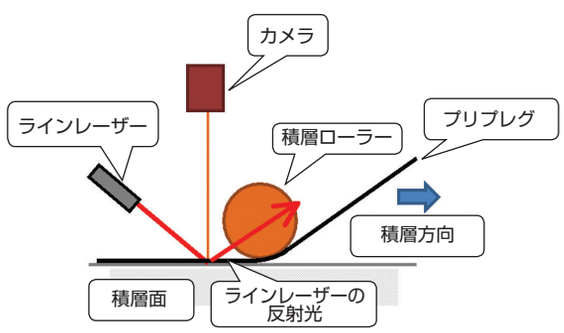


Fig. 7　Adjusting to layer height



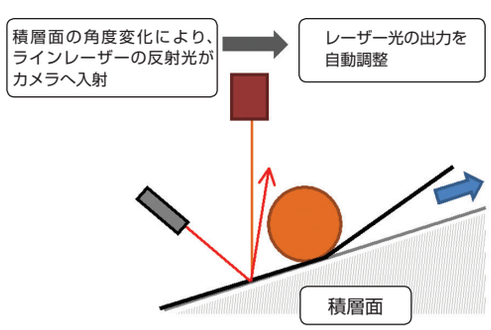


Fig. 8　Adjusting to layer incline

を防ぐため、プリズム、反射ミラーを使用することで、ヘッド内に組み込むことを可能とした（Fig. 9）。

以上のような対策により、非接触で、変化する積層面（計測面）に追従し、自動積層機の走行時の急加減速及び振動がある環境下においても、高速、高精度な計測、判定ができるコンパクトな装置を自動積層機に実装可能になった。

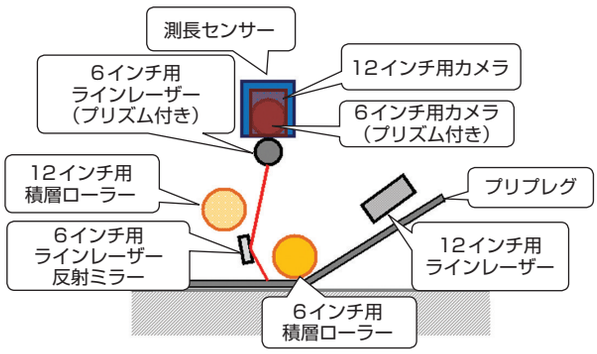


Fig. 9　Placement of the system

6.　まとめ

〔カメラ＋ラインレーザー〕計測方式の利点は、計測条件に合わせて、様々な調整・設定が可能であり、自由度が高いことである。自動積層機への実装過程においても、その自由度の高さを活かし、データ収集と調整を繰り返すことで、実用に耐えうるシステムを開発することができた。

7.　謝辞

プリプレグ積層精度計測技術の開発、適用では、様々な技術課題に対し、三洋機工株式会社のご協力により、問題を解決し、積層機へ実装することができました。この場をお借りし、感謝の意を表します。

参考文献

(1) 富士重工業株式会社、三洋機工株式会社：プリプレグの粘着状態検査装置、特開2013-154541（2013）

【著　者】

安陪　彰児

富士重工業株式会社

スバル自動車事業の拡充と世界進出――拡大期のスバル紹介

ジャスティ ECVT（1984年～ 1994年）

全長/全幅/全高(mm)　　3,535/1,535/1,390
エンジン　　水冷４サイクル直列３気筒 OHC　997 cc
最高出力　　63 PS/6,000 rpm
最大トルク　　8.5 kg-m/3,600 rpm

軽自動車と小型乗用車の空白を埋めるリッターカーとして1984年、スバルジャスティがデビュー。２ボックスセダンのFFと4WDの設定でスタートした。３年後の1987年２月、電子制御電磁クラッチ式無段変速機(ECVT)を搭載したモデルが追加設定された。自動車用無段変速機の実用化はスバルのECVTが世界初であり、生産終了までの累計台数は72,000台に及び、スバルCVT技術の向上に貢献した。

Ｔ－５型航空機用フライト・シミュレータの紹介

Introduction of T-5 Operational Flight Trainer

市　島　　茂*　　金　子　弘　行*　　早　川　正　翁*
Shigeru ICHIJIMA　Hiroyuki KANEKO　Masahito HAYAKAWA

抄　録

航空宇宙カンパニーでは、自衛隊のパイロットを目指す航空学生の訓練を安全かつ効率的に行うためのフライト・シミュレータを納入している。

紹介するＴ－５型航空機用フライト・シミュレータは平成6年に海上自衛隊小月航空基地へ納入されたが、現在までに実際の航空機側で実施されたコックピット計器盤等の改善反映、コンピュータ能力向上による近代化、顧客要望の反映を目的としたリニューアル事業を行った。

本稿ではＴ－５型航空機用フライト・シミュレータの概要と、そのリニューアル事業における技術要素および低コスト化手法について紹介する。

Abstract

Subaru Aerospace Company has supplied flight simulators to train students to be pilots for the Japan Self Defense Forces.

T-5 operational flight simulator was supplied to the Japan Maritime Self Defense Forces Ozuki air base in 1994. The simulator was later renewed to incorporate instrument panel improved in a real aircraft and modernized computer capacity and to meet customer demands.

This paper describes an overview of the renewed T-5 operational flight simulator, its technical components and cost-reduction technique implemented in the renewal project.

1. まえがき

Ｔ－５型航空機用フライト・シミュレータは、航空機を初めて自分で操縦する航空学生を対象としたものであり、実際の航空機を使用した訓練と平行して使用されるものである。そのため､手順の学習のみならず､視覚、聴覚、操舵反力、機体の動揺などの操縦感覚を含めた模擬を高精度で実現することが求められる。

リニューアル事業においては従来型で実現している模擬精度を維持するとともに、最新技術を適用することでさらなる精度向上を図り、民生品を採用するなど低コスト化に配慮した設計開発を実施した。

2. Ｔ－５型航空機用フライト・シミュレータの概要

本システムは、飛行運動計算の結果を元に、航空学生が体感する加速度および振動等を動揺装置によって模擬するとともに、動揺装置上に搭載した模擬コックピット内において、CGI（Computer Generated Image）による窓外視界、デジタル音源による飛行時の音響、アクチュエータによる操舵反力の模擬などを行うことで、実際の航空機を操縦した際に得られる視覚、聴覚、操縦感覚、加速度等を体感可能とするものである。

システム概要図を Fig. 1 に示す。

＊ 航空宇宙カンパニー　システム設計部

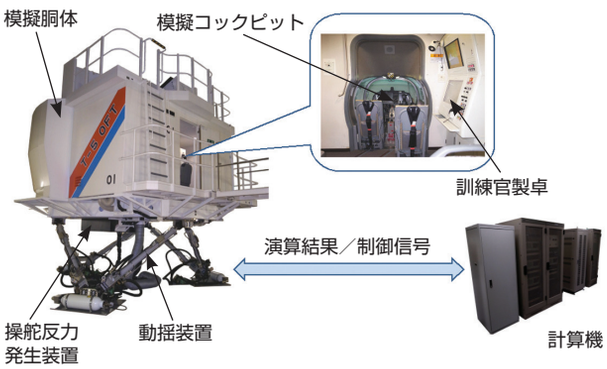


Fig. 1　Outline of this system

3.　リニューアル事業における技術的特徴

3.1　CGIによる計器板模擬

従来システムにおける計器板の模擬は、実際の航空機において電気信号を用いて駆動される計器については実機品を採用し、気圧や方位、ジャイロなどによって駆動される計器については、シミュレータ専用に開発された模擬計器を採用していた。

このような従来型の構成では、模擬計器に対応した電気信号を生成する機構が必要であった。

また、実機品および模擬計器が実際の航空機と同じ数量必要であり、開発、運用フェーズ双方において高コストであった。

リニューアル事業においては、計器板にタッチパネル付き液晶ディスプレイを埋め込み、CGIを用いて各計器を模擬することとした(Fig. 2)。

これにより、計器板の構成は、計算機と液晶ディスプレイというシンプルな機器構成となり、双方の機器ともに民生品を採用することで、大きなコスト低減を実現している。

Fig. 2　Comparison of instrument panel

計器の縮尺及びレイアウトは実際の航空機同等であることが求められるが、液晶ディスプレイは表示領域が長方形であるため、CGIによる計器表示面積を大きくするのに比例して、グレア・シールド(計器板上の日よけ)からの逸脱部が大きくなる(Fig. 3)。

この逸脱部分は航空学生が目にする窓外視界の妨げになっしまうため極小化する必要があった。

液晶ディスプレイの表示面積確保とグレア・シールドからの逸脱面積極小化という相反する要素について検討し、パイロット・ヒアリングを重ねた結果、姿勢指示器の中心位置及び主要計器の上辺位置を実機同等とするとともに、計器間の隙間を詰めて縮尺比90%とする最適解を導いた。

また､計器に付属しているノブを回す操作など､タッチパネルでは同様の操作を実現できない箇所においては、視認性および飛行状態における操作性を踏まえた新たなGUI(Graphical User Interface)を開発し、実際の計器が有する機能を実現した。

姿勢指示器におけるGUI表示例をFig. 4に示す。

CGIで模擬する各計器はモジュール化により独立性を保っており、各計器個別の改修にも容易に対応可能とした。

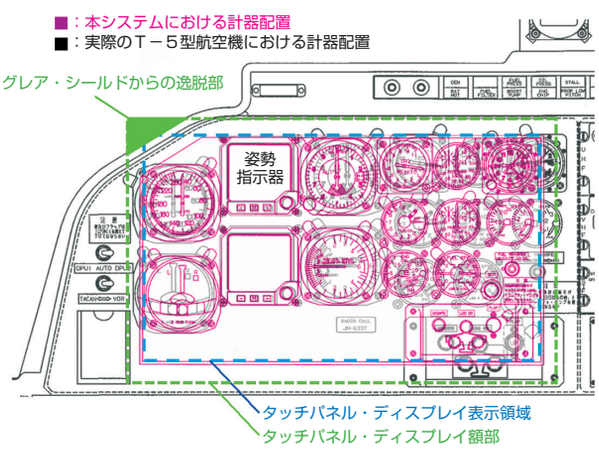
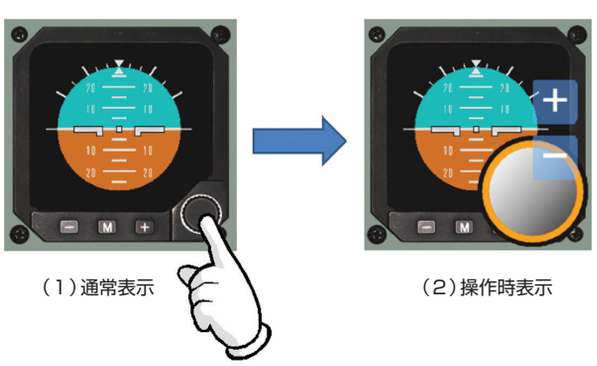


Fig. 3　Layout of instrument panel



ダイヤル部にタッチすることで、拡大ダイヤル及び「+」「−」ボタンを表示する。橙色で強調したダイヤル外周部に沿って指をスライドさせることで、ダイヤルの回転操作を模擬する。また、「+」「−」ボタンにより微調整が可能。

Fig. 4　GUI of attitude indicator

3.2　訓練管制卓におけるユーザ・インターフェース

訓練管制卓は、教官が本システムの制御を行う装置であり、主な操作はタッチパネル付きディスプレイにより行う(Fig. 5)。

訓練を行う上での初期条件(初期位置、気象等の環境条件)の設定や、訓練開始(フライト・モード)/停止(フリーズモード)の制御、模擬故障発生の制御等を任意のタイミングで実施することができる。

本システムにおけるモード遷移図をFig. 6に示す。

シミュレータを用いた訓練を実施する大きな利点として、実際の航空機では実施できない機器の故障などの緊急事態における対応訓練や、所望の地点における訓練、任意の気象条件における訓練を、容易かつ反復して行えることがあげられる。

従来の訓練管制卓は、概ね上記条件を満たしていたものの、操作に対するレスポンス改善に対する要望があり、かつ、表示面が湾曲しているCRTディスプレイであったため、タッチした位置と検出した位置とのズレが生じることがあった。

リニューアル事業では、タッチパネル付きディスプレイはCRTから液晶に変更され、管制プログラムはMotifと呼ばれるUNIX上でのGUI環境から、WindowsGUIによるプログラムに変更された。これにより、タッチパネル操作時におけるレスポンス向上を実現するとともに、表示面がフラットになったことで操作精度の向上を実現した。

WindowsGUIプログラムは、先に開発済みであった航空自衛隊の初等練習機であるT－7型航空機用フライト・シミュレータの当該プログラムをベースとすることで、技術リスクの回避、コスト低減を実現するとともに、将来的な機能拡張にも対応可能なものとした。

また、教官が模擬コックピット内に着座した状態での訓練管制を可能とするため、従来のシステムでは携帯遠隔制御装置と補助表示装置という二つの機器を使用していたが、リニューアル事業においてはこれら二つの機器を廃止し、新たな携帯端末装置に機能を統合した。また、従来のシステムでは訓練管制卓と比較し限定的であった携帯用遠隔制御装置の機能についても、リニューアルにより訓練管制卓の制御画面同等の機能を持たせることで、より効率的な訓練が実施可能となった(Fig. 7)。

Fig. 5　Integrated operation system

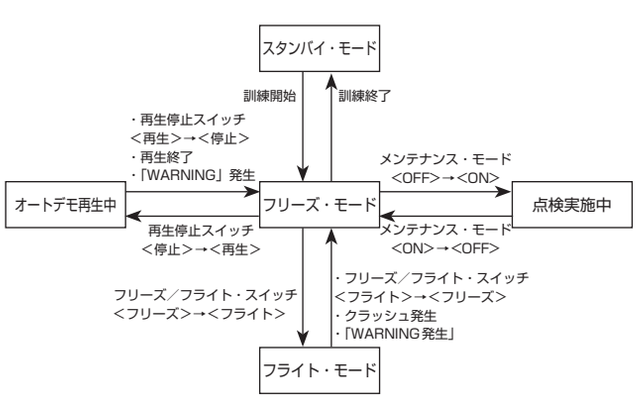


Fig. 6　Mode transition diagram

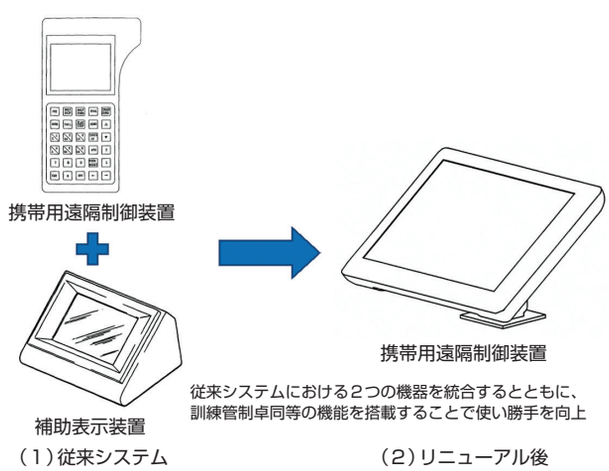


Fig. 7　Integration control device

3.3　音響の模擬

音響の模擬は、実際の航空機にて録音した音響データを元に、音量およびピッチをプログラム制御することで実現している。

音響の種類として、エンジン音、プロペラ音、風切り音、脚作動音など物理的に発生する環境音と、無線機などの機器から発生される信号音の双方を模擬している。

環境音は、ワークステーションからヘッドフォン・アンプおよびオーディオ・アンプを介し、模擬コックピット内に設置された3個のスピーカーから出力される(Fig. 8)。

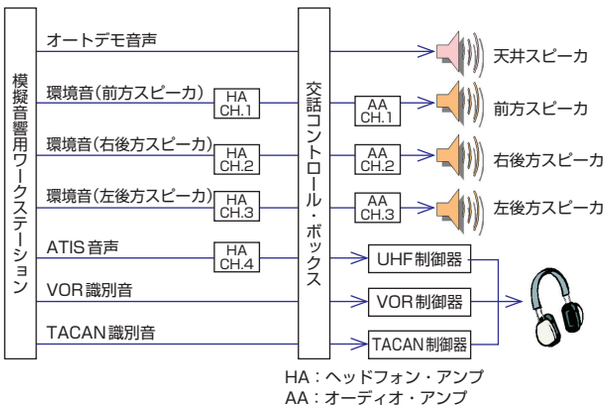


Fig. 8　Audio-system block diagram

環境音の音量は、航空学生がヘッドセットを装着した状態で明瞭に認識できるよう調整されているほか、交話コントロール・ボックスにより消音および任意の音量に調整可能である。

また、各信号音は各制御器を通して被訓練者が着用するヘッドセットから出力される。

信号音には無線局の識別信号のほか、ATIS（Automatic Terminal Information Service、飛行場情報放送業務）の模擬音声が含まれる。ATISは空港に離着陸する航空機に対し、音声により飛行場の気象情報、飛行場の状態、航空保安施設の運用状況などを提供するものであるが、本システムでは訓練官制卓による設定内容（滑走路番号および、気温／気圧、視程、雲の状態などの気象条件）を判断し、合成音声を生成することで模擬を行っている。

これにより、膨大な音声データを準備することなく柔軟なATIS音声模擬が可能となった。

3.4　飛行運動模擬技術

本システムは、T－5型航空機の全飛行範囲における飛行特性および性能を、「Motion3」と呼ばれる6自由度シミュレーション・プログラムを用いて実現している。

空力データ・テーブル、エンジン・モデル、脚モデル等が「Motion3」に入力され、演算結果としてその他のプログラムで使用するための機体位置(X,Y,Z)、姿勢(ϕ, θ, ψ)、速度(Vx,Vy,Vz)、角速度($\omega x, \omega y, \omega z$)、加速度(Ax,Ay,Ax)、角加速度($\omega$ dotx, ω doty, ω dotz)を出力する。

Fig. 9にブロック図を示す。

3.5　窓外視界および操舵反力の模擬

窓外視界映像はCGI生成コンピュータで生成され、プロジェクタから透過型スクリーンに投影される。航空学生は、ミラーに映った透過型スクリーン背面の映像を、無限遠の窓外視界映像として視認する。

また、窓外視界の視野範囲は水平182°、垂直40°である（Fig. 10）。

リニューアル事業においては、CGI生成コンピュータおよびプロジェクターの近代化による窓外視界映像の高精細化を実現し、従来では困難であった地上目標物を参照した航法飛行訓練が可能になるとともに、パイロットにとって重要な操縦技術である離着陸訓練時における映像の精度が向上した。

操縦席から見た窓外視界映像（左方向）をFig. 11に示す。

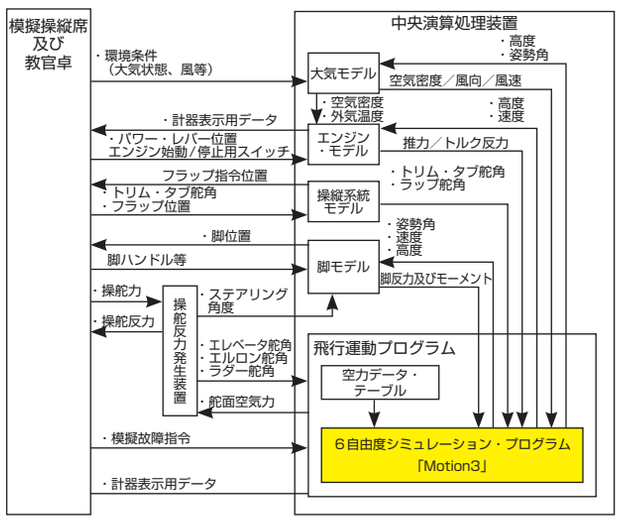


Fig. 9　Flight-simulation block diagram

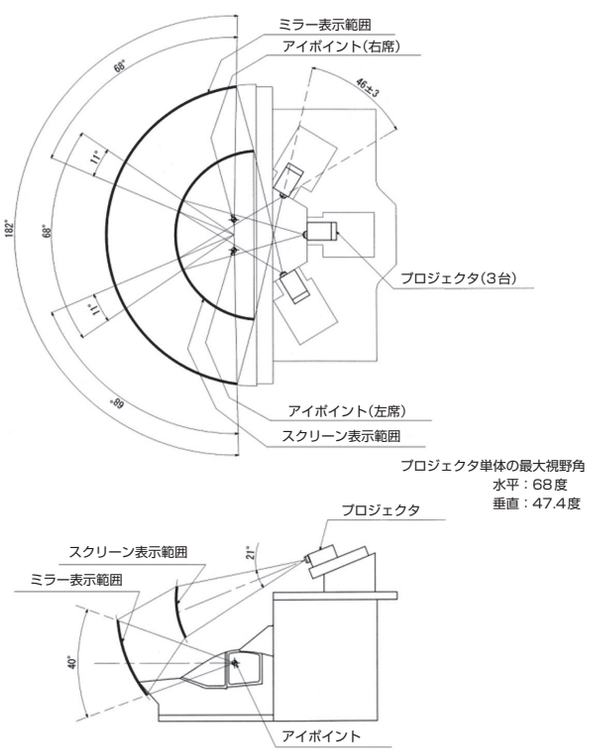


Fig. 10　Field-of-view of user

Fig. 11　Appearance of outside-of-the-window

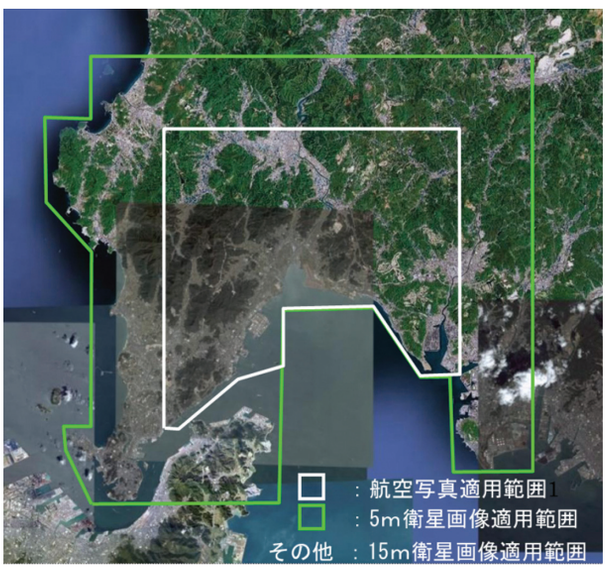


Fig. 12　Division of terrain database

地上目標物を含む地形データベースは、T－5型航空機が運用されている小月航空基地の飛行場を中心とし、重要度に応じて模擬の詳細度を変化させることにより、訓練効果や映像処理性能を踏まえた最適化を行っている（Fig. 12）。

また、従来型システムにおいて油圧式であった操舵反力発生装置を電動化することで、レスポンスの向上と省エネ化および整備性向上を実現した。

3.6　模擬度の評価

模擬度の評価は、実際の航空機から得られた飛行特性データとシミュレーション結果の比較による定量的な評価および、社内パイロットによる定性的な評価の双方により実施した。

Fig. 13に、データ比較による定量的評価例を示す。

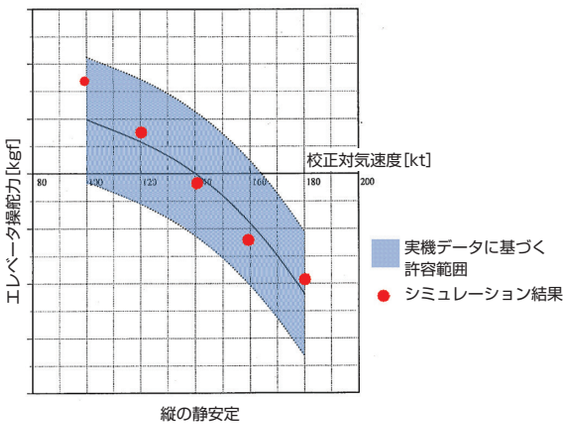


Fig. 13　Quantitive evaluation

4.　低コスト化手法

各技術要素に対する低コスト化については先述のとおりであるが、その他として、LINUX採用によるプログラム開発費用低減、民生品採用によるハードウェア費用低減、並びに機能の絞り込みが挙げられる。

4.1　LINUX採用

飛行運動模擬プログラムの実行やシミュレーションの管理を行う中央演算処理装置において、従来型システムではOSにリアルタイムUNIXが使用されており、プログラミング言語にはFORTRANが多く採用されていた。

OSを現在普及してるWindows等へ変更する場合、ソフトウェア改修コストが大きくなる上、リアルタイム性の確保が困難となる。

このため、従来プログラムの大部分を流用可能とすることでソフトウェア改修コストを抑制するとともに、リアルタイム性に対する用件を満たすOSとして、リアルタイムLINUX搭載ワークステーションを採用した。

4.2　民生品採用

従来型システムにおける各種計算機は、UNIX系OSを搭載した専用設計のハードウェアを多く使用していたため、ハードウェアが高額である上に故障探求に時間がかかり、維持コストの増大を招いていた。

リニューアルに際してはWindowsを搭載した民生品で信頼性の高いワークステーションを採用することで、ハードウェア費用の抑制および信頼性向上による維持費の低減を実現した。

また、ワークステーションの仕様を共通化することで、補用品の種類を削減することができ、維持コスト低減による顧客満足度向上も実現した（Fig. 14）。

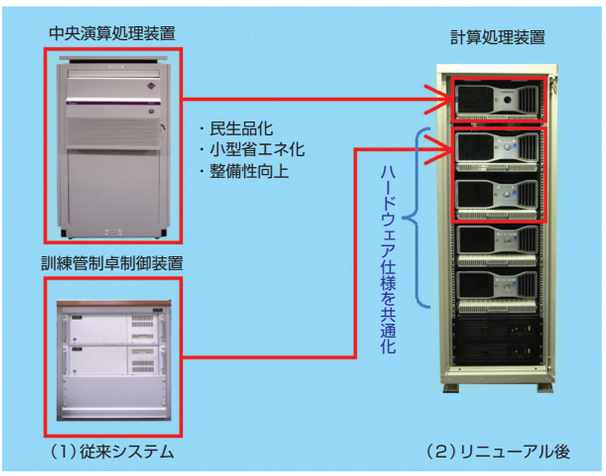


Fig. 14　Adoption of consumer product

4.3　機能の絞り込み

リニューアル事業を行うにあたり、従来型システムの運用実態を確認するとともに顧客との調整を実施し、使用頻度の低いハードウェアおよび機能については廃止するものとして、機能の絞り込みを実施した(Fig. 15)。

これにより、開発コストを低減するとともにハードウェア削減による維持費の低減を実現した。また、機能を絞り込んだ結果として簡潔な操作が可能になり、シミュレータ全般の使い勝手向上にも寄与した。

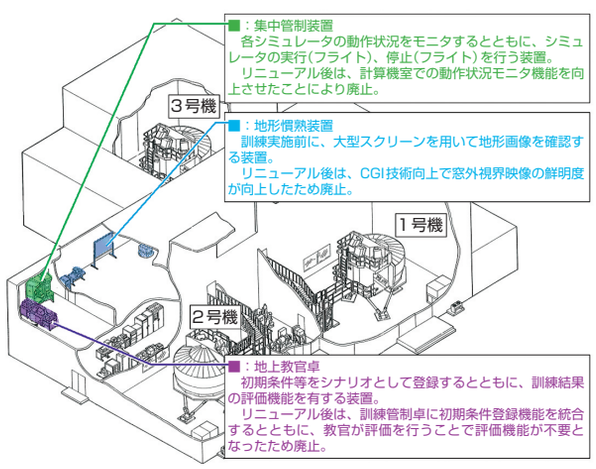


Fig. 15　Integration and deletion of function

5.　まとめ

フライト・シミュレータは、実際の航空機では実施することができない緊急時の訓練を実施することが可能であるとともに、環境負荷低減にも寄与するものである。

また、近年の計算機能力の向上やCGI技術の向上で、今後もフライト・シミュレータを用いた訓練が多くなると予想される。

今後も最新技術の動向を注視しつつ、最適な教育訓練システムを追求し、安全かつ効率的なパイロット育成に貢献していく。

【著　者】

市島　　茂

金子　弘行

早川　正翁

産業機器用エンジン開発における CAE の活用

CAE Analysis in Development of Engine for Industrial Equipment

柿　崎　敬　一*　　杉　浦　規　郎*
Keiichi KAKIZAKI　　Norio SUGIURA

抄　録

製品開発における一般的な課題として、「設計品質の向上」、「開発コスト低減」、「開発スピード向上」が挙げられ、これらの課題解決に向け、様々なツールを導入し製品開発を行っている。その一つとして、“CAE（Computer Aided Engineering）”の活用がポイントとなっている。　CAEは、自動車業界をはじめとし、航空業界や電子機器業界で技術発展を遂げてきた。近年、我々の産業機器用エンジン開発においても、“CAE”が導入され、製品開発に大きな影響を与えている。

本論文では、産業機器用エンジン開発における設計者CAE活用展開の取り組みと、活用事例を紹介する。

Abstract

As issues of product development, “improvement of design quality”, “development cost reduction” and “development speedup” can be considered. In order to solve these challenges, we are developing products by taking advantages of various tools. One of the tools is CAE (Computer Aided Engineering). CAE has been technically evolved in automotive industry, aircraft industry, electronics industry, and so on. In recent years, CAE has also contributed to the development of industrial engines.

In this paper, CAE application to industrial engine development is introduced.

1.　まえがき

近年、産業機器用エンジンの業界において、「環境汚染」、「省エネルギー」、「製品の長寿命化」などの環境対応が「ものづくり」をする製造業へ要求されている。お客様へタイムリーに製品を提供するために、開発の質の向上が問われている。その様な環境下で、我々は、5つの業界のお客様へ、動力源（エンジン）を提供している（Fig. 1）。

製品開発における課題として、次の3つを考えている。

①「設計品質の向上」
②「商品開発コスト低減」
③「開発のスピードアップ」

これらの課題を解決し、お客様に高品質・高機能な製品を素早く開発し提供するための一つの手段として、CAEの活用が挙げられる。Fig. 1で示す全ての製品開発にCAEを活用し開発の質の向上を図るべく、次の2つをCAE技術開発のテーマに掲げ取り組んでいる。

①「開発の上流における設計者CAE」
②「エンジンメーカとしてのCAE技術力」

Fig. 1　Product introduction

＊ 産業機器カンパニー　技術部

②については、さらに「製品まるごとCAE」をキーワードに掲げ取り組んでいる。次項より、上記の2つのCAE活用の取り組みおよび、実開発での活用事例を順に紹介する。

2.　開発の上流における設計者CAE

2.1　なぜ設計者CAE?

産業機器用エンジン開発の現場は、少数精鋭の複数チームで構成される。1チームは、設計･実験メンバー合わせて6名～10名程度で構成され、エンジンをゼロから設計し、試作、評価、生産準備の全てを行っている。一人が受け持つ業務範囲は広く、特に構成部品設計検討においては、主運動系(ピストン、クランク、コンロッド)から大物鋳造部品(シリンダヘッド、シリンダ、ケース)、補機類(エアクリーナ、マフラ)などの複数に跨って担当している。よって、設計者は、自分のアイデアを様々な部品設計(製品)へ込められる機会が多くなる一方、そのアイデアの妥当性を、机上検討の段階で素早く把握しておく必要がある。そこで、アイデアの妥当性を確認するツールとして、設計者自らがCAEを実施する「設計者CAE」が有効と考え、概案設計検討等の開発の上流で活用している。

2.2　設計者CAEツール

Fig. 2に設計者CAEとして用意・活用しているツールを示す。設計者CAEツールに求める機能として、以下に3つを挙げる。

①複雑なオペレーションを必要としないツール
②CAD(3D)⇔CAEの往来が容易であること
③精度<スピード(評価数)を優先

①については、設計者が図面作成や3DモデリングをしながらCAEを実施するため、CAEのための複雑なオペレーション習得は負荷になる。また、設計者は、自ら設計した3Dモデルを用いCAE評価をし、その結果からまた3Dモデルの形状修正を繰り返す。そのため、②のCADとCAEの往来が容易である必要がある。そこで、Fig. 3に示すように、CAD上に搭載されているCAEツールを活用し、境界条件設定やメッシュ作成などのモデル作成をし、様々な種類のCAEが実行できるようにツール環境を整備した。

我々の考える設計者CAEツールにおいて、最も重要なことが③である。CAEの活用において、高い精度で実測と一致することは重要である。

しかし、精度を追求するあまりに計算時間がかかってしまっては、スピードが要求される開発の中では活用できない。複数の設計アイデアから妥当なアイデアを素早く絞込むためのツールであることがポイントである。

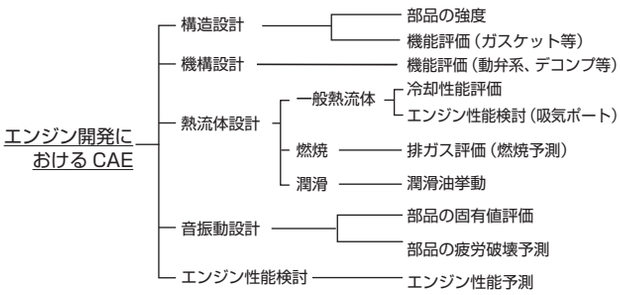


Fig. 2　CAE tools for designers

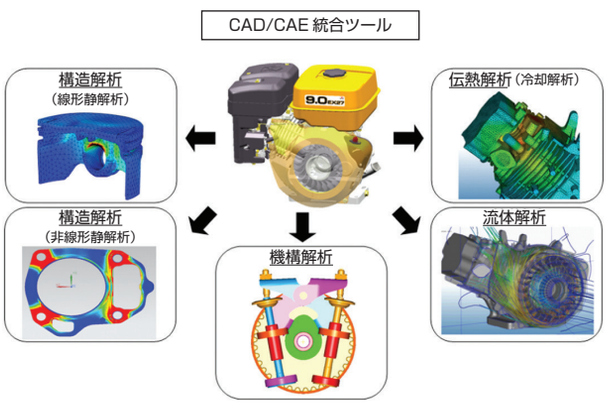


Fig. 3　CAE tools on CAD

2.3　設計者CAE活用事例

設計者CAE活用事例について紹介する。

2.3.1　エンジン構成部品の強度・機能検討

設計者CAEとして、最も行われている解析が部品の強度検討に用いられている構造解析である。我々のエンジンにおいて、部品強度の観点からもっとも過酷な使われ方をされるのが建設機械用エンジンである。特に、道路工事現場で地面を固める機器である「ランマー」に搭載されているエンジンは、地面を固める際の衝撃により、瞬間的に100Gもの加速度を受ける。Fig. 4にランマー用エンジン開発における構造解析事例を示す。ピストンやコネクティングロッド､そして、ランマーへのエンジン取り付け部の構造解析を実施している。

Fig. 5に､エンジンのカット図を示す。シリンダヘッドとシリンダの間にガスケット(以下､ヘッドガスケットと呼ぶ)が挟まれている。ヘッドガスケットは、空気とガソリンの燃焼による高圧な燃焼ガスをシールするために設置される。

Fig. 4　Structural analysis of rammer

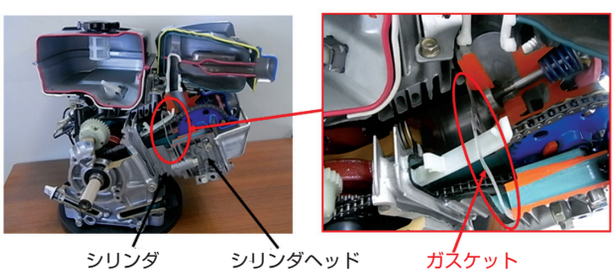


Fig. 5　Head gasket

高圧ガスに耐えるため、ガスケット面にビードと呼ばれる突起を設けられている。このビードの潰れを考慮した面圧解析を行うために、設計者向けの非線形解析ツールを構築し実施している。Fig. 6にCAEと実測の面圧分布比較を示す。面圧の高低の傾向の相関が確認できる。

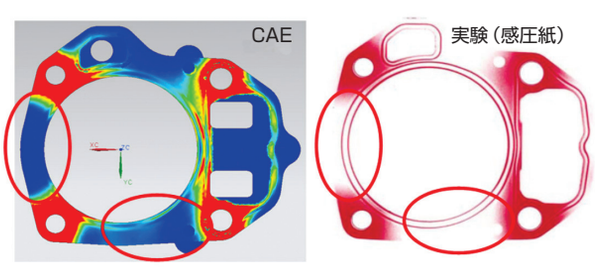


Fig. 6　Surface pressure distribution

2.3.2　エンジン構成部品の機構検討

エンジンの機構検討の一つとして、動弁系が挙げられる。我々のエンジンには、自動車用エンジンとしては標準となっている「OHC：Over Head Camshaft」や、一昔前の「OHV：Over Head Valve」や「SV：Side Valve」など様々なレイアウトを採用している。また、エンジン回転数も、常時3600 rpm程度の低回転で使用する産業機器用エンジンや、最高回転数9000 rpmにもなる車載用エンジンがある。開発の下流で動弁系の機能異常が見つかった場合、再検討による開発へのインパクトが大きいため、設計の上流で質の高い検討をすべく、Fig. 7に示す動弁系機構解析モデルを作成しロッカアームやロッカシャフトの変形も考慮したバルブの挙動確認を実施している。高回転仕様のエンジンの動弁系では、「バルブジャンプ・バウンス」と言った慣性力の影響によるバルブの異常な挙動を示す恐れがあるため、本解析は必須である。Fig. 8にCAEと実測のバルブ挙動を示す。本解析手法において、「バルブジャンプ・バウンス」と言った現象が発生する回転数は、CAEと実測で350 rpm程度の差異であることを確認している。

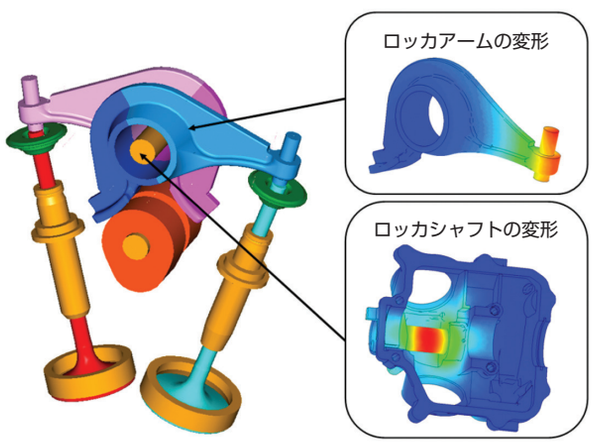


Fig. 7　Valve train mechanism analysis model

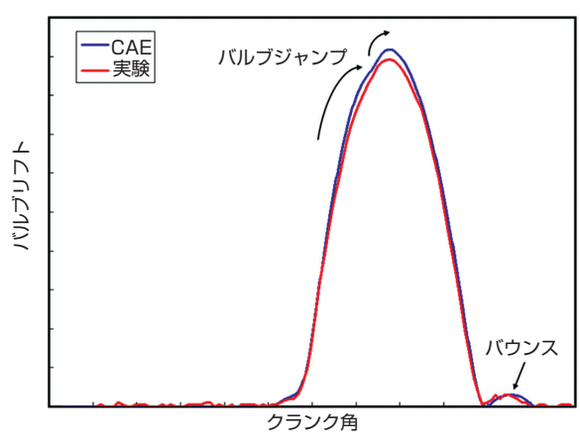


Fig. 8　Valve behavior (CAE & experiment)

2.3.3　冷却機能検討

エンジンの冷却方式は、我々のエンジンの中で車載用を除く全てが、「強制空冷方式」である。Fig. 9に冷却構造を示す。冷却風は、エンジンに直接取り付けられたファンとブロアハウジングにより、冷却対象部品であるシリンダヘッドへ送られる。解析モデルは、ファンを含む周辺領域に回転移動境界条件を設定

したエンジン ASSY モデルを用いる。Fig. 10 に示すファンの風量､損失トルクなどの単体性能を算出する。Fig. 11 にエンジン全体の冷却風の流動を示す。これらの結果から、冷却機能の机上検討をしている。

Fig. 9　Cooling system（Forcedly-Cooled Engine）

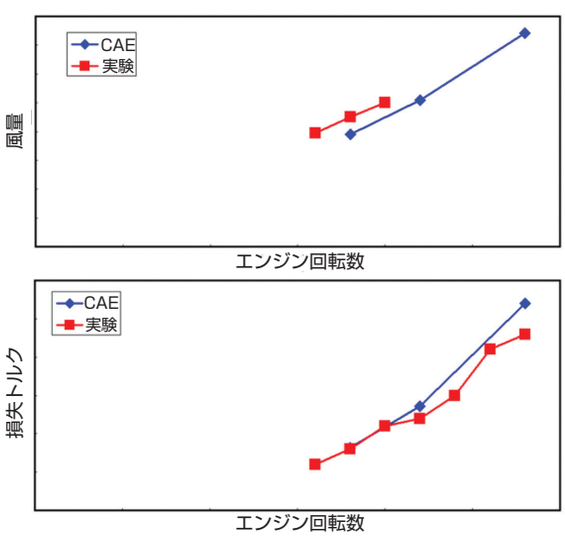


Fig. 10　Performance of cooling fan
(CAE & exprimen)

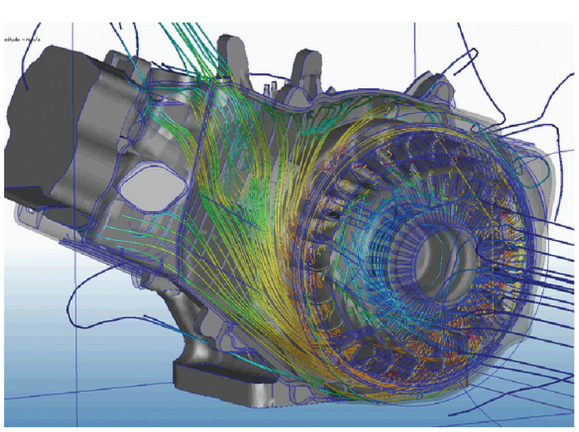


Fig. 11　Cooling air streamline

2.3.4　エンジンの吸気性能検討

エンジンの出力は、エンジン内部に吸い込まれる空気の量と大きく関係がある。また、排気ガス性能は、空気と燃料がエンジン内部へどのように吸い込まれて行くかと関係がある。これらの性能に大きく影響する部分が、シリンダーヘッドの吸気ポートである。近年では、産業機器用エンジンの業界においても、排気ガス規制が厳しくなったため、吸気ポートの形状検討には注意を払っている。実際のエンジンでは、ピストンやバルブが作動し流動する非定常脈動流となるが、設計者CAEとしての吸気ポート性能解析では、定常流れの解析モデルを作成し、流量(Fig. 12) と流れの構造(Fig. 13) を評価している。

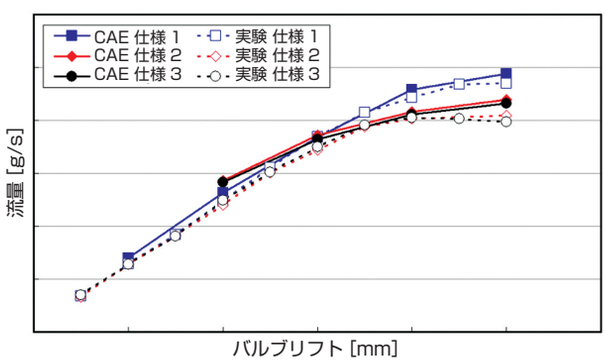


Fig. 12　Intake port performance
(CAE & experiment)

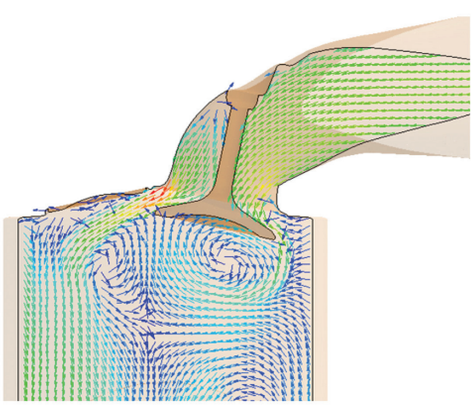


Fig. 13　Velocity vector distribution

3.　エンジンメーカとしてのCAE技術力

産業用エンジン開発においてCAEは、今や必要不可欠なツールとなってきた。さらに質の高い製品開発を行うためには、前章で述べてきた設計者CAE以外にも、エンジンメーカとしての高度なCAE技術を併せて備えておかなければならない。

3.1 「製品まるごとCAE」の取り組み

CAE技術開発のテーマとして、「製品まるごとCAE」を掲げている。これは、エンジンまるごとを、コンピュータの中（バーチャル空間）に構築し、エンジンを運転（CAE）する取り組みである。我々の開発する産業用エンジンは、自動車用エンジンや、航空機用エンジンと比べて、まだまだ電子制御が少なく、メカニカルな構造になっている（例えば、エンジン回転数の制御に採用している「ガバナ（遠心式調速機）」など）。よって、エンジンまるごとをCAEにより評価することは、比較的やりやすいと考える。

「製品まるごとCAE」を実現するための最初の技術的課題として、下記の2つを挙げる。

①Multi-Physics（複数物理の連成）解析

②大規模解析

これら2つの技術開発事例について、次項で紹介する。

3.2 「製品まるごとCAE」技術開発事例

3.2.1 産業用エンジンの冷却性能および熱変形（熱流体／構造解析技術）

前項の2.3.3冷却機能検討で述べた冷却風の流れ解析に対し、発熱部であるシリンダヘッドへの熱条件を考慮した冷却性能解析および、構造解析と連成させた熱変形解析の事例を紹介する。解析手順をFig. 14に示す。まず、CADより作成された解析モデルを用い、流体解析ツールにて冷却風の流れ場を算出する。次に、シリンダヘッドの燃焼室壁面および、シリンダ壁面に実測温度または、燃焼ガスが壁面に触れる時間から算出した熱流速条件を定義し、伝熱解析を行い、冷却性能を評価する（Fig. 15）。

次に、前述で算出された温度分布を、シリンダヘッドの構造解析モデルにマッピングし、さらに、シリンダヘッドの固定ボルトの軸力等の境界条件も定義し、熱変形解析を実施する。Fig. 16に熱変形解析結果を示す。熱の影響を考慮した構造解析を実施することで、より実機に近い条件で強度検討が可能になる。

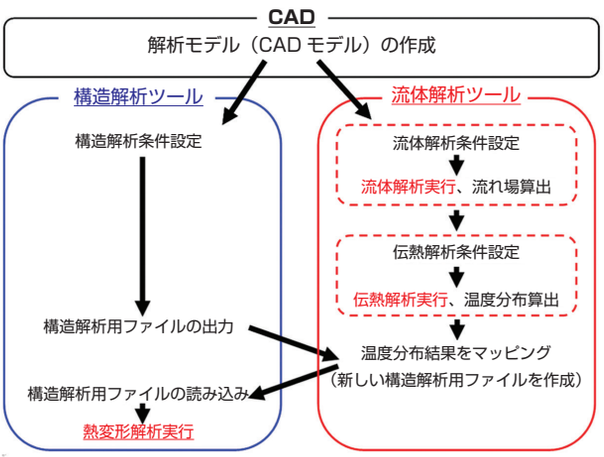


Fig. 14　Analysis procedure

Fig. 15　Temperature distribution

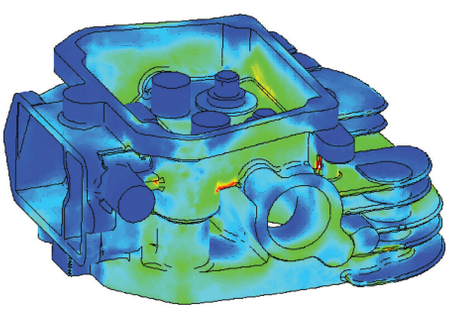


Fig. 16　Thermal stress distribution

3.2.2 はねかけ式潤滑の潤滑油挙動解析（機構／流体解析技術）

産業用エンジンの多くは、オイルポンプを搭載した「強制潤滑」ではなく、Fig. 17に示すような「はねかけ式潤滑」である。「はねかけ式潤滑」とは、エンジンケース底部に貯留された潤滑油を、コネクティングロッドに設置されているスクレーパと呼ばれる棒により掻き揚げて雰囲気潤滑する方法である。そのため、潤滑性能の作りこみは、実機によるトライ＆エラーで行うことが多く、開発の上流等で、まだ実物がない状態で実施ことは非常に困難であった。そこで、CAEによる「はねかけ式潤滑」のオイル挙動解析技術を構築し、潤滑性能検討ができるよう技術開発を行っている。Fig. 18にオイル挙動解析の一例を示す。

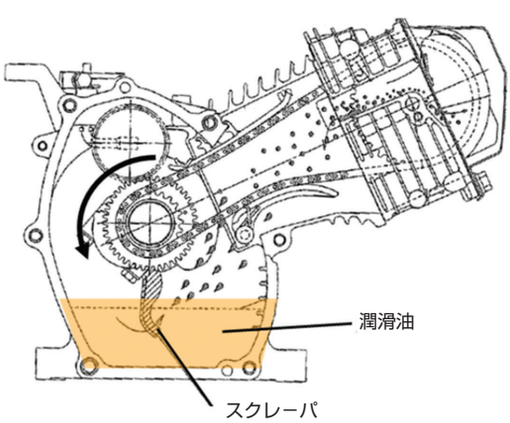


Fig. 17　Splash lubrication

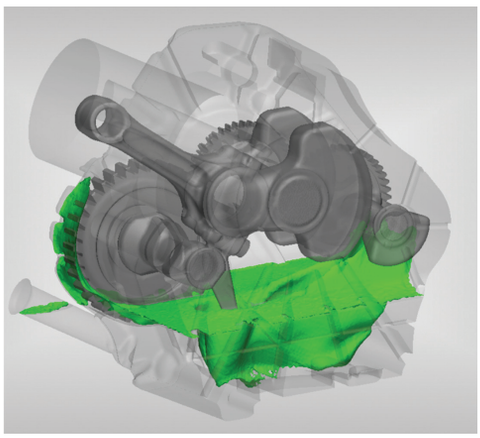


Fig. 18　Lubricant behavior (Liquid surface)

解析手法については、まず、エンジンケースおよび、コネクティングロッド、クランクシャフト、その他内蔵の軸類をモデル化し、各部品に回転等の動作条件を定義する。次に、ケース底部に潤滑油を定義し、各内蔵部品を動作させ、VOF 法(Volume Of Fluid Method) を用いてスクレーパによる潤滑の掻き揚げをシミュレーションしている。

3.2.3　発電機筐体内の冷却風流れ解析（大規模解析技術）

我々が開発・製造する製品の中で数少ない最終商品として、発電機がある。発電機は、Fig. 19 の概略に示すように、エンジンと発電体、制御ユニットなどの部品と、それを包む筐体で構成される。エンジンや発電体は、当然、運転時に発熱するため、筐体内には熱が篭る。そのため、エンジンには冷却ファンが設置され、筐体外部から冷却風を取り込み、発電体やエンジンを冷却している。よって、発電機の冷却性能検討において、筐体内の冷却風流動状況の把握が重要となる。CAE を用い、流動状況を解析する場合、発電機のフルモデルを使用する必要があるため、解析モデル規模は、かなり大きくなる。しかし、近年の PC 等のハードウェア技術の進歩により、モデル規模をあまり気にせずに解析ができるようになってきた。

Fig. 20 に筐体内の冷却風流れ解析結果を示す。この解析は、冷却ファン部に回転移動境界条件を定義し、要素数が 3,000 万要素以上にもなる大規模解析である。解析結果から、筐体内の流れの様子や、筐体に設置された複数の冷却風取入れ口の流量バランスを把握することができる。解析の精度検証として、Fig. 21 にエンジン周辺の圧力について、CAE と実測の比較を示す。両者で非常に高い相関が確認でき、比較的高い精度の解析が出来ていると考える。本解析は、エンジンの燃焼とそれによる発熱、潤滑等を除けば、コンピュータ（バーチャル）の中で発電機を運転しているシミュレーションであり、「製品まるごと CAE」における重要な CAE シミュレーション技術である。

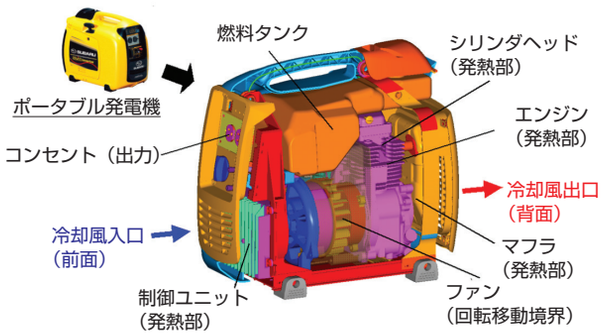


Fig. 19　Schematic of generator（Portable type）

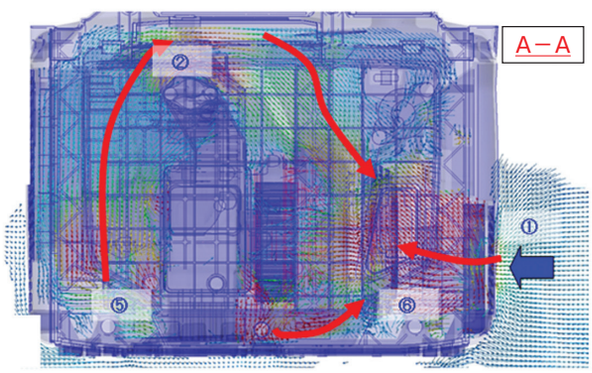


Fig. 20　Flow pattern of cooling air in housing

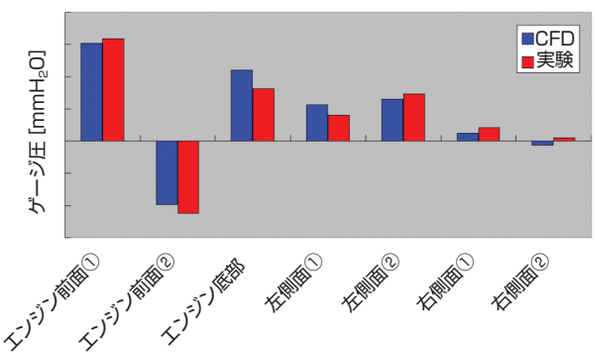


Fig. 21　Pressure in housing (CAE & experiment)

4. あとがき

お客様に高品質・高機能な製品を素早く開発し提供すべく、「設計者CAE」、「製品まるごとCAE」に注力し取り組んできた。エンジンの部品強度や機構、冷却等の設計検討へのCAE活用は定着してきたが、振動・騒音については、まだ実測評価が中心である。特に、我々の最終商品の一つである発電機の市場においては、騒音がその商品性を決める重要なポイントになっている。今後は、振動・騒音検討へのCAE活用に注力し、「製品まるごとCAE」を目指し技術構築していくと共に、さらに良い製品をお客様に提供できるように努める。

【著　者】

柿崎　敬一

杉浦　規郎

富士重工業株式会社

スバル自動車事業の拡充と世界進出――拡大期のスバル紹介

オールニュー・レオーネ（1984年～ 1994年）

全長/全幅/全高(mm)　4,370/1,660/1,400
エンジン　水平対向４気筒OHC　1,781 cc
最高出力　135 PS/5,600 rpm
最大トルク　20.0 kg-m/2,800 rpm

1984年7月、三代目となるオールニュー・レオーネシリーズ発売。1.8L4WD GTターボに空気圧により車高を制御するエレクトロ・ニューマチックサスペンションを採用。10月にはツーリングワゴンとエステートバンを投入。1986年４月にはスバル初のセンターデフ式フルタイム４WDのレオーネ３ドアクーペRX/Ⅱ発売。このシリーズはレガシィ登場までの基幹車種であり、米国ではアルシオーネを含め年20万台を越える販売を記録した。

スバルと刺身と煮魚と

SUBARU, Sashimi and Boiled Fish

坂 崎 明 彦*1　　太 田 康 之*2
Akihiko SAKAZAKI　　Yasuyuki OOTA

抄 録

刺身にも煮魚にも夫々の良さがある。
原理原則に従い、愚直にやるべき事をやって、スバルの車の質を高めて行きたい。
不易と流行のバランスもスバルの開発には重要。
スバルの技術者達は一生懸命働き、スバルを世間からそれなりに評価されるレベル迄持ち上げた。
これからは、それを維持しつつ、余暇にはのんびりと古き良き日本の伝統や、ヨーロッパの石の文化を学ぶ時間を持ち、スバルを更なる高みに導くべきだろう。

Abstract

Sashimi and boiled fish have good points each other. In accordance with the principles, by doing things in simple honesty, we want to improve the quality of SUBARU cars.
Balance between the transient and the immutable is also important in the development of SUBARU cars.
Engineers at SUBARU worked hard and they lifted the level of SUBARU to the stage where people value it.
From now on, while maintaining the level, SUBARU engineers should have time to learn good old traditions of Japan and the culture of the stones of Europe. Let's raise new SUBARU cars to much higher place.

1. まえがき

本報告は、スバル技報第40号の「スバルと12弦ギターとブリュートナーと」[(1)]の続編である。

1.1 鯉の刺身と煮魚

富士重工業には、以前、永年勤続旅行と言う制度があり、入社後の年数に応じ、若干の会社補助と共にまとまった休暇が付与されていたので、報告者の一人は、老いた両親と家族で先祖の地、会津に旅行した。
泊まった会津の旅館の向付の鯉の刺身は非常に旨かった。
鯉の甘煮も非常に旨かった。どちらも同じ鯉なのに、雰囲気は全く異なり、鯉料理を中心とした晩餐全体のもてなしも素晴らしく、とても幸せな気分になれた。

料理で使う美味しい良い食材は、車で例えればタイヤや部品の様なもので、これをおろそかにしてはならない。

Fig. 1　Sashimi of carp [(2)]

＊1 開発改革担当部長付
＊2 車両研究実験第1部

Fig. 2 Carp stewed in thick sweet sauce [2]

1.2 白い御飯も美味しい。

晩餐では、東北のコシヒカリも美味しかった。

御飯は一般に日本国内では主食で、日本のどの様なおかずとも相性が良く、おかずと一緒に食べる事が多い。

おかずが殆ど無くても、ふりかけ又は天然の塩一振り、或いは梅干し1個あれば結構美味しく食べられる。

スバルのプラットフォームの土台は、白い御飯の様に基本をしっかりし、求められるどの様なチューニングにも適応出来るフレキシビリティを備える事が重要である。

2. パワーステアの味

2.1 初代レガシィ北米向け立上り時の舵力の経験

初代レガシィ北米向け立上り時、北米ディーラの一担当者から、舵力が重いので軽くしろとの話が伝わって来た。

執筆者の一人は,当時パワーステアリングの設計を担当していたが、操安の研究実験を担当していた辰己英治氏(現STI)にこの事を伝えたら、「自分は舵力だけでなく、車の動きや、乗り心地、車全体の雰囲気を総合的に見てバランスを取っている。舵力だけでどうのこうの言われたく無い。舵力だけを変えるつもりは無い。」ときっぱりと言われた。

そこで現地に「最上級のフランス料理と、最上級の中国料理と、最上級の懐石料理をごった煮にしても、最上級のディナーにはならない。日本の寿司職人の辰己英治が、最高の刺身を御馳走して差し上げようとしているのだから、舵力だけを取り上げてごちゃごちゃ言わないで欲しい。他の性能や車の性格とのバランスが重要。」と言うメッセージを英語で伝えて事を収めた。

料理も車両のチューニングも、関連する要素の個々のアイコンでは無く全体としての景色が重要である[3]。

2.2 パワーステアは刺身と煮魚、どちらが良いか？

初代レガシィには未だマニュアルステアリングがあり、スポーティな車は大部分がマニュアルの時代であったので、人力ではどうにもならなくなりつつあった据え切りはアシストをするが、走り出してしまえばマニュアルのフィーリングに近付けようと言うチューニングが流行した。

レガシィRSでは高価な車速感応油圧反力パワステを採用し、アシスト低減時にはステアリングコラムからピニオンまでの剛性をマニュアルの様に高める配慮まで行ったので、まさに刺身的にタイヤと直接運転者が対話出来るチューニングを目指したと言える。

ところが、その後大衆車でもパワーステアリングが当たり前になり、大部分の運転者には逆にマニュアルステアリングの方が違和感になり、2代目レガシィからは、ステアリングコラム系の剛性を下げつつアシストを低減する車速感応可変バルブを採用し、パワーステアならではの味付けで、運転者の疲労低減、安心感確保をする様になった。

まさに煮魚的に、タイヤからの入力にパワステならではの調理を施した当時のスバル車と言える。

今では、パワーかマニュアルかでは無く、ステアリングはどうあるべきかと言う時代になっている。

3. ブリュートナーの音の秘密

前回の論文でブリュートナーに関する記述引用の許可を求めた縁で、執筆者の一人はブリュートナー日本総代理店の横山彼得(ペテロ)氏と知り合いに成った。

同論文で、ブリュートナーグランドピアノの豊かな音が、ハンマで打たない共鳴専用弦を1本加えたアリコート方式だけによるかの様な論調にしてしまったが、全く不明であった。

横山氏の御店の宝物、ブリュートナー創業50年記念モデル1905年製はアリコート方式採用前のモデルであるにも関わらず,執筆者のブリュートナーより遥かに響きが良い。

Fig. 3 Blüthner 50th Anniversary model made in 1905 [4]

3.1 ブリュートナーの響板の工夫。

ブリュートナーは全ての音階で響きを良くし、ピアニッシモからフォルテッシモが出せ、演奏者が思う通りに音を表現出来る様多くの設計上の工夫や拘りを持っているが、此処では紙面の都合で響板についてのみ記す。

ピアノの響板の上には、弦を乗せてその振動を響板へ伝える駒が取りつけられ、駒の上に張られた弦は駒を頂点として山なりに張られるので、響板が弦の圧力に耐えるためには駒を頂点として山なりになっていなければならず、多くのメーカーは響板の中央を高く盛り上げる(Fig. 4)。

Fig. 4　General curvature of sound board [5]

この方式では、響板の端部は1平面だから、響板を取り付けるインナーリムの上面も平らに出来るが、横山氏は特定の周波数で響板の共振が強く出ると言う。

一方ブリュートナー社は、響板上の駒が山の尾根の上に乗るように、紙を丸めて筒を作る要領で、響板を一方向のみに曲げる方法(Cylindrical curvature)を採用している。

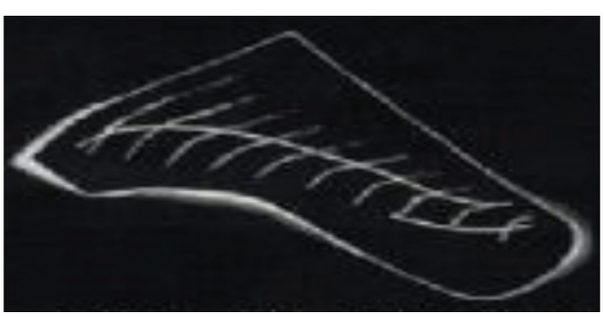


Fig. 5　Cylindrical curvature of sound board [5]

ブリュートナーのクラウン加工と、それにまつわる工夫は一枚の紙片を使って理解出来る。ブリュートナーの響板は四角い紙の対角を持って上向きに反らせた様な状態になっている。響板の端末は1平面上に無いから、インナーリムの上に響板を取りつけるために、隙間を埋めるためのサウンドボード・レストを態々採用している(Fig. 5)。

一般にピアノは中高音の軽やかなショパンの愛したプレイエル、中低音の重厚なベヒシュタイン、ベーゼンドルファーと言った様に、得意な周波数域を持つが、ブリュートナーは、ショパンからベートーベン迄あらゆるジャンルの曲に適応出来る。

ボディが殆ど2次曲面の組合せで、防音対策が部分的には無しに近かった商用車サンバーの音響が以外に良く、乗用車でもこの考えをトライして見たいと思う。

3.2　ヨーロッパ伝統のピアノ調律

基本がしっかりしていても、チューニングが御粗末では台無しになる事は言うまでもない。

横山氏が、初めてウィーンを訪れた時、現地やザルツブルグの調律師たちの仕事を見て驚いたのが、コンサート前の調律。ユニゾン(同じ音程で1本の弦に対してもう1本の弦を合わせること)がまだ合っていないのに次の音に移ってしまったので、最初はその調律師を、「きちんと音を合わせることが出来ない調律師だ」と思った。

ところがコンサートが始まったら、狂った調律を施されているはずのピアノが、なんとも素晴らしい声で歌い、その音はいまだかつて聴いたことがないほど長く伸び、豊かな響きを伴っていた！美しいハーモニーや、様々に変化していく音色は、まるでオーケストラを聴いているかのようで、あまりの感動に溢れる出る涙をとめられなかった。

同時に、日本では音に含まれる倍音を聴いて調律するよう教えられるのだが、彼が聴いていたのは基音であることに気付いた。しかもその基音は、日本で教えられてきたものではなく、実はもう1オクターブ下にある、“隠れた基音”だったとの事[6]。

横山氏はその後長い年月掛けて修行し、ヨーロッパの伝統に基づいたピアノ調整・調律技術を会得した。

横山氏のチューニング作業を見ると、一見わざとユニゾンをずらしているように感じられるがそうでは無い。

ピアノでは限られたスペースに1音当たり通常3本(ブリュートナーでは4本)の弦を配置するので、扇形に開いて配置された弦の長さは微妙に違う。このため、倍音を合わせると大事な基音がずれ、アタック音は出るが音が伸びなくなり、基音を合わせれば音は豊かに伸びやかになり、結果として倍音は僅かずれると言う事らしい。

そこで、携帯端末内臓のFFTで真ん中のドの上のラの音の周波数を調べて見た。1次周波数が基準通りの440 Hzで「豊かなsustain(音の持続)」をし、「一つ下に隠れている基音」は本当の1次周波数だと理解出来た(Fig. 6)。

Fig. 6　FFT analysis of Blüthner

自動車の音作りでもdB目標値を満足しただけの無響室の様な静かさは気持ち悪く、エンジン伝達、吸気、排気の音の基本次数成分を強調し、軽快感やリニア感を向上させる場合があり、基本次数の音源は車でも重要である[(7)]。

3.3　ピアノ調律師と昔のピアノ製作者との対話

執筆者が所有するブリュートナーを調律しながら、横山氏曰く、「むこう（西洋）は一人が全権を握って作る文化があります。オーディオメーカーでもそう。ピアノの調律を通してその製作者と対話している感覚があります。昔は感覚にすぐれた天才が沢山いたんだと感じます。現代ではこういう仕事は出来ないでしょうね。ドイツのピアノメーカーで中間の新しいサイズを出したけど全く音がダメ。色々設計し直して出したけどダメ。今の技術では当時の技術に追いつけません」。横山氏の「製作者と対話している感覚」が、もう一人の執筆者の中では最近のテーマになっている。

4.　或るヨーロッパ車両開発者との対話

普及価格帯では異例なほど音性能が良いヨーロッパ車を、ここ数ヶ月に渡って調査した。エンジンがアイドリング中でも停止していると勘違いするほど静かで、一時停止時に音の研究実験のベテランをして「良いね、このアイドリングストップ!」と誤解させるほどである。

この車の様々なデータを取り、また全て分解して“物”の面からも多面的に分析したが、吸音材と遮音材は、勘所へ少量の“高くて音性能が良いもの”を使っている以外は、従来から良く知られた”安くて音性能が並のもの”だった。

それなのに音性能が素晴らしい理由は「基本に忠実にそれを徹底的に突き詰める」という一点である。

音の静かな車を作る基本は「音の元を断つ」であり、昔から言われ続けている一般思想は以下の通りである。

・音源のレベルをしっかり抑える
・音源近くの吸音をより手厚くする
・車両の外板で重要な部位は板厚を厚くして遮音する。
・振動の入り口では剛性を上げて遮断する。
・防音材は隅々まで施工して効果を最大化する。

上記ヨーロッパ車の調査を通し、その車の開発者に、「この道を究めるのに近道はない。基本的なことを繰り返し突き詰めていくことでしか、この水準には達しえない。

僕らがここへ到達するのに、どれだけ長い時間鍛錬を重ねてきたかわかるか？この道を究めるには君たちのように『どこまで突き詰めれば良いか』なんて議論している暇は無い。みんな基本に忠実にやればやるほど車は良くなることを知っているし、これほどの高みへ到達できたのは開発も製造も『とことんまでやらないと気がすまない』人ばかりだからね。」と言われてる気がした。

執筆者の一人は富士重工業入社前の学生時代、この車の初代モデルに乗っていたが、挙げるとキリがないほど開発者の意思が伝わって来る車で、彼らと対話をしてる気分になり、それ故か「降りたくないと思わせる何か」のある車であった。

初代モデルから続く少し前までの歴代のモデルにおいても、ただひたすらに基本的な音性能や運動性能を極めていった様には、神々しさすら感じる。

走りと音の両立のための基本を噛み砕くと「動くべきところ（足回り等々）はしなやかに動き、動かざるところ（キャビン＝車室）は強固に固めて微動だにさせない」という極当たり前の一点になり、それがタイヤを正しく支えつつ様々な入力をいなして外界と離れた包まれ感と素晴らしい走りを生み出し、それが乗員の安心感につながる様に思え、スバルもそれなりのレベルに達しているが更に磨きたい。

5.　廃（すた）れて行くモノ

執筆者の一人は数年前、目に止まった「オーディナリ型」自転車が歴史の中でこの持つ意味に興味が沸き、買わずには気がすまなくなって入手した（Fig. 7）。

Fig. 7　Ordinary bicycle

この自転車を乗りこなすためには少なからず時間がかかった。理由は簡単で「ペダルをこぐ力」がハンドルの回転軸回りに「操舵モーメント」を発生し(Fig. 8)、ハンドルを左右へ回そうとするため、ハンドルを握る手はこの反力と格闘し続けるからである。このため不安定だし、「移動する」という基本でも「ペダルをこぐ力」を「前に進む力」に100%変換出来ず非効率である。

自転車の歴史はその後チェーンを使った後輪駆動化により、後輪の駆動と前輪の操舵が非連成になり、自転車としての完成形を見る事になる。

完成形へつながる過渡的モデルとしての価値は大きいが、原理原則に従っていないモノは廃れていく。

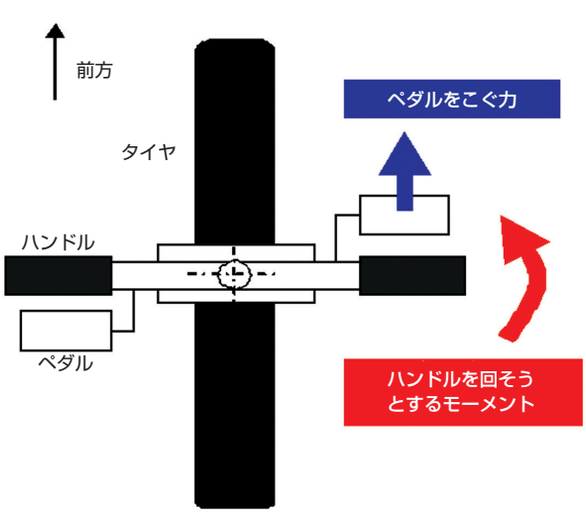


Fig. 8　Mechanism of Ordinary

6.　廃(すた)れていかないモノ

原理原則に従って基本を究めたもの、あるべき姿を実現しているモノは廃れず、執筆者の一人が今も使い続けているモノの中から三点を例に考察したい。

6.1　廃れない靴

一点目はRed wing社の875(通称アイリッシュセッター)である。執筆者の一人はこの靴を1998年に新品で購入し、15年間使い続けている(Fig. 9)。

875は1952年に開発された8インチ丈のハンティング・ブーツ877をルーツにして、細部の変更をした以外は当時の方法で現在も作り続けられており、丈夫でかつしなやかに動くアッパーと、柔らかな履き心地のクレープソールにより靴としての基本、「歩行を補助すること」と「足を守ること」に徹している[8]。

この靴は、ハンティングという過酷なフィールドでその特徴が究められた結果、靴としての普遍性を得て、約60年経った今でも変わらぬ価値を提供している。

Fig. 9　Irish Setter

6.2　廃れないギター

二点目はGibson社のLes Paul Modelである。

執筆者の一人は1972年製のこのギターを1997年に購入し、16年間使い続けている(Fig. 10)。このモデルは1952年販売開始で、今も細かな仕様差はあるものの同じ形で作り続けられている[9]。

このギターを弾くとすぐに開発者の意図、「sustain(音の持続)」を最優先にしたことが伝わってくる。

その音色は比較的フラットでくせが無く、ピックアップ(弦の振動を音の電気信号に変換する部分、ボディに上下2個ある金色のもの)の選択やトーンノブの調整、さらにアンプのセッティングにより、カントリーやJazzのような甘い音色からロックのハードに歪んだ音色まで幅広く表現がすることが出来る。

このモデルは楽器としての基本「豊かなsustain」と「音色をコントロールできる」ことを究め、約60年経った今も多くの現役ミュージシャンに愛用されている。

また、このモデルは「良いボディが出来上がれば、どんな味付けにも合う」という点でも良いお手本であ

る。

先に論じた白い御飯やブリュートナーにも通じる所があろうか?

Fig. 10　Gibson Les Paul Model

6.3　廃れないPCと携帯端末

三点目は某社のPCと携帯端末である。

これらを所有している執筆者の一人は、学生時代に研究室でこのPCと出会ってから20年間使い続けているが、理由はただ一つ「使いやすい」からである。この特徴が一人の強烈な理想主義者から生み出された事は特筆に価し、以下に彼の発言内容を引用する。

- 三回以上ボタンを押させない。
- 最先端のハイテクを、普通の人にも使い方が分かるようにして、普通の人が驚き、普通の人が喜ぶ様にする。
- ユーザーの言う事をきくのは大事だが、ユーザーはどんな大革命が起きるかは教えてくれない。
- 考え抜かれた商品が求められ、完璧な製品を作る事が完璧な戦略だ[10]。

その製品は「使いやすさ」という道具の基本を究め、操作感は普遍的なまでに完成度が高く、初代から現行モデルまで、同じ操作感で使う事が出来る(Fig. 11)。

6.4　廃れていかないモノへの雑感

廃れていかないモノには、作り手の思いが宿っていて、対話している感覚を覚えられるモノすらあり、その結果、愛着が生まれる場合が多い様に思える。

執筆者の一人が2001年にイタリアとフランスを旅行したら、フィアット500(1957 ～ 1977製造)やシトロエン2CV(1949 ～ 1990製造)等の古い車が現役で沢山走っていた。

Fig. 11　PC and mobile terminal

スバルにも永く愛されている車種が数多くあるが、それは丹精込めた作り手の想いが車に宿っているからだと思う。スバル360を自分でレストア等、自分なりにスバルの歴史を辿ってみた結果、スバルの強みは「みんながその気になればみんなが納得したありたい姿を実現できる」ことであり、それが可能な小回りの効く規模である事だと考えている。そんなスバルは、御客様に神々しいイメージを感じて頂けるレベルに達する事が出来るだろうか?

スバルの目指すべき方向性は車の本質、原理原則に従って基本を究めていくことであると考える。

7.　まとめ

スバルの技術者は、御客様に飽きられない様に次から次へと新しいネタを御客様に提供しなければ、捨てられてしまうと言う社内の議論がある。

これは一面では正論で或るが、或る落語名人曰く、「最近の若い芸人の一部は刺激で無理やり御客様の笑いを取ろうとする。やがて同じ刺激では御客様が笑わなくなり、刺激がどんどんエスカレートする。そうすると芸が駄目になり、御客様も駄目にしてしまう。

そうではなくて、自分の芸を磨き、構築した素晴らしい噺の世界をそーっと披露する。すると御客様がすーっと噺の中に入って来て下さるのを感じられる事がある。これが本当の噺家の芸の世界だと思う。」

不易を知らざれば基立ちがたく、流行を知らざれば風新たならず(原理原則 − principle − を知らなければ基礎を確立出来ず、流行を知らなければ新しい風が吹かない)。

スバルの開発部門のマネージメントとしては、流行の部分への戦力投入だけでなく不易の部分に対しても、本稿の執筆者の様な少し変わった技術者達でも構わないから一定勢力を充て続けている事が、その開発

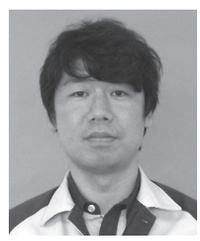
力のサステイナビリティの保証のために肝要であるかも知れない。

参考文献

(1) 坂崎明彦、太田康之：スバルと12弦ギターとブリュートナーと、スバル技報、No.40（2013）、p.213-218
(2) 会津東山温泉向瀧公式HP、http：//www.mukaitaki.com/cuisine/spring/（2014.4閲覧）
(3) 坂崎明彦：新人類の早期戦力化教育方法、スバル技報、No.34（2007）、p.185-189
(4) ピアノクリニックヨコヤマHP、スタッフ日記、http：//www.piano-clinic.jp/（2014.4閲覧）
(5) ピアノクリニックヨコヤマHP、ブリュートナー、http：//bluthner.jp/about2_1.html（2014.4閲覧）
(6) ピアノクリニックヨコヤマHP、当店の調律について、http：//www.piano-clinic.jp/（2014.4閲覧）
(7) 近藤和幸ほか：新型レガシィの音造り「ニュースバル ボクサーサウンド」の開発、スバル技報、No.30（2003）、p.81-87
(8) Red Wing HP、http：//www.redwingshoe.co.jp/legends/（2014.4閲覧）
(9) THE GIBSON、リットーミュージック・ムック、第23号（1994）
(10) 桑原晃弥：スティーブ・ジョブス全発言、PHPビジネス新書（2011）

【著　者】

坂崎　明彦


太田　康之

富士重工業株式会社

スバル自動車事業の拡充と世界進出――拡大期のスバル紹介

アルシオーネVX（1985年～ 1991年）

全長/全幅/全高(mm)　4,510/1,690/1,335
エンジン　水平対向6気筒OHC　2,672 cc
最高出力　150 PS/5,200 rpm
最大トルク　21.5 kg-m/4,000 rpm

アルシオーネはスバルのイメージリーダーカーとして、また新ジャンルの高速ツーリングカーとして、1985年にデビュー。空気力学、機能美を追求した斬新なスタイリングに、1.8L水平対向OHC・EGIターボエンジンを搭載した4WDとFFを展開。特に空気抵抗は世界でもトップレベルのCd値＝0.29（FFモデル）を達成。1987年には、2.7L水平対向6気筒エンジン（FLAT 6）を搭載したVXを発売。このモデルには油圧多板クラッチを電子制御することで前後の駆動配分を自動制御するACT-4が採用された。

スバルの質量管理の現在過去未来

Past, Current, and Future Mass Management in SUBARU

坂 崎 明 彦*1　　占 部 清 和*2
Akihiko SAKAZAKI　　Kiyokazu URABE

抄 録

最初に、スバルのDNAに関連し、中島飛行機の軽量化設計マニュアル、スバル360と初代インプレッサの軽量化について簡単に紹介する。

LEVORG、WRXのパワーウェイトレシオと重心高は、PT（プロジェクトチーム）メンバー関係者が一丸となって質量管理に努力した結果、自信を持ってお客様に一級品である事を自慢出来るレベルに出来た。

スバルの質量管理はさらなる高みを目指す。

Abstract

First of all, in relation to the Subaru DNA, I briefly introduce Mass Reduction Design Manual of Nakajima Aircraft and the weight control efforts for Subaru 360 and the first Impreza.

Subaru's project team members have done their best to work together on mass management to have the right center of gravity and power-to-weight ratio for LEVORG and WRX, and they are proud of them.

Mass management in Subaru aims for much higher place.

1. まえがき

質量管理は、自動車製造者にとって極めて重要な機密事項であるが、そのエッセンスをほんの少し御披露させて頂き、スバルの質量管理のさらなる発展と、自動車業界の活性化に繋げたい。

2. 航空機の質量管理

2.1 中島飛行機の質量管理

富士重工業の前身＝中島飛行機 では無いが、中島飛行機の生産拠点の跡地に富士重工業（株）本工場があるため、昔の遺物が時々出て来る。その中に中島飛行機の軽量化設計マニュアルがあったので以下抜粋する。

重量は飛行機の空力的特性に対して非常に大きな影響を與えるものである。之を数的に示すと全備重量10%の増加に対し前と同じ離陸性能を得るには出力を25% 増すか、翼面積 或いは CLMAX を40% 増さなければならない。又、上昇率及び上昇限度を補うには、出力で15%、翼幅で言えば22%を夫々増さなければならない。唯、速度だけが少し位重量が増しても大した変わりの無いものであるが、それでも着陸時には其の増加重量の2乗に正比例して大きな悪影響を及ぼす。

一般に機体は其の構造効率を良くする事に依って重量の軽減が出来るから、重量軽減をするには、構造上から突っ込んで行った方が寧ろ近道である。即ち、強度計算する者が優れていれば、それだけでもう重量軽減が出来る。

強度計算が余り慎重過ぎて、必要以上の強度を持たせたり、効果的でない力の使い方をする様な事が無い様、一層の努力を払い、「重量意識」とでも言うべきものを身に付ける様心掛ける事が必要である。

又、余り力の掛からない部品に対しては、重量に関する過失が最も普通に行われ、然れども余り気付かないでいる。

例えばよく製図者が金具の設計に当って、「使用中壊れるといけないから此処は1.5 mmにしよう‥‥否、安全第一に1.8 mmにして措こう。そうすれば別に強

＊1 開発改革担当部長付
＊2 開発改革担当部長 開発改革主幹

度計算は入らない。」等と話している事を屢々（しばしば）耳にする。若し、この場合、製図者が一寸（ちょっと）大体の計算をやって見れば虞らく1 mm位で強度は十分なる事が判るであろう。この様な製図者は所謂「重量意識」に目覚めていない者である。

さらに以下項別に重量軽減法を示す。

(1) 鋼の代りに Al合金 を使用出来ないか

応力の大なる点では如何なる材料も鋼に及ばないが、研究に依っては、荷重を多数の構材に分布させるか、荷重配置を変更するとかして、Al合金を使用する事も出来る。設計上是非とも重い鋼鍛造物を必要とする場合には、その代わりに応力外皮、即ち成形薄板構造を研究して見る事。

鋼使用によって得られる大きな利益は熔接可能な点にある。併し、熔接による重量増加は決して少ないものではない。即ち「トラス」構造では平均其の重量の4.3%、普通の発動機架では5%、小さい金具類では25%にも及ぶ重量増加がある。従って、熔接構造とする前には常にAl合金の使用に依って解決出来ないか考えて見るべきである。

(2) Al合金の代りにMg合金を使用出来ないか
⇒ 約35%の重量軽減。

(3) Mg、Al合金の代りに人造樹脂（プラスチック）を使用出来ないか
⇒ 夫々約14% ～ 44%の重量軽減。

(4) 金属の代わりに可塑合成材を使用出来ないか
可塑材はAl合金の40%乃至56%の比重である。

(5) 部品を単純に作れないか

(6) 結合部の数を最小限度に出来ないか？

(7) 二個以上の部材を一つに纏める事は出来ないか

Fig. 1の如く部材を1個に纏めるときは重量及び工作上非常に有利である。

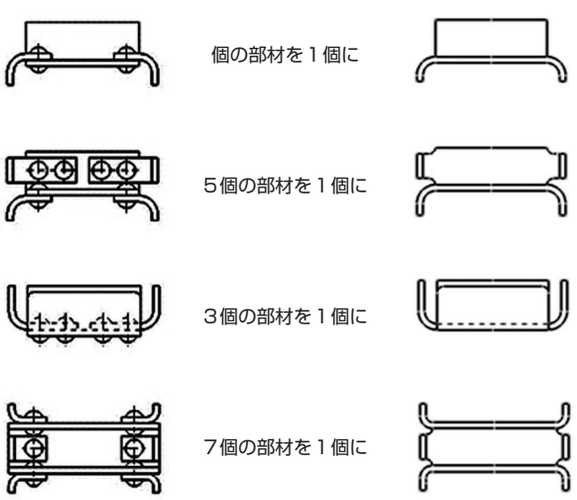


Fig. 1　Integration of parts

さらに扉構造に於ける単純化を次に示す（Fig. 2）。

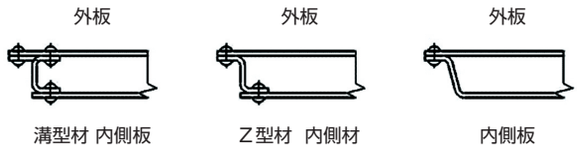


Fig. 2　Simplification of structure

4個の部材は——→ 3個に——→ さらに2個となし得る。

(8) 除去し得る部材は無いか

(9) 点熔接に出来ないか

φ2.5鋲1000本点熔接化で約300 g重量軽減。

(10) より薄肉の材料を使用出来ぬか

(11) 紐出し（ビード加工）をして薄板に出来ぬか

(12)「フランジ」付き軽減孔で薄板に出来ないか
軽減孔を設ける事は過剰な材料を除去すると同時に補強性を与えると言う一石二鳥の効果がある。

(13) 軽減孔を増す事は出来ないか

(14)「フランジ」を付け軽減孔拡大出来ないか？

(15) 円以外の形状で軽減孔面積を大きく出来ないか

(16) 除去し得る余剰材料はないか

(17) 押出し材の代わりに板曲材を使えないか

(18) Al合金の「ボルト」「ナット」は使えないか

(19) 鍛造部品に出来ないか

(20) 最終仕上（塗装）の重量増加を除去出来ないか

(21) 新材料に依る重量軽減が出来ないか

(22) より軽量な購買部品が得られないか

2.2　現在の航空機構造設計に於ける質量管理

『航空機設計の最も重要な機能の一つが質量管理であると、多くの航空機設計者は確信している。通常、新設計の基本質量推定について技術部は、質量グループのみに依存しており、これらの推定に基づいて契約上の責任を負う。全備質量を過小推定しても、過大推定しても危険である。質量推定が過大である場合は、他社と競争する事が出来ない。また過小である場合は、厳しい財務上のペナルティが課せられ製造の注文を取る事が出来ない。』と、マイクル・C・Y・ニウ氏はその著書[(1)]の中で述べており、質量管理が航空機開発の重要な問題である事は今も昔も変わり無い。

3.　スバルの過去の質量管理

3.1　スバル360の質量管理

1955年、オオタ自動車の会社更生法の申請後、十数名の技術陣は部課長と共に富士重工業へ移籍し、スバル360の開発に高い貢献をした模様である[(2)]。

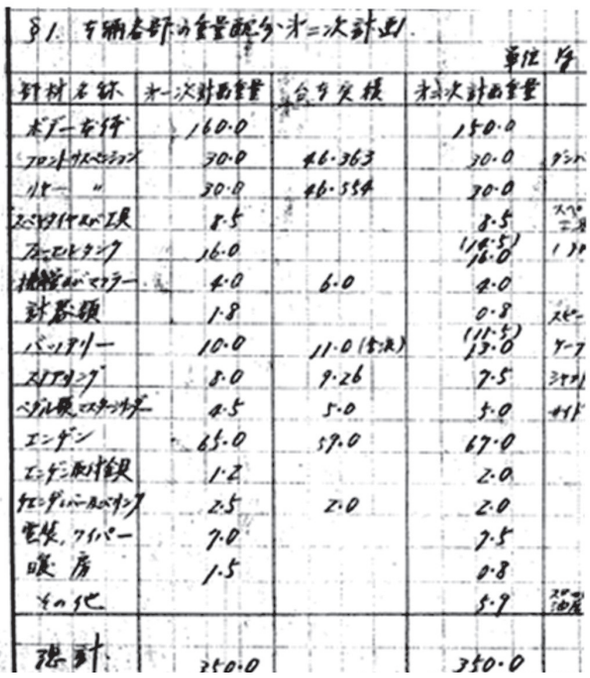


Fig. 3　Prospect of mass of SUBARU 360

移籍して来たメンバーの一人が、台車（各部の機能や全体の性能を確認するためのバラックの試作車）の実績より見て、このままでは実車はラビットスクータ2.5台分の計画重量350 kgを40 ～ 50 kg超過する事が考慮されるとの報告書を残している（Fig. 3）。

『対策として構造部材のt0.6化、カバー、フードのAL化、計器はスピードメータのみ、タンクや強度部材でないものはAL化、樹脂化などを実施する。足回り部品は1品ずつ材質、構造、寸度の再検討を行う。』等と記されており、この報告書が発行されてから質量管理が急速に細かくなったそうである。

さらにこのメンバーは自ら担当するサスペンションについて、他の機能部品群以上の質量軽減ノルマを課し、大物部品は勿論、小物部品では、ボルト、ナット、ワッシャに至るまで仔細に軽量化のシナリオを構築した報告書を残している（Fig. 4）。

3.2　初代インプレッサの質量管理

WRCに参戦始めたレガシィは、そのデビュー当時、著名なラリーストから、ノーブレーキ、ノーパワー、しかしグッドハンドリングと言われた。

レガシィ WRC参戦仕様のブレーキ、エンジンの改良と並行して、パワーウェイトレシオ、ブレーキパワーウェイトレシオ、接地面荷重の大幅な低減を図るべく、車両の大幅な軽量化のためホイールベースを60 mm短縮し、その他諸々の合理化と見切りをしたのが、初代インプレッサの基本的な生い立ちであった。

「皆が頑張って軽量化目標を達成したらフードをアルミにしてやるぞ。」と上司に言われ、皆頑張った。

Fig. 4　Mass reduction plan of SUBARU 360 suspension

報告者の一人の坂崎は足回り関係の責任者であったが、当時はスバル360の開発を経験したメンバーもまだ現役で僅かながら残っていて、その軽量化の技と精神のDNAはマンツーマンである程度伝承されていた様に思う。

技術レベルのハーモナイゼーションは面白く、アルミフードも採用して達成したインプレッサ最軽量仕様の空車重量1200 kg が、その後WRC優勝を長きに渡って競い合うライバルメーカの出して来た新型車の1200 kgとぴったり同じだったのには魂消た。

この辺りの経緯については、スバル技報2010 No.37「スバル車のタイヤと馬力荷重の選定方法」にも記述があるので参考にして欲しい。

4.　スバルの現在の質量管理

スバルの現在の質量管理の課題は、

①質量は勿論の事、重心高、重配についても推算精度を高める事。

②他社を凌駕する質量関連諸元を実現するための具体的な、開発、管理の方策を持つ事。

等である。

そのためには数表だけではなく、CADも有効なツールで、スバルの開発では、2003年発売のR2で、部品

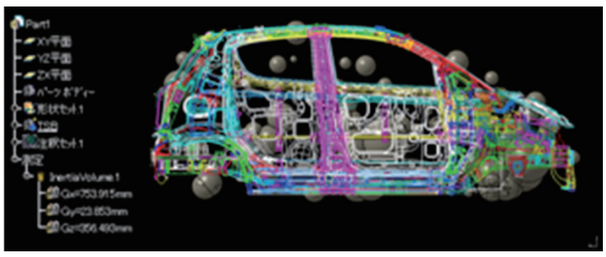


Fig. 5　Mass distribution of R2

群毎の質量をアルミ球に換算して3Dデータ上にマニュアルでプロットし、全部の球を合わせた重心、慣性主軸向き､慣性能率の大きさを見える化する取組が、設計管理部門で試されていた(Fig. 5)。

4.1　推算精度の向上

スバルは水平対向エンジン、低重心を標榜しているのでその重心高の把握には、同業他社以上の慎重さを要す。

現在ではデジタル技術が進歩しているため、坂崎が試作部門に在籍時、デジタルモックアップ担当者は、その可能性をアピールするために、3D CADデータに紐付けされたインプレッサの部品群毎の質量球をE-BOM的なデータベースから引当てて、質量管理に使えないかトライを行っていた(Fig. 6)。

その後、坂崎と占部が現在の所属にて質量管理を開始して、重心高の実測値と、上記CADデータを付き合わせるとなかなか合わない。

そのため、これも試作部門のリバースエンジニアリング担当者に、御恥ずかしい話ではあるが、自社の車をリバースして貰い、部品群毎に重心位置と質量をデジタル計測して、3Dデータの中に質量球として入れ込んで貰ったのがFig. 7である。

Fig. 6と7の画像とデータを突き当わせて、データの不備を設計にフィードバックして修正して貰い、計測での誤差の要因を徹底的に検証して、押えるべき所はしっかり押える様にして、漸く計算と実測の辻褄が合う様になる。

参考迄に、Fig. 8の写真は2004年に、関係企業のFTSに富士重工業の板橋らが委託して、部品群を一つずつ外して､質量分布を測定して貰った時の写真で、重心計測には、吊るすか3点測りが分かり易い。

この方法で気をつけるべきは液類の取扱いである。

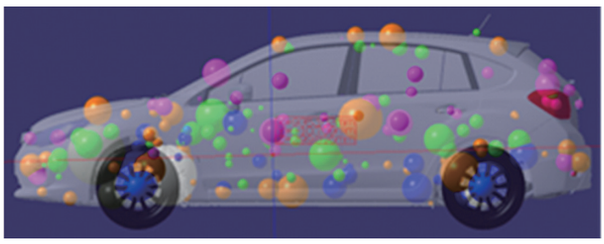


Fig. 6　Mass distribution of Impreza E-Bom data

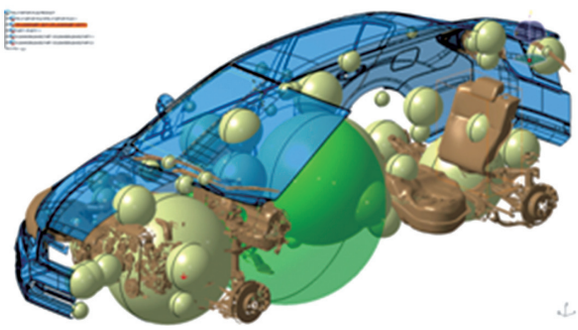


Fig. 7　Mass distribution of Impreza reverse data

Fig. 8　Measurement of mass distribution

NHTSA及びSAEペーパ[3][4][5]によると、重心高の測定精度は～'88では±25 mmを越えていたのが、～'91では±19 mm、～'92では±6 mm､'95～はチルト・テーブル式で重心高の値の±0.5%に向上したとの事。重心高約500 mmとすると、±2.5 mm程度になる。報告者の占部、坂崎の計測も±2 mm程度、スバルの実験の達人では±1 mm程度が実力の様である。

戦艦大和の進水での喫水は、前が60 mm浅かったので3000 tの水を全部に注入して水平にしたとの事[6]。小型自動車の全長は4.7 m以内であるから、戦艦大和の全長263mで比例計算すると、

60 mm × 4.7 m ÷ 263 m=1.07 mm

で、比率的には大艦の喫水管理精度も小型自動車の重心高管理も努力限界は同じであると言える。

4.2　LEVORG 、WRX の質量管理の実際

元技術本部副本部長の平川は、現在スバルが世界のトップレベルであると市場で高く評価されている各要素に多大な影響を与えた人物である。坂崎の入社以来兄貴分的な存在で、質量管理については開発部門に危機感を自覚させ、全体のベクトルを合わせるために、坂崎を皆の前で厳しく指導するデモを多用した。諸大名に言う事を聞かせるために、信長が見せしめに秀吉を派手に蹴飛ばしたりするシーンが時代劇には良く登場するが、それに似た所がある。「坂崎君可愛そうだね。定年退職しても平川さんに皆の前であそこまでボコボコにされなければ成らないのかい。楽に隠居はさせて貰えないのかい。」と後輩の部長クラスから慰められた事もある位だから、結構演技は真に迫っていたのだと思う。正論で押して来る平川のアピールは目標達成活動、特に重心高下げの後押しになったと言わざるを得ない。

質量軽減、重心高下げ活動がスランプ状態に陥り、事務方は、各設計、実験の部長級を集めて、平川副本部長の前で御前会議を開き活動促進する事を提案した。然しながらプロジェクトメンバーの士気は高く、「御前会議？部長が出て来たからどうなると言うんだ。部長が出て来て何とかなるなら俺達は能無しか？」、「部長や副本部長なんてみっともない事言わないで俺達でなんとかしようよ。」と言う機運になった。

技報にいったい何を書いているんだと思われる読者もいらっしゃるかも知れないが、質量軽減、重心高下げは、学問では無く、芸に近い問題で、関わる人間の根性とセンスが発揮される場を、如何に演出して作り出すかが重要なポイントである。

その後、LEVORG の PT は、前述平川をして、「非常に良いPTになって来ている。人が育っている。何か困難な問題が発生してもPT内で協力して何とかしようと言う機運が高まっている。」と言わしめる状態になった。

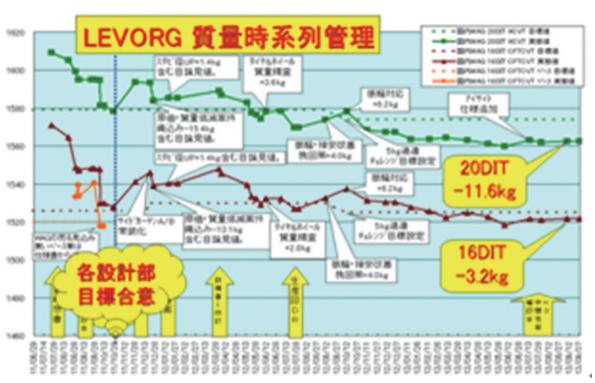


Fig. 9　Transition of mass of LEVORG

Fig. 10　Center of gravity position management image

Fig. 9は、実際のLEVORGの実態質量の変遷を示す門外不出のグラフで、目標に対してPTメンバ協力して目標質量に収めて行った様が見える。（大部分の字が潰れているのは門外不出故で、御容赦願う。）

同じ様な活動が重心高、重配についてもなされた事は言うまでもなく、Fig. 10に管理イメージを示す。

指針を示せば、質量管理事務方は踏ん反り返っていれば良いと言うものではなく、既出のマイクル･C･Y･ニウ氏はその著書の中で、質量管理者の各部門とのギブアンドテイクの信頼関係を力説しており、報告者の一人の通称『占部効果』と言われる働きも重要であった。

PT、PGM（プロジェクトマネージャー）の努力の結果として、LEVORG、WRXのパワーウェイトレシオと重心高は、自信を持って御客様に一級品である事を自慢出来るレベルに出来た。

5.　スバルの未来の質量管理

5.1　質量管理の先見先手先攻

スバルの開発者は、御客様とスバルの使われ方を良く考え、開発の前提条件を明確にし、その土台の上にピラミッドの様に確定要素を積み重ね、やり直しの無い開発をしなければならず、Fig. 11に拙い質量管理の典型を示す。

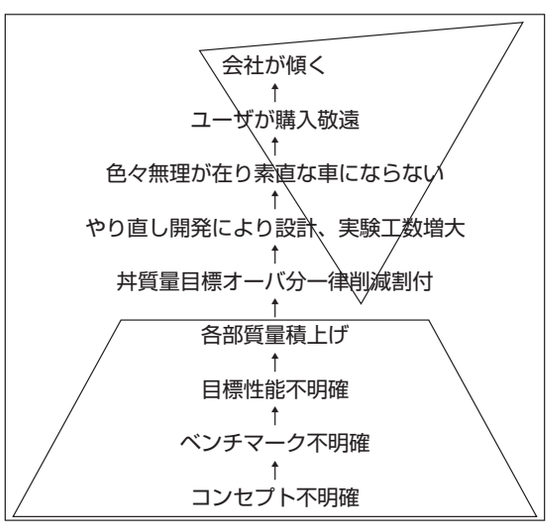


Fig. 11　Bad mass control management

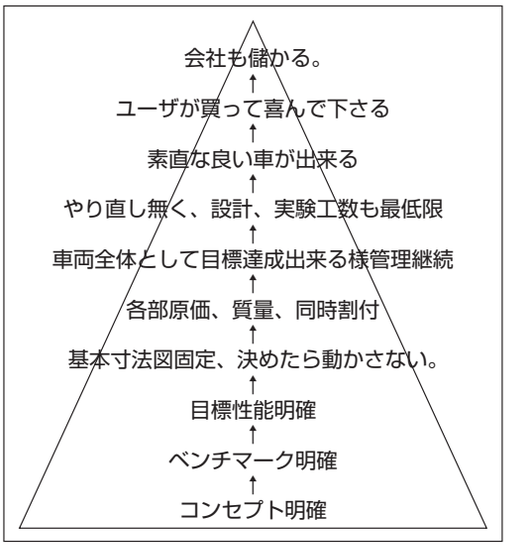


Fig. 12　Good mass control management

Fig. 12に上手い質量管理の典型を示し、質量管理者は先見、先手、先攻でこの様に仕事を進めるべきである。

5.2　車両慣性主軸管理への挑戦

スバルのベテラン操縦安定担当者の多くは、量産したスバル車の中で、空荷のサンバートラックが一番望ましい前後方向慣性主軸を持っていたと認識している(Fig. 13)。

また、彼等はサンバーバンのルーフキャリアで、車両の後上方だけに過積した場合に、重心高、重配の問題だけで無く、慣性主軸が前下がりになる事により、操安性に影響する事を知っている(Fig. 14)。

車両慣性主軸の向きの車両運動性能に及ぼす影響について、慣性主軸は車両前上がり、ロール軸は車両前下がりが宜しいとの一連の他社知見[7][8][9][10][11]があり、以上を裏付けている。

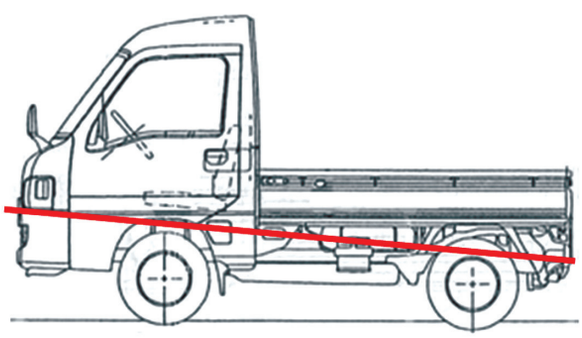


Fig. 13　Forward up axis of inertia image

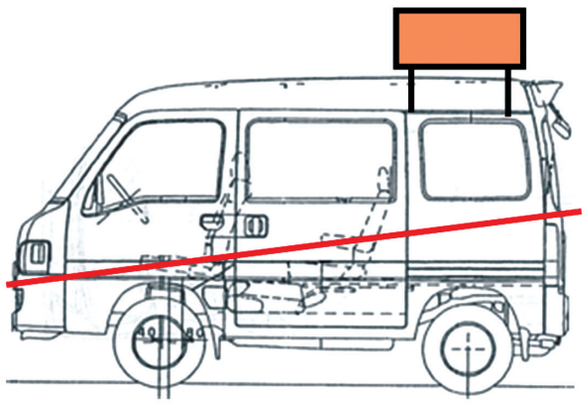


Fig. 14　Forward down axis of inertia image

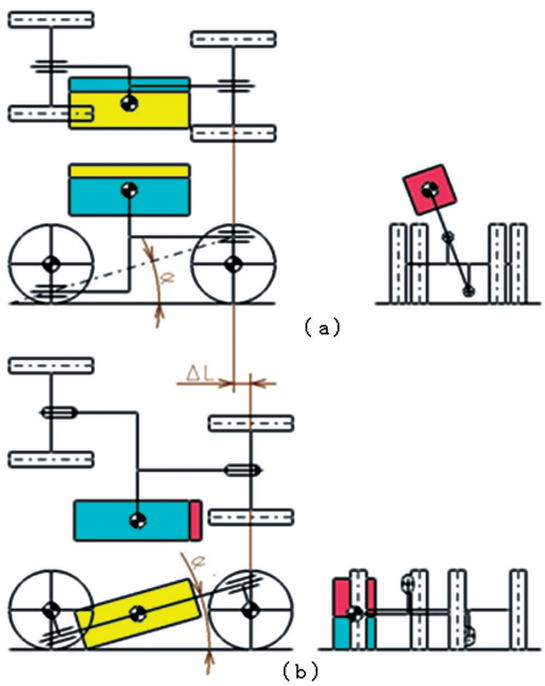


Fig. 15　Three degrees of freedom model in roll motion

他社の理論モデルで一番宜しいのは、Fig. 15(a)[11]と思われるが、これは極端な例として車両バネ上を90度ロールさせたFig. 15(b)で明らかな様に、ロールに伴いロールセンタ軸の前下り角度 $\alpha \neq \alpha'$ が変化し、ホイールベースが△L変化するので、制駆動、AWDで前後拘束の強い場合にも対応した、簡易モデルを開発して、他社に無い慣性主軸を設定出来る可能性のあるスバル水平対向エンジン縦置きAWDの基礎特性を解明したい処である。

5.3　車両質量管理の技能と精神の伝承

既に、スバルの開発部門には軽量であったスバル360の開発に直接関与したプロパー社員は一人もいなくなっている。また、当時としては軽量であった初代インプレッサの開発をリードしたメンバーも間も無く殆どいなくなるであろう。

この様な状況下、その技能と精神を後進に引き継ぐ事は、スバル開発のサステイナビリティを保証する上で極めて重要であり、温故知新出来る環境整備に心して掛かる。

参考文献

(1) マイクル・C・Y・ニウ：航空機構造設計、p.615
(2) http：//www.jahfa.jp/jahfa10/pala/person2.pdf
(3) Gary J.Heydinger,et al.：Measured Vehicle Inertia Parameters-NHTSA's Data Through November 1998,SAE Paper, 1999-01-1336、p.1-2
(4) Background to NHTSA NCAP Ratings for Rollover Resistance, http：//www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NHTSA Administration/Presentations & Speeches/Associated Files/PatNAS.ppt（2014.4月閲覧）, p.15
(5) Light Vehicle Rollover, http：//www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NHTSA Administration/Presentations & Speeches/Associated Files/SteveNAS.ppt（2014.4月閲覧）、p.12
(6) 前間孝則：戦艦大和誕生 下、1999（講談社）、p.66-73
(7) 樋口実、種子田和宏、芝端康二、皆川正明：ばね上挙動が車両運動性能に与える影響、自動車技術会学術講演会前刷集、No.107-01（2001）、p.15-18
(8) 平原道人：ロール慣性主軸の傾きが運動性能に与える影響、自動車技術会学術講演会前刷集、No.76-03（2003）、p.9-14
(9) 酒井英樹、穂積仁、杉山瑞穂：ロール特性が車両運動に及ぼす影響、自動車技術会学術講演会前刷集、No.121-05（2005）、p.13-18
(10) 土井崇司、野沢孝司、鳥谷和史：車両諸元が操舵時の運動性能に及ぼす影響解析、自動車技術会学術講演会前刷集、No.104-06（2006）、p.15-20
(11) 皆川正明：車体のロールを考慮に入れた3自由度車両モデルのコンセプト、自動車技術会論文集、39巻4号（2008）、p.17-22

【著　者】

坂崎　明彦

占部　清和

富士重工業株式会社

スバル自動車事業の拡充と世界進出――拡大期のスバル紹介

アルシオーネSVX（1991年～ 1996年）

全長/全幅/全高(mm)　4,625/1,770/1,300
エンジン　水平対向6気筒DOHC24バルブ 3,318 cc
最高出力　240 PS/6,000 rpm
最大トルク　31.5 kg-m/4,800r pm

スバル初の本格3ナンバー・スペシャリティークーペ「アルシオーネSVX」。全域でスムーズな回転フィールを発揮する3.3 L “BOXER-6”。4WDのハンドリングを高い次元に引き上げた新開発のVTD-4WDシステム。アクティブセイフティ思想に基づく4センサー4チャンネルABSと4WSの採用など、最先端の技術を装備した。独創的で存在感のあるスタイリングはジウジアーロの提案を基本にした。

特許紹介

SUBARU patent review

技術開発部

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。

乗員保護装置

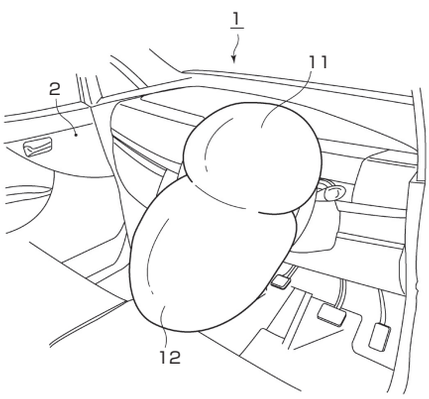
【出願】特許第5377582号
【発明者】長澤　勇、馬場　紀佳、中瀬　哲也

【発明の背景】

乗員保護装置は、ステアリングのセンタパッドにエアバッグ袋体を折り畳んで収容し、車両への衝撃時に乗員側に向かってエアバッグ袋体を展開させることで、衝撃から乗員を保護するものが知られている。センタパッドはステアリングとともに回転し、円形状をなして形成されたエアバッグ袋体は主に乗員の頭部を保護している。

近年、乗員の頭部を保護するのみならず、胸部、腹部を保護したいという要求が高まっている。特に、乗員の胸部にはシートベルトが掛け渡されているため、衝撃時に乗員の胸部を圧迫してしまう可能性がある。

非回転構造のセンタパッドにエアバッグ袋体を搭載し、このエアバッグ袋体の形状を頭部保護部、胸部保護部及び腹部保護部からなるように形成した自動車用エアバッグ装置が考案されている。しかし、乗員の頭部と胸部とで膨張展開態様を異ならせているものではなく、改善の余地がある。



エアバッグ袋体の膨張展開時を示す斜視図

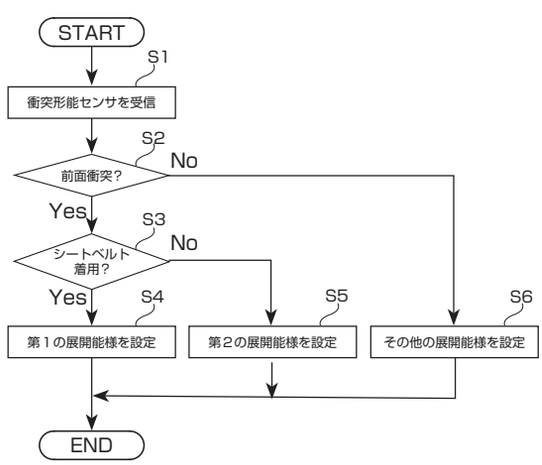
【発明の概要】

本発明の乗員保護装置は、車両への衝突により生じる衝撃から乗員を保護するもので、ステアリングに対して非回転構造のセンタパッドに収容され、乗員の頭部を保護可能な第1エアバッグ袋体及び乗員の胸部を保護可能な第2エアバッグ袋体を含む複数のエアバッグ袋体で構成している。

車両への衝突態様に応じて、第1及び第2エアバッグ袋体を互いに独立して膨張展開させ、膨張展開時の複数のエアバッグ袋体の膨張展開態様を制御する膨張展開態様制御手段をもつ。

膨張展開態様制御手段は、乗員がシートベルトを着用していると判定した場合は、第1エアバッグ袋体よりも第2エアバッグ袋体を先に膨張展開可能となるよう制御する。また、乗員がシートベルトを着用していないと判定した場合は、第2エアバッグ袋体よりも第1エアバッグ袋体を先に膨張展開可能となるよう制御する。

これにより、車両への衝撃から乗員をより効率的に保護することができる。



乗員保護装置の出力制御手段の制御フロー

車両の運転支援装置

【出願】特許第5345350号
【発明者】澤田　慎司

【発明の背景】

近年、自動車等の車両においては、車載のカメラやレーザレーダ装置等により外界の走行環境を検出して自車両との衝突可能性のある障害物を認識し、警報・自動ブレーキ・自動操舵といった各種制御を実行することで衝突を回避し、安全性を向上させる技術が実用化されている。また、上述のカメラやレーダ装置等ではドライバの視野範囲以外のものまでは検知できないことから、自車両外部との通信により、ドライバ視野以外の情報を得られる技術が開発されている。

例えば、GPSからの受信情報に基づいて必要な地域の地図データを読み出し、この地図データに基づいて自車両と障害物の軌跡を推定し、交差する場合に警報する支援装置が知られている。しかし、自車両のドライバに見えている車両と見えていない車両とに対して同じタイミングで警報を行うため、ドライバに見えている車両すなわちドライバが当然認識している車両に対して警報がなされて煩わしさを感じさせるばかりでなく、ドライバに見えていない車両すなわちドライバが認識していない車両に対しては、警報が遅れる可能性がある。

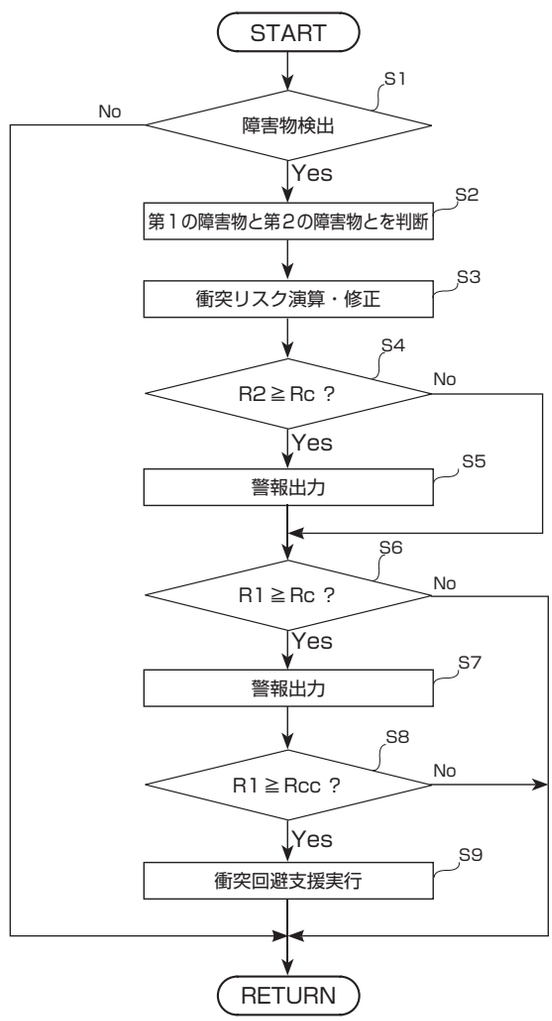
自車両のドライバが視認可能な障害物と視認困難な障害物との双方に対して適切なタイミングで運転支援を行うことのできる車両の運転支援装置が求められている。

【発明の概要】

可視光による第1の検出装置と、可視光によらない第2の検出装置とを用いて自車両外部に存在する障害物を検出し、第1の検出装置で検出される障害物を自車両のドライバが視認可能な第1の障害物として判断するとともに、第2の検出装置で検出されて第1の検出装置で検出されない障害物を自車両のドライバが視認困難な第2の障害物として判断する(S2)。

各障害物の衝突リスクを修正し、第2の障害物の衝突リスクが第1の障害物の衝突リスクよりも大きくなるように調整する(S3)。そして、第2の障害物の衝突リスクR2を閾値Rcと比較し、R2≧Rcのときに第2の障害物に対する警報を出力する(S5)。また、R2<Rcのときには、第1の障害物の衝突リスクR1を閾値Rccと比較し、R1≧Rccの場合、衝突の危険性があると判断して自動ブレーキや回避操舵を行う(S7)。

これにより、自車両のドライバが視認可能な障害物と視認困難な障害物との双方に対して適切なタイミングで運転支援を行い、安全を確保する。



警報判断処理のフローチャート

車両の駆動力制御装置

【出願】特許第5244169号
【発明者】西田　祐之、田中　敬樹、森下　誉仁、
鯵本　恵介、安永　慎也

【発明の背景】

パワートレインを構成する自動変速機として、例えば無段変速機においては、変速モードとして、予め設定された変速特性に従って変速比を自動で制御する自動変速モードに加え、予め設定された複数の変速段の何れかを手動で選択することによって所定の固定変速比に変速可能なマニュアル変速モードを備えたものが知られている。

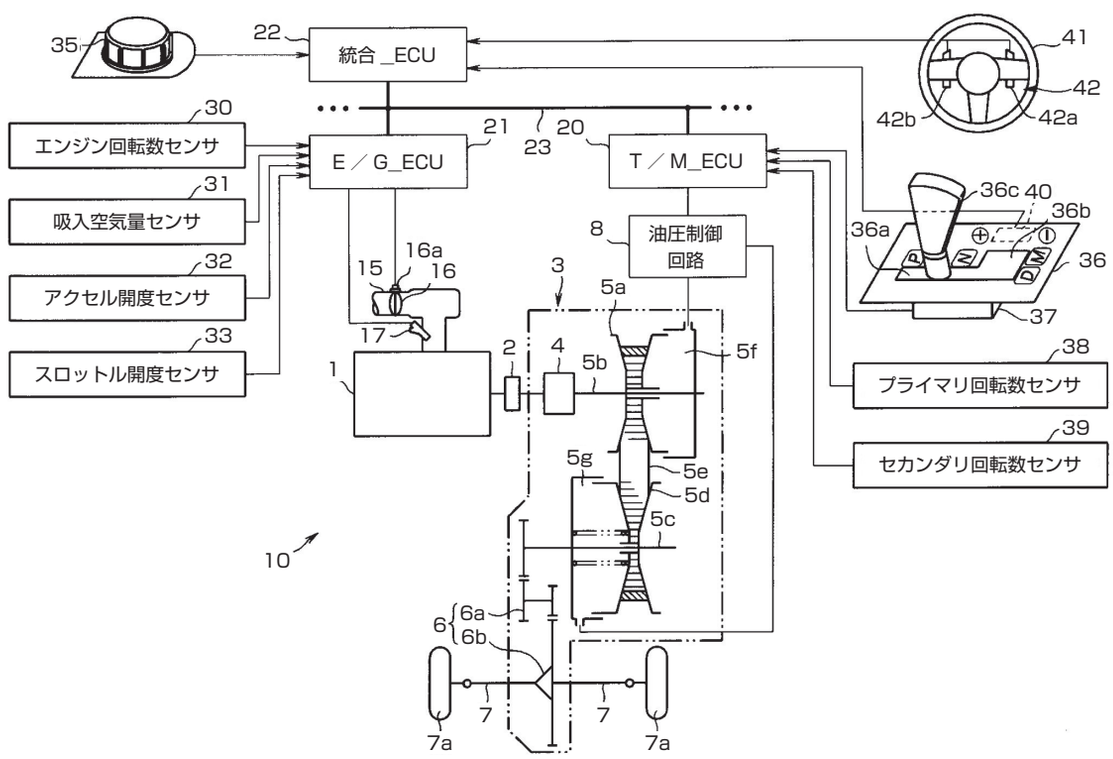
この場合、マニュアル変速モード選択時は、予め設定された自動アップシフト／ダウンシフト回転数の範囲内においてはドライバが選択した変速段が維持される。そのため、上記回転数の範囲内において、変速段を手動で選択出来ない状況下において、ドライバが加速意図を持ってアクセルを踏み込んだ場合、当然変速は行われず、所望の加速度が得られないため、車両の加速応答がドライバの意図に沿わなくなる。この状況を改善するとマニュアル変速モードの利便性が改善できる。

【発明の概要】

パワートレインを構成する自動変速機の変速モードとして、マニュアル変速モードが選択された時に、自動変速機の入力回転数が予め設定されたキックダウン許可回転数以下であり、且つ、ドライバによるアクセルペダル踏込量が予め設定されたキックダウン許可踏込量以上であるとき、変速段を現在の変速段よりも低速側の変速段に自動変速させる自動ダウンシフト制御をおこなう。

自動ダウンシフト制御は、キックダウン許可回転数として駆動力特性のモード毎に異なる回転数が設定され、アクセル操作に対する応答性が高い駆動力特性のモードであるほど低く設定されている。また、自動ダウンシフト制御は、キックダウン許可踏込量として駆動力特性のモード毎に異なる踏込量が設定され、アクセル操作に対する応答性が高い駆動力特性のモードであるほど大きく設定されている。

これにより、マニュアル変速モードにおいて、ドライバの選択した変速段を所定に維持しつつ、必要に応じてドライバの意思に合致した違和感のない自動変速を行うことが可能となる。



車両に搭載されるパワートレインの概略構成図

電気自動車

【出願】特許第5259220号
【発明者】佐川　耕平、渡部　直樹、椎名　岳人、
山口　宜久、田村　高志、石田　真吾

【発明の背景】

電動モータと内燃機関とを有する車両(HEV)には、ガソリンエンジン等の内燃機関で燃焼させる化学エネルギーを供給するための燃料供給用の給油口が設けられる。

また、蓄電体に対して外部から電気エネルギーを供給するための充電口が設けられるものがある。そのようなタイプの車両はプラグインHEVと言われており、このタイプの車両には急速充電用の充電口と通常充電用の充電口とが設けられることがある。

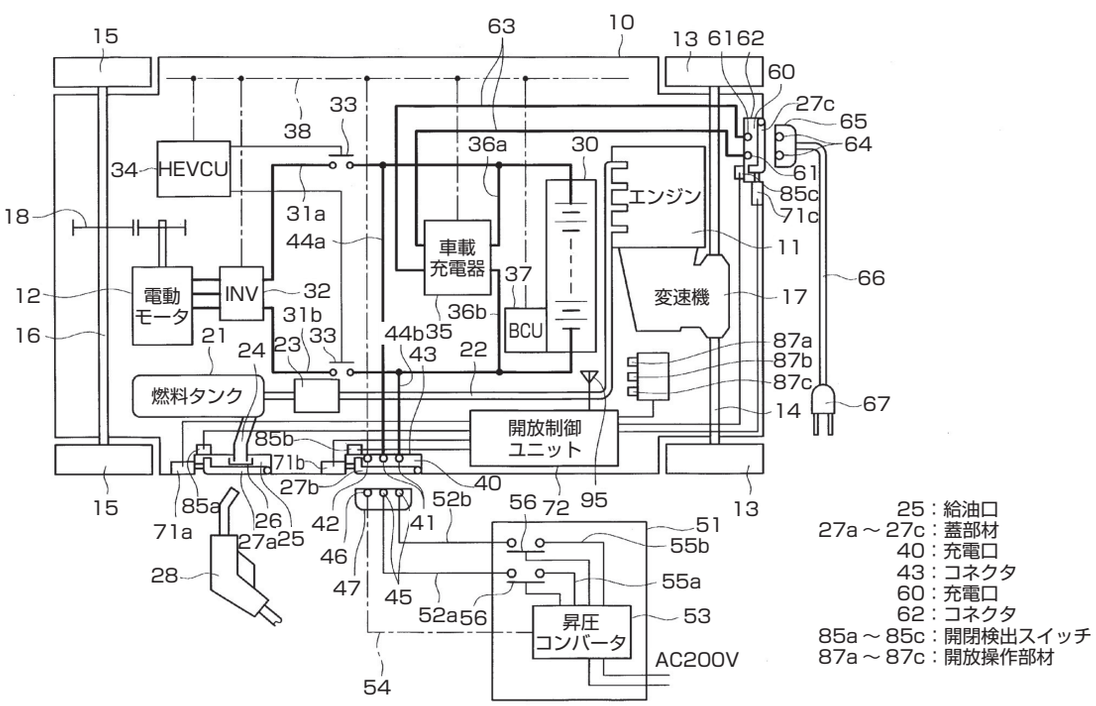
給油口と充電口とがともに同時に開放されるようになっていると、揮発性の高い燃料の給油作業と、火花が発生する可能性のある充電作業とが同時に行われる可能性があり、このような事態の発生を防止する必要がある。また、複数の充電口による同時充電は、蓄電体の過充電や充電器の故障、さらに作業者の感電につながる可能性があり、これらも同時に行われるべきではない。

【発明の概要】

本発明の電気自動車は、電動モータと内燃機関とを動力源として備えた電気自動車である。車体には、燃料タンクに燃料を供給するための給油口、蓄電体に電気エネルギーを供給するための急速充電用の充電口と通常充電用の充電口が、それぞれエネルギー供給口として設けられている。

給油口および急速充電用の充電口と通常充電用の充電口は、蓋部材とそのロック機構により閉塞状態と開放状態とに切り換えられる。1つの蓋部材の閉塞が解除されると、他の全ての蓋部材は開放状態に切り換えられることが禁止され、蓋部材が開放されるエネルギー供給口は1つに制限される。

これにより、燃料タンクへの給油作業と蓄電体への給電作業とが同時に行われることが防止される。また、複数の充電口のうちのいずれかの1つの充電口が開かれると、他の充電口を開くことが禁止されるので、複数の充電口から同時に充電作業が行われることができなくなり、充電作業中に他の充電口が不用意に開放されることが防止される。したがって、給油口や充電口等の複数のエネルギー供給口を有する車両において、安全かつ円滑にエネルギー供給作業を行うことができる。



電気自動車を示す概略図

蒸発燃料処理装置

【出願】特許第5171884号
【発明者】田中　秀樹

【発明の背景】

燃料タンクの給油口に取り付けて使用され、燃料タンク内で発生した蒸発燃料を吸着するため、タンクキャップ内に吸着剤である活性炭を封入したタンクキャップ型のキャニスタが提案されている。このようなタンクキャップ型のキャニスタにおいては、簡単な構成によって蒸発燃料を処理することができるため、汎用エンジン等の蒸発燃料処理装置として採用されることが多い。

このキャニスタは、タンクキャップに対して単に活性炭を充填する構造であることから、活性炭全体に蒸発燃料を行き渡らせることが困難である。すなわち、活性炭量に対する蒸発燃料の吸着効率が低いことから、要求される蒸発燃料の処理能力を確保するためには、多くの活性炭の充填が必要となりキャニスタが大型化してしまう。

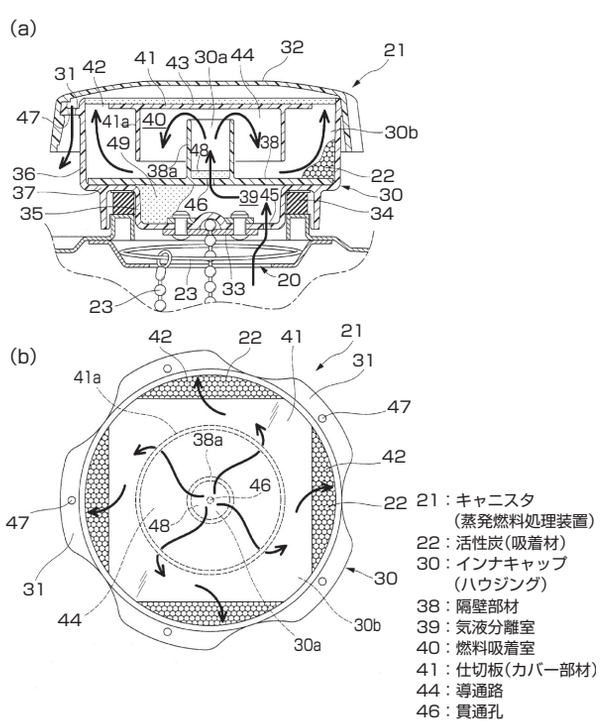
また、活性炭に液体燃料が浸透してしまうと、活性炭の性能が劣化することから、活性炭への液体燃料の浸透を防ぐことが重要である。特に、様々な機器の動力源となる汎用エンジンにおいては、燃料タンクが振動したり傾斜したりすることも想定されるため、活性炭に対する液体燃料の流入を防止する構造が求められる。

【発明の概要】

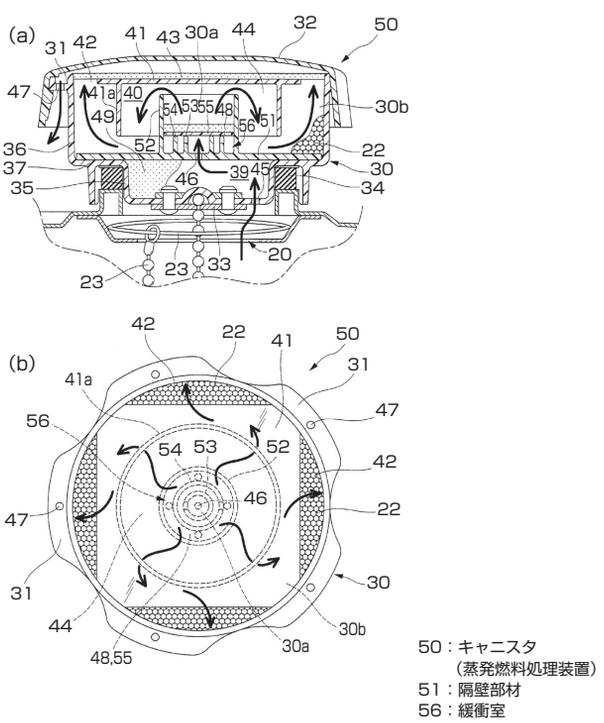
タンクキャップ型キャニスタの内部構造として、隔壁部材およびカバー部材により、活性炭が充填される燃料吸着室に導通路を区画するようにした。蒸発燃料を含んだ空気はこの導通路に沿ってより長い距離を流れるため、燃料吸着室の隅々までの活性炭を活用することができ、効率良く蒸発燃料を吸着させることが可能となる。これにより、必要な蒸発燃料の処理能力を確保しながら活性炭の充填量を削減することができ、キャニスタの小型化および低コスト化を達成することが可能となる。

また、隔壁部材の中央部に形成される貫通孔を介して気液分離室と燃料吸着室とを連通させることにより、燃料タンクが傾斜した場合であっても、活性炭への液体燃料の流入を防止することが可能となる。

さらに、上記構造に対して気液分離室と燃料吸着室との連通部に、迷路構造を有した緩衝室を設けることで、より大きな燃料タンク傾斜にも対応することが可能となる。



キャニスタの効率化および液体燃料流入防止構造



緩衝室を設けた液体燃料流入防止構造

繊維強化樹脂と金属との接続構造、及び繊維強化樹脂と金属との接続方法

【出願】特許第5172983号
【発明者】濱田　圭佑、長田　保

【発明の背景】

繊維強化樹脂複合材（Fiber Reinforced Plastics）は、航空機、自動車、船舶あるいは一般産業機器の構造用部材として広く用いられている。例えば、炭素繊維やガラス繊維等の無機物系強化繊維を縦横に配して織り込んだ織物にエポキシ樹脂などの樹脂を含浸硬化して形成したものが知られる（CFRP、GFRP、AFRP等）。

しかし、すべてを繊維強化樹脂複合材で構成せず、一部に金属材を適用しなければならない場合も少なくない。そこで、繊維強化樹脂複合材と金属材と高強度に接合することが課題となる。従来、繊維強化樹脂複合材と金属材とを直接接着することにより、締結具を排して軽量化等を図る技術が提案されている。

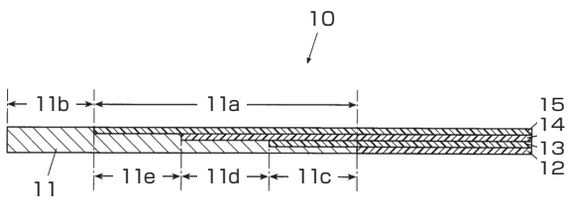
しかし、従来技術にあっては、繊維強化樹脂複合材及び金属材をそれぞれ2層以上にして交互に重ねた構造によって、平面や任意の曲面をもった形状を構成することは困難であり、要求される総厚内において各層の層厚をより薄く、より多層化するには自ずと限界が生じる。

【発明の概要】

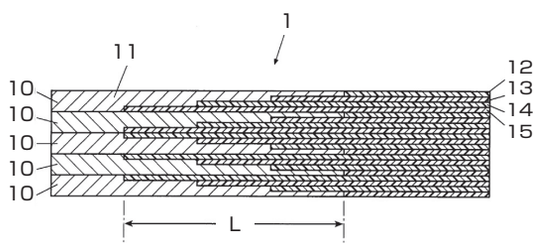
本接合構造は、ステップ状接合面を構成する端部が端面方向に向かって段階的に薄くなるステップ状構造に形成された金属材と、ステップ状構造上を端部でフラットに埋めるように積層された繊維強化樹脂複合材とからなる要素を一枚として、これを積層する構造又は手法における接合技術である。

ステップ状接合面を多段化することはもちろん、ステップ状接合面を介して交互に重なる繊維強化樹脂層及び金属層を薄い総厚内でも多層化することが容易である。この多層化により、繊維強化樹脂と金属との総接着面積が大きく確保され、接合強度等の特性が向上する。また、多層化した金属部を溶接することにより、任意の形状の部品と接合することが可能になる。適用する金属材の種類は問わない。

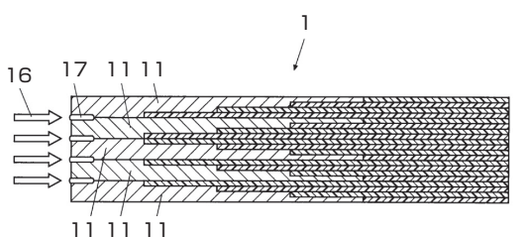
そのため、十分な接合強度でありながらステップ状接合面の形成長さを短くすることが可能となる。また、衝撃荷重や引張・圧縮・曲げ等の繰り返し荷重を受けた場合、1層のステップ状接合では完全分断又はほぼ半分まで剥離破壊されるが、本接合構造では同荷重条件でも剥離が生じにくく、外面の一部の剥離にとどめることが出来る。



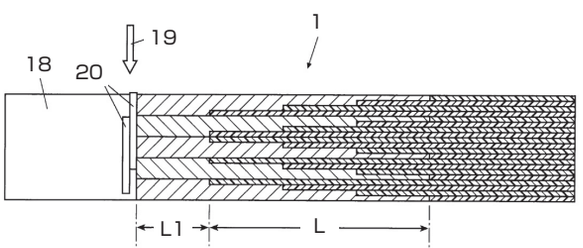
繊維強化樹脂と金属との接合構造の一枚の要素の断面図



繊維強化樹脂と金属との接合構造の断面図



金属部の端部溶接断面図



任意の部材との溶接断面図

社外発表一覧表（2013.1 ～ 2013.12）

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 （○は代表者）	所 属
2013.01	2013 SAE Government-Industry Meeting（U.S） “Advanced Driver Assistance Stereo Camera System and it’s Acceptance in the Japanese Market”	関口 守	電子商品設計部
2013.01	電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーション基礎研究会 「ドライバの認知状態共有に関する社会的受容性のアンケート調査」	志堂寺 和則[*1] 内海 章[*2] 多田 昌祐[*2] 山本 直樹[*2] 松尾 典義[*3] 鳥居 武史[*4]	＊1 九州大学 ＊2 国際電気通信基礎技術研究所 ＊3 車両研究実験第2部 ＊4 スバル技術研究所
2013.02	第41回交通科学安全セミナー 「自律検知型運転支援システムの開発・商品化」	喜瀬 勝之	先進安全PGM
2013.02	シンポジウム（No.10-12）新開発エンジン 「水平対向直噴ターボガソリンエンジンの開発」	金子 誠 二神 貴弘 脇本 一成 石田 礼 片倉 祐一	技本PGM（環境対応） パワーユニット研究実験第1部 CAE部
2013.03	電子情報通信学会ITS研究会 「ドライバの認知状態共有の効果 －歩行者の道路横断判断－」	志堂寺 和則[*1] 内海 章[*2] 多田 昌祐[*2] 山本 直樹[*2] 松尾 典義[*3] 鳥居 武史[*4]	＊1 九州大学 ＊2 国際電気通信基礎技術研究所 ＊3 車両研究実験第2部 ＊4 スバル技術研究所
2013.03	電子情報通信学会ITS研究会 「画像による顔姿勢推定を利用したドライバの運転挙動評価」	乗冨 修蔵[*1] 多田 昌祐[*1] 内海 章[*1] 山本 直樹[*1] 松尾 典義[*2] 鳥居 武史[*3] 志堂寺 和則[*4]	＊1 国際電気通信基礎技術研究所 ＊2 車両研究実験第2部 ＊3 スバル技術研究所 ＊4 九州大学
2013.04	第53回歯車技術研究会 「縦置CVT遊星ギヤ音開発」	三好 慶和	CAE部
2013.05	映像情報メディア学会のメディア工学研究会 「運転者状態の共有による交通事故低減技術の開発」	内海 章[*1] 多田 昌祐[*1] 山本 直樹[*1] 松尾 典義[*2] 鳥居 武史[*3] 志堂寺 和則[*4]	＊1 国際電気通信基礎技術研究所 ＊2 車両研究実験第2部 ＊3 スバル技術研究所 ＊4 九州大学

発表時期	会　議　名 「発表タイトル」	講　演　者 （○は代表者）	所　　属
2013.05	24th US-Japan Technology Forum “Future Cooperation for Dual-Use Technology-Research and Development for Future UAS Applications”	山根　章弘	航空宇宙カンパニー研究部
2013.06	一般社団法人日本鉄道運転協会 「スバルの先進運転支援システム『アイサイト』とその技術」	関口　守	電子商品設計部
2013.06	2013 Japan Altair Technology Conference 「BRZのボディ開発における車体CAE（剛性、衝突）活用事例」	深町　和弘	CAE部
2013.06	防衛省　技術幹部教育 「スバルの安全への取組みとアイサイトに見る、新商品創出の背景」	樋渡　穣	スバル技術研究所
2013.08	日経エデュケーションチャレンジ2013 「“ぶつからないクルマ？”スバルが生んだアイサイトの秘密」	樋渡　穣	スバル技術研究所
2013.09	SAE 2013 On-Board Diagnostics Symposium（U.S.） “SUBARU’s Experience with Test-Out of OBD Monitoring for Individual Components and Systems”	大伴　洋祐	ハイブリッド研究実験部
2013.09	ヒューマンインタフェースシンポジウム2013 「交通事故低減のための運転者状態の検知・共有技術の開発」	内海　章[*1] 多田　昌祐[*1] 山本　直樹[*1] 松尾　典義[*2] 鳥居　武史[*3] 志堂寺 和則[*4]	＊1 国際電気通信基礎技術研究所 ＊2 車両研究実験第2部 ＊3 スバル技術研究所 ＊4 九州大学
2013.09	SAE 2013 AeroTech Congress & Exhibition（Canada） “Analysis of Minute Water Droplet’s Freezing Process on Coated Surface”	遠藤　悠[*1] 木村　茂雄[*1] 長谷川 実嗣[*1] 田中　太朗[*2] 山岸　陽一[*1]	＊1 神奈川工科大学 ＊2 航空宇宙カンパニー研究部
2013.09	International Conference on Lightning and Static Electricity Seattle 2013（U.S） “Lightning Current Flow Analysis and Measurement of The Composide Structure”	○藤田　博康 西　孝裕樹 津端　裕之	航空宇宙カンパニーシステム設計部
2013.09	International Conference on Lightning and Static Electricity Seattle 2013（U.S） “Novel Estimation Method of Spark Phenomena of The CFRP Sample with A Fastener by Optical Measurement Technique Under Lightning Strike Test”	大塚　信也[*1] 古川　真陽[*1] 山口　裕貴[*1] 西　孝裕樹[*2] 津端　裕之[*2]	＊1 九州工業大学 ＊2 航空宇宙カンパニーシステム設計部
2013.09	第37回静電気学会全国大会 「航空機用CFRP 製燃料タンクにおける帯電液体の電荷挙動（東大）」	○後藤　隼紀[*1] 熊田 亜紀子[*1] 中俣　浩樹[*1] 日高　邦彦[*1] 津端　裕之[*2] 川島　愛[*3] 西　孝裕樹[*2]	＊1 東京大学 ＊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航空機設計部

発表時期	会　議　名 「発表タイトル」	講　演　者 （○は代表者）	所　　属
2013.09	フォトニックセンシング最前線 「FBG光ファイバセンサを用いた 航空機構造健全性診断技術」	副島　英樹	航空宇宙カンパニー 研究部
2013.09	9th International Workshop on Structural Health Monitoring（U.S） “Damage Detection Technology for CFRP Structures using MFC/FBG Hybrid Sensor Systems”	高橋　孝平*1 副島　英樹*1 坂部　敦彦*1 岡部　洋二*2 武田　展雄*3 吉田　幹夫*4	＊1 航空宇宙カンパニー 研究部 ＊2 東京大学 生産技術研究所 ＊3 東京大学大学院 ＊4（一財）素形材センター
2013.09	自動車技術会生産加工部門委員会 第59回 技術交流会 「ハイポイドギヤ歯切り加工における球状化焼鈍鋼の 工具磨耗予測」	白石　真一	生産技術研究部
2013.09	薄鋼板成形技術研究会 「スクラップ落下不良への取り組み」	筒井　規之	第1生産技術部
2013.09	スバルプレス成形技術研究会第40回研究会 「型製作課 改善事例の紹介」	林　　秀彰	工機部
2013.10	国際歯車会議2013 「ハイポイドギヤ歯切り加工における球状化焼鈍鋼の 工具磨耗予測」	白石　真一	生産技術研究部
2013.10	自動車技術会秋季学術講演会 「Webアンケート調査によるドライバの認知状態共有に 関する社会的受容性の検討」	志堂寺 和則*1 内海　　章*2 多田　昌祐*2 山本　直樹*2 松尾　典義*3 鳥居　武史*4	＊1 九州大学 ＊2 国際電気通信 基礎技術研究所 ＊3 車両研究実験第2部 ＊4 スバル技術研究所
2013.10	16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - ITSC 2013（Nederland） “Active Safety with Enhanced Communication among Traffic　Participants”	内海　　章*1 多田　昌祐*1 山本　直樹*1 松尾　典義*2 鳥居　武史*3 志堂寺 和則*4	＊1 国際電気通信 基礎技術研究所 ＊2 車両研究実験第2部 ＊3 スバル技術研究所 ＊4 九州大学
2013.10	第８回埼玉北部地域技術交流会 「“ぶつからないクルマ？”スバルが生んだアイサイト 、と知能化の将来」	樋渡　　穣	スバル技術研究所
2013.10	自動車技術会関東支部　講演講習会 「“ぶつからないクルマ？”スバルが生んだアイサイト 、と知能化の将来」	樋渡　　穣	スバル技術研究所
2013.11	中央大学　事業所見学会 「“ぶつからないクルマ？”スバルが生んだアイサイト 、と知能化の将来」	樋渡　　穣	スバル技術研究所
2013.11	フロンティア21エレクトロニクスショー 「“ぶつからないクルマ？”スバルが生んだアイサイト の秘密」	樋渡　　穣	スバル技術研究所

発表時期	会　議　名 「発表タイトル」	講　演　者 （○は代表者）	所　　属
2013.11	13th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition（日本） “Development of Structural Health Monitoring Technology for CFRP Structure Using FBG/PZT Hybrid Sensor System”	高橋　孝平*1 副島　英樹*1 坂部　敦彦*1 岡部　洋二*2 武田　展雄*3 吉田　幹夫*4	*1 航空宇宙カンパニー 研究部 *2 東京大学 生産技術研究所 *3 東京大学大学院 *4（一財）素形材センター
2013.11	第51回 飛行機シンポジウム 「複合材構造における被雷時の電流分布の解析および試験（FHI）」	○西　孝裕樹 津端　裕之 藤田　博康	航空宇宙カンパニー システム設計部
2013.11	第51回 飛行機シンポジウム 「雷撃試験におけるCFRP ファスナ部のスパーク検出とそのエネルギー評価（九工大）」	○松下 敬一郎*1 大塚　信也*1 岡本　昌隆*1 西　孝裕樹*2 津端　裕之*2	*1 九州工業大学 *2 航空宇宙カンパニー システム設計部
2013.11	第51回 飛行機シンポジウム 「リアルタイム画像レーダ“LiveSAR”の開発と飛行試験 ～大規模災害に備えて～」	○山鹿　光記*1 奥村　俊輔*2 犬竹　正明*3	*1 航空宇宙カンパニー 航空機設計部 *2 航空宇宙カンパニー システム設計部 *3 東北大学 名誉教授
2013.11	第51回 飛行機シンポジウム 「強制加振法による動安定風洞試験について」	中野　欣也	航空宇宙カンパニー 研究部
2013.11	第51回 飛行機シンポジウム 「チタン合金のレーザピーニングの研究」	橋本　麻由*1 足立　隆史*1 平木　　恵*1 佐野　雄二*2	*1 航空宇宙カンパニー 研究部 *2（株）東芝
2013.11	第51回 飛行機シンポジウム 「プリプレグ積層精度計測技術」	安陪　彰児*1 常田　勝男*2	*1 航空宇宙カンパニー 生産技術部 *2 三洋機工（株）
2013.11	第51回 飛行機シンポジウム 「次期固定翼哨戒機（XP-1）の構造設計」	○長尾　広志*1 大倉　昌己*1 山本　恵一*1 高木　清嘉*2 真杉　京一*3 斎藤　宗俊*4 中澤　　裕*5	*1 川崎重工業（株） *2 三菱重工業（株） *3 航空宇宙カンパニー 航空機設計部 *4 日本飛行機（株） *5 防衛省技術研究本部
2013.11	（一社）日本非破壊検査協会秋季講演大会 「耐雷銅箔を用いたTDR法によるCFRP構造セルフセンシング」	○山田　和広*1 轟　　章*2 水谷　義弘*2 鈴木　良郎*2 藤田　博康*3	*1 東京工業大学大学院 *2 東京工業大学 *3 航空宇宙カンパニー システム設計部
2013.11	（公社）自動車技術会シンポジウム 「BRZのボディ開発におけるCAE」	深町　和弘	CAE部
2013.11	第22回GKN駆動系フォーラム 「ハイブリッド用リニアトロニックの開発」	杉浦　朋亮	パワーユニット研究実験第3部

発表時期	会　議　名 「発表タイトル」	講　演　者 （○は代表者）	所　　属
2013.11	自動車技術会シンポジウム 動力伝達系の最新技術2013 「ハイブリッド・リニアトロニックの開発」	木嶋　俊介	トランスミッション設計部
2013.11	自動車技術会シンポジウム No.05-13 車体構造の信頼性を支える新たな接合評価技術の展開 「車体構造のための接合疲労試験の提案」	伏谷　裕士	材料研究部
2013.11	日本溶接学会東部支部 実用溶接講座 「スバルにおける 溶接の種類及び抵抗スポット溶接の課題」	坂井　健輔	生産技術研究部
2013.12	JMAGユーザーカンファレンス2013 「CAE技術を用いたクランクシャフト高周波焼入れ最適化（第2報）」	稲見　顕子	生産技術研究部
2013.12	12th International CTI symposium Automotive Transmissions, HEV and EV Drives（Germany） “Development of Hybrid Lineartronic”	木嶋　俊介	トランスミッション設計部
2013.12	奈良スバル自動車（株）創立60周年記念式典 「“ぶつからないクルマ？”スバルが生んだアイサイト 、と知能化の将来」	樋渡　穣	スバル技術研究所
2013.12	STAR Japanese Conference 2013 「BPMを利用した次世代ライトCAEの紹介 ～事例:混合気分布CAE（es-ice）～」	湯村　洋典	CAE部

2. 寄　稿

発表時期	寄　稿　先 「発表タイトル」	著　　者	所　　属
2013.01	自動車技術会論文集 Vol.44、No.1、January 2013、p63-68 「自動車用ハイポイドギヤの高効率化」	斎木　康平[*1] 渡辺　　健[*1] 白木 啓一郎[*1] 深町　俊介[*1] 飛澤 圭一郎[*2]	＊1 CAE部 ＊2 富士テクノサービス（株）
2013.10	日本複合材料学会誌、Vol.39、No.6（2013）、p203-211 「複合材構造健全性診断技術開発 第2章 超音波ラム波を用いた接着剥がれ診断技術」	副島　英樹[*1] 高橋　孝平[*1] 坂部　敦彦[*1] 岡部　洋二[*2] 武田　展雄[*3]	＊1 航空宇宙カンパニー研究部 ＊2 東京大学生産技術研究所 ＊3 東京大学大学院
2013.11	自動車技術会シンポジウム No.05-13 車体構造の信頼性を支える新たな接合評価技術の展開 「市場走行負荷データを活用した悪路入力の特性把握」	蓮水　正信	材料研究部
2013.11	自動車技術会シンポジウム No.05-13 車体構造の信頼性を支える新たな接合評価技術の展開 「ロードシミュレータにおける汎用波形作成の ための一考察」	蓮水　正信	材料研究部

（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

編　集　後　記

環境対応やIT化など自動車を取り巻く環境の変化が激しい中で、スバルは本物の機能に支えられた価値の提供を目指してきました。「安心と愉しさ」です。クルマの基本機能である「走る」「曲がる」「止まる」を磨き続け、「全ての人の命を守る」ことを最優先し安全機能を高めてきました。

「安心」では、そのうちの一つに、多くのお客様からご好評をいただいている先進の運転支援システム、アイサイトがあります。アイサイト(ver.2)を販売以来、累積販売台数も20万台を超えました。そのアイサイトもステレオカメラを始めシステムを一新しアイサイト(ver.3)へと進化し、新型車レヴォーグとともに発進いたします。

新型車レヴォーグは、まさにクルマとして「安心と愉しさ」を追求し、スバルの本質的な「ものづくり」の精神を結集したクルマです。一人でも多くのお客様に、クルマの本質的な価値としてスバルが追求してきた「安心と愉しさ」とともに、「スバル車を所有する悦び」をぜひ味わっていただききたいと願っております。

本第41号では、自動車部門からは、新型車レヴォーグ、新型WRXの小特集に加えて、安全、CAE、計測技術、生産技術の各分野について、航空宇宙カンパニーからは、設計、生産技術、計測技術に加えてフライト・シミュレータについて、産業機器カンパニーからは、エンジン開発におけるCAE活用について紹介しています。これらの記事が、スバルの多岐にわたる技術を理解する助けとなれば幸いです。

最後に、本号の発刊にあたり、執筆にご協力いただきました皆様、編集に尽力していただいた関係者の皆様に深く御礼を申し上げると共に、これからもお客様に提供する価値としての「安心と愉しさ」を追求し続けていきたいとの思いを添えて結びとします。　（関口）

スバル技報編集委員会構成表

委員長：荻原　浩　技術開発部
委　員：佐々木　啓　スバル商品企画本部
小林　正彦　デザイン部
荻原　浩　技術開発部(委員長兼務)
坂崎　明彦　開発改革担当部長
綾部　俊宏　車体設計部
山村　英人　外装設計部
松本　誠司　CAE部
宇津木 芳明　シャシー設計部
岡本　一樹　内装設計部
関口　守　電子商品設計部
小林　祐司　電子技術部(群馬)
阿久澤 光弘　材料研究部
秋山　徹　車両研究実験第1部
調所　弘和　車両研究実験第2部
内田　匡則　車両研究実験第3部
大矢　勇人　試作部
島野　正興　生産技術管理部
喜瀬　勝之　先進安全PGM
國枝　専　エンジン設計部
委　員：宇都宮 陽敏　トランスミッション設計部
金子　誠　技術本部 PGM
小林　春樹　パワーユニット研究実験第2部
山本　光夫　パワーユニット研究実験第3部
井上　浩一　電子技術部(東京)
大抜 由起夫　HEV設計部
木谷　泰行　スバル技術研究所
村田　巖　航空宇宙カンパニー 研究部
矢澤　哲男　産業機器カンパニー 技術部
事務局：福島　儀隆　技術管理部(群馬)
黒田　宏彦　技術管理部(東京)
矢内　幸夫　技術管理部(群馬)
大町　昭司　技術管理部(東京)
藤田 江利子　技術管理部(群馬)
中村　正彦　技術管理部(東京)
中山　和夫　富士テクノサービス株式会社
永澤　精一　富士テクノサービス株式会社
石松 喜代司　富士テクノサービス株式会社
富岡　淑美　富士テクノサービス株式会社

スバル技報第41号(非売品)

発　行　平成26年8月
発行兼編集人　スバル技報編集委員会
発行所　富士重工業株式会社技術管理部
群馬県太田市スバル町1-1
電話　0276-26-2411
印　刷　富士テクノサービス株式会社
群馬県太田市金山町27-1
電話　0276-26-2626

©2014 Fuji Heavy Industries Ltd.
禁無断転載

SUBARU