2024 No.51

SUBARU 技報

SUBARU TECHNICAL REVIEW

2.5-LITRE FOUR-CYLINDER BOXER ENGINE

EQUIPPED WITH STANDARD SYMMETRICAL AWD

NEW FORESTER 2025

SUBARU

デザイン部　水間 鑑

表紙デザイン

SUBARU のクルマには、どんな車種にも先進的な技術が詰まっています。
そんな頼もしさ、カッコよさを感じさせるようなハイテク感溢れる世界観を表現しました。
新型 FORESTER はデザインの視点から見ても、これまでとは違う進化を遂げています。
技報の表紙でも一味違う SUBARU を感じて頂けると嬉しいです。

SUBARU TECHNICAL REVIEW

2024 No.51

巻頭言

ひとつのSUBARU

常務執行役員　渡　邊　郁　夫

“自動車業界は100年に一度の大変革期にある“と言われて久しいですが、一体いつから言われるようになったのかをあらためて振り返ってみると、おそらく2016年にダイムラーのCEOがパリモーターショーでの中長期戦略の説明中に「CASE」という言葉を使ったことが始まりとされています。また、トヨタ自動車の豊田章男社長が2018年10月に「100年に一度の大変革の時代を生き抜くために」と題したメッセージでこの表現を使い、広く知られるようになりました。

一方で社内はというと、従来から100年に一度の大変革と言ってはいたものの、動きは緩やかだったのが実態でした。それが、昨年の新体制発足から急速にこの1年間で、変革に向けた動きが大きく加速したというのが実感で、これからが本当の真価を問われることになると思っています。動き出しに時間は掛かったものの、この1年間の変化のスピードには目覚ましいものがあると思います。一方で、我々が置かれている事業環境変化のスピードは、想定以上に早く、先行きが読めない状況にあるのは周知の事実です。

こんな環境下だからこそ、原点に戻り本質的に大切にすべきことに拘ることが重要で、その答えは意外とシンプルだと思っています。SUBARUの誕生から一貫していることは、「人を中心としたクルマづくり」であり、いかにこの考え方を普遍的な軸として、この大変革の時代の中でもぶれずにやっていけるかだと思います。

人を中心としたクルマづくりというのは、乗って頂くお客様に寄り添い考える事はもちろんですが、クルマづくりからアフターに至る迄、携わる全ての人を大切に考える事がSUBARUの目指す姿、“笑顔をつくる会社“そのものに繋がると考えています。あくまでも主役は人であり、「人の可能性を信じ、人を育て、人を活かすこと」を目指すことで、結果的に大きな成果を生み出します。

そのためにも、我々が携わるモノづくり領域はもちろんですが、お客様に繋がる全てのプロセスを俯瞰し、ムダなプロセスをなくしていくこと、本来、人がやらなくて良いことを無くし、本質的に人がやるべき事に注力出来る環境を作っていく事が非常に重要です。既に各々の領域でアメーバ的に行われている「想い」を込めた活動を如何に繋いでいくか、また、その「つながり」を強くすることで活動を活性化させていくことが、一つのSUBARU化そのものであり、この先が見通せない難しい環境下を乗り越える大きな原動力になると信じています。

我々は、自動車産業の大変革時代の真っ只中で、現在、新しくSUBARUらしいバッテリーEVを生み出す事を通じ、「開発プロセス」、「商品企画」、「生産体制」の刷新を合わせて行い、「モノづくり革新」と「価値づくり」で世界最先端を目指しています。

我々には、この取り組みを成功させるだけのポテンシャルと情熱があると信じています。“ONE　SUBARU”で、この大変革期を全力で駆け抜けましょう！

目　次

✦巻頭言

「ひとつのＳＵＢＡＲＵ」――――――――――渡　邊　郁　夫

✦小特集「新型フォレスター（北米、欧州モデル）」

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

2. 新型FORESTERのデザイン開発について ――髙松　雄輝・小澤　修司・西井　喬哉…… 13

3. キックセンサ式パワーリヤゲート開閉システム
長谷川　拓也・大塚　裕介・中村　昌也…… 21

✦小特集「クロストレック 新型ハイブリッド」

4. CROSSTREK新型ハイブリッドの紹介 ―――SUBARU新型ハイブリッド開発プロジェクトチーム … 26

5. CROSSTREK 新型ハイブリッドシステム用トランスアクスルの開発
高柳　良太・双木　勝之・富田　拓郎
室井　裕佐・小林　哲夫…… 33

6. CROSSTREK HYBRID向けパワートレイン制御開発
渡邉　　豪・若山　綾那・牧野　和輝
志村　　進・林　　秀樹・戸谷　好貴 …… 38

7. 新工法を用いた樹脂燃料タンクの開発 ――――小沼　広明・森田　浩也・畠中　秀明…… 43

8. CROSSTREK 新型ハイブリッド用エンジンの開発
及川　武志・白鳥　早紀・室井　裕佐
高開　勇希・末次　祐太 …… 50

✦小特集「モノづくり革新」

9. 新開発拠点「Innovation Hub」について ――仁科　沙津紀・大家　敏宏・舟串　卓也
松土　賢人・小坂　昌義…… 56

10. ソフトウェア人財育成の紹介 ――――――――ソフトウェア人財育成プロジェクトチーム …… 60

11. 高回転歯車のオイル撹拌挙動CAE技術構築 ―粟田　裕介…… 67

12. ドライバビリティ官能評価におけるAI活用の取組み
浅野　貴文・土屋　康祐・柏倉　賢二
川口　拓真・志村　春樹・新　　僚介
金子　　隆・金堀　凌也…… 74

13. モデルベースによるパワートレイン制御適合手法の構築
久保　宏幸・荒井　駿弥・有元　健眞
岸　　優介・杉浦　朋亮…… 81

14. 振動エネルギー伝搬分析に基づく車体骨格特性の要件化
阿部　啓介・田中　勇之介・山崎　　徹…… 85

15. リチウムイオン電池安全性評価の開発環境検討（設備仕様検討プロセス改革と適用）
志村　雅幸・七嵐　沢朗・今西　宏文
増見　光彦・山本　恭平…… 92

16. 樹脂爪構造のCAE解析技術とAIサロゲートモデル開発
新島　隆平・赤石　大地・太田　一宏…… 99

✦論文・解説

17. 自動車通電部位の錆生成に関する机上検討手法
内田　　晃 …… 104

18. 増速機構を用いたAWD車両挙動のメカニズム解析
山崎　義暢・小野　　瞭・清水　友博
伊藤　　奨・柿原　裕介・小栗　昌己
薮崎　佑介・川原﨑　洋文・青木 亮治 …… 109

19. 乗り心地の向上と操縦安定性の向上とを両立させる防振ゴム材料の開発
黒田　浩章・片岡　　誠・柏井　健太郎
八木澤　正規…… 117

20. 第５世代移動通信規格に対応したコネクテッド自動運転研究の取り組み
山口　史人・関口　幸相・中道　釈夫
小山　　哉・石井　一貴…… 122

21. カメラ画像認識性能開発での仮想空間の活用とその補完
長谷川　悠・小山　　哉 …… 129

22. 空調性能におけるお客様の声からの改善点の分析　-IQSコメントのテキストマイニング-
圷　　亮輔・大木　裕介…… 135

23. 未規制物質の生成機構の調査と低減技術の実証
中山　智裕・桂　　拓未・原井　惇行
石坂　浩大 …… 140

24. 歩行者事故データを用いた深層学習による頭部衝突位置の予測と検証
江島　　晋・外処　凌雲…… 147

25. 2030年死亡交通事故ゼロに向けた市場事故分析
長谷川 晴康・那須　瑞穂 …… 154

26. 前面衝突における乗員体格差が傷害に与える影響
吉川　満晴…… 159

27. 車軸動荷重に寄与するタイヤモードの実験的同定
山田　宏典・阿部　啓介・佐藤　直人
田中　　潤 …… 167

28. 充放電装置に連携したバッテリHILSシステムの構築と評価
黒田　一徳・工藤　　聡・古田　一樹
菊池　　淳…… 173

29. 次世代モータの開発 ――――――――――小林　　淳・岡田　朋之・小名川　真
田中　　豊…… 177

30. 持続可能な航空燃料適用の研究に関する紹介 ―中村　寛俊・小川　俊哉・上田　浩司…… 182

31. 空飛ぶクルマの実証研究について ――――――岡田　悟史・高谷　亮太・岩本　智文
小谷　和彰・横田　　篤 …… 187

32. ヘリコプター動力伝達部品へのレーザピーニング適用
大澤　知将・武藤　雅彦・谷嶋　真一
中村　尚人・白井　龍汰・小熊　至智…… 193

33. ヘリコプターの周囲監視のための障害物検知・回避システムの開発の取り組み
迫　匠一郎・高桑　　真・山家　大輔…… 201

✦特許紹介

34. 電動式全輪駆動車 ——— 塩川　弘晃・大黒　智寛 …… 205

35. 電動車両 ——— 末若　大輔 …… 207

36. 車両制御装置 ——— 堀口　陽宣・水谷　亮一・長田　明久
川嶋　洋平・杉本　雄紀 …… 208

37. 運転支援装置 ——— 谷田貝 拓朗・熊谷　　光 …… 209

38. 個人認識システム ——— 中村　亮太・松橋　太陽 …… 210

39. 衝撃吸収装置 ——— 向中野 侑哉・池田　　聡・長澤　　勇 …… 211

40. 車両の運転制御システム、及び、車両の運転制御装置
小山　　哉・小林　謙吾・海老沢 憲一
高橋　康宏・河村　浩彰・中西　　優 …… 212

41. 孔検査装置の送り出し装置 ——— 小野　遼平・渡邉　政雄・中畑　達雄 …… 213

42. プリプレグ積層装置、プリプレグ積層方法及び複合材成形方法
平林　大輔・青木　一行・小祝　　京
國谷　知可 …… 214

✦社外発表一覧(2023.4 ～ 2024.3 講演・寄稿)

…… 215

CONTENTS

✦Foreword

ONE SUBARU —— WATANABE Ikuo

✦Special Issue : New FORESTER

1. Introduction of SUBARU New FORESTER
SUBARU FORESTER Project Team …… 1

2. Styling Design Development of New FORESTER
TAKAMATSU Yuki, OZAWA Shuji,
NISHII Takatoshi…… 13

3. Kick Sensor Type Power Rear Gate System —— HASEGAWA Takuya, OOTSUKA Yusuke,
NAKAMURA Masaya …… 21

✦Special Issue : CROSSTREK New Hybrid

4. Introduction of New Hybrid CROSSTREK —— SUBARU New Hybrid Project Team …… 26

5. Development of Transaxle for CROSSTREK New Hybrid System
TAKAYANAGI Ryota, NAMIKI Katsuyuki,
TOMITA Takuro, MUROI Yusuke,
KOBAYASHI Tetsuo …… 33

6. Powertrain Controls Development for CROSSTREK HYBRID
WATANABE Go, WAKAYAMA Ayana,
MAKINO Kazuki, SHIMURA Susumu,
HAYASHI Hideki, TOYA Yoshitaka …… 38

7. Development of a Plastic Fuel Tank Using a New Construction Method
ONUMA Hiroaki, MORITA Hironari,
HATAKENAKA Hideaki …… 43

8. Development of New Hybrid Engine for CROSSTREK HYBRID
OIKAWA Takeshi, SHIRATORI Saki,
MUROI Yusuke, TAKAGAI Yuki,
SUETSUGU Yuta …… 50

✦Special Issue : Monozukuri* Innovation (* Monozukuri : Manufacturing)

9. New R&D Base "Innovation Hub" ——NISHINA Satsuki, OYA Toshihiro, FUNAKUSHI Takuya, MATSUDO Kento, KOSAKA Masayoshi ····· 56

10. Introduction of Software Human Resource Development
Software Human Resource Development Project Team ··· 60

11. CAE Technology Construction for Oil Stirring Behavior of High-Speed Gears
AWATA Yusuke····· 67

12. Efforts to Utilize AI for Drivability Sensory Evaluation
ASANO Takafumi, TSUCHIYA Kosuke, KASHIWAKURA Kenji, KAWAGUCHI Takuma, SHIMURA Haruki, ATARASHI Ryosuke, KANEKO Takashi, KANAHORI Ryoya····· 74

13. Development of Powertrain Control Calibration Method Using Model Base
KUBO Hiroyuki, ARAI Shunya, ARIMOTO Kenshin, KISHI Yusuke, SUGIURA Tomoaki····· 81

14. A Method for Design Requirement Definition of Vehicle Body Frame Characteristics Based on Vibrational Energy Propagation Analysis
ABE Keisuke, TANAKA Yunosuke, YAMAZAKI Toru ····· 85

15. Studies on Development Environment of Lithium-Ion Battery Safety Evaluation (Innovation in the Process of Equipment Specifications Study and its Application)
SHIMURA Masayuki, NANAARASHI Takuro, IMANISHI Hirofumi, MASUMI Mitsuhiko, YAMAMOTO Kyohei ····· 92

16. CAE Analysis Technology of Resin Claws and Development of AI Surrogate Model
NIIJIMA Ryuhei, AKAISHI Daichi, OOTA Kazuhiro ····· 99

✦Technical Paper & Explanation

17. Theoretical Rust Formation Verification Method on Energized Parts in Automobiles
UCHIDA Akira ····· 104

18. Mechanism Analysis of Vehicle Dynamics Using Wheel Speed-up System for AWD
YAMAZAKI Yoshinobu, ONO Akira,
SHIMIZU Tomohiro, ITO Susumu,
KAKIHARA Yusuke, OGURI Masami,
YABUSAKI Yusuke, KAWARAZAKI Hirofumi,
AOKI Ryouji ····· 109

19. Development of Anti-Vibration Rubber Materials
That Improves Both Ride Comfort and Handling Stability
KURODA Hiroaki, KATAOKA Makoto,
KASHIWAI Kentaro, YAGISAWA Masanori ··· 117

20. Study of Connected Autonomous Driving
with 5th Generation Mobile Communication System
YAMAGUCHI Fumihito, SEKIGUCHI Yukiharu,
NAKAMICHI Tokio, OYAMA Hajime,
ISHII Kazuki ····· 122

21. Development of Camera Image Perception: Virtual Space and Complementation
HASEGAWA Yu, OYAMA Hajime ····· 129

22. Analysis for Improvements in Air Conditioning Performance Based on the Customer
Comments -Text Mining for IQS Comments-
AKUTSU Ryosuke, OKI Yusuke ····· 135

23. Investigation of the Formation Mechanism of Unregulated Substances and
Demonstration of Reduction Technologies
NAKAYAMA Tomohiro, KATSURA Takumi,
HARAI Atsuyuki, ISHIZAKA Kouta ····· 140

24. Prediction and Validation of Head Impact Location Using Deep Learning
with Pedestrian Crash Data
EJIMA Susumu, TODOKORO Ryoun ····· 147

25. Analysis for Zero Fatal Road Accidents in 2030
HASEGAWA Haruyasu, NASU Mizuho ····· 154

26. Effect of Difference in Body Shape on Occupant Injury in Frontal Impact
YOSHIKAWA Mitsuharu ····· 159

27. Experimental Identification of Tire Modes Contributing to Dynamic Axle Load
YAMADA Hironori, ABE Keisuke,
SATO Naoto, TANAKA Jun····· 167

28. Construction and Evalution of Baterry-HILS Linked to Bidirectional DC Power Supply
KURODA Kazunori, KUDO Satoru,
FURUTA Kazuki, KIKUCHI Jun ····· 173

29. Development of Next-Generatinon Motors———KOBAYASHI Jun, OKADA Tomoyuki,
KONAGAWA Shin, TANAKA Yutaka ····· 177

30. Introduction to the Study on the Use of Sustainable Aviation Fuel
NAKAMURA Hirotoshi, OGAWA Shunya,
UEDA Koji ····· 182

31. Flight Demonstration Research of eVTOL（Flying Car Technology）
OKADA Satoshi, TAKAYA Ryota,
IWAMOTO Tomofumi, KOTANI Kazuaki,
YOKOTA Atsushi ····· 187

32. Application of Laser Peening to Power Transmission Parts of Helicopter
OOSAWA Tomomasa, MUTOU Masahiko,
YAJIMA Shinichi, NAKAMURA Naoto,
SHIRAI Ryota, OGUMA Yoshitomo ····· 193

33. Development of Obstacle Detection and Avoidance System for Helicopter Surrounding Surveillance
SAKO Shoichiro, TAKAKUWA Makoto,
YAMAGA Daisuke ····· 201

✦SUBARU Patent Review

34. All-Wheel Drive Electric Vehicle——SHIOKAWA Hiroaki, OGURO Chihiro …… 205

35. Electric Vehicle ——SUEWAKA Daisuke …… 207

36. Controlling Driving Force Distribution Ratio in Response to Prediction Oversteer
HORIGUCHI Harunobu, MIZUTANI Ryoichi,
OSADA Akihisa, KAWASHIMA Yohei,
SUGIMOTO Yuki …… 208

37. Driving Support Device——YATAGAI Takuro, KUMAGAI Hikaru …… 209

38. Personal Identification System——NAKAMURA Ryota, MATSUHASHI Taiyo …… 210

39. Impact Absorber——MUKAINAKANO Yuya, IKEDA Satoshi,
NAGASAWA Isamu …… 211

40. Vehicle Driving Control System and Vehicle Driving Control Device
OYAMA Hajime, KOBAYASHI Kengo,
EBISAWA Norikazu, TAKAHASHI Yasuhiro,
KAWAMURA Hiroaki, NAKANISHI Masaru … 212

41. Positioning Device, Hole Inspection Feed Machine of Hole Scanner
ONO Ryohei, WATANABE Masao,
NAKAHATA Tatsuo …… 213

42. Prepreg Lamination Apparatus, Method of Laminating Prepregs and Method of Molding Composite Material
HIRABAYASHI Daisuke, AOKI Kazuyuki,
KOIWAI Kei, KUNIYA Tomoyoshi…… 214

✦List of Published Reports

…… 215

新型 FORESTER の紹介

Introduction of SUBARU New FORESTER

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

抄　録

これまでのFORESTERが持つ強みである、幅広い活動範囲における、高い安全性能と走行性能が与える安心感を、外観でも表現する事を目指し、「堂々たる安心感ある佇まい ― 乗員が守られ、かつ、安心して、どこへでも行けそうな、The SUV －」を商品コンセプトに開発を進め、まずは北米及び、欧州向けで発売を開始した。

お客様に提供する価値と、それを実現する為の技術的な手法について紹介する。

Abstract

We aim to express in the exterior, the sense of security provided by high safety performance and driving performance in a wide range of activities, which has been the strength of FORESTER thus far. This product was developed under the concept of “The SUV, bold presence that offers a sense of safety to all passengers and confidence to drive anywhere” and was launched in North America and Europe.

We will introduce you the value that the car offers to customers and the technical methods adopted to realize it.

1．まえがき

1997 年のデビュー以来、「どこにでも行ける、どこでも使える」という基本価値を継承してきたFORESTERは、幅広いお客さまに受け入れられ、SUBARU の中核を担う重要なクルマに成長した。

一方で現在のコンパクトSUV 市場は、機能性の高さだけでは選ばれにくい状況へと変化しており、将来のSUBARU ユーザを担う若いお客さまに支持していただくために、“自分が求めているクルマはこれだ”と感じて貰える強い個性や堂々とした存在感のある革新的なデザインに挑戦した。

また、これまでのお客さまに信頼いただいた、機能的価値を持ったクルマであり続けるために、従来の強みである機能性や安心・安全のさらなる進化にも取り組んだ。

図 1　FORESTER 外観

図 2　FORESTER 外観

2．開発の狙い

「デザインの飛躍」と「SUV としての機能的価値の進化」、この2 つを開発の主軸に定めた。

2.1　コンセプト

お客さまの顕在/潜在ニーズから、FORESTER の強みとなる領域と強化すべき領域を軸とし、商品コンセプトを定めた。（図3）

FORESTER の機能的価値をさらに磨き上げ、それを内外装のデザインに表現することで、コンパクトSUV のカテゴリーで存在感を示す事を狙った。

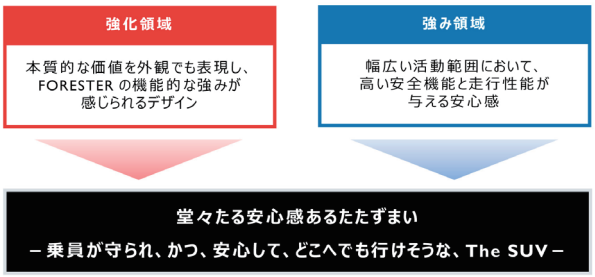


図３　商品コンセプト観

正統派SUV として、安心・安全志向のシニア層の要望に応えつつ、多様な価値観を持つ若年層のお客さまにも選んでいただけるクルマを目指した。

強化領域では、FORESTER のSUV としての価値をデザインで表現することで、見ただけで乗りたくなるような期待感を創出した。強み領域では、オン・オフ問わずに常に身近に感じられるFORESTER ならではの安心と愉しさをさらに磨き上げた。（図4）

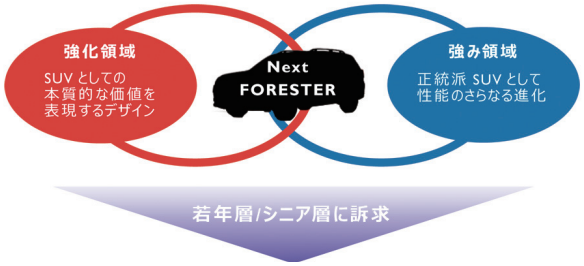


図４　商品の方向性

2.2　お客様への提供価値

正統派SUVとしての進化した機能と、力強く存在感あるデザインを実現する事で、以下の価値を提供する。（図5）

図５　提供価値

また、SUV 本来の価値が感じられるコアモデルをグレードの軸としつつ、スタイルの異なる多彩なグレードをラインナップした。

自然環境から都市生活まで、お客さまによって異なる多様なライフスタイルに合わせて好みのモデルを選択できるようにし、幅広い価値を提供する。

また、以前からあった「SPORT」グレードは、自然的なイメージから都会的なものへ再定義し、若年層や新規のお客さまに訴求する。（図6）

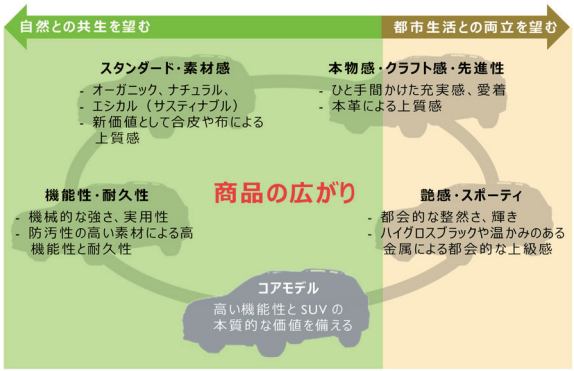


図６　グレードラインナップ

3．主要諸元

米国及び、欧州の主要な諸元を示す。

表 1 主要諸元

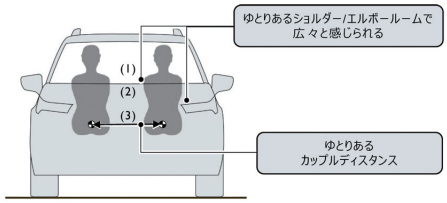
仕向	米国				
グレード	Base	Premium	Sport	Limited	Touring
■寸法・重量・定員					
全長×全幅×全高[mm]	4,655×1,830×1,730				
ヘッドルーム[フロント／リア][mm]	1,047/1,006	1,016/957			
レッグルーム[フロント／リア][mm]	1,101/1,000				
ショルダールーム[フロント／リア][mm]	1,466/1,441				
ホイールベース[mm]	2,670				
トレッド 前／後[mm]	1,565/1,570		1,570/1,575	1,565/1,570	1,570/1,575
最低地上高[mm]	220				
カーブウエイト[kg]（各グレードの最軽量）	1,592	1,619	1,638	1,639	1,662
乗車定員[名]	5				
■性能					
最小回転半径[m]	5.4				
燃費	33/26[MPG][hwy/city]			32/25[MPG][hwy/city]	
■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	電動アシスト ラック&ピニオン式				
ステアリングギヤ比	13.0：1				
サスペンション［前輪／後輪］	ストラット式/ダブルウィッシュボーン式				
ブレーキ［前／後］	ベンチレーテッドディスク/ベンチレーテッドディスク				
駐車ブレーキ形式	電気式				
■エンジン					
型式・種類	FB25 水平対向4気筒2.5 L DOHC 16バルブ				
内径×行程[mm]	94.0×90.0				
総排気量[cc]	2,498				
圧縮比	12.0:1				
最高出力	180[hp]@5,800[rpm]				
最大トルク	178[lb-ft]@3,700[rpm]				
燃料供給装置	筒内直接燃料噴射装置				
燃料タンク容量[L]	63				
■トランスミッション					
変速機形式	リニアトロニック前進無段 後退1速				
変速比（第1 速～ 8 速）	4.066-0.503		4.066-0.503（マニュアルモード4.066-0.559）		
変速比（後退）	4.379				
減速比	3.700				

仕向	欧州		
グレード	Premium	Sport	Limited
■寸法・重量・定員			
全長×全幅×全高[mm]	4,670×1,830×1,730		
ヘッドルーム[フロント／リア][mm]	1,047/1,006（サンルーフ有り：1,016/957）		
レッグルーム[フロント／リア][mm]	1,101/1,000		
ショルダールーム[フロント／リア][mm]	1,466/1,441		
ホイールベース[mm]	2,670		
トレッド 前／後[mm]	1,565/1,570		1,570/1,575
最低地上高[mm]	220		
カーブウエイト[kg]（各グレードの最軽量）	1,693	1,707	1,717
乗車定員[名]	5		
■性能			
最小回転半径[m]	5.4		
燃費	183[g/km][CO2]		
■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	電動アシスト ラック&ピニオン式		
ステアリングギヤ比	13.0：1		
サスペンション［前輪／後輪］	ストラット式/ダブルウィッシュボーン式		
ブレーキ［前／後］	ベンチレーテッドディスク/ベンチレーテッドディスク		
駐車ブレーキ形式	電気式		
■エンジン			
型式・種類	FB20 水平対向4気筒2.5 L DOHC 16バルブ		
内径×行程[mm]	84.0×90.0		
総排気量[cc]	1,995		
圧縮比	12.5:1		
最高出力	100[kW]@5,600[rpm]（モーター12.3[kW]）		
最大トルク	182[Nm]@4,000[rpm]（モーター66[Nm]）		
燃料供給装置	筒内直接燃料噴射装置		
燃料タンク容量[L]	48		
■トランスミッション			
変速機形式	リニアトロニック前進無段 後退1速		
変速比（第1 速～ 8 速）	3.601-0.513（マニュアルモード3.553-0.682）		
変速比（後退）	3.689		
減速比	3.900		

4．パッケージ

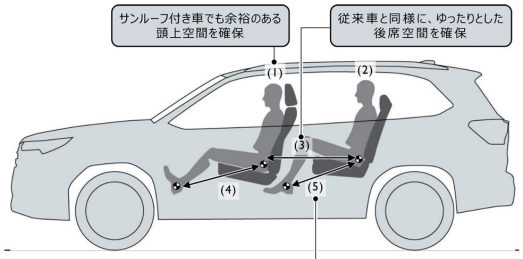
4.1　広々としたゆとりある室内空間

前席後席の室内空間は、インストルメントパネルやトリム類の断面形状を工夫することで従来車に引き続きクラストップの室内空間を確保した。（図7,8）



No.	諸元	従来車	新型車	従来比	競合車A	競合車B	競合車C	競合車D	競合車E
(1)	前席 ショルダールーム	58.2 (1478)	57.7 (1466)	-0.5 (-12)	57.6 (1464)	58.1 (1477)	57.2 (1453)	56.8 (1443)	57.1 (1450)
	後席 ショルダールーム	57.2 (1454)	56.7 (1441)	-0.5 (-13)	56.1 (1425)	55.9 (1419)	54.9 (1395)	55.8 (1417)	55.9 (1421)
(2)	前席 エルボールーム	60.1 (1526)	60.2 (1530)	+0.1 (+4)	58.5 (1486)	59.6 (1513)	59.1 (1500)	58.2 (1478)	59.4 (1508)
	後席 エルボールーム	59.3 (1506)	59.7 (1517)	+0.4 (+11)	58.4 (1483)	58.2 (1479)	58.4 (1484)	57.3 (1455)	58.3 (1481)
(3)	前席 カップルディスタンス	29.1 (740)	29.1 (740)	±0	29.4 (746)	29.6 (751)	29.0 (736)	28.7 (729)	28.3 (718)
	後席 カップルディスタンス*1	28.0 (710)	28.0 (710)	±0	27.6 (700)	28.5 (723)	27.7 (703)	29.3 (743)	28.8 (731)

*1: 後席左右 2 名乗車
*: 単位は inches (mm)。
*: 数値は社内調べ。
トップ　次点



No.	諸元		従来車	新型車	従来比	競合車A	競合車B	競合車C	競合車D	競合車E
(1)	ヘッドルーム 前席	サンルーフなし車	41.2 (1047)	41.2 (1047)	±0	-	40.5 (1029)	-	41.6 (1056)	-
		サンルーフ付き車	40.2 (1020)	40.0 (1016)	-0.2 (-4)	37.8 (960)	-	38.6 (980)	-	38.7 (984)
(2)	ヘッドルーム 後席	サンルーフなし車	39.6 (1006)	39.6 (1006)	±0	-	39.0 (991)	-	38.1 (969)	-
		サンルーフ付き車	37.6 (956)	37.7 (957)	+0.1 (+1)	39.8 (1011)	-	38.5 (977)	-	37.6 (954)
(3)	後席空間（前後席）		37.2 (946)	37.2 (946)	±0	34.5 (876)	33.1 (843)	33.2 (843)	36.3 (921)	35.6 (904)
(4)	レッグルーム（前席）		43.3 (1101)	43.3 (1101)	±0	42.7 (1085)	42.6 (1083)	42.3 (1075)	41.5 (1053)	42.9 (1090)
(5)	レッグルーム（後席）		39.4 (1000)	39.4 (1000)	±0	35.4 (899)	38.4 (975)	33.7 (857)	37.9 (962)	38.5 (977)

*: 単位は inches (mm)。
*: 数値は社内調べ。
トップ　次点

図7　室内空間

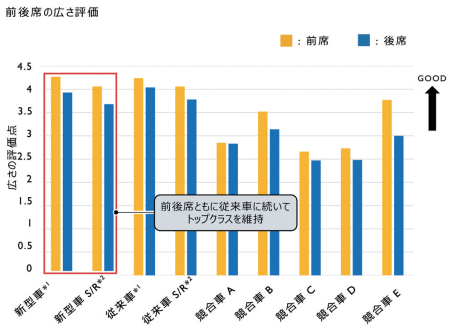


図8　前後席の広さ

4.2　メリハリある荷室開口広さ

新型ではデザインと両立しながら、普段使いやレジャーにおける荷室の使い勝手を犠牲にしないパッケージングを実現した。荷室容量は489L(VDA方式/床上)の大容量を可能とした。（図9,表2）

図9　荷室容量

表2　荷室開口寸法

	開口幅 [mm]	開口高 [mm]	容量 [L]
従来車	1300	817	494
新型車	1250	819	489

ゴルフバッグやキャリーバッグ等の大きな荷物を斜めにすることなく搭載できたり、アウトドアでの休憩時に大人二人がゆったりと並んで座れたり、といった様々なケースで活用できる。（図10）

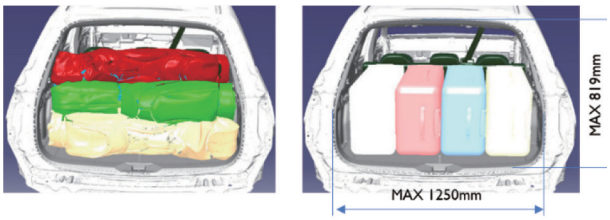


図10　荷室積載イメージ

5．ユーティリティ

5.1　快適で愉しい時間を提供

日常使いからアクティビティまで、クルマでの移動を快適にする、さまざまなアイテムを設定。磨き抜かれた機能性と気配りを盛り込んだ使い易さで、ドライバはもちろん、クルマに乗るすべての人に快適で楽しい時間を提供する。

5.1.1　フロントドア　ボトルホルダ

ペットボトルに加え近年ニーズが高まっている20オンスクラスのエコボトルも干渉することなく入る収納性を確保。水平基調のスイッチパネルと周辺レイアウトの最適化により、ボトルを車両前方からも入れることができ、足を運転姿勢から移動させることなくスムーズに収納できる。（図11）

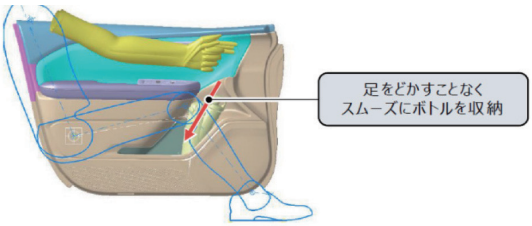


図11　ボトルホルダ

5.1.2　センターコンソール

従来車と同様に、シフトレバー後方に2つの前席用カップホルダを採用。出し入れのし易さにこだわり、２つのカップホルダを斜めにレイアウトする事で、ステアリングまでの距離を短縮し運転姿勢でのボトル類の出し入れを容易にした。（図12）

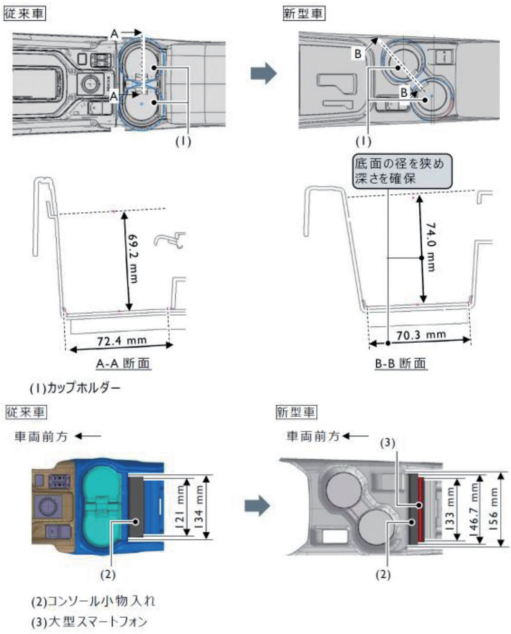


図12　カップホルダ

また、カップホルダ後方にある小物入れの横幅を従来車比で約22mm拡大。スマートフォンを横にして収納できるサイズとし、使いやすさに配慮した。

5.1.3　シートベンチレーション、ヒータ

夏の蒸し暑い環境下でも快適にすごせるシートベンチレーションを設定。涼しさを感じ易い大腿部裏を中心に通気孔を最適な配置とすることで、エアコンの冷たい空気をシート内に吸い込み蒸し暑い日でも快適な座り心地を提供する。（図13）

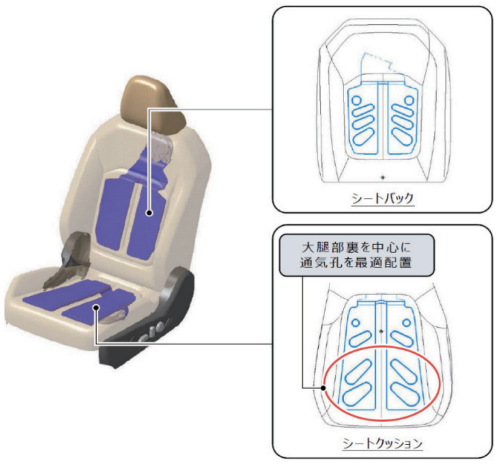


図13　シートベンチレーション

また、冬の寒い日に有用であるシートヒータについてはシートバックに包み込まれる感覚を実現する為、肩部の昇温範囲を拡大。シートクッションは温かさを感じ易い膝裏から太腿裏にかけてヒータ熱線を広範囲かつ高密度に配置し、快適性を向上した。（図14）

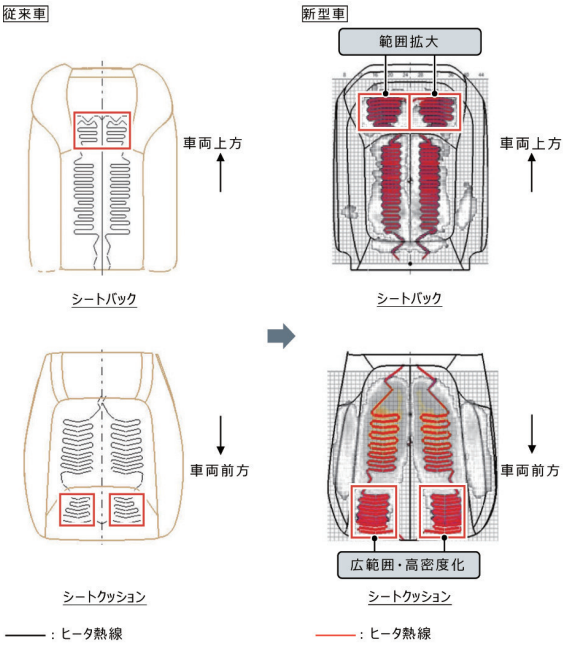


図14　シートヒータ

5.1.4　ユーティリティフック(アクセサリー)

お客様の多様な要望に応え、ラゲッジルームの使い勝手を最大化するため、荷室およびリヤゲートに固定できるユーティリティフックを開発した。(図15)

フックとしての使い勝手を追求すると同時に、フックをベースにユーティリティバーやカーゴシェルフボード(いずれもアクセサリー)などを固定できる拡張性も付与した(図16)。

フックは、どんな時でも使いやすいデザインを目指し、荷物や買い物袋を掛け易く、どの角度からでもカラビナが挿入し易い形状とした。(図17)

また、拡張機能として、ユーティリティバーを挿入・固定するため、フックのスポーク部はバー先端を挿入し易い形状とし、固定部は受け形状をもつ金属製ボルトをインサート成形することにより、強度を高めた。(図18)

図15　ユーティリティフック

図16　ユーティリティフック使用例

図17　使いやすさを追求した形状

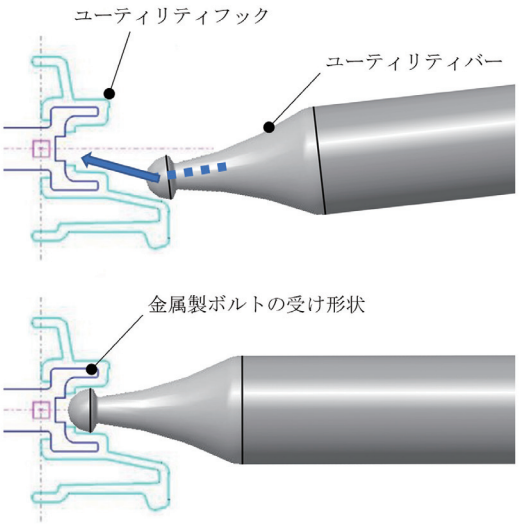


図18 ユーティリティバーの挿入・固定

5.2　移動を愉しく豊かにする先進的な機能

5.2.1　より使い勝手のよい先進HMIへ

使用頻度の高いスイッチは1回で操作できるよう、オートビークルホールド、アイドリングストップシステムのスイッチを常時表示するように変更した。

さらに、新型FORESTER独自となる機能として、オートビークルホールド／アイドルストップシステム／SI-DRIVEの設定を、ドライバーモニタリングシステムと連携させた場合には、ドライバ毎の好みの設定を車両が記憶する。次回乗車時、OKボタンを押すだけで一括して変更することができる。(図19)

図19　先進HMIの使い勝手向上

5.2.2　ナビゲーション機能の向上

交通情報サービスであるTomTom Trafficを北米で採用。従来のSXM trafficに対し、テレマティクスによってサーバーと連携することでリアルタイムの事故と渋滞を分析して交通量を事前に予測するコネクテッド サービスに対応している。

さらに、認知度が高まってきたWhat3words機能も搭載し、目的地を3つの単語でピンポイントに設定でき、仲間との共有も行える。(図20)

また、バレー(バレーサービス：ホテル等でボーイに鍵を渡し、エントランスから駐車場まで車両を移動してもらうサービス)モードを設定すれば、個人情報を見ることができなくなる。(図21)

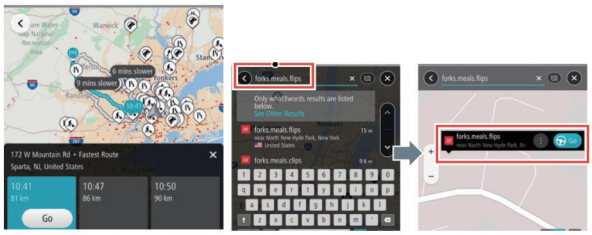


図20 TomTomTraffic経路案内とWhat3words機能

図21　バレーモード

さらにテレマティクスと連携することで、速度超過や盗難のリスクに対し、お客さまのスマートフォンに通知することが可能である。

5.2.3　SXM　with　360L

衛星通信に加えネット通信機能が加わることによって、ユーザの嗜好に沿った楽曲提案、サーバーを使った多彩な楽曲検索等が可能となっている。

このネット通信機能はSXM社の2023版から可能で、SUBARUがトップランナーとなる見込みである。(図22)

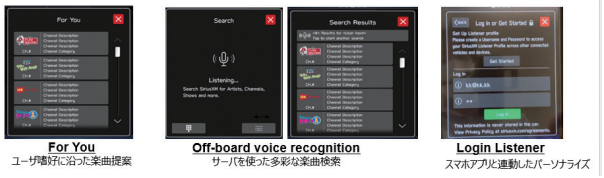


図22　SXM with 360L

6．動的質感

6.1　動的質感開発の狙い

新型車では、従来車を凌駕する性能とは何かを突き詰めて考えることから開発が始まり、辿り着いたものが、原点回帰のヒトを中心としたスバルグローバルプラットフォームの更なる深化だった。不快な振動・騒音が少なく、静粛性の高い快適性、長時間のドライブでも疲れることのない安心感といった、感性領域に踏み込んだ動的質感を目指して開発を行った。

高減衰マスチック材や断面発泡剤、シート取付構造、フルインナーフレーム化といったボディ構造の進化や、2ピニオン方式電動パワーステアリングなど、新型CROSSTREKでの改良要素(図23)を継承し、更なる質感向上を実現した。

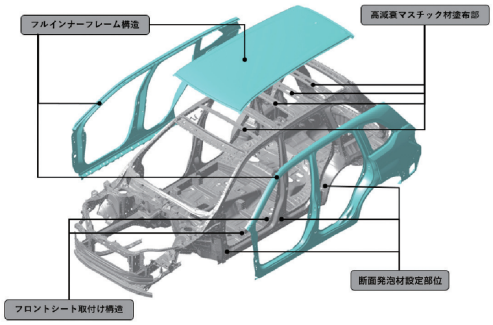


図23　動的質感向上の継承要素

6.2　安心感をもたらす快適な走り

雑味のある音を低減し、快適で愉しいドライビングを提供すべく、各種振動騒音性能を進化させた。

フロアマットをはじめ各種インシュレーターの板厚アップや材質変更、CVTの防音カバー拡大や剛性アップなどの改善によって、全周波数域での加速車内音を低減している。(図24)

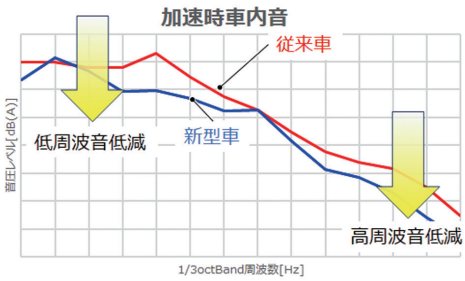


図24　加速時の車内音

6.2.1　ボディパネルの遮音と制振

エンジンルームとキャビンを仕切るトーボードインシュレーターの材料・形状を最適化し、大幅に軽量化しつつ遮音性能を向上させることで、加速時のエンジン放射音が室内へ侵入するのを抑制した。また、パネル振動解析を用いて制振材の板厚と配置の最適化を実施。必要な厚さの制振材を効果的な箇所へ適用することで、静粛性向上と軽量化を両立した。(図25)

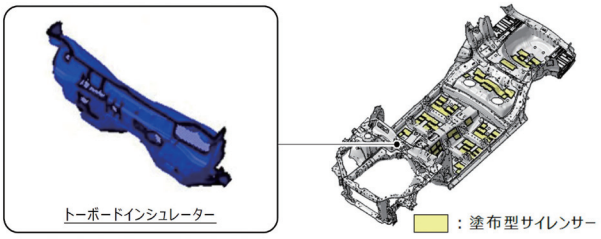


図25　トーボードインシュレーターとフロアパネル制振材

6.2.2　カバーフェンダーロア

フロントフェンダーとボディの間の吸音材となるウレタン製のカバーフェンダーロアをFORESTERとして初採用した。遮音・吸音性能を向上させることで、ロードノイズおよび加速時のエンジン放射音が室内へ侵入するのを抑制している。（図26）

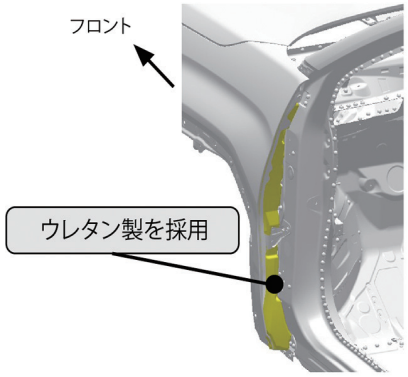
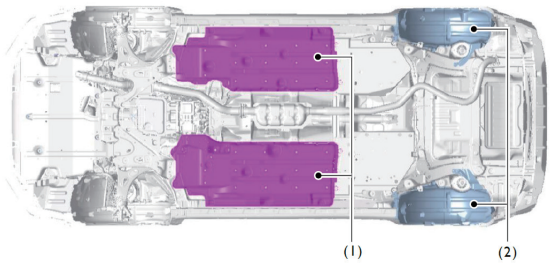


図26　カバーフェンダーロア

6.2.3　床下アンダーカバー

従来車のリヤマッドガードに加え、床下アンダーカバーを吸音材化した。板金部品の被覆部を拡大することで、静粛性と空力性能を向上。ロードノイズやエンジン音、水はね音などのノイズを、リヤホイールハウスや、床下まわりで低減させた。（図27）



(1) 床下アンダーカバー
(2) リヤマッドガード

図27　車両床下吸音材

6.2.4　構造用接着剤

高粘度タイプの構造用接着剤を採用すると共に、適用範囲を２倍以上に拡大した。（図28）　スポット溶接間を連続的に接合し、微小な変形を抑えることでボディ全体の剛性を上げ操縦安定性・乗心地性能を向上させた。

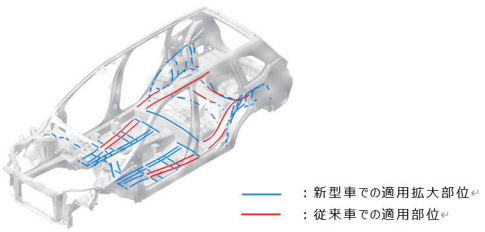


図28　構造用接着剤塗布範囲拡大

6.2.5　フロントドア・リヤドア

風切り音を低減するために、フロントドアガラスの板厚をアップするとともに、ウェザーストリップ端部の隙詰めにより密閉性を向上させた。（図29）

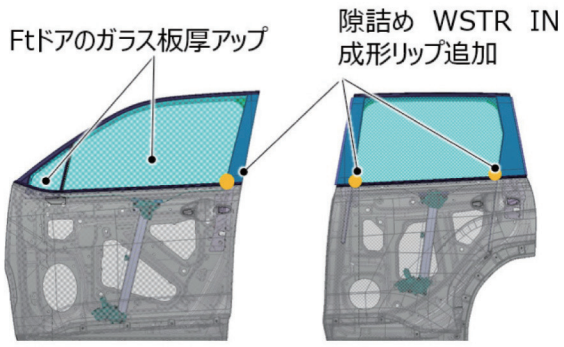


図29　ドア構造

6.2.6　ステアリングホイール

ステアリングホイール内のダイナミックダンパの特性を最適化することで、ユーザの手に伝わる振動を低減し、長時間のドライブでも疲れにくくした。（図30）

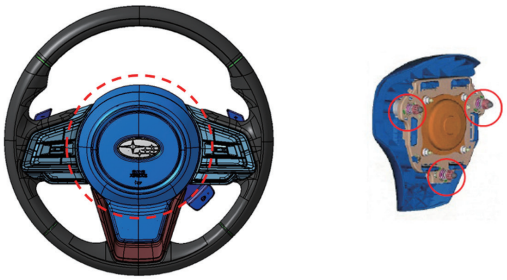


図30　ステアリングホイールダイナミックダンパ

6.2.7　パワートレイン

エンジンの爆発によって発生する力でクランクシャフトが微小にたわみ、それによってクランクシャフト打音が発生する。この打音低減を狙い、エンジン、リニアトロニック剛性アップを実施し、クランクシャフト打音低減と伝達抑制を実施した。更にリニアトロニックのドライブプレート低剛性化により、クランクシャフト打音をダイレクトに伝わらないようにすることで、車内で感じる不快なエンジン音を低減した。（図31、32）

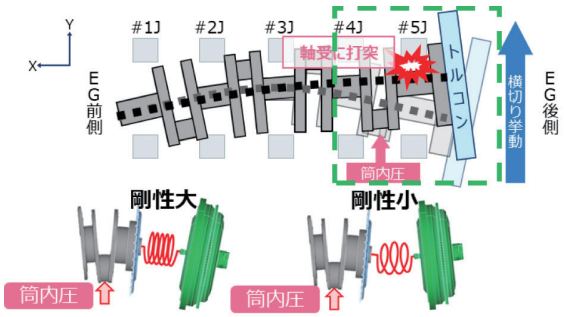


図31　クランクシャフト模式図

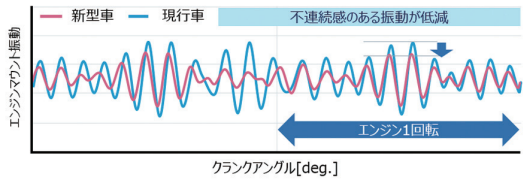


図32　振動低減イメージ

6.2.8　エンジンスタータ・エンジンマウント

アイドルストップ再始動時のショック低減として、エンジンのスタータ容量アップ、エンジンマウントの減衰特性最適化を行い、再始動時ショックを低減した。

加速時車内騒音改善として、アルミハウジングエンジンマウントの採用、エンジン制御最適化により、加速時に車内に聞こえる音を低減した。(図33)

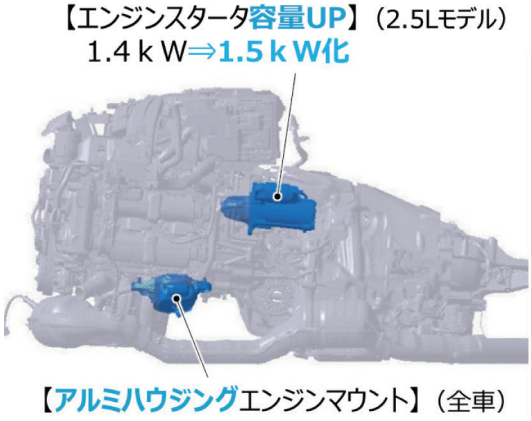


図33　エンジンスタータ・エンジンマウント

6.3　意のままに操れる走行性能

6.3.1　空力の活用

さまざまな部品の組み合わせと、あらゆる走行シーンを想定したシミュレーションやテストドライブを繰り返し、空力を車両全体で最適化。

アンダーカバー車両前方側のエアダム形状、フロントフェンダー部エアアウトレット等により、車体廻りの空気を整流することで、車体の左右ふらつきを低減し、操縦安定性や乗心地および直進安定性を向上させている。(図34)

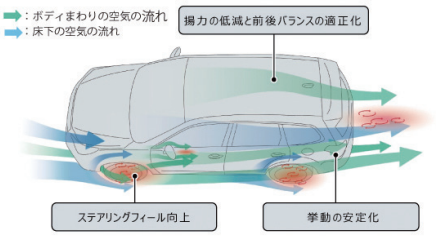


図34　空力性能開発コンセプト

(1) フロントエアアウトレット

フロントフェンダー部にエアアウトレット(図35)を採用。ホイールハウス内に留まる空気を排出し、タイヤから発生する空気の渦をより外に遠ざけることで、フロントタイヤにかかる揚力を低減させた。

図35　フロントエアアウトレット

6.3.2　シャシーデバイスによるフィーリング向上

ブレーキペダル戻し時の液圧変化を最適化して、より自然で扱いやすいブレーキフィーリングを実現している。(図36)

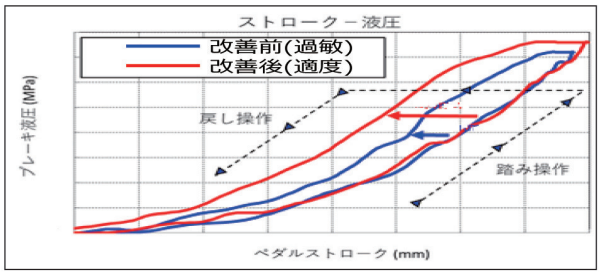


図36　ペダル戻し時フィーリング改善

7．安心・安全

7.1　リアルワールドで使える良好な視界

7.1.1　0次安全(視界の良さ)

フロントガラスや、サイド面の三角窓の面積を確保することで、FORESTERの視界の良さを継承した。エンジンフード後端の左右、Aピラー付け根部分を低くする事で斜め前方の視界を広げた。

また、エンジンフードの前端から後端までを視認できるようにする事で、車両感覚を掴みやすくした。

他にも、ワイパが視界に入らないパッケージングとする事で、すっきりとした前方視界を実現した。(図37)

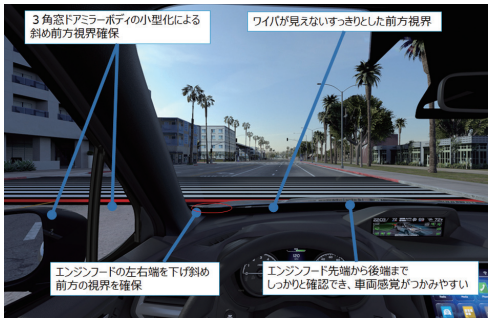


図37　前方視界

欧州向けではカーブや右左折時にヘッドライトが左右に動く事で進行方向を照らす、ステアリング連動ヘッドライトを全グレードに標準装備した。

7.1.2　マルチビューモニタ

４つの高精細デジタルカメラを採用したマルチビューモニタシステムを導入した。

車両近傍の全周360°をカバーするトップビューをはじめとした各種ビューモニタ機能、さらにリヤソナーや後側方レーダで検出した障害物や移動車両に対する警報表示を連動させることで、駐車や出庫をはじめとした様々なシーンにおいてドライバの安全確認をサポートする。（図38）

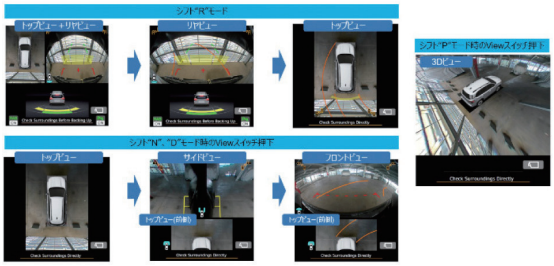


図38　マルチビューモニタ

7.2　ドライブを愉しめる最新の安全技術

7.2.1　新型アイサイト

新型アイサイトは追加で広角単眼カメラを導入し、低速での走行時に、前方を横切る自転車に対する衝突回避や右左折時の歩行者の巻き込み回避に対応した。（図39,40）

欧州向けは、前側方レーダとの連携により出会い頭の衝突回避にも対応した。

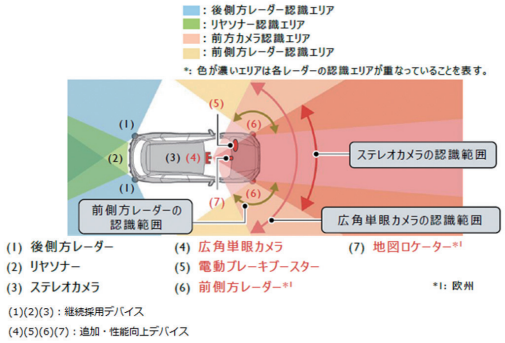


図39　新型アイサイト

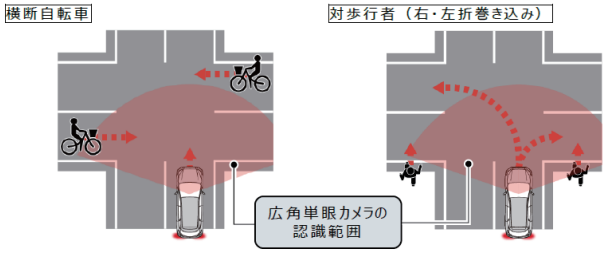


図40　広角単眼カメラ

7.2.2　ドライバ異常時対応システム

ドライバ異常時対応システムは操舵支援制御の作動中に一定時間ステアリング操作がなかった場合、警報によりドライバに注意喚起する。(北米ドライバモニタリングシステム付車では、わき見も検知)

それでもステアリングが操作されない状態が続いた場合は、SUBARU初となるパルスブレーキを用いて体感的に警告し、最終的には緩やかに減速し車線内に停車し、外部からの救助に備える。（図41）

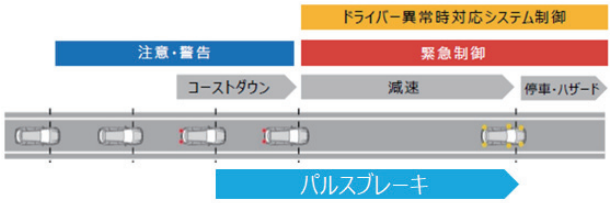


図41 ドライバ異常時対応システム（北米仕様）

欧州向けには、標識認識との連携によるクルーズコントロール、インテリジェントスピードリミッタを導入した。クルーズコントロールで走行中に、標識認識によって判定した制限車速によりセット車速を自動で切替え、制限車速を上限車速にセットし、制限速度を超えた場合に車両の速度を抑制する。

7.3　万が一の衝突安全

7.3.1　北米・欧州　前面衝突

前面衝突時にエアバッグがシート座面前方を押し上げ、腰部の前方移動を抑制することで、シートベルトによる拘束保護性能を向上させた。これにより、胸部及び下肢への傷害を低減する。（図42）

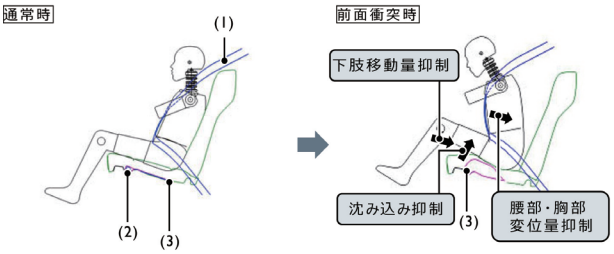


図42　シートベルトによる拘束

7.3.2　北米　斜め衝突

北米NCAPに導入されたオブリーク衝突対応するため、頭部保護用の突起形状を織込んだ新形状の助手席エアバッグを採用した。

前側方からの衝突時において、乗員の被害を軽減し、頭部すり抜け防止により頭部拘束性を向上させた。（図43）

図43　助手席エアバッグ

7.3.3　北米　側面衝突

リアルワールドでのより厳しい側面衝突モードを想定し、車体構造をアップグレードした。センターピラーにはTWB(Tailor Welded Blank)の継続採用による変形モードコントロールに加え、サイドレールのアウターに980MPa材を採用することで、高強度化と軽量化を両立した。(図44)

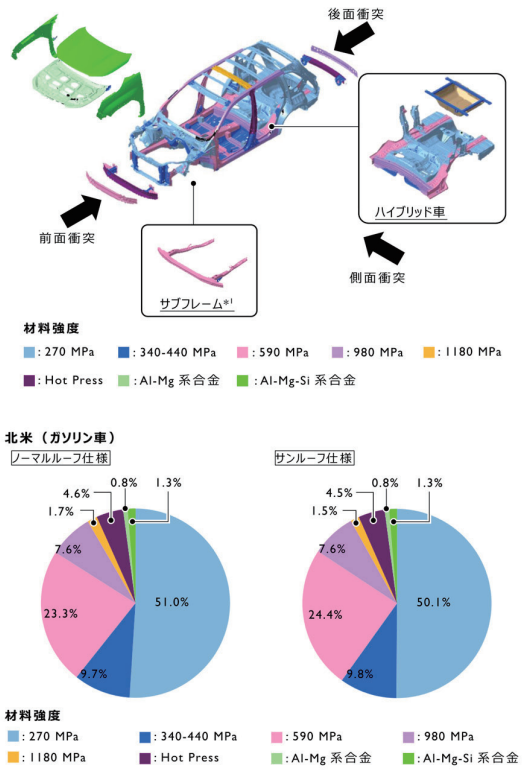


図44　車体骨格強化部材とハイテン比率

7.3.4　欧州　前面衝突

欧州・豪州NCAPに導入されたMPDB（Mobile Progressive Deformable Barrier）に対応し、自車の乗員保護だけではなく相手の乗員も保護するという考え方を取り入れて前面衝突開発を行った。車両前部のバンパービームの拡大とレイアウト最適化とともに、サブフレームを追加した。衝突時のエネルギーを分散させることで、被衝突側（相手車両）の損傷を軽減し加害安全性を向上している。(図45)

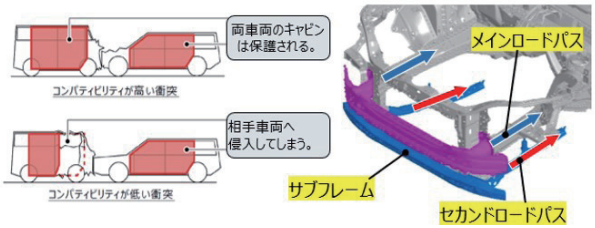


図 45　前面衝突対応の採用構造

7.3.5　欧州　側面衝突

欧州EuroNCAPに導入された2名乗員評価やファーサイドスレッド試験に対応するため、側面衝突では、運転席の車両中央側にファーサイドエアバッグを設定した。

側面衝突時にエアバッグが車両中央側に展開することで運転者の側方移動を抑制し、運転者と助手席乗員との衝突や、運転者が助手席側の内装材と衝突した際の被害を軽減する。(図46)

図46　ファーサイドエアバッグ

8. まとめ

デザインを飛躍させるために、新しい開発フローにも挑戦することで、堂々とした存在感のあるFORESTERに生まれ変わることができた。

これまで以上に、より多くの、そして、より多様なお客様に愛される車になって欲しいとプロジェクトメンバー一同願っている。

最後に、サプライヤー含めた多くの関係者のご尽力に、紙面を借りて厚く御礼申し上げる。

【著　者】

FORESTER開発プロジェクトチーム

［商品事業本部］	舟串　卓也
［内外装設計部］	鈴木　祥靖
	大原　智彦
［E&Cシステム開発部］	小林　良輔
	武島　護
［ボディ設計部］	松尾　拓磨
	橘　篤寿
	荒木　直也
［ＡＤＡＳ開発部］	高木　秀倫
	石田　武
［パワートレイン設計部］	佐伯　陽彦
［車両開発統括部］	熱田　匡昭
	岸川　昌寿
［車両運動開発部］	森島　幸司
	堀川　敦
	大田　健人
	今井　哲也
	佐藤　広直
［車両環境開発部］	松坂　英哲
	高橋　遼
［アクセサリー企画部］	近藤　太郎

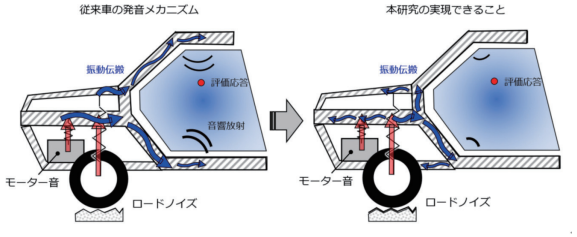
SUBARU 騒音低減に向けた研究が自動車技術会賞「浅原賞学術奨励賞」を受賞

2024年5月24日

「第74回自動車技術会賞」において、当社技術者が騒音低減に向けた研究に対して「浅原賞学術奨励賞」*1を受賞しました。
HEVやバッテリーEVなど電動車のモーター走行時においては、従来エンジン音に埋もれていたロードノイズやモーター音などの不快な騒音がより目立つようになります。本研究では、従来困難であった幅広い周波数帯の騒音低減に寄与する車体パネルの特定と車体骨格に関する要件定義の手法を構築しました。なお、本研究の成果は既に次期フォレスターの開発にも活用しています。

受賞テーマ：振動エネルギー伝搬分析に基づく車体骨格特性の要件化に向けた基礎検討
受賞者：阿部 啓介（株式会社SUBARU/神奈川大学）

＊1：自動車技術に関する優秀な論文等を発表した将来性のある新進の満37歳未満の個人に贈られる賞



本研究の成果（イメージ図）

新型 FORESTER のデザイン開発について

Styling Design Development of New FORESTER

髙 松 雄 輝*
TAKAMATSU Yuki

小 澤 修 司*
OZAWA Shuji

西 井 喬 哉*
NISHII Takatoshi

抄 録

新型FORESTERの商品コンセプトは「堂々たる安心感あるたたずまい。乗員が守られ、且つ安心して、どこへでも行けそうな、The SUV」である。

新型FORESTERはお客様のライフスタイルに寄り添い、支える事の出来る高い性能を有しており、その性能をデザインで表現しきる事を狙いとした。また、競合ひしめくSUV市場の中で埋没しない強いデザインへと進化させる事も同時に求められた。それらを達成させる為の具体的な手法や取り組みについて報告する。

The new FORESTER’s product concept is "The SUV with imposing and reassuring presence that provides passengers protection and peace of mind that make the passengers feel like they can go anywhere."

We aimed to thoroughly express the new FORESTER’s high performance through its design that stands by and supports the customer's lifestyle. At the same time, the design needed to be evolved to stand out strongly in the competitive SUV market. This report introduces the detailed methods and efforts that we adopted to achieve these targets.

1. まえがき

商品コンセプトである「堂々たる安心感あるたたずまい。乗員が守られ、且つ安心してどこへでも行けるSUV」に仕立てる為、スタイリングコンセプトは、『頑丈で堂々とした存在感をクリーンなデザインで表現する事』とした。そのデザイン実現のためには大きく3つの要素が必要と考えた。

1つ目は「Fun to Challenge」アスレティックで頑丈なボディとする事で、チャレンジしたいというアクティブマインドを支える。

2つ目は「Cool & Adventurous Looking」トラックライクな力強さで堂々とした存在感を表現する事。

3つ目は「Seamless Experience」クリーンなデザインで都市から大自然まで活躍するシーンを選らばず気負いなく活動できる存在とする事である。

図１　フロントビュー

図２　リヤビュー

＊ デザイン部

2．エクステリアデザイン

エクステリアデザインは、ボディサイドに強い軸を通し乗員を守る強い塊感を表現し、そこから張り出したフェンダーボリュームで安定感と走破性の高さを可視化。加えて、AピラーとDピラーに樹脂製のガーニッシュを設け、視覚的にキャビンの薄さとロアボディの厚みを印象付けるデザインとした。リヤガラスも過度に傾斜させずにフォレスターの特長である積載性能の高さを表現。（図3）

図3　エクステリアデザインテーマ

2.1.1　造形テーマ

フロント廻りはグリルからヘッドランプまで高い位置に軸を通し、フェイスデザイン全体の厚みを表現している。また、現行車ではシルエットから飛び出していたヘッドランプもシルエットに馴染むようデザインし、凹凸のない強い塊感を表現した。バンパー廻りにはタイヤへ向かっていく台形の立体を勘合させ、スタビリティの高さを表現した。（図4、5）

図4　フロントフェイスデザイン

図5　フロントフェイスデザインの狙い

フロントグリルとヘッドランプを連続させるデザインとし、ヘキサゴングリルやコノ字ヘッドランプで表現してきた、塊の強さやワイド感をフェイスデザイン全体でより強く表現している。ヘッドランプはグリルモールから連続感のある形を用いて、ワイド感を表現。デイランニングランプの発光部には厚肉のインナーレンズを採用し、奥行き感のあるデザイン表現を行った。（図6）

図6　グリルとヘッドランプ

リヤ廻りもフロント同様に高い位置に軸を設け、ロアボディの厚みを表現。リヤコンビからタイヤへ向かう大きな台形モチーフで、スタンスの良さを強調させた。(図7、8)

図7　リヤデザイン

図8　リヤデザイン狙い

リヤコンビネーションランプ外形は左右を繋ぐようなモチーフで、車両全体の軸を受けた高い位置にレイアウトした。ランプ内はヘッドランプと同様のデザインテーマとし、シルバーのアクセントを加えた。(図9)

図9　リヤコンビネーションランプ

2.1.2　プロテクション表現

フロント・サイド・リヤのボディ下部に統一されたプロテクション表現をほどこし、アクティブな使用シーンを想起させるデザインとした。(図10)

図10　ボディ下部のプロテクション表現

特長的なリングモチーフを使い、グレード毎に表面処理や色を変える事でキャラクターを明確に分けていく工夫を織り込んだ。(図11ブロンズ色の部品)

図11　リングモチーフによるグレード表現(Sport)

2.1.3　ホイールデザイン

ホイールは17インチ、18インチ、19インチの3種類を用意。17インチホイールは左右対称のデザインとし、剛性感の高さと安定感を感じさせる形状とした。18インチホイールはアクティブなユースシーンにマッチする動きのある偏芯タイプのデザインを採用。FORESTERでは初採用となる19インチホイールには、大きさを強調する伸びやかな線使いと、偏芯で動きのあるモチーフで堂々とした存在感のあるデザインに仕上げた。(図12、13、14)

図12　17インチホイール（左右対称）

図13　18インチホイール（偏心）

図14　19インチホイール（偏心）

3．インテリアデザイン

新型FORESTERではインテリアにおいても「乗員が守られ、且つ安心してどこへでも行ける」、そんなSUBARUらしい安心と愉しさを鮮明に表現した。移動の時間をより安心でき、居心地を良くすることで運転によるストレスをやわらげ、「もっと遠くへ 様々なところへ出かけたい」、そんな アクティブで愉しい気持ちを掻き立てるインテリアに仕上げてきた。それを実現するため今回デザインで新しく取り組んだいくつかの手法や工夫について報告する。

図15　インテリアイメージ画

3.1　SUVらしい頑丈かつ安心を感じるテーマ

乗員の目の前に広がるインストルメントパネルとドアパネル/コンソールに対して、守られている安心の表現を色濃く織り込んだ。センターインフォメーションディスプレイを中心に、水平軸を基調とするテーマで3面立体構成を使って表現し、インパネからドアに繋がる一体感ある力強い造形とした。SUVとしての頑丈さを表現し、その形が乗員を包み込むことで、守られている安心と空間の広がりを感じさせる。（図15、16）

コンソールは操作部をがっしりと囲む様な多角形の造形テーマで、インパネとテイストを統一。タフな使用シーンを想起させ、アクティブマインドを高める形状としている。ドアの構成を頑丈な強さを表現する統一の造形テーマに合わせ、表皮エリアや周囲のグラフィックも多角形としてテーマの印象に合わせることで、乗員が守られる安心感を強調している。（図16、17、18）

図16　インテリアデザインテーマ

助手席で安心感を与えているミッドパッドには、外装でも使っている幾何学のグラデーションパターンをあしらい造形テーマの広がりを強調させながら、内外での統一感から車両一台のデザイン完成度も高めている。

ミッドパッド下側の加飾パネルはアウトドアのギア感を感じさせ、よりタフな印象をミッドパッド周辺に醸し出している。（図17）

図17　インパネ・ドア(幾何学グラデーションのミッドパッド)

3.2　人が触れるところを柔らかく

乗員を包み込む造形テーマは、形状だけではなく、人が触れた時にも安心を感じられる、ソフトな触感素材や表皮をあしらっている。ミッドパッドやドアトリム加飾など、包み込まれる頑丈な造形が柔らかな素材で構成されるインテリア空間とした。(図17)

シフトゲート周辺にもやわらかい素材をあしらうことで、乗員の膝があたった場合でもソフトな感触が安心を感じさせる。シフトノブも室内テーマに合わせた多面体の構成としつつ、操作時の握り心地も硬くないレベルを同時に両立させている。(図18)

図18　フロントコンソール

3.3　コミュニケーションが取りやすいシート

フロントシートでは、後席の家族とのコミュニケーションが取りやすい工夫を織り込み、移動時の愉しさをアップさせた。

シート形状では、乗員をしっかりと守る印象を与える為、サイドの土手を高くし、しっかりとホールドされる形状とした。同時にU字のモチーフを使い、包まれ感のあるデザインとした。(図19,a)加えて前席から後席へ振り返った際、後席が見やすく手を伸ばした時にアクセスし易いよう、ショルダーのボリュームを最小サイズに設定、後席の子供とモノの受け渡しなどを楽に行えることで移動時のストレス緩和を考慮した。シートバックの縫製ラインはアシンメトリーとし、後席と前席の繋がりを強める工夫を織り込んでいる。(図19,b、図20,b)

前席と後席で家族の一体感や距離を近くに感じさせることで、車内での会話を促し、より愉しい移動空間になることを狙った。

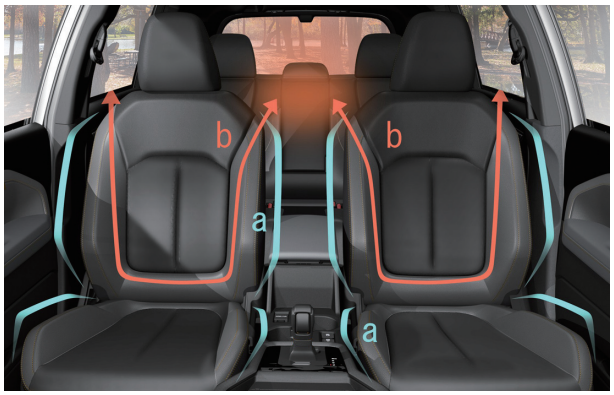


図19　シートイメージ図1

図20　シートイメージ図2

3.4　リヤドアから繋がる広大な荷室エリア

リヤドアトリムから荷室にかけての空間は、リヤシートを倒して使用する際に、リヤドアトリムの意匠が荷室へ連続するテーマとすることで、FORESTERらしい広大なユーティリティ空間を感じさせることを狙った。リヤゲートパネルには、ヘキサゴンモチーフを力強く表現し、大切な荷物をしっかりサポートする逞しさを表現。様々なギアを積極的に積みたくなる、そんなマインドを刺激することを意図した。(図21)

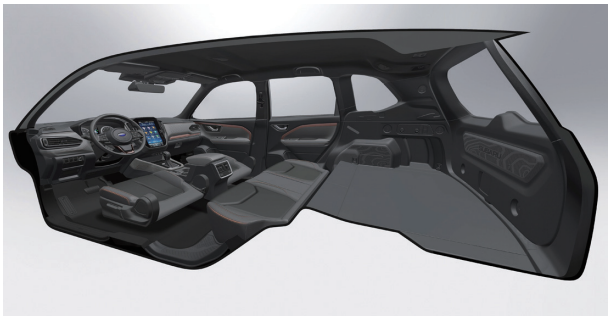


図21　室内全体 イメージ画

3.5　気持ちを盛り上げるネイチャー柄

ステップの滑り止めや、荷室の物の出し入れのしやすさを考慮し、今までも設定されてきた凹凸のビード（縦スリット）に、今回は自然をイメージさせるネイチャー柄の表現を加えた。さらにドアや荷室にも同じネイチャー柄を感じるビードを設定した。これらは乗降時の足の滑り止めや荷物積載時の滑りやすさや傷を目立たなくさせる機能性だけではなく、アウトドアでの使用が多いSUBARUのお客様に向けて、この車を使った際にこれらの柄が目に入ることでよりアクティブで愉しい気持ちにさせることを狙っている。さらに柄の中には小さな「靴の足跡の柄」などを忍ばせている、これらはフロントドア・リヤドア・コンソール・ステップ・荷室の部品のいくつかに表現している、是非実車で見つけていただき、ちょっとした愉しさを味わっていただきたい。（図22、23）

図22　ネイチャー柄 フロントドア下端

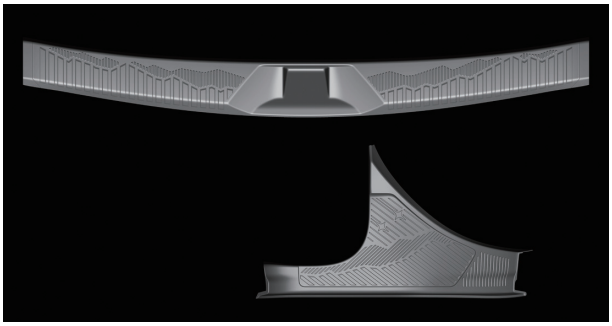


図23　ネイチャー柄 リヤスカート/ステップ

4．内外装CMF（ｶﾗｰ,ﾏﾃﾘｱﾙ,ﾌｨﾆｯｼｭ）のデザイン

CMFデザインでは、多様なライフスタイルや幅広い用途に応えるべく、価値に合わせた内外装のコーディネーションを実現した。安心してどこまでも行けるSUVとしての本質的な価値を高めたBASE/PREMIUM/LIMITEDを中核に、クラフトマンシップを感じさせる上質なTOURING、街中でも安心を感じられるオンロード志向のSPORTをラインナップ。お客様の多様化する使用シーンに合わせたグレード毎の個性を色/素材/加工で仕立てた。

4.1　内装CMFデザイン

若々しくアクティブな意匠や表皮の組み合わせで、各グレードの個性を強化させた。

自然と一体になる空間を演出する為、ベーシックなトリムの明るい仕立てでは、室内から外への広がりをグレーのグラデーションで表現した。（図24、25、26）BASEグレードはクラッティングの力強い矩形を想起させるエンボス柄をメイン部に配し、シンプルでタフに仕立てた。（図24）PREMIUMグレードは上質な織り表皮をトリコット材と組み合わせ、アクティブに仕立てた。（図25）LIMITEDグレードは乾いた白木を想起させるインストルメントパネル加飾や人工スエードをドアトリムのアクセントに採用し、革シートと組み合わせて仕立てた。（図26）

図24　BASEトリム

図25　PREMIUMトリム

図26　LIMITEDトリム

また、お客様のより質感の高い素材や街中の運転を楽しみたいという気持ちに、特徴的な色や複数の素材を組み合わせた表現で応えた。TOURINGグレードは、ブラウン＆黒のカバーリングに人工スエードとステッチを組合せ、一手間造り込んだ仕立てとした。（図27）SPORTグレードは黒とグレーの合皮にブロンズ色の帯やパイピングを組み合わせ、若々しくスポーティに仕立てた。（図28）

図27　TOURING トリム

図28　SPORT トリム

新型FORESTERの空間を際立てるべく、新規の色/素材/表面処理を開発した。SPORT用のブロンズ色に加え、インストルメントパネル加飾には乾いた白木調(図29) やエイジングされた金属調(図30) の表現を施した。また、地厚で組織感の強い織物をベースに、手触りの良い起毛と光沢&ランダムなアクセントの表皮を採用した。(図31)

図29　木目調のIP加飾

図 30　金属調の IP 加飾

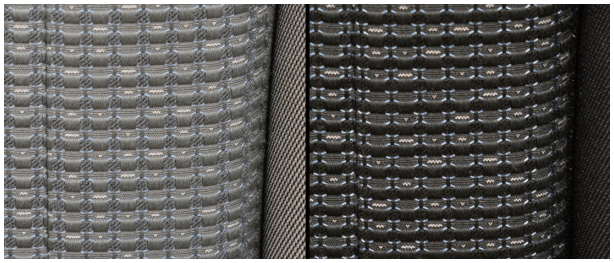


図 31　ブロテックファブリック (新型 FORESTER 専用)

4.2　外装 CMF デザイン

頑丈で堂々とした存在感を、色やシボのコーディネートで分かり易く表現した。

３部品構成のグリルの色艶やヘッドライト内の加飾色、ボディロアのシボや加飾色の組み合わせで、お客様の気持ちに合わせた外装の仕立てを実現した。ボディの厚みを強調する部品色をグリルやロア加飾に配したガンメタ仕立て(図32)、グリル本体&下回りを艶黒で引き締めた上質な艶黒仕立て(図33)、上屋の黒締めに対し下回りの加飾とホイールに専用のブロンズ色を配すスポーティな仕立て。(図34)

図32　ガンメタコーディネート

図 33　艶黒コーディネート

図 34　ブロンズコーディネート

外装色はモノトーンや赤青と低彩度色、専用のアースカラーを加えた全10色をラインナップ。（図35、36）普段使いに合う質の良いシンプルな表現で自然にも馴染むソリッドライクな専用のカーキ・パール（図35）を新規採用した。

図35　RIVER ROCK PEARL(専用色)

図36　その他ボディ色ラインナップ

外装の存在感を際立てる新規アイテムとして、従来よりも立体感を強調しクリーナビリティ性を高めた凸のナシ地シボを下回りの原着部に配置した。ブロンズ色は、金属の持つ塊感を光輝材で強調しつつ、ハイライトの赤味に拘り上質な質感を実現した。（図37）

図37　ブロンズ色

5．終わりに

今回で6代目となる新型FORESTERは、より多くのお客様に選ばれ、一人一人の人生に寄り添い、永く愛される商品にする為にデザインを大きく進化させる事を目標としてきた。

外装、内装、カラーコーディネーションに至るまで、お客様のライフスタイルを考え、一から創り上げてきた。また、魅力的なデザインを創り上げる為には、我々デザイナーだけではなく多くのエンジニアの知恵と工夫が必要であった。SUBARU開発チームが一丸となって作り上げた新型FORESTERの進化を感じて頂けましたら幸いです。

【著　者】

髙松　雄輝

小澤　修司

西井　喬哉

キックセンサ式パワーリヤゲート開閉システム

Kick Sensor Type Power Rear Gate System

長谷川　拓　也*　　大　塚　裕　介*　　中　村　昌　也*
HASEGAWA Takuya　　OOTSUKA Yusuke　　NAKAMURA Masaya

抄　録

キックセンサ式パワーリヤゲート開閉システム（キック式パワーリヤゲート）とは、アクセスキー所持状態でリヤバンパの下に足を出し入れすることでパワーリヤゲートを開閉できる機能部品である。手を使わずに操作できる為、買い物、スポーツやアウトドア等の際に役立つ機能である。

SUBARU開発では初となるキックセンサ式パワーリヤゲートは、後発であるがゆえにお客様の使用感に寄り添い、かつ使いやすいシステムを目指した。

本稿では、SUBARUのキックセンサ式パワーリヤゲート開閉システムの開発概要について紹介する。

Abstract

The kick sensor type power rear gate system is a functional part which can open and close the power rear gate by putting a foot under the rear bumper while carrying the access key. Since this system can be operated without using hands, it is a helpful function in shopping, sports, and outdoor activities.

We prioritized the usability of customers and aimed to realize an easy-to-use system because this system is our first kick sensor type power rear gate to be launched and is a latecomer in the market.

This report introduces the development summary of this kick sensor type power rear gate system of SUBARU.

1．まえがき

開発に当たり、足を高く上げることなく自然なキック動作で検知する為の足上げの高さ、足入れ量等の目標を定め、センサの形状・搭載位置、制御仕様を工夫した。 また、降雨など環境要因及び小動物通過時の誤検知回避ロジックや、閉め始めの頭部接触防止としてディレイ時間を付加するなど、利便性と安全性の観点でお客様の実使用感覚に基づく期待に寄り添う設定に拘った。

2．キックセンサモジュール

新型フォレスターは、SUVとしての使い勝手をより重視し、手が塞がった状態でも操作でき、リヤゲートを開け閉めることができる「キックセンサ式」を採用した。

図1　キックセンサ式

2.1　キックセンサの方式

キックセンサの方式は、市場で広く利用されている二つの静電容量センサを用いて静電容量の変化によって物体の動きを検知する方式を採用する。二つのセンサの役割は図2にて示す通り、バンパ下に足を入れた際につま先を検知するセンサと、足のすねを検知し、足のキック動作と、キック以外の動きや雨、自動洗車機等の外的要因の動きと判別する。

センサ及びECUは、図3に示す機構で構成されているキックセンサブラケットで一体化し、これをリヤバンパ内に設置している。

＊ 車両安全開発部

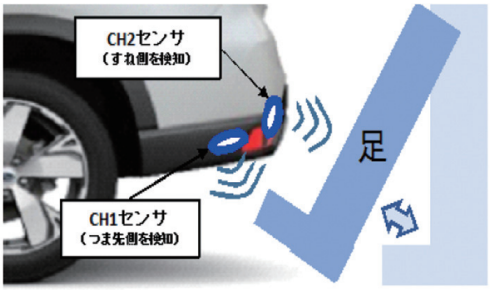


図2　センサの役割

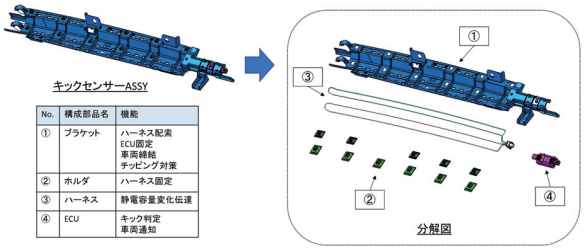


図3　キックセンサブラケットの構造

2.2　キックモーションを行う場所

キックセンサモジュールを配置する場所としては、以下の理由で車両後端の中心とした。

a. お客様がリヤゲートを利用する際に立つ位置である。

b. 荷物を持っている状態で開閉ともにアクセスしやすい。

c. 車両中心に開閉トリガを配置することは、従来採用の多いオープンスイッチ式等で広く認知されており、方式変更による影響がすくない。

2.3　センサ形状の工夫

SUBARUのSUVは走破性を高める為、リヤバンパの底面が高く設定している。そのため、キックセンサの検知範囲に足を入れるためには、足を高く上げるか、足を奥まで入れる必要があり、使い勝手が悪くなることが予想される。

図4　キック動作を行う位置

また、片足立ちの懸念に関して、1秒以内のキック動作あれば、片足立ちになっても重心動揺によりバランスを崩す可能性が低いことが分かった。

上記のことから、バランスを崩さない自然なキック動作での検知に必要な足入れ量と足上げの高さ目標値を定めた。

定めた目標値を実現する為、図5にて示す通りブラケット構造を工夫し、センサ部を極力後方に配置することで、足入れ量と足上げの高さの目標を実現した。（図6参照）

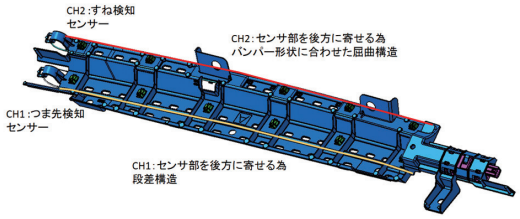


図5　キックセンサブラケット形状の工夫

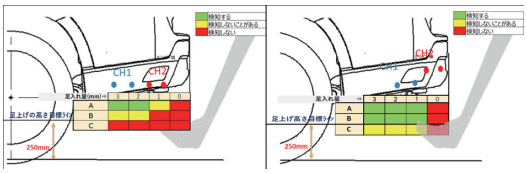


図6　ブラケット変更前後の検知性

3．検知ロジック

キックセンサはアクセスキーを所持した状態で、バンパ下に足を入れて引く動きにセンサが反応し、パワーリヤゲートに動作許可信号を送り、開閉するシステムである。足の動きを判別するロジックを下記に示す。

3.1　検知性

キックセンサは2つのセンサがつま先とすねの出し入れにより（図7参照）、波形の立ち上がりからON判定、足を引いたときの立下りからOFF判定を検出し、波形の「山」を認識し、複数のロジック（操作時間判定・CH1/2比率判定等）を用いてキック動作とその他の動作を判別する。（図8参照）

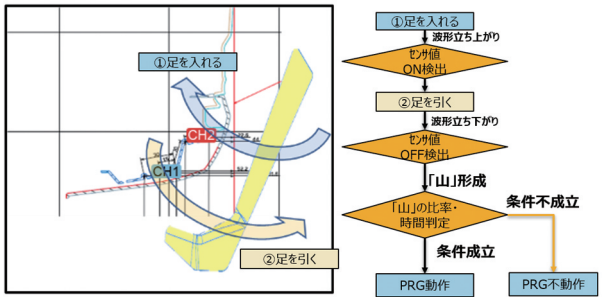


図7　足の出し入れと検知フロー

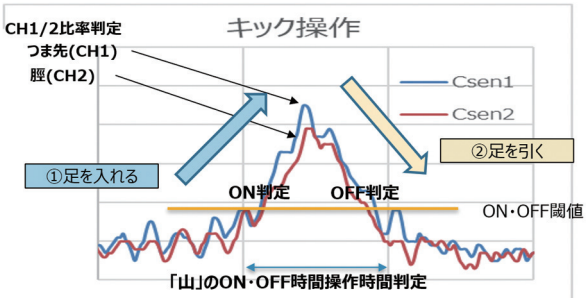


図８　検知判定条件

3.2　車両周辺の人の動きによる誤検知回避性

お客様がアクセスキーを持って車両周辺にいる場合、車両周辺の人の歩行動作等で不要動作が発生するシーンが想定される為、歩行動作で検出させないロジックを下記に示す。(図9参照)

3.1にて示した通り、2つのセンサの「山」を判定する。ON・OFF判定間の操作時間判定と、CH1/2比率判定を用いて、キック動作と歩行動作を切り分けている。(図10参照)

図９　歩行動作

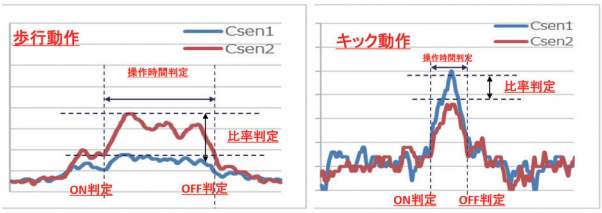


図１０　歩行動作とキック動作の波形比較

4．対外乱環境性能

自然環境の外乱によってセンサ感度が変動する状況に対し、不要な検知をさせない為に以下のシーンを想定した。

4.1　降雨による影響

降雨時は、リヤゲートパネルを通じリヤバンパに流れる水の動きに反応し、誤検知に繋がる可能性があるため対策が必要である。

降雨時の波形の特徴として、ノイズに似た連続的な変動を示す為、連続反応を認識し、図11に示す通り検知閾値を上げて誤検出を防ぐ。

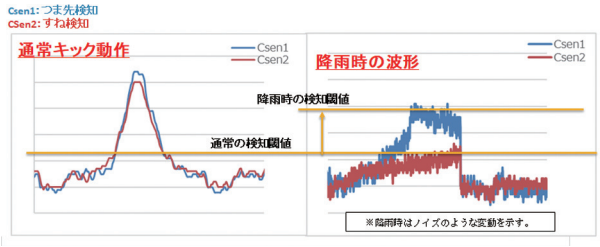


図１１　通常キックと降雨時の反応

4.2　降雪、着雪による影響

降雪時や積雪時に走行すると、車両底面及び背面に着雪する。センサ特性としては物体の動きに反応する為、着雪して留まっている雪自体は反応しないが、(図12参照)一定時間ごとにセンサのイニシャル値補正することで検知性を確保する。

また、バンパ内に入り込んだ雪でセンサと車体が繋がると、フランジとの導通により検知性を低下させる為、雪の侵入を防ぐ為に図13に示す通りキックセンサブラケットにリブを立てる対策を講じた。

図１２　着雪状態

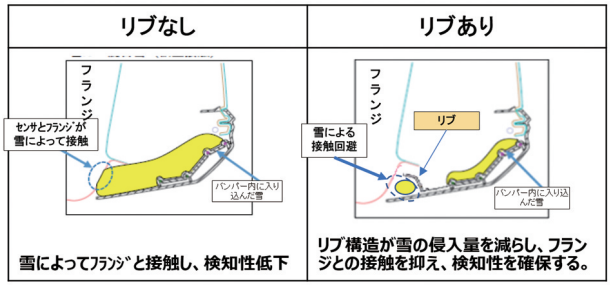


図 13　リブ構造による雪入り対策

4.3　小動物による影響

外乱要因として散歩中の犬がバンパ下を通過するシーンが考えられる。米国では約9050万世帯がペットと生活しており、米国世帯の約70%に及ぶことから[1]、誤検知の遭遇頻度が高まると考え、実際に小動物を通過させ、試験を実施した。

その結果、複数条件の組み合わせを除き※　誤検知しないことが確認できた。

また、キーを所持している場合のみに検知する為、お客様が車両周辺に居ないときにパワーリヤゲートが開くことは無い。

※　動物の体格、通過速度、通過エリアの様々な条件が重なった際に検知に至ることがある。

（図14，15参照）

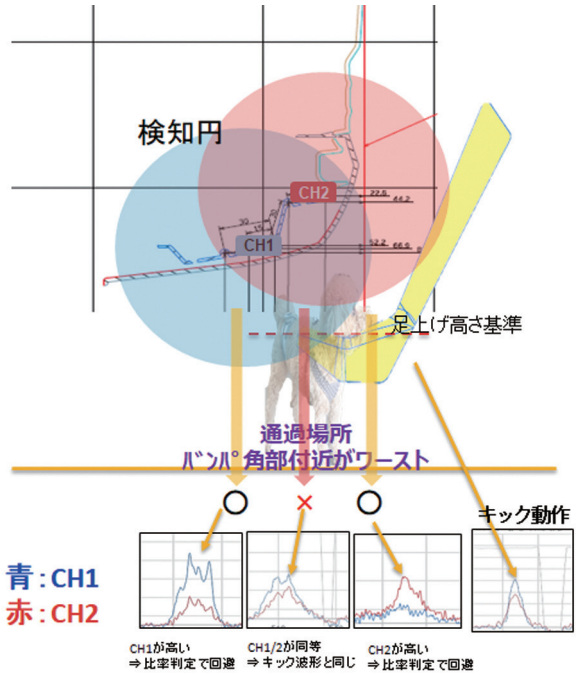


図 14　小動物による検知条件

図 15　検知に至る動き

5．車両連携制御

キック動作後のパワーリヤゲートの動きに対し、利便性と安全性の両立に取り組んだ。

5.1　開動作

お客様はキック後すぐにリヤゲートが動くことを期待していると考え、キック動作から1秒以内に動作することを目指した。

また、バンパ後面に触れるようなキックは、開動作軌跡に巻き込まれる懸念がある為、検知しにくい設定とした。

5.2　閉動作

リヤゲートの動きによる頭部への衝突が危惧される為､閉動作時には身を引く為のディレイ時間を設けた。（デフォルト2秒、無/1/2/3秒にカスタマイズ可）

また、荷物を持ったまま車両から離れることを想定し、キックで閉まる際にロックも行うキック＆ロックの機能を追加した。（デフォルトOFF）

6．市場導入

前述の通り、お客様にキックセンサを使いやすくご利用いただく為に十分配慮したが、アクセスキー所持、足を入れて引く動作など、条件やコツをお客様にご理解いただく必要があると考え、取り扱い説明動画やオーナーズマニュアルの整備を進め、使い始めから「安全・安心」を実感頂ける配慮策を講じた。

6.1　オーナーズマニュアル

蹴り方について3.1にて示した通り、「足を入れて引く動作」が必要であり、図16に示す通り、足をかざすイラストには、必ず足を入れて引く動作が必要であることを強調した。

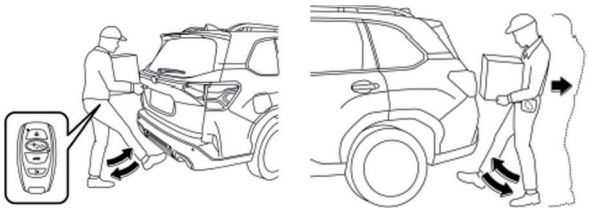


図 16　オーナーズマニュアル記載イラスト

また、お客様が困らないように、意図せず動作するシーンや、キック動作をしているのに動かないシーンを下記の例に挙げて記載し、注意喚起を促した。

●意図せず動作するシーン
　◆バンパ周辺に器材などが設置されているとき
　◆車を洗車しているとき
　◆小動物やボールなどがバンパ下を通過する時

●キックしても動かないことがあるシーン
◆足をバンパ下に入れたまま停止しているとき
◆バンパ後面に触れるようなキックをしたとき
◆繰り返しキックをしたとき
◆足を横にスライドする動きをしたとき
◆大雨が降っているとき
◆バンパが非常に汚れているとき

7．まとめ．

本稿ではお客様に「安全・安心」に使っていただけるSUBARUのキックセンサ式パワーリヤゲート開閉システム開発を紹介した。本開発では車の使われ方分析に基づいた使いやすく不安の少ないシステムとなるよう開発を進めてきた。

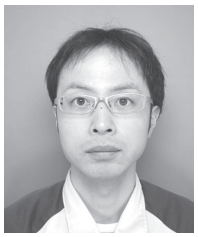
近年、外装システムをシームレスに利用することができる技術の進化が著しいが、これからもお客さまの利便性向上に貢献する技術を開発していき、お客様の生活を豊かにし、笑顔をお届けすることを目指すべく邁進していく。

最後に、キックセンサの開発に尽力いただいた関連部署の方々、パートナー企業の皆様に深く感謝申し上げる。

参考文献

(1) 米国のペット産業 - 規模と規模株式分析 - 成長傾向と成長傾向予測 (2024 ～ 2029 年)
https://www.mordorintelligence.com/ja/industry-reports/united-states-pet-market

【著　者】


長谷川 拓也

大塚　裕介

中村　昌也

CROSSTREK 新型ハイブリッドの紹介

Introduction of New Hybrid CROSSTREK

SUBARU 新型ハイブリッド開発プロジェクトチーム
SUBARU New Hybrid Project Team

抄　録

すべての人に「FUN」な気持ちになっていただきたい、そんな思いで誕生したCROSSTREKは、従来のSUBARUの価値をしっかりと継承するとともに、お客様のアクティブなライフスタイルに寄り添う商品として価値提供をしてきた。今回、新型ハイブリッドシステムの搭載によってさらなる進化を遂げ、SUBARUのエントリーゲートの幅を拡大する。

その開発のねらいと、それを実現するための技術的な手法について紹介する。

Abstract

CROSSTREK was born from the desire to make everyone feel "FUN." It has firmly inherited the traditional SUBARU values and has provided the product value that fits the active lifestyles of our customers. Now, that it has of a new hybrid system, it has evolved even further to widen the entry gate to SUBARU.

In this paper, we introduce the aims of the development and the technical methods to achieve them.

1．まえがき

近年、地球規模の環境変化は、生活への影響が無視できないものになってきている。多くの国や企業が環境対策にのりだし、自動車業界も例外ではない。

2023年6月、SUBARUは新体制に切り替わり、8月には新経営体制における方針を発表。2030年の電動車販売比率を、ハイブリッド車＋電気自動車で40%から、電気自動車のみで50%とする計画にアップデートした。ただし、電動化シフトへの過渡期においては何が正解かは誰にもわからない。SUBARUは、そうした100年に一度といわれている大変革期を「柔軟性と拡張性」をもって臨んでいく。

その答えの一つとして、私たちは、電気自動車だけではなく、ガソリンを使用する車も並行して開発、生産を継続する。電動化シフトを進めながらも、2030年のSUBARU車の50%はハイブリッド車やガソリン車が支えていく。これは過渡期に対する対応だけが理由ではない。

SUBARUにはあらゆる地域に、さまざまな嗜好を持ったお客さまがいらっしゃいます。それは、電動化に対応した設備が十分に整っていない地域や、豪雪地帯もある。そうしたお客さまにも、これまでと変わらぬ「安心と愉しさ」という提供価値を感じてもらい、笑顔になっていただくために、私たちSUBARUは、電気の力を最大限に活用した新型ハイブリッドシステムの導入を決め、選択肢の幅を拡大していく。

図1　CROSSTREK 新型ハイブリッド外観

2．開発のねらい

2.1　SUBARUならではのハイブリッドシステム

水平対向エンジン×シンメトリカルAWDによる安定した高い走行性能は、SUBARUが誇る提供価値のひとつである。この価値を継承するために、ストロングハイブリッドとなった新型ハイブリッドでもプロペラシャフトを用いたメカニカル式のAWDを選択。

SUBARUが長年磨き上げてきたAWD技術を継承するだけでなく、ハイブリッドシステム×シンメトリカルAWDにより悪路走破性をさらに高め、ほかにはない頼もしい走りを提供する。

更に新型ハイブリッド専用に作り直した2.5Lエンジンは、燃焼効率を高め、燃費性能を向上させるとともに、高出力モータと組み合わせることで、ゆとりある動力性能を実現した。

2.2　CROSSTREKへの搭載

CROSSTREKはお客様にとって身近で寄り添う大切なモデルであり、SUBARUとともに過ごすカーライフのエントリーゲートとなる重要な役割を担っている。幅広くお客さまにお選びいただけるスタンダードなモデルとしてのポジションを確立し、多様な価値観を持つさまざまなお客さまの期待に応えてきた。

重要な役割を担っているCROSSTREK だからこそ、これからも多くのお客さまに寄り添うモデルであり続けるために、新型ハイブリッドの搭載を決めた。

価格が上がってしまうパワーユニットであるからこそ、最も手の届きやすいモデルへの搭載が重要であると考えた。

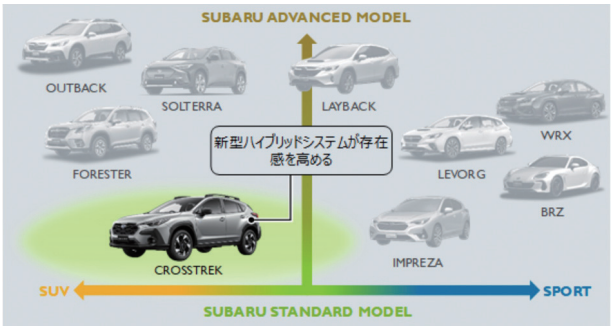


図2　CROSSTREK のポジショニング

2.3　トップクラスの航続距離

ハイブリッド車は、バッテリーやモータ、インバータなど多くの専用ユニットを搭載するが故に、ガソリン車より部品のレイアウト上の制約も多くなる。特に、大きなスペースを要する燃料タンクは、その容量を小さくしてユニットの搭載場所を確保する場合が多い。

新型ハイブリッドでは、燃料タンク周辺のスペースを確保するためにPCU（パワーコントロールユニット）の搭載位置を拘り抜き、エンジンの上部へ搭載した。結果として、ガソリン車並みの燃料タンク容量を実現。燃費向上と燃料タンクの大容量化の相乗効果で、トップクラスの航続距離を実現している。

3．ユーザーベネフィット

SUBARUらしさを継承した新型ハイブリッドは、環境性能だけではなく、走行性能や静粛性、実用性など、あらゆる面でガソリン車と同等以上の性能を有し、これからのSUBARU を支えていく新しいパワーユニットとして、従来のガソリン車、マイルドハイブリッド車とともにSUBARU の選択肢の幅を広げる。新型ハイブリッドが、普段使いの移動からアクティブな活動まで、あらゆるシーンに寄り添い、お客さまの「やりたいこと」、「行きたい場所」、「もっと先まで」、その好奇心を駆り立てる。

3.1　動的質感

新型ハイブリッド車では、ストロングハイブリッド化の重量増を感じさせない操舵の軽快さや、特に後席での乗り心地の良さを目指した。高速道でのばね上のフラット感や収まりの良化を狙い、長距離運転時の快適性も向上させた。また、操舵に関わる部品にチューニングを加えることで、ステアリングに伝わる振動遮断性を良化させた。

この他、ハイブリッド車における燃費向上に欠かせない高効率な回生を実現するブレーキシステムや、SUBARU車にとって重要な性能ファクターである走破性について、またハイブリッド車ならではの静粛性について説明する。

3.1.1　足廻りの進化

新型ハイブリッド車においてもSUBARUならではの重量バランスに優れたシンメトリカルAWDのレイアウトを継承した。ストロングハイブリッド化による重量増に合わせて、足廻り部品のフロントロアアームではブッシュ特性の前後バランスを最適化し、ブッシュ変形による走行時のトー変化を抑制し、操舵時の正確性と応答性を向上させた（図3中央）。またリヤダンパではロッドを延長することで横力負荷時のフリクションを低減させ、ダンパの動き出しを滑らかにした（図3右側）。これらの専用設計により、操縦安定性と乗り心地を高次元に両立し、さまざまなシーンで快適な移動を実現している。

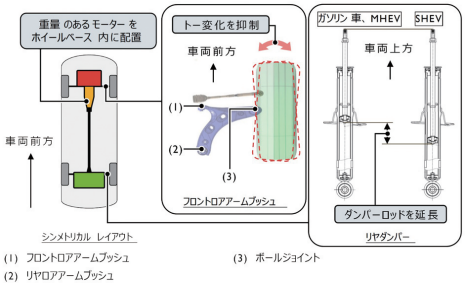
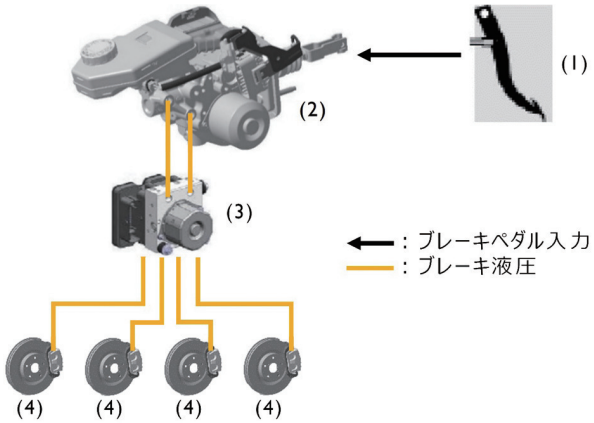


図3　サスペンション

3.1.2　安心感のあるブレーキフィーリング

新型ハイブリッド車専用の電子制御ブレーキシステムを採用した(図4)。ブレーキ液圧をきめ細かく制御し、回生ブレーキによる制動力を最大限に活用するよう協調制御することで、エネルギー回収効率を向上させ、優れた燃費性能に貢献している。また、ブレーキの効きと剛性感のバランスを最適化することで、コントロールしやすく安心感あるブレーキフィールを実現した。



(1) ブレーキペダル
(2) マスターシリンダー＆ブースター ASSY
(3) ビークルダイナミクスコントロール(VDC)ユニット
(4) フロント/リヤブレーキ

図4　ブレーキシステム構成イメージ

3.1.3　走破性(メカニカルAWD)

プロペラシャフトを用いたメカニカル式のAWDにより後輪に適切な駆動力を伝達し、悪路での高い走破性と雪道などの低μ路での安定した走りを実現した(図5)。さらに、低速からアクセル操作にレスポンスよく駆動力を出力するモータにより、急な坂道での発進や雪道の吹きだまりからの脱出も安心して行える力強い走りを可能にしている。SUBARUならではの高い走破性を継承し、頼もしい走りを提供している。

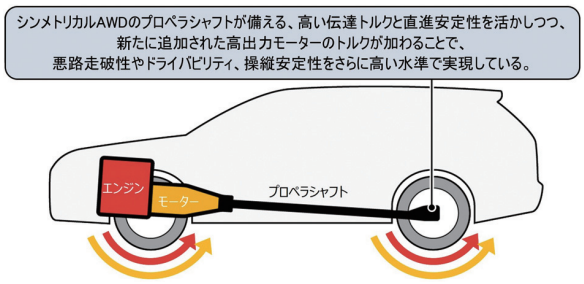


図5　新型ハイブリッドシステムのAWD

3.1.4　1ランク上の静粛性

新型ハイブリッドシステムでは、モータ走行領域を拡大し、エンジンの高回転化を抑制することで、低速走行から加速、高速巡行まで全領域で静粛性を高めた。更に、車両としてもインシュレータ(吸音材)の適用を拡大し、1ランク上の静粛性を実現している。

フードインシュレータの面積と厚みを拡大(図6)することで、エンジン音をより吸収し、静粛性が向上した。

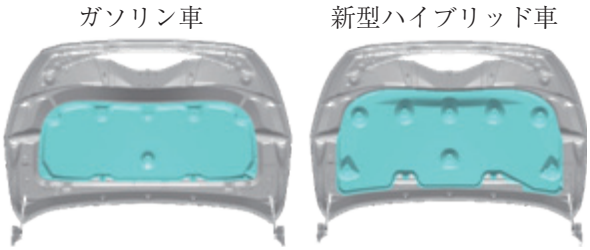


図6　フードインシュレータ

また、モータを内蔵するトランスアクスルのケース剛性を最適化したほか、トランスアクスル周辺のトンネルインシュレータの面積を拡大(図7)するとともに、フロアマットにも高比重の素材を採用し、ハイブリッド車特有のモータ音を抑制している。車外騒音も低減させ、質の高い走りと静粛な移動空間を両立させた。

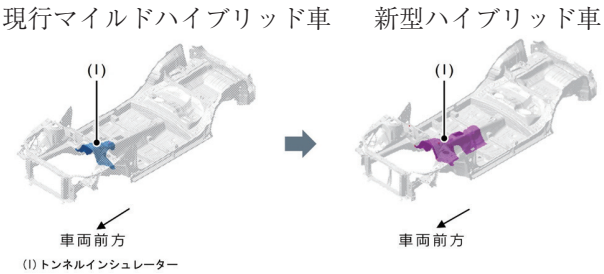
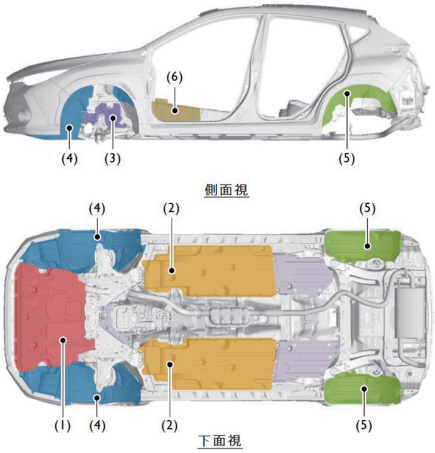


図7　トンネルインシュレータ

更に床下部品にも多くの吸音材を追加・拡大した。(図8) これらにより、車内・車外への騒音を抑制している。



(1) フロントアンダーカバー　(4) フロントマッドガード
(2) リヤアンダーカバー　(5) リヤマッドガード
(3) サイドアンダーカバー　(6) トンネルインシュレータ

図8　床下のインシュレータ追加・拡大

3.1.5　EVモード

約30 km/h 以下の速度かつ、車両状態の条件を満たしたときに、ドライバーの意思でモータによる走行を選べるEV モード(図9) を採用した。早朝、深夜の住宅地を走るとき、または屋内駐車場で移動するさいに、低騒音化*1と排気ガス低減に貢献し、社会環境に配慮した。

*1 ：ただし、車両の接近を周囲に報知するため、車両接近通報音(AVAS) を車外に向けて吹鳴する。

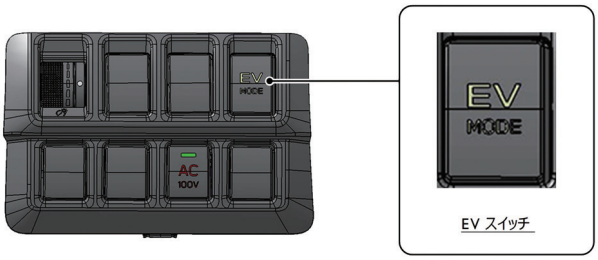


図9　EVモードスイッチ

3.1.6　AVAS（車両近接通報音）

EV走行時、周囲に車両の接近を知らせる車両接近通報音は、お客様不満に直結する車内音圧と、法規要件が相反するため両立する性能を目指した。スピーカを路面に向け、ダクトを通して発音させることで、車外全周に対する認知性を保ちながら車内音量を低減した。また、次世代のSUBARU電動車をイメージした音源を新規開発し、車体の感度に合わせた音色に最適化することで車内の静粛性と法規要件を両立させた。

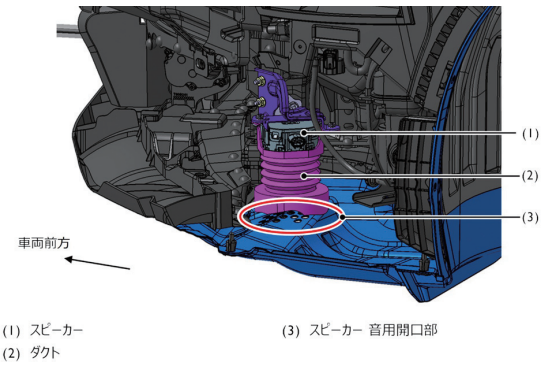


図10　車両接近通報スピーカ

3.2　実用性

従来から好評をいただいている居住性や使い勝手をキープした各種レイアウトを継承している。ハイブリッドシステムの起動においてもプッシュスタートスイッチの操作でON/OFFができ、またEV関連のスイッチも運転席の集合スイッチエリアに配置させることで、従来からのお乗り換えのお客様に対しても戸惑いなく新型ハイブリッドシステムを使いこなしていただける室内空間を実現した。

3.2.1　荷室空間

荷室ボードの下部に高電圧バッテリを搭載しているが、開口部の幅や地面からの高さを全く変えずに荷物の積み下ろしのしやすさを確保した。さらに後席を前倒しての荷室拡大モードにおいては前方部へ拡がる大きな面積を確保しながらアクセサリーコンセント(オプション設定)を加えることでレジャー時や車中泊など、様々な活用を可能とした。

3.2.2　空調性能

エンジン駆動状態に左右されずに冷房性能を確保するための電動コンプレッサ(図11)、および暖房性能を確保するためのPTCヒーター(図12) の採用と制御構築を行い、燃費向上と快適な冷暖房性能の両立を図った。また、極寒時にはEV走行モード中でも十分なデフロスター性能を確保するハイブリッド車独自の空調制御を採用した。

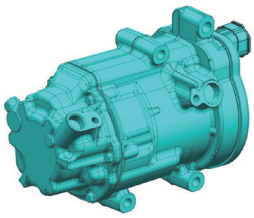


図11　電動コンプレッサ

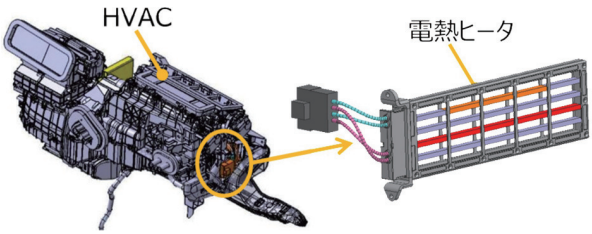


図12　PTCヒータ

3.2.3　アクセサリーコンセント(AC100V)

荷室に家庭用と同じAC100Vコンセントを設定し、合計1500Wまでの電気製品を使用可能とした(図13)。野外でのレジャーや、災害などの緊急時における給電も可能とした。

図13　アクセサリーコンセント

3.3　安全性能

新型ハイブリッド車では、従来車の安全性を維持しながら、アイサイトXをCROSSTREKとして初めて採用。上級パワーユニットに相応しい先進安全機能の充実を図った。また、ハイブリッド専用ユニットに合わせ、車体の強化も実施した。特に、荷室床下に搭載した高電圧バッテリーは、衝突時の安全性を含め様々な安全性を配慮し開発を行った。

3.3.1　アイサイトX

CROSSTREKで搭載した新世代アイサイトでは新型ステレオカメラに広角単眼カメラを加えることで、広い認識範囲で危険をいち早く発見し交差点をはじめとした様々なシーンでの事故回避アシストを可能にしている。これに加え、新型ハイブリッド車ではLEVORG、OUTBACKより採用した高度運転支援機能（アイサイトX）を搭載。新世代アイサイトシステムに３Ｄ高精度地図ユニット、ステアリングタッチセンサ等のデバイスを追加することで渋滞時ハンズオフアシストやアクティブレーンチェンジアシスト等の運転負荷軽減機能を実現。自動車専用道路の様々なシーンでドライバーの負担を軽減し快適なロングドライブをサポートする。

3.3.2　高電圧バッテリーの保護

荷室に搭載されている高電圧バッテリーは特に車両後部からの衝突に備え、バッテリーパック搭載位置、車体との締結構造の工夫、筐体骨格の適正化により、衝突安全性を確保。加えて、荷室内で水等をこぼしても、水壅路を走行してもバッテリーパック内部に水等が侵入しにくい構造を採用（図14）。

また、動力・燃費性能を永く維持し続けるために、バッテリーの制御による保護及び監視と冷却温度ムラを低減する冷却構造を採用（図15）。

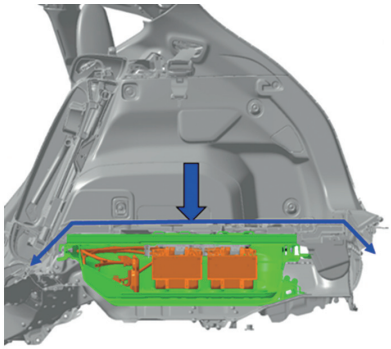


図１４　被水対策構造

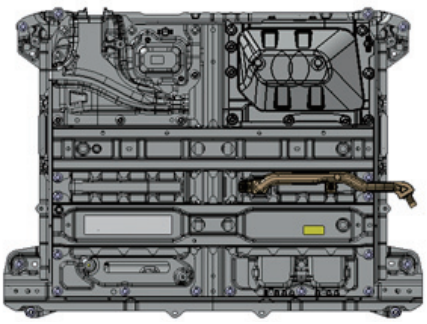


図１５ 高電圧バッテリー

3.3.3　衝突安全ボディ

従来車に対し、PCUのエンジンルーム内配置、高電圧バッテリーのリヤフロア配置に伴い、ボディ構造の最適化と高張力鋼板を適切に配置することで、優れた衝突安全性能を実現した（図16）。

また、対前面衝突では、トーボード構造を変更（図17）することで、PCUの必要衝突ストロークを確保し、万が一の衝突に備え、電気関連の安全性に配慮。対後面衝突では、リヤフレームおよびガセットの衝突時のつぶれ方をコントロール（図18）することで、高電圧バッテリーの破損を抑制するとともに、高電圧バッテリーの室内侵入量を規制し、乗員の安全性に配慮した。

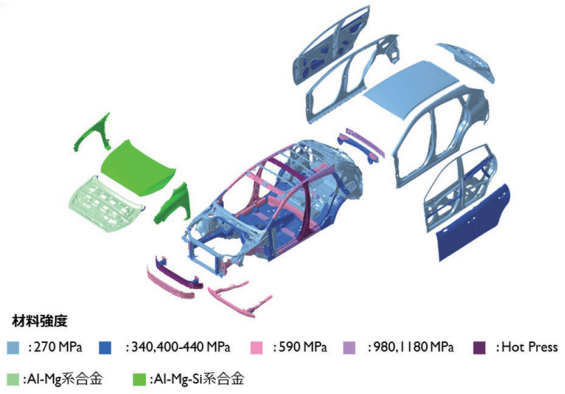


図１６　車体骨格強化部材

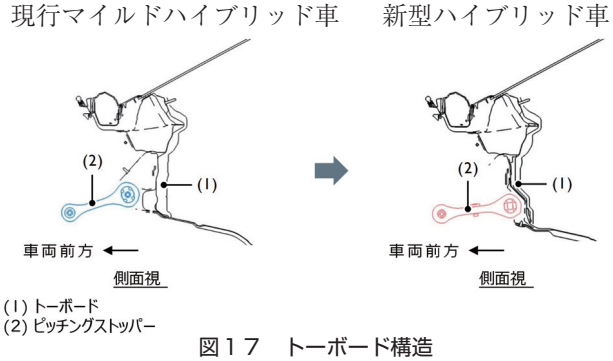


図１７　トーボード構造

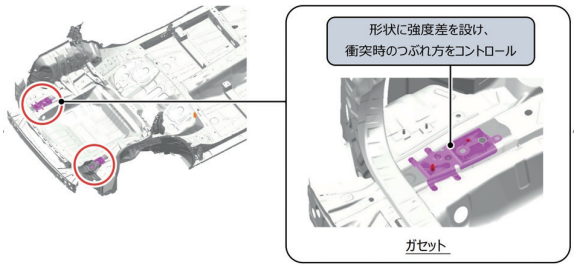


図１８　リヤフレーム構造

4．デザインと装備

これまでのCROSSTREKと同様に、アウトドアアクティビティを楽しむには装備が重要である。特に「挑戦的」に楽しむために部品のデザインは、それに見合う機能と気持ちの表現になっている。

4.1　デザイン

CROSSTREKが持つ、キャビンが小さく、前後のタイヤが張り出して見える、積極的に走り回れそうなプロポーションは「挑戦にふさわしいカタチ」で、力強くなったパワートレインを支え、アクティビティに挑戦するワクワクを演出した。

4.1.1　レターマーク

水平対向エンジンの特徴である、水平運動のピストンモチーフを四角く丹精な輪郭で表現し、その中のスピンドルによる緻密なリフレクション加工で、新型ハイブリッドの先進性を合わせて表現した（図19）。

図19　新型ハイブリッド専用レターマーク

4.1.2　ホイールデザイン

新型ハイブリッド車専用の意匠にダークメタリック塗装＋切削光輝、18インチアルミホイールを採用。4本スポークで先進性を表現するとともに、各スポークはフック形状をモチーフとして、悪路にもしっかりと食いつく力強さを表現した（図20）。

図20　18インチアルミホイール

4.1.3　インテリアデザイン

ブラックのトリムと明るいグレーのコントラストが際立つ内装に、ブレイズガンメタリックのアクセントを加えた、洗練されたカラーコーディネートで、お客さまのスポーティマインドをかき立てる（図21）。

図21　インテリアデザイン

4.2　インフォテインメント・テレマティクス

11.6インチのセンターインフォメーションディスプレイは新型ハイブリッド車でも引き続き採用、大画面で見やすく、使いやすく、機能も充実している。よく使うAVHボタンを常時表示とすることで、1回の操作で設定変更を可能とし、使い勝手を高めた。

更に、メータでは、新型ハイブリッドの特長である緻密なエネルギーマネジメントが一目でわかる表示とした。パワーメータでは、システムの稼働有無／出力／エネルギーの回収状況、エネルギーフローではエネルギーの流れや高電圧バッテリー充電状況を表示する（図22）。

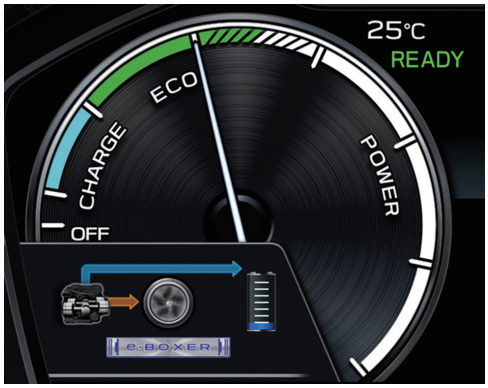


図22　パワーメータおよびエネルギーフロー

4.2.1　テレマティクス

スマートフォンでの専用アプリを使ったテレマティクス機能を拡張。リモート空調では、スマホ操作でエアコンを作動させることができ、夏場には車内を予め冷やしておいたり、冬場にはデフロスターを作動させることで除氷作業も可能とした。また、マイカー検索も機能を拡張し、スマホ操作で車両のハザードランプを点滅させることが可能となり、広い駐車場で自車を見つけやすくなった。

4.2.2　フル液晶メータ

アイサイトXとセットでの展開とし、高度運転支援によって増えた車両側の情報をわかりやすく伝えるため、12.3インチの大画面で多様な表示を可能にした。従来のメーター表示に加え、ナビゲーション表示も可能Apple CarPlayとの連携を強化し、CarPlayルート案内時にターンバイターン表示とApple Mapへの切替を可能にして利便性を高めた(図23)。

※Apple CarPlayは、Apple Inc.の商標です。

図23　フル液晶メータ　CarPlayでのルート案内表示

5．まとめ

世界的に電動化、EV化の流れが進んでいる中で、このCROSSTREKに搭載した新型ハイブリッドは、これからのSUBARUの基幹となるパワーユニットの1つとなると考え、開発チーム一丸となって開発が行われました。お客様に満足頂けるよう徹底的に拘り抜き、ギリギリまで改良を行い、“SUBARUらしいハイブリッド”に仕上げることができました。是非、一人でも多くのお客様にその進化をご体感いただきたいと願っています。

最後に、本開発にあたり多くの関係者の協力が不可欠でした。この場を借りてそのご尽力に感謝いたします。

【著　者】

新型ハイブリッド開発プロジェクトチーム

「商品事業本部」　藤居　拓也
「内外装設計部」　沼澤　浩二
「ボディ設計部」　松尾　拓磨
　荒木　直也
　黒田　昌広
「ＡＤＡＳ開発部」　石田　武
　小西　英祐
「バッテリーシステム開発部」　上田　逸央
「デザイン部」　高木　曽太
「車両開発統括部」　清水　亮介
　里村　聡
　京兼　靖明

CROSSTREK　新型ハイブリッドシステム用トランスアクスルの開発

Development of Transaxle for CROSSTREK New Hybrid System

高　柳　良　太[*1]　TAKAYANAGI Ryota
双　木　勝　之[*2]　NAMIKI Katsuyuki
富　田　拓　郎[*3]　TOMITA Takuro
室　井　裕　佐[*1]　MUROI Yusuke
小　林　哲　夫[*1]　KOBAYASHI Tetsuo

抄　録

2024年に国内へ導入するCROSSTREK向けにシリーズ/パラレル式の新型ハイブリッドシステムを開発した。トヨタ自動車(株)とのアライアンスによって技術供与された中容量モータジェネレータ1(以降MG1)と大容量モータジェネレータ2(以降MG2)を内蔵したトランスアクスルTH2Bを開発した。

本稿ではそのトランスアクスルTH2Bについて開発技術を紹介する。

Abstract

A new series/parallel hybrid system has been developed for CROSSTREK to be launched in Japan in 2024.

We have developed the transaxle TH2B which incorporated middle capacity Motor Generator 1 (MG1) and large-capacity Motor Generator 2 (MG2), which were provided through an alliance with Toyota Motor Corporation.

This report introduces the development technology for the transaxle TH2B.

1．まえがき

SUBARU初となる、ストロングハイブリッド用の新型ユニットを開発し、2024年に国内で発売の、CROSSTREK　HYBRIDに搭載する。本稿では、その新型ハイブリッドトランスアクスルTH2Bおよびパワーコントロールユニット(以降PCU)の技術内容について紹介する。

2．開発の狙い

近年、世界的に要求が高まる「環境性能向上」に加え、「動的質感向上」を実現すべく、シンメトリカルAWDを継承した新型ハイブリッドトランスアクスルを新規開発し、低燃費と大容量MG2採用による優れた動力性能を両立させた。従来型TH2A(北米CROSSTREK PHEV)に対し、WLTCモードでのトランスアクスル総損失を従来比11%低減、およびスピンロス17%低減を目標とした。主断面を図1、目標性能達成手段を表1に示す。

3．構造と主要諸元

本ユニットは高電圧バッテリの充電や駆動用電力の供給を行うモータ(MG1)と、駆動と回生ブレーキによる発電を行うモータ(MG2)を内蔵している。

また、エンジン動力をMG1と出力軸に分割する動力分割機構、MG2動力を出力軸に伝達するモータリダクション機構、減速機構およびデファレンシャル機構で構成されたギヤトレインを採用した。主要構造を図2、主要諸元を表2に示す。

＊1 パワートレイン設計部
＊2 車両環境開発部
＊3 車両運動開発部

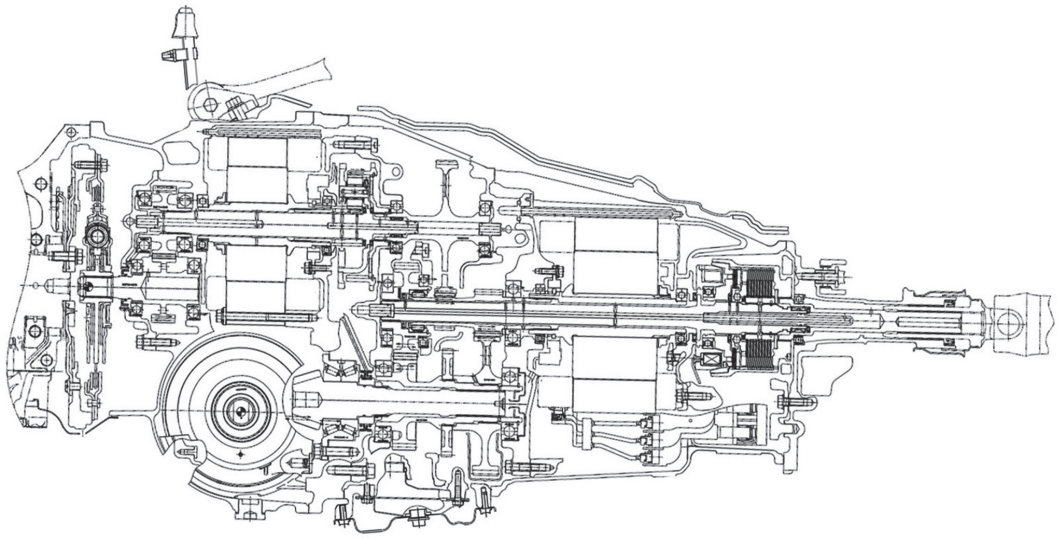


図１　新型ハイブリッドトランスアクスルの主断面

表１　目標性能達成手段

Target performance	Approach	Items
Environmental friendliness	Mechanical loss reduction	[4.1]Axis layout
		[4.2]Motor cooling and lubrication
	Lower spin loss	[4.3]Motor reduction gear [4.3]Baffle
	AWD control optimization	[4.4]Torque distribution
Dynamic quality	Gear noise reduction	[5.1]MG2 helical gear reduction [5.2]Helical gear construction method
	Motor noise reduction	[5.3]Sound insulations [5.3]Dynamic damper
	Power performance	[5.4]Large capacity MG2

4．環境性能向上の取り組み

4.1　軸レイアウト

環境性能と振騒性能を両立する最適な軸レイアウト検討をゼロベースで実施した。取り得るすべてのトルクフローを考慮して軸レイアウトを洗い出し、目標性能達成のための最適な軸レイアウトを導き出した。

4.2　モータ冷却、潤滑

セカンダリリダクションギヤ、モータリダクションギヤ、トランスファギヤの潤滑を従来型TH2Aの掻き上げ潤滑から強制潤滑へ変更し、エンジンが停止するEV走行などすべての走行条件でもモータ冷却や潤滑性能を確保できるように、エンジン軸側とアウトプット軸両方からオイルポンプを駆動できるツインドライブ機構を採用した。ツインドライブ機構の断面図を図3に示す。

また、リリーフバルブを設定し、オイルポンプ吐出圧を最適に保つことで、冷却性能、信頼性能を確保しつつ、オイルポンプ駆動ロスのミニマム化を図った。

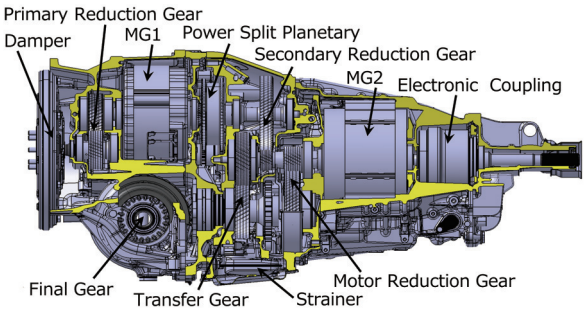


図２　新型ハイブリッドトランスアクスル主要構造

表２　主要諸元

Engine max torque		209Nm
Motor max torque		270Nm
Gear ratios	Power split planetary	Power generation :0.278
		Drive:0.722
	MG2 reduction ratio	3.380
	Primary reduction ratio	1.057
	Secondary ratio	0.240
	Transfer ratio	1.000
	Final ratio	3.700

トーイング走行などの高出力連続運転時のモータ冷却のため冷却性能の高い水冷クーラを採用。オイルクーラで冷却されたオイルをモータへ直接導くことで冷却性能を確保した。冷却、潤滑の概念図を図4に示す。

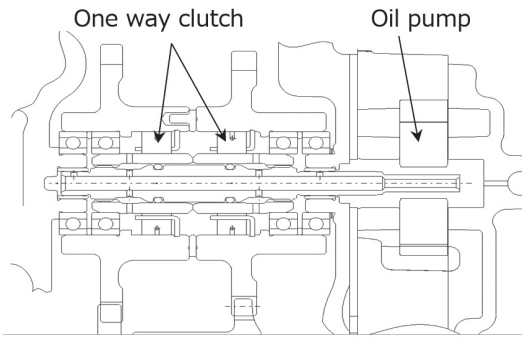


図３　ツインドライブ断面図

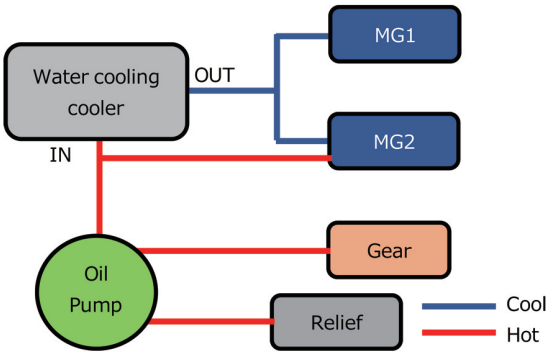


図４　冷却、潤滑概念図

4.3　スピンロス低減

モータリダクションギヤを従来型TH2Aのプラネタリギヤからヘリカルギヤへ変更したことにより、4ピニオンプラネタリギヤでの噛み合い点数8点からヘリカルギヤの噛み合い点数1点となり、スピンロスを低減した。

また、このヘリカルギヤのオイル攪拌抵抗を低減すべく従来型TH2Aに対して、9%の油量低減を行った。車体G発生時の油面が傾いた際に発生するストレーナからのエア吸いを最小限に留めるようオイルの吸い口位置の最適化を行い実現した。更に油面に浸かるモータリダクションギヤにおいてはバッフルを設置した上で、潤滑を必要とする全ての箇所においてギヤの掻き上げに頼った潤滑を廃止し、ケースやシャフトの油穴から強制的に供給される潤滑構造とした。モータリダクションギヤを図５に示す。

これにより、確実且つ最小限となる潤滑流量を実現し、信頼性を確保しつつ攪拌抵抗の低減効果を高めた。また、この潤滑最適化により、MG2の大容量化に伴う冷却性能の向上として従来型TH2Aに対し23%の必要流量増加を要したものの、オイルポンプ吐出油圧は29%低下させ、オイルポンプ駆動ロス低減にも成功した。結果としてWLTCモードでのトランスアクスル総損失の従来比11%低減目標を達成、スピンロス17%低減目標を達成した。

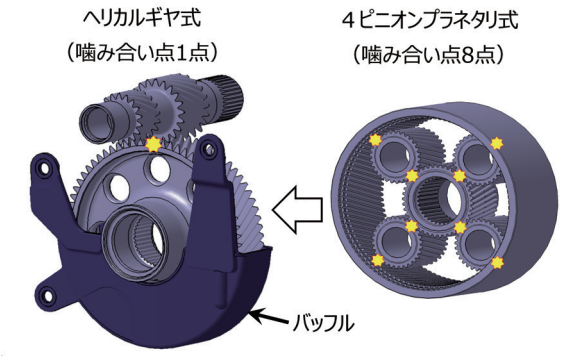


図５　モータリダクションギヤ

4.4　AWD制御

雪上や悪路を走行中のアクセルペダル踏み増し操作を行った際に、瞬時に後輪へトルクを伝達することによるホイルスピンの抑制は、安定感のある車両挙動を実現する上で重要となる。新型トランスアクスルのAWDシステムにおいては、伝達トルクの制御指示に対する応答性に優れる電制カップリングを採用した。更に従来採用の電制カップリングに対し、内部剛性やカム角の変更により、30%の応答性アップを達成した。結果、電動車としての燃費性能と操縦安定性の高レベルでの両立を実現している。結果を図6に示す。

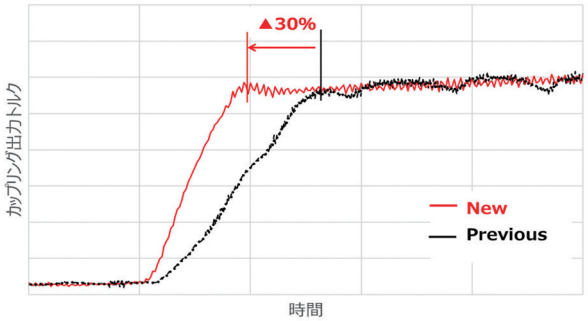


図６　電制カップリング応答時間

５．振騒性能向上の取り組み

5.1　ギヤ音に対する構造的配慮

モータリダクションギヤをヘリカル化することで、スピンロスだけでなく振騒性能も向上を実現している。モータリダクションドライブギヤはセカンダリドリブンギヤと軸共用となり歯車が隣り合うため、従来工法の歯研では製造することができない。そのため、レイアウト実現に向けてパワーホーニング加工を当社加工ギヤとして初採用した。それによりMG2大容量化に対応しつつ振騒性能を向上させる構造を従来比-24mmのコンパクトなレイアウトで実現している。ヘリカルギヤ構造を図７に示す。

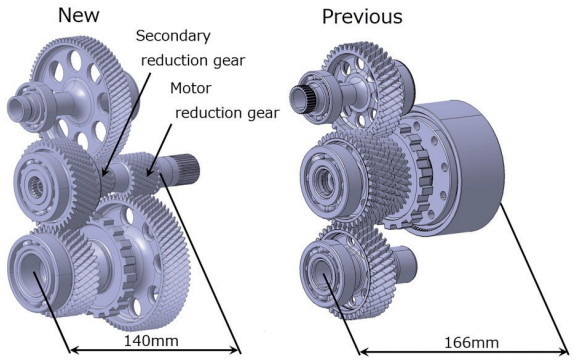


図７　ヘリカルギヤ構造

5.2　ギヤ音に対する工法配慮

構造配慮で採用したパワーホーニング加工は構造だけでなく伝達誤差の低減にも寄与している。従来工法の歯研では伝達誤差にロバスト性をもたせるためにクラウニングを付与するが、創成歯研だと加工軌跡上ナチュラルバイアスが付き、噛み合い始めと終わりの当たりが強くなり起振力を悪化させる要因となっていた。パワーホーニング加工ではドレスギヤの精度転写となるためクラウニングもバイアスも任意に設定することができる。一方で、パワーホーニングでは歯研ほどの歯面修正力を得られないため、クラウニングを小さくし、ナチュラルバイアスを抑制した歯研ギヤと組合せることで、起振力の代表指標である噛合い伝達誤差を従来比1/2まで低減した。結果を図8に示す。

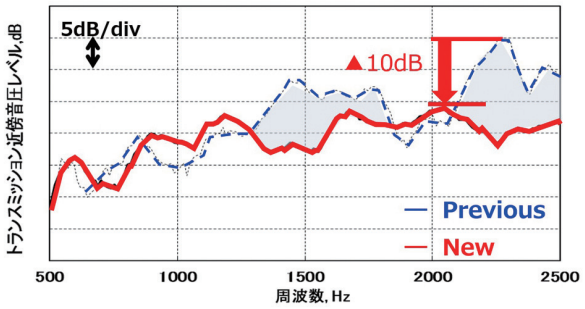


図８　ギヤ音

5.3　モータ音に対する構造的配慮

モータ音伝達経路であるトランスミッション後端マウント付近の振動を低減する為、3つの狙い周波数に対してダイナミックダンパー(以下、DDと略記)をUPR、LWR、RHにそれぞれ設定した。質量対効果が最大となるように各振動モードと並進する構造に設計し、振動を最大4dB低減した。DDの構造を図9、結果を図10に示す。

また、MG2ロータに接続するギヤシャフトが従来構造から長くなりシャフトが倒れるミスアライメントによるロータ回転次数ノイズを低減する必要があり、ロータスラスト方向のガタ量を詰める皿バネを採用した。信頼性・スピンロスと両立する為、スラスト押付力と振動の実機サーベイ結果をCAEへ落とし込み、最小の背反で振動を10dB低減した。結果を図11に示す。

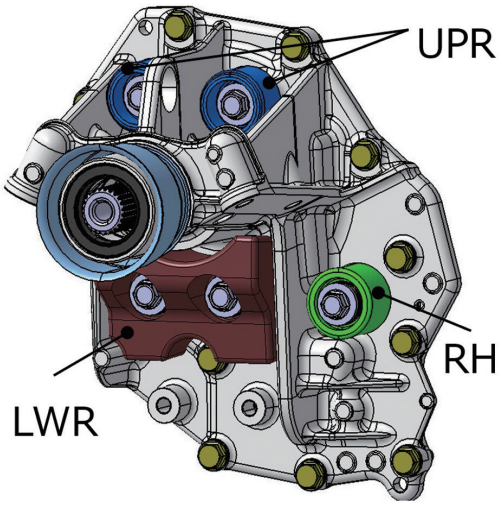


図９　ダイナミックダンパー

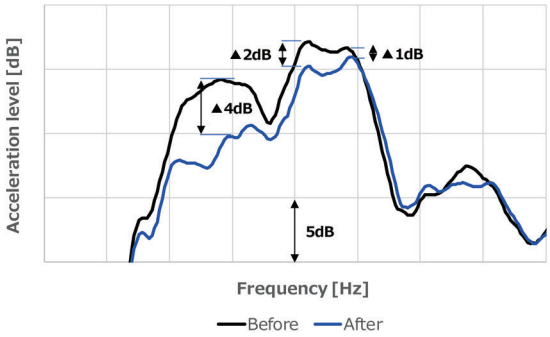


図１０　DDによるモータ音低減効果

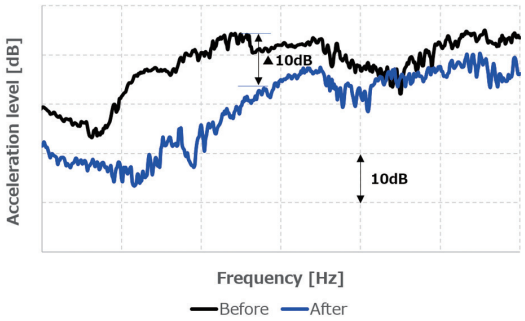


図１１　皿バネによるロータ回転次数ノイズ低減効果

5.4　大容量MG2による動力性能の向上

動的質感向上(登坂能力、加速性能)を目的とし、大容量MG2を採用した。大容量MG2に求められる大電流に対応するため、電力変換素子を大容量対応仕様に置き換えた。素子以外は中容量と同仕様とし、PCUをエンジン上に搭載するスペース制約を達成しつつ、登坂性能と中間加速性能の向上が図れる様チューニングしPCU全体の信頼性を確保した。これにより加速タイム、動的質感の向上に寄与した。 大容量MG2の

性能曲線を図12に示す。70→90mph加速タイム比較（北米）を図13に示す。

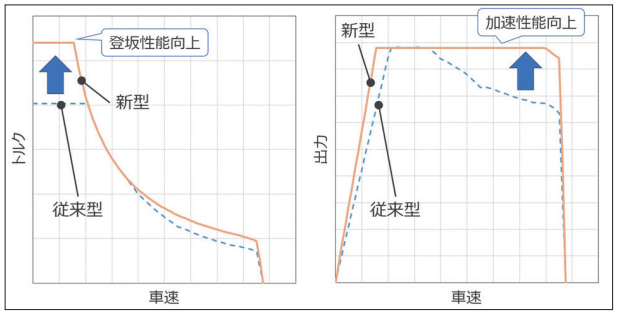


図１２　大容量ＭＧ２　トルク出力性能

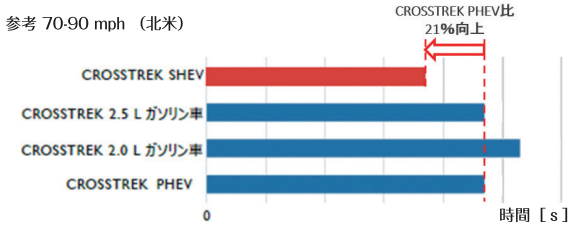


図１３　70 → 90mph 加速タイム比較（北米）

６．まとめ

今回、新開発したストロングハイブリッド用トランスミッションには、本稿で述べた新規軸レイアウト、機械損失低減、軽量化、AWD制御、そして各種振騒対策を織込み、国内向けのSUV車両の環境性能と動的質感の向上に貢献した。

最後に、本開発及び生産化にあたり、多大なるご支援、ご協力を頂いた社内外の多くの関係者の方々へ、心より深謝を申し上げる。

参考文献

(1)　足森　崇志ほか:CROSSTREK HYBRID用プラグインハイブリッドトランスミッションの開発、SUBARU技報, No.46(2019)、p.99-103

【著　者】

高柳　良太

双木　勝之

富田　拓郎

室井　裕佐

小林　哲夫

CROSSTREK HYBRID 向けパワートレイン制御開発

Powertrain Controls Development for CROSSTREK HYBRID

渡邉　豪[*1] WATANABE Go
若山綾那[*1] WAKAYAMA Ayana
牧野和輝[*1] MAKINO Kazuki
志村　進[*1] SHIMURA Susumu
林　秀樹[*1] HAYASHI Hideki
戸谷好貴[*2] TOYA Yoshitaka

抄　録

CROSSTREK HYBRIDは商品コンセプト“FUN”の実現に向け、新たなパワートレイン制御を開発した。本稿では、SUBARUのクルマづくりを継承しつつ、動的質感と環境性能を向上した詳細について報告する。

Abstract

We have developed a new powertrain control system for the CROSSTREK HYBRID,which improves its driving dynamics and environmental performance. This paper provides details on this development.

1．まえがき

柔軟性と拡張性の向上に向けたICE系（ガソリン車・HEV・PHEV）の商品強化として、次世代e-BOXERを開発した。専用のパワートレイン制御により、移動が愉しくなる動的質感、自然と共生できる環境性能を向上させ、新型クロストレックの開発コンセプト“FUN”を実現した。

2．動的質感の向上

2.1　走りと燃費を両立するAWD解放制御の開発

次世代e-BOXERでは、トランスミッションの新規開発に合わせ、新型の電子制御カップリングを採用し走行性能と環境性能の両立を実現した。本章ではAWD制御開発の取り組みを説明する。

図1にトランスミッション主断面を示す。新型の電子制御カップリング(以下カップリング)はトランスミッションの後方に配置し、エンジンやモータのトルクを走行状態に基づき後輪に伝達するシステムである。既販車では、カップリング内のクラッチを常時締結し走行性や走破性を確保していた。しかしクラッチを締結することで、カップリング電制部での電力消費が発生、また駆動系の循環トルクによりメカ的な損失が生じる。そこで新型クロストレックでは、AWDを必要としない走行条件下では、カップリングのクラッチを解放し損失低減を図った。

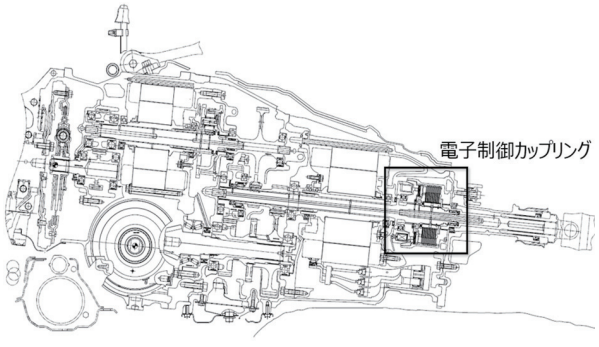


図１　トランスミッション主断面

クラッチの解放を実施するにあたり、お客様が期待するAWD性能を維持した上で環境性能の向上を目指した。具体的には、国道や高速道路など比較的車速変化が少ない条件下ではクラッチを解放し、登坂や曲がりくねった山道、砂利路や積雪で荒れた路面等では、特別な操作をすることなくAWDで走行できるよう開発した。

＊1 車両環境開発部
＊2 E＆Cシステム開発部

特に今回のクラッチ解放制御で重要視したことは、路面の判定である。現行車のAWD制御は舵角や駆動力を基に制御するため、勾配や山道は判断しやすいが路面状況の判定が難しい。そこで、4輪車輪速差(4輪車輪速のうち最大値-最小値)を用いて荒れた路面を判定することに取り組んだ。一例を図2に示す。比較的路面状態の良い高速道路や国道と比較し、雪上市街地やダート路は車輪速差が大きく出る傾向がある。一方、調査して行く中で安定した路面でもマンホールや道路の継ぎ目で一時的に4輪車輪速差が大きく出てしまい、クラッチ開放が出来なくなる懸念があった。お客様の期待に合わせるべく、一般道ではクラッチ解放しつつ悪路ではAWDになるように適切な閾値設定を行った。

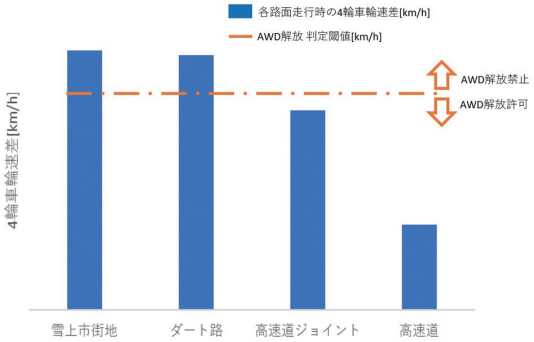


図２　走行路毎の４輪車輪速差

また、凍った路面や圧雪路は路面の状況が良く4輪車輪速差が出にくい場面でも、AWDの安心感を実現すべく評価を実施した。図3に氷盤路での転舵試験結果を示す。クラッチを解放した状態で走行中に転舵を行うと舵角以上にヨーレートが増加し車両がスピン傾向になる。一定以上の舵角となった場合は素早くAWDに切替えることでスピンを防止した。

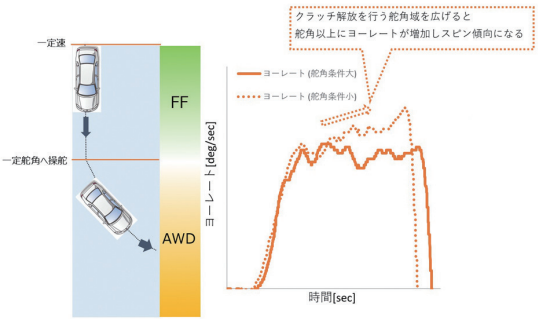


図３　雪上 緊急回避操作波形
（太線：FF 領域大、細線：FF 領域小）

以上の結果をもとに、一般道でのクラッチ解放頻度を試算した結果を図4に示す。交差点の右左折や信号からの発進、料金所からの加速や本線への合流などを含めても、一般道で55%、高速道路では74%までクラッチ解放状態を維持して走行できることが確認できた。

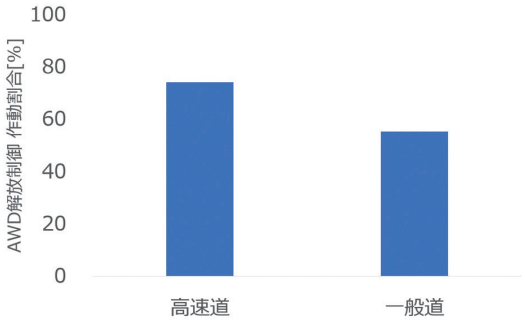


図４　走行シーン毎の AWD 解放作動割合

本制御による燃費改善効果については、３.1 SUBARU最良燃費性能の実現 を参照。

2.2　意のままに操るドライバビリティを実現するハイブリッド制御の開発

新型クロストレックの次世代e-BOXERにて採用するハイブリッド制御（以下、次世代e-BOXERに採用するハイブリッド制御を指す）の特徴は、エンジンと電気モータの協調動作を最適化することに重点を置いたシリーズパラレル方式である。電気モータは駆動用モータと発電用モータの2つを使用しており、運転状況やドライバの要求に応じて、ハイブリッド制御はエンジンと電気モータの出力をリアルタイムで最適に調整し、効率的かつ効果的な駆動力を提供する。

低速走行や市街地走行では主に電気モータが駆動力を担い、静かでスムーズな走行を実現する。一方、高速走行や急加速が必要な場合にはエンジンが主要な駆動力を提供、電気モータがこれを補助することにより、強力な加速力を発揮し快適な運転が可能となる。

ハイブリッド制御を開発する上で大きな課題は、現行SUBARU制御との融合/協調にあった。特にエンジン制御やアイサイト制御、メータディスプレイ制御とは多くのインターフェースが繋がっている。相互の制御を理解した上で機能協調を行い、SUBARUらしい車としての魅力をそのままに品質を担保していく必要があるが、要件の高度化、複雑化により難易度は高い。

そこで新型クロストレックでは、各制御間をつなぐインターフェース信号に着目し、専門エンジニアたちが双方向および共通言語での認識あわせを詳細に行い、さらに新規に興したHILS(Hardware-In-the-Loop-Simulation)や、実車両を用いた動作検証結果と組み合わせて制御を構築した。

以上の開発取り組みの結果として、ハイブリッド制御による環境性能向上をしつつもSUBARUがこれまで長年積み上げてきた”意のままに操るドライバビリティ”を次世代e-BOXERでも実現した。

3．環境性能の向上

3.1　SUBARU最良燃費性能の実現

燃料性能に対するお客様の期待が高まる中、OEMは性能向上に努めてきた。SUBARUも例外ではない。2013年にはSUBARU初となるハイブリッドシステムをインプレッサXVに搭載した。以降､改良を重ねフォレスターやクロストレックなどのSUVカテゴリの環境性能向上に貢献してきた。しかし、更なる燃費向上ニーズに応える性能改善には限度があった。

そこで新型クロストレックでは、次世代e-BOXERを搭載し、SUVカテゴリにおいてSUBARU最良の環境性能を実現した。本章では燃費と排出ガス性能、システム制御開発の取り組みを説明する。

次世代e-BOXERでは2モータ式ハイブリッドシステムを採用、駆動用モータの出力を10kWから88kWへ向上することでEV走行の領域を拡大した。更に、モータの特性を生かしたシリーズパラレル方式により、エンジン動作点を自在に制御することで、熱効率の良い領域を使用できるようになった。

図5,6に現行車と新型クロストレックのWLTCモードのエンジン動作点を示す。現行車もモータで熱効率の良い動作点を狙っているが、モータ出力上の限界があった。新型車ではEGR率向上や筒内流動改善による熱効率の上昇に加えて、2機の高出力モータを制御することで、WLTCモード走行時の平均熱効率15%UPを実現した。

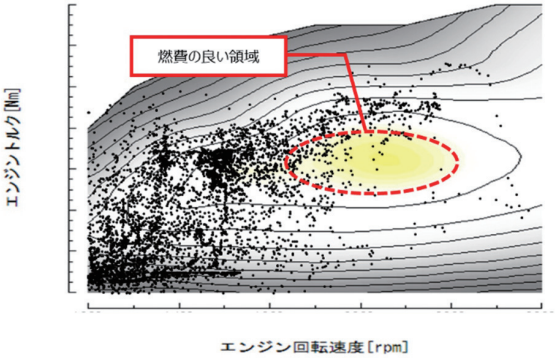


図５　現行クロストレックのエンジン動作点

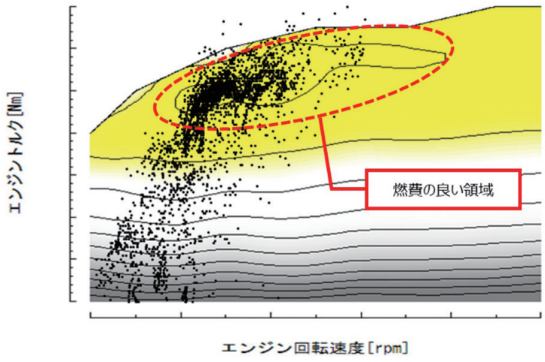


図６　新型クロストレックのエンジン動作点

また、2.1章で紹介したAWD解放制御の燃費効果について、図7にWLTCモード走行時の電力損失と駆動損失の低減量を示す。1200 ～ 1400秒の高速走行時を中心に損失を低減し、燃費改善に貢献した。

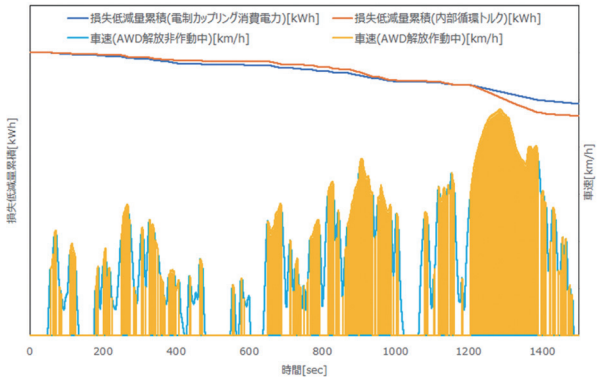


図７　WLTC モード走行時の損失低減量

以上の技術を織り込んだ新型クロストレックは、従来のSUBARUらしさを継承しつつ、図8に示すようにWLTCモード燃費18.9[km/L]という高い環境性能を実現した。

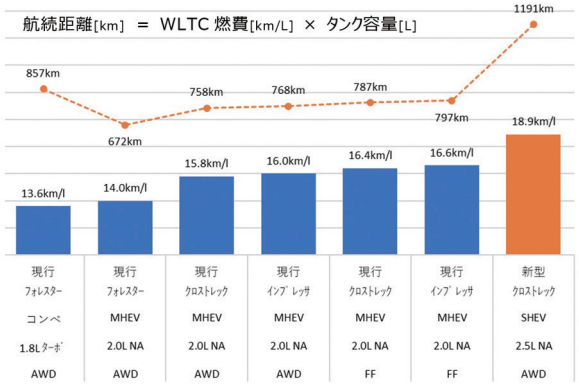


図８　SUBARU-SUV カテゴリ燃費、航続距離

3.2　クリーンな排出ガス性能を実現するエンジン制御の開発

排出ガス用浄化触媒は、自動車や定置式エンジンの後処理システムとして広く普及し、クリーンな大気環境保全のために必要不可欠な技術となっている。この触媒には長期に渡り高い浄化性能が求められるが、触媒を通過する排出ガス組成や、高温のガスにさらされることによる性能劣化を抑制することが課題であった。次世代e-Boxerでは排出ガス再循環(EGR:Exhaust Gas Recirculation)をエンジンの高回転・高負荷領域まで積極的に導入した。EGRシステムによって排出ガス(不活性ガス)を導入することで、燃焼温度の高温化抑制やノッキング発生の抑制(燃焼位相の早期化)において排出ガス温度を低減し、使用過程における触媒の熱劣化を抑制した。

図9に示すように次世代e-BOXERでは、エンジン

運転領域の高回転・高負荷までの広い範囲において高EGR率で制御した。排出ガスの大幅な温度低下を実現したことで、触媒の劣化を抑制し、長距離走行後において現行e-BOXERに対して23%の排出ガス低減を実現した。

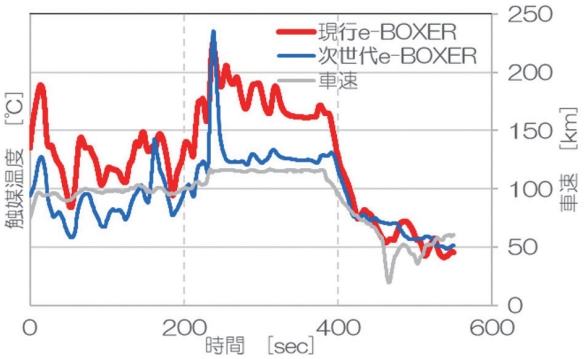


図９　高速走行中の触媒温度

3.3　安心安全を支えるシステム制御の開発

多岐にわたるHEVシステム制御の中でも今回はフェイルセーフについて説明する。

ハイブリッド制御は、ブレーキ、エンジン、モータ/インバータ、高電圧バッテリ、アイサイト、メータ等多くの制御コントローラと連携する。システム制御では、高電圧系統、モータ等のアクチュエータの安全状態を監視し、走行可能状態も判断している。

車両として確認できるものはメータ内にある“READY”灯であるが、万一の故障検出時には最大限安全に移動できるようフェイルセーフ(故障部位のアクチュエータ停止による安全性担保)し、警告内容を適切に伝える機能を実装した。具体的にはエンジンが重度な故障を検知した場合、駆動モータと高電圧バッテリのエネルギで走行し、逆に駆動モータが故障した場合はエンジンを使って可能な限り走行する。また高電圧のバッテリが故障した場合は、エンジン、発電用モータで電力を発生させ、駆動モータを使って走行する等、安全確保のため駆動デバイスを使い切り走行機能を維持する。

SUBARUのハイブリッドシステム構成において、システム制御は、AWD技術とも連携する。故障は何時どのような状況で発生するか、全てを予測することはできない。対応としてフェイルセーフ機能の評価を定常状態だけではなく、冬の雪道や極低温を想定した低μ路において、ベテランからクルマに乗り慣れてない人まで考慮した。あらゆる環境でのクルマの振る舞いを確認することで、品質を作り上げた。

図10に各故障モードにおける最大加速度を示す。駆動用モータ故障時は発生駆動力が1割程度に落ち、低μ路での発進時に車輪スリップさせるほどの駆動力が出ないため、AWDの必要は無くなる。また、AWD制御を継続させると内部循環トルクにより走行負荷が上昇し加速が鈍くなる。駆動モータ故障および、インバータ故障に限定、安全を確保した移動を優先するために、AWD制御を一時的に止め走行負荷の少ない前輪のみの駆動：FF状態に遷移させることで、発進での加速度を少しでも高める車両とした。

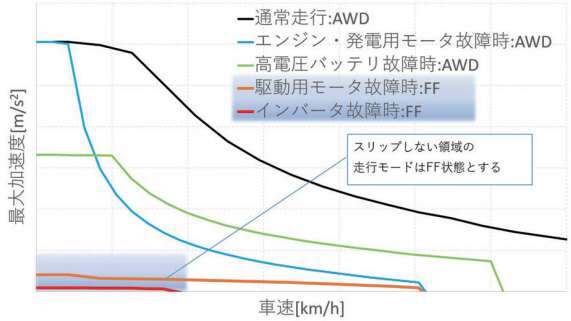


図 10　各故障モードにおける最大加速度

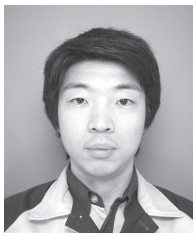
以上より、万一の際にも“READY”を最大限に点灯させ走行継続し、安全な場所まで退避出来るよう制御開発した。システム制御があるからこそ、常に安心の”FUN”を届け、いざというときも頼りになる、思い切り走りを愉しめるクルマが実現できた。

4．まとめ

次世代e-BOXERのパワートレインと合致する専用の制御開発により、動的質感・環境性能に加え安全性能も向上させられた。ハードと制御の双方で技術を積み重ねた結果、新型クロストレックという車両としての開発コンセプト“FUN”を実現した。

最後に本開発を行うにあたり、多大なるご協力をいただいた関係会社ならびに社内関係部署の方々に深くお礼を申し上げます。

【著　者】

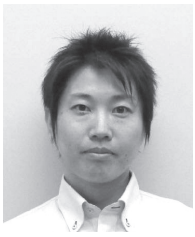

渡邉　豪

若山　綾那

牧野　和輝

志村　進

林　秀樹


戸谷　好貴

SUBARU「フォレスター」一部改良モデルを発表

2023年8月24日

今回の改良では、後退時ブレーキアシストの設定を変更し、後退時に障害物を検知した際の警報タイミングを早めることで、さらに安全性能を高めました。
内外装は、最上級グレード「STI Sport」に採用しているブラック塗装のシャークフィンアンテナとルーフスポイラーを全グレードに標準装備。 また、「X-BREAK」、「Advance」はパワーリヤゲートを標準装備。さらに、「X-BREAK」には、運転席＆助手席８ウェイパワーシートを標準装備とした。

Advance

特別仕様車「XT-EDITION」

新工法を用いた樹脂燃料タンクの開発

Development of a Plastic Fuel Tank Using a New Construction Method.

小 沼 広 明*
ONUMA Hiroaki

森 田 浩 也*
MORITA Hironari

畠 中 秀 明*
HATAKENAKA Hideaki

抄 録

CROSSTREK次世代e-BOXERの車両パッケージングへ対応し、同セグメントにおいて優れた航続距離を確保した燃料タンクを開発した。従来の燃料タンクに対し、構成部品である支柱(補剛部材)、バルブ、配管を内蔵化することで空間効率を向上させ、ハイブリッド化に対応した周辺部品とのレイアウト整合と燃料タンク容量確保を両立させた。

また本燃料タンクは現行国内法規向けのエバポシステムだけでなく、今後の世界各国の排ガス規制強化へも対応可能な発展性も考慮し開発を行った。具体的にはグローバルで最も厳しい北米エバポエミッション規制(LEV-Ⅲ)への適合を見据え、高剛性仕様の燃料タンクを用いて燃料タンク密閉システムNIRCOS(Non-Integrated Refueling Canister Only System)に対応可能とした。なお各国のエバポシステム毎に燃料タンクへ要求する剛性が異なるため、タンク本体を共用しながら支柱の本数の増減のみで対応可能な柔軟な仕様とした。結果として同北米規制に対応し量産済の2019MY CROSSTREK HYBRIDの断熱材付きタンク仕様に対し、原価低減を実現した。

本稿では、今回開発した燃料タンクの構造、開発時の工夫点を報告する。

Abstract

In response to the vehicle packaging of the CROSSTREK next-generation e-BOXER, we have developed a fuel tank that ensures excellent cruising range in this segment. Compared to conventional fuel tank, the layout has been improved by integrating the surrounding components (such as pillars (stiffeners), valves, and tubes) to enhance space efficiency and securing the capacity of the fuel tank.

In addition, this fuel tank was developed considering the potential of correspondence not only to the evaporative system for current domestic laws and regulations, but also to the tightening of exhaust gas regulations in countries around the world in the future. Specifically, a fuel tank with high rigidity specifications is used to make it compatible with the pressurized fuel tank system NIRCOS (Non-Integrated Refueling Canister Only System) to comply with the globally most stringent North American Evaporative Emissions Regulations (LEV-III). Since the rigidity required for the fuel tank differs per evaporative system in each country, flexible specification is adopted to design the tank by increasing or decreasing the number of pillars while sharing the tank body. As a result, we have reduced cost compared to the insulated tank specification of the 2019 MY CROSSTREK HYBRID, which had complied with the North American regulations.

In this paper, we report on the structure of the newly developed fuel tank and the points of innovation during development.

＊ パワートレイン設計部

1．まえがき

現在、自動車は純ICE車からハイブリッド車、電気自動車への過渡期にあり、同時に環境対策のために世界各国で燃料蒸発ガス(以下、エバポ)を含む排出ガス規制が年々強化されている。燃料タンク＆エバポ排出抑止システム(以下エバポシステム)もハイブリッド化や排ガス規制強化に対応した新しいシステムが必要である。CROSSTREK次世代e-BOXER用燃料タンクは現行国内法規向けのエバポシステムだけでなく、世界各国の排ガス規制強化に対応する新しいエバポシステムへの発展性も考慮して開発を行った。

2．開発の経緯

純ICE車でのエバポエミッション排出規制への対応は、燃料タンクで発生するエバポをキャニスタで捕集し、貯めたエバポをエンジンの吸気負圧を利用してエンジンへ送り、エンジン内で燃焼させて処理することで大気への排出規制に対応している(図１)。キャニスタは「駐車中に発生するエバポ」と「給油時に発生するエバポ」を貯める機能を合わせ持つため、法規上はIntegrated Systemと呼ぶ。

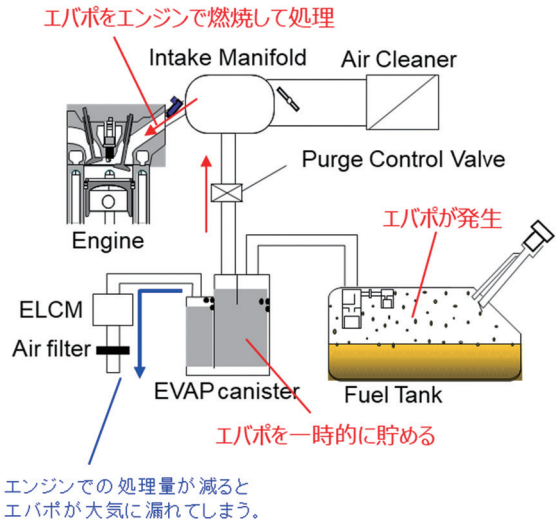


図１　純ICE車のエバポシステム概要図

ハイブリッド化によりエンジンの作動時間が短縮し、また環境対応のためエンジンの吸気負圧が低くなることで、「エンジンで処理できるエバポ量」＜「燃料タンクで発生するエバポ量」の関係となると、キャニスタに貯めたエバポが大気に漏れてしまう(図１青字)。そのため、駐車中の「燃料タンクで発生するエバポ」を出さない密閉燃料システムが必要となる。キャニスタは「給油時に発生するエバポ」を貯める機能のみになるため、法規上はこれをNon-Integrated Refueling Canister Only System(以下NIRCOS)と呼ぶ。

3．ベンチマーク

3.1　燃料タンクの圧力対策

NIRCOSの基本原理は、燃料タンクを密閉容器にすることで､駐車中の「燃料タンクで発生するエバポ量」をゼロにしてエバポ排出規制に対応する(図２)。

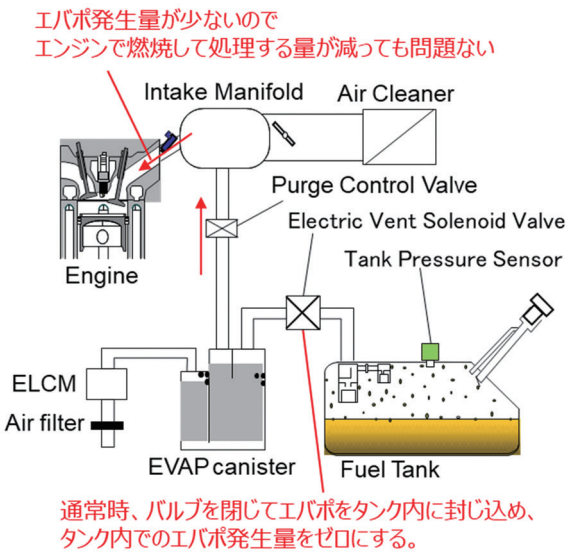


図２　NIRCOS 概要図

燃料タンクを密閉容器にするため、ガソリンの蒸気圧に耐えるための圧力対策がNIRCOS開発の肝となる。圧力対策手法はボイルシャルルの法則(PV/T＝一定)に沿って大きく３つに大別でき、各社、P,V,Tのどれかひとつの手法、もしくは複数の手法を組み合わせて最適化を行っている(表1)。

表１　NIRCOS 用燃料タンクの圧力対策手法

		対策手法			
		P 圧力への対策		V 膨張による 圧力抑制	T 受熱低減による 圧力抑制
		高剛性タンク		可変容量タンク	断熱タンク
特徴		タンクを補剛し高圧に耐える。		高圧時にタンクを膨張させ容積増→圧力上昇を抑制。	タンクを断熱材で覆い、受熱を減らし圧力上昇を抑制。
市場での採用例		厚板板金タンク	支柱内蔵型樹脂タンク	形状での剛性コントロールによる可変容量樹脂タンク	断熱材付樹脂タンク
メリット		・大容量化容易	・大容量化容易 ・軽量	・既存工法で製造可能 ・軽量	・既存工法で製造可能 ・軽量
デメリット		・質量大	・タンク製造設備への投資 要	・膨張させるための周辺空間 要	・断熱材が高価
得失整理 (メリット活かせる適用仕様)		大容量タンク	・生産量が多い車種 ・大容量タンク	・床下空間 余裕有（FF車 等） ・小容量タンク	・生産量が少ない車種 ・小容量タンク
当社の開発状況	仕様	厚板板金タンク （先開済）	支柱内蔵型樹脂タンク （先開済）	－	断熱材付樹脂タンク （量産済）
	質量	20.3kg （満タン52L仕様）	8.3kg （満タン50L仕様）	－	8.2kg （満タン50L仕様）

今回採用した支柱内蔵の高剛性樹脂燃料タンク以外の厚板板金、可変容量、断熱材付の各々の具体的な対策イメージを３．１．１～３．１．３で説明する。

3.1.1　厚板板金タンク

図3は先開済の厚板板金燃料タンクである。燃料タンクシェルを板厚ｔ２．０mm（従来燃料タンク比約２倍）にUPすることで耐圧強度を向上させる。重量が樹脂燃料タンクに比べ２倍以上に増えるのがデメリット。（表1）当社としては先開済。

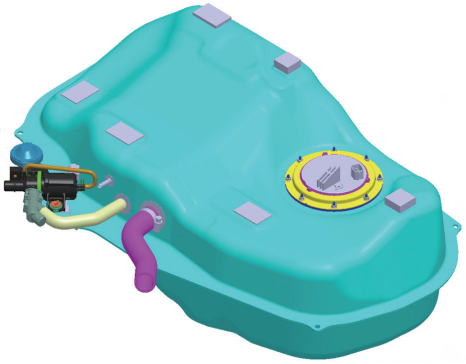


図３．厚板板金による高剛性燃料タンク

3.1.2　可変容量樹脂タンク

図4は可変容量燃料樹脂タンクのイメージ図である。燃料タンクの一部に変形しやすい形状を設定しておくことで燃料タンク内圧上昇時に燃料タンク容積を増やし、圧力上昇を緩和させる。従来構造の樹脂燃料タンクの耐圧性でも問題ないようにすることで投資やコストを抑制できるが、変形させるための周辺スペースが必要であり、プロペラシャフトを有する車などの床下スペースが限られる場合や大容量燃料タンクには不向き。

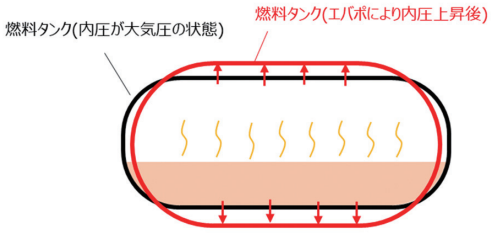


図４　可変容量燃料タンクのイメージ

3.1.3　断熱材付樹脂タンク

図５は量産済の断熱材付樹脂タンクである。燃料タンク内圧上昇の原因は夜から昼にかけての気温上昇によって燃料が蒸発することであり、従来工法の樹脂燃料タンクを断熱材で包むことで燃料の温度上昇を防ぎ、燃料タンク内圧上昇を抑制する。断熱材が高価だが従来工法の燃料タンクを使用できるため投資が低く、少量生産に適する。また、断熱材が小さくできる小容量燃料タンクに適する。当社では北米向け2019MY CROSSTREK HYBRIDにて採用済。他社では断熱材の使用量を減らすため、可変容量樹脂タンクとの併用例もみられる。

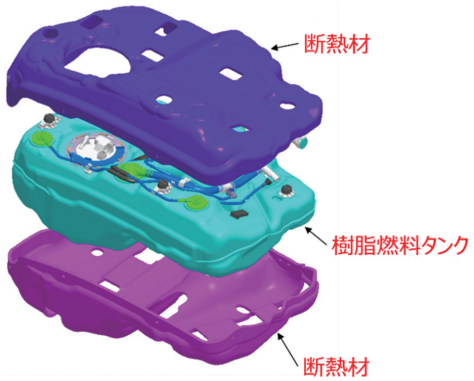


図５　断熱材付樹脂タンク

3.2　燃料タンクの満タン容量

燃料タンクの満タン容量は、日常生活でガソリンスタンドに行く回数の削減や長距離旅行時のガス欠への不安を無くすため、航続距離をベンチマークして満タン容量を決定している。図6のように満タン容量63Ｌとすることでcrosstrek次世代e-BOXERは同セグメントにおいて優れた航続距離を達成させた。

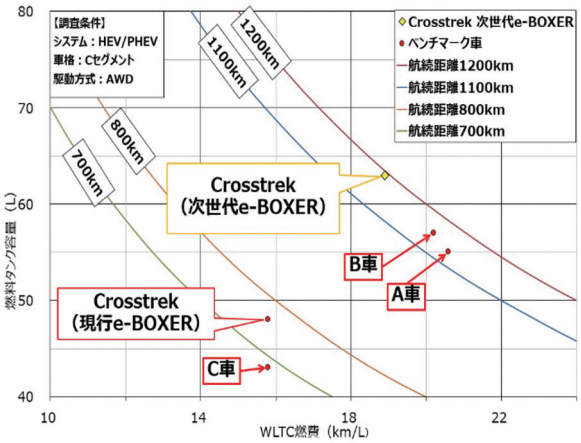


図６　容量ベンチマーク結果

3.3　ベンチマーク結果まとめ

大容量の満タン63Ｌを床下スペースの少ないＡＷＤ車で実現するため、また、生産台数増加に対しコストを抑制するため、燃料タンクの圧力対策手法は３．１．１～３．１．３の手法ではなく、ツインシート工法による支柱内蔵の高剛性樹脂燃料タンクを採用し、満タン容量、原価低減、軽量化を実現させた。

4．高剛性樹脂燃料タンクの仕様概要

従来のブロー成形工法による樹脂タンクに対し、ツインシートブロー成形工法による樹脂燃料タンクの特徴は、燃料タンク内側に部品を設定可能なことである。この特徴を活用し、補剛のための支柱やバルブを燃料タンク内側へ固定する構造とした。高剛性が不要な国内向け仕様（以下、非NIRCOS）では支柱を２本設定し、

高剛性が必要なNIRCOS仕様には支柱を４本設定可能な設計仕様とし発展性を確保した(図7)。

内蔵物　支柱(青)、バルブ(緑)、ジョイント(灰)

図７　高剛性樹脂燃料タンクの仕様概要

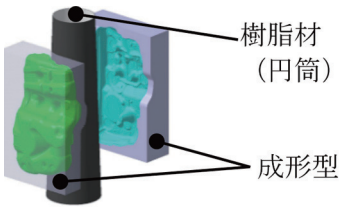
５．開発トピックの紹介

5.1.1　従来の高剛性化の対応手段と課題

NIRCOS用高剛性タンクの耐圧性の目標としては市場のガソリン蒸気圧と気温を加味した24kPaである。従来の高剛性化手法としては、ブロー成形時にスタンドオフと呼ばれる燃料タンクの一般面に凹形状を設け上面と下面を接合させることで剛性を高める手法(図14)を取っている。しかし凹形状を設定する背反として５．２で後述する燃料タンク容量に大きく影響するため、本燃料タンクでは新たにツインシート工法を採用し補剛部材の支柱を内蔵化することで、目標の剛性と容量確保を達成できた。

5.1.2　ツインシート工法概要

従来のブロー成形工法では図８の様に円筒状に押し出した樹脂材の内側にエアーを吹き込み金型に転写していたが、ツインシート工法では燃料タンク上面用と下面用の樹脂材を２枚のシート状に押出(図9)の後に、一次転写(図10)、内蔵部品組付(図11)、二次転写(図12)を行い成形完了となる(図13)。樹脂材を２枚に分割することで部品の内蔵化を実現したことが従来工法に対する革新的な点である。



※従来のブロー成形だと工法上燃料タンク内への部品の取付は後工程での溶着対応が必要。

図８　従来のブロー成形工法

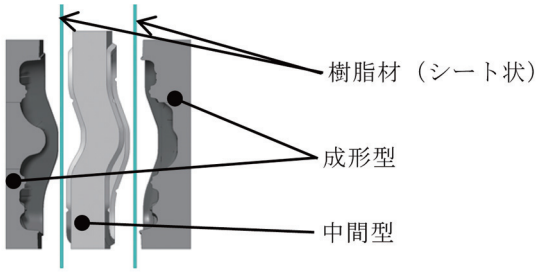


図９　成形手順１（押出）

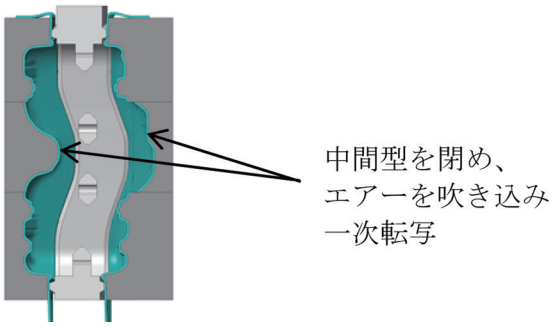


図 10　成形手順２（一次転写）

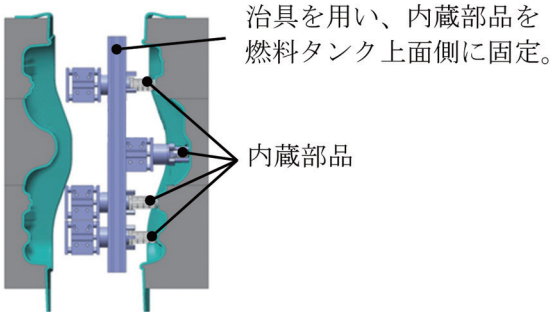


図 11　成形手順３（内蔵部品組付）

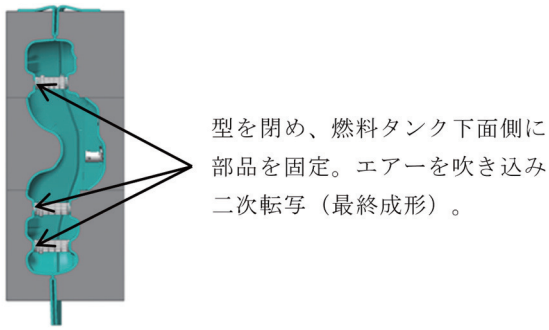


図１２　成形手順４（二次転写、内蔵部品組付）

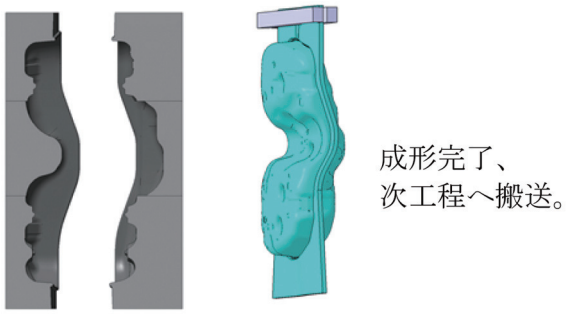


図 13　成形手順5（燃料タンク取り出し）

5.1.3　支柱化による剛性向上効果

高剛性化の達成手段として従来工法のスタンドオフ（図14）に代え、支柱（図15）を設定することで、大幅な変形量（最大△86％）の抑制を実現した。（図16）

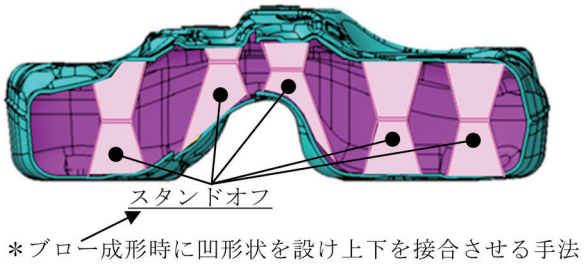


図 14　従来工法での高剛性化仕様

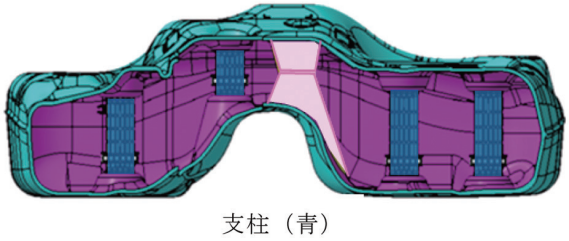


図 15　新工法での高剛性化仕様

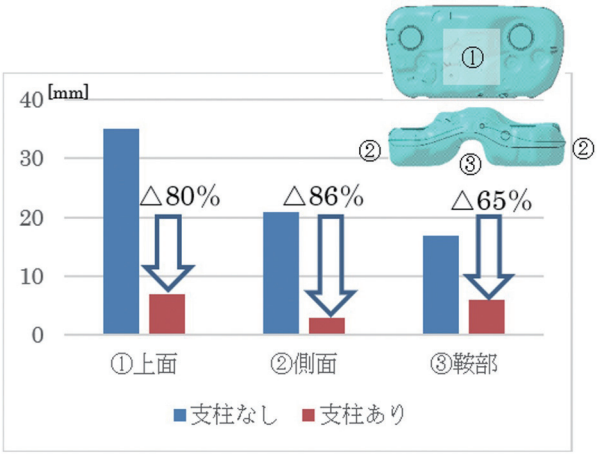


図 16　燃料タンク変形量比較@３２～５６kPa

5.2　空間効率向上（支柱化による容量向上）

純ICE車からハイブリッド化に伴う車両としての大きな変化点として、燃料タンク後方へのバッテリー搭載がある。本変更に伴い、燃料タンク周辺部品のレイアウトを一新し、燃料タンク左側方にキャニスタ、高電圧ケーブルをレイアウトし周辺部品との共存できる形状とした（図17）。ハイブリッド化のレイアウト対応と従来工法での高剛性化（図18）を組み合わせると満タン容量としては大幅減少となってしまうため、打開策として支柱（図19）に容量向上効果も含めて仕様検討を行うことで燃料タンク容量63Lを確保し設定目標を達成した。（図20）

図 17　周辺部品レイアウト

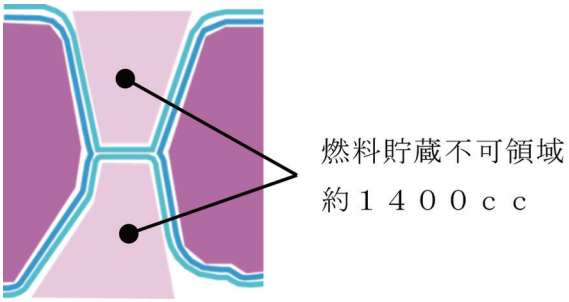


図 18　スタンドオフ部断面

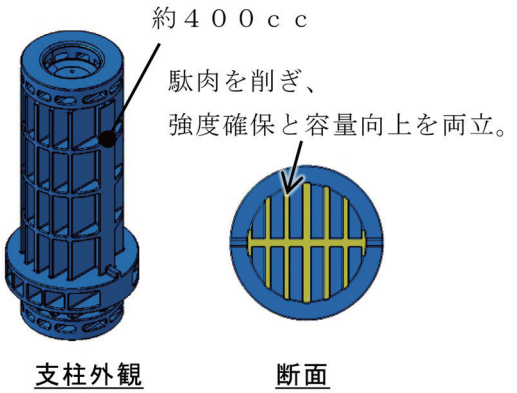


図 19　支柱　構造概要

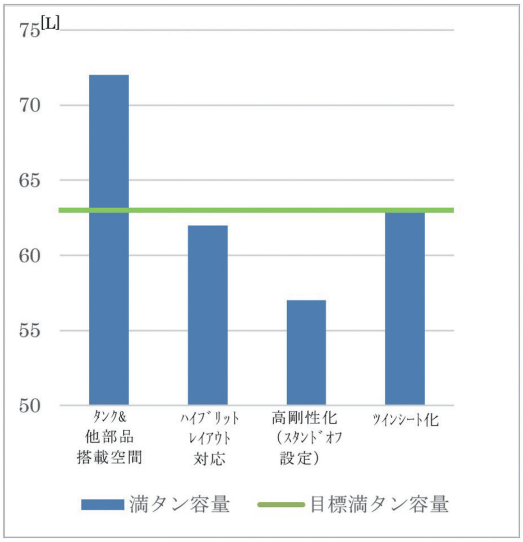


図 20　検討時の燃料タンク容量推移

5.3　ツインシート化の工夫

5.3.1　NIRCOS仕様と燃料タンクの共用化

NIRCOS仕様に関しては設定圧力が上昇方向となる。NIRCOSとの燃料タンク共用を見据え、支柱の最適な設定位置を確立することで、目標変形量に対し支柱（青色）本数の変更のみで燃料タンク本体の共用化を実現した。（図21、22）

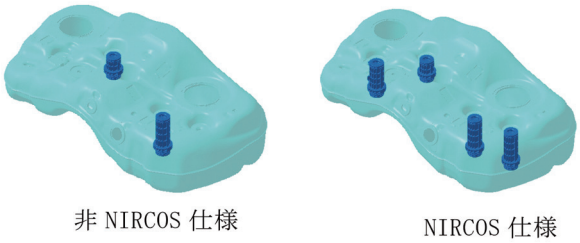


図 21　支柱設定数の違い

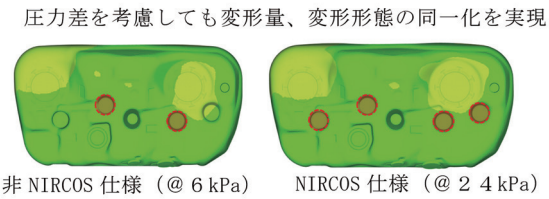


図 22　変形量

5.3.2　内蔵部品の固定方法と安全性確保

従来のブロー成形工法では後工程でタンクに構成部品を組付していたが、ツインシート工法では成形中に燃料タンク内側に支柱やバルブ等を固定することになるため構成部品固定後の機能毎に最適な結合方法を2種選定し織込んだ。

融着結合

結合後の強度を要する部位に採用。構成部品の結合部部材の端面を融解（赤色）させ、成形中に燃料タンク（水色）と結合する。（図23）

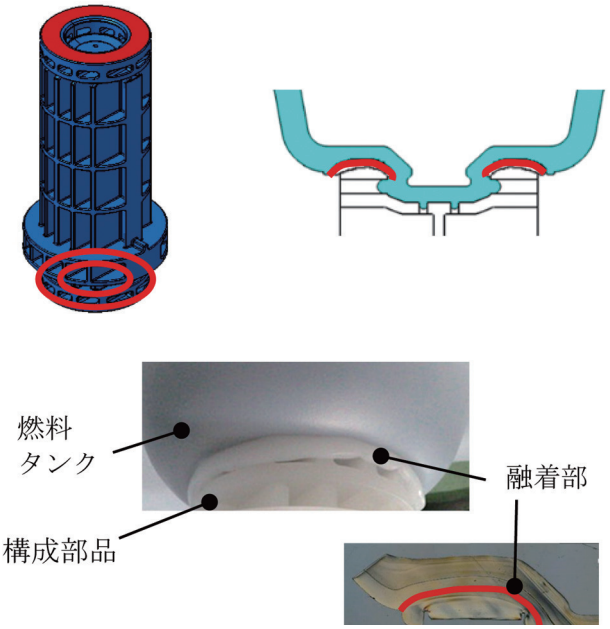


図 23　融着結合詳細

アンカー嵌合

構成部品の固定部（赤丸部）に採用。燃料タンク成形時に燃料タンクシェルを固定部に入り込ませることで結合（図24）。燃料タンクと構成部品の融点が異なる場合においても対応可能である。

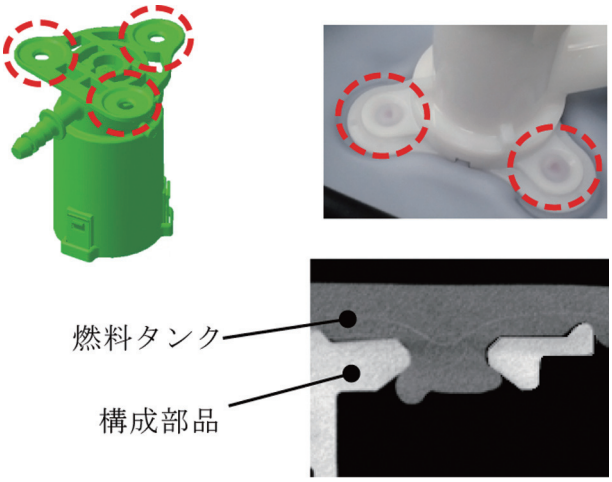


図 24　アンカー嵌合詳細

5.3.3　燃料タンク内固定部の安全性確保

想定以上の衝突時等の大入力が燃料タンクに掛かった状態においても、燃料タンクからの燃料漏れを確実に防ぐため、燃料タンク本体を損傷させず構成部品側で破断や脱離するヒューズ機構（赤丸部）を織込み安全性を確保した。（図25）

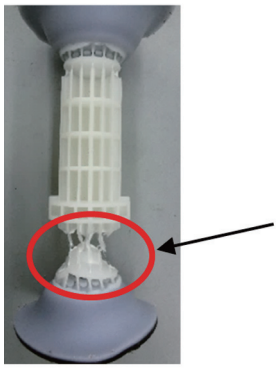


図２５　融着結合部　ヒューズ機構

5.4　燃料タンク内配管の集合化

燃料タンク内で発生したエバポを燃料タンク外へ排出する配管を集合するためのジョイント（灰色）を燃料タンク内に設定した。なお今後のNIRCOS仕様との共用化を見据え、燃料タンク内の圧力センサ用及び追加のバルブ用配管も集合できる設計仕様とした。他銘では艤装部品で同様の機能を持たせている事例もあるが、本燃料タンクとしてはレイアウト上、最適な位置を考え、本構造を採用し限られた空間を有効活用できる仕様とした。（図26）

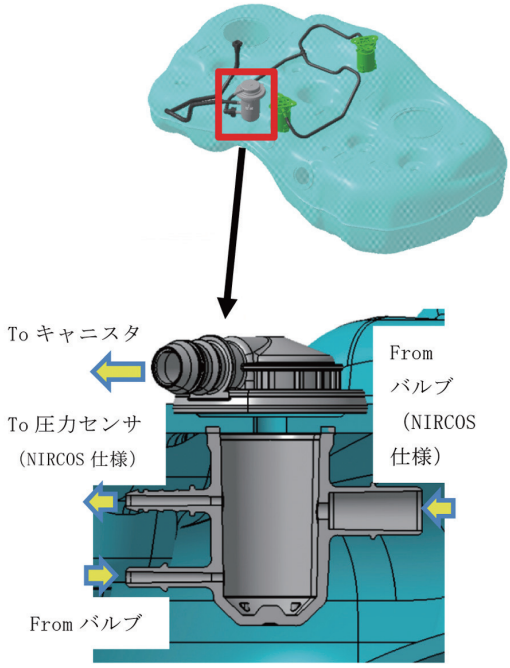


図２６　ジョイント仕様詳細

６．まとめ

本開発を完遂することで、CROSSTREK次世代e-BOXERの車両パッケージング成立及び燃料タンク容量の目標を達成し量産化が実現できた。また今後の環境規制強化を見据え、本燃料タンクを共用しNIRCOSにも柔軟に対応できる燃料タンクを量産化できた。（表2）

表２　開発実績まとめ

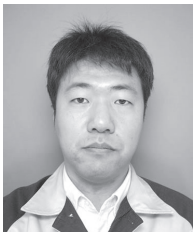
開発目標		達成状況	
空間効率向上	車両パッケージング達成 満タン容量63L確保	○	・ツインシート採用 ・支柱採用
高剛性化	北米エバポ法規対応	○	
原価低減		○	原価△28％ *北米向け2019MY Crosstrek HYBRID比

謝辞

本開発を量産化するにあたり、先行開発段階からSRDホールディングス㈱をはじめ関係する多くの方に多大なご協力をいただいた。紙面を借りて改めて御礼申し上げる。

【著　者】

小沼　広明


森田　浩也

畠中　秀明

CROSSTREK 新型ハイブリッド用エンジンの開発

Development of New Hybrid Engine for CROSSTREK HYBRID

及川 武志*
OIKAWA Takeshi

白鳥 早紀*
SHIRATORI Saki

室井 裕佐*
MUROI Yusuke

高開 勇希*
TAKAGAI Yuki

末次 祐太*
SUETSUGU Yuta

抄 録

新型CROSSTREKでお届けする次世代e-Boxerでは、車両のコンセプト“FUN”の実現に向け、SUBARUのクルマの良さの継承と、ハイブリッドならではの環境性能を高バランスで実現するエンジンを新たに開発した。

SGP（スバルグローバルプラットフォーム）の持つ車体の良さを活かしたハイブリッド車とすべく、2.5Lをベースとして動的質感と環境性能を高いバランスで達成するエンジンに仕立てた。

Abstract

For the next-generation e-Boxer to be introduced to the new CROSSTREK, we have newly developed an engine that achieves a good balance at a high level between the strengths of SUBARU vehicles passed down for generations and the environmental performance unique to hybrids to realize the model concept of "FUN".

To create a hybrid vehicle that takes advantage of the body strength provided by SGP (Subaru Global Platform), we have crafted an engine based on 2.5L that strikes a highly good balance between dynamic quality and environmental performance.

1．まえがき

自動車業界は、カーボンニュートラルを実現するための活動を加速させ、ICE車中心だった市場が大きく変わり、ハイブリッド、電気、燃料電池などガソリン車以外のエネルギーを使用したクルマが多く登場している。SUBARUでも、これまでマイルドハイブリッド、プラグインハイブリッド、電気自動車を導入してきた。その中で現時点の最適解のひとつとして、電気の力を最大限に活用し環境性能を高めたシリーズ・パラレル式のハイブリッドシステムを採用し、環境性能の向上と航続距離の伸長を実現するハイブリッド専用エンジンを新たに開発した。

本稿ではハイブリッド車への適応を目的に取組んだ『各ユニット配置』および『性能向上の取り組み』について、詳細を報告する。

＊ パワートレイン設計部

2．開発の狙い

車両のコンセプト“FUN”の実現に向けたひとつの要素である好奇心を駆り立てる「航続距離の長さ」を実現すべく、燃料タンク容量の確保および燃費性能の向上を目指した。加えてハイブリッド化に際してエンジン主要デバイスの最適化および開発初期段階から関連部門との協業を強化し、ひとつのSUBARUで開発に取組んだ。

燃料タンク容量の確保については、ハイブリッドシステムの基本コンポーネントのひとつであるパワーコントロールユニット（以降PCU）をエンジンルーム内に搭載することで燃料タンクスペースを確保し、ガソリン車同等以上の容量を実現した。

また前述のPCU搭載と併せてハイブリッド化で不可欠となるモータ、高電圧バッテリをガソリン車と変わらないプラットフォーム内に搭載。(図1)「安心と愉しさ」を提供する要であるシンメトリカルAWDを最大限に活かしたシステムとしつつ、重量増分をカバーしたゆとりのある動力性能を備えることを目的に排気量を2.5Lとして各部の最適化を行いSUBARUら

しい走りを目指した。(表1)

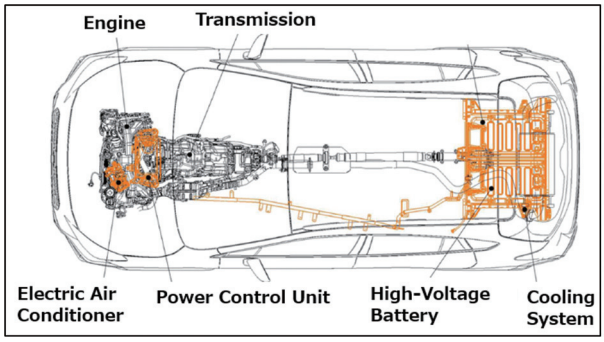


図1　ハイブリッドシステム配置

表1　諸元表

	新型車
エンジン型式	FB25
配置	水平対向
燃料供給方法	筒内噴射
使用燃料	レギュラーガソリン
気筒数	4気筒
総排気量 [cm³]	2,498
吸気方式	自然吸気
弁機構	DOHC 4バルブ
駆動方式	タイミングチェーン
動弁系デバイス機構	吸気AVCS
ボア×ストローク [mm]	94.0×90.0
圧縮比	11.9

3．エンジンの各ユニット配置

3.1　ユニット配置

3.1.1　PCUのエンジンルーム内搭載

北米向けに生産しているクロストレック プラグインハイブリッド(PHEV)のPCUは床下に配置しているが、新型CROSSTREKでは燃料タンク容量の拡大を目的にエンジンルーム内にPCUを搭載した。(図2)

PCUの搭載スペース上、従来車のようなユニット配置が困難となることから吸気/EGRシステム等のエンジン補機部品を中心に車両前方に集約配置し、航続距離の伸長と出力・燃費・排ガス・衝突安全性を高バランスで実現している。

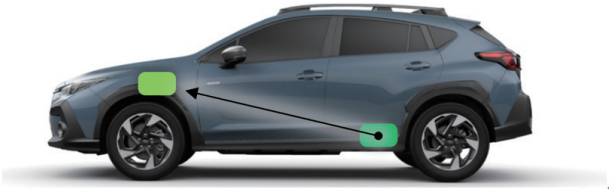


図2　PCU搭載場所変更

3.1.2　吸気システム配置と性能の両立

吸気システムについては、ポンピングロス低減と筒内流動改善(後述4.2.1)によって燃費性能の向上とモータやバッテリの重量増を感じさせない動力性能を実現している。

PCU搭載に伴う吸気システムの課題は車両前方レイアウトによる吸気管取回し変更と圧力損失/気筒間バラツキ・振騒性能をバランスさせることであった。

圧力損失/気筒間バラツキについては、吸気管の取回しが従来型2.5Lに対して曲率が大きく複雑な取回しになっているが、吸気管長の短縮と流動解析を用いて流路形状の最適化を行うことで圧力損失の悪化による出力低下を約1%に抑えつつ、気筒分配バラツキの低減を図っている

加えてポンピングロス低減を狙ったEGRガス導入についても新気とのミキシング力強化を狙ってインテークマニホールドチャンバーの前に配置しているスロットルバルブ直後にEGRガスを導入することで各気筒への分配性能を向上させている。(図3、4)

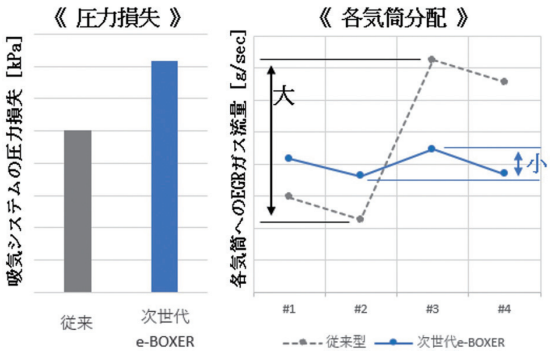


図3　CAE解析による圧力損失とEGR気筒バラツキ

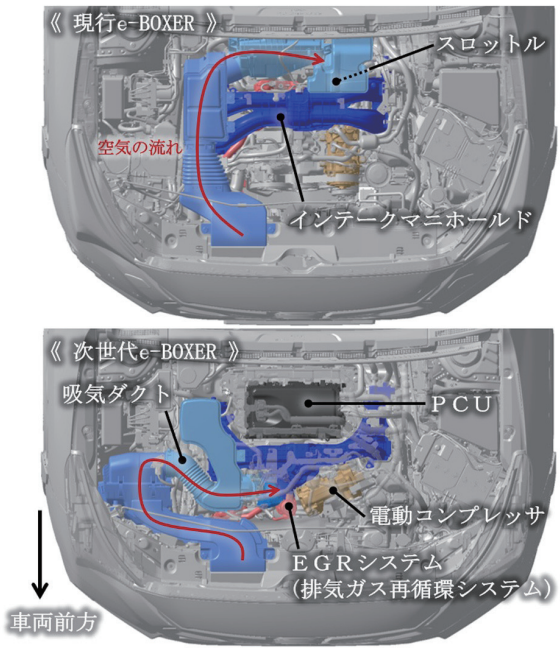


図4　エンジンルーム

「振騒性能」については、少ないスペースで消音性能を満足させることが課題で、空気脈動を低減するレゾネータの狙い周波数およびインテークマニホールドの最適化を行っている。スロットルバルブφ60化をはじめとした吸気管径を縮小することで全体の音圧を下げつつ、ハイウェイ合流時などの加速時に発生する音に対し最も感度のある周波数帯の吸気音圧を低減させるレゾネータ設定とすることで各性能および法規（加速走行騒音規制（R51-03）フェーズ3）を両立し、ハイブリッドならではの静粛性を実現している。（図5）

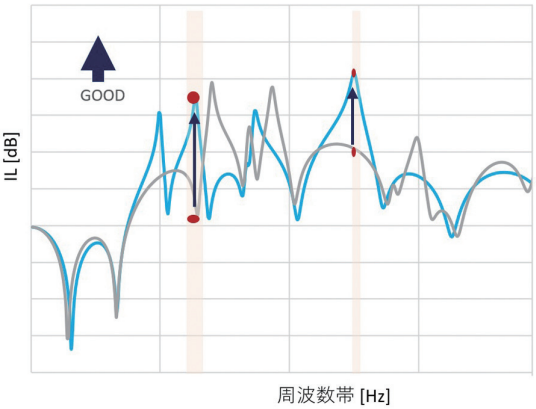


図５　消音性能向上

3.1.3　衝突時の高電圧安全確保への取組み

高電圧部品のエンジンルーム搭載に伴い、車両衝突時にもPCU本体、高電圧コネクタ、ケーブル類の生存空間を保護する構造を採用し、部品破損による高電圧部の露出、感電防止に配慮した。

《 PCU保護空間の確保 》

車両衝突時にPCUはエンジンと共に車両後方に移動する。その際にPCUとトーボード間のスペース確保のため、PCUを保持するブラケットでトーボードを後退させる構造を採用したことと、PCUとトーボードの初期空間設定により、乗員の安全性を確保した。（図6）

《 PCU本体/周辺部品の保護 》

PCU背面側に設置したプロテクタによりPCU本体、高電圧コネクタ、ケーブル類とトーボードの直接接触による部品破損を防止、高電圧部の露出や感電懸念を排除している。

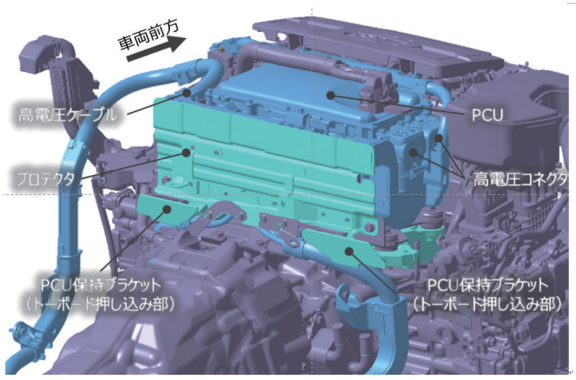


図６　PCU本体/周辺部品の保護（車両右後方より）

3.2　PCUの振動・熱害対策

3.2.1　振動対策への取組み

エンジンからの振動入力に対し、ゴムブッシュを介してPCUを搭載するフローティング構造を採用した。(図7)これにより、エンジン二次振動領域と、高周波領域におけるPCU許容振動値を満足し、エンジン直上への搭載を可能とした。

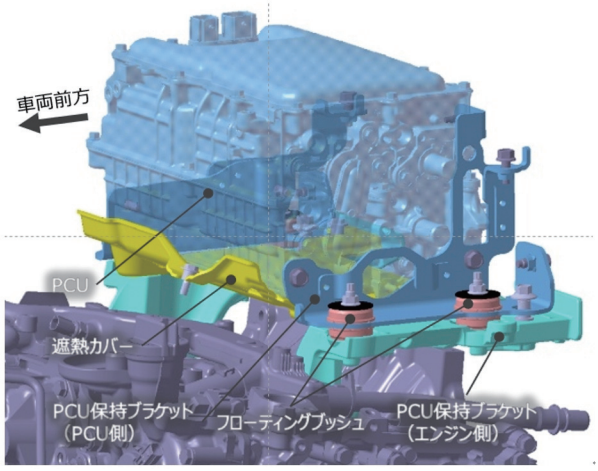


図７　PCU保持構造・熱対策（車両左前側より）

3.2.2　熱害対策への取組み

エンジンからの受熱に対し、PCUとエンジンの間に遮熱カバーを設置し、登坂後のアイドルやトーイング等、エンジンルーム内の厳しい熱環境に置いてもPCU周辺雰囲気温度をPCU許容温度以下に保つことが出来た。(図8)

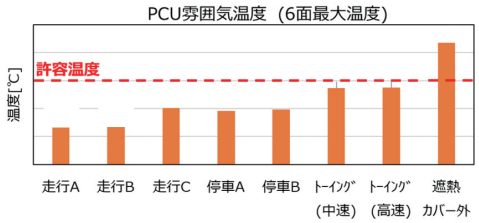


図８　PCU雰囲気温度

4．エンジン性能向上の取り組み

4.1　環境性能向上

4.1.1　アトキンソンサイクルの採用

加速・登坂性能確保のために走行用モータの駆動力を活かすことで、燃焼は実用域での燃費向上により特化し､吸気遅閉じのアトキンソンサイクルを採用した。

本エンジンでは吸気カムに従来型2.5L比で広開角のプロフィールを採用し、圧縮行程より膨張行程で長く開くバルブタイミングとした。実圧縮比を下げることによるノッキングの抑制、スロットルを大きく開くことによるポンピングロスの低減につなげ、膨張比を確保することで燃焼からより多くの運動エネルギーを得て、高い熱効率を実現した。

4.1.2　筒内流動・燃料噴射の最適化による燃焼改善

実用域での燃費向上のために筒内流動・燃料噴射を最適化し、出力低下をできる限り抑えながら排気ガスと両立する燃焼を実現した。

吸気ポート形状は筒内流動強化のためにシリンダブロック側へ寄せ、レイアウト上の課題となるインジェクタ周りの冷却水通路は従来シリンダヘッド側から当てていたのに対してシリンダブロック側から供給する構造とした。筒内の流動解析により、各部寸法に対する流動の代用指標として吸入空気量、タンブル比の感度を確認し、実験計画法により最適化した。[(1)] また、この吸気ポート形状に合わせてタンブルジェネレーションバルブ(TGV)および吸気ポート内に設置するシリンダヘッドプレートの形状も同様に最適化。従来型2.5Lエンジン比で吸入空気量をできる限り維持しつつ、筒内流動の強化を実現した。(図9)

また、燃費性能向上のため排気ガス再循環 (EGR)率も増加させているが(後述4.2.1)、この背反として燃焼安定性が悪化する。これに対しても、筒内流動の強化により、圧縮時のタンブル残存性を改善し、EGR増加に対する着火安定性を確保した。(図10)

排気ガス性能の向上については、PN発生の主要因であるピストンへの燃料付着量の低減を狙い、噴霧パターンを最適化した。この変更に対しても燃焼安定性を確保できるよう、点火プラグ周辺の混合気形成の代用指標としてプラグ周り当量比の基準を設けて従来型と同等となるよう管理した。筒内流動と燃料噴射タイミングを調整することで、排ガス規制(H30 規制(WLTP) 50%減 PM 規制）を満足する燃焼を実現。(図11)

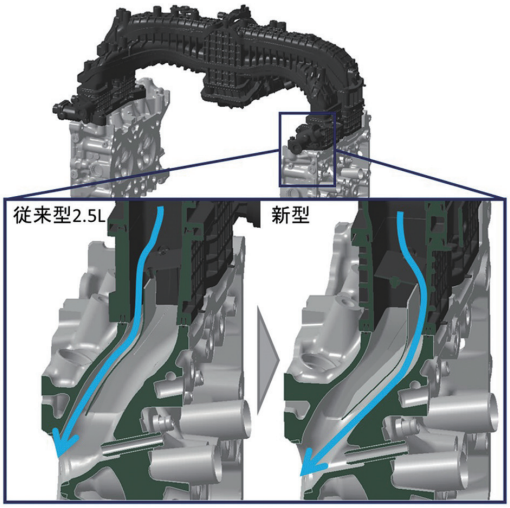


図９　筒内流動の変更

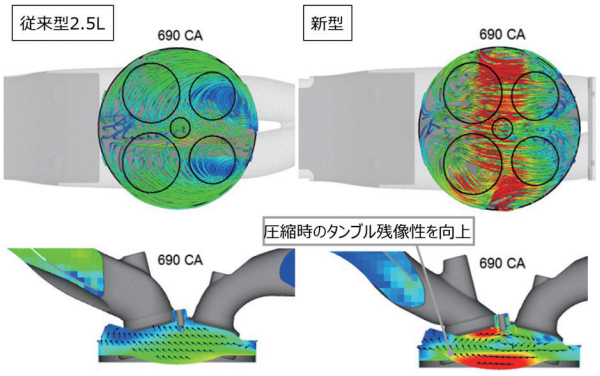


図10　タンブル残存性の比較

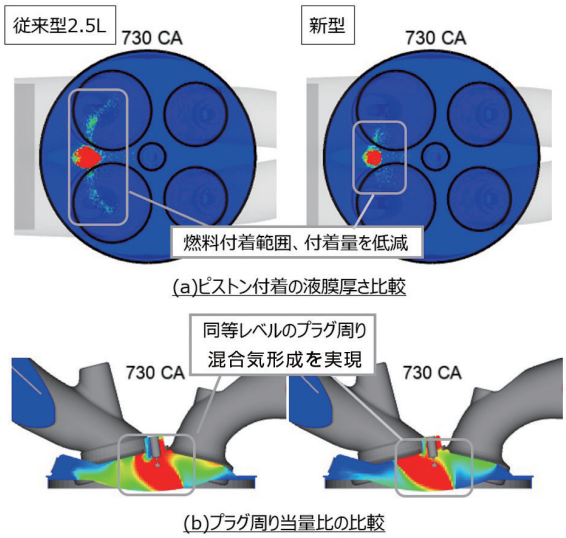


図11　燃料噴射とピストンへの燃料付着

4.1.3　トランスアクスル内ギヤ歯打ち音の抑制

次世代e-Boxerで採用するトランスアクスル構造はエンジン始動時の圧縮反力が高いとダンパ共振によりトランスミッション内部のギヤが歯面分離し、歯打ち音が発生してしまう。振騒低減に向けて歯打ち音の抑制と、背反する他性能を両立するため、吸排気バルブタイミングを最適化した。(図12)

始動時の圧縮反力を下げるよう、吸気カム位相を制御するAVCSのロック位置変更により始動時のバルブ閉タイミングを遅らせることで対応。この変更に対し、吸排気バルブのオーバーラップ区間を確保するために排気カム位相も合わせて遅角させた。オーバーラップ区間があることで内部EGRを促進し、始動時の排気ガス性能を満足することができる。一方で、排気カム開タイミングを遅角するとポンプロスの増加により、高回転域での出力は低下してしまう。高回転域では走行用モータの駆動力を加えつつ、カム位相の最適化により動力・排気ガスを両立した。

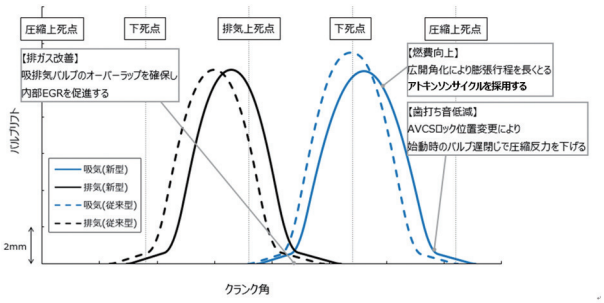


図12　吸排気バルブタイミング

4.2　環境性能と動力性能を両立する排気システム

4.2.1　環境性能を支えるEGRシステム

次世代e-Boxerでは、幅広い運転領域で排気ガス再循環（EGR：Exhaust Gas Recirculation）を積極導入することで、排ガス温度の高温化抑制、ポンピングロスの低減を実現した。(図13)

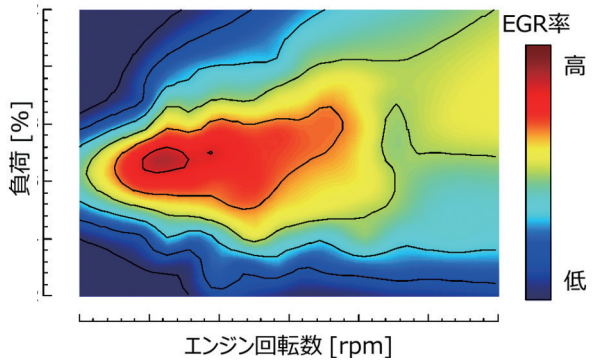


図13　次世代e-Boxer EGR導入領域

EGR導入領域や導入量拡大の課題は汚損に対する耐力向上で、排気ガス中の未燃焼成分（デポジット）のEGRバルブ付着が増えることによる制御性の悪化であった。そのため次世代e-Boxerでは三元触媒で浄化された排気ガスをEGRシステムへ導入する構造とすることでデポジット付着を大幅に低減し、制御性を向上させることで車両の長期使用に対する信頼性を向上している。(図14・15)

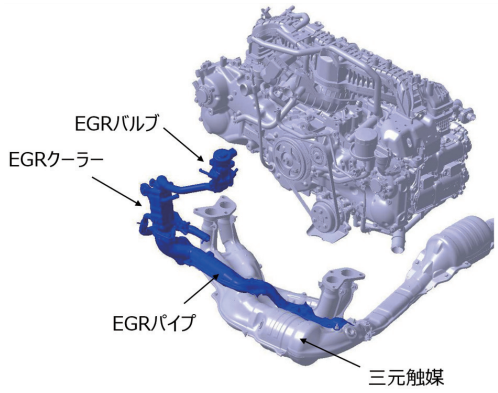


図14　EGRシステムの概略

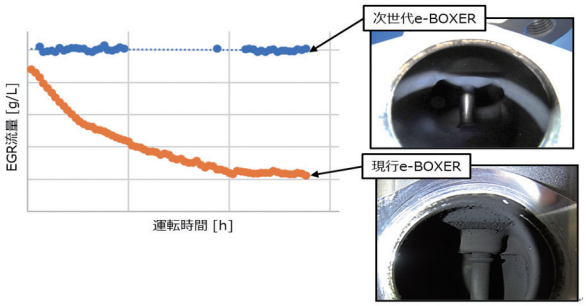


図15　EGRデポジットの改善

4.2.2　環境性能と出力性能の両立

環境性能と出力性能を高次元で両立するため、「EGR経路への入り易さ」と「テールパイプへの流れやすさ」を高次元で両立させる排気流路を開発した。流体解析や排気脈動計測を元に、ステンレス鋳鋼、ハイドロ成形といった高度な加工技術を活用し、限られた車両レイアウト内で実現している。(図16)

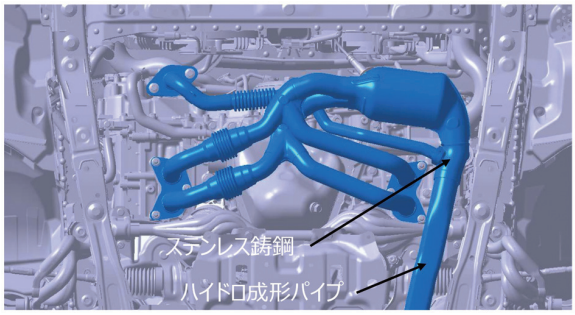


図16　排気システムの概略

5．まとめ

次世代e-BOXER専用のエンジン開発により、好奇心を駆り立てる「航続距離の長さ」と「環境性能や動的質感の向上」を両立させ、新型クロストレックの開発コンセプト“FUN”を実現した。

最後に本開発を行うにあたり、多大なるご協力をいただいた関係会社ならびに社内関係部署の方々に深くお礼申し上げる。

参考文献

(1)安達ら,”エンジン熱効率向上に向けた筒内流動解析技術の進化”,SUBARU技報,Vol.49 129-137

【著　者】

及川　武志

白鳥　早紀

室井　裕佐

高開　勇希

末次　祐太

SUBARU「レガシィ アウトバック」の改良モデルを発表
～アウトドアでの使い勝手と上質さを兼ね備えた特別仕様車を新たに設定～

2023年9月7日

今回の改良では、ステレオカメラに加えて広角単眼カメラを搭載した新世代アイサイトを装備。また、シャークフィンアンテナにカメラを内蔵したスマートリヤビューミラーを採用し、ラゲッジルームの積載性能を確保しつつ安全性能を高めました。加えて、アウトドアでの使い勝手と上質さを兼ね備えた特別仕様車「Limited EX “Active × Black”」を追加。

Limited EX “Active × Black”

新開発拠点「Innovation Hub」について

New R&D Base "Innovation Hub"

仁科 沙津紀*1 NISHINA Satsuki
大家 敏宏*2 OYA Toshihiro
舟串 卓也*2 FUNAKUSHI Takuya
松土 賢人*3 MATSUDO Kento
小坂 昌義*4 KOSAKA Masayoshi

抄 録

Innovation HubはGRAND CONCEPT「笑顔をつくる」と4つのCONCEPT「つくるを愉しむ」「本質から語り合う」「未来を見つける」「拡張性」を掲げ、モノづくり革新・価値づくりの実行を加速することを目的としている。

新たな開発拠点として働き方改革という点にも重点をおき、これまでにない様々な施策を講じた。

ステークホルダーの皆様を笑顔にするため、Innovation Hubを軸にSUBARUは“ONE TEAM”となる。

以下、Innovation Hubの具体的な施策・設備の一部を紹介する。

Abstract

Innovation Hub's GRAND CONCEPT is "Delivering Happiness to All". Four concepts: "enjoy manufacturing," "discuss the essence," "find the future," and "expandability" were also posted to speed up "Monozukuri Innovation" and "Value Creation". Furthermore, various new efforts were also made on this R&D base for work-style innovation.

To deliver happiness to our stakeholders, SUBARU will become "ONE TEAM" with Innovation Hub at its center.

The following introduces some parts of measures and facilities of Innovation Hub.

1. まえがき

グローバルに大変革を迎える自動車産業において、益々厳しくなる環境対応や複雑で高度化する新しい技術等に対応していくためには今までのやり方の延長では厳しい。SUBARUグループ全体や開発部門で見ても、従来のようなペースでリソースを拡大することは難しくなり、これからは「どれだけ仕事の質を高められるか」が課題である。

能力を余すこと無く発揮でき、人や組織の相乗効果でより生産性や創造性を高められるよう、仕事の進め方、組織の在り方、職場環境等を整える事が必要である。ハード面・ソフト面で様々な仕掛け・仕組みを施しており、Innovation Hubを基にひとつ のSUBARU化を目指し、クルマをつくる会社から「笑顔をつくる」会社になる。

2. コンセプト

GRAND CONCEPT「笑顔をつくる」と4つのCONCEPT「つくるを愉しむ」「本質から語り合う」「未来を見つける」「拡張性」を掲げた。100年に1度の大変革期と言われる時代において開発プロセスの改善・効率化は必須であり、さらにSUBARUの「モノづくり革新 」「価値づくり」を加速させることが重要である。それらを達成するためのあるべき姿として、社内外一体となって本質から語り合い、最新技術や考え方を共有することで新しいSUBARUの未来を見つけ、互いの仕事に共感をもってつくることを愉しむ、SUBARUの“ONE TEAM”化が必要だという結論に至った。Innovation Hubは、お客様の人生に寄り添うSUBARUを目指し、ステークホルダーの皆様とこれまで以上に商品の進化・高密度な開発を推進してい

＊1 技術開発部
＊2 商品事業本部
＊3 内外装設計部
＊4 技術管理部

くための新たな拠点となる。

3. 具体的な施策・設備(一例)

3.1　1F社内外共創エリア　図1

2023年9月に竣工し、2024年1月に稼動した地上7階建てのInnovation　Hubには社内外パートナーの繋がりを大切にし、新しい価値・技術を発明する中心建屋にすべきという想いが込められている。

共創エリアをInnovation Hub各所に設定することで開発を加速させ、「モノづくり革新」「価値づくり」をより高次元で実現させることを狙った。その中核が共創ホールである。ワークショップ等の従来の使い方に加え、社内外パートナーとの長期的かつ多様な技術開発が可能なスペースとしての利用を計画している。専用の会議室(3室)、工作室、音響室、VR/MRルーム、給湯エリア等を有しており、アクセス性や実車展示を考慮して1階のレイアウトとした。

共創ホールに隣接したカフェエリアはリラックスして過ごせることなどの付加価値にこだわり、ラグジュアリーで落ち着いた空間を目指した。複数人で談笑できるソファ席、テーブル席だけでなく、個人でも過ごしやすいように一人席やフォンブースも設置した。

図1　共創ホール

3.2　3Fプロムナード　図2

Innovation Hubの大動脈であり、人と情報が集う遊歩道として、偶発的な人・情報・技術と出会い、インスピレーションを受けるエリアとなっている。大小さまざまなミーティングスペースを設け、大型モニターを3台設置した新技術展示エリア、タッチパネル式の開発ビジョンウォール、リフレッシュルームをレイアウトした。エレベーターホールを抜けると食堂、執務エリア、ロッカールーム、テストコースにそれぞれ向かうことができ「Hub」としての機能を持つ。

「SUBARUを知る、世の中を知る、お客様を知る」をコンセプトに社内に眠る予期せぬ情報と出会えるエリアを目指す。

図2　プロムナード

3.3　3Fリフレッシュルーム　図3

現代人は慢性的な疲れやストレスを抱えていると言われている。人生100年時代とも呼ばれ健康寿命の重要性も説かれる今、我々も例外ではないと考えた。“従業員のパフォーマンスを最大化するためには”、“仕事の疲れを引きずらず公私共に健康でいられるようにするためには”、以上2点に重きを置いた。更に、他のエリア機能と重複せず独自の尖った機能を持たせることにも拘った。具体的には心身のリラックス環境の構築である。リフレッシュには様々な考えがある為、アンケートの複数実施や文献の多読など最大公約数を探すことに苦労したが、軽い運動ができること、目を閉じ寛げること、これらを満たすことで多くの方の考えるリフレッシュ環境を実現した。

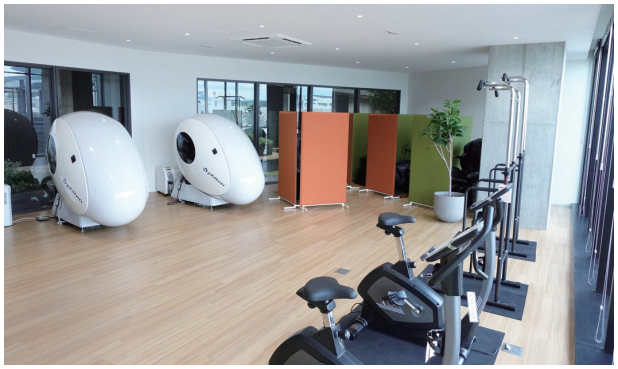


図3　リフレッシュルーム

3.4　4F～6F執務エリア　図4

仕事の質やスピードを上げて効率よくアウトプットを生み出せる環境づくりを狙い、働き方に合わせて自由にスペースを活用できる、コミュニケーションを加速させられる仕掛けを盛り込んだ。3フロア吹抜け・柱間24mの大スパン。組織の壁を越えた価値創造を加速すべく、とにかく壁や柱を最小限にし、一体感を持たせた。組織横断的な大部屋開発から一人籠っての作業まで、シゴトに合わせて席を選べる全席フリーアドレスの執務スペースとした。また、各フロアに設けた「チャレンジエリア」は、実車や部品を置きイベン

トもできるスペース。あえて人通りの多い場所に設置し、オープンな雰囲気の中で「人と情報を交差させ、偶発的なものも含め社内の共創･価値づくりの中心地」とした。

図４　チャレンジエリア

3.5　屋内外デザイン確認場　図５

分散していたデザイン確認場をワンフロアに集約し、CGからクレイモデル、実車までの多様な形態やシーンでの確認を可能とする事で、「未来を見つける」ための気付きを得ると共に、付加したデザイン価値の検証精度向上を狙った。

屋内には、12m×3 .4mサイズ（実車サイズを2台並べる事が可能）の高精細/高輝度な大型LEDモニターを設置し、現地/現物さながらのCGを一度に大勢と共有する事で、「本質から語り合う」場となり、「モノづくり革新」に向けたデジタルツールとなる。

屋外は、ブラックアウトされた背景と、4台のターンテーブルにより、自然光下で複数モデルや競合車を同時に比較する事が可能となる。

また、最大30ｍの視認距離を確保し、狙い通りの形になっているか確認する事も可能となる。

図５　屋内デザイン確認場

4．おわりに

プロジェクトが始まったのは2018年。

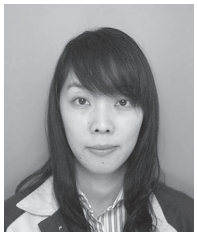
お客様の人生に寄り添うSUBARUであり続けたい。変革をリードする人財を育み 、皆で未来をつくる ための知の中心としていきたい。そう願うメンバーが集まり始まった。

現状の社内の困りごと集約から始まり、将来を見据え、どうあるべきか？何ができるか？試行錯誤しながら、約５年かけてここまで辿り着いた。

しかし成果を生み出すのはこれからである。Innovation Hubで働く人と共に、さらなる「モノづくり革新」「価値づくり」を 推進していきたい。

最後に、このプロジェクトチームは誰一人専任の人はおらず、活動の意義に共感し、有志で集まってくれたメンバー達である。彼らの協力無くしてInnovation Hubは実現し得なかった。心から御礼を申し上げる。

【著　者】


仁科　沙津紀

大家　敏宏

舟串　卓也

松土　賢人

小坂　昌義

「SUBARU　BRZ」一部改良モデルを発表
～上質さとさらなるスポーティさを実現した「STI Sport」グレードを新たに設定～

2023年9月22日

SUBARU初となるマニュアルトランスミッション車（以下MT車）向けの、運転支援システム「アイサイト」を採用。 また、上質さとさらなるスポーティさを付加した「STI Sport」グレードを新たに設定しました。

SUBARU BRZ「STI Sport」

ソフトウェア人財育成の紹介

Introduction of Software Human Resource Development

ソフトウェア人財育成プロジェクトチーム
Software Human Resource Development Project Team

抄　録

当社では2022年度より主に技術本部社員を対象にしたソフトウェア人財育成プロジェクトを進めてきた。自動車業界や当社を取り巻く環境は激しく変化しており、ソフトウェアがより重要性を増す中で、当社がソフトウェア人財育成に取り組む狙いや研修プログラムの全体構造、運営面での配慮について紹介する。

Abstract

Our company has been working on developing human resources with software utilizing skills since fiscal year 2022, mainly targeting Engineering Division employees. Amid the rapidly-changing automotive industry and environment surrounding our company, software is becoming increasingly important. In this report, we introduce our purposes of developing software-utilizing human resources, the overall structure of the training program, and our consideration for program management.

1．まえがき

自動車業界は過去十年で劇的な進化を遂げ、CASE（Connected, Autonomous, Shared & Services, Electric）やMaaS（Mobility as a Service）などの新技術が続々と導入されている。

これらの技術革新は、制御技術やソフトウェアの進化無しには成し得ないものであり、クルマの価値の源泉はハードウェアからソフトウェアへとシフトしている。そのため、車両はソフトウェアによって定義されているという意味でSDV（Software Defined Vehicle）という用語も広く知られるようになっている。

本論文では、こうした劇的な進化の中で当社が今後も競争力を維持・向上させるために実施しているソフトウェア人財育成について、新たなスキルや知識習得の必要性に応え、効果的な人財育成を実現するための具体的な戦略と取り組みを紹介する。

2．ソフトウェア人財育成の狙いと概要

ソフトウェア人財育成戦略（2022年度～）の目的は、商品力の強化とモノづくり改革に直結する人財を育成することである。具体的な目標として、5年で600人のソフトウェア人財を増員する計画が掲げられている。そのうち、将来のコア人財となることを期待される上級人財30人を短期間で育成することが求められる。上級人財を育成する実践研修の一環として、一部の部署が「企業内大学」としての役割を担うこととした。

次に、研修内容としては、まず組込み技術とAI・DX（Artificial Intelligence・Digital Transformation）に焦点を当て、新入社員と既存社員を対象にしている。研修プログラムは、研修レベル（入門、初級、中級、上級）に応じたコースを設定し、ステップアップしながらソフトウェアに関するスキル、知識の習得を進める。上級（新入社員のみ）に関しては対象者を選抜し、実践研修を行うことでコア人財の育成を目指している。

また、既存社員には現行のスキルを考慮しつつ、新たなスキルの習得を促す「アドスキル」プログラムを提供する。このプログラムは、各社員のキャリアパス

に沿ったスキルセットを強化し、キャリアアップを支援するものである。なお、当社では既存社員が今まで積み上げてきた車両に関するスキルは引き続き活用してほしいという想いから、「リスキル」ではなく「アドスキル」という言葉を使い「車両」×「ソフトウェア」をどちらも理解できる人財の育成を目指している。

AI研修に関しては、研修修了後にAIスキルを実践的に活用できるよう、大学と連携した研修プログラムも実施している。また、受講者がスキルを習得するだけでなく、その知識を指導・活用する立場にあるマネジメント層向けの研修も整備した。

このように、本研修は新入社員から既存社員、そしてマネジメント層に至るまで、幅広い層を対象にした包括的な研修プログラムを提供し、ソフトウェア人財の育成を体系的に進めている(図1)。

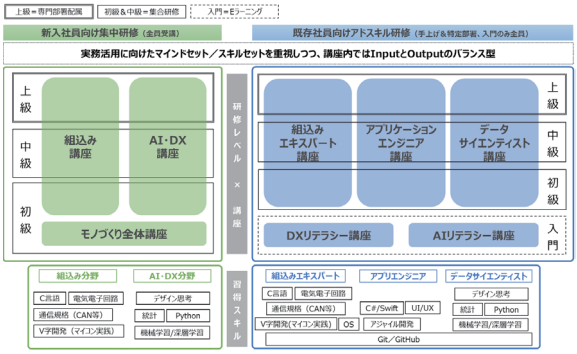


図1　ソフトウェア人財育成の全体像

3．新入社員研修

ソフトウェア研修では、まず新入社員研修を実施し、その後に既存社員研修を実施した。ここでは、新入社員研修について紹介する。本研修の特徴は以下の通りである。

(1) 技術本部配属の新入社員全員が対象

新入社員研修では入門研修(ものづくり体験)と初級研修(組込み、AI講座)を全員必修とした。狙いは全員の基本的な技術レベルを底上げし、ソフトウェア人財としての基盤を築くことにある。特に初級研修は、組込みやAIの共通の技術言語を理解するための必修の研修として位置づけた。中級研修では、専門性が高くなるため、組込みとAIのどちらかを選択する形式を採用している。選抜方法としては、「本人要望」「上司要望」「本人素養」の各要素を考慮している(図2)。

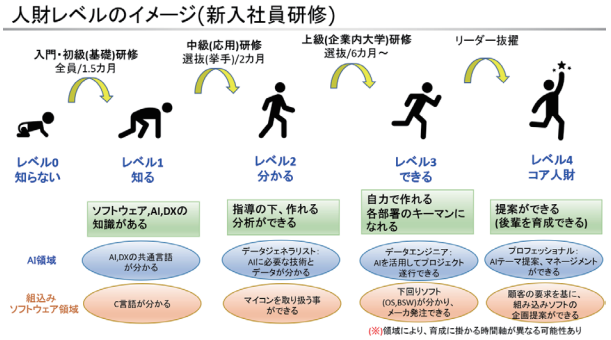


図2　人財レベルのイメージ

(2) 対面での講義形式

研修は基本的にオンラインではなく対面での実施とした(図3)。狙いは、講義への集中度の向上、心理的安全性の確保、そして仲間同士の教え合いなど、相互学習の促進にある。なお、対面での講義は幸いコロナ禍が落ち着き始めたタイミングだったため何とか実現できた。

図3　新入社員研修の様子

(3) 集中研修形式

本研修は入社後行われる生産実習の直後に設定し、自職場の業務が本格的になる前の短期間で集中的に育成することを目指した。この期間中、他の業務は原則禁止とし、研修に専念できるよう環境を整えた。

3.1　組込み研修

ここからは組込み研修について紹介する。技術本部が開発する「制御」とは、In/Out端子・マイコン・電源ICなどを一通り備えた電子基板ユニットにプログラムを織込み動作させる、いわゆる「組込みソフトウェア」と呼ばれる形態が主流である。全社で制御開発力の強化に舵切りするため、一般的な情報系研修に加え、実践的な開発力の強化を目的に2つの課題を設定した。

(1) 実業務として開発に参画できる人財育成

開発プロセスを体系立てて学び、プログラミング言語の知識だけでなく業務として開発に参加できる実践的な経験を積ませる。

(2) 技術コア人財を目指す候補者の発掘

ソフトウェア技術の将来戦略を立てられる人財を長期間かけて育てるため、集合研修を通して素養あるメンバーを見出す。

3.1.1　組込み初級・中級研修

研修対象として新入社員を選定し、全員を一定レベルに引き上げることを計画したが、毎年相当規模の人数が入社するため自社のみでの研修は困難であり、外部研修ベンダを活用することとした。

組込み研修はある程度定式化されたカリキュラムが世間・各ベンダで存在しているが、いずれもそのままでは当社が重視する能力(開発プロセスを理解していること、ソフトウェア・マイコンが回路の動作原理を理解していること)に対し過不足あり、大規模な仕立て直しをした。その際、当社として全員に身に着けさせるべき能力は何かを議論し、必要十分となる項目の取捨選択・効果的な実践課題の検討に多くの時間を割くこととなった。

主に初級では情報学基礎とプログラミング言語などの知識研修を中心とし、中級にかけて演習課題を増やして実践形式で開発プロセスを学べるものとした(表1、表2)。

表1　初級カリキュラム

概要	内容	所要日数
C言語プログラミング（概要説明）	初級でC言語を学ぶ理由を説明	1
コンピューター概論 初級	OS、メモリなどのコンピューターに関する基礎知識の学習を行う	
C言語プログラミング（環境構築）	C言語のプログラムを書いて動かすための環境を準備する	
C言語プログラミング	画面に出力する （C言語のプログラムを書いて動かしてみる）	1
	変数（型、const、代入）	
	演算（様々な演算子）1	
	演算（様々な演算子）2	1
	条件によって処理を変える(if, switch)	
	繰り返し処理（for, while, break, continue）	1
	配列（配列の宣言、代入、配列と文字列）	1
	関数（定義、呼び出し、引数、戻り値）	1
組込みシステム 演習（Arduino）	Arduinoを動かしてみる	1
	LEDを点滅させる	
	ボタン入力を処理する	
	音を鳴らす	
	プログラミングして動かす	1
	シリアル通信を使う	
	LCD表示を行う	
	無線モジュールを接続させる	
仕様書の書き方	説明を聞きながら　要求仕様、要件定義、設計、実装、テスト仕様の書き方を個人単位で学ぶ	1
	用意された対象課題に対する要求仕様書、要件定義書、設計書、テスト項目の書き方などをグループワークで分かれて相互理解しながら学ぶ	1

表2　中級カリキュラム

概要	内容	所要日数
C言語	C言語において一般的に難しいとされる内容を学ぶ（ポインタ、配列・文字列とポインタ、構造体と共用体など）	3
	組み込みシステム実践向けの機能を学ぶ（ファイル入出力、標準ライブラリ、プリプロセッサ、Makefileの作り方など）	2
組込システムと確認用計測機器の理解	STM32マイコンボードを用い制御回路設計の応用力を養う（LEDを点滅させる、ボタン入力を処理する、ビット計算、LCD表示など)併行して製作した仕様の確認・検証手段などを学ぶ（オシロスコープ、デジタルマルチメータの使い方）	2
車載通信の理解	車載通信仕様の1例としてCAN通信について学ぶ（CANプログラムの実行/作成）	2
[演習1] 自販機の機能を用いて考える	初級で作成した仕様から機能追加する 初級で作成した各ドキュメントを修正し、実装、テストをグループワークで行う	3
	発表コンペ（グループワーク単位）	1
[演習2] エアコン開発	要求仕様書が受講生に渡され、要件定義以降の工程の作業を実施する	5
	発表コンペ（グループワーク単位）	1
[演習3] 自由課題	研修の総まとめ Arduino、CANを用いての自由なシステム構築を通し性能・設計・シミュレーション プログラム作成・実装・テスト・修正、また成果物作成まで一通り実施する事で開発の実践的な流れを学ぶ	7
	発表コンペ（グループワーク単位）	1

特に中級演習では、電子工作用のマイコン・基板が一体になった開発機材 Arduino と CAN 通信の仕組みを使うことのみを条件とし、それ以外は受講者が自由にアイデアを出して実践的な開発研修に取り組めるようにした(図4)。

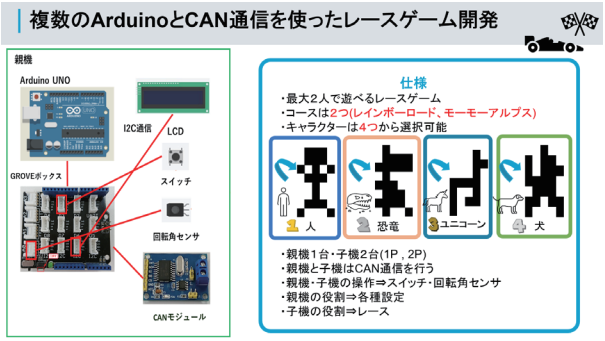


図4　中級自由課題の成果物例

受講者の評価について、研修で目標とする能力に到達したかは、ペーパーテストの点数を定量指標とした。一方で、上級研修への選抜にあたっては単純な知識量だけでなくチームリード・学習意欲など、総合的なポテンシャルを評価指標とするため、研修への取り組みの様子を複数の観察者によって定性的に判断し、演習での成果物自体をチェックして評価する手法を採ることとした。

研修を始めると懸念していた通り、受講者によって理解度がバラつきやつまずきが発生した。日ごとにアンケートを取り全員の理解度を確認したことで、翌日に追加説明するなど細かいフォローにつなげられた。理解度の差は学生時代の情報系の下地に因るところもあり、全新入社員に一律の研修をする難しさと考える。

状況の随時把握と対策については研修ベンダと週次の確認会をベースとし、研修立ち上げ直後・問題がある場合はデイリーで検討して、研修自体の軌道を修正していったことが奏功した。また、アンケートだけでは特に難しい箇所だけが取り上げられる傾向にあるため、講義中の発言や様子を確認することも重要である。

3.1.2　組込み上級研修

初級・中級研修は希望者全員が受講できるコースとした一方で、上級研修は将来基盤ソフトウェア部分の提案ができるレベルのコア人財化を目指し集中育成するため、情報系知識に加えて総合的な能力素養を人財要件とした。

(1) 深くソフトウェアに入り込める
　　知識・応用力・発展力
(2) 学習スピード、理解力
(3) 技術やテーマに対する探求力

(4) リーダシップ系の素養

上級研修はより実践的なソフトウェア/ハードウェア技術・開発プロセス・基盤部分の経験を積むため、カリキュラムベースではなく該当開発と育成環境を持つ開発現場で実務ベースの研修をする。

3.1.3 組込み研修の振り返り

各年次における、初級研修修了時のC言語知識/組込み演習の基準スコアに到達できた受講者の比率推移を示す(図5)。なお、中級研修は実践重視、かつ多軸評価のため単純比較はしていない。

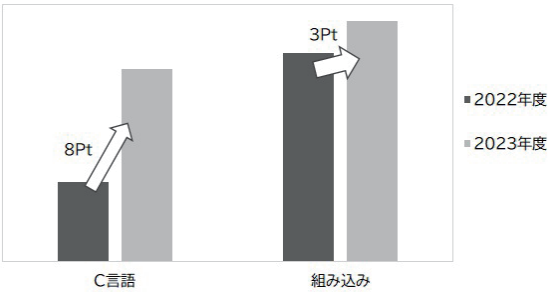


図5 基準点到達率の推移

絶対数は省略するが、どちらのカテゴリでも基準スコア到達者が増加していることから、教材・教え方・フォローの改善によって研修効果を高められていると考えられる。

また、受講者から寄せられた意見を随時研修に反映することで、知識面だけでなく研修全体に対する心理的な印象も向上できた。これらのことから、研修カリキュラムは作って終わりではなく、常に状況を把握し、改善に努めることが重要であると考える。

3.2 AI研修

次に、新入社員AI研修について紹介する。講座設計においては、特にモチベーションやマインドについて配慮した。そもそも新入社員全員が「データサイエンティストになりたい！」と入社しているわけではない。そこで、特に前半では以下の部分を重視した。

(1) モノづくりやAI/デジタル技術への親しみの醸成

(2)「持っている」だけでなく「使える」スキル習得

3.2.1 AI初級・中級研修

初級研修の導入部分では先進技術だけでなくコンピュータやデータに馴染めるような体験講座を取り入れるなど工夫した(表3)。

表3 AI初級カリキュラム

概要	内容	所要日数
環境構築・最先端技術・ChatGPT	最新 Tech トレンドを体験を通して学ぶ	1
データマネジメント基礎（アイサイトの歴史1時間）	データを扱う基礎となる知識を学ぶ	2
データサイエンス活用	Excel をベースに統計の基礎を抑え、データ分析の演習を実施	1
コンピュータサイエンス実践	AI を実装する以前に必要な知識を学ぶ	1
Python 入門	Python の環境構築やつまずきポイントを学ぶ	1
Excel / Python 演習	Excel と Python の練習時間を確保	1
Python & 機械学習入門	Python の基礎と機械学習の理論を手書き数学で学ぶ	1
復習・課題		1
機械学習実践	機械学習を実装しデータ分析力と実践力を学ぶ	3
復習・課題（SUBARUデータの可視化1時間）		1
DX 追体験ワークショップ	実際の現場を再現しながらデータ活用を体験	3

また、AI研修と言っても、単なるPython研修に留まってしまうと、身に着けたスキルを実際の業務で十分に活かせない可能性が大きい。そこで、Pythonなどのプログラミングスキルに加えて、企画力や課題形成力を養うことも重視し、実現場を再現したデータ分析のロールプレイングなどもカリキュラムに取り入れた。さらに、AI・DXを身近に感じてもらい、課題形成の一助とするために、社内のAI事例を実際に体験できるコンテンツは自社で用意した(図6)。これにより、新入社員が自分の業務においてどのようにAI技術を活用できるかを具体的にイメージできるように配慮した。

図6 当社のAI活用事例紹介

中級研修では、AIに関する知識だけでなく、「使いこなす」「作れる」ことを意識した人財育成を目指した。特に「作れる」点に関しては、受講者が自職場に戻った後でも自力でAIモデルが開発できることを目標としている。そのため、調査力や突破力を身に付けるために、中級の講義では敢えて全てを教えず受講者自身で考えてもらうことを強く意識している。

研修内容に関して、技術本部でよく扱われる時系列データや画像データなどは特化した内容として用意した(表4)。

表４　AI中級カリキュラム

概要	内容	所要日数
Python 総復習	初級教育の復習と中級教育の導入を実施	1
Python & 機械学習 入門	Pythonの基礎と機械学習の理論を手書き数学で学ぶ	1
データサイエンス実践	データ分析に必要な統計 数理の基礎から実践まで学ぶ	3
データサイエンス応用	数学の応用、データサイエンスの発展演習	2
機械学習実践	機械学習を実装しデータ分析力と実装力を学ぶ	3
ディープラーニングハンズオン	機械学習 -ディープラーニングの理論と実装	3
データエンジニアリング入門	データエンジニアリングの基本的な知識を演習を通して学ぶ	1
データエンジニアリング実践	課題解決のためのデータベースアーキテクチャの設計	2
時系列解析特化	時系列データの扱い方、統計モデル/機械学習モデルを用いた予測	2
数理最適化	数理最適化の基礎と課題に応じた理論と実装方法を学ぶ	3
画像処理特化	物体検出、セグメンテーションなど画像処理の応用	3
異常検知特化	センサなどの時系列データや画像データを用いた異常検知の実装	2
演習課題 機械学習パート)	コンペティション 機械学習モデルの構築と予測精度の向上	3

最終演習では、受講者のスキルが想定以上に向上したため、「SUBARUにとって有益なアプリ」というテーマだけを与え、グループで挑戦してもらった。その結果、学んだ開発プロセスを基に、新入社員ならではの自由な発想で自走することができた。参考として、優勝チームのユニークな事例を示す（図7）。

図７　WEBカメラ従業員見守りアプリ

運営面としては、中級研修では専門性が高まるため、20人前後の少人数制を採用し、心理的安全性を確保することで、受講者が自由に質問や意見を述べられる環境を整えている。このような工夫により、実務に直結するスキルを持つ人財の育成を実現している。

3.2.2　AI上級研修

本研修の対象者はAI中級研修から選抜された数名である。主な研修配属先はアイサイト×AIを専門に高度な開発を行っているSUBARU Labであり、期間は半年から1年程度となる。対象者はAI開発のメンバの一員として加わり、実践的かつ高度なAI開発スキルを身につける。なお、研修後の再配属先のニーズも事前にリサーチし、それをバックキャストした上で研修テーマの擦り合わせも綿密に行っている。

3.2.3　AI研修の振り返り

ここまでAI研修の内容を紹介してきたが、あくまで研修は知識・スキルの提供に過ぎず、習得した知識・スキルは実践を通じて初めてその価値を見出す。そこで、研修実施後にそれらの活用状況を把握するためのアンケートを定期的に実施している。その結果、新入社員が即座にスキルを活用するケースは多くはないものの、これまで以下の活用事例が実績として挙げられる。

(1) エンジンデータと排ガスデータ解析の自動化
(2) 車両形状に対する空力抵抗のAI予測
(3) 面圧解析のサロゲートモデル
(4) 電池セルの寿命予測
(5) 次世代アイサイト向けAIモデル作成
(6) 音の官能評価、および振動等を用いた故障検知
(7) 試験データの可視化や情報整理
(8) 表形式のデータの可視化・グラフ作成
(9) エクセルでは処理しきれないビッグデータ解析

3.3　新入社員研修を支えた事務局運営

本研修は通常の社内研修と異なり、数カ月にもわたる前例のない長期研修かつ入社後まもない新入社員全員を対象とする大規模研修であった。そこで、下記に示すような丁寧な受講者コンディション管理を実施した。

(1) 運営体制
研修会場では、受講者の様子を日々観察し、異常や問題が発生した際には即時対応できるよう、毎日最低1名の事務局要員を配置した。

(2) ファミリー制度
事務局がカバーしきれない細かい部分については、受講者同士で目配りできるよう、"ファミリー制度"と呼ばれる6名程度の少人数チームを形成した。各チームにはリーダを設け、事務局とのスムーズな情報連携を図った。

(3) パルスサーベイの活用
日々のコンディション変化を素早く察知するため、毎朝数分間で完了するアンケートを実施した（図8）。各人の小さな変化も見逃さないよう、日々の定点調査を行い、必要があれば事務局とベンダが連携して対策を講じた。

その結果、本研修では途中離脱者がゼロであった。今後も受講者のサインを見逃さないよう、継続してベンダも巻き込んでこまめにフォローしていく。

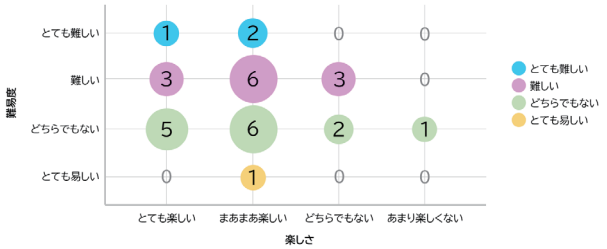


図８　パルスサーベイの一例

4．既存社員研修

本章では既存社員研修の概要を紹介する。本コースの対象は技術本部全体であり、その中からリソースシフトに関わる領域の選抜制と受講者の自主性を考慮した挙手制の2つを採用している。既存社員研修は先行している新入社員研修をベースに内容をブラッシュアップしたものである。ただし受講形式については、新入社員研修と異なり研修専念期間の設定が難しいことから、初級はオンラインを中心とし、中級はオンラインとオフライン（対面）のハイブリッド開催とし、長期間の研修カリキュラムとした（表5）。

表5　既存社員研修の概要

	新入社員	既存社員
対象人数	約200名	約4000名
参加方式	原則、全員参加	選抜制／挙手制
講義形式	オフライン（対面）	ハイブリッド（オンライン／オフライン）
日程	週5日	週1日以下
講座	ものづくり／組込み／AI	組込み／AI／アプリ
コース	入門／初級／中級／上級	入門／初級／中級
内容	知識と実践重視	実践重視

4.1　マネジメント層向けAI研修

技術本部全体のAI・DX活用推進には、プロジェクトを支えるマネジメント層の理解も鍵となる。そこで、マネジメント層向けの研修も用意した（表6）。本研修の目標は、以下のとおりである。

（1）ビジネス課題とAI/デジタル技術の活用での解決手段を紐づけられる状態

（2）下位者のAI/デジタル技術の活用を正しく評価でき、かつ適切にフォローができる状態

マネジメント層向け研修では、AI技術の基礎的な理解に加え、AIプロジェクトのROI（Return on Investment）分析などのトピックスも取り上げている。また、自社事例のケーススタディを通じて、実践的な知見を得られるよう工夫している（表6）。

表6　マネジメント層向けAI研修メニュー

概要	内容	所要日数
最新トレンド	生成AI活用を学ぶ	0.5
評価指標・ビジネス効果試算	ケーススタディを通じてAIモデルの評価指標と効果試算	0.5
業務変革ワークショップ＋DXビジネス企画立案	DXに関する課題抽出とビジネス企画の立案	1.5
DXプロジェクトマネジメント	AIプロジェクトに特化したマネジメント方法を学ぶ	0.5
GPT×Python活用	GPTを活用したPython体験	0.5
AutoML	AutoMLを活用して機械学習の流れを体験	0.5

これらの多角的なアプローチにより、組織全体のソフトウェアリテラシの向上を図っている。既存社員向けの研修は、単なるスキルアップの機会にとどまらず、組織の変革と競争力強化の重要な推進力となっている。今後は、研修の効果測定と継続的な改善、さらには研修後のフォローアップ体制の強化などを通じて、より効果的かつ持続可能な人財育成システムの構築を目指していく。

5．ソフトウェア人財育成での学びと課題

ここまで述べてきたとおり、長期間にわたり多くの方々が関わる本プロジェクトを通じて得た学びや気づきは非常に大きい。それらの詳細を以下に示す。

（1）カリキュラムの定期的な見直し

毎週実施している講義の振り返りに加え、毎年、最新技術の変化や受講者のアンケート結果に基づきカリキュラムをアップデートしている。これにより、常に鮮度の高い講義を提供し、受講者の高い満足度を維持できる。

（2）受講者同士の持続的なネットワーク

研修内ではグループで協力する演習が多く、長丁場かつ集合研修の中で助け合うことで受講者間の仲が深まったとの声が非常に多い。各部署での業務に戻った後でも仲間同士の繋がりが維持されており、ソフトウェア関連の困りごとはもちろん、その他の業務でも相互に助け合える関係が続いている。このような受講者同士の強固なネットワークは、当社のソフトウェア人財育成プロジェクトの重要な成果の一つである。

（3）プロジェクトチームの多様性

今回のプロジェクトチームは、基本、各職場から希望者を募る形で編成された。本稿の著者一覧にも示されているように、各部門から異なるバックグラウンドを持つメンバーが集まったことで、多様な視点が生まれた。また、人に役割を当てるだけでなく、時には役割を人に適応させることで、チーム運営を円滑に進めることができた。これらの取り組みは、当社が目指している「ひとつのSUBARU」の一例として捉えることができる（図9）。

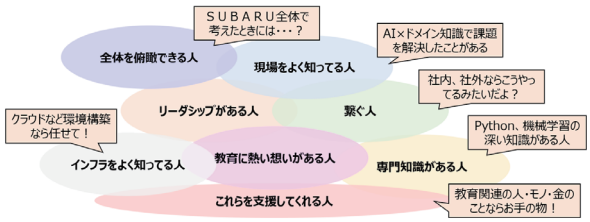


図9　プロジェクトチームの多様性

最後に、本研修は2022年度に開始されたが、現状のアンケート結果によると、活用数はまだ多くないことが課題である。技術本部内でのAI活用事例の展示会や社内コンペティションなどを実施しているが、これらの取り組みを地道に続けていく必要があると考える（図10）。また、当社が掲げるモノづくり革新に向けて勢いをつけるためには、技術本部だけでなく他部

門も巻き込み、全社でこのような動きを加速させることが直近の至上命題であると考える。これにより、社内のAI/デジタル技術の活用がさらに促進され、競争力の向上に寄与することが期待される。

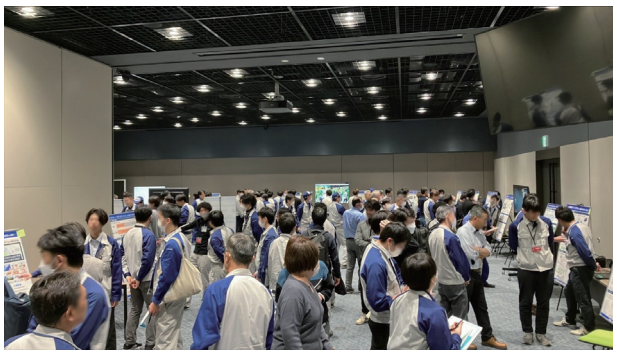


図10　技術本部AI活用事例の展示会

6．まとめ

当社におけるソフトウェア人財育成プロジェクトは、自動車メーカに求められる急速な技術革新に対応するため、プロジェクトメンバが高い意識をもって取り組んでいる。当社が今後もお客様に愛され、笑顔をつくる会社であり続けるため、より良い人財育成プロジェクトとなるよう日々努力を続けていく。最後に、本プロジェクトの遂行にあたり多大なるご協力を頂いた協力会社様ならびに受講者の皆様に深く感謝の意を表する。

【著　者】

ソフトウェア人財育成プロジェクトチーム

［技術開発部］	斎藤　誠
	金子　隆
［E＆Cシステム開発部］	原田　政明
	鈴木　彰
	小柳　裕
［車両環境開発部］	牧野　和輝
［パワートレイン設計部］	金坂　嘉之
	南　皓也
	三松　隼太
［車両開発統括部］	平尾　公一
	高橋　利典
［ADAS開発部］	金井　崇
	林　正裕
	向井　成樹
［技術研究所］	鳥居　武史
	志波　大樹
［技術管理部］	阪井谷　要
	菊地　正雄
	加茂下浩隆
	宮崎　正也
	白木美莉花
	正田　篤生
	塩谷　桂大
［商品事業部］	尾嵜　一徳
［営業企画部］	鈴木　雄太

高回転歯車のオイル撹拌挙動 CAE 技術構築

CAE Technology Construction for Oil Stirring Behavior of High-Speed Gears

粟 田 裕 介*
AWATA Yusuke

抄 録

CAEを用いてトランスアクスル内部のオイル撹拌挙動を予測することは、性能向上や開発効率化のために重要である。しかし、歯車の高回転領域におけるオイル撹拌挙動は気相と液相の混相流となる複雑な現象であるため、従来の粒子法を用いたオイル単相自由表面流解析では高回転領域における撹拌ロス特性やオイル撹拌挙動において実現象を捉えられない課題があった。これらの技術課題に対応するため、粒子法を用いた気液二相流解析手法の技術構築に取り組んだ。本稿では上記の技術開発の取り組みと、構築した技術をトランスアクスル開発に適用した事例について紹介する。

Abstract

Predicting the oil stirring behavior inside a transaxle by CAE analysis is important to improve performance and development efficiency. However, the oil stirring behavior at the high-speed rotation range of gears is a complex phenomenon involving multiphase flow of gas and liquid, and the conventional particle method-based oil single-phase free surface flow analysis could not capture the actual phenomena of oil stirring loss characteristics and the stirring behavior in high-speed rotation range. To address these technical issues, a technology for gas-liquid two-phase flow analysis using the particle method was constructed. This paper introduces the efforts in the technical development and cases where the developed technology was applied to transaxle development.

1. まえがき

近年、BEV用トランスアクスルの小型・軽量化に向けてモータの高回転化が注目されている。これによりトランスアクスルとして使用される歯車に関しても、これまで以上に高回転領域でのギヤ撹拌損失低減や潤滑性能向上への要求が高まっている。これらの要求に対応するため、複雑な気相と液相の混相状態となるギヤ高回転領域におけるオイル撹拌挙動や撹拌ロス特性を机上で精度よく予測する技術が必要となる。そこで、粒子法の一種であるSPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）法をベースとした気液二相流解析の技術構築に取り組み、撹拌試験機を用いてその妥当性を検証した。本解析手法をトランスアクスル開発に適用することで従来手法である単相自由表面流解析から精度を向上できたので、その内容を報告する。

＊ 技術開発部

2. オイル挙動解析技術

車両開発の効率化を推進するため、当社では粒子法を用いた流体挙動の可視化解析技術を開発・適用している[1]。特にトランスアクスル内のオイル挙動はギヤ撹拌によって界面の変化が大きい現象となるため、VOF (Volume of Fluid)法などの計算メッシュを用いた手法では界面の位置や形状を正確に捉えることが難しく、界面のぼやけが問題となる。一方、粒子法では、

流体を計算メッシュではなく粒子に分割することで自由表面を明瞭に保つことができ、トランスアクスルのオイル挙動解析に有効である[2]。

2.1　粒子法

粒子法とは流体の運動を粒子の運動に置き換え離散化する手法である。本稿では粒子法の一種であるSPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）法をベースとした手法を用いた。

粒子法は式(1)、(2)に示す支配方程式[3]を用いて粒子の運動が計算される。

Navier-Stokes方程式；

$$\frac{D_{V_i}}{Dt} = -\frac{\nabla p_i}{\rho_i} + \frac{\nabla \cdot \tau_i}{\rho_i} + \nabla \varphi_i + f_i \qquad (1)$$

連続の式；

$$\frac{D\rho_i}{Dt} + \rho_i \nabla \cdot (V_i) = 0 \qquad (2)$$

非圧縮性 $\frac{D\rho_i}{Dt} = 0$ の場合、$\nabla \cdot (V_i) = 0$ となる。

ここで、Vi、ρi、piはそれぞれ粒子iの速度、密度、圧力を表し、式(1)の右辺の第1項は圧力による加速度、第2項は粘性による加速度、第3項は付着・凝縮力によって引き起こされる加速度、fiは重力や流れ抵抗などの外力ベクトルを表す。

2.2　気液二相流解析手法

これまでトランスアクスル開発ではオイル挙動を粒子で離散化する単相自由表面流解析手法を用いていたが、電動化によりギヤの回転速度が高い領域に遷移すると、オイル挙動や撹拌によるトルクロス特性が実機と大きく乖離する解析精度課題が生じた。これは高回転化に伴ってギヤ周りに発生する気流を解析で考慮できていない影響であると考え、気流現象を含めたオイル挙動予測手法を検討した。

粒子法を用いて気流影響含めたオイル挙動を予測する手法として、粒子法とFVM（Finite Volume Method）を連成させる手法がある。しかし、この手法の場合、新たに計算メッシュを準備する必要があり、またFVMとしてのパラメータチューニング検討も別途必要になるため、解析コストが悪化してしまう。

そこで、本稿ではオイルに加えて空気も粒子の運動として扱い、粒子法のみで気液二相流現象を解く手法を検討した（図1）。この手法は気相（空気）と液相（オイル）を別々の流体で作成し、異なる物性パラメータを持たせた2種類の連成計算によって混相流を解く手法である[4]。本稿ではこれまで粒子法で再現できなかったギヤ周りに発生する気流現象を考慮するため、この手法をギヤ撹拌現象に適用することにより解析精度を向上できるか検討した。

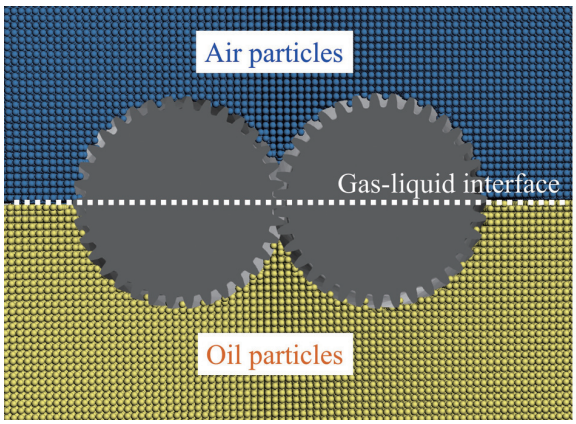


図１　粒子法による気液二相流解析手法

３．オイル挙動可視化試験検証

解析精度検証のため、ギヤ一対の試験装置を用いたオイル撹拌挙動の可視化及びギヤ撹拌によるトルクロス値の実測を行った。

3.1　可視化試験装置

実験に用いた装置はGearbox内にヘリカルギヤ一対のみを配置しており、モータ駆動によってギヤが回転し、トルク計によってオイル撹拌時のトルク値を出力することができる（図2）。Gearboxはポリカ板を用いてギヤ近傍のオイル撹拌挙動を可視化することができる。また、本試験装置にはオイルヒータ及びポンプが備わっており、試験時は任意の油温で評価することが可能となっている。

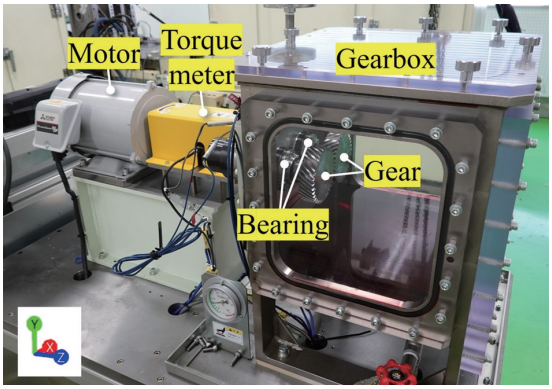


図２　可視化試験装置

試験のオイルにはATFを用いており、油温条件は50 [℃]とした。試験条件50 [℃]におけるオイル物性値は以下の通りである。

密度：829.6 [kg/m^3]

動粘度：1.88E-05 [m^2/s]

本稿では複雑な気液二相流れを検証するため、静油面高さはギヤ中心位置とし、回転数は駆動ギヤ3000 [rpm]まで試験を実施した（図3）。

検証用の供試ギヤ（ヘリカルギヤ）諸元を表1に示す。

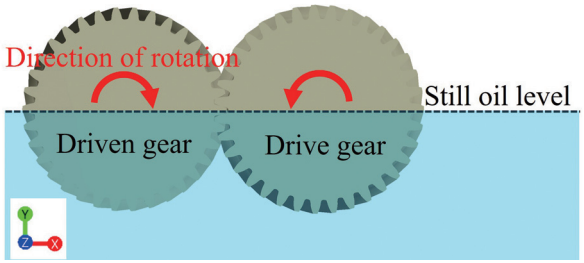


図３　ギヤ回転方向と油面高さ

表１　ギヤ諸元

	Drive gear	Driven gear
Number of teeth	35	34
Module [mm]	2.06	
Pressure angle [deg]	14.5	
Helix angle [deg]	33.0	

なお、以降に示すトルクロス値は撹拌試験装置内の軸受やシール等によって発生する抵抗分を差し引いたギヤ撹拌分の駆動ギヤ軸上トルクロスを表している。

3.2　解析モデル構築

解析精度検証に向けて、可視化試験装置と同一形状のGearbox及びギヤモデルを構築した。本稿では気液二相流解析を実施するため、Gearbox内に静油面高さを境界面としてオイル粒子と空気粒子をそれぞれ初期配置した(図4)。

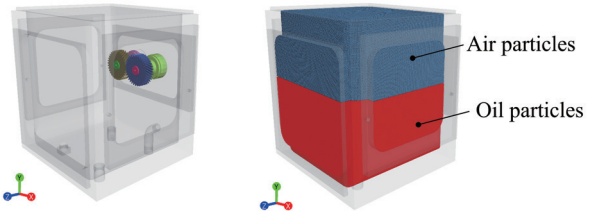


図４　解析モデル

解析モデルの静油面高さや油温は試験条件と合わせており、オイル物性値(密度・動粘度)は実測値を用いている。なお､空気粒子には下記物性値を用いた。

密度：1.22 [kg/m^3]

動粘度：1.51E-05 [m^2/s]

粒子径としてはオイル粒子:1.2 [mm]、空気粒子:2.4 [mm]を選定した。

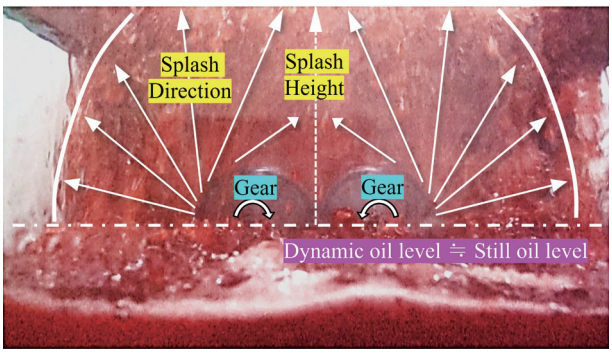
3.3　検証結果

気液二相状態におけるオイル挙動と撹拌ロス回転数特性の解析精度を検証するため、本稿では1600、3000 [rpm]における試験結果と解析結果を比較した。

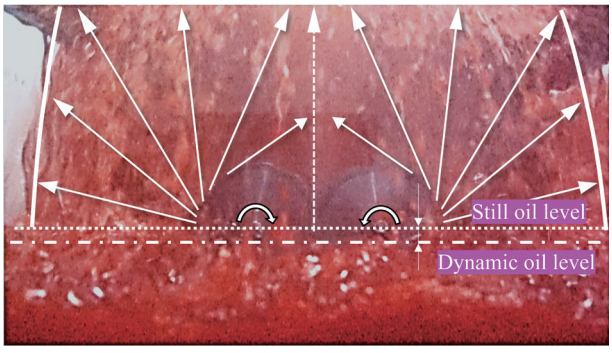
3.3.1　オイル挙動検証結果

(１)試験結果

撹拌試験機を用いて1600、3000 [rpm]のオイル挙動を確認した(図5)。各回転数におけるオイル挙動は、歯面が油面から出た後に歯面に付着しているオイルがギヤ回転によって剥がれ、ギヤ円周の接線方向にかき上げられることで扇形のオイル分布を形成している。また、かき上げ高さはGearbox上壁に到達していることが確認できる。一方で、3000 [rpm]では1600 [rpm]に対して広範囲にオイルが飛散しており、オイル飛散量も多い。これにより、3000 [rpm]になると多くのオイルがGearbox全体に飛散するために動油面高さが下がる状況を確認した。



(a) 1600 [rpm]



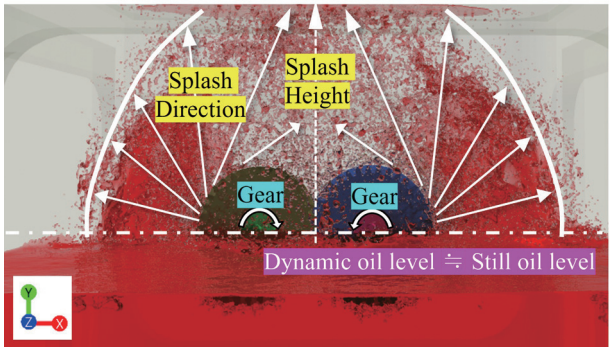
(b) 3000 [rpm]

図５　オイル可視化試験結果

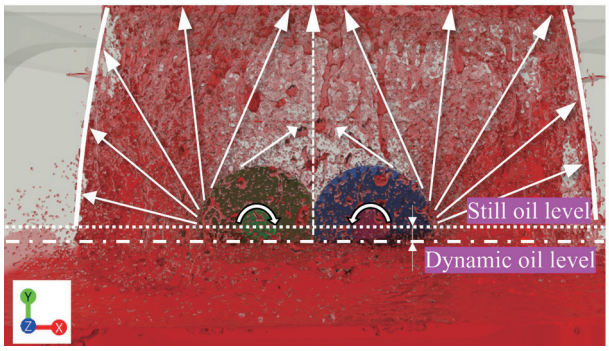
(２)解析結果

粒子法を用いた気液二相流解析により1600、3000 [rpm]のオイル挙動を算出した(図6)。各回転数においてギヤにより撹拌されたオイル分布は扇形を形成し、かき上げ高さがGearbox上壁に到達している。また、オイル飛散領域は1600 [rpm]に対して3000 [rpm]の方が広範囲に飛散し、オイル飛散量も多い。さらに3000[rpm]では1600 [rpm]に対して動油面高さが下

がっていることを確認した。これらの挙動は実機傾向と定性的によく一致していることが確認できた。



(a) 1600 [rpm]



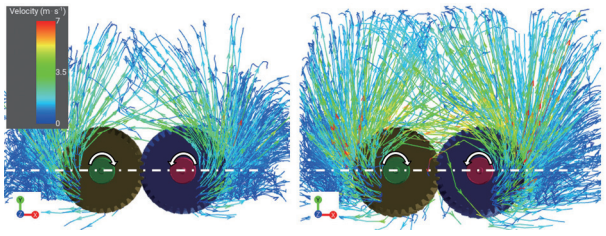
(b) 3000 [rpm]

図６　気液二相流解析によるオイル挙動

3.3.2　オイル挙動解析結果の考察

（1）オイル分布結果の考察

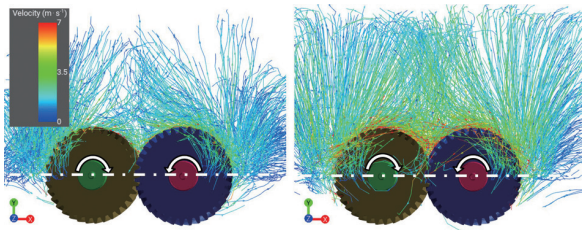
本解析結果においてオイル飛散領域が1600 [rpm]から3000 [rpm]で拡大した要因を分析する。各回転数におけるオイル粒子の流速ベクトルを算出すると、ギヤ回転数が増加するのに伴い、歯面から剥がれた後のオイル粒子の流速が増加していることを確認した(図7)。これにより飛散領域が拡大したと考えられる。



(a) 1600 [rpm]　(b) 3000 [rpm]

図７　解析によるオイル流速ベクトル表示

歯面から剥がれた後のオイル粒子の流速が増加する要因の一つとして、ギヤが高回転になることでギヤ周りに発生する気流が影響したと推測した。そこで、ギヤ周りに発生する気流を可視化(空気粒子の流速ベクトル表示)すると、各回転数においてギヤ周りに気流が発生していることを確認できた(図8)。特に、ギヤ歯面近傍の空気流れに着目すると、3000 [rpm]では1600 [rpm]に対してより高速な気流となっていることが分かる。この高速な空気流れによって図７のように、1600 [rpm]に対する3000 [rpm]の歯面から剥がれた後のオイル粒子の速度が増加したと考察した。

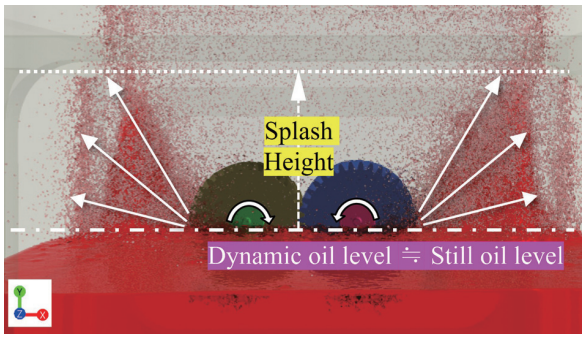


(a) 1600 [rpm]　(b) 3000 [rpm]

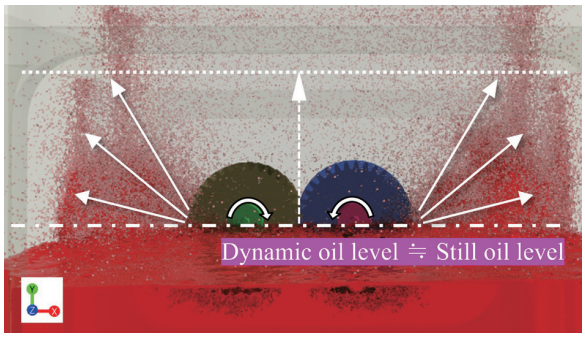
図８　解析による気相流速ベクトル表示

（2）オイル単相自由表面流解析との比較

気流影響を検証するため、図6に示したSPH法ベースの気液二相流解析モデルから空気粒子を除き、気流を考慮しないオイル単相自由表面流モデルで解析を行い、オイル分布を算出した(図9)。その結果、気液二相流解析に対してオイル単相流解析から得られたオイル分布は扇形ではなく、かき上げ高さが低くなり、オイル飛散量も少ないことが確認できた。また、1600[rpm]から3000[rpm]に回転数が増加してもオイル挙動の変化はあまり確認できない。



(a) 1600 [rpm]



(b) 3000 [rpm]

図９　オイル単相流解析によるオイル挙動

ここで、オイル単相流解析と気液二相流解析でオイル挙動が大きく変化した要因について考察した。一般的に、流体に作用する遠心力の大きさは流体の密度に比例する。そのため、本解析条件においては、オイ

ル粒子に作用する遠心力は空気粒子に対して約680倍の遠心力が作用する(図10)。ここで、回転するギヤの歯面に付着するオイル粒子には大きな遠心力が働くため、単相流解析の場合は歯面に付着しているオイル粒子は図9のように歯面が油面から出た直後にギヤ半径方向に剥がれてしまう。これにより、図9のように単相流解析では回転数上昇に伴うオイル分布の変化もあまり発生しなかったと推測する。一方、気液二相流解析によりオイル粒子と空気粒子の相互作用がある場合、密度が低い空気粒子はその粒子に働く遠心力が弱いために歯面から剥がれずにギヤ回転方向に動く。ここで、空気粒子とオイル粒子の境界面ではせん断力が働くため、オイル粒子は高速な空気粒子の移動方向に引きずられ、オイル粒子のベクトルが図7のようにギヤ回転方向に変化したと考察した。

以上の検証結果より、高回転歯車におけるオイル撹拌現象に対しては気相を考慮する本手法が解析精度向上に有効であることが分かった。

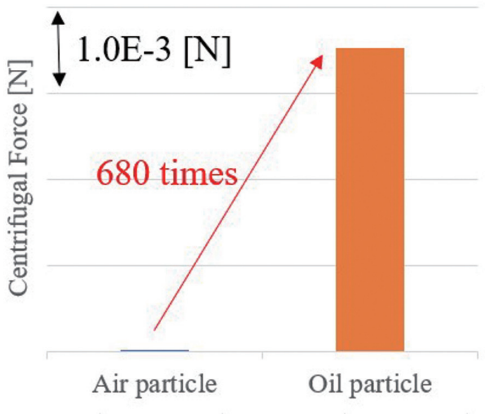


図 10 歯面に付着する粒子に作用する遠心力イメージ

3.3.3 撹拌ロス検証結果

(1)撹拌ロス回転数特性

高効率のトランスアクスルを開発するためにはギヤ撹拌によるトルクロス値を精度高く予測する技術が必要である。特にトランスアクスル開発で行う仕様変更や改善対策の検討において、撹拌ロス回転数特性を精度良く机上予測することが求められる。

気液二相流解析手法を用いた撹拌ロス予測精度検証として、本稿では1600 [rpm]から3000 [rpm]へ回転数が上昇するのに伴う撹拌ロスの増加代 [%]を撹拌ロス回転数特性の評価指標として実機と比較した(図11)。

実機評価より3000 [rpm]の撹拌ロスは1600 [rpm]に対して177[%]となる結果が得られた。これに対し、従来手法であるオイル単相自由表面流解析の撹拌ロス増加代は126[%]と少なく、実機から大きく乖離した。これは、3.3.2節にて述べた単相流解析結果において、1600 [rpm]及び3000 [rpm]でオイル挙動の変化が少ないことが要因と推測される。一方、本稿で検討した気液二相流解析手法では撹拌ロス増加代は172[%]であり、実機の撹拌ロス回転数特性を精度良く予測できていることが確認できた。これは気相影響を考慮したことで、回転数上昇に伴うオイルのかき上げ量の変化代、つまり歯面に接触するオイル粒子数の変化代をより正確に捉えられるようになったことが寄与したと推測する。

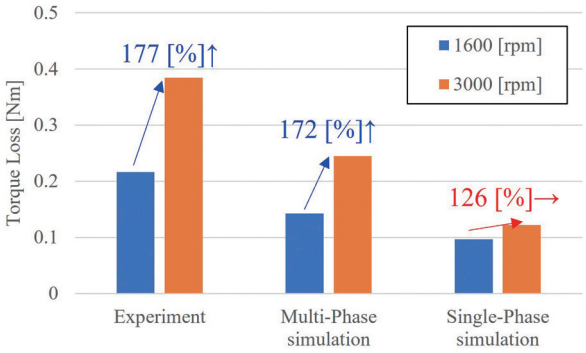


図 11 撹拌ロス回転数特性

(2)撹拌ロス絶対値精度向上

上記検証における気液二相流解析ではオイル粒子径1.2[mm]を選定することで、従来手法であるオイル単相流解析に対して撹拌ロス回転数特性の精度を向上できた。一方で、解析から得られた撹拌ロス絶対値は実機結果から乖離していたため、更なる精度向上を図った。

粒子法における解像度は粒子径に依存するが、一方で粒子径を細かくすると計算コストが膨大になり[5]、車両開発に適用することが困難となる。そこで、本稿では更なる予測精度向上と開発効率化の両立に向けて、高解像度にしたいギヤ近傍領域のみの粒子径を多段階で微細化するCPS(Continuous Particle Size)手法を検討した(図12)。この手法では、粒子径を可変させたい領域と粒子径の最小-最大値を設定すること

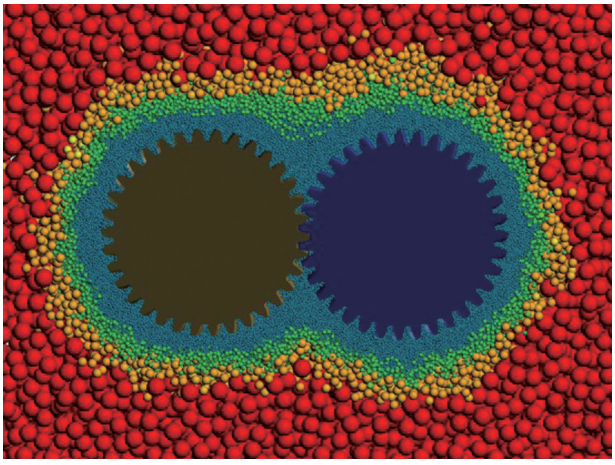


図 12 Continuous Particle Size 手法

で、その中間領域では粒子の挙動に応じて自動で粒子径が可変するため、解析の質を担保しながら発生する粒子数を抑えることができる[4]。したがって、これまで粒子法解析で使用してきた同一粒子径での計算や2段階で粒子径を可変させる計算手法に対して計算時間を大幅に抑制することが可能となる。

CPS手法を用いてギヤ近傍の粒子径を0.8[mm]まで微細化し、実測した撹拌ロス値と比較した（図13）。その結果、撹拌ロス値は粒子径1.2[mm]の単相流解析や気液二相流解析の結果から更に精度が向上し、実機と定量的によく一致することを確認できた。

本検証では、オイル挙動が大きく変化した単相流解析と気液二相流解析の手法違いに対して、粒子径を1.2[mm]から0.8[mm]に微細化したことによる撹拌ロス絶対値の変化代が大きい結果が得られた。これは、粒子径を微細化したことで歯溝に隙間なく粒子が入り込み、その結果、駆動ギヤ・被動ギヤの全ての歯面において粒子の接触する面積が増加したことで抵抗力が上昇し、より実機に近いトルクロス値を算出できたためと考察する。

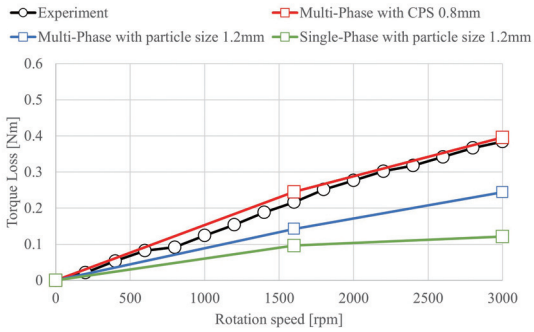


図13　撹拌ロス結果

4．BEVトランスアクスルへの適用

第3章で構築したオイル撹拌挙動予測技術をBEVトランスアクスルに適用し、トランスアクスル構造におけるオイル挙動の机上検証を行った。

4.1　3軸構造トランスアクスルへの適用

ヘリカルギヤ2対でモータ回転を減速させる3軸構造減速機に本手法を適用した。複雑な気液二相状態を検証するため、車速120 [km/h]条件における解析を行った。本解析にはCPS手法を適用し、粒子径は3.3.3節で最も高い精度が得られた0.8 [mm]を選定した。

解析から得られたオイル挙動を確認すると、ギヤ周りに発生する高速気流の影響を受け、オイルが気流に沿って噛み合い部に流入する挙動が得られた（図14）。

この気液二相現象により、従来手法であるオイル単相自由表面流解析結果に対して撹拌ロスが増加する結果が得られた（図15）。なお、図15における単相流解析結果は図9の単相流解析と同じ粒子法であるMPS（Moving Particle Semi-implicit）法を用いて算出したものである。

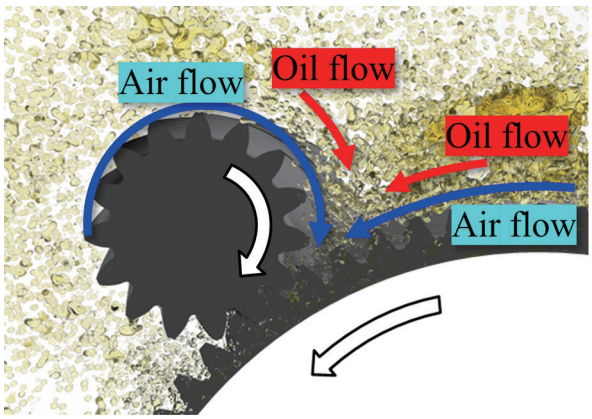


図14　3軸トランスアクスルオイル挙動

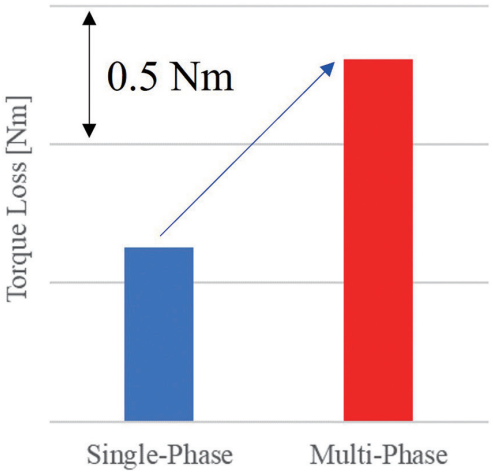
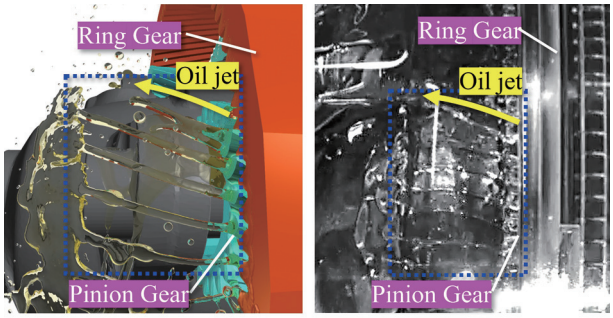


図15　3軸構造における単相流・二相流解析の比較

4.2　1軸構造トランスアクスルへの適用

ステップドピニオンを有する1軸構造減速機に対して本手法を適用した。1軸構造においては実機検証結果からリングギヤとピニオンギヤの噛み合い部からオイルが噴出する現象を確認していた。この現象に対して本稿で構築したCPS手法を用いて噛み合い部における粒子径を0.2[mm]まで微細化した結果、解析でも



(a)　解析結果　　(b) 実機検証結果

図16　1軸トランスアクスルオイル挙動

本現象を捉えることができた(図16)。本稿で構築した解析手法を用いることにより噛み合い部におけるミクロな潤滑現象も予測可能な精度に向上できた。

5．まとめ

本稿ではギヤ高回転領域においてギヤ周りに発生する気相を粒子として解く気液二相流解析手法を構築し、撹拌試験機を用いてその予測精度を検証した。得られた内容は以下の通りである。

1. ギヤ高回転領域において、気液二相流解析で得られたオイルかき上げ高さやオイル分布は実機と定性的に一致した。一方で、オイル単相流解析を用いて算出したオイル挙動は実機と大きく乖離した。これらの結果より、高回転歯車におけるオイル撹拌現象に対しては空気相を考慮する手法が解析精度向上に有効であることを明らかにした。
2. また、構築した気液二相流解析手法は実機の撹拌ロス回転数特性を捉えられる精度を有することを確認できた。さらに、多段階粒子径微細化手法CPSを用いてギヤ近傍の粒子径を0.8[mm]に微細化することで実機の撹拌ロス値と定量的に一致する精度に向上した。本手法により、従来の同一粒子経の計算手法に対して、計算時間を抑制しつつ実機の撹拌ロスを精度良く予測できる技術を構築できた。
3. 構築した技術をトランスアクスル開発に適用した。本手法を用いることにより、トランスアクスル内において高回転ギヤ周りに発生する気流がオイル挙動に影響する様子やギヤ噛み合い部からオイルが噴射するミクロな噛み合い潤滑現象を再現することが可能となった。

最後に、本技術開発にあたり技術支援をいただいたエイヴィエルジャパン株式会社様に深謝する。

参考文献

(1) 斎藤誠、河野正敏、宮原英和、宮武 健太：CVTフロントデフのオイル挙動解析とブリーザ性能向上、自動車技術会学術講演会予稿集(2016)、20166321
(2) 越塚誠一、柴田和也、室谷浩平：粒子法入門、2014(丸善出版)、p.1-13
(3) FIFTY2 Technology GmbH：Preon Solver Theory v6.1 (2022)、p.4-8
(4) FIFTY2 Technology GmbH：PreonLab 6.1.1 Manual (2024)、p.78-86
(5) Michael Reichl、Philipp Lenz、Alexander Oliva：Challenges and possibilities of virtual development of e-axle transmissions SPH-Simulation with PreonLab (2023)

【著　者】

粟田　裕介

ドライバビリティ官能評価における AI 活用の取組み

Efforts to Utilize AI for Drivability Sensory Evaluation

浅野貴文[*1] ASANO Takafumi
土屋康祐[*2] TSUCHIYA Kosuke
柏倉賢二[*2] KASHIWAKURA Kenji
川口拓真[*2] KAWAGUCHI Takuma
志村春樹[*2] SHIMURA Haruki
新　僚介[*2] ATARASHI Ryosuke
金子　隆[*1] KANEKO Takashi
金堀凌也[*1] KANAHORI Ryoya

抄　録

自動車のドライバビリティ性能の向上には、複雑な運転操作と車両挙動の組合せを、熟練者が経験と勘で網羅的に評価する必要がある。本研究では、膨大な試験工数を低減し知見を共有すべく、機械学習を用いた評価手法を開発した。更にエンジンベンチ試験で活用し、ECUデータから車両の加速度を予測する事で実車に頼らない評価を試みた。

Abstract

To enhance the drivability performance, the combination of complex driving operations and vehicle behavior needs to be evaluated with experiences and intuitions of expert drivers. In this study, we have developed evaluation methods using Machine Learning to reduce extensive testing efforts and to share the expertise. Furthermore, by utilizing the methods in engine bench tests and predicting the vehicle's acceleration from ECU data, we attempted evaluations independent of actual vehicles.

1. まえがき

当社ではお客様への提供価値のひとつである「安心と愉しさ」の追求を続けている。運転の愉しさに関わる重要な要素として、ドライバビリティ（ドライバの意図どおりの加速、定常、減速走行ができることの運転性評価）がある。この評価は豊富な経験と技量を有した熟練ドライバによって行われている[(1)]。

ドライバの官能評価を客観的に判断し数値化する取組み[(2)]や、実物のパワートレインと車両シミュレーションを用いて自動評価を行う取組み[(3)(4)]はされつつあるが、以下の課題があり未だ評価に多くの時間を要している。

その課題は、以下の①、②の2つあると考えている。

①車両開発の初期段階でドライバビリティの課題を抽出し、制御定数の最適化を早期に行いたいが、複雑で繊細な車両挙動を机上で再現することが難しく、実車に頼っている。

②ドライバの知見を共有し定数適合の負担を低減したいが、熟練ドライバの豊富な経験と勘による官能評価に頼っている。

本研究ではドライバビリティ性能のひとつであるアクセルTip-in（以下Tip-in）性能を題材に、課題①、②を解決した取組みを紹介する。また、第4章以降では、本システムを過渡EDM(エンジンダイナモメータ)および実車に適用した取組みを紹介する。

2. Tip-in性能評価試験データ

本研究では、ドライバビリティ性能の中でも、特に条件が複雑で制御適合に時間を要しているTip-in性能に着目した。

・Tip-out：アクセルON状態からOFFで発生する車両前後方向の車両挙動

＊1 技術開発部
＊2 車両環境開発部

・Tip-in：アクセルOFF状態からONで発生する車両前後方向の車両挙動(図1)

これらの評価は様々な運転パターンを評価するため、エンジン回転数、アクセル開度、ギヤ段などを組み合わせた数百単位の評価条件で行われる。本研究では、ガソリンCVT車両を用いて計測された、前後加速度，ECUデータ，評点データを学習データとして機械学習に適用した。前後加速度は車両フロントガラスに設置した加速度計を利用し、アナログ出力により車載の計測器で記録する。ECUはアクセル開度、スロットル開度、要求エンジントルクなどの58種類のラベルを含む時系列走行データを計測し、評点はドライバによる5段階の官能評点を記録した。官能評価の着眼点は、アクセル踏込に対する前後ショックおよび揺れ、レスポンス性となる。評点は、合格：4点，合格(下限)：3点，不合格：2点の範囲を0.5点刻みで記録した。

なお、本計測は株式会社SUBARUの倫理委員会から承認を得て実施している。

3. 機械学習を用いたTip-in性能の自動評価

3.1 アプローチ方針

前述した従来の官能評価における課題を整理すると、以下2つのアプローチが必要となる。

STEP1. 加速度予測(実車に頼らない仕組み)

EDM評価で計測したECUデータ(エンジンの時系列データ)を入力として、車両の前後加速度を予測する。これで実車を使わなくとも車両挙動の予測を可能にすることができた。

STEP2. 評点予測(人に頼らない仕組み)

予測された加速度を入力として、官能評点を予測する。これでドライバに依存しない評価を可能にすることができた。

上記2STEPで構成された自動評価システムを図2に示す。本研究では、特徴量の根拠によるモデルの可読性の観点からDeep Learningではなく、決定木ベースの機械学習手法を採用した。

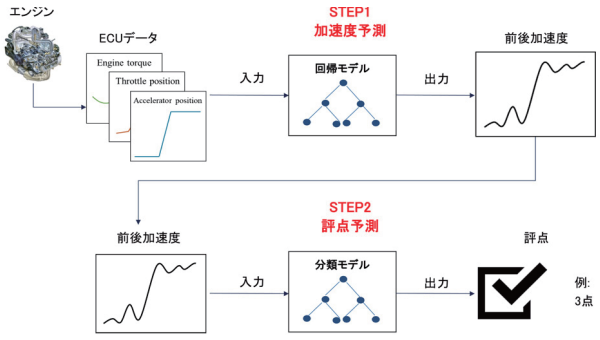


図2 自動評価システム(2STEP)

3.2 STEP1 加速度予測

3.2.1 LightGBM

LightGBM(Light Gradient Boosting Machine)は、アンサンブル学習アルゴリズムの一種である。アンサンブル学習とは、同じデータから作成した各学習モデルの結果を統合して評価し、未学習のデータに対する予測精度(汎化性能)を向上させる学習手法である[5]。LightGBMは決定木アルゴリズムに基づいた勾配ブースティングのフレームワークであり、全量データから数個のデータを抽出し、逐次的に学習モデルを作成する。前のモデルの誤りを次の学習器が修正することで、重みを逐次調整し、予測精度を向上させる(図3)。STEP1の時系列回帰において、LightGBMの性能が適していると考えたため、本手法を採用した。

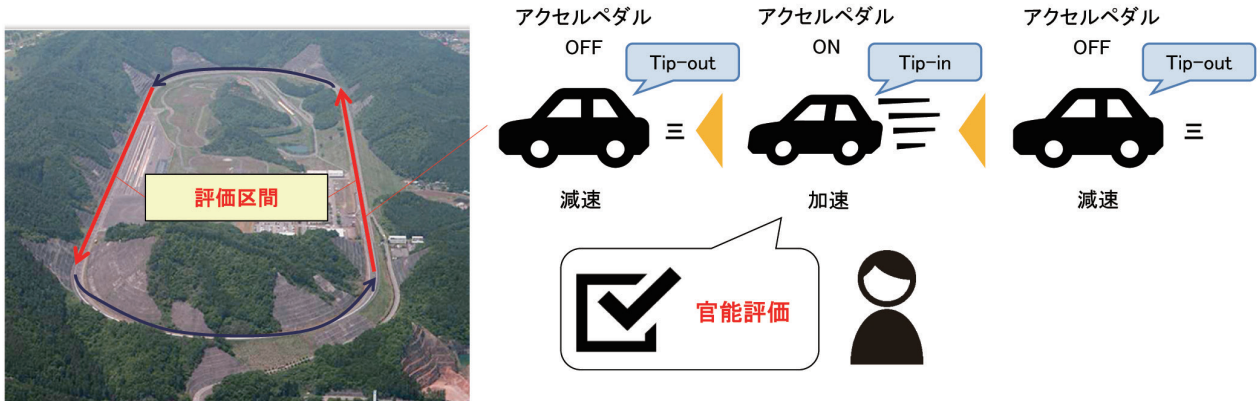


図1 Tip-in 性能評価の試験概要

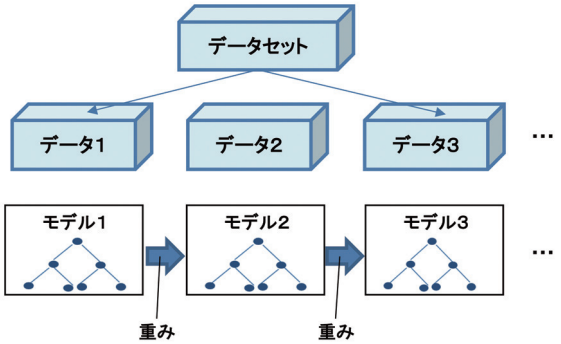


図3　LightGBM のイメージ

3.2.2　特徴量設計

学習データとして、入力となる58種類のエンジンの時系列データと、目的変数となる前後加速度から、特徴量を作成した。各データに対して、複数の移動窓ごとの統計量（平均値・最大値・最小値など）から特徴量を作成し、時間単位で回帰モデルにより加速度を逐次予測する。予測の例を図4に示す。ラベル1、2、･･･、58それぞれのt=1、2、3、t=4、5、6、t=7、8、9の3つの移動窓の統計量を算出する。算出したラベル1、2、･･･、58の移動窓の特徴量を入力（説明変数）として、LightGBMにより、t=10の加速度（目的変数）を予測した。

またロバスト性と汎化性能を向上させるため、評価条件に従い36種類のデータセットを作成し、更に5つグループに分類することで、K分割交差検証法（K=5）による学習を行った。

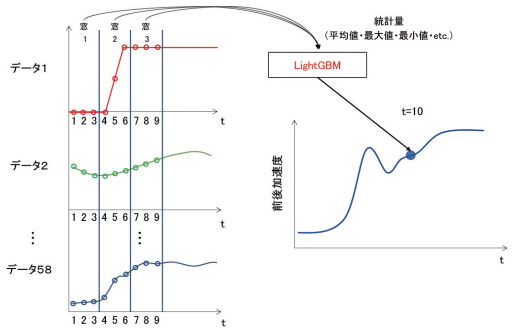


図4　加速度予測の特徴量設計

3.2.3　学習器の評価

図5に評点ごとの加速度予測器の結果を示す。なお、CVTは連続可変機構であるが、Tip-in性能においては、仮想固定ギヤ段ごとに加速度の特徴量の形状が異なることから、各ギヤ段で評価および適合を行っている。そこで、本研究では、それぞれに対して独立の学習を行い、図5はMレンジ3速の結果である。

実車加速度と予測値を比較した結果、決定係数R2の値は0.99であり、一般的なモデル性能評価指標のひとつであるMAE（Mean Absolute Error）の値は、0.06であった。更に、学習済みの加速度予測器は、丸点線の部分のような、官能評価において熟練ドライバの評価に大きく寄与する、ショックの振幅の特徴量も表現できていることが確認できた。

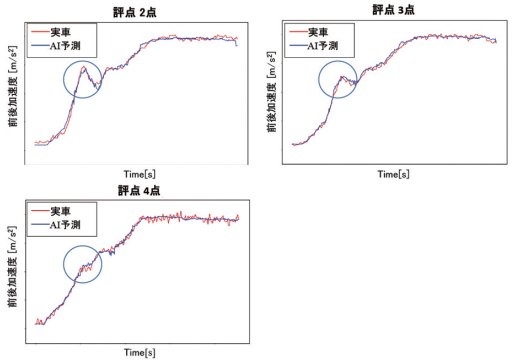


図5　加速度予測の結果

一方で、特徴量設計の段階で、加速度上昇時の振幅について、十分に精度が出ない場合があった。この場合、移動窓あたりの統計量に微分値を追加し再学習を行った。その結果、予測器の性能が向上した例を図6に示す。

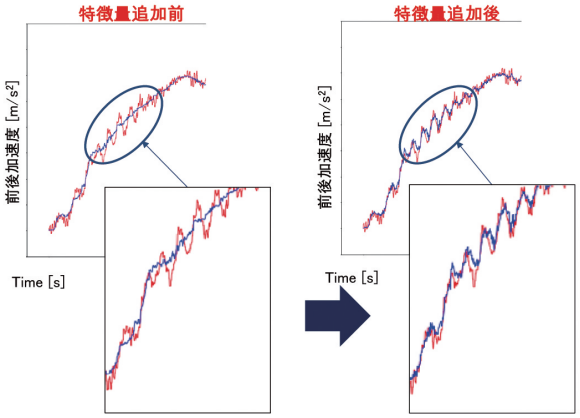


図6　特徴量追加による性能向上

3.3　STEP2　評点予測

3.3.1　ランダムフォレスト

予測された加速度から官能評点を予測する分類器として、同じくアンサンブル学習アルゴリズムの一種であるランダムフォレストを利用した（図7）。レコードや特徴量をサンプリングして抽出し、サンプルごとに並列で決定木を作成する。これらをアンサンブルすることにより高い汎化性能を持った予測が行える[6]。また、特徴量の重要度を可視化することで、モデルがどの特徴量を重視しているかを直感的に表現することができる。この性能を利用し分類器の予測の根拠・重みづけを見える化することで、信頼性向上や改善点の検討が可能になるモデルを構築した。

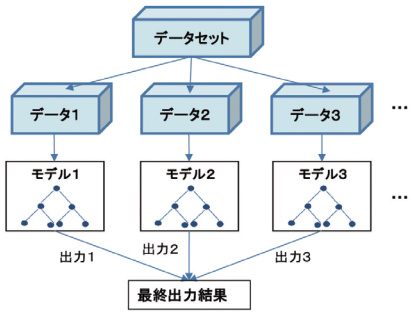


図7　ランダムフォレストのイメージ

3.3.2　特徴量設計

STEP1同様に、特徴量設計を行い分類器の学習を行った。加速度予測器による出力から、普段ドライバが注目している特徴量を抽出し、その特徴量とドライバの官能評点を正解ラベルとした学習データを作成した。ひとつの加速度波形から14種類の特徴量を抽出した。これらは、全体の統計量、移動窓単位の統計量、ドライバビリティ要素の大きく3つに分類される。まず全体の統計量は、加速度全域から平均値、最大値などを算出した。次に、加速度を時間軸で5つの窓に分割し、窓ごとに平均値、最大値などの統計量を算出した。最後に、入力された加速度に対し、極値を算出し、それぞれの組み合わせによって、加速度振幅，加加速度(以下ジャーク)などの特徴量を抽出した(図8)。

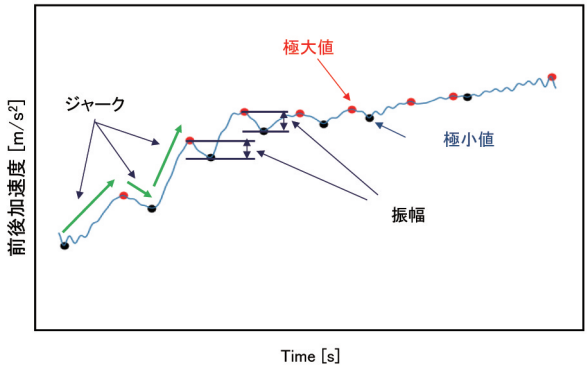


図8　評点予測の特徴量設計

3.3.3　学習器の評価

表1に学習結果を示す。なお、STEP2は分類モデルであることから混合行列で整理した。行は正解ラベルを表し、列は予測されたラベル、数値は割合を表す。予測された評点と、学習データであるドライバ評点を比較し、正答率を算出した。正答率は、予測値と正解値のTrue Positive(TP)、False Positive(FP)、False Negative(FN)、True Negative(TN)によって式(1)から求められる。正答率の値は0.83であり、予測値と正解値が異なる場合の割合が低いことから、官能評点の予測器として十分な精度が確認できた。

$$\frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

TP: True Positive
FP: False Positive
FN: False Negative
TN: True Negative

表1　評点予測の結果(混合行列)

		予測 評点		
		2	3	4
正解 評点	2	0.92	0.08	0.00
	3	0.17	0.73	0.10
	4	0.00	0.25	0.75

更に、ランダムフォレストの特徴量重要度の上位を図9に示す。この結果から、ジャークおよびショックを表す振幅が評点予測に大きく寄与していることがわかった。分類器はドライバビリティ要素を重要視し、熟練ドライバと同等の認識能力を持つことができたと推測できる。

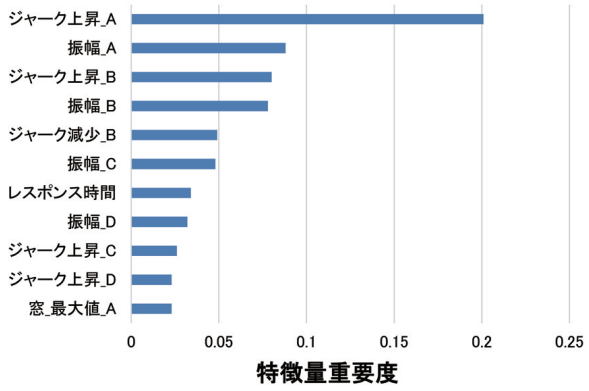


図9　評点予測の特徴量重要度

4.　ドライバビリティ性能開発における適用事例

4.1　過渡EDMによるTip-in性能評価

本システムを水平対向2.5L直噴NAエンジンの開発に適用し、実車完成前にドライバビリティ性能評価と制御定数検討を行った取組みを紹介する。

過渡EDMとは、低慣性かつ高周波応答性のあるダイナモメータを用いることで、車両同等の過渡条件でのエンジン運転が可能な試験機である。

本研究では、実車試験により計測したエンジンの時系列データから、エンジン回転数，アクセル開度プロフィールを過渡EDMに入力することで、実車によるTip-in性能の評価を台上で模擬して試験を実施した。図10に台上評価環境を示す。

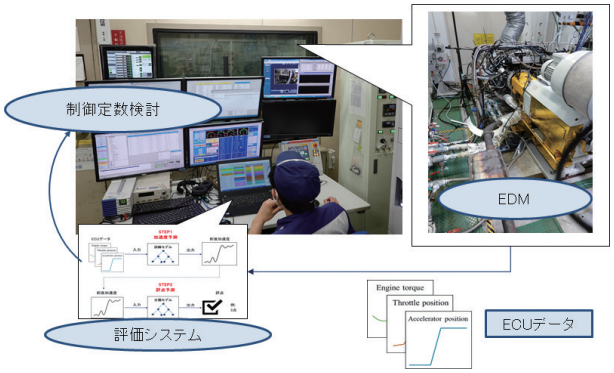


図１０　EDMによる台上評価環境

ここで、エンジン回転数を入力値として試験を行う場合、ECU制御定数の変更に伴うエンジン状態の変化による車両挙動を再現できない課題が生じた。そのため、EDMに入力するエンジン回転数は一定とし、性能評価を実施した。その結果、STEP1の加速度予測にて、評価で重要となる振幅、ジャークが再現できない場合が生じたため、予測値のトレンド成分から振幅を補正する後処理モデルを開発した。これにより、図9のシステムでも十分な加速度、評点予測を可能にした。

4.2　台上評価の結果

表2にエンジン制御定数A、BによるEDMでのTip-in性能評価の結果を示す。表の左2列は評価条件で、エンジン回転数，アクセル開度を示す。右列はMレンジ3速における評点予測値を示す。定数Aは2、2.5点のような低い評点が見られた一方で、定数Bでは3.5、4点のように改善された。

図11に、制御定数A、Bによる加速度予測値の比較を示す。評点2点の定数Aは、評点4点の定数Bに比べ、加速度のジャークが大きいことがわかった。EDMにおける加速度予測値からTip-in性能に影響する特徴量を抽出し、熟練ドライバ同等の評価ができていると推測する。実車とドライバの試験に依存していたTip-in性能評価を、LightGBMによる加速度予測とランダムフォレストによる評点予測によってEDMで可能にする手法を確立することができた。

表２　評点予測の結果（定数A v/s B）

制御定数 A v/s B			
エンジン回転数 rpm	アクセル開度 %	定数A 評点 点	定数B 評点 点
1100	0-25	3.5	3.5
	0-50	3.5	3.5
	0-100	2.5	3.5
1400	0-25	3.5	3.5
	0-50	3.5	4
	0-100	2	4
1600	0-25	3.5	3.5
	0-50	2	3.5
	0-100	3.5	3.5
2000	0-25	3	3.5
	0-50	3.5	3.5
	0-100	2	4
…	…	…	…

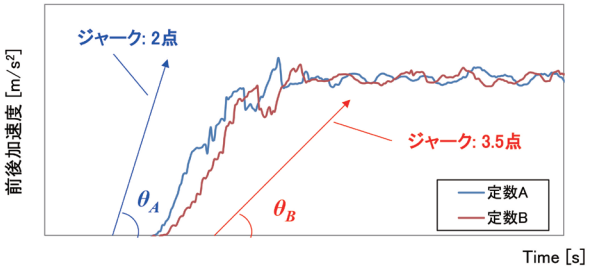


図１１　加速度予測の結果（定数A v/s B）

4.3　実車評価との比較

図12に、実車を用いて前後加速度を計測し、LightGBMによる加速度予測との比較を行った結果を示す。LightGBMによる加速度は、実車加速度の傾向を捉えており、図9、図11の結果から重要度の高い特徴量と判断できた加速度上昇時におけるジャークも同様な推移が予測できたと推測できる。

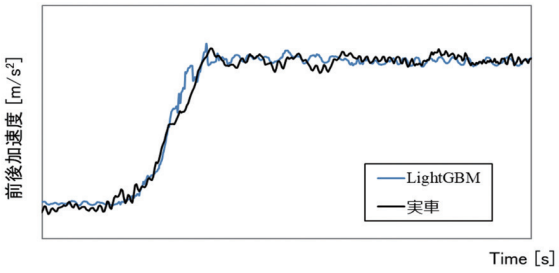


図１２　実車とLightGBMの加速度比較結果

4.4　実車における適用事例

ここからは最終的なドライバビリティ性能判断を行う実車評価に焦点を移し、STEP2の評点予測のみ用いて、ドライバに即座に評点をフィードバックするシステムを搭載した取組みを紹介する。

前述した性能評価のフロントローディングを行っても、最終的なドライバビリティ性能の良否判定は、熟練ドライバの経験と技量によって行われる。市場のドライバによる如何なる操作にも対応するには、複雑で網羅的な評価が必要となり、以下の課題がある。

① 実走評価では、膨大な時間がかかり評価のやり直しが懸念。

② ノウハウの伝承が困難で、評価能力は経験値に頼っている。

そこで、実車評価におけるデータ計測用端末に、ランダムフォレストによる評点予測機能を搭載し、ドライバの操作を自動で検出し、リアルタイムで評点を確認するシステムを開発した(図13)。

システム導入により、ドライバ自身の評点と、蓄積されたデータから評点を照らし合わせて判断することができ、熟練者であっても間違えてしまうことよる、やり直しの低減が期待できる(課題①に該当)。さらに、経験と技量が異なる複数人のドライバを招集し、走行テストを実施した。自身の評点が過去のドライバビリティ知見に対して、どの辺りに位置するのかレベリングが期待できる(課題②に該当)。

図１３　リアルタイム評点予測システム

また、図14に蓄積された走行データをクラスタ分析し、走りの特徴量に対する評点の傾向を可視化した結果を示す。縦軸は正のジャーク、横軸は振幅を示す。各点は類似する加速度のクラスタを示し、赤、青、黒点の順に評点4点、3点、2点を示す。評点4点は、ショック(振幅)を感じさせない滑らかな加速感で、振幅が大きくなりショックを感じやすくなるほど、ドライバは評点が悪くなる傾向が見られた。このショックと評点の関係性から数ある特徴量の中でも、特にスムーズな加速感を重視して評価している傾向が把握できた。これらの知見は、ドライビングモードの切替によるドライバ要求トルクのチューニングなどにフィードバックされ、運転による走りの愉しさの味付けに活用したい。

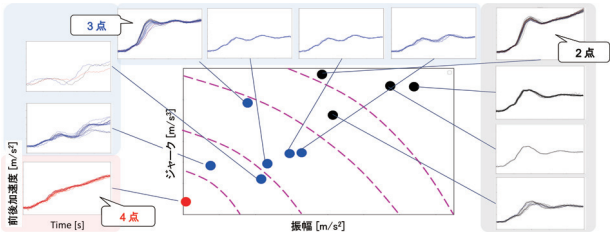


図１４　ドライバ評点傾向の可視化

5. まとめ

ドライバビリティ性能の評価には、実車と熟練ドライバの豊富な経験と勘による官能評価が必要という課題があり、ドライバビリティ性能のひとつであるTip-in性能を題材に、加速度予測，評点予測による2STEPの新評価システムを開発した。加速度予測にはLightGBM、評点予測にはランダムフォレストを採用し、その有用性を確認した。本手法を水平対向2.5L直噴NAエンジンの制御定数検討に適用する事で、実車完成前にTip-in性能評価を確認でき、制御定数適合を可能にする手法を確立できた。さらに、実車への評点予測機能の搭載により、ドライバの評価やり直しを低減し、走りの味付けとなる知見を可視化できた。

参考文献

(1) 浅野　貴文ほか：機械学習を用いたドライバビリティ官能評価の開発と知見の定量化、自動車技術会2024年春季大会、学術講演会　講演予稿集、20245296(2024)

(2) エイヴィエルジャパン株式会社：多様化するパワートレイン開発を支援する開発環境および開発手法に関して，計測と制御，第53巻 第8号，p. 735-738(2014)

(3) 田島尚史ほか：機械学習を用いた車両ドライバビリティ性能の自動評価法，日本機械学会論文集，Vol.88 No.915，p. 22-00219(2022)

(4) 岡島 儀尚ほか：自動車用エンジン開発におけるモデルベース適合の活用事例，Suzuki Technical Review，p.36-41(2018)

(5) 李 天琦ほか：LightGBMを用いた不動産投資における高精度価格推定モデルの構築，人工知能学会全国大会論文集，第34回，3Rin4-49(2020)

(6) 門脇 大輔ほか：Kaggleで勝つデータ分析の技術，p.238-239,260(2019)

【著　者】

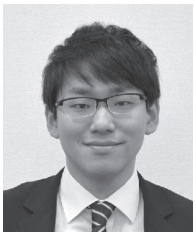
浅野　貴文

土屋　康祐

柏倉　賢二

川口　拓真

志村　春樹


新　　僚介

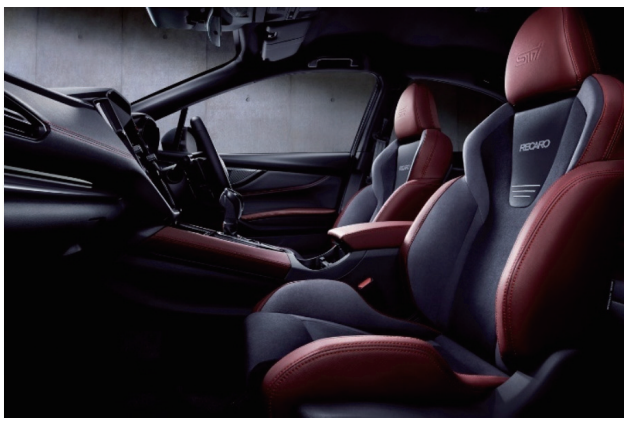
金子　　隆

金堀　凌也

SUBARU「WRX S4」改良モデルを発表

2023年10月25日

今回の改良では、ステレオカメラに加えて広角単眼カメラを搭載した新世代アイサイトを装備しました。また、デジタルマルチビューモニター機能に４つのカメラから取り込んだ映像を合成して車両周囲360°映し出す3Dビュー表示や、車速15km/h未満時に自動でフロントビューとトップビューを表示するAUTOモードを加え、死角を減らすことで安全性能を高めました。 さらに、「STI Sport R EX」に大型リヤスポイラーをメーカー装着オプションとして新たに設定。



WRX S4「STI Sport R EX」

モデルベースによるパワートレイン制御適合手法の構築

Development of Powertrain Control Calibration Method Using Model Base

久保宏幸[*1] KUBO Hiroyuki
荒井駿弥[*2] ARAI Shunya
有元健眞[*3] ARIMOTO Kenshin
岸優介[*3] KISHI Yusuke
杉浦朋亮[*3] SUGIURA Tomoaki

抄　録

近年の自動車ビジネスは急速に変化するマーケット動向に合わせタイムリーな商品開発が求められている。そのため多様なパワートレイン(ICE,HEV,PHEV,BEV) を同時並行で開発する必要がある。本研究ではPTTB (パワートレインテストベンチ) とMBC (Model Based Calibration) を活用し、パワートレイン一体 (エンジン+トランスミッション) での制御適合の技術構築に取り組み、短期間且つ高品質な開発を実現した。本報では技術構築内容と従来手法との結果比較を報告する。

Abstract

In the recent automotive business, timely product development in response to rapidly changing market trends is required. To meet this demand, various powertrains (ICE, HEV, PHEV, and BEV) need to be developed in parallel.

In this study, we have developed a technology for control calibration of the entire powertrain (Engine and Transmission) using PTTB (Power Train Test Bench) and MBC (Model Based Calibration) and achieved high quality development in a short period of time.

This paper introduces the technical development and comparison of the results with conventional methods.

1．まえがき

パワートレイン制御はマーケットごとの要望や法規に適合させるため、ロジックが複雑化しバリエーションも増している。この状況において制御パラメータに対する適合(Calibration) 開発を短期間且つ高品質で完了させることが喫緊の課題である。特にパワートレインシステム全体で連携し性能開発する領域では、関連する制御パラメータが多く最適解を導くための難易度が高い。また、テストドライバの官能評価に依存した制御適合をテストコースにて行っているため評価に時間を要し多くのリソースが費やされている (図1) 。これらの問題解決のためには、品質を維持した状態で人的リソースに依存した開発から脱却を行うことが必要であり、従来とは異なる新たな制御適合開発手法の技術構築に取り組んだ。

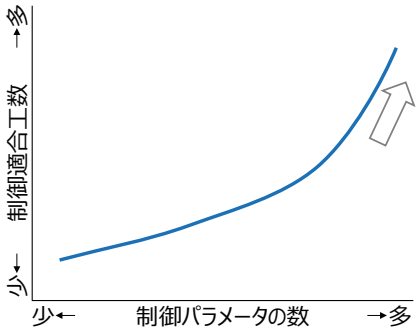


図１　適合工数

2．実車を用いたMBC

問題解決のアプローチとして、エンジン単体の適合開発で既に個々のユニットでは適用していたMBCをパワートレインシステム全体の適合開発に適用するこ

＊1 車両開発統括部
＊2 車両運動開発部
＊3 車両環境開発部

とを検討した。MBCは適合対象を物理モデルか統計モデルで表して最適値を探索する手法であるが、ドライバビリティ制御適合が可能なパワートレインの物理モデルを作成することは膨大な工数が必要で効果的に短期間で適合の最適解を見出すために、本研究では実験データを基にした統計モデルによるMBCを実施した。

統計モデルによるMBC適用を実現するためには、実車状態で大量のデータを安定的に計測する必要があり、台上試験設備の1つであるPTTBを活用して自動計測システムを構築した。また、台上試験化により官能評価はできないため、計測データから定量評価を行えるよう適合指標の数値化を行うと共に、大量の計測データを処理するためのソフトウェア開発も実施した。システム全体を図2に示す

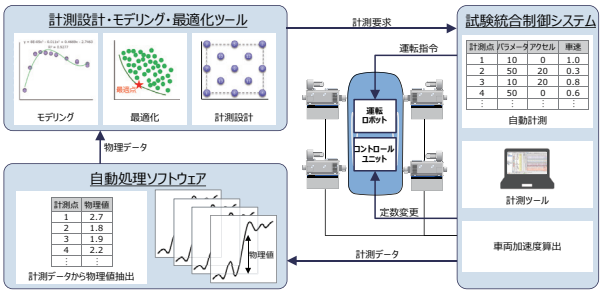


図２　システム図

2.1　PTTBシステム

（1）システム概要

本研究の試験台上化においては、図3に示すPTTBを使用した。PTTBとは車両側の車軸とダイナモを直結した台上試験機である。

本試験機は、車両の車軸とダイナモを直結して運転するため、4輪軸トルクを計測することが可能である。また、車軸のみが回転しタイヤは回転しないため、タイヤグリップの影響を無視できる。

図３　PTTB

（2）MBC実現に対する技術要素

図4にPTTBシステム図を示す。

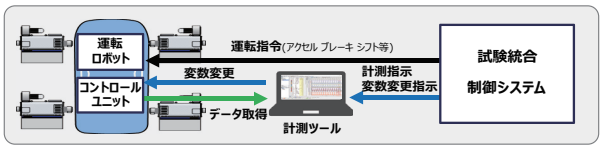


図４　PTTBシステム図

MBCでは複数の要因の組み合わせで計測点を決定する必要があり計測点が数百点に上る。そこで本システムではロボットによる自動運転と自動定数変更機能を用い大量の計測データを取得できるようにした。

2.2　適合指標の定量化

従来のドライバビリティ適合では適合者の官能評価によって評点を付け、良し悪しを判断していた。本研究においては適合の試験台上化に取り組むにあたり適合指標の物理値による定量化に取り組んだ。

定量化を実施するにあたり官能評点が良いものから悪いものまで複数の仕様をテストコースで乗り比べ、熟練者の評価コメントをもとに官能評点に相関の高い物理値を調査した。一例としてトルクコンバータのロックアップ締結制御の評価要素をグラフに示す（図5）。

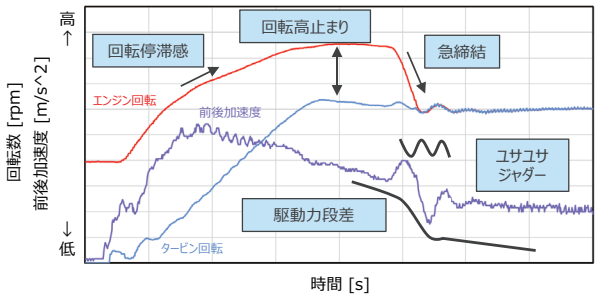


図５　評価要素（ロックアップ制御）

ロックアップにおいては、従来エンジン回転挙動として捉えていた現象がロックアップ完了までの時間で表現できること、また締結時間はアクセル開度によってドライバが期待する適値が存在することが分かった（図6）。

以上の様に、これまで官能評点で適合していた評価要素を物理値に置き換え、MBCを実現した。

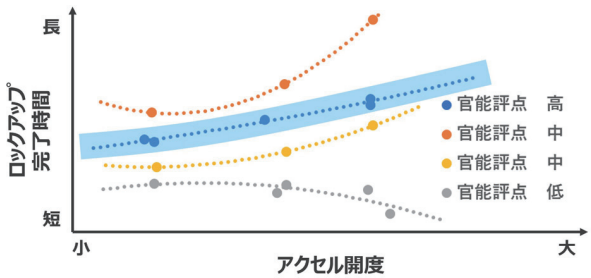


図６　官能評点 - 物理値関係図（ロックアップ制御）

3．計測条件

3.1　適用事例

エンジンとトランスミッションが協調して動作するコースト状態からアクセル踏み込み時のドライバビリティ適合を対象に、MBCを用いた制御パラメータ探索手法と経験的かつOFAT(One-factor-at-a-time)等の従来手法と適合結果の比較を実施した。アクセルONによってドライバの加速要求に対し加速度の収束時間および、ヘジテーション(引き込み量と表現)が最小となる制御パラメータを探索しドライバビリティ要件の最適化を目指した。比較方法に関して下記2点および図7の官能性能の要件を最適化指標として要件定義を設定し、MBC手法および従来手法との比較により効果検証を行った。

1.アクセル踏み込みから前後加速度の収束時間
2.前後加速度の引き込み量

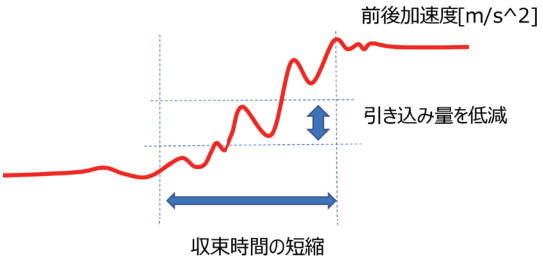


図７　最適な加速度プロフィールの要件定義

3.2　計測点数およびDoEについて

計測点数は各要因の組み合わせによって決定し、Design-of-Experiment(以下、DoE)に基づき変数パラメータの組み合わせを作成する。本研究では、DoE計測結果を用いてモデリングを行い、エンジンおよびトランスミッションの各種制御におけるパラメータの組み合わせによる官能性能のモデル化を行った。表1に試験条件一覧を示す。制御パラメータは、ファイヤリング状態へ復帰する際の要求軸トルクに対する目標点火時期への徐変係数、トランスミッション変速比の変化量の徐変係数および時定数を採用し各パラメータ値を探索した。

表１　試験条件一覧

エンジン仕様	直噴2.5ℓ水平対向
トランスミッション仕様	リニアトロニックCVT
制御パラメータ数	3点
DoE計測点数	65点（S-OptimalDesign）
最適化対象	①アクセル踏み込みから前後加速度の収束時間 ②前後加速度の引き込み量

4．結果

4.1　DoEとモデリング結果

図8にDoEに基づく多点計測結果の一部を示す。一般的に複数の最適化対象が存在する場合、最適化の組み合わせは、一義的に定まらないことが多く、特定のトレードオフの解を選択する必要がある。この解において最適となるトレードオフの曲線をパレートフロントといい、これにより図7で定義した官能性能の背反が見えるようになっている。従来手法では可視化が困難であった複数の性能に対して、2変数以上の相互作用の結果を容易に可視化が可能となり、より品質の高い性能を実現できるようになった。

4.2　従来手法およびMBC適用後の比較

図8に収束時間および引き込み量における改善量も示す。4.1に示したDoE結果より、アクセル踏み込み時の応答性および引き込み量は背反性能である。応答性向上に伴いよりトルクの立ちあがりが急峻傾向となる。そのため、過渡制御状態となり車両挙動に著しく乱れを与え、ヘジテーションやショックに繋がる。MBC適用により収束時間に関しては、アクセル踏み込み時から前後加速度が収束するまでの時間が従来比約100msの短縮を実現し、ドライバの加速要求に対する応答性を向上させた。また、引き込み量は従来比約33%改善されている。次に図9に前後加速度波形およびバンドパスフィルタ(以下、BP)処理を施した加速度波形を示す。A-A’間が本研究で提示した引き込み量に該当する箇所である。BP処理した波形を比較するとMBC適用時では従来比で前後加速度の抑制が確認できる。

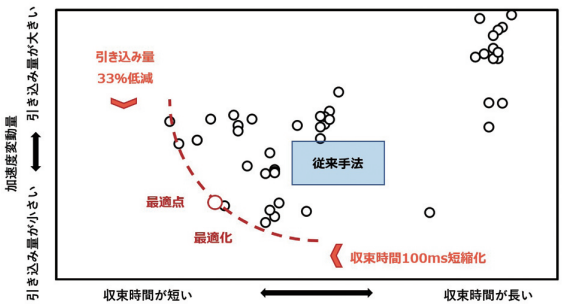


図８ DoE計測結果および各改善量

ベテランの経験値に基づいて適合を進めてきた従来手法に対し、本手法を適用することで適合手法の刷新が示唆された。ドライバビリティ制御適合において、商品性に直結する官能性能を物理化することで“味付け”の定量化ができ、人に依存しない開発が可能となった。

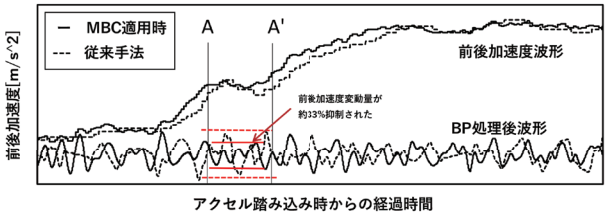


図９ 前後加速度波形および BP 処理後の加速度波形

５．まとめ

本研究ではPTTBとMBCを活用し、パワートレイン一体 (エンジン＋トランスミッション) での制御適合を行うことにより、従来手法に比べ短期間且つ高品質な開発を実現した。引き続きエンジニアの感性を定量値に落とし込み、また対象制御もパワートレインだけでなくボディ系制御など領域を拡大し、クルマ1台で短期間且つ高品質な開発を目指していく。

参考文献

(1)　湯村洋典：スバルのパワーユニット開発を支えるMBDの紹介、スバル技報、No.43、2016、p.52

【著　者】

久保　宏幸

荒井　駿弥

有元　健眞

岸　　優介

杉浦　朋亮

SUBARU フォレスター 特別仕様車「X-EDITION」を発表
～アウトドアへの一歩を後押しするモデル～

2023年10月25日

「X-EDITION」は、「Touring」に人気の高いアクセスキー対応運転席シートポジションメモリー機能や後席左右のシートヒーターなどに加え、撥水ファブリック/合成皮革シートや撥水カーゴフロアボードなど、普段使いでも、アウトドアシーンでも使い勝手の良いアイテムを標準装備しました。

フォレスター 特別仕様車「X-EDITION」

振動エネルギー伝搬分析に基づく車体骨格特性の要件化

A Method for Design Requirement Definition of Vehicle Body Frame Characteristics Based on Vibrational Energy Propagation Analysis

阿　部　啓　介[*1]　ABE Keisuke
田　中　勇之介[*1]　TANAKA Yunosuke
山　崎　　徹[*2]　YAMAZAKI Toru

抄　録

広帯域の騒音低減に向け、車体からパネルへの振動エネルギー伝搬の分析技術および車体骨格の設計要件化の手法を開発した。

まず、瞬時振動インテンシティ解析により系全体の振動エネルギー伝搬経路を可視化し、入力直後の第一波に着目した分析が広帯域の騒音低減に有効であることを示した。また、エネルギー伝搬経路として重要な部位である骨格間結合部に着目し、伝搬量を定量化できるインピーダンス評価モデルを開発した。これにより、結合剛性比をパラメータとした際の伝達インピーダンスの変化を指標にエネルギー流れのコントロールを可能とし、パネル振動の低減可能性を示した。

Abstract

To reduce noise in a wide bandwidth, a technique for analyzing vibrational energy propagation and a method for design requirement definition of vehicle body frame were developed. First, the propagation paths of the system were visualized by instantaneous structural intensity analysis, which was effective for wideband noise reduction. Additionally, an impedance evaluation model was developed to quantify the amount of propagated energy by focusing on the T-junction of frame. This model enables the control of energy flow by using changes in transfer impedance as an indicator when the coupling stiffness ratio is used as a parameter and demonstrates a potential to reduce panel vibration.

1．はじめに

車両の電動化が加速する時代変革期においても、クルマの静粛性はSUBARUが大切とする重要な商品価値の一つである。電動車走行時に乗員が顕著に感じ取り易い騒音の代表例には、ロードノイズやモータ音が挙げられ、これら現象は約100 ～ 10kHzと広帯域にわたる特徴をもつ。

著者らは、広帯域の固体伝搬音を効率よく低減させる技術として、振動エネルギー伝搬に基づいた分析体系および設計技術の確立を目指している。固体伝搬音は、車体パネルの振動がキャビンへ音響放射することに起因するため、起振源により発生する“振動エネルギー流れを視る”、そして“流れをコントロールする”ことにより、発音体へ“エネルギーを伝えない(逃がす)”、ことを研究のコンセプトに置く。先行研究では、第一波により生ずる振動エネルギー伝搬のシミュレーション可視化技術を開発[(1)]し、振動エネルギーをパネルに伝えない制御が広帯域のパネル振動および車室内音の低減に有効であることを、車体モデルを用いた数値検証により示した[(2)(3)]。更に、モノコックボディを想定した場合、どのパネルへ振動エネルギーを伝搬させやすいかを分析[(4)]し、骨格パネル間の点結合部(スポット溶接部)における伝搬の定量化手法[(5)]を明らかにした。一方で、この概念に基づく車体の設計要件定義の手法については検討されていない。エネルギーを“流したい方へ流す”“流したくない方向へ流さない”ことを意図した車体骨格の設計パラメータを抽出できれば、静粛化の方針策定が可能となる。

＊1 車両環境開発部
＊2 神奈川大学

本研究ではエネルギー伝搬視点での設計要件化手法の構築を目的に、簡易構造の有限要素モデルを対象に以下の一連の要素技術を検討し、骨格特性の要件化を行った。(A) 振動インテンシティ解析により進行波のエネルギー流れを流線で明らかにする。次に、(B) 骨格間結合部のエネルギー伝搬の定量化を可能とするため、伝達インピーダンスを用いた解析手法を構築する。そのうえで、(C) 結合諸元のパラメータスタディにより骨格結合特性とパネル振動の相関を確認し、エネルギー伝搬視点に基づくパネル振動低減実現性を示すと共に、設計要件化手法の可能性を示す。

2. 検討内容

中周波帯におけるボディ振動の特徴としては「低周波で生ずる骨格の曲げ、ねじり変形に加え、断面変形が生ずるため、振動形態が複雑である」、「薄板プレス成型であるパネルはモード波長が短く、モード密度も高い」などが挙げられる。これらを踏まえ、エネルギー伝搬の視点で検討内容を定めた。以下に詳細に示す。

2.1　対象構造物

一般に発音寄与が高いとされる車体のフロア構造を模擬し、鋼製の骨格とパネルで構成される簡易構造体を用いる（図1左）。骨格パネル間はスポット溶接による接合である。

2.2　解析条件

入力位置は実現象を模擬し、図心からずれた位置かつ、複数方向の入力が励起されるよう y-z 平面に対し30度方向の加振とした（図1右）。波源は、ブロードバンドの周波数域をカバーするガウシアンパルスとし、評価応答にはパネル部の等価放射パワー（Equivalent Radiated Power; ERP）として次式を用いる。

$$\mathrm{ERP} = \frac{1}{2}\rho c \sum_{i=1}^{N} \left|v_{N,i}\right|^2 \Delta S_i \qquad (1)$$

ここで、ρ は空気密度、c は音速、$v_{N,i}$ はパネルを構成する N 要素のうち要素番号 i の法線方向の振動速度、ΔS_i は要素面積である。ERPは音響放射係数を正規化した指標であるため、パネルの固有モードに応じた音響放射効率の変化が未考慮であるが、パネル振動が車内音に寄与するという考えのもと近似的に車内音を評価する指標として用いる。

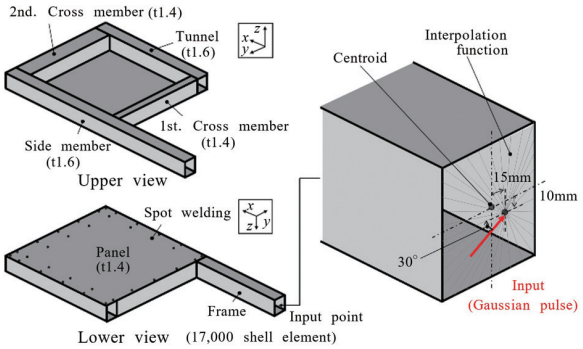


図 1　簡易構造物、入力位置の概要

3. 伝搬初期の進行波流れの可視化

3.1　瞬時振動インテンシティ

伝搬初期の振動エネルギー流れを明らかにするために、瞬時振動インテンシティ解析を行った。要素 i の時刻 t における瞬時振動インテンシティ $I_i(t)$ は、

$$I_i(t) = -\sigma_{ij}(t)v_j(t), \qquad \text{for } i,j = 1,2,3 \qquad (2)$$

であり、単位時間に構造物の単位幅あたりを通過する振動エネルギーとして、応力テンソル $\sigma_{ij}(t)$ と振動速度 $v_j(t)$ の積で定義される[6]。x-y 平面のシェルの振動インテンシティ $I_x^{shell}(t)$、$I_y^{shell}(t)$ は以下のように与えられる。本稿では、面内波と面外波による振動インテンシティの和として考える。

$$I_x^{shell}(t) = -\left(N_{xx}\dot{u}_x + N_{xy}\dot{u}_y + Q_{xz}\dot{u}_z + M_{xx}\dot{\theta}_y - M_{xy}\dot{\theta}_x\right)$$
$$I_y^{shell}(t) = -\left(N_{yy}\dot{u}_y + N_{yx}\dot{u}_x + Q_{yz}\dot{u}_z - M_{yy}\dot{\theta}_x + M_{yx}\dot{\theta}_y\right) \qquad (3)$$

ここで、N_{xx}、N_{yy}、N_{xy}=N_{yx} は単位幅あたりの面内力、M_{xx}、M_{yy}、M_{xy}=M_{yx} は単位幅あたりの曲げモーメントおよびねじりモーメント、Q_{xz}、Q_{yz} は単位幅あたりのせん断力、u_x、u_y、u_z は並進変位、θ_x、θ_y、θ_z は回転変位を表す。以降では、本解析から得られる結果を瞬時解とも称す。

3.2　進行波のエネルギー流れの評価

任意に選定した3ラインの周波数における瞬時解を解析する。解析にはその周波数を中心周波数とするガウシアンパルス入力での直接過渡応答解析とし、そこから得られる要素力と振動速度から演算する。図2に解析結果を示す。入力を与えた直後の初期伝搬時刻（$t = 4.2 \times 10^{-4}$ s）における振動エネルギーを示しており、振動インテンシティベクトルを基に流線で表示したものである。

周波数と伝搬速度は比例関係にあるため、振動エネルギーは周波数が高いほど進行が早いことが確認されるが、いずれの周波数でも、Side member先端にお

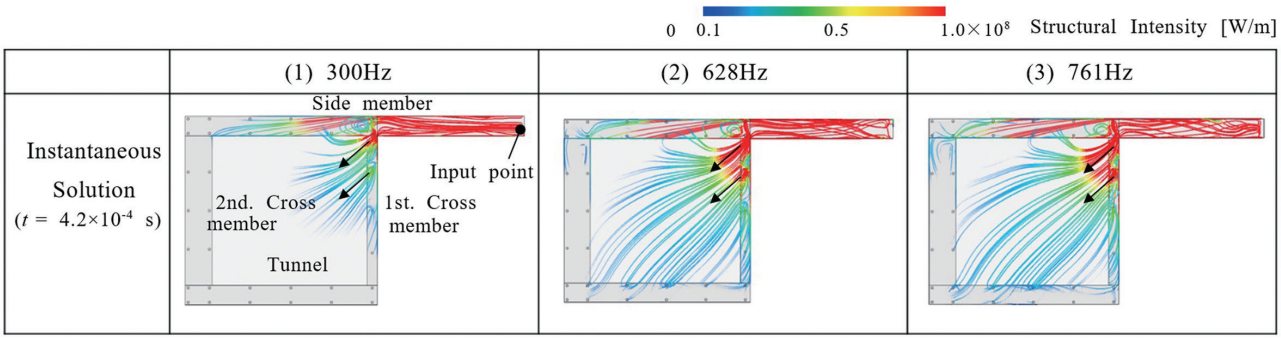


図 2 瞬時振動インテンシティ解析による進行波流れ ((1) 300Hz, (2) 628Hz, (3) 761Hz)

ける入力により発生した振動エネルギーは1st. Cross member側へ分岐し、点結合部からパネルへ流入する結果(図中の黒矢印)を確認した。本結果より、伝搬初期の進行波の流れは周波数に依らないこと、その経路はいずれの周波数でも共通であり、1st. Cross memberよりパネルに流入することが分かった。これにより、瞬時解により得られる進行波の伝搬経路のコントロールを構造設計により図ることで、特定の周波数に限定することなく広帯域でのパネル振動を低減できる可能性があると考える。以降の検討では、伝搬初期の進行波に着目し，骨格間結合部に着目した振動エネルギー伝搬の定量化と設計要件化に関する検討を行う。

4. 伝達インピーダンスの評価

骨格間結合部に着目した設計指針を得るために、骨格断面に生ずる振動インテンシティの時間変化を表す量として伝達インピーダンスの算出を検討した。中周波を対象とする場合、入力や骨格形状の非対称性に起因し、発生する振動インテンシティは各骨格の面ごとに異なる挙動が生ずる。骨格一断面を伝わるエネルギー和を図心一点で記述することで複雑な伝搬のメカニズムを単純化し理解できると考えた。解析により出力される振動インテンシティは骨格シェルの各要素におけるエネルギー流れに限られるため、図心の一点におけるエネルギー伝搬を記述可能なモデル化手法の検討を行った。

4.1 エネルギー伝搬の定量化手法の検討

いま、図3に示す骨格間結合部を考える。分岐直前断面を#1断面、分岐直後断面をそれぞれ#2断面(直交方向)、#3断面(延伸方向)と称す。解析では、各シェル要素における要素力や振動速度の出力はできるが、骨格一断面で発生するそれらの合成和(ベクトル和)を直接出力することができない。そこで#1 ～ #3の骨格断面を多重節点化(同一座標上だが節点を切り

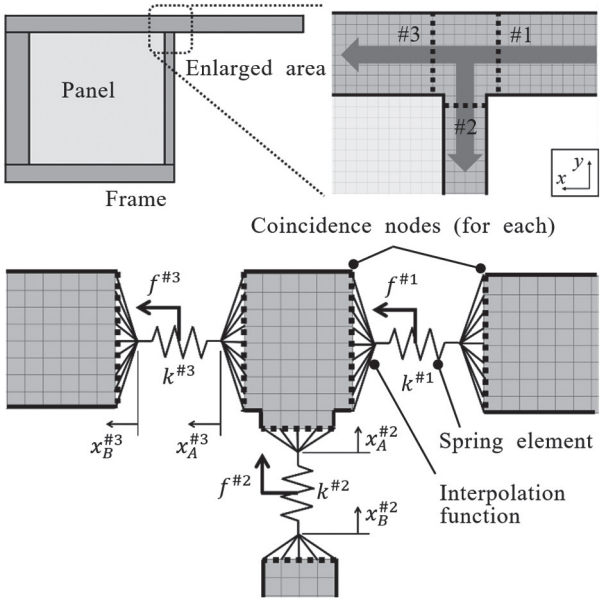


図 3 インピーダンス評価モデルの概観

離した状態)し、それら節点において形状補間要素を用い図心に6自由度系ばね要素で結合し集約させた。

集約ばねの動剛性をそれぞれ$k^{\#1}$、$k^{\#2}$、$k^{\#3}$(これらを集約ばねとも称す)、並進、回転を含む6自由度とし、以下に表す。

$$k^{\#j} = \{k_x^{\#j} \quad k_y^{\#j} \quad k_z^{\#j} \quad k_{rx}^{\#j} \quad k_{ry}^{\#j} \quad k_{rz}^{\#j}\}, \text{for } j = 1,2,3 \quad (5)$$

形状補間要素は式(6)の多点拘束方程式で示され、図心に集約した従属節点(ばね要素の両節点)において骨格断面の各節点で発生する荷重平均を出力する。

$$f^{shell} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i f_i^{shell} \quad (6)$$

ここで、f^{shell}は従属節点の6自由度力成分、f_i^{shell}はシェル要素のi番目の節点の6自由度力成分、α_iは結合距離と発生荷重に応じ決定される重み付け係数である。

本モデルを用いエネルギー伝搬を評価するには、#1 ～ #3の集約ばねで各骨格断面に生ずる変形のベクトル和を出力する必要があるため、集約ばねの動特性

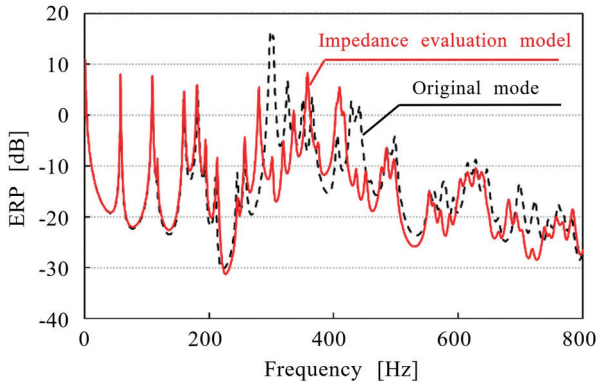


図４ オリジナルモデルとの ERP 比較による
インピーダンス評価モデルの妥当性評価

も適切に設定しなければならない。そこで、パネル振動特性の誤差が最小となるよう動ばね特性を最適化解析により定めた。

本モデル（インピーダンス評価モデルと称す。評価手法の詳細は後述）の妥当性を検証するため、オリジナルモデルとパネルERPの比較を行った。図4に赤実線（インピーダンス評価モデル）、黒破線（オリジナルモデル）で示す。評価応答は広帯域で概ね一致傾向にあると判断し、本モデルを用いて骨格間結合部におけるエネルギー伝搬の定量化手法を考える。

伝達インピーダンスは、構造物の点iに発生する力F_iに対する点jにおける速度応答v_jの比（力に対する速度応答の逆数、力／速度、$i \neq j$）で表され、その区間における「エネルギーの伝わりにくさ」を示す。いま、骨格先端を強制力加振した際の#1 ～ #3断面の集約ばねに発生する内力、振動速度をそれぞれ$f^{\#j}$ [N]、$v^{\#j}$ [m/s]とし、並進、回転を含む6自由度の特性を以下の時間関数で表す。

$$f^{\#j} = \left\{ f_x^{\#j} \quad f_y^{\#j} \quad f_z^{\#j} \quad f_{rx}^{\#j} \quad f_{ry}^{\#j} \quad f_{rz}^{\#j} \right\},$$
$$v^{\#j} = \left\{ v_x^{\#j} \quad v_y^{\#j} \quad v_z^{\#j} \quad v_{rx}^{\#j} \quad v_{ry}^{\#j} \quad v_{rz}^{\#j} \right\},$$
$$, \quad \text{for } j = 1,2,3 \qquad (7)$$

また、#2、#3断面の集約ばねの両節点における変位を$x_A^{\#2}$、$x_B^{\#2}$、$x_A^{\#3}$、$x_B^{\#3}$とすると、#1から#2、#1から#3への伝達インピーダンスZ_{12}、Z_{13}をそれぞれ以下のように示せる。

$$Z_{12} = f^{\#1}/v^{\#2} = f^{\#1}/\frac{d}{dt}\left(x_A^{\#2} - x_B^{\#2}\right) = f^{\#1}/\frac{d}{dt}\left(\frac{f^{\#2}}{k^{\#2}}\right) \quad (8)$$

$$Z_{13} = f^{\#1}/v^{\#3} = f^{\#1}/\frac{d}{dt}\left(x_A^{\#3} - x_B^{\#3}\right) = f^{\#1}/\frac{d}{dt}\left(\frac{f^{\#3}}{k^{\#3}}\right) \quad (9)$$

各変数の算出方法は先述のとおり、fは形状補間要素により計算された荷重平均値、kは最適化により求めた値を用いる。#1断面の内力および#2、#3断面の振動速度は、同時刻における値とし、それぞれ並進3自由度成分の平方和をとる。

$$Z_{12} = \sqrt{\left(f_x^{\#1}\right)^2 + \left(f_y^{\#1}\right)^2 + \left(f_z^{\#1}\right)^2} \Bigg/ \sqrt{\left\{\frac{d}{dt}\left(\frac{f_x^{\#2}}{k_x^{\#2}}\right)\right\}^2 + \left\{\frac{d}{dt}\left(\frac{f_y^{\#2}}{k_y^{\#2}}\right)\right\}^2 + \left\{\frac{d}{dt}\left(\frac{f_z^{\#2}}{k_z^{\#2}}\right)\right\}^2} \quad (10)$$

$$Z_{13} = \sqrt{\left(f_x^{\#1}\right)^2 + \left(f_y^{\#1}\right)^2 + \left(f_z^{\#1}\right)^2} \Bigg/ \sqrt{\left\{\frac{d}{dt}\left(\frac{f_x^{\#3}}{k_x^{\#3}}\right)\right\}^2 + \left\{\frac{d}{dt}\left(\frac{f_y^{\#3}}{k_y^{\#3}}\right)\right\}^2 + \left\{\frac{d}{dt}\left(\frac{f_z^{\#3}}{k_z^{\#3}}\right)\right\}^2} \quad (11)$$

本検討は、進行波が骨格間結合部に到達する時刻帯を対象としている。振動インテンシティ結果からも反射により生ずる後退波成分は存在しないことが確認できているため、得られる伝達インピーダンスは概ね縦波の伝搬量を示すといえる。一般に、進行波は縦波、ねじり波、曲げ波などの種々の波動成分で構成され、詳細な現象分析には波動解析がよく用いられる。本手法のように図心における内力及び速度の平方和を取ることで、波動成分の分離はできなくなるが、骨格一断面を通過する波動伝搬の総量を簡便に表すことができるという利点があると考えられる。 Z_{12}、Z_{13}を比較すれば骨格間結合部において進行波のSide member側、1st. Cross member側それぞれの伝搬量（どちらに流れやすいか）を明らかにするといった初期伝搬のメカニズムの俯瞰ができると考えた。

4.2　伝達インピーダンス解析結果

瞬時振動インテンシティの解析結果より進行波が骨格間結合部に到達する時刻帯$T = T_c$(2.4×10^{-4}~4.2×10^{-4} s)に着目し、骨格間結合部における進行波成分の伝達インピーダンスZ_{12}、Z_{13}を評価する。図5に赤線（Z_{12}）、青線（Z_{13}）で示す。上記手法に基づき算出した時刻帯Tcにおける伝達インピーダンスは$Z_{12} < Z_{13}$であり、#2側へ伝搬しやすい結果を示している。この考え方に基づけば検討対象である骨格間結合部の諸元変化により$Z_{12} > Z_{13}$とすれば#3側への伝搬が促進され、1st. Cross memberからパネルへのエネルギー流入は抑制されると仮説が立つ。

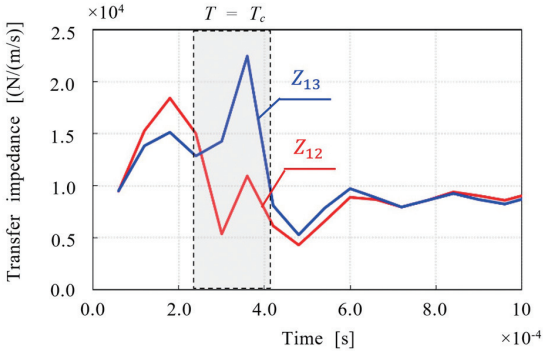


図５　#2 および #3 断面における
伝達インピーダンス評価結果

4.3　骨格間結合剛性をパラメータとしたエネルギーコントロールのスタディ

何らかの骨格構造の諸元変更により進行波が制御され、パネルへのエネルギー流入を抑制することができればパネルERPを低減できる。実構造における骨格間結合部剛性は、スポット溶接位置や点数の変更、フランジ形状、骨格断面積などで決まるが、今回はインピーダンス評価モデルにおける集約ばねの動特性をパラメータとした際のエネルギー伝搬コントロールの可否を検討した。今回は簡単のためパラメータの変更についてはインピーダンス評価モデルの動特性を基準値とし、並進3自由度の動特性を一律に変更するものとする。インピーダンス評価モデルで#2および#3断面に配した集約ばねの動特性$k^{\#2}$、$k^{\#3}$の比を、

$$k_{ratio} = k^{\#2}/k^{\#3} \tag{12}$$

またそのときの進行波が到達する時刻帯$T = T_c$における各断面の伝達インピーダンス比を、

$$Z_{ratio} = Z_{12}/Z_{13} \tag{13}$$

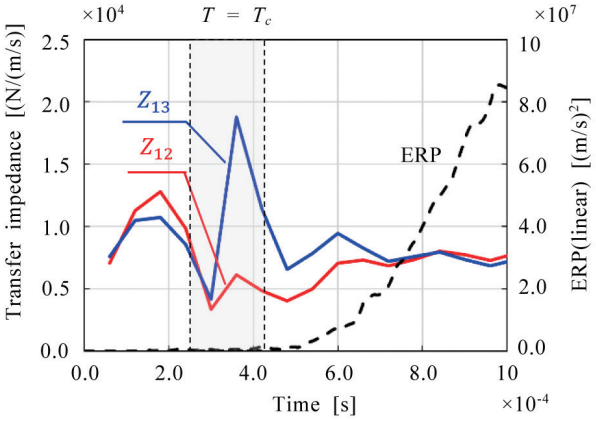
と定義する。

まず、k_{ratio}の大小2パターンによる伝達インピーダンスZ_{12}、Z_{13}と、それに伴うパネルERPの時間推移を確認した。図6(a)に「$k^{\#2} < k^{\#3}$ ($k_{ratio} < 1$)」の場合、図6(b)に「$k^{\#2} > k^{\#3}$ ($k_{ratio} > 1$)」の場合を示し、赤線(Z_{12})、青線(Z_{13})、黒破線(パネルERP)で示した。進行波が骨格間結合部に到達する時刻帯$T = T_c$で伝達インピーダンスZ_{12}、Z_{13}は立ち上がる。そして、エネルギーが骨格間結合部を通過した時間後より次第にパネルERPは増加する傾向にあるため、振動エネルギーが経時的にパネルへ流入していくことが分かる。

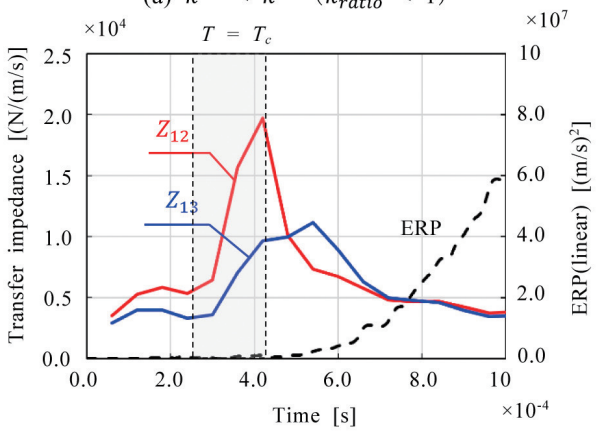
また、図6(a)より「$k^{\#2} < k^{\#3}$ ($k_{ratio} < 1$)」の場合、進行波の到達時刻帯における伝達インピーダンスは$Z_{12} < Z_{13}$ ($Z_{ratio} < 1$)であり#2側へ伝搬しやすい結果である。一方、図6(b)より「$k^{\#2} > k^{\#3}$ ($k_{ratio} > 1$)」の場合、$Z_{12} > Z_{13}$ ($Z_{ratio} > 1$)であり#3側へ伝搬しやすい結果である。パネルERPは、K_{ratio}が大きい場合の方が明らかに経時増加が少なく、パネルへのエネルギー流入量が小さいことを示唆している。

図7に(a)「$k^{\#2} < k^{\#3}$ ($k_{ratio} < 1$)」、(b)「$k^{\#2} > k^{\#3}$ ($k_{ratio} > 1$)」の場合について、パネルへ振動エネルギーが流入した後の時刻(9.0×10^{-4} s)における振動インテンシティ結果比較を示す。パネルへのエネルギー流入量は(b) $k^{\#2} > k^{\#3}$ ($k_{ratio} > 1$)の方が小さく、骨格間結合部における集約ばねの動特性変更により#3側へエネルギーを伝搬させることで、パネル流入を抑制できることを確認できた。

以上より、時刻歴での伝達インピーダンスおよびパ

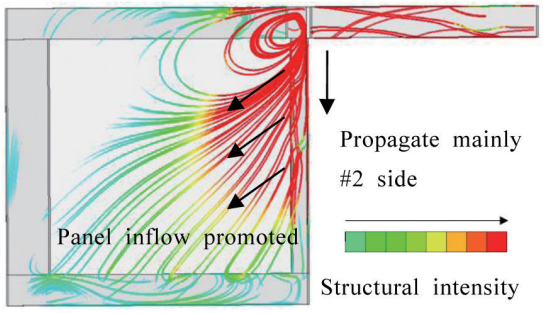


(a) $k^{\#2} < k^{\#3}$ ($k_{ratio} < 1$)

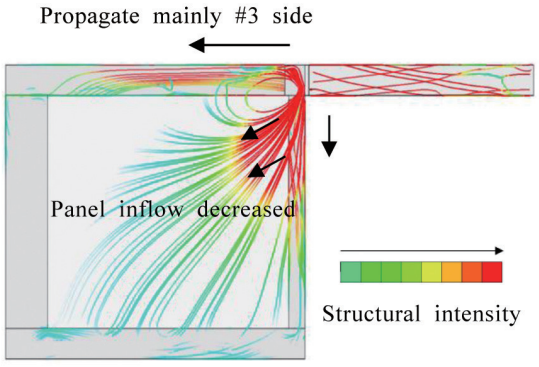


(b) $k^{\#2} > k^{\#3}$ ($k_{ratio} > 1$)

図6　結合剛性比k_{ratio}が与える伝達インピーダンスの変化



(a) $k^{\#2} < k^{\#3}$ ($k_{ratio} < 1$)



(b) $k^{\#2} > k^{\#3}$ ($k_{ratio} > 1$)

図7 結合剛性比k_{ratio}による瞬時振動インテンシティの挙動変化 (9.0×10^{-4} s)

ネルERPの評価により、骨格間結合部における進行波の分岐度合いとパネル流入を定量化できる。

4.4　エネルギー伝搬とパネルERPの相関性の確認

結合部剛性をパラメータに用いた進行波の伝搬制御とパネルの振動エネルギー平均レベルの相関性を示すため、k_{ratio}を乱数としたランダムサンプリングにより伝達インピーダンス比Z_{ratio}とパネルERP（O.A.値）の関係を整理した。

図8に横軸k_{ratio}、縦軸Z_{ratio}、バブル径をパネルERP（O.A.値）としたバブルチャートを示す。図中の(a)および(b)は4.3節におけるパラメータサンプルと対応する。図右上にいくにつれてバブル径が小さくなることから、k_{ratio}とZ_{ratio}は比例し、それらはパネルERPと反比例の関係にある。図中の(*)のように例外的にk_{ratio}が小さい場合でもパネルERPが小さいパラメータサンプルも存在するが、これは、集約ばねの動特性変更により入力周波数の300Hz帯に存在している固有モードが離間された特異な場合があることを確認している。パラメータスタディの結果を俯瞰すると、k_{ratio}を大きくすればパネルERPが低下する傾向にあるといえる。

したがって、パネルERP低減に向けた結合部の設計指針としては、$k^{\#2} > k^{\#3}$とすることで、1st. Cross member側へ伝搬していた進行波をSide member側へ流れやすく（$Z_{ratio} > 1$、つまり$Z_{12} > Z_{13}$）し、パネルへの進行波の流入を抑制することが有効である。以上より、振動インテンシティの時間変化を表す量として骨格間結合部における伝達インピーダンスを算出した結果、骨格結合剛性との相関性を示し、エネルギー伝搬コントロールによるパネル振動の低減可能性を示した。

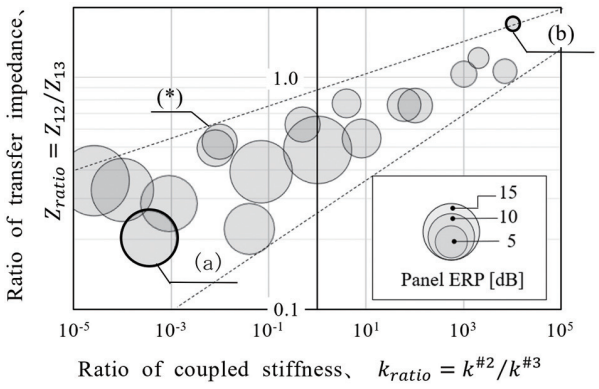


図８　結合剛性比k_{ratio}、伝達インピーダンス比Z_{ratio}、EPRの関係性（バブルチャート）

5．まとめ

骨格間結合部に着目した設計指針を得るために、振動エネルギー伝搬分析およびエネルギーコントロールの数値検証を行った結果、以下の知見が得られた。

(1) 系全体における進行波の流れを瞬時振動インテンシティにより明らかにした。伝搬経路が周波数に依存しない結果から、進行波（第一波）のコントロールが広帯域の騒音低減に有効である可能性を示した。

(2) 骨格断面におけるエネルギー伝搬を記述するため、振動インテンシティと対応する伝達インピーダンスを骨格間結合部の図心の一点で導出可能なモデルを提案した。本モデルにより、骨格間結合部における進行波の伝わりやすさを定量化できることを示した。

(3) 骨格結合剛性比k_{ratio}をパラメータとした際のパネルERPの変化を検討し、両者の相関があることを明らかにした。これにより、エネルギー伝搬コントロールによるパネル振動の低減可能性を示した。

参考文献

(1) Keisuke Abe et al.: Instantaneous Structural Intensity Analysis on Vehicle Body, Proceedings in Inter-noise2023, Makuhari, Japan (2023)

(2) 阿部啓介ほか：低周波ロードノイズ性能予測に向けたフルビークルモデル化技術の開発、SUBARU技報、第46号、p.123-129（2019）

(3) 阿部啓介ほか：振動エネルギー伝搬分析に基づく車内音低減技術、SUBARU技報、第50号、p.90-96（2023）

(4) Keisuke Abe et al.: VIBRATIONAL ENERGY PROPAGATION MODELLING BETWEEN FRAME AND PANEL IN THE EARLY STAGES OF VEHICLE BODY DEVELOPMENT、2ND. PAPER: BETWEEN HOLLOW FRAME AND PANEL, Proceedings in ICSV30, Amsterdam、Netherlands (2024)

(5) 阿部啓介ほか：骨格パネル間の点結合部における振動エネルギー伝搬メカニズム、自動車技術会論文集、54巻、5号 (2023)

(6) Noiseux, D.U.：Measurement of Power Flow in Uniform Beams and Plate, Journal of Acoustical Society of America, Vol.47, p.238-247 (1970)

【著　者】

阿部　啓介

田中 勇之介

山崎　　徹

SUBARU「ソルテラ」改良モデルを発表

2023年10月25日

今回の改良では、SUBARU Safety Senseの機能を拡充し、安全性能を向上しました。
さらに、冷間時のバッテリー暖機性能向上等により、外気温による充電時間のバラツキを低減。低温環境下での、電欠ランプ点灯時からSOC*1 80%までの急速充電時間を最大で約30%削減*2し、シビアコンディションにおけるBEVの実用性を向上させました。

*1：State of Charge（充電量）
*2：外気温-10℃の環境下において、90kW急速充電器での充電時間（開発時における試算値）

ソルテラ「ET-HS」

リチウムイオン電池安全性評価の開発環境検討（設備仕様検討プロセス改革と適用）

Studies on Development Environment of Lithium-Ion Battery Safety Evaluation (Innovation in the Process of Equipment Specifications Study and its Application)

志村雅幸[*1] SHIMURA Masayuki
七嵐沢朗[*2] NANAARASHI Takuro
今西宏文[*3] IMANISHI Hirofumi
増見光彦[*1] MASUMI Mitsuhiko
山本恭平[*4] YAMAMOTO Kyohei

抄　録

電動化等の市場ニーズに沿った開発環境構築のためには、必要な設備を迅速に導入し、早期に稼働させるなど、スピード感を持った導入が必要不可欠である。その実現のためには、既存の設備仕様検討プロセスを根本から見直し、改革する必要がある。

そこで我々は、設備仕様検討プロセスの改革のため、『フロントローディング型のスタイル』とし、『設備仕様検討プロセスの全体最適』を実現させた。

これにより、導入実績が少なく、設備要件が不透明のため、既存プロセスでは仕様構築が困難である『リチウムイオン電池の安全性評価』について、設備仕様検討をスムーズに進捗させた。本稿にその取組みを紹介する。

Abstract

To build a development environment that meets market needs such as electrification, it is essential to introduce necessary equipment quickly and put it into operation as soon as possible. To this end, it is necessary to fundamentally innovate the existing equipment specification study process.

We have achieved “total optimization of equipment specification study process" by restructuring the equipment specification study process into a “front-loading style".

In this paper, we introduce you “the equipment specification study process” and the application to "Lithium-Ion Battery Safety Evaluation".

1．まえがき

「SUBARUらしさ」を際立させるためには、乗る人すべての「安心と愉しさ」・「環境（CO2削減）性能」を高次元で両立させた電動車を魅力あるものとし、高品質かつ早期に、お客様に提供することが求められる。そのためには、電動車の基幹ユニット技術などの開発を高効率に推進する必要があり、その開発環境も早急な構築が求められる。その実現のためには、開発設備の導入から稼働までの短期化が必須となる。

開発設備を短期間で導入し、問題なく早期に稼働させるために、開発設備の仕様検討プロセスを根本から見直し、仕様検討全体を最適化するプロセスへと進化させた。そのプロセスとは、仕様検討初期の設備企画・構想工程で必要とする要件の検討を前倒しで進める『フロントローディング型のスタイル』である。これにより完成までを見通すことができ、設備要件の抜け漏れ防止・投資費用・設備仕様検討期間、すべてを最適化させることが可能となる。

次に、改革した『設備仕様検討の〈新〉プロセス』を電動車開発設備の検討に適用した。対象は、電動化技術の基幹ユニットである、リチウムイオン電池（以降、LIBと記す。）の安全性評価である。理由は、以下の3つである。

① 大容量の2次電池であるLIBは、衝突・充電事故による発煙・発火等、様々な課題を内包しており、更なる安全性・信頼性向上が求められるなど、早急に開発環境構築が必要であるため。

② 安全性評価は、LIBを故意に破壊させ、燃焼させる前提の評価である。そのため、安全・環境面は高品質の対応が望まれるため。

③ 安全性評価は、導入実績も非常に少なく、設備仕様に不明瞭な項目も多い。既存の設備検討プロセ

＊1 バッテリーシステム開発部
＊2 株式会社明電舎　モビリティ T＆S技術部
＊3 技術管理部
＊4 車両運動開発部

スではノウハウがなく、設備導入後に安全・環境の追加投資が発生するなど、稼働までに日程を要するため。

本稿にて､改革した『設備仕様検討〈新〉プロセス』､そのプロセスを適用した、LIB開発の安全性評価の抜け洩れない要件見える化までの取り組みを紹介する。

2．設備の仕様検討

設備の仕様を検討するおおよその場合、目的とする試験評価関連のみについて考慮してしまい、作業者の安全や地域住民への環境などは仕様検討者の経験の範囲のみの対応となる、もしくは前例のある類似設備の仕様となる。結果、作業者安全リスクや環境リスクが残存する抜け漏れのある仕様となり、設備導入の手戻りや設備改修・新規設備追加など、設備稼働までが長期化し、車両開発遅延の原因となる。特に、LIBの安全性評価設備などは、導入実績も少なく、設備仕様も不明瞭であるため、安全や環境リスクが残存する設備となりやすい。

設備を､作業者安全リスクや環境リスクを問題なく、短期間で導入させるためには、設備の開発プロセス改革が必要である。以下にその取り組みについて説明する。

2.1　問題ない設備とするための要件

設備検討において最優先で検討すべき要件は、目的とする制御や評価等ができることである｡その他にも、労働災害を発生させない作業者の安全、地域住民に迷惑をかけないような環境保全、定期点検などのメンテナンス性がある。表1に、以上の設備要件について一覧を示す。

これらの4大設備要件は、設備構築の際にはすべてを満たす必要があり、どの設備要件も犠牲にすることは許されない。

表１　４大設備要件

目的	開発で必要な制御・評価ができること
安全	労働災害とならないこと
環境	地域住民に環境面で迷惑をかけないこと
運用	メンテナンス等を簡便にできること

2.2　設備仕様検討〈新〉プロセス

表1で述べた設備要件であるが、新規に設備仕様検討プロセスに織り込む場合、プロセスが進行するほど手戻りに要する手間は大きくなり、設備仕様検討期間が長くなる。場合によっては、設備要件の抜け漏れ等のために設備改修が発生するなど、追加投資と更なる設備仕様検討期間の長期化につながってしまう。

以上を解決するために、設備仕様検討プロセス上流工程の企画・構想段階にて、表1の4大設備要件を十分に深く検討する､『フロントローディング型のスタイル』とする。

『フロントローディング型のスタイル』にすることにより、プロセス上流工程の企画・構想段階で必要要件を洗い出し、その要件を満たす設備の見通し立てを行う事が出来る。

この仕組みは、企画・構想段階の検討負荷を増加させるなど一見工数が増大してしまうように見えるが、完成までを見通すことができ、課題等の問題をあらかじめ取り除くため、その後の工程で、手戻りや必要な設備要件の抜け漏れを抑制することが可能となり、最終的には、設備仕様検討プロセス全体を大きく最適にできる。

2.3　安全・環境要件の設備仕様検討

要件(表1に示している4大設備要件)ごとで仕様検討プロセスも異なる。本項目では、既存の設備検討で最も問題が多く、進捗が困難である『安全』『環境』要件について着目し、改革した〈新〉プロセスの進め方を示す。

『安全』『環境』要件の設備仕様検討〈新〉プロセス進め方概要を、表2に示す。これらに示すように、新プロセスは、その初期工程の設備企画・構想段階で、安全・環境のリスクを十分に検討し、その対策までを見通す流れとなっている。

表２　安全・環境要件 仕様検討〈新〉プロセス

Step 1	安全・環境 リスク候補の抽出
Step 2	リスク候補の現象数値化・具体化
Step 3	リスク明確化と措置基準
Step 4	措置対象リスクの低減シナリオ構築
Step 5	構築シナリオに沿った設備導入推進

◆Step1：安全・環境 リスク候補の抽出

・安全リスク候補の抽出

あらゆる危険性又は有害性を洗い出し、特定する。なお、法規等で危険又は健康障害を防止するための措置等が定められている場合は、それを遵守すること。

・環境リスク候補の抽出
　設備から出る気体・液体・音や振動エネルギーなどを調査・確認し、リスクを抽出する。

◆Step2：リスク候補の現象数値化・具体化
　Step1にて抽出したリスク候補に対し、その現象を数値化、もしくは具体化する。
　例えば、有害ガスの場合は排出されるガス量、騒音は発生する騒音値を数値化する。火災の場合はその発生源などを具体化する、などである。

◆Step3：リスク明確化と措置基準
　Step2にて現象を明確にしたリスクの達成基準を明確化し、低減措置が必要なリスクを明確化する。
　例えば、有害ガス排出等であれば、ガス成分を確認し、その成分に対し安全で作業する濃度や公害などの法規・社内規制の措置基準を明確にする。火災の場合は、火災リスクのある個所から出火しても、延焼範囲は限られた範囲に抑制し、建屋火災とならないようにする、などである。

◆Step4：措置対象リスクの低減シナリオ構築
　Step3で明確になった対応すべきリスクに対し、基準をクリアする低減シナリオを検討する。
　例えば、有害ガス等は、有効な浄化方法と達成基準をクリアするための設備規模がある。火災は、発火させない制御や発火しても許される延焼範囲とその消火方法などである。

◆Step5：構築シナリオに沿った設備導入推進
　Step4にて明確になった、安全・環境措置のシナリオに則って、設備仕様を明確にし、導入を進める。

3．LIB安全性評価 安全・環境リスク候補（設備仕様検討＜新＞プロセス：Step1）

本章以降では、LIB安全性評価設備の安全・環境の設備仕様検討〈新〉プロセスでの取組みを示す。

この設備は、導入実績も非常に少なく、有害ガスや急速燃焼による衝撃が発生するなど安全・環境上のリスクが高いため、既存の設備検討プロセスでは、仕様構築は非常に困難である。

ここで、LIB安全性評価の設備について補足する。電動車で使用されているLIBは、生産品質、衝突や充電事故による発煙・発火など、様々な課題を内包しており、市場からも更なる安全性・信頼性向上が求められる。その安全性の評価を行うために、LIBの限度を超えた使い方（LIBを破壊させるまで）の評価を実施する設備である。

評価種類およびLIB破壊時の現象を図1に、それぞれの評価種類でのLIB破壊時の挙動を表3に示す。

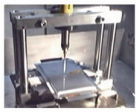
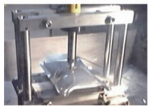
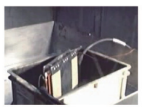
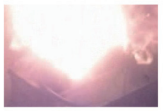
評価	LIB 破壊前	LIB 故意破壊	
		発煙確認	発煙（引火）
釘差し			
圧壊			
過充電			

図１　LIB安全性評価試験と破壊現象

表３　安全性評価（図１）のLIB破壊時の挙動例

釘差し	発煙のみ、引火には達していない。
圧壊	発煙⇒引火⇒燃焼　の現象 可燃物の煙量が少ないため、炎の規模は小さい。
過充電	発煙⇒引火⇒急速燃焼　の現象 発煙量も多く、引火後、燃焼速度も速く広範囲に燃え広がっている。

LIB評価の安全性評価現象（図1，表3）により、LIB破壊時は発煙・引火・燃焼（急速燃焼 含む）など、種々の現象を認識した。

次に、LIB評価の安全性評価現象（図1，表3）をバラし、安全・環境リスクの候補出しを行った。結果を図2に記す。

以上、設備仕様検討〈新〉プロセスStep1：安全・環境 リスク候補の抽出を実施した。次項以降は、抽出したそれぞれのリスクに対して、表2のStep2～4の取組みを記す。

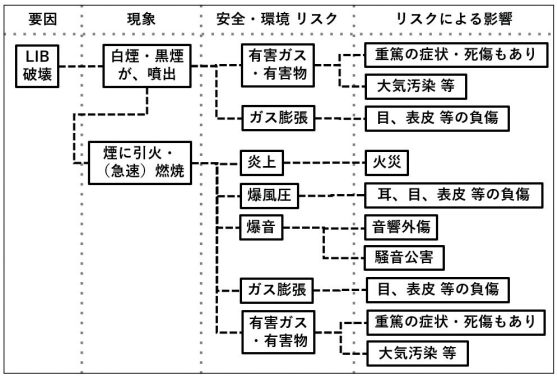


図２　LIB 破壊現象バラシ、安全・環境リスク洗出

４．LIB破壊起因の炎上の措置

LIBの安全性評価は、ほとんどの場合、LIBが燃焼する。それにより、評価設備、建屋の順に燃え広がり、図2に示すように火災となる危険がある。本章では、LIB破壊起因の炎上について、検討する。

4.1　炎上リスクの具体化
（設備仕様検討＜新＞プロセス：Step2）

LIBが破壊されると、可燃である電解質が噴出し、それに引火し、LIBが燃焼する。以下項目のように整理される。

・出火元：安全性評価領域（評価設備）
・出火時期：評価ごとに発生

4.2　炎上リスク明確化と措置基準
（設備仕様検討＜新＞プロセス：Step3）

評価設備炎上により、建屋火災となるリスクが考えられるため、措置基準としては、LIBが出火しても、安全性評価設備は炎上せず、評価領域で収まることとする。

4.3　炎上リスクの低減シナリオ構築
（設備仕様検討＜新＞プロセス：Step4）

LIB破壊により出火しても、評価領域内で収まるようにするために、以下の施策を行う事とする。

①　LIB評価領域は不燃材で囲われた閉空間とし、炎や煙が広がらないようにする。
②　LIB評価領域で設備炎上となる高温等発生時には、冷却消火できるようにする。
③　停電時でも消火対応できるようにする。

５．急速燃焼による爆風圧・ガス膨張の措置

LIB破壊時には、図2に示すように、LIBから可燃である電解液がガスとなり噴出される。そのガスに引火する場合、発煙量が多いと急速燃焼となり、ガス体積も増加し、急激な圧力上昇も発生する。

ガス膨張に関しては、放圧バルブを設置するなどの対策を実施するため検討外とする。本章では、急激な圧力上昇で人体や装置破損となる爆風について検討する。

5.1　爆風圧リスクの数値化と措置基準
（設備仕様検討＜新＞プロセス：Step2，3）

爆風圧の数値化は、以下の2つの手順にて行う。

手順①：LIB電解質（可燃物）をTNT等価量へ換算[1]
手順②：換算したTNT火薬量から爆風圧を換算[2]

結果イメージを図3に示す。

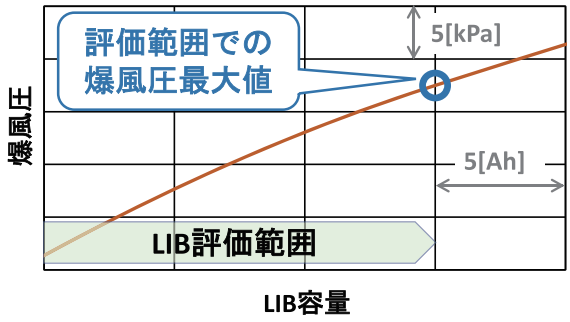


図３　LIB 容量による爆風圧

爆風圧の最大値は、評価するLIB容量最大値の場合である。措置基準としては、LIB評価容量最大値での爆風圧に、安全性評価領域の閉空間が十分に保たれることとする。

5.2　爆風圧リスクの低減シナリオ構築
（設備仕様検討〈新〉プロセス：Step4）

安全性評価領域の閉空間を十分に保たせるために、評価領域エリアは爆風圧最大値の3.5倍まで許容できる設計（安全率 3.5）とした[3]。

６．急速燃焼による爆音の措置

前章にて、急速燃焼時に発生する爆風圧について記載したが、同時に爆音も発生する。

本章では、図2に示す音響外傷や騒音公害の原因となるLIB急速燃焼時に発生する爆音について、検討する。

6.1　爆音リスクの数値化
（設備仕様検討〈新〉プロセス：Step2）

LIBを破壊し、急速燃焼させ、その爆音の近接音圧を計測した。図4に爆音レベルの把握結果を示す。

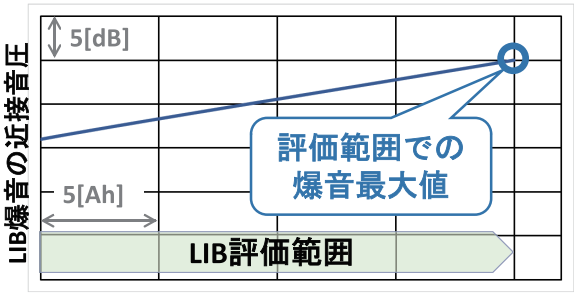


図4　LIB 容量による爆音

6.2　爆音リスク明確化と措置基準
（設備仕様検討〈新〉プロセス：Step3）

爆音による､安全･環境関連の措置基準を表4に示す。

安全要件の音響外傷は、LIB評価範囲での最大爆音によるトータルばく露時間は3秒未満であり、措置基準を達成しているため、安全上問題なしと判断する。

環境要件の騒音公害については、LIB爆音は、措置基準(規制値)よりはるかに大きく、対策が必要である。

表4　爆音による安全・環境の措置基準

要件	影響	措置基準
安全	音響 外傷	ばく露時間：3［秒/日］以下(4) （LIB 容量最大爆音音圧）
環境	騒音 公害	音圧レベル：55［dB］以下 （場所・騒音発生時間　考慮）

6.3　爆音リスクの低減シナリオ構築
（設備仕様検討〈新〉プロセス：Step4）

LIB爆音は、騒音公害水準に対し上回っているため、遮音措置を実施することとする。

遮音方法は、その効果を確認するため、図5に示す装置イメージにて種々の遮音レベルを計測し、それにより、騒音公害規制値をクリアするためのシナリオを構築した。　図6にそのシナリオを示す。

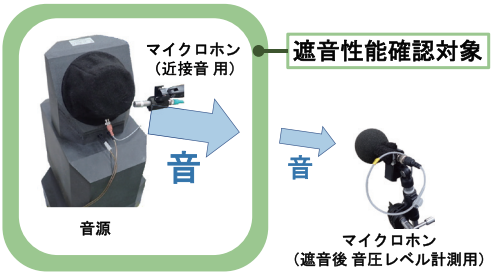


図5　遮音性能把握評価 イメージ

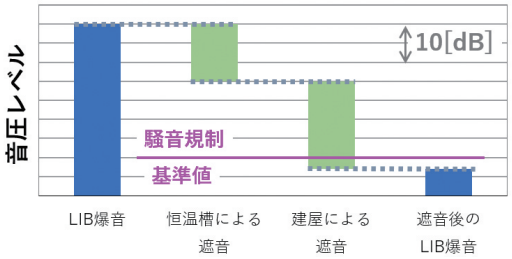


図6　騒音公害措置の達成シナリオ

7．LIB破壊による排出ガスの措置

LIB破壊時に、ガスが排出される。ガスは白煙、黒煙の順に噴出し、それに引火した場合は燃焼する。

排出ガスは、図2に示すように、『重篤・死傷』などの安全リスク、『大気汚染』などの環境リスクと大きく2つある。ここで安全リスクに関しては、作業者がばく露しないように措置を施した設備とするため、以下項では、環境リスクについてのみ述べる。

7.1　排出ガスの環境リスクの具体化
（設備仕様検討〈新〉プロセス：Step2）

LIBの安全性評価を行い、その時に発生したガス等の排出物を捕集･分析した。図7に、評価装置イメージを示す。

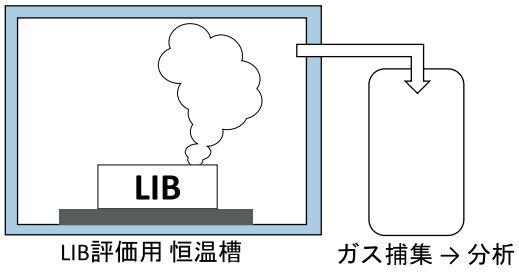


図7　LIB 破壊時の排出ガス測定イメージ

分析した結果、排出ガスには粒子状物質と各種ガス(液体含む)の2種類を確認した。

粒子状物質は、物質特定、組成解析が困難であるため、電池内部の素材等から特定化学物質(健康被害を引き起こす物質)が含まれている最悪のパターンを想定した。

各種ガスについては、環境規制に該当する成分が数種類ある。

7.2　排出ガスの環境リスク明確化と措置基準
（設備仕様検討〈新〉プロセス：Step3）

排出ガス中の粒子状物質については、粒子状物質が有害な場合の環境規制値を措置基準とした。

ここでの措置基準とした規制値であるが、設備設置場所の条例では、特定化学物質などの有害物は、国の基準より高レベルとなるため、注意が必要である。

排出ガス中の各種ガス気体については､分析の結果、数種類の成分がある。図8に、環境法規に該当する成分の排出量と措置基準(環境規制値)の割合を示す。

ここで、「GAS-A」「GAS-E」「GAS-F」は、措置基準を大幅に超過しており、低減対策が必要であることが明確となった。

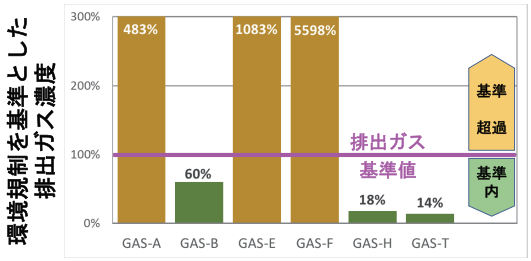


図８　環境規制対象ガスの基準と排出量
（排出のガス濃度：1[m³] あたりの濃度に換算）

7.3　排出ガスの環境リスクの低減シナリオ構築（設備仕様検討〈新〉プロセス：Step4）

排出ガス中の粒子状物質の低減シナリオについては、粒子状物質の粒径と排出量から、措置基準を達成できるようにフィルタ種類、フィルタサイズ、風量等の設定を行った。以上により、措置基準をクリアする見通しを得た。

排出ガス中の各種ガスは、図8に示すように、「GAS-A」「GAS-E」「GAS-F」の低減対策が必要であり、それぞれのガス成分の処理方法を表5に示す。

表５　排出ガスの気体有害ガスの処理

ガス種類	処理方式	具体的な処理方法
GAS-A	吸着	ケミカルフィルタ（化学吸着）
	燃焼	直接燃焼、触媒燃焼
GAS-E	吸着	活性炭フィルタ（物理吸着） ケミカルフィルタ（化学吸着）
	燃焼	直接燃焼、触媒燃焼
GAS-F	吸着	ケミカルフィルタ（化学吸着） アルカリ粉末吹き込み
	水洗浄	洗浄水の気液接触

措置基準をクリアするシナリオ構築には、表5の具体的な処理方法を選択し、その規模を設定することにより、措置基準をクリアする見通しを得た。

8．まとめ

我々がお客様のニーズに沿った商品開発環境を構築するためは、以下項目の効果を見込んだ設備仕様検討プロセスが必要である。

Q（設備要件の抜け漏れなしに）
C（要件を満たす最低限の投資で）
D（最適化された設備仕様検討期間で）

そのために我々は、フロントローディング型へ設備仕様検討プロセスを刷新・改革させた。

本稿では、「安全・環境上のリスクが高い」、「導入実績が非常に少ない」、「設備仕様に不明瞭な項目が多い」などの課題があり、既存の設備仕様検討プロセスでは、設備仕様構築が困難となる案件であるLIBの安全性評価について、改革した設備仕様検討プロセスを用い、仕様検討を実施した。結果、問題なく短期間にて検討を完了させることが出来た。今後も改革した設備仕様検討プロセスを用い、ＳＵＢＡＲＵの商品をお客様に訴求していくための開発環境構築を行っていく。

最後に、LIB安全性評価設備の仕様検討に携わったすべての方々に対して、紙面を借りて御礼申し上げます。

参考文献

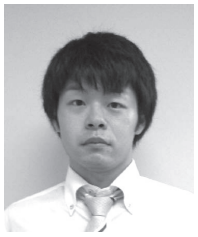
(1)　消防庁特殊災害室: 石油コンビナートの防災アセスメント指針、平成25年3月、P140-141
松永猛裕ほか：爆発チャンバー内における爆風圧
(2)　計測実験、Science and Technology of Energetic Materials, Vol.61 No.3 (2000), P135-136
JIS B 8267: 2020、圧力容器の設計
(3)　Chan, Henry S.: Occupational Noise Exposure,
(4)　DHHS (NIOSH) Publication, No. 98–126(1998), P20

【著　者】

志村　雅幸

七嵐　沢朗

今西　宏文


増見　光彦

山本　恭平

SUBARU 新型SUV「レヴォーグ レイバック」を発表
～高度運転支援システム「アイサイトX（エックス）」を標準装備～

2023年10月25日

新型SUV「レヴォーグ レイバック」は、「レヴォーグ」が持つ先進安全・スポーティ・ワゴン価値の3つの価値に加え、SUVの価値である自在性と、上質さを兼ね備えた、SUBARUの豊富なSUVラインアップの中で、唯一無二の存在となるSUVとして、日本市場向けに新たに開発したモデルです。

レヴォーグ レイバック「Limited EX」

樹脂爪構造のCAE解析技術とAIサロゲートモデル開発

CAE Analysis Technology of Resin Claws and Development of AI Surrogate Model

新島 隆平[*1] NIIJIMA Ryuhei
赤石 大地[*2] AKAISHI Daichi
太田 一宏[*1] OOTA Kazuhiro

抄 録

バンパに樹脂カバーを取り付ける際、爪による嵌合固定が採用されている。だが、デザインやスペースの問題から様々な爪形状で設計する必要があり、爪挿抜時の最大荷重を早期にかつ精度よく予測したい。この課題に対して、有限要素法(FEM)とAI技術を活用した手法で爪挿入時の最大荷重を実物に頼らずに短時間で予測する手法を構築し、実用できる見通しを得た。同時に爪挿入時のメカニズムや荷重値に影響のある設計因子も理解し、現象理解を深化させることができた。本取組について紹介し、今後の応用についても述べる。

Abstract

Various claw shapes are used for fastening due to design and space constraints when attaching a resin cover to a bumper. However, it is crucial to predict the maximum load during claw insertion accurately and early without relying on physical testing. We developed a method that combines FEM and AI to predict the maximum load during claw insertion. Additionally, we gained insights into design factors affecting the mechanism and load values during claw insertion, enhancing our understanding of the phenomenon.

1. はじめに

バンパに取り付けられる樹脂製カバー(以下、カバー)は、多くの場合、爪による嵌合固定が採用されている。この固定方法は、生産性と市場での取り外しやすさの観点から非常に有効である。しかし、爪挿入時の荷重(挿入力)と爪取り外し時の荷重(固定力)は爪の剛性に依存し、これらは相反する性質を持つため、その設定が非常に敏感に作用する。そのため、爪の構造と形状を標準化し再利用すること(以下、標準形)が望ましいが、デザインの形状や後方構造とのスペースの制約から、標準形を活用できない場合が多い。特に、バンパの正面部と側面部に回り込んだ部分では、挿入方向が変わることに加え、金型抜き方向の制約から形状の統一がほぼ不可能である。さらに困難なのは、バンパとカバーの両方が弾性体であり、挿入力と固定力を推測するためには、これら2つの部品の剛性を正確に把握する必要がある。これまでの開発では、形状データを作成する際には過去の実績に基づいた簡易的な手計算に依存してきたが、部品を取得後の確認で設計変更が必要となることが少なくなかった。この問題を解決するために、CAEによる検証技術の開発に取り組んだ。なお、固定力は後方からの取り外し作業が必要な構造を採用したため、今回の技術開発は挿入力に焦点を当てて進めた。検証技術としては、実物とCAEの数値の相関だけでなく、現象の一致性も確認しながら開発を進めた。また、CAEの有効なポイントである挙動分析により、挿入力に大きな影響を与える形状因子を抽出し、各因子の影響度が即時に確認できるようにした。一方、形状作成に活用できる精度の検証技術として構築できたが、検証に時間がかかるという問題も生じた。この新たな問題を解決するために、AI技術を活用したサロゲートモデルの利用に取り組んだ。

本報は、有限要素法(FEM)とAI技術を活用した一連の予測手法の開発結果について紹介する。

＊1 内外装設計部
＊2 技術開発部

2. 実機計測の概要

部品組付け作業において重視される要素は、いかに少ない力で爪を確実に嵌合させるかである。このため、カバーの挿入時における最大荷重が重要な指標となる。この最大荷重を把握するために、バンパとカバーの嵌合部に焦点を当てた。これらの部品を切り出して計測を行い、得られた実機計測結果を表1に示す。

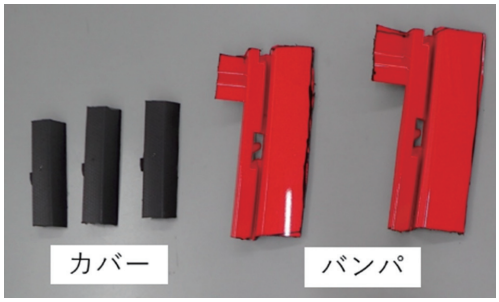


図１　計測用切り出し部品

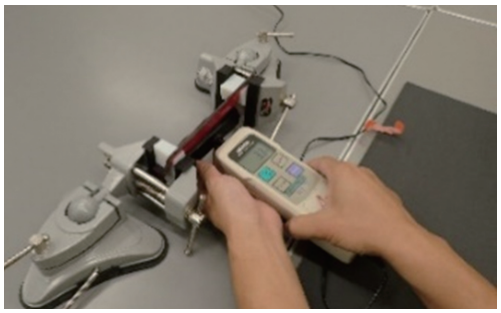


図２　実機計測の様子

表１　実機計測結果

試験No.	最大荷重（N）
1	39.4
2	37.3
3	38.6
4	35.6
5	41.0
6	37.5
平均値	38.2

実機計測結果から安定した数値が計測できた6試験を検証に用いることとした。

3. FEMモデルの概要

実機計測結果を再現するために、非線形構造解析ソフトウェアであるLS-DYNAを用いて、部品を切り出した実機試験に準じたモデルを作成した。この時、解析モデルが実現象と同様な挙動を示すように材料特性や接触などの境界条件の設定を行った。バンパとカバーのFEMモデルについては、図3に示す。

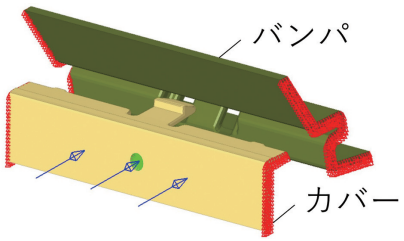


図３　バンパとカバーのFEMモデル

4. FEMモデルの再現性

解析諸条件の設定により、最大荷重が40Nとなったことが確認された。この結果は、実機計測平均値と比較しても高い再現性を有している。解析結果と実機計測平均値との関係性を図4に示す。

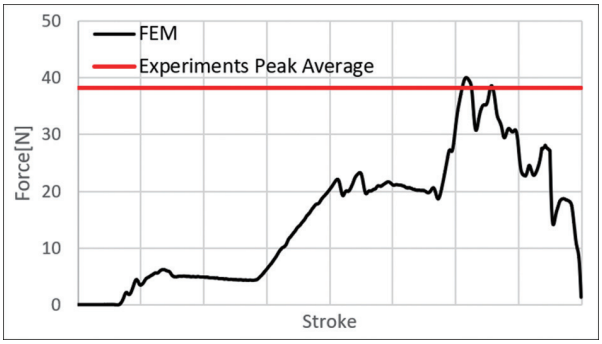


図４　解析結果と実機計測平均値の比較

5. 標準形による解析結果

解析結果と実機計測結果の間に高い再現性が確認されたことから、今後の標準形となる爪の形状にて解析を行い、爪の嵌合に至る現象を確認した。さらに、標準形での挿入力は、図5からバンパ間口最大時（③）に最大荷重が発生すると推定した。

図５　爪嵌合に至る現象

6. 標準形による形状因子の影響

前章の通り、爪の形状を構成する因子の一つ一つが挿入力に影響を与える為、それぞれの影響度を検証した。標準形を基に形状因子を抽出し、それぞれの変数を変化させた解析を行った。図6、7は特に影響が大きいと考えられる"カバー爪の高さ"と"バンパ抑え爪の長さ"の影響度を示す。一般的な設計範囲においては、両因子とも線形性を示すことが確認できた。

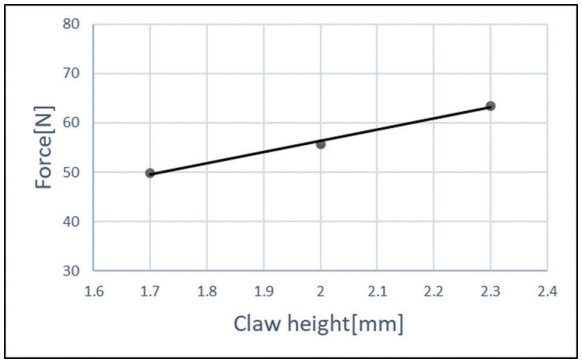


図６　カバー爪高さの挿入力への影響

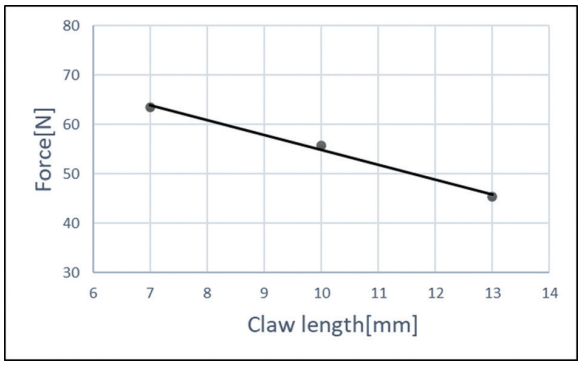


図７　バンパ抑え爪長さの挿入力への影響

その他の形状因子についても検証を行い、最終的に10個の因子に絞り込んだ。

7. サロゲートモデルの開発

7.1　FEMの課題とサロゲートモデル化の動機

前章までのFEMによる解析結果を参照することにより、ある1つの形状因子を変化させた際の挿入時最大荷重を予測することが可能となった。しかし、複数の因子を同時に変化させた場合、その挿入時最大荷重を前章までの知見を用いて見積もるのは簡単ではなく、都度FEMモデルを作成し解析を実行する必要がある。

ここで、最適な設計のために、各因子をあらゆる値に設定し、FEMによる解析を行うことを考える。因子数を10とし、各因子を3水準とした場合、全条件の解析に要する時間は3年以上(3^{10} 件×0.5 h/件)と見積もられ、このように網羅的な解析を実施するのは現実的でない。また、解析条件を絞り込むにせよ、FEMモデルの作成や解析の実施、適切な結果処理を行うには専門的な知識と技術が要求されるが、図面作成に活用する検証ツールとしては、設計実務者に負担を強いることなく、自身で簡単に扱えるという利便性を持つことが望ましい。

そこで、前章までに説明したFEMによる解析のサロゲートモデル化を行い、挿入時の最大荷重予測計算の高速化および簡易化を図った。

7.2　サロゲートモデル構築

モデル構造には、過剰適合を抑えやすく、特徴量重要度の算出により高い解釈性を有するランダムフォレスト回帰(1)を採用し、入力(説明変数)を各形状因子の値、出力(目的変数)を挿入時の最大荷重F_{max}とした(図8)。実装はPythonで行った。また、学習データとして99件の解析結果(FEM)を用い、その中からランダムに抽出した70%を訓練用、残りを検証用とした。

サロゲートモデルによる予測結果とFEMによる解析結果の比較を図9に示す。検証データ(Test set)に対して、決定係数(補足1)は0.74、予測誤差RMSPE

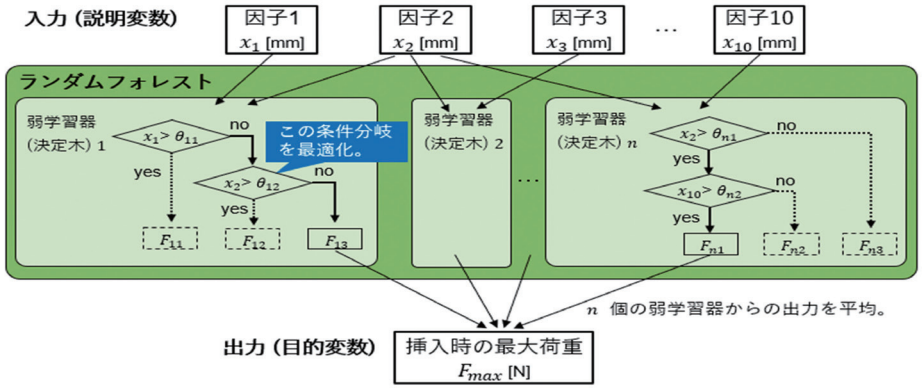


図８　サロゲートモデルの構造

（補足2）は8.0%となった。また、サロゲートモデルの予測結果が第3四分位数（75パーセンタイル）F_{q3}（図9の緑線）を超えるサンプルに対しては、サロゲートモデルがF_{max}を過小評価する傾向にあり、予測誤差が10%を大きく超えるケースも見られた。したがって、サロゲートモデルの使用は、その予測結果が（学習時の）F_{q3}を下回る範囲内にとどめる運用とすることで、F_{max}を大幅に過小評価するリスクを低減する。この時、F_{max}の設計上限値（図9の橙線）はF_{q3}以下であり、予測したいF_{max}の値がサロゲートモデルの適用範囲内に収まっていることが確認できる。また、$F_{max}<F_{q3}$の範囲に限定するとRMSPEは4.4%となり、予測精度の高い条件でサロゲートモデルを利用することができると考えられる。

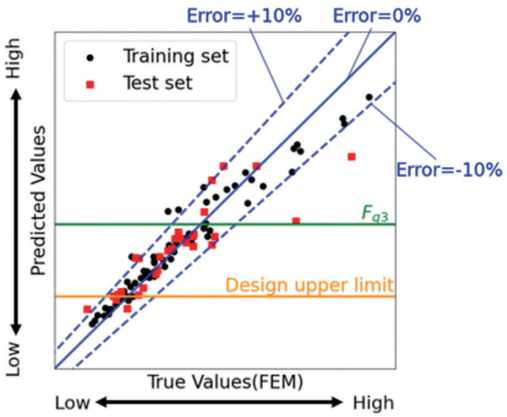


図９　サロゲートモデルの予測と FEM の比較

サロゲートモデルによる予測にかかる時間は、わずか2.3×10^{-5} s/件であり、FEMに対しておよそ10^8倍の高速化を達成した。すなわち、前節で述べた(FEMで3年以上かかる)網羅的な計算を、サロゲートモデルはおよそ1.4sで完了する。また、FEMモデルの作成が不要で、10個の形状因子を入力するだけでF_{max}の予測が可能という簡易性を実現した。さらに、FEMや機械学習の分野に関する高度な専門知識を習得せずとも扱える、Microsoft Excelをインターフェースとしたツールとし、設計実務者にとっての利便性向上を図った。

7.3　挿入角の変化に対する堅牢性向上

ここまで標準形を規定する形状因子のみをサロゲートモデルの入力としていたが、これは汎用性の観点で不足がある。それは挿入方向の変化に対応できないことである。

標準形を規定する因子は、挿入方向と爪の長手方向のなす角（挿入角）の変化に対して不変であるように設定されており、結果として挿入角の変化は爪の実態的な形状変化をもたらす（図10）。すなわち、従来のように形状因子（図10におけるa_1やa_2）のみをサロゲートモデルに入力すると、上記の形状変化の効果が予想結果に反映されないことになり、例えばバンパ正面部と側面部のように、挿入方向が異なる状況に同一のサロゲートモデルを適用できないことになる。

この課題に対して、2種類の対策を講じた。1つは挿入角により変化する実態的な寸法（図10におけるb_1やb_2）を形状因子の代わりに従来のサロゲートモデルに入力して予測する方法（Method1）であり、もう1つは挿入角を説明変数に加えて学習し直す方法（Method2）である。

図11に、挿入角変化に伴うF_{max}の変化について、上記2種類の対策を施したサロゲートモデルで予測した結果をFEMによる解析結果と共に示す。Method1の予測結果とFEMによる解析結果との間には挿入角の大きい条件で乖離が見られるのに対し、Method2の予測結果はあらゆる挿入角においてFEMの解析結果をよく再現している。FEMによる解析結果の分析から、挿入角の変化に伴いカバー爪とバンパ抑え爪の初期接触位置がずれることで、抑え爪の変形メカニズムが変わる様子が確認できており、そのためにMethod1は学習した特徴量空間外にあるサンプルを予測する、いわゆる外挿の状態に陥ったと考えられる。

以上の結果から、Method2を採用し、説明変数に挿入角を新たに加えたモデル構造とすることで、挿入角変化に対する堅牢性の向上を達成した。

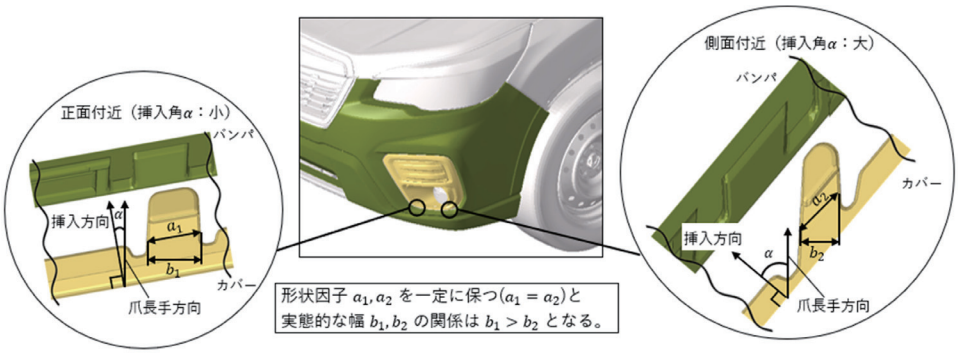


図 10　挿入角の変化に伴う爪の形状変化

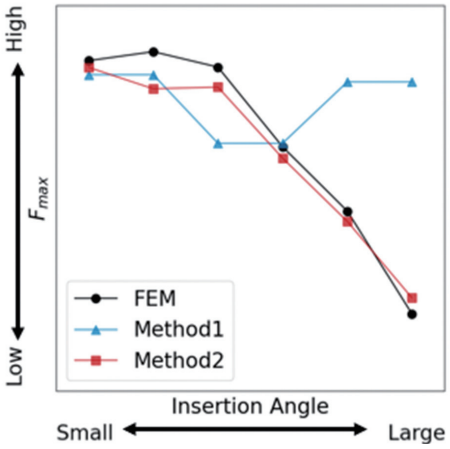


図 11　挿入角変化に伴う挿入時最大荷重の変化

7.4　今後の課題とモデルの応用可能性

樹脂爪による嵌合においては、挿入時の最大荷重予測の他に、組付け作業時の半嵌合防止のため、節度感の検討も課題となりえる。本報では言及していないが、F-S線図の他のピーク値についても同時に予測可能なモデルを作成しており、これを節度感評価などに応用することも可能と考えている。

8．まとめ

バンパに用いられる樹脂爪の挿入力を過去実績に基づいた簡易計算に頼らずに予測する手法として、FEMによる解析技術を確立した。そして、FEMによる解析を利用し、挿入のメカニズム解明や最大荷重に影響を与える形状因子の分析も行い、現象理解を深めた。

さらに、短時間での予測を実現するため、形状因子と挿入角の値から挿入時の最大荷重を予測するサロゲートモデルを開発した。

本報で紹介した樹脂爪挿入時の最大荷重予測手法は、バンパを対象としたものである。しかし、バンパに限らず樹脂爪のような嵌合方法は、車両の様々な部品に使用されており、本手法の応用が期待できる。本報で検討したFEMやAI技術を用いて、更なる嵌合手法の検討ツールを構築・開発し、その運用を目指したい。

（補足1）

決定係数R^2は次式に従い算出した。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2}$$

ここで、y_iは標本値（FEMによる解析結果）、f_iは推定値（サロゲートモデルの予測結果）、$\bar{y}$はy_iの平均値、Nは標本数を表す。

（補足2）

推定値f_iの標本値y_iに対する相対誤差の二乗平均平方根（RMSPE：Root Mean Squared Percentage Error）は次式に従い算出した。

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{y_i - f_i}{y_i}\right)^2}$$

参考文献

(1) L.Breiman: Random Forests, Machine Learning, Vol.45(2001)、p.5-32

【著　者】

新島　隆平

赤石　大地

太田　一宏

自動車通電部位の錆生成に関する机上検討手法

Theoretical Rust Formation Verification Method on Energized Parts in Automobiles

内　田　　晃*
UCHIDA Akira

抄　録

自動車内の大電流通電部位である電源システムの錆生成を机上検討する手法を構築している。電源システムは電場を発生させるため、錆生成に影響する要素を他の部位よりも多く持つ。また、錆が機能失陥を引き起こす部位でもある。その特徴を反映可能な新たな手法構築のため、モデル解析とパラメータ計測が必要であった。それぞれの検討内容と結果を報告する。

Abstract

We are creating a technique that can predict rust formation in power supply systems which are parts exposed to high current in automobiles. Power supply systems have more factors that influence rust formation than other parts because they generate electric field. In addition, they also fall into function failure by rust. To form a new technique which can reflect these characteristics, model analysis and parameter measurement were necessary. This article reports on their examination details and results.

1．まえがき

自動車部品は、その使用過程において、屋外環境に暴露され錆生成の懸念を持つ。生成された錆は部品強度や通電性能、外観に影響を与え車両性能を損なう。電源システムにおいても同様であり、例えば、電気端子が錆により減肉した場合、脱落・通電不良を引き起こす可能性がある。加えて､車両の他の部品と異なり、電源システム部品はその機能のために常態的に通電を行う必要があり、自身の発生電場が錆生成に影響する可能性を持つ。しかし現在、車両の発生電場を考慮した机上検討は多くなく、成立性判断は部品製作後の評価に頼るところが大きい。初期設計段階での最適化や網羅的検証は難易度が高く、結果として設計変更のリスクを抱える。上記の課題を解決するため、手法の確立を試みた。

2．本検討の前提、対象、方法の全体像

本手法が目指す導出対象は、各開発での部品仕様と付着水溶液仕様に応じた錆生成速度である。導出した速度を活用することで、通電部品の強度・電気要件の成立性判断が可能となる。例えば、錆による端子減肉が車両ライフサイクルで1mm見込まれるとの見通しが立てられれば、その厚み分を考慮した条件で強度検討を行うことが出来る。

2.1　検討の前提

広く知られている通り、錆生成は対象金属が接触水溶液中にイオン析出することで進行する(図1)。イオン析出の過程においては、金属原子から電子が放出されることが必要であり、その電子移動は金属内電気勾配や異種金属接合時の自然電位差、そして今回検討対象である外部からの印加電圧を元として生じる。

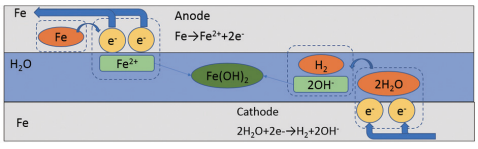


図１　錆生成とイオン析出模式図

＊ パワートレイン設計部

また、その定量的要素として金属界面部での電荷移動抵抗や水溶液中の反応種の拡散・泳動・対流による拡散抵抗が存在する(図2)。これらの抵抗成分について多数の研究が行われているが、対象材料や溶液成分および環境によって変わるところが大きく、一般化はなされていない。

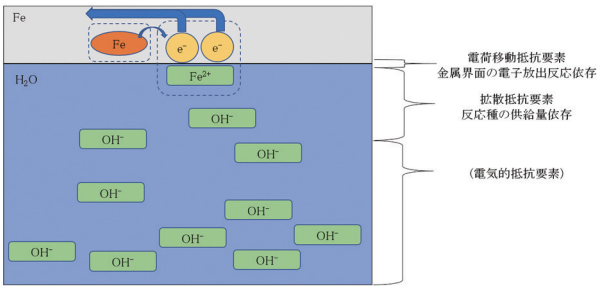


図２　イオン析出時の抵抗要素

自動車の市場製品の製作への活用を目的とすることから、検討対象や方法を下記の通り絞り込んだ。

・自動車部品に水溶液が付着した形態

・金属種類は通電部で使用の多いFe、Cu、Al

・水溶液抵抗はアノード・カソード要素の分解を行わず、金属2枚の一括抵抗を使用

以下、Fe材での検討内容を記す。

2.2　検討対象

(1)電源系統の端子接続部への水溶液侵入(図3)

対象とした理由は、常態的に外部電場が印加されており、特にオルタネータやDCDCコンバータなどの出力線では大電流が常時通電されること、開発都合により異種金属接合が発生する可能性があること、端子の平面度や面粗度によって侵入量が変化することなど、生成を促進変化させる要因を複数含むためである。

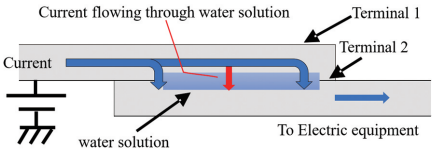


図３　端子接続部への水溶液侵入

(2) 12V系統と車体グランドとの水溶液短絡(図4)

端子接続部と比較すると、通電距離が長いことや通電時間が限定的である緩和要素を持つ。一方で、12V系統とグランドの電位差が直接印加されるため、外部電場強度が大きいという促進要素を持つ。

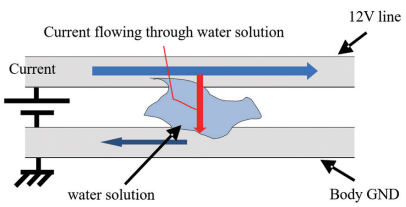


図４　車体グランドとの水溶液短絡

2.3　全体像

2.2の2つの対象を検討可能とするため、モデルによる机上解析と実機計測を行った。検討の流れを下記および図5に示す。

(a)端子接続模擬モデルを作成

(b)対象金属と水溶液での電気伝導度を実測

(c)モデル各部に電気伝導度を設定

(d)有限要素解析によりモデル各部の電流量を算出

(e)電流量から錆生成量を換算

(f)実物の計測結果との相関取りとモデル修正

作成の中で、モデルパラメータとなる水溶電気伝導度については、独自に水溶液中抵抗値の実機計測を行い取得した。

図５　検討の流れ

3．解析モデル

2.2の図3のケースに対する検討を示す。Fe材の電源端子接続部に水溶液が侵入した状態を想定した。概要図を図6および図7に示す。2枚のFe材を並べて設置し、接続部がFe材同士の直接接続と水溶液(5%NaCl)介在接続が複合する形態とした。接続部を10×10の格子状パネルに分割し、全体の1割(10パネル)が水溶液により接続された構成とし、パネルごとの電流分布を算出できるよう設定した。接触部の厚みは1mmと実製品と比べると非常に大きい値であるが、実測値との相関取りを優先し、初期設定した。電源端子を模擬していることから、端子全体に100Aの大電流が流れるよう境界条件を設定した。またパネルごとに通過電流を解析算出して、金属部から水溶液中に流出する電流値を取得した。初期段階では、解析メッシュの設定により、パネルごとの電流値の総計と境界条件の電流値に差が発生したが、最大メッシュサイズを2mmに調整し、最終的に誤差1%以下に収束した。

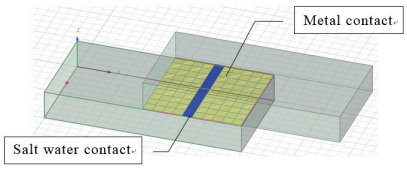


図６　解析モデル鳥瞰図

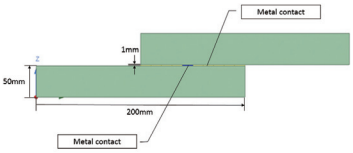


図７　解析モデル側面図

[解析条件]
導体寸法：200mm × 100mm × 50mm
接触部寸法(1パネル)：10mm × 10mm × 1mm
メッシュサイズ：2mm
通電電流：100A

4．水溶液電気伝導度の計測

4.1　計測設備

設定パラメータのうち、水溶液の電気伝導度に実測値を使用した。計測設備を図8および図9に示す。2枚のFe材を作成し、電圧印加用の電源を接続した上で正対させ、5%塩水中に浸漬させた。浸漬面積は25cm^2である。電源電圧を段階的に増加させて電流値を都度計測し、換算することで電気伝導度を取得した。複数の車両条件への適用を見越し正対距離を変えて繰り返し計測を実施した。

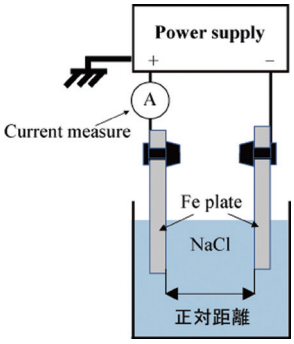


図8　計測設備模式図

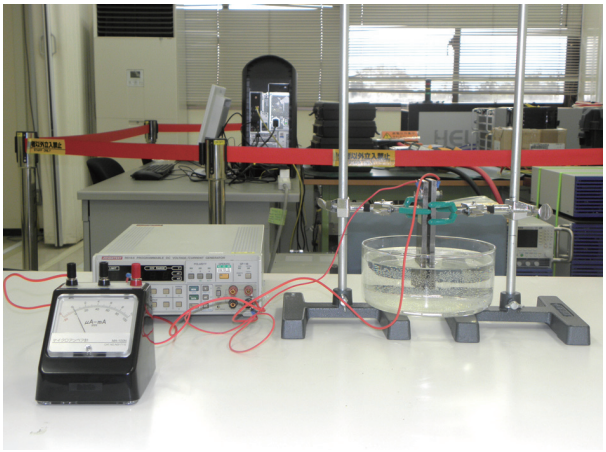


図9　計測設備写真

4.2　計測結果

計測した水溶液電気伝導度を図10に示す。VoltageはFe材間の印加電圧、各系列は正対距離の別を表す。

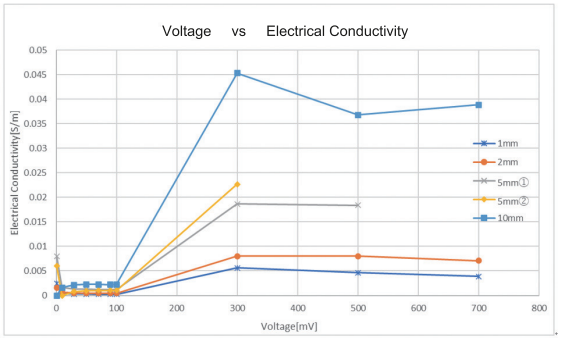


図 10　水溶液電気伝導度

大きく2つの特徴がみられた。

(1)印加電圧＞100mVで電気伝導度が急増する

印加電圧が100mVから300mVへ変化した際、電気伝導度が10倍以上に増加した。正対距離により差はあるが定性的には類似の傾向を示している。メカニズム検証は行えていないものの、反応律速が電荷移動抵抗から拡散抵抗へと切り替わったためと推察する。本電圧域は、近年の車両電源仕様において実存しうる領域であり、注目が必要である。

(2)正対距離と電気伝導度に正の相関がある

計測前の予測と異なった結果である。通電距離の増加に伴い伝導度が減少すると見込んでいたものの、実際には逆の傾向となった。(1)と同様に未検証であるが、金属間の体積増大による拡散抵抗の低下が距離増加の影響を打ち消すだけの効果を与えたものと推測する。実際の車両部品の検討では端子間の正対距離をより微小であり、外挿方法を検討する必要がある。

Fe材の計測前後の写真を図11に示す。図の左側は正対面、右側はその裏面である。アノード側に錆が生成されており、水溶液中への電流流出があったことが推定できる。同時に、正対面以外では錆生成がみられないことから、意図しない面からの周り込み電流は小さく、計測電流値への影響が小さいことが期待できる。

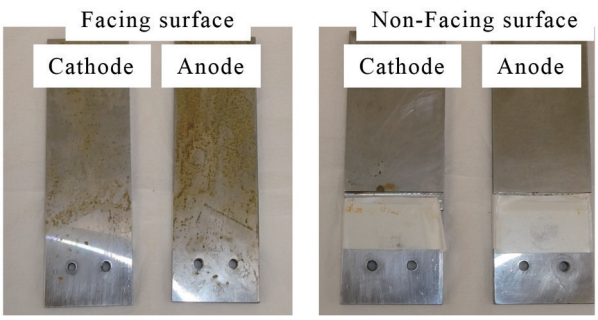


図 11　電気伝導度計測に用いた Fe

5．解析計算

5.1　条件

モデルの水溶液伝導度に以下①～③の値を設定し、それぞれ電流解析を行い水溶液中の電流密度を算出の後、F式(A)にて1secあたりの錆生成速度に換算した。

①海水電気伝導度

4 [S/m](S：ジーメンス)

②正対距離1mm　印加電圧0.1Vの実測値

0.3×10^{-3} [S/m]

③正対距離1mm　印加電圧0.3Vの実測値

5.6×10^{-3} [S/m]

電流密度から錆生成速度への換算は下式にて行った。

錆生成速度[m^{-3}/s]

＝電流×分子量÷イオン価数÷e÷NA÷密度(A)

NA：アボガドロ定数=$6.02214076 \times 10^{23}$

e：電気素量=$1.602176634 \times 10^{-19}$ [C]

Fe分子量：55.845 [g/mol]

Feイオン価数：2

Fe密度：7.874 [g/cm^{-3}]

5.2　結果

条件とする電気伝導度に差があることから、解析結果にも対応した差が発生すると予測していた。しかし、実際にはその差は非常に小さく、有効数字5桁まで分解能を上げて確認しても同一の値を示した。結果を表1に統合して示す。結果に差が発生しなかった要因は、金属と水溶液の伝導度の差に対して水溶液条件間の伝導度の差が非常に小さく、全体の電流分布に影響を与えていないことと推測する。解析自体の誤りも疑ったが、検証的に電気伝導度を十分に大きくした際には結果変化が生じ、妥当性を確認した。各結果は図6で示した水溶液接続の10パネルそれぞれに対応している。また錆生成速度は、仮に全面腐食により均一に錆生成が発生すると仮定した場合の、金属厚みの減少速度に相当する。

表1　錆生成速度解析結果

No.	電流密度[A/cm^2]	錆生成速度[μm/s]
1	4.5761×10^-2	1.7
2	3.8799×10^-2	1.4
3	5.5542×10^-2	2.0
4	4.7689×10^-2	1.8
5	2.8867×10^-2	1.1
6	3.3654×10^-2	1.2
7	4.0485×10^-2	1.5
8	4.5850×10^-2	1.7
9	5.8257×10^-2	2.1
10	5.4799×10^-2	2.0

結果として、導かれた錆生成速度は自動車に求められる信頼性寿命を考慮すると非常に高速である。例えば、1mm程度の錆変化は端子の強度や機能に有害な影響を与えることが想定され、それが10hour以下の時間で行われることになる。通電部の特徴として考慮すべき結果を得た。

6．まとめ

6.1　今回成果

(1)モデル解析とパラメータ計測により錆生成速度を算出する手法を構築した。

(2)水溶液電気伝導度の計測環境を構築し、値および特徴を取得した。

(3)今回設定した金属および水溶液の条件において錆生成速度は非常に高速であり、通電部の特徴として考慮が必要であることが判明した。

6.2　今後の展望

(1)実測結果との比較を通じ精度の向上をはかる

(2)検討可能対象を拡大し量産開発への適用をはかる

(3)結果への影響が予想される下記に関して検討を拡大し、手法と知見の発展をはかる

①金属接触抵抗値設定の詳細化

②水溶液付着形状の変更、細分化

謝　辞

本検討にあたり、種々のご助言をいただいた、東北大学 武藤泉教授、西本昌史助教、産学連携機構様に、この紙面を借りて御礼申し上げる。

参考文献

(1) 日本鉄鋼協会：鉄鋼便覧　第3巻　材料の組織と特性
(2) 武藤　泉：屋外待機腐食環境のモデリングとそれに基づく低露点型サイクル腐食試験法の開発、材料と環境47(1998)
(3) 西方　篤：腐食の電気化学基礎　-腐食の速度論-、材料と環境、66 (2017)

【著　者】

内田　晃

SUBARU「レヴォーグ」改良モデルを発表

2023年10月25日

今回の改良では、ステレオカメラに加えて広角単眼カメラを搭載した新世代アイサイトを装備しました。また、デジタルマルチビューモニター機能に４つのカメラから取り込んだ映像を合成して車両周囲360°映し出す3Dビュー表示や、車速15km/h未満時に自動でフロントビューとトップビューを表示するAUTOモードを加え、死角を減らすことで安全性能を高めました。加えて、「STI Sport EX」、「STI Sport R EX」にウルトラスエード®シートを装備した特別仕様車「Black Interior Selection」を追加しました。

レヴォーグ「STI Sport EX Black Interior Selection」

増速機構を用いたAWD車両挙動のメカニズム解析

Mechanism Analysis of Vehicle Dynamics Using Wheel Speed-up System for AWD

山崎 義暢 *1
YAMAZAKI Yoshinobu

伊藤 奨 *2
ITO Susumu

藪崎 佑介 *1
YABUSAKI Yusuke

小野 瞭 *3
ONO Akira

柿原 裕介 *2
KAKIHARA Yusuke

川原﨑 洋文 *1
KAWARAZAKI Hirofumi

清水 友博 *2
SHIMIZU Tomohiro

小栗 昌己 *1
OGURI Masami

青木 亮治 *1
AOKI Ryouji

抄 録

BEVにおいては前後独立の動力源が主流となっているが、雪路のような路面摩擦係数の低い状況において、プロペラシャフト付きのAWD車両と挙動を比較すると、車両安定性の低下が確認されている。これはプロペラシャフトによる前後輪の差回転拘束が無いことに要因があると推測される。すなわち、前後輪の回転数差を制御することによる車両運動への効果を明らかにすることが、BEVの前後独立モータ制御を改善していく一助になると思われる。

前後輪の差回転が前後軸間トルクフローや車両挙動に及ぼす影響に着目し、プロペラシャフト付き増速システムにて解析と実車検証を実施した。結果を基に旋回中の回頭性と安定性にフォーカスしたメカニズムを報告する。

Abstract

In recent years, BEVs with dual-motor AWD have been more popular than those with single power source and conventional torque distribution systems.

Previous studies have shown that restraining the speed ratio between the front and rear axles is effective in improving vehicle dynamics during cornering.

In this paper, we describe the effect of the reaction of the longitudinal torque distribution caused by the presence of the propeller shaft and the effect of the speed ratio constraint using the wheel speed increase system.

1. まえがき

ALL Wheel Drive(以下 AWD)は、雪路のような滑りやすい路面でのトラクションや車両挙動の安定性を向上する効果があり、これまで各社様々な検討が行われてきた[(1)(2)(3)(4)(5)]。

エンジンを動力源に持つフルタイムAWD車は、従来の1つの動力源による駆動トルクをトランスファとプロペラシャフトで前後に配分する方式に対し、Battery Electric Vehicle(以下BEV)においては前後独立の動力源(2モータ式)が主流となっている。2モータ式AWDでは、原理上前後トルク配分を自在に決定できるため、車両の走行状態に応じた駆動力配分制御を実現することができる。しかし、走行試験の結果として、特に雪路のような路面μの低い状況において、同等の車両諸元を有するプロペラシャフト付きのAWD車両と挙動を比較すると、操舵に対するヨー応答ゲインは前後モータの制御により目論見どおりに実現できる一方で、高速域での車両安定性の低下が確認されている。これは前後輪の差回転拘束が無いことに要因があると推測される。

本稿では、前後輪間の回転数比で前後駆動力配分を制御する事を狙い増速機構を適用。前後輪の差回転による車両運動への影響メカニズムを明らかにすることを目的に、前後輪の駆動力とタイヤ力の関係、それに基づく車両運動解析と前後増速機構を用いた実車による検証を行い、前後輪間のトルクフローと車両運動に与える影響をまとめる。

＊1 パワートレイン設計部
＊2 車両運動開発部
＊3 車両環境開発部

2．前後輪の駆動力と車体横力、ヨーモーメントの関係

2.1　前輪の駆動力と車体横力の関係

簡易的な現象把握を目的として、前輪駆動車と後輪駆動車の2仕様を用いて、前輪偏重トルク配分と後輪偏重トルク配分の車両における挙動差を比較する。

前輪に働く駆動力、及び横力が車体横力へ及ぼす影響を図1に示す。前輪駆動車では、前後力F_{xF}の舵角成分sin(δ)を車体横力として使えるため、スタッドレスタイヤのようなスリップ率増加に対する横力F_{yF}の落ち方が大滑り角で緩やかになる特性を持つタイヤでは、駆動力による車体横力の旋回成分への影響が大きくなると仮説を立て、2輪車両モデル(図2)を用いた理論検討を行った。

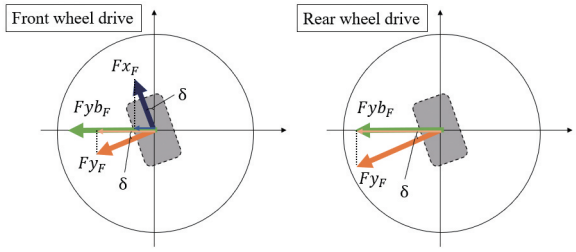


図1　前輪の車体横力

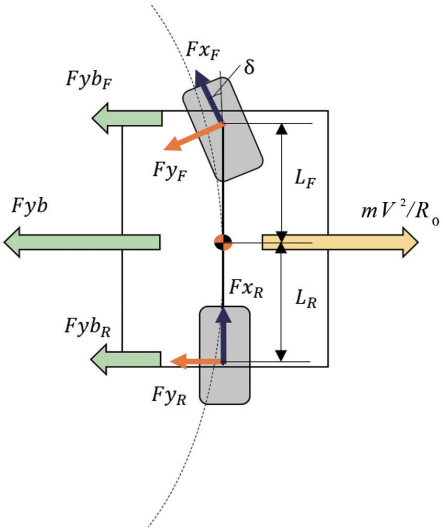


図2　2輪車両モデル

図中の記号は下記のとおりである。ただし添え字Fは前輪、Rは後輪、lは左輪、rは右輪を表す。

F_x：タイヤ前後力　F_y：タイヤ横力

F_{yb}：車体横力

L：前後軸―重心間距離

δ：前輪舵角　R_0：旋回半径　V：車体速度　m：車両重量

β_F，β_R：タイヤ横滑り角

2輪モデルより、前後軸のタイヤによる車体横力はそれぞれ以下の式(1)～(3)で表現される。

$$2 \cdot Fyb_F = Fyb_{Fl} + Fyb_{Fr} \quad (1)$$

$$2 \cdot Fyb_R = Fyb_{Rl} + Fyb_{Rr} \quad (2)$$

$$Fyb_F = Fx_F \cdot sin(\delta) + Fy_F \cdot cos(\delta) \quad (3)$$

上記の式(3)に関して、Fx_F，Fy_Fは前後それぞれのタイヤのスリップ率と滑り角、および摩擦円(路面μ)の限界によって変化する。本稿では駆動時のスリップ率Sを式(4)で定義し、図3に示すタイヤ特性を用いて車体横力を算出する。

$$S_F = \frac{r \cdot \omega - v \cdot cos\beta_F}{r \cdot \omega} \quad , \quad S_R = \frac{r \cdot \omega - v \cdot cos\beta_R}{r \cdot \omega} \quad (4)$$

S：スリップ率　r：タイヤ転がり半径

ω：タイヤ回転角速度　v：タイヤ接地面速度

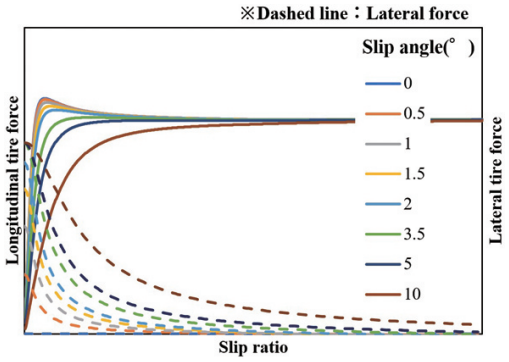


図3　スリップ率とタイヤ前後力・横力の関係

同一車速と仮定した場合の駆動力配分違いによる車体横力の結果を図4に示す。なお、条件(a)は旋回半径が大きく、条件(b)は旋回半径が小さい。

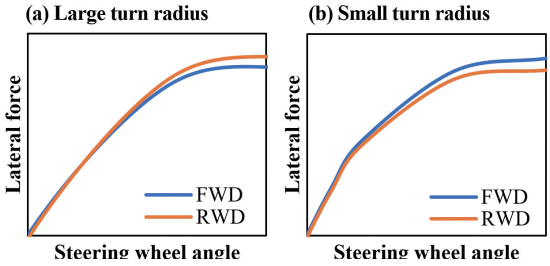


図4　車体横力とハンドル角の関係

条件(a)では全域で後輪駆動車の車体横力の方が大きいが、条件(b)では前輪駆動車の車体横力が大きくなる領域があることがわかる。走行条件によっては前軸駆動力の舵角成分$Fx_F \cdot \sin(\delta)$の影響が相対的に大きくなり、前輪偏重の駆動力配分の方が大きい車体横力となる走行状況があることを確認した。

2.2　前後軸の駆動力とヨーモーメントの関係

駆動力、前後輪の差回転、タイヤのスリップ率、車両前後軸位置の旋回半径と車両に付与されるヨーモーメントの関係を考察する。本章では、図5に示すように駆動トルクを前後に分配するセンターディファレンシャルギヤと、後輪(または前輪)の回転を所定の比率で前輪(または後輪)より増速した状態に拘束する差動制限クラッチを有したAWDシステムを対象とする。

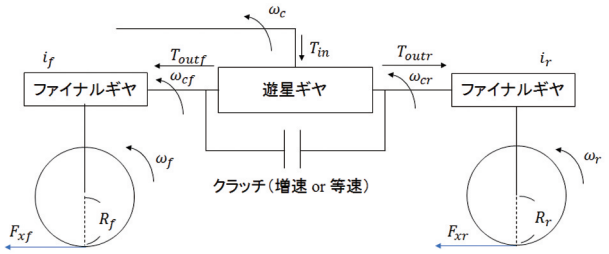


図5　AWDシステム構造図

記号は下記の通りである。ただし添え字fは前輪、rは後輪を表す。

T_{in}：トランスファ入力トルク

T_{outf}、T_{outr}：トランスファ前後出力軸のトルク

ω_c：トランスファ入力軸の回転速度

ω_{cf}、ω_{cr}：トランスファ前後出力軸の回転速度

R_f、R_r：前後タイヤの転がり半径

i_f、i_r：前後輪軸のファイナルギヤ比

a：トランスファ前後出力軸の回転速度比
(=1：等速、>1：後輪増速、 <1：前輪増速)

ω_f、ω_r：前後タイヤ回転角速度

V_f、V_r：前後タイヤ接地点の路面速度

S_f、S_r：前後輪のスリップ率

K_f、K_r：前後タイヤのドライビングスティフネス

以降、数式の意義を見やすくするため、下記の換算係数を用いる。

d_f、d_r：換算係数
γ_f、γ_r：換算係数
j：換算係数

$$\frac{R_f}{i_f} = d_f \qquad \frac{R_r}{i_r} = d_r \qquad \frac{\gamma_r}{\gamma_f} = j$$

$$\frac{i_f V_f}{R_f} = \gamma_f \qquad \frac{i_r V_r}{R_r} = \gamma_r$$

差動制限クラッチを締結した場合、動力源からの入力トルクTinと、前輪への分配トルクT_{outf}および後輪への分配トルクT_{outr}の関係は式(5)のとおりである。

$$T_{in} = (T_{outf} \cdot \omega_{cf} + T_{outr} \cdot \omega_{cr}) / \omega_c$$
$$= d_f K_f (1 - \frac{\gamma_f}{\omega_{cf}}) \cdot \frac{\omega_{cf}}{\omega_c} + d_r K_r (1 - \frac{1}{a}\frac{\gamma_r}{\omega_{cf}}) \cdot \frac{\omega_{cr}}{\omega_c} \qquad (5)$$

タイヤ前後力F_{xf}、F_{xr}を表すと式(6)となる。

$$F_{xf} = K_f \frac{T_{in} - (1 - \frac{1}{a}j) d_r K_r}{d_f K_f + \frac{1}{a} j d_r K_r}$$
$$F_{xr} = K_r \frac{\frac{1}{a} j T_{in} + \left(1 - \frac{1}{a}j\right) d_f K_f}{d_f K_f + \frac{1}{a} j d_r K_r} \qquad (6)$$

前後輪回転速度の関係は式(7)、前後輪のスリップ率は式(8)になる。前輪増速率と後輪増速率は3%に設定した。

$$\omega_{cr} = a\omega_{cf} \qquad (7)$$

(等速 a=1、前輪増速 a =0.97、後輪増速 a =1.03)

$$S_f = (1 - \frac{\gamma_f}{\omega_{cf}}) \qquad S_r = (1 - \frac{1}{a}\frac{\gamma_r}{\omega_{cf}}) \qquad (8)$$

タイヤが路面摩擦係数(以下、路面μ)に応じた最大の力を発生していると仮定すれば、タイヤの摩擦円の考え方から、タイヤの前後力F_x、及び横力F_yと路面の摩擦係数μ、垂直荷重Fzの関係は式(9)となる。

$$F_y = \sqrt{(\mu F_Z)^2 - {F_x}^2} \qquad (9)$$

式(5)および式(6)より、タイヤ接地点の路面速度比(Vr/Vf)から計算した前後軸の旋回半径比に対する前後駆動力の関係を示すと図6となる。ここで前後等速、前後輪増速および前後独立駆動の場合を比較すると、前後増速比と駆動力配分の変化に一定の相関がある事がわかる。

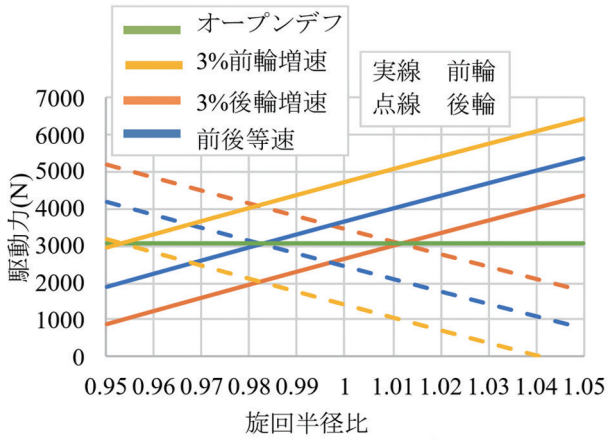


図６　旋回半径比に対する前後輪駆動力の関係

式(6)および式(9)より、旋回半径比に対する旋回方向のヨーモーメントMzの関係を示すと図7となる。車両に付与されるヨーモーメントに着目すると、プロペラシャフト付きの車両においては、前後軸の旋回半径比が大きくなる、すなわち前軸の走行軌跡が後軸より旋回内側になると車両への旋回方向のヨーモーメントが減少する(①)。後輪の回転増速により後輪の駆動力を増加させると式(9)の関係より、後輪の横力が減少し旋回方向のヨーモーメントが増加する (②)。同様に前輪の回転増速により旋回方向のヨーモーメントは減少する (③)。前後軸間の回転拘束が無く、前後トルク配分を50：50とした仕様では、ヨーモーメントは前後軸位置の旋回半径比によらず一定となる(④)。

以上により、前後軸の旋回半径比と車両へのヨーモーメントおよび増速の関係を定性的に捉えることができる。

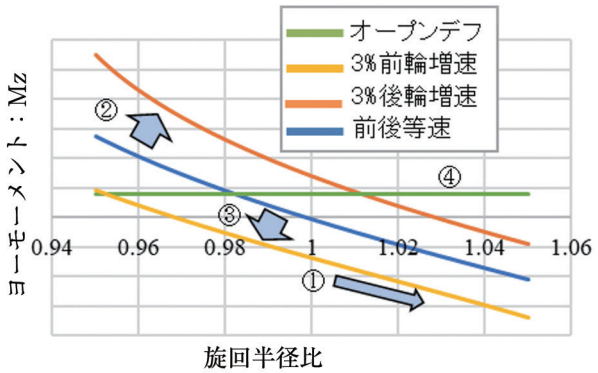


図７　旋回半径比とヨーモーメントの関係

３．車両運動解析

前章のメカニズムを基に、駆動力配分や前後輪の回転数が車両運動に与える影響をシミュレーションモデルにて解析する。解析条件は湿潤路面～圧雪路を想定して路面 μ を0.6とし、旋回半径はR15とした。以降の説明では、分析区間を図8に示すような2つに分割する。直進からアクセルをオフにし、ステアリングを切ってコーナーに進入する区間をターンイン、アクセルを踏み込んでコーナーから脱出する区間をターンアウトとする。ドライバー入力操作は目標車速と目標軌道を追従するように制御した。

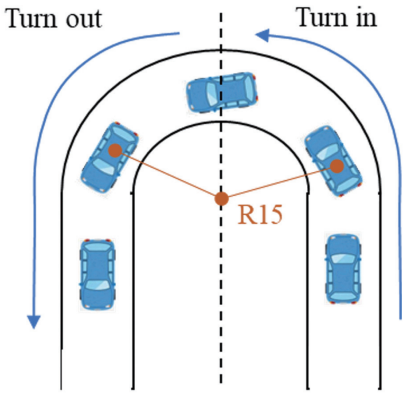


図８　走行経路

本章では、2.1節で示した仮説「前輪偏重の駆動力配分の方が大きい車体横力となる走行状況があること」を検証するため、ターンインでは前輪を3%増速したAWDシステムと後輪駆動(以下、RWD)を比較する。また、2.2節で示した仮説「前後軸の旋回半径比と車両へのヨーモーメントおよび増速の関係」を検証する為、ターンアウトではヨーモーメントによる適度な車体姿勢を実現しやすいと考えられる後輪を3%増速したAWDシステムとオープンセンターデフで基本配分を50:50とした仕様(以下、Open)を対象に車両挙動を確認する。解析条件の組合せを表1に示す。本稿の車両座標系はISO8855-2011規格で定義されている座標系とする(図9)

表１　解析で比較する駆動方式

	ターンイン	ターンアウト
後輪駆動(RWD)	○	-
オープンセンターデフ (Open)	-	○
前輪増速 AWD (3%増速仕様)	○	-
後輪増速 AWD (3%増速仕様)	-	○

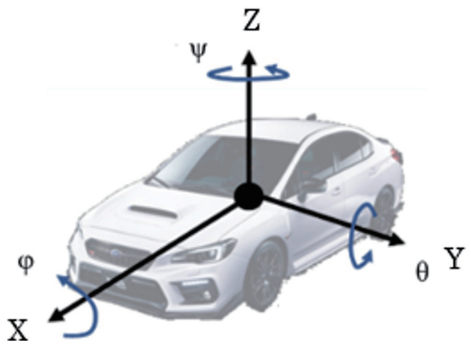


図9　車両に固定した座標系

3.1　ターンインの解析

ターンインにおける車両挙動をRWDと前輪を3%増速したAWDシステムで比較する。車速30km/hでコーナーに進入する走行状況でのハンドル角に対する横加速度を図10、前後軸の駆動力を図11に示す。図10より前輪3%増速仕様の方が操舵に対する横加速度が大きくなっていることがわかる。図11の駆動力に着目するとプロペラシャフトにより前後軸が拘束されている前輪3%増速仕様では前輪が駆動、後輪が制動となる状態から、操舵角の増加に伴い前輪駆動力、後輪制動力が徐々に減少していくことがわかる。これは図6から分かるように、操舵初期の旋回半径比が大きな走行状態から操舵角の増加に伴い旋回半径比が減少したことが原因である。

ターンインでは前輪増速により前輪駆動力を大きくとることで、ハンドル角に対する横加速度を大きくすることができる。

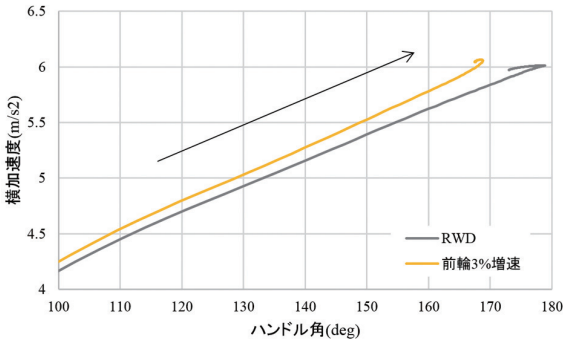


図10　ターンインにおけるハンドル角に対する横加速度

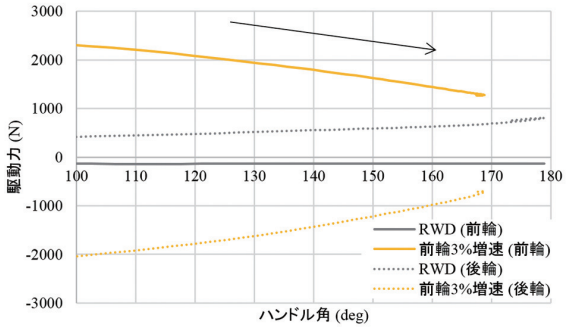


図11　ターンインにおける前後軸の駆動力

3.2　ターンアウトの解析

ターンアウトにおける車両挙動をOpenと後輪を3%増速したAWDシステム仕様で比較する。車速30km/hからR15のコーナーを緩加速で脱出する走行状況での、車体横滑り角βに対する滑り角速度$\dot{\beta}$の関係を図12、前後軸の駆動力を図13に示す。図12を見ると後輪増速AWDの方が同じ車体滑り角での$\dot{\beta}$が収束傾向であり、車体滑り角の増加(スピン傾向)が穏やかになっていることが分かる。また、図13に示すように、後輪増速AWDではβに応じて駆動トルクの配分率(前後軸トルク/総トルク)が変化している。

これは、車体滑り角の増加(旋回内向き)に伴い、旋回半径比も増加するため、図6に示す関係より前後軸のトルク配分が変化するためである。これにより、一定以上のβが発生した場合には後輪に対し前輪の前後力が大きくなり、横力は前輪側で減少する一方で後輪側では増加する。これにより、旋回方向のヨーモーメントを抑える働きが発生する。これは、プロペラシャフトで前後輪がつながっていることで、前後の回転数差からトルク移動が発生しているためである.。

このように、プロペラシャフトで前後輪の回転数比を拘束できるAWDでは、前後のトルク移動により、回転数比の設定に応じた旋回姿勢へ安定させる効果が期待できることが解析で確認できたため、実走行での実機検証を行った。

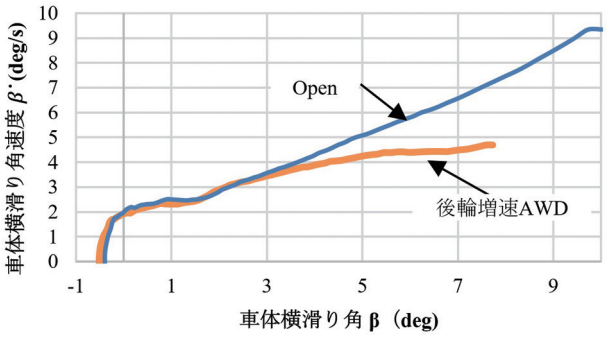


図12　ターンアウトにおける車体横滑り角と滑り角速度

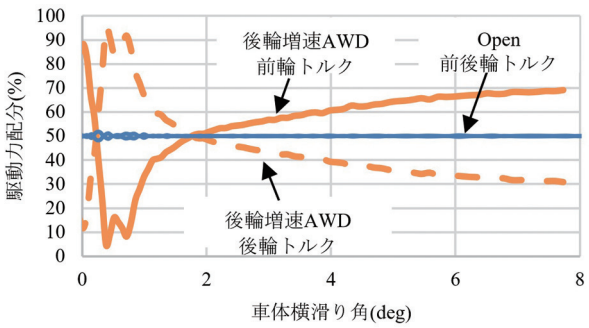


図13　ターンアウトにおける車体横滑り角と駆動力配分

4．検証方法

前後輪の差回転拘束の有無が車両挙動に与える影響の検証車両には、以下に述べる2種類のAWDシステムを用いた。

1）　前輪増速システム：後輪駆動ベースのカップリング式AWDを用い、1つのクラッチから構成される前輪増速機構を設けた(図14)。

2）　後輪増速システム：センターデフ式フルタイムAWDを用い、2つの遊星ギヤと2つのクラッチから構成される後輪増速機構を設けた(図15)。

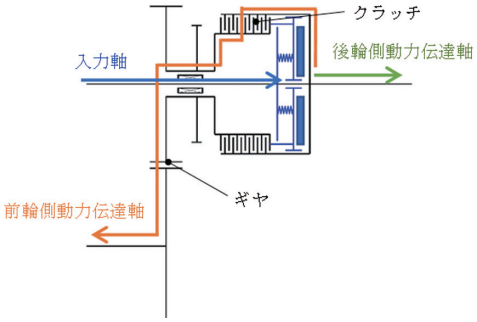


図14　前輪増速システム

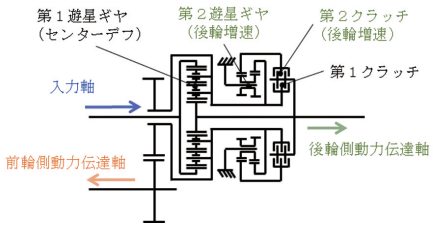


図15　後輪増速システム

5．実車評価結果

雪路にて検証試験を行い、比較した駆動方式と走行状況は3章の表1と同様とした。

5.1　ターンイン（前輪増速）

試験条件は解析と同様にR15、車速30km/hとし、①後輪駆動(RWD)、②前輪3%増速の2仕様で計測を行った。

図16に操舵角に対する横加速度の関係、図17に前後輪アクスルシャフトトルクを示す。図16より前輪3%増速はRWDと異なり舵角に対して横加速度の線形性を持っていることが分かり、以下の要因が考えられる。

1) 前後差回転拘束力の有無により路面状態が安定しない走行シーンでは、タイヤのスリップ率が変動しやすく、その変動に応じた横力変化が起こり得る。そのため、差回転拘束力を持たないRWDは舵角に対しての横加速度が安定しなかったと考えられる。

2) 前輪増速の影響により、図17に示すように前輪3%増速はRWDと比較して前輪の駆動トルクが大きい。従って、舵角成分sin(δ)を車体横力として使える。

2章および3章の検討結果より、本評価のタイヤ特性、及び旋回半径においては、駆動トルクによる車体横力の増加成分がタイヤスリップ率増加による横力の減少分よりも大きくなり、これが前輪3%増速の高舵角域での線形性に寄与したと考えられる。

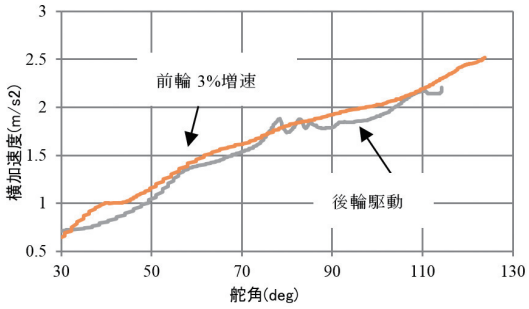


図16　舵角に対する横加速度の比較

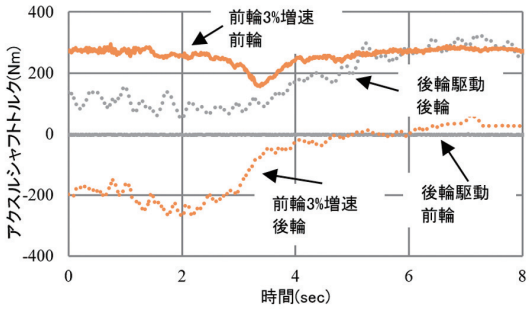


図17　前後輪アクスルシャフトトルク

5.2　ターンアウト(後輪増速)

試験条件は解析と同様に旋回半径R15とし、前後輪の差回転拘束が無く、①前後50:50拘束無し(Open)、②3%後輪増速の2仕様で計測を行った。

図18に後輪3%増速の車体横滑り角、図19にOpenの車体横滑り角(以下β)、図21に車体横滑り角とトルク配分の関係を示す。後輪3%増速ではアクセル操作に対してタイムラグなくβが変化しているが、Openはアクセル操作に対してβの発生が遅れている。図18と図21の(a)領域に示すように、後輪3%増速では、後輪増速によりトルク移動が発生し、アクセルオン時の姿勢から、Front＜Rearの駆動トルク配分となり後輪の横力が減り、アクセル操作と同時にβが旋回内向きに増えている。

また、βが旋回内向きに大きくなり過ぎた後は、前後差回転拘束の影響で、前後輪の旋回半径比の変化に伴うプロペラシャフトによるトルク移動により、(b)領域のように前輪へのトルク配分が増加することで旋

回外向きのヨーモーメントが発生し、βの増加を止める力となる。

一方、Openではβによらず前後等トルク配分なので、アクセル操作に応じたβの変化が起きにくいことと、車速の上昇に伴って旋回横加速度が増加し、接地荷重に対して駆動トルクが大きい後輪でタイヤ横力による摩擦円飽和が急激に起こるため、2次曲線的にβが旋回内向きに増加しているのがわかる(図19)。

これはプロペラシャフトを介した前後トルク移動が無く、βが変化しても前後トルク配分は変化せず、βの変化を抑制するヨーモーメントが発生しないためである。β - $\dot{\beta}$ の図(図20)を見ても、後輪3%増速の方が車体滑り角の安定性を有していることが分かる。このようなプロペラシャフトを介したトルク移動によって、後輪偏重のトルク配分に設定した車両であっても車両姿勢の安定性を付与することが可能であることが実車でも確認できた。

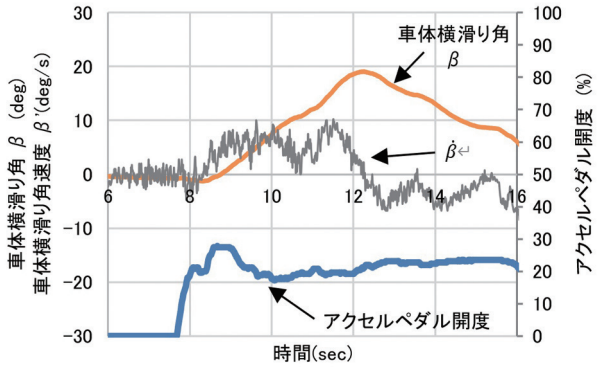


図 18　後輪 3% 増速の車体横滑り角

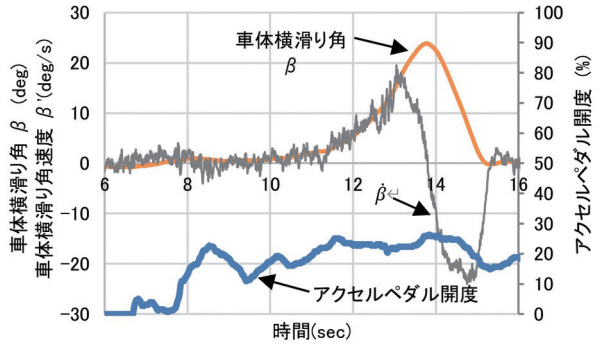


図 19　Open の車体横滑り角

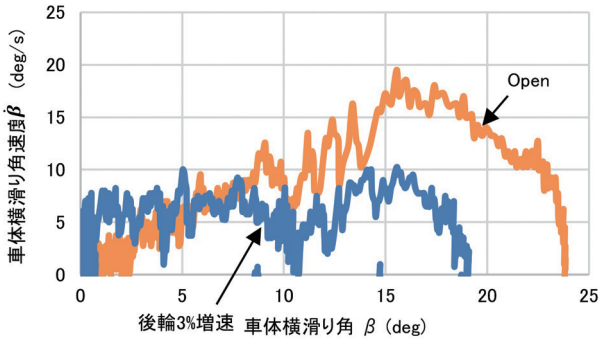


図 20　車体横滑り角と車体横滑り角速度の関係

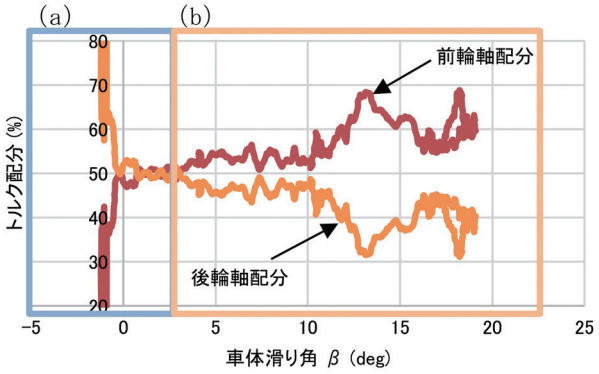


図 21　後輪 3% 増速の車体横滑り角 とトルク配分の関係

6．まとめ

プロペラシャフト付きAWDに増速機構を設けた車両の旋回時前後輪間トルクフローと、それによる車両挙動への影響について、メカニズム検証を行い、以下の結果を得た。

(1) ターンインでは前輪の駆動力を車体横力として使用することができるため、前輪増速とすることで舵角に対する横加速度が大きくなる走行条件がある。

(2) ターンアウトでは、後輪増速により狙いの走行軌跡に向けて車両重心点の横滑り角が付けやすくなる。

(3) 前後輪の差回転拘束は、車両重心点の横滑り角速度の低減に効果がある。これは、車両重心点の横滑り角が旋回時タイヤ力の静的なつり合いへ向かうように、車両のヨーモーメントを増大または抑制するように制駆動トルクの前後移動が起こることによる。

走行状態に応じた前後輪の差回転と車両挙動の関係メカニズム解明は、車両の安定性と運動性能の両立に貢献できる。今後、BEVの前後独立2モータ式AWDに対して、本稿の増速による効果と原理を活かしたAWD制御により、車両の運動性能と安定性の更なる両立を目指す。

参考文献

(1) 美辺暾ほか：四輪駆動車の操安性について、自動車技術、Vol.40 No.3、p.284-289(1986)
(2) 石井孝憲ほか：車両運動性能を向上させる軽量な4WDシステム、自動車技術、No.133-09、p. 19-22(2009)
(3) 鈴木伸一：小型、軽量なトルクベクトリング4WDシステムの開発、自動車技術、No.35-11、p.7(2011)
(4) 湯浅亮平ほか：FFベースの新4WDシステムの制御開発、自動車技術、No.60-19、p.2(2019)
(5) 加藤嵩之：CX-60のAWDシステム開発（電子制御カップリング トルクベクタリング）、JSAEシンポジウム「動力伝達系の最新技術2023」No.07-23、p.12-27(2023)

【著　者】

山崎　義暢

小野　瞭

清水　友博

伊藤　奨

柿原　裕介

小栗　昌己

薮崎　佑介

川原﨑 洋文

青木　亮治

乗り心地の向上と操縦安定性の向上とを両立させる防振ゴム材料の開発

Development of Anti-Vibration Rubber Materials That Improves Both Ride Comfort and Handling Stability.

黒田浩章[*1] KURODA Hiroaki
片岡誠[*2] KATAOKA Makoto
柏井健太郎[*3] KASHIWAI Kentaro
八木澤正規[*4] YAGISAWA Masanori

抄録

乗り心地と操縦安定性の向上を目的としたサスペンション向け防振ゴムブッシュについて、天然ゴム材料と同様に射出成型可能なミラブルウレタンゴム材料の適用化検討を実施した。その前提となるばね特性はモジュラスであり、モジュラスを向上させる手段としてウレタンポリマーのムーニー粘度と補強用カーボンの最適化を図り、更に実走行試験による官能評価や、実用化に向けての耐加水分解性に代表される環境性能試験を行うことで、問題ないことを実証した。

Abstract

For the purpose of improving ride comfort and handling stability, the use of Millable urethane was considered as a material of anti-vibration rubber bushes for suspensions. Similar to natural rubber used in anti-vibration rubber bushes, Millable urethane can be injection-molded. The modulus was optimized by adjusting the Mooney viscosity of the urethane polymer and the amount of reinforcing carbon, resulting in improved ride comfort and handling stability. Environmental performance tests such as hydrolysis resistance tests showed positive results for practical application of the urethane.

1．まえがき

従来、サスペンションブッシュには、低コストであり、成形が容易であり、安定調達な天然ゴム材料が広く用いられている。なお、天然ゴム自体は、車体を支えるには硬度が不十分であるため、天然ゴムをそのままサスペンションブッシュに採用することはできず、図1のように、補強材としてカーボンを添加した天然ゴム材料がサスペンション用の防振ゴムとして用いられている。しかしカーボンは、天然ゴムの伸長および収縮を阻害する。そこで乗り心地を向上させるためには、カーボン含有量を低下させることを考えるが、カーボン含有量を低下させすぎると、転舵時の動き出しの遅れや車体の動きの増加により安定性が悪化してしまい乗り心地のみならず操縦安定性が低下してしまうという問題が生じる。このため、乗り心地と操縦安定性の向上を両立することができるゴム組成物の開発が希求されている。このような課題に鑑み、引張モジュラスを向上させることにより、乗り心地の向上と、操縦安定性の向上を両立することが可能なゴム組成物をサスペンションブッシュ向けに開発した。

2．ミラブルウレタンゴム組成

本実施形態に係るミラブルウレタンゴム組成物は表1のように、ムーニー粘度ＭＬ（１＋４）１００℃が２９以上９０以下であるミラブルウレタンポリマーと、有機過酸化物架橋剤と窒素表面積が３０m^2/g以上１００m^2/g以下のカーボンを含み、カーボンの含有割合を、ミラブルウレタンポリマー１００質量部に

＊1 材料研究部
＊2 スバルテクニカインターナショナル株式会社 車体技術部
＊3 スバルテクニカインターナショナル株式会社 車両実験部
＊4 富士ゴム工業株式会社 技術部

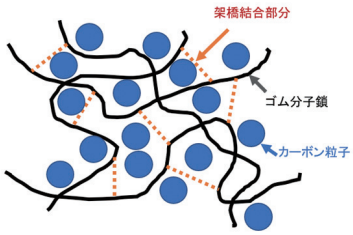


図１　ゴム中に分散したカーボン粒子

対して１質量部以上４０質量部以下とする。これにより、本実施形態に係るゴム組成物が架橋されることにより得られるゴムは、表２のように引張モジュラスを向上させることができる。なお、比較例は天然ゴムとブタジエンゴムのブレンド材である。引張モジュラスは、ＪＩＳ　Ｋ６２５１で規定される。また、実施例１～６では、可塑剤、加水分解対策剤、酸化防止剤、薬品分散剤、潤滑剤、促進剤等の添加剤を適宜添加した。

図２は、実施例１～実施例６、および、引張モジュラス[ＭＰａ]の測定結果を示すグラフである。図２において、黒い四角は実施例１を示し、白い三角は実施例２を示し、白い丸は実施例３を示し、白い四角は実施例４を示し、黒い三角は実施例５を示し、黒い丸は実施例６を示し、白い菱形は比較例を示す。以上の実施例１～実施例４の結果から、材料ムーニー粘度ＭＬ（１＋４）１００℃を大きくすることにより、補強材のカーボン含有割合を増加させることなく、Ｍ１００、Ｍ２００、Ｍ３００の引張モジュラスが向上することが確認できた。

表１　ミラブルウレタンゴムポリマーの配合実施例

実施例		1	2	3	4	5	6
種類	材料（ムーニー粘度）	質量部					
ポリマー	66.0ML(1+4)100℃	—	50	100	50	—	—
	90.0ML(1+4)100℃	—	—	—	50	100	100
	40.0ML(1+4)100℃	—	50	—	—	—	—
	29.0ML(1+4)100℃	100	—	—	—	—	—
カーボン	第1カーボン	18	18	18	18	18	18
	第2カーボン	16	16	16	16	16	16
有機過酸化物架橋剤		2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	4.2

表２　ムーニー粘度と引張モジュラスの関係

実施例		1	2	3	4	5	6	比較例
ムーニー粘度ML(1+4)100℃		29.0	53.0	66.0	78.0	90.0	90.0	—
引張モジュラス（MPa）	M100	2.3	2.7	2.9	3.2	3.0	3.7	1.9
	M200	6.5	8.0	8.8	9.7	9.4	11.7	4.4
	M300	12.7	14.7	16.2	17.9	17.7	20.8	7.5
硬度(HA)		61.0	64.0	66.0	68.0	67.0	67.0	65.0

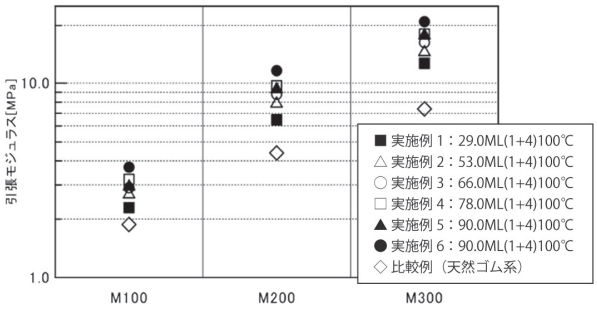


図２　実施例と引張モジュラスの測定結果

３．開発の流れ

ミラブルウレタンゴム製サスブッシュの開発は図３の流れで実証している。

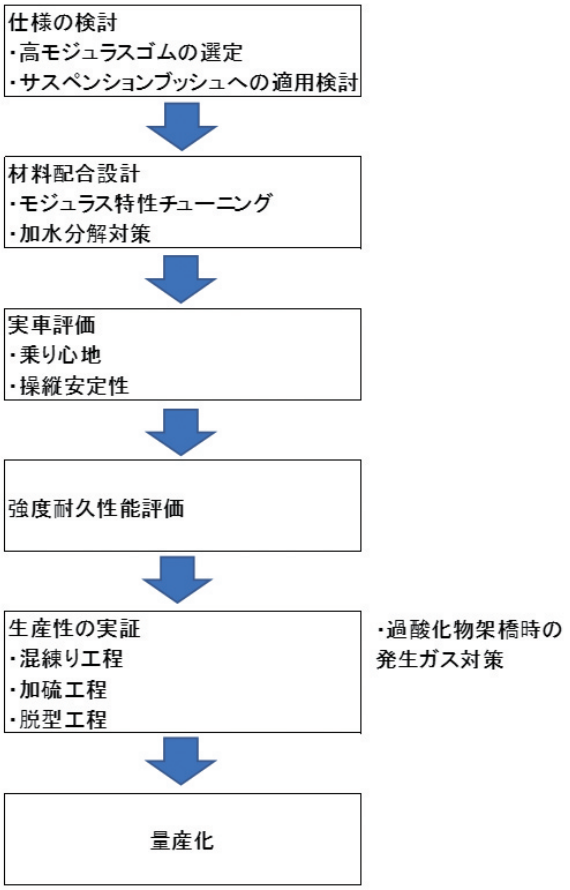


図３　開発の流れ

4．高モジュラスゴムの選定

表３のように、材料選定にあたっては、強度と弾性に優れたミラブルウレタンゴム（エステル系）を選定。弱点ともいえる耐水性と成形性を解決することで、実用化を実証している。

表３　ゴム物性

	ミラブル ウレタンゴム （エステル系）	NR	SBR	EPDM	BR	IIR
強度	◎	○	◎	△	○	△
弾性	◎	○	△	△	○	×
耐熱性	○	△	○	◎	○	◎
耐寒性	○	◎	○	◎	◎	○
耐クリープ性	◎	○	△	△	○	×
耐水性（加水分解）	△	◎	◎	◎	◎	◎
成形のしやすさ	×	◎	◎	○	△	△
コスト	×	○	○	◎	○	△
国内外での材料の調達しやすさ	○	◎	○	○	○	○

最適　◎　＞　○　＞　△　＞　×　不適

4.1　加水分解対策

図４のように、加水分解防止剤の添加といった従来手法に加えて、ゴム中のエステル基濃度を２０％低減することで、耐加水分解性能を向上させている。

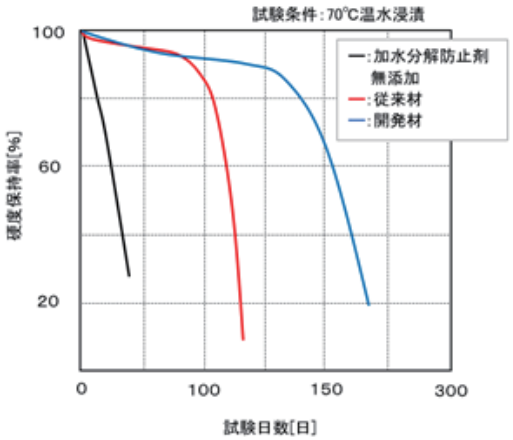


図４　開発ミラブルウレタンゴムの耐加水分解性

5．サスペンション部品への適用検討

ミラブルウレタンゴム材料は天然ゴム材料と同じ硬度でありながら、モジュラスが非常に高いことによる減衰効果と変形時の形状追従性の両立が特徴であり、サスペンションブッシュに用いることで操縦安定性と乗り心地の両立が狙えると考察した。図５に示したサスペンションブッシュについては、フリクション低減、変形ヒステリシスの低減、アライメント変化の抑制等が操縦安定性向上の一つの要素として挙げられており、モータースポーツ車両では高硬度ゴムを使用して静ばね定数を上げたブッシュや、内筒に金属製ボールを使用して変形を抑制するピロボールブッシュ等を採用したものが一般的に使用されている。

今回は操縦安定性への影響度が高いサスペンションブッシュの中で、リヤサスペンションのスタビライザーを保持するブッシュ（以下、スタビブッシュリヤ）に本材料を採用し、車両運動性能を確認した。

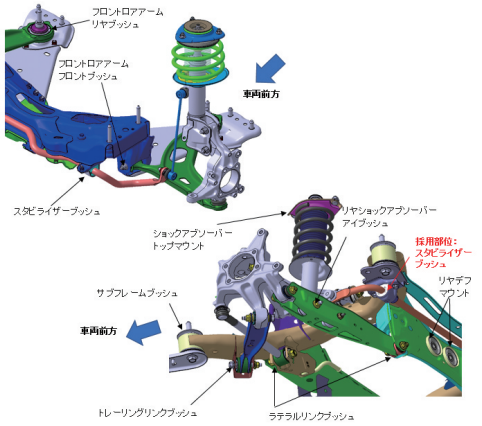


図５　ミラブルウレタンゴム化を検討したブッシュ類

5.1　乗り心地および操縦安定性の評価

スタビブッシュリヤを従来の天然ゴム材（比較例）からウレタンゴム材（実施例３）へ変更した場合の乗り心地、およびその他操作感の変化は、表４の通りである。４名のドライバが運転し、操作感および乗り心地の体感レベルを点数で比較評価を行う評点法で実施した。ステアリング応答性は、４０ｋｍ／ｈで走行した際、ステアリングを±２°、±３０°転舵させたときの応答性を示す。ステアリング手応えは、１００ｋｍ／ｈで走行した際、ステアリングを±２°、±３０°転舵させたときの手応えを示す。乗り心地およびハンドリングは、普通走行（６０ｋｍ／ｈ以下で走行した）した際のハンドリング・乗り心地評価を示す。安定性、安心感、および、追従性は、１２０ｋｍ／ｈでカーブ走行中にステアリングを±３０°転舵させたときの車両安定感、遅れの少なさを示す。ロール感およびロール共振は、１００ｋｍ／ｈでステアリングを±３０°転舵させたときのロール感、ロール収束性を示す。一般乗り心地は、４０ｋｍ／ｈで、５mm～１０mm程度の小さな段差の乗り越し、および、マンホールの乗り越しを行った際の乗り心地を示す。　ステアリング応答性、ステアリング手応え、ハンドリング、安定性、安心感、追従性、ロール感、および、ロール共振で示される操縦安定性において、比較例と較べて操縦安定性および乗り心地が向上することが確認された。なお、感受性の評点は従来の天然ゴム材ブッシュを基準とした点数であり、＋１．０点はターゲットユーザーの多くが変化を実感し実用レベルで満足できる内容である。

表４　乗り心地および操縦安定性の評価結果

項目	試験条件		比較例	実施例3
ムーニー粘度 ML(1＋4)100℃	—		—	66．0
ステアリング応答性	40km/h	±2°	±0	＋1．2
	100km/h	±30°		＋1．4
ステアリング手応え	100km/h	±2°		＋1．2
		±30°		＋1．4
乗り心地	ハンドリング路			＋0．7
ハンドリング	普通走行60km/h以下			＋1．2
安定性、安心感	タックイン 急操舵±30° テストコース80km/h テストコース120km/h			＋1．5
追従性(リヤグリップ)				＋1．5
ロール感	100km/h ±30° 緩〜急操舵			＋1．0
ロール共振(揺返し)				＋1．2
一般乗り心地	40km/h 段差、その他			＋0．7
総合評価				＋1．2

また、評点での操作感の向上を定量的に確認する方法として、微小舵応答計測を実施した(図６)。ステアリングロボットとＧＰＳジャイロを使用し、機械的にステアリング角度を０°→２°まで切った際のヨー角度(進行方向に対する車の角度)に着目した。

図７は比較例の従来天然ゴム材料を使用したブッシュ、図８は本開発の実施例３のウレタンゴム材を使用したブッシュでの結果であり、右縦軸はステアリング入力舵角[°]、左縦軸はヨー角度[°]、横軸は経過時間[s]を示す。４０ｋｍ／ｈで直進走行状態から経過時間１．０ｓで操舵を開始した。試験結果より、複数回計測した際のヨー角度の発生点が明確(点線部)であることや、ヨー角度のばらつきが０．２９°→０．１３°へ約５５％低減されていた(赤線部)。以上の結果より応答性が向上し、ステアリングの動きと車両の動きの一体感が向上していることが定量的に確認できた。

尚、経過時間０ｓ〜１．０ｓ、ステアリング舵角０°時のヨー角発生前のバラつきの減少についてもミラブルウレタンゴムによる効果である。

図６　微小舵応答計測試験

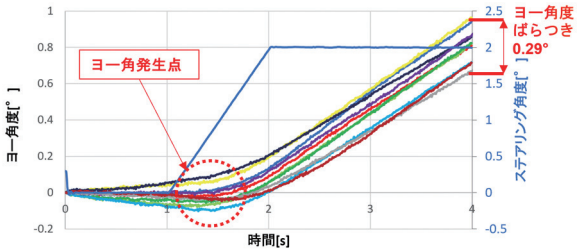


図７　微小舵応答実車試験結果（比較例：天然ゴム系）

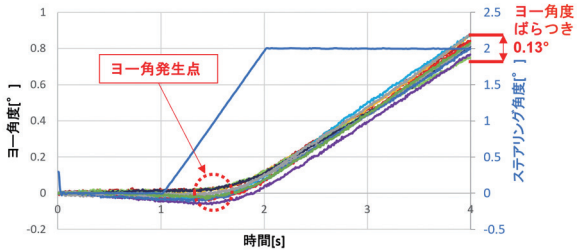


図８　微小舵応答実車試験結果(実施例３:ミラブルウレタンゴム)

６．強度耐久性能評価

試験用スタビブッシュリヤに関しては、はじめに図９のように実車搭載時を想定した上下方向のばね特性を計測し、更に図１０のようにスタビバーねじり方向のばね特性が規格内にあることを確認できたものについて、図１１のような実車相当レイアウトで、高温環境や低温雰囲気、塩泥水被水など、市場環境を想定した各種性能試験を行い、問題ないことを実証した。

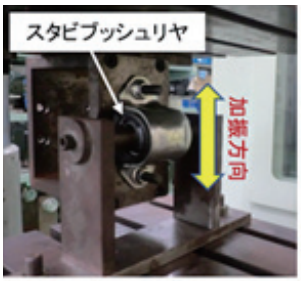


図９　上下ばね特性試験

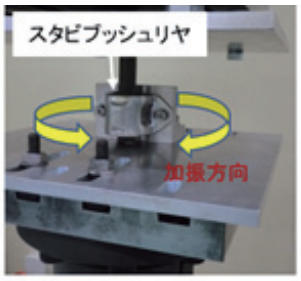


図 10　ねじりばね特性試験

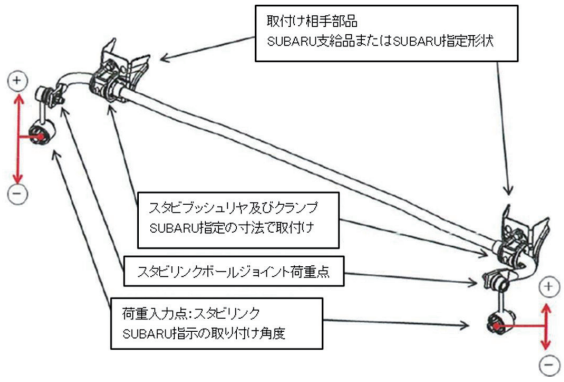


図 11　スタビブッシュリヤ耐久性試験概要

7．生産性の実証

混練り工程～脱型工程に至るまで、高モジュラスポリマーゆえの課題を紹介する。

7.1　混練り工程

ゴム混練りで、ゴム実温が１００℃を超えると飴状になってしまい、練り設備内にゴムが貼り付いてしまう。いっぽう、ゴム練り温度が低すぎると、配合添加薬品の分散が上手くできず、ばね特性ばらつきが大きくなる。そのため、混練り時のゴム温度公差を厳しく管理する事で品質の安定を図った(±５℃管理)。

7.2　加硫工程

過酸化物架橋配合のため、金型温度を半減期基準温度となる１７５℃以上に設定したかったが、１６５℃で金型割部分にバックライディングと呼ばれるひび割れが生じてしまう。金型温度が低いと、図１２のように残留過酸化物架橋剤が製品内に残ってしまい、２次架橋時に発生するガスで気泡が発生。そのため、残留過酸化物架橋剤を極力無くし、２次架橋実施時にガスの発生が出ない成形条件の見極めを行った。

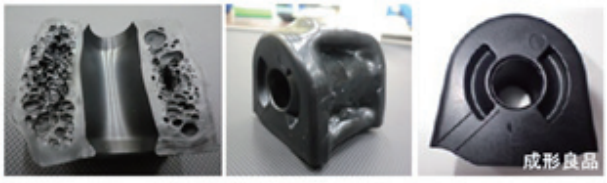


図 12　過酸化物架橋時の発生ガスによる異常

7.3　脱型工程

ミラブルウレタンゴムは高モジュラスポリマー構造の為、金型からの脱型し難い。型割構造を工夫する事で高モジュラス材でも離型作業がしやすい型構造設計を行った。

8．まとめ

高強度で高弾性特性を持ち、射出成型可能なミラブルウレタンゴム材を自動車防振ブッシュ向けに開発できたことは、操縦安定性や乗り心地を向上させる有効手段と考えており、採用部品の拡大に努めていきたい。

謝　辞

本研究を実用化するにあたり、生産課題を解決して頂いた富士ゴム工業株式会社、スバルテクニカインターナショナル株式会社関係部署の方々のご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表する。

参考文献

(1) 白坂ら,“高結晶性オリゴットを構成単位とするエラストマーの合成と性質”,高分子論文集,Vol.56,No.1,pp.18-23(Jan.,1999)
(2) 和田ら,“機能性ポリウレタンの開発と応用”,シーエムシー出版

【著　者】

黒田　浩章

片岡　誠

柏井　健太郎

八木澤　正規

第５世代移動通信規格に対応したコネクテッド自動運転研究の取り組み

Study of Connected Autonomous Driving with 5th Generation Mobile Communication System

山口史人* YAMAGUCHI Fumihito
関口幸相* SEKIGUCHI Yukiharu
中道釈夫* NAKAMICHI Tokio
小山哉* OYAMA Hajime
石井一貴* ISHII Kazuki

抄　録

技術研究所ではSAE自動運転Level 3以上の自動運転を高レベル自動運転と称し、その実現に向け研究を進めている。高レベル自動運転のアフォーダブルな価格帯での商品提供にはコネクテッド技術は必須である。

北海道美深テストコースにスタンドアローン方式の第5世代移動通信システム(5G SA)に対応したローカル5G基地局を設備導入し、将来コネクテッドを想定した遠隔自動運転システムを開発した。

当社専用に導入したローカル5G通信設備の技術的な機能紹介と、遠隔自動運転システムの研究開発の取り組みについて報告する。

Abstract

Technical Research Center considers SAE Level 3 or 4 automated driving as high-level automated driving and is conducting research toward its realization. Connected technology is essential for providing high-level automated driving in an affordable price range.

We have installed a private 5G base station supporting 5G SA at our proving ground, and a remote automated driving system has been developed for future connected systems.

In this paper, we report the technical features of the private 5G communication facilities exclusively implemented and the research and development efforts for the remote automated driving system.

1．まえがき

技術研究所では、SAE Level3、4 の自動運転を高レベル自動運転と称し､実現に向け研究を進めている。高レベル自動運転を実現するには高いセンサ性能と堅牢性が求められる。一方、自律システムで構築するには処理負荷やコストから難易度が高いため、自動運転にコネクテッドとサーバによる外部処理の考えを導入している[(1)]。

コネクテッドによる遠隔自動運転制御を第5世代移動通信システム(5G)と協調させた自動運転研究開発を行うためには、実5G通信環境下で技術開発を行う必要がある。しかしながら、現在キャリア通信における5G展開はコアネットワークが第4世代通信システム(4G)と共有するノンスタンドアローン型の5G NSA方式に留まり、スタンドアローン型の5G SA方式の展開は限定的である。そのため当社自動車試験用テストコースに専用の5G基地局を設置し、ローカル5G SA通信設備を導入した。

本稿では、テストコースに導入したローカル5G SA設備の紹介と、協調型自動運転システムの技術開発の内容について報告する。

2．コネクテッド自動運転車の概要

サーバと移動通信システムを介して制御できる試験台車としてコネクテッド自動運転車(図1)を開発している。

＊ 技術研究所

図１　5G 基地局とコネクテッド自動運転車

近年普及しているADAS のシステムに自動運転のシステムが冗長系となる構成とし、自動運転システムのセンサ群はコネクテッドの情報と連携できるよう機能構成としている（図2）。なお、本稿ではコネクテッド情報と連携し走行する自動運転をコネクト自動運転と呼称する。

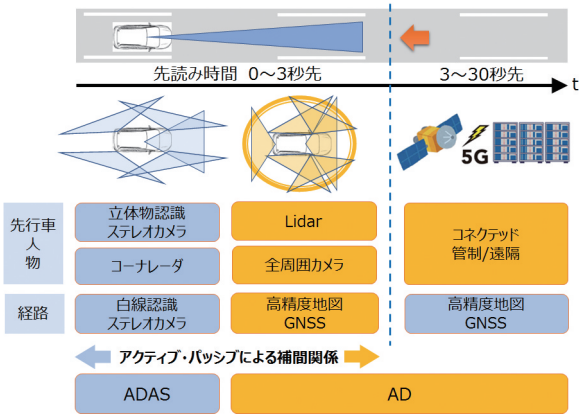


図２　コネクト自動運転のセンシング構成

コネクト自動運転は車両とサーバが移動通信システムで繋がる構成で機能を実現する。この構成で実現できる機能としては大きく2 つに分けられる（図3）。

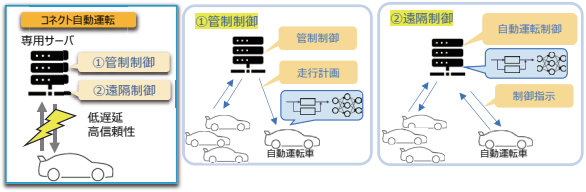


図３　管制制御と遠隔制御

（1）コネクト管制制御

複数車両の位置情報をサーバで把握することで実現できる管制機能になり、周辺車と連携・協調した走行計画を可能とする。自動運転の走行計画をサーバに持たせることで、より安全な自動運転を実現できる。

（2）コネクト遠隔制御

自動運転制御部をサーバで演算および処理することで実現できる遠隔制御の機能になる。サーバに高度な認識処理と車両制御処理を持たせることで、車両はミニマムな構成にすることができ、これにより、簡便なシステムで構成されたアフォーダブルな価格帯の車両でも、限定的な自動運転機能を実現できる。

3．ローカル5G SA設備

自動運転車とサーバ間は5Gのような高信頼性の通信性能であることが望ましく、低遅延や大容量、リアルタイムといった機能が求められる。具体的には3GPP（移動通信システムの標準化団体）のRelease 18[(2)]の仕様に該当する。

しかし、現在の一般的に利用できる5G通信は、4Gと共有するノンスタンドアローン型の5G NSAであるため、通信性能や機能は4Gのパフォーマンスに留まる。

5G機能である「高信頼、低遅延(URLLC)」「大容量(eMBB)」「多接続(mMTC)」の特徴を活かし、ネットワーク・スライス技術と組み合わせた協調型自動運転システムを研究開発するため、当社テストコースである「スバル研究実験センター美深試験場（北海道中川郡美深町）」にスタンドアローン方式5G SA仕様のローカル5G SA設備を導入した[(3)]。

3.1　Nokia NDAC

ローカル5G SA設備はノキアソリューションズ＆ネットワークス合同会社のNDAC（NOKIA DiGital Automation Cloud）のシステムで構成した（図4）。

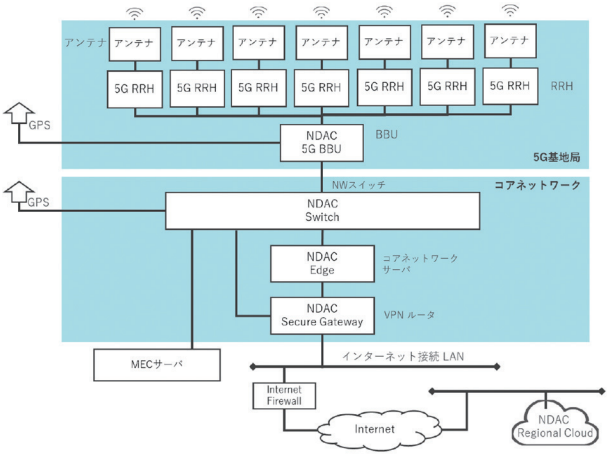


図４　NDAC 5G SA システム構成

3.1.1　NDACハードウェア

（1）NDAC Edge（5G コアネットワークサーバ）

5Gネットワークのコア部分の機能を持ち、ユーザのデータ管理やセッション管理、DNN（Data Network Name）機能（ネットワーク・スライシング

代替)、QoS(Quality of Service)管理などを行う(図5)。
(2)NDAC 5G RRH/BBU(5G基地局)

5G通信基地局の構成要素として、BBU(Base Band Unit)(図6)とRRH(Remote Radio Head)(図7)に分かれる。BBUは基地局のベースバンド信号処理機能を持ち、RRHは無線信号(RF)の送受信を行う機能を持つ。

図5　5G コアサーバ

図6　5G BBU

図7　5G RRH

3.2　Nokia ローカル5G端末

車載用ローカル5G端末としてNOKIA 5Gフィールドルータと車載用マルチポートアンテナ(図8)を自動運転車に搭載し、NDAC基地局(RRH)と接続する。5Gフィールドルータはローカル5Gのn79周波数チャネルに対応し、グローバル5G/4Gバンドにも対応する。デュアルSIM構成により、ローカル5G通信とキャリア通信でサーバネットワークの切り替えも可能である。

図8　5G フィールドルータとアンテナ

3.3　5G無線通信性能

美深試験場メイン周回路での自動運転実車試験のため、コース全域で一定のスループットとレイテンシの通信性能が必須となる。レイテンシは3GPP標準仕様で決まるため、サーバ認識処理に最低限必要となるカメラ映像伝送レート(アップロード側スループット)から電波強度を仕様定義した。

表1　無線通信要求仕様

電波強度(RSRP)仕様	スループット(UL)仕様
-105dBm(Min)	5Mbps(Min)

無線電波伝搬シミュレーション(図9)から電波強度を満たすための必要な基地局数とアンテナ配置を検討し、全7局の基地局構成(図10)で設計した。

ローカル5G基地局はアンテナ最大出力が制度上63Wに制限されているため、キャリア基地局アンテナと比べると電波到達距離は短くなる特徴を持つ。また、コース周辺立木や勾配等のコース形状から、複数局で全周囲を囲むような構成が必要となった。

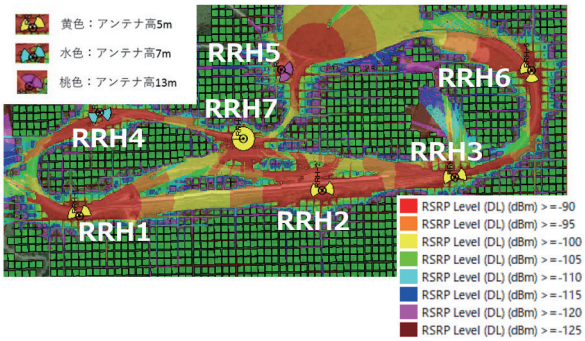


図9　電波伝搬シミュレーション結果

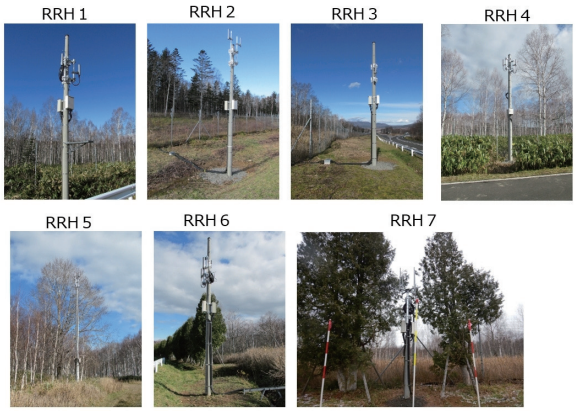


図10　基地局

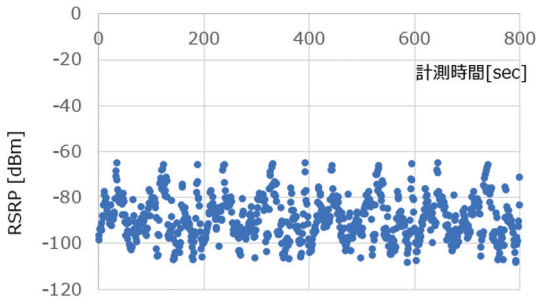
3.3.1　性能試験

メイン周回路のコースを周回走行状態とさせ、車載端末が受ける電波強度の取得と、車載端末からNDACエッジサーバまでのPing応答、スループットの値を計測した。

電波強度はメイン周回路全域において平均で-90dBm付近を確保できており、最低値として一部区間において-108dBmを記録しているが、局所であるため問題はない（図11）。

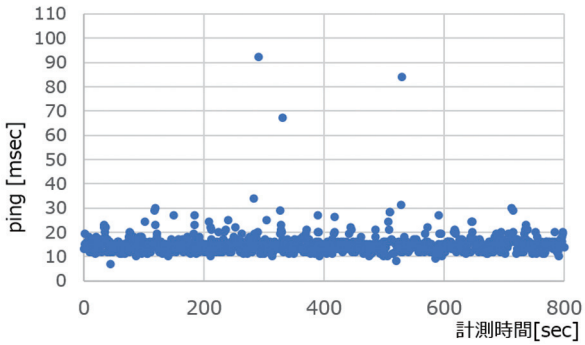
レイテンシ性能はNDACエッジサーバまでのPing応答で確認した。基地局ハンドオーバ時の瞬間的な遅延発生を除けば、コース全域において平均15msecの結果を得られており、車両制御におけるフィードバック制御も十分可能な性能を確保できたといえる（図12）。

スループット性能は、平均100Mbps以上の性能を確保できており、これは自動運転車両から4K解像度の映像を30fpsで転送を可能とする（図13）。ダウンロード側のスループットは200Mbps以上となった（図14）。



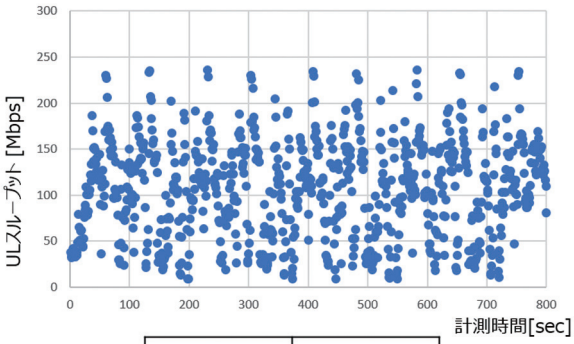
Max	-65.1 dBm
Min	-108.5 dBm
Avg.	-89.5 dBm

図１１　電波強度性能



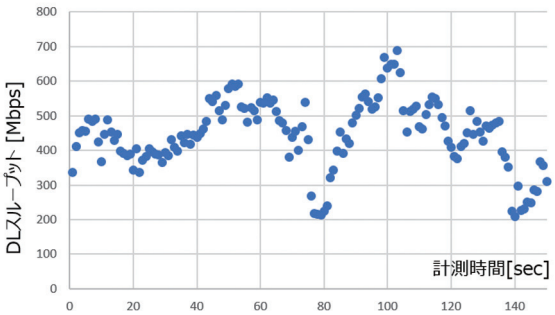
Max	114 msec
Min	7 msec
Avg.	15 msec

図１２　レイテンシ性能



Max	235.8 Mbps
Min	7.9 Mbps
Avg.	105.5 Mbps

図１３　スループット性能（アップロード側）



Max	689.1 Mbps
Min	213.1 Mbps
Avg.	462.0 Mbps

図１４　スループット性能（ダウンロード側）

４．自動運転MECサーバ

図３で示したように、コネクト遠隔制御では自動運転車両側に搭載している高機能・高負荷な自動運転アプリケーションをサーバ側に移している。自動運転アプリケーションは、操舵制御（LKS）や前後制御（ACC）の車両制御を処理する制御アプリケーションとカメラ周囲認識処理を実施する認識アプリケーションで構成される。

これら自動運転アプリケーションを搭載したサーバは、NDACと接続し、エッジコンピューティングを実施するMEC（Multi-access Edge Computing）サーバとして構築する。

4.1　サーバネットワーク構成

MECサーバのアプリケーションは管制制御、遠隔制御、遠隔認識の大きく３つで構成しているが、制御と認識の処理においてそれぞれで要求される通信要件や性能は異なる。

・管制／遠隔制御（自動運転制御）

車両運動に関わる制御のため、低遅延で高信頼なリアルタイム通信であること。

・遠隔認識（映像転送）

自動運転車で撮像した高解像度の画像データを高速に伝送するため、大容量通信であること。

アプリケーションの通信品質を相互に干渉させないためにネットワーク・スライスで構成した（図15）。共通の物理ネットワーク上に論理的にネットワークを分離（ネットワーク・スライス）し、アプリケーションごとでネットワーク・スライスを選択する。各ネットワーク・スライスではそれぞれでQoS制御が個別に動作するため、アプリケーションで求められる要件に適切なQoS設定を行い、各ネットワーク・スライスの特徴づけを行った。

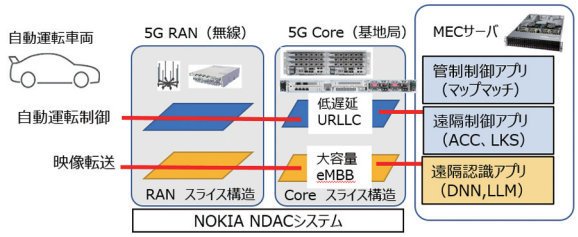


図15　サーバネットワーク構成

4.2　サーバアプリケーション構成

・管制制御アプリケーション

車両からアップロードされた緯度経度の位置情報をベースにサーバ地図データベースからマップマッチングを行い、自車位置における車線内横位置や道路曲率などを算出する。また、遠隔制御とのアプリケーション間通信により、マッチング情報と車両情報の送付と、制御指示値の受信を行い、車両側とのインターフェースの役割を持つ。

・遠隔制御アプリケーション

LKSとACCの機能を持つ。車両制御に必要な目標舵角と目標加減速度の指示値を算出する。制御ロジックの構成について図16で示す。自動運転車両とは20msecの時間間隔で通信を行い、サーバによるリアルタイム制御を実現している。

・遠隔認識アプリケーション

車両のフロント左右カメラ画像の受信処理と、DNN認識処理を行う。H.264コーデックのカメラ撮像データをデコードし、DNN認識処理とLLM処理系に画像入力する。認識処理で得られたステレオ測距結果出力および状況判断出力を遠隔制御アプリケーションへ送付する構造とした（図17）。

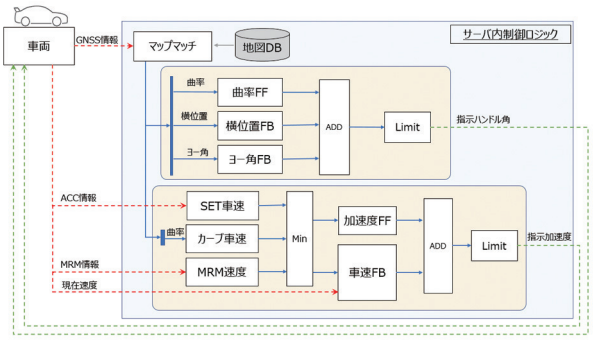


図16　制御ロジック

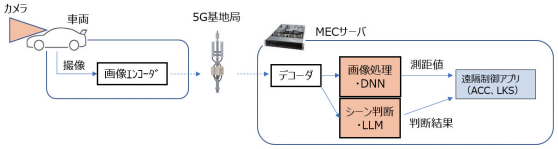


図17　遠隔認識の構成

5．実車検証

前記のローカル5G設備およびMECサーバのシステム構成を構築し、実車における試験を実施した。サーバ遠隔による自動運転制御および車両カメラ映像伝送機能について評価・検証を行った。コースはメイン周回路の本線レーン（図18）とし、自動運転制御をセットして、制御動作中に道路逸脱などの危険事象が発生しない限りは、ドライバ操作（ハンドル、ブレーキ操作）は行わずに自動走行をさせる。

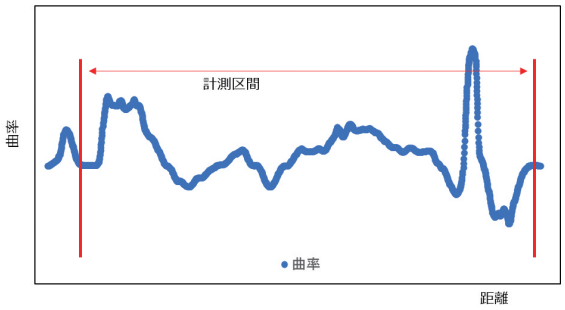


図18　メイン周回路本線コース形状

5.1　遠隔ACC／LKS

ACCセット車速の設定は100km/hの設定とする。サーバ側のACCとLKSによる車速制御と操舵制御が自動運転試験車で動作することを確認した。

図19は、コース全周においての操舵の様子を表している。MECサーバで計算した操舵目標ハンドル角値が5G通信を介して途切れることや遅れもなく車両へ送付できている。レーン逸脱やドライバ操作が介入することもなく、自動制御の継続状態でレーンをトレースすることができた。周回路全域において5G通信による遠隔LKSの制御が動作する結果を得られた。

また、コース曲率半径が小さい急コーナの区間

（図20）では、車速も落ちるため旋回に必要なハンドル角量も大きくなりハンドル角速度も高レートとなるが、フィードバック制御が破綻することなく車両旋回運動が成立している。5G通信の低遅延性能が有効に働いた結果であるといえる。

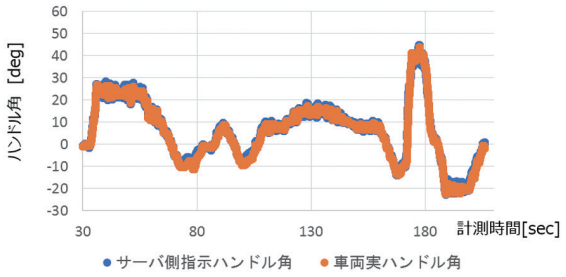


図１９　コース全周における指示と実ハンドル角

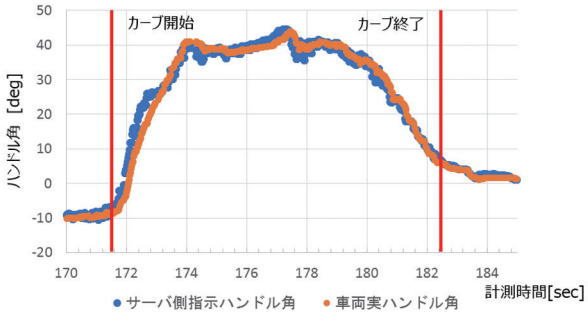


図２０　急コーナにおける指示と実ハンドル角

ACCによる前後制御においても、操舵制御と同様に問題ない制御が実施できた。車速上限はセット車速100km/hに対して決定されて制御され、レーン曲率に対して加減速制御が行われていることも図21からわかる。

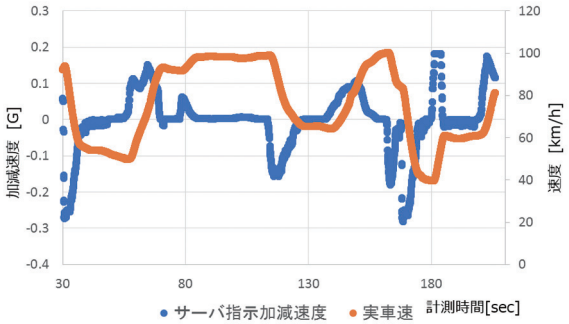


図２１　加減速度指示に対する車両実車速

5.2　映像伝送

自動運転車両から30fpsで送付される高解像度の映像が途切れることなくサーバ側で受信できることを評価した。デコードされた画像データが遠隔認識アプリケーションに入力され、機能動作（図22）することを確認した。

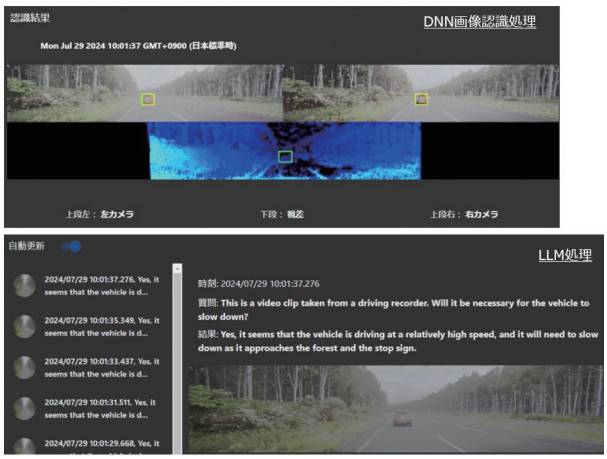


図２２　遠隔認識アプリケーションの動作

６．まとめ

次世代移動通信システムと協調する自動運転システムとして、今回ローカル5G SA設備をテストコースに配備し、自動運転制御サーバアプリケーションの開発を行い、遠隔自動運転のシステムとして構築した。5G SA通信がもたらす機能（ネットワーク・スライシング、QoS制御）と性能（低遅延、大容量・高速）により、自動運転機能を外出しした遠隔自動運転を実現できた。このことは、多くのユーザの手が届きやすい形で自動運転機能を提供することにも繋がるものと考える。

なお、今回のシステムでは、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）が提唱する協調型自動運転システム[(4)]のうち一つの形であり、数ある自動運転ユースケースに対応していくためには、路側インフラとの協調も重要になる。道路センシング技術がもたらす自動運転へ効果も注視しながら、ユーザにとって価値のある自動運転技術を開発してゆきたい。

最後に、今回ローカル5G SA設備の導入で支援いただいた日鉄ソリューションズ株式会社、開発に協力いただいたNSW 株式会社、株式会社Fixstars Autonomous Technologiesに謝意を表する。

参考文献

(1) 小山ほか：高レベル(Level3、4)コネクテッド自動運転の研究,SUBARU 技報 No.23（2023）
(2) 3GPP、Specifications & Technologies、Release18、https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-18
(3) 総務省　北海道総合通信局　広報誌、https://www.soumu.go.jp/main_content/000949977.pdf (北海道の情報通信２０２４、p.4)
(4) 内閣府、SIP 協調型自動運転ユースケース, https://www.sip-adus.go.jp/rd/rddata/usecase.pdf（用語、p.4）
(5) 続・５Ｇ教科書、インプレス(2023)
(6) Ruipu Luo, et al. : Valley: Video Assistant with Large Language model Enhanced ability, https://arxiv.org/pdf/2306.07207v2 (2023)

【著　者】

山口　史人

関口　幸相

中道　釈夫

小山　　哉

石井　一貴

SUBARU「インプレッサ」と「クロストレック」がIIHS安全性評価で賞を獲得
（米国仕様車が対象）

2023年11月10日

米国IIHS*1によって行われた2023年安全性評価において、2024年モデルのインプレッサが最高評価となる「トップセイフティピックプラス(TSP＋)」を獲得しました。また、2024年モデルのクロストレックは、「トップセイフティピック(TSP)」を獲得。

*1：Insurance Institute for Highway Safety（道路安全保険協会）

2024 年モデル インプレッサ（米国仕様車）

2023 トップセイフティピックプラス ロゴ

カメラ画像認識性能開発での仮想空間の活用とその補完

Development of Camera Image Perception: Virtual Space and Complementation

長谷川　悠*　　小　山　哉*
HASEGAWA Yu　　OYAMA Hajime

抄　録

自動運転は様々な環境下でシステムを継続することが求められる。そのためには自律センサを用いて常に周囲の環境を把握し続け、車両や歩行者、障害物などの物体を認識しなければならない。

技術研究所では物体認識にカメラ画像とAIを組合せた画像処理を用いて高度な自動運転の実現を目指している。認識性能を向上させるために天候、時間帯など様々な条件下で取得したカメラ画像を画像認識AIに大量に学習させる必要があるが、走行試験でのカメラ画像収集と学習用データ化には多大な時間を要する課題があった。

本稿では仮想空間を用いてカメラ画像収集と学習用データ化に要する時間を短縮し、画像認識性能開発を効率化した手法を紹介する。加えて、仮想空間の不足点を補完する取組みについても述べる。

Abstract

Autonomous driving system is required to adapt to various environments and maintain its functionality by monitoring the surroundings using sensors.

We aim to achieve advanced autonomous driving by using image perception that combines camera images and AI. To improve its camera perception, it is necessary to train the AI with a large amount of camera data obtained under various conditions. However, data collection and teaching data creation are some of our issues and are also time-consuming.

In this article, we introduce a method to shorten the time required for camera image collection and teaching data creation using virtual space, and to streamline image perception development. Our efforts to supplement the limitations of virtual space are also described.

1．まえがき

技術研究所では自動運転車を絶対にぶつからない車と考え研究開発を進めており、当社が考える総合安全のうち、危険を回避する１次安全として、様々な環境でカメラ画像により周囲を認識し、衝突を防ぐ必要がある。ここでは認識性能を向上させるために必要なカメラ画像収集と学習用データ化に要する時間を短縮し、開発を効率化した手法を紹介する。

2．自動運転車でのカメラ画像収集と学習用データ化

昨今は自律センサを搭載した運転支援機能を有する車両が普及してきている。センサの中でもカメラは人間の眼と同様に物体の特徴を把握することに優れ、画像処理と組合せて物体を正確に認識できる。そこで当社の自動運転車は周囲360度をカメラでセンシングするために1組のステレオカメラ、6つの単眼カメラを搭載した。またカメラに加えてLiDAR、ミリ波レーダ、超音波ソナーを搭載し、自動運転の冗長性と継続性を高めた自律センサ構成とした[(1)]（図1、表1）。

＊ 技術研究所

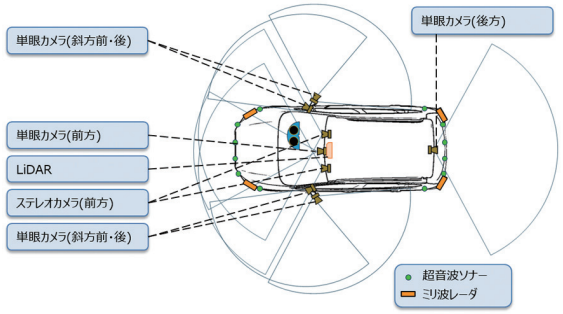


図１　自動運転車の自律センサ構成

表１　ステレオカメラ・単眼カメラの認識範囲

カメラ種別	認識範囲
ステレオカメラ	前方・近傍
単眼カメラ	前方・遠方
	側方（前後・左右）
	後方

画像認識にはDNN（Deep Neural Network）を用いた推論を利用している。DNNとは人間の脳の神経回路網を模倣した多層のニューラルネットワークである。DNNは大量のデータから特徴を抽出して学習（トレーニング）することで、複雑なパターンや関係性を推論（予測・分類）することが可能となる。

DNNは様々な走行環境、組合せにおけるカメラ画像とその画像上に存在する物体の画像座標データ・分類情報をセットにして学習させることで正確な物体認識を実現することができる。ここで用いるデータセット群を学習の教師データと呼ぶ。

従来は教師データを生成するために実車での走行試験によりカメラ画像を収集し、その後に手動で物体の画像座標データおよび分類情報を付与（以下アノテーションとする）したものを教師データとしていた。この手法は推論の対象である現実空間の物体を撮影したカメラ画像そのものを学習の教師データとして用いるため、学習環境（現実空間）と推論環境（現実空間）における差分はほとんど生じない（図2）。

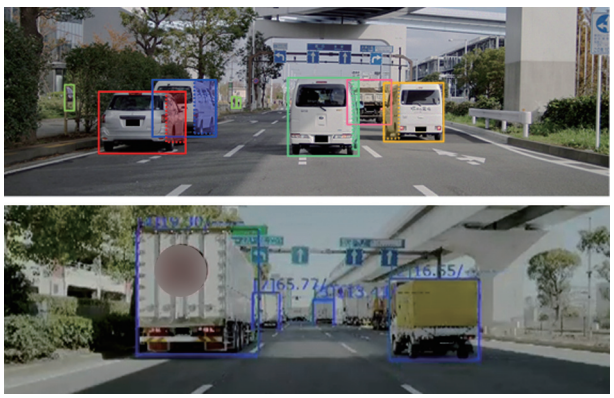


図２　現実空間を用いた学習画像（上）と推論画像（下）

一方、実車でカメラ画像を収集するためには走行試験を繰返す必要があり、それには多大な時間を要する。また逆光や降雨などの自然現象を意図的に発生させることが難しい、周辺車両の急な減速や割込みなど危険事象の再現にリスクを伴う、などの課題も顕在化した。

そこで現実空間で収集していたカメラ画像の代替として仮想空間であるゲームエンジンを用いて現実空間のカメラ画像を置換し、効率的に教師データを生成する取組みを進めてきた。

３．仮想空間を用いた認識性能開発の取組み

仮想空間であるゲームエンジンで教師データを生成し、学習させて現実空間で推論を行っている[(2)]。つまり学習環境（仮想空間）と推論環境（現実空間）が異なるのである。仮想空間を用いる利点を次に述べる。

3.1　教師データ生成時間の短縮

仮想空間には３次元空間に地図情報を配置でき、さらにその上に自車や周囲の物体を任意の場所に配置することができる。仮想の自車には実車と同様の位置、角度でカメラを取付ける。またカメラの画角や焦点距離などの特性を付与することで、仮想空間で生成する画像の性質を現実空間で撮影した画像の性質に近付けることができる。

配置した物体に移動する方向、速度などの条件を付与することで、意図した走行環境を仮想的に再現することができる。また晴れ、曇り、雨など天候条件を任意に変更することもできる。これらの走行条件を定義したものを走行シナリオと呼ぶ。

予め定義した走行シナリオに従い、その開始から終了まで、仮想の自車はカメラ画像を撮影しつつ仮想空間上を自動で移動する。このとき周囲の物体も同様に自動で移動する。またカメラ画像の撮影と同時に各物体に対して自動でアノテーションを行う。従来の実車での走行試験によるカメラ画像の撮影、および８つのカメラ画像に対する手動でのアノテーションに時間を要していたが、仮想空間を用いてこれらを自動化することで教師データの生成時間を短縮することができる。

3.2　走行条件・環境の再現性の高さ

現実空間において危険を伴う走行シナリオ、例えば前方の車両が急減速する、側方の車両が前方へ急に割込むシーンを再現できる。また逆光や降雨などの自然現象を意図的に発生させることができる。走行シナリオに従ってこれらの環境における走行を安全に、再現性高く繰返し行うことができる。

3.3　3次元アノテーションの実現、品質の安定化

仮想空間は３次元空間座標値(x,y,z)を有し、物体は８つの頂点座標を持つ直方体(バウンディングボックス)でそれを囲うように自動でアノテーションを行う(図3)。この座標値は正解座標データや真値と呼ばれる。現実空間では正確な真値を求めることは難しいが、仮想空間ではこれが明確に定まり、物体の正確な位置を把握できる。また２次元画像座標(x,y)に投影される際に一定のルールに基づき変換され、アノテーションの品質がバラつかず、安定させることができる。

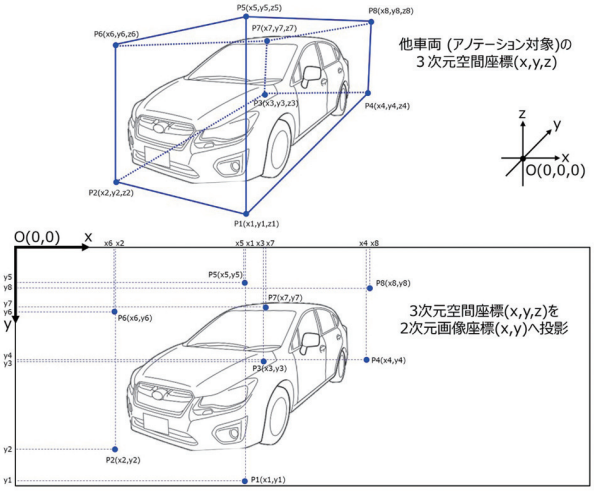


図３　仮想空間における３次元アノテーション

3.4　実環境での認識性能評価

ゲームエンジンで生成した教師データを用いて学習を行い、現実空間における基礎的な物体認識性能を向上させることができた(図4)。天候が晴れの日など周囲の視認性が高い走行環境においてはデータ生成速度を活かし、以下の(1)～(3)を繰返して開発スピードを高めることができた。

(1) 実路での走行試験および机上シミュレーションにおいて推論を行い未認識や誤認識の発生シーンを抽出
(2) ゲームエンジン上で(1)のシーンと同条件の走行シナリオを設定、教師データを生成
(3) 学習を実行

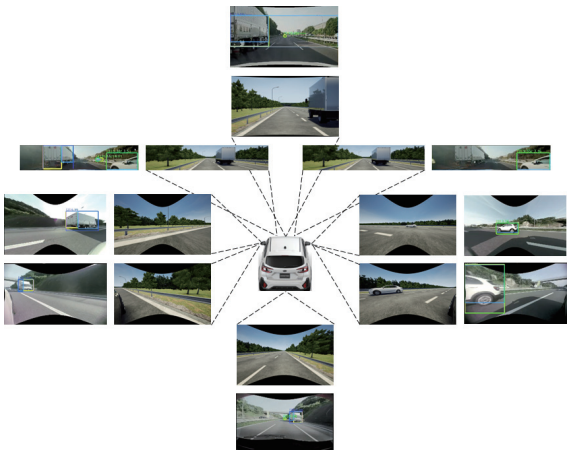


図４　仮想空間を用いた学習画像（内）と推論画像（外）

他方で仮想空間での再現が難しく学習量が不足し、物体認識が困難なシーンがあることが分かってきた。

4．ゲームエンジン認識開発の課題

ゲームエンジンをベースにした画像認識開発ではその開発スピードを高めることができる一方で、弱点となる点が顕在化した。

学習環境(仮想空間)と推論環境(現実空間)のカメラ画像の性質に大きな差が生じるシーンがあることがわかってきた。ゲームエンジンでは現実空間で発生するシーンを代替可能なカメラ画像を生成、学習できていないため、推論できない(物体を認識できない)のである。ここではその弱点を整理する。

4.1　光の物理現象の再現が困難

現実空間で発生する光の反射や散乱などの現象によりカメラの認識性能は低下する。例えば、朝夕の太陽の角度が低く太陽光が路面に強く反射する、夜間に自車や周辺車両のヘッドライトが散乱する場合である。

ゲームエンジンで代替可能なカメラ画像を生成するためには朝夕、夜間といった仮想環境を新たに制作する必要があったが、開発費用の増加および開発期間の長期化となった。

4.2　イメージセンサの特徴・特有現象の再現

カメラのイメージセンサには明るさの範囲を広く取るHDR(High Dynamic Range)機能や動的な被写体のボケであるモーションブラー現象といった特徴がある。例えば、夜間などの光量不足や明暗差が大きく切替るシーンではHDR機能によりカメラ画像の黒潰れ、白飛びを抑え、視認性の低下を抑えることができる(図5)。ゲームエンジンではイメージセンサの特徴を再現したカメラ画像を生成することは難しかった。

そのためこれらの特徴を有するイメージセンサモデルをゲームエンジンに接続し、実現象との一致性を高めることを試みた。しかしイメージセンサモデルが要求する入力情報（色情報）を既存のゲームエンジン環境から出力することが困難であることがわかった。

図５　HDR 機能が有用なシーンの例
（HDR 機能は左図、右図ともに有効）

そこでゲームエンジンが苦手とするシーンを補完する別手法を組合せることを考えた。基礎的な認識性能の向上には引き続きゲームエンジンを活用しつつ、ゲームエンジンが苦手とする視認性が低下するシーンの再現には別手法を用い、生成した教師データを統合して１つの教師データ群としてDNN学習を行うこととした。

5. ゲームエンジンを補完する新しい取組み

ゲームエンジンが苦手とするシーンの教師データを生成するため、新たに自律センサシミュレータ、AI生成画像、実カメラ画像の認識座標データ加工の各手法を取り入れた（表2）。これらはゲームエンジンに比べデータ生成時間が遅いが、現実空間の物理現象、センサ特徴の再現に優れる。ここで各手法の特徴を示す。

表２　各教師データ生成手法の特徴と有用なシーン

教師データ生成手法	特徴、有用なシーン	教師データカメラ画像例
ゲームエンジン	生成速度が高速 晴れの日など周囲の視認性が高い環境	
自律センサシミュレータ	カメラ特性の再現性が高い HDRが有用なトンネル出入口など	
AI生成画像	未走行環境を生成可能 夜間や豪雨など視認性が低下する環境	
実カメラ画像 認識座標データ加工	実車のカメラ特性そのもの 局所的に誤認識課題を修正可能	

5.1　自律センサシミュレータ

仮想空間である自律センサシミュレータは光の反射やイメージセンサ特有の現象を再現できることが特徴である。またゲームエンジンほどではないが高速にデータを生成することが可能である。

その１つであるDIVP®を用いて太陽光やランプ光といった光源を加工し、現実空間で発生するカメラ特性であるハレーションによる画質低下を再現した[3]（図６）。

図６　現実空間のハレーションを再現したカメラ画像

また、自律センサシミュレータにはイメージセンサモデルも適用できる。HDRなどイメージセンサの特徴を再現し、実カメラ画像により近い画像を生成できる。ここではHDR機能の効果が現れるトンネル出入口における明暗差が大きいシーンを太陽光やランプ光の強さを調整することで再現した。またゲームエンジンと同様に３次元空間における正解座標データを有し、自動で３次元アノテーションを行うこともできる（図7）。

図７　トンネル出入口の明暗差を再現したカメラ画像

5.2　AI画像生成・画像変換

走行試験を実施していない環境の画像をAIにより生成、変換し、教師データとする方法も取り入れた。仮想空間で夜間を再現するためには新たにその環境を制作する必要があるが、この手法により既存の資産である実カメラ画像を活かし、日中とは異なる時間帯のカメラ画像を擬似的に生成することができる。既存の資産である実カメラ画像を活かすため、新たな仮想空間の制作が不要である。

ここでは日中の実カメラ画像を薄暮の走行シーンへ変換する技術[4]を用いた。変換後の画像はランプ、ヘッドライトの点灯、また路面の反射などの実現象を再現している（図8）。変換後の擬似カメラ画像は変換前に対して特徴差が小さいことも特筆すべき点である。

図８　日中のカメラ画像（左）と擬似的に生成した
薄暮のカメラ画像（右）

なおDNN学習にはカメラ画像と正解座標データをセットで用いるが、変換後の擬似カメラ画像には正解座標データが存在しない。そこで日中の実カメラ画像に対して推論を行うことにより生成した正解座標データを、変換後の擬似カメラ画像と組合せて新しい教師データとすることとした。車両位置は変換前、変換後の画像において同等でありその座標データも同等であるため置換したのである。つまり「薄暮画像＋正解座標データ」の新しい組合せを生成することができた。

5.3　実カメラ画像からの誤認識情報の除去

走行試験ではDNN推論処理（画像認識処理）を行いつつそのデータを記録している。記録された座標データに誤認識情報が含まれていた場合、その座標を除去、加工して修正する（図９）。そして「実カメラ画像＋加工した座標データ」を教師データとしてDNN学習を実行し、物体が画像上に存在しないことを学習させる。

図９　座標データの除去前後のイメージ

この手法は座標データの加工を手動で行うため、大量のデータの処理には時間を要するが、発生頻度が低いシーンに対して局所的な処置を行うことができる。

6．各手法を組合せた学習・開発のサイクル

DNN学習の教師データとしてゲームエンジンで生成したデータを中心とし、自律センサシミュレータ、AI画像生成、実カメラ画像を加えた画像認識学習の開発サイクルを構築した（図10）。

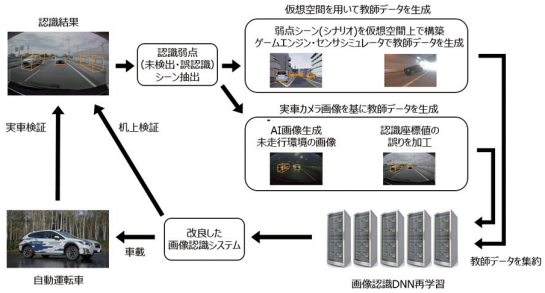


図 10　構築した認識性能開発サイクル

教師データ生成、学習、走行試験・机上シミュレーションによる実験を繰返し実行することでカメラ画像認識性能の開発効率、スピードの向上を図った。データ生成速度、実現象の再現性などそれぞれの利点を生かし、苦手とする点を相互に補完している。

学習完了後に自律センサシミュレータ、AI画像生成の効果を検証した。ここではトンネル内および進入のシーン（図11）、薄暮シーン（図12）において物体認識に成功した例を紹介する。日中を対象にゲームエンジン画像のみで学習を行った場合、いずれも物体（車両）を認識できないシーンであった。

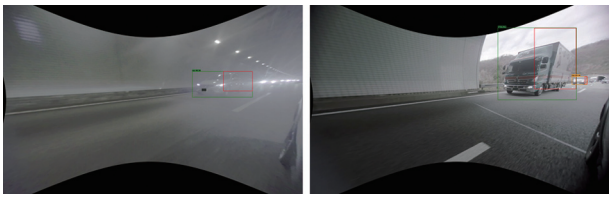


図 11　自律センサシミュレータ画像学習による認識性能の向上（2 例）

図 12　AI 生成画像による認識性能の向上（2 例）

複数の手法の組合せによりそれぞれの強みを活かし、相互に補完できることが分かった。様々な環境における教師データ量をさらに増加させることが認識性能向上に繋がると考える。

7．まとめ

仮想空間を用いた教師データ生成手法を中心に複数の手法を組み合わせた認識性能の開発手法を紹介した。昨今は自律センサシミュレーションを目的とした仮想空間、シミュレータが数多く登場してきており、認識性能の開発効率、スピードは大きく向上してきている。またAIを活用した画像生成技術も日進月歩で進化しており、様々かつ複雑な交通環境において物体認識性能を向上させていくためにこれらの新しい技術を積極的に取り入れていきたい。

また仮想空間技術やAIを用いた画像変換技術などは産官学が連携し、協調する分野であるとも言える。センサメーカ、部品メーカ、自動車OEM、大学等の研究機関などの様々な企業・団体が協力し、研究開発がさらに加速することが期待される。今後、現実空間の再現性が高い仮想空間において、リアルタイムなシミュレーションが可能となることも期待され、認識性能のみならず、車両制御機能などと連携していくことが望まれる。

本開発において自律センサシミュレーションのデータ生成においてBIPROGY株式会社に、AI生成画像のデータ生成において三菱重工機械システム株式会社にご支援いただき深謝する。

参考文献

(1) 小山ほか：SUBARUコネクテッド自動運転の研究、SUBARU技報、No.48、(2021)
(2) 理経・スバルが取り組む「HILS＋VR（仮想現実）」技術は自動車開発に飛躍的なスピードをもたらす！ - Response.jp
https://response.jp/article/2020/01/08/330434.html
(3) SIP-adus SIP自動運転の成果とその先へ！
成果展示会＆自動運転シンポジウム オンライン展示会- C2 仮想空間での自動走行評価環境整備手法の開発
https://www.sip-adus.go.jp/exhibition/c2.html
*DIVP®は学校法人幾徳学園の登録商標
(4) 深層学習と領域認識を組み合わせた画像変換技術 - 三菱重工技報 Vol.59(2022)
https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/593/593060.pdf

【著　者】

長谷川　悠

小山　哉

SUBARU 新型「フォレスター」を世界初公開

2023年11月17日

米国ロサンゼルスにて開催中の2023年ロサンゼルスオートショーにおいて、新型「フォレスター」(米国仕様車)を、世界初公開しました。
SUVらしく頑丈で堂々とした存在感を感じるエクステリアデザインとし、フルインナーフレーム構造による高いボディ剛性や、2ピニオン電動パワーステアリングの採用により動的質感を向上。また、新世代アイサイトを標準装備し、安全性能も高めました。さらに、一部グレードでは11.6インチセンターインフォメーションディスプレイも搭載しました。

新型「フォレスター」（米国仕様車）

空調性能におけるお客様の声からの改善点の分析 -IQS コメントのテキストマイニング -

Analysis for Improvements in Air Conditioning Performance Based on the Customer Comments -Text Mining for IQS Comments-

坏　　亮　輔*　　大　木　裕　介*
AKUTSU Ryosuke　　OKI Yusuke

抄　録

SUBARUの空調開発では、初期品質調査(Initial Quality Study:IQS)でのお客様のコメントから指摘理由を分析し改善することで、お客様に満足いただくための開発を行ってきた。しかし、そのコメントは業界全体で数百件にも及ぶため、分析には時間を要する。さらに、分析者の主観的判断に頼らざるを得ない部分があった。

そこで、著者らは自然言語処理技術を活用したIQSのコメントのテキストマイニングによる分析手法を構築した。これにより、大量のコメントを指摘理由別に客観的に分類し、その指摘数を定量評価することが可能となった。

Abstract

In order to satisfy the customers, SUBARU has been working on air conditioning development by reducing dissatisfaction obtained from the customer comments. through the Initial Quality Study (IQS). The dissatisfaction points cannot be analyzed without relying on subjective judgment of the analyst, and the analysis takes a lot of time due to the large number of comments.

Therefore, the authors have developed a method for analyzing IQS comments by text mining using the natural language processing technology. This made it possible to objectively classify a lot of comments by reason and quantitatively evaluate the number of comments.

1．まえがき

SUBARUでは全社的にお客様の不満や使いにくさの改善に取り組んでおり、その指標の一つに初期品質調査(Initial Quality Study:IQS)のスコアを用いている。IQSは新車を購入いただいたお客様に対して実施される装備や性能、初期不具合等に関するアンケート調査をスコア化したものである。空調開発においてもIQSを一つの指標として、その内容を基に性能の改善点を明確化し開発に活かしている。

改善点を明確化するために、IQSのアンケート内容の1つであるお客様のコメントから指摘理由を分析する必要がある。しかし、コメントはお客様の不満点がフリーコメントで記載されており、その数も膨大である。そのため、分析において大量のコメントを見切れない、また分析者により文の解釈が異なるといった課題があった。

そこで、著者らは大量のコメントを客観的に評価できる手法としてAI技術に着目した。AI技術の一つである自然言語処理技術を活用したテキストマイニングにより、コメントを指摘理由別に客観的に分類し、その指摘数を定量的に評価する分析手法を構築した。本稿ではその内容と手法の妥当性について述べる。

＊ 車両環境開発部

2．初期品質調査（IQS）について

2.1 概要

初期品質調査（IQS）は米国の調査会社J.D.Power社によって毎年実施される調査で、新車購入から3ヶ月経過したお客様を対象としている。調査は装備や性能について9分野227項目（2023MYまでは223項目）の不満点・初期不具合に関するアンケートで実施され、結果は100台あたりの指摘数としてスコア化される。スコアは販売車種ごとに算出され、その車種ごとのスコアをブランド内の販売台数比率で重みづけした値の合算値がブランドスコアとなる。スコアは指摘数を意味するため、スコアの数値が低いほど評価が良いことを意味する。

IQSの結果は、品質の良い車を調べる際、特に米国の多くのお客様が参照するとされており、良い品質であることを示すにはIQSで高評価を得ることが重要である。

2.2 分析の課題

お客様に満足いただく品質の良い車づくりをしていくために、IQSの結果からお客様の指摘内容を分析し不満点を改善する取り組みを行っている。改善は不満に繋がった指摘理由をアンケートのコメントから分析し、指摘数が多い理由に対して優先的に取り組むべきである。

しかし、指摘理由が記載されたコメントは1項目あたり業界全体で数百件にも上る。すべてを人の目で見きることは難しく、文の解釈や指摘理由の重要度を見極めるにも分析者の主観が入ってしまうため、分析者の経験の影響を受けることは避けられない。

3．提案する分析手法について

そこで、著者らは近年急速な発展を遂げている自然言語処理技術を活用し、分析者の経験に依らずIQS結果の大量のコメントを指摘理由別に客観的に分類し、その指摘数を定量評価する手法を構築した。図1に本手法の処理フロー概略図を示す。

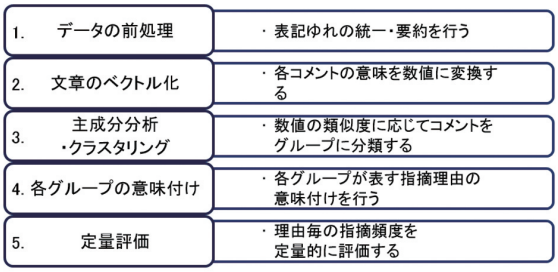


図1 本手法の処理フロー概略図

以下でその手法の内容を説明する。

3.1 データの前処理

IQSのコメントは一般のお客様のフリーコメントであるため、「air conditioner」を「AC」や「A/C」、「temperature」を「temp」と表現するなど略語（表記ゆれ）が多く存在する。表記ゆれがある状態だとこの後の分析が煩雑になるため、出現頻度が高いものに関しては可能な範囲で表記の統一を行う。

また、コメントに文字数制限等は設けられておらず文章の長さは様々である。そこで、自然言語処理ライブラリの「Transformers[1]」を活用し、全コメントに対し、要約処理を行い文の長さの差を小さくする。これにより、この後の処理において、文の長さという文の意味に直接は関係しない要素の影響を小さくすることができる。また、文章の意味に基づいた処理をしやすくなる。

3.2 文章のベクトル化

各コメントが持つ意味の類似度の比較にはテキストデータを数値的表現に変換する必要がある。その手法は、これまでに様々な提案がなされているが、今回は2018年にGoogleから発表された「Universal Sentence Encoder(USE) [2][3]」を用いることとした。USEは文章を入力として、512次元のベクトルを出力する。このベクトルは、文章に含まれる単語や単語の並び順などを基に文章全体の意味を数値的に表現する。そのため、このUSEを使用することで各コメントの意味を512次元のベクトルに変換できる。

3.3 主成分分析・クラスタリング

次に、ベクトル化されたコメントに対して類似度が高いものを同類にまとめ、グループに分割する。しかし、512次元のベクトルでは処理の負荷が高いこと、得られた結果を人が解釈するのが困難なことから次元数を減らす必要がある。そこで、主成分分析を用いた次元の削減を行う。主成分分析は、入力される多次元のデータに対して、そのデータが持つ変数間の相関関係から主成分と呼ばれる新たな成分を作成し、低次元の形へと変換する。例えば、図2のように元々は2次元（2変数）で表されていたデータを新たな軸を定義することにより、元の情報量を極力維持したまま1次元（1変数）のデータとして表現が可能となる。今回は512次元のベクトルを、主成分分析により4次元へと変換した。そのうち1つの次元はコメントの長さを意味するものであったため残りの3次元のデータがコメントを分類するための基準となる。

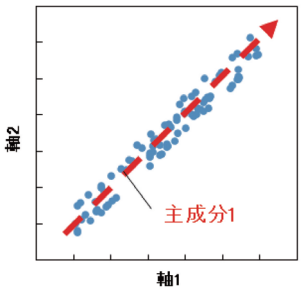


図２　主成分分析例（２次元→１次元へ）

ここで、データの類似度に基づいて分類するのがクラスタリングと呼ばれる機械学習の手法である。今回、クラスタリングには機械学習ライブラリscikit-learnに含まれるVBGMM（Variational Bayesian Gaussian Mixture Model）のアルゴリズムを使用した。VBGMMは分類数が事前にわかっていないデータに適しているとされている[4]。前述の３次元のデータをVBGMMのアルゴリズムにより４つのグループにクラスタリングした結果を図３と４に示す。図３と４では３次元のデータを2枚の平面図にそれぞれ投影している。各点がコメントを表し、色がグループ分けの結果を表す。図3から緑と青のグループ、図4から黄と紫のグループが分けられていることが見て取れる。

ここまでの処理により、コメントを類似度の高いグループに客観的に分類することができる。

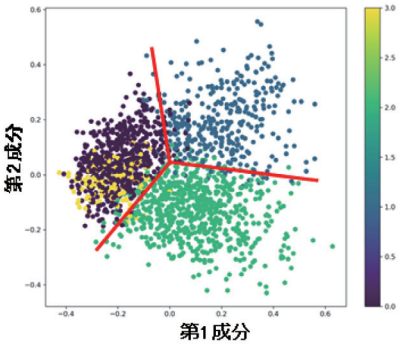


図３　クラスタリング例 第１成分vs.第２成分

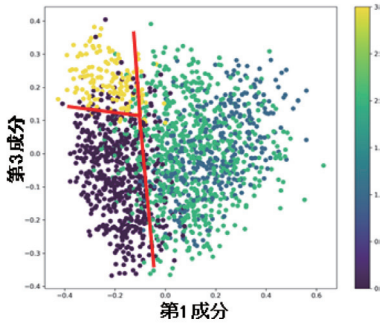


図４　クラスタリング例　第１成分vs.第３成分

3.4　各グループの意味付け

クラスタリングによるグループ分けは機械的に実施されるため、そのグループが何を表すかは人が意味付けをする必要がある。グループの意味付けは、各グループに分類されたコメントに含まれる単語の出現頻度から行った。

ただし、単純な単語の出現頻度だけでは意味付けが難しいため、自然言語処理ライブラリである「spaCy[5]」を用いて次のような処理を実施した。まず、文中に含まれる単語をすべて原型に変形して名詞・動詞・形容詞等の比較的意味の重みが大きい品詞のみを抽出する。さらに、「名詞＋名詞」「動詞＋形容詞」などの順番で出てきた単語については結合して一単語として扱うことで意味付けをやり易くした。例えば、"The air conditioner does not get cool quickly."という文章に対して、この処理を行えば"air_conditioner not_get_cool quickly."と変換される。

以上のような処理の上で、連続する2語での単語の出現頻度の上位を可視化すると、例として図5のような結果が得られる。この意味付けには分析対象とした性能に関する知識が必要となる。この例では"take while"・"take_long_time to_cool"・"not_cool quickly"など時間に関するものが多いことから「冷えるまでに時間がかかる」と意味付けした。ここでつけられた意味が不満点の指摘理由を表すこととなる。

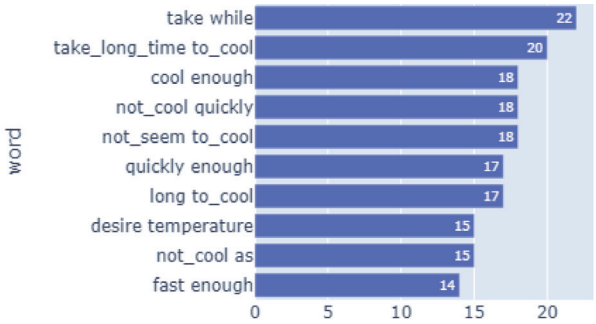


図５　グループ内の単語組合せ出現頻度可視化例

3.5　定量評価

以上により、コメントを指摘理由別に分類し、その指摘数を分析者に依らず客観的に算出することができる。ここで、IQSスコアは「100台あたりの指摘数」を表すため、IQSスコアに「指摘理由が占める割合」を乗算することで「その指摘理由による100台あたりの指摘数」を算出できる。「各指摘理由が占める割合」は銘柄別でも算出可能なため、銘柄別に各理由での指摘数を算出することで、SUBARUが他銘柄と比べて優れている点や改善が必要な点などを定量的に評価可能となる。

4．妥当性検証

構築した手法の妥当性を評価するため、IQS調査項目の一つ「CLMT04: Air conditioner doesn't achieve/maintain desired temperature（冷房の効きに関する不満）」の2022・2023年の2年分のコメントデータに適用した。

2022年におけるCLMT04のSUBARUブランドスコアは、業界全体平均であるIndustryスコアに比べて悪い。そこで、本手法により指摘要因の分析を行ったところ、コメントは4つのグループに分類された。各グループは「故障」「冷えるまでに時間がかかる」「冷房能力不足」「期待する温度とギャップがある」と意味付けすることができ、これらがCLMT04項目における指摘理由を表している。この4つの指摘理由について「100台当たりの指摘頻度」を業界全体平均・SUBARUそれぞれで算出した結果を図6に示す。「冷えるまでに時間がかかる」「期待する温度とギャップがある」の2項目の指摘頻度が全体平均を上回っており、これらが優先的に改善を目指すべき課題と考えられる。

この課題に対し、2023年IQS集計対象モデル以降のSUBARU一部車種に改善策を織り込んでいる。2023年のコメントに対して、同様に指摘数の分析を行ったところ(図7)、前年では指摘数が全体平均を上回っていた「冷えるまでに時間がかかる」「期待する温度とギャップがある」の2項目とも全体平均を下回る結果となった。改善策が狙い通りにお客様の不満改善につながったことが確認できた。

以上のことから、本手法の妥当性が確認でき、分析経験の無い人でも大量のコメントを客観評価できることが検証できた。

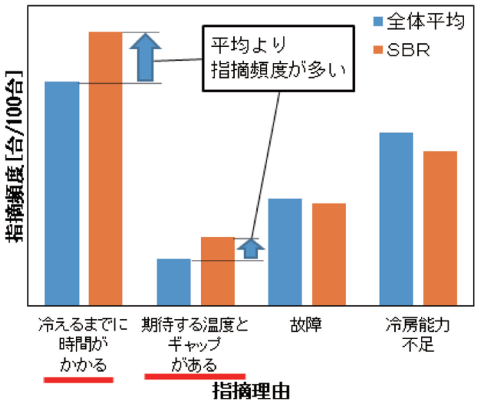


図6　2022年CLMT04項目分析結果

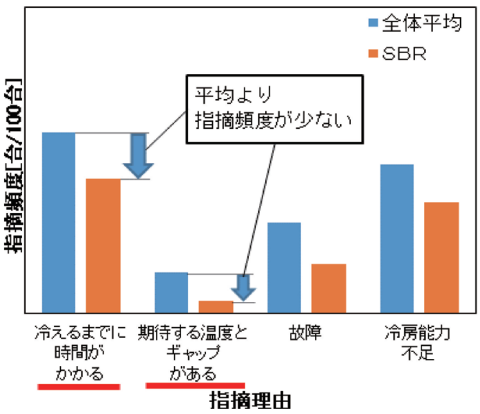


図7　2023年CLMT04項目分析結果

5．まとめ

本稿で自然言語処理技術を活用したIQSのコメントのテキストマイニングにより、大量のコメントから指摘理由別に指摘数を定量評価する手法を構築した。冷房に関する指摘理由分析を行った結果、優先的に改善を目指すべき課題として「冷えるまでに時間がかかる」「期待する温度とギャップがある」を抽出した。その課題に対して、一部車種に織り込んだ改善策の効果を定量的に評価できた。これらの結果から、従来人の手ではやりきれていなかった分析を経験に依らず誰でもできることを確認できた。このため、今後空調性能に関する他項目の分析にも活用していき、お客様に満足いただける車づくりをより一層推進していく。

謝辞

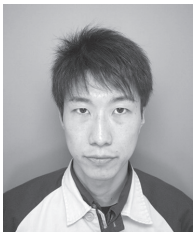
本手法の構築は群馬大学連携AI教育の成果であり、関係者各位に深く御礼申し上げます。

参考文献

(1) Hugging Face：Transformers, https://huggingface.co/docs/transformers/index (2024-7-25)
(2) Kaggle：Google¦universal-sentence-encoder, https://www.kaggle.com/models/google/universal-sentence-encoder (2024-6-24)
(3) Cer,D. et al：Universal Sentence Encoder, arXiv:1803.11175
(4) scikit-learn：Choosing the right estimator, https://scikit-learn.org/stable/machine_learning_map.html(2024-6-24)
(5) spaCy：Industrial-Strength Natural Language Processing, https://spacy.io/ (2024-7-12)

【著　者】

圷　亮輔


大木　裕介

SUBARU 特別仕様車「WRX S4 STI Sport ♯」を発表

2024年1月12日

SUBARUのモータースポーツ統括会社であるスバルテクニカインターナショナルは、「WRX S4 STI Sport R EX」をベースとした特別仕様車「WRX S4 STI Sport ♯（シャープ）」を発表しました。500台限定で販売。

特別仕様車「WRX S4 STI Sport ♯」

STI 製フレキシブルパフォーマンスホイール フロント

未規制物質の生成機構の調査と低減技術の実証

Investigation of the Formation Mechanism of Unregulated Substances and Demonstration of Reduction Technologies

中山 智裕[*1] NAKAYAMA Tomohiro
桂 拓未[*1] KATSURA Takumi
原井 惇行[*1] HARAI Atsuyuki
石坂 浩大[*2] ISHIZAKA Kouta

抄 録

現在、世界的に新規規制物質について規制強化の議論が進められている。今後の規制候補として、アンモニア(NH3)、亜酸化窒素(N2O)、ホルムアルデヒド(HCHO)などの導入について対応技術の開発が進められている。乗用車に先行して産業起因における対策が求められているが、自動車排ガスに対して調査を先行し、対応技術の開発を進めておくことが重要と考える。

本調査では、自動車用ガソリンエンジンにおいて将来的に対応技術開発が必要となる未規制物質の排出メカニズムの調査、および現行の規制物質を含む排ガス成分について低減技術の実証試験を行った。エンジンアウトエミッションと触媒後の排ガスをフーリエ変換赤外分光法(FT-IR)により多成分計測し、アンモニア、亜酸化窒素、ホルムアルデヒドについて特性調査および低減のための実証試験を行ったので、その結果を述べる。

Abstract

Discussions are currently underway worldwide on strengthening regulations on newly regulated substances. Technologies are being developed to address the future introduction of restrictions on candidate substances such as ammonia (NH3), nitrous oxide (N2O), and formaldehyde (HCHO). Although measures for industrial emissions are required ahead of those for automobile exhaust emissions, it is important to promote research in advance and develop technologies.

In this study, we have investigated the mechanisms of unregulated substance emissions from gasoline engines which will require future technology development and have conducted demonstration tests of technologies for reducing exhaust gas components, including currently regulated substances. Multi-component measurement was made using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) for engine-out emissions and post-catalyst exhaust gases. This paper reports the results of characteristic investigations and demonstration tests for reducing ammonia, nitrous oxide, and formaldehyde.

1. まえがき

未規制物質の規制動向について、欧州では世界に先行して策定の動きがみられ、アンモニア、メタン、亜酸化窒素、ホルムアルデヒドの導入が議論されており、欧州を中心として対策技術の開発が加速している。国内では令和2年の環境省の中央環境審議会の第14次答申「今後の自動車排出ガス低減策のあり方」[(1)]は、現状微小粒子の規制強化を優先するが、その他未規制物質対策「自動車排出ガス低減対策の検討にあり、温室効果ガスである二酸化炭素に加え、メタンCH4や亜酸化窒素(又は一酸化二窒素(N2O))等が増大しないよう配慮する必要がある。」との見解がまとめられている。このような動きに対して、自動車メーカとして先行し対応技術の開発を進めておくことが重要と考える。

＊1 車両環境開発部
＊2 パワートレイン設計部

2．試験装置

試験装置の概要を図1に、単気筒エンジンの諸元を表1に示す。実験には吸排気脈動を調整するためのチャンバーや背圧調整機構を有した単気筒エンジンを用いた。吸排気脈動や壁面温度は事前の調整により、量産4気筒エンジンの境界条件を再現している。排ガス成分の計測には堀場製作所製MEXA-1600DEGRを用いた。未規制成分の計測には堀場製作所製FTX-ONEを用いた。未規制成分の計測は触媒前後での変化をとらえるため、触媒前後から選択して計測できるように配管している。

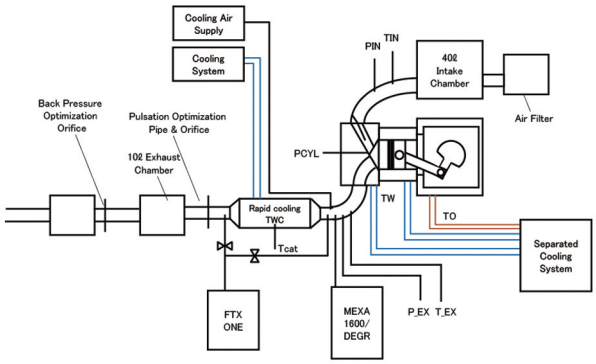


図１　試験装置の概要

表１　単気筒エンジンの諸元

Single Cylinder Engine Specifications	
Bore × Stroke [mm]	Φ94 × 90
Displacement [cm^3]	624.58
Compression ratio[-]	12.3
Cooling water temperature[K]	273～373
Injection system	Side mounted gasoline direct injection
Fuel pressure [MPa]	10～38

量産仕様の触媒を要素試験用のベースとし、外周部に冷却回路、流路上流に冷却空気の投入配管を設置した。また、触媒層内温度を800℃から-5℃まで冷却、ソーク可能な試験装置を製作し、触媒温度の変化に伴う未規制成分の排出特性を調査した。

2.1　アンモニア生成の調査

アンモニアの生成には排ガス中の一酸化窒素NOに対し、三元触媒上で生じる水性ガスシフト反応及び水蒸気改質反応が強く寄与している。それらの反応により生じる水素H2が還元剤として作用し、アンモニアが生じることが知られている[(2)]。水性ガスシフト反応はロジウムRhが300℃以上、白金Ptが200℃程度から反応が活発化し、セリアCeの酸素吸蔵(レドックス反応)の有無などによって温度帯毎の転換率が大きく異なる。Rh、Ptを含む際は概ね200℃付近から水性ガスシフト反応が開始する。一方、水蒸気改質反応は、高温のリッチ条件で活発に反応が進む。温度帯としては320℃付近から高温側で水蒸気改質に伴うH2の生成が活発になる。

触媒を低温ソーク後、運転を開始、触媒温度Tcatが過渡変化する中でFT-IRを用いた多成分排ガス計測を実施した。触媒前後の排ガス成分を計測し、同時計測した触媒層内温度により、温度毎の触媒前後の排ガス成分の特性分析を行った。図2に触媒温度変化中における排ガス成分の排出特性を示す。

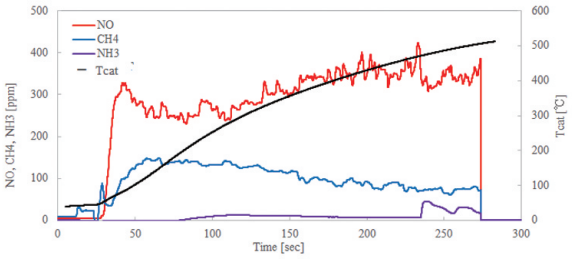


図２　触媒温度と排ガス成分の排出特性

図3に温度毎で整理したλの変化に伴う三元触媒(TWC)前後のアンモニア排出量を示す。アンモニアはエンジンアウトエミッション中にはほとんど存在しないことがわかる。触媒上の反応によるNO-N2Oの生成が支配的と考える。触媒前後の排ガス濃度を触媒温度Tcat毎に比較し、投入NO量で正規化することでNO転換率とNH3生成効率を算出した。その式を(1)(2)に示す。

$$Conversion_{NO} = \frac{NO_{After-TWC}}{NO_{Base}} \quad \cdots(1)$$

$$Formation_{NH3} = \frac{NH3_{After-TWC}}{NO_{Base}} \quad \cdots(2)$$

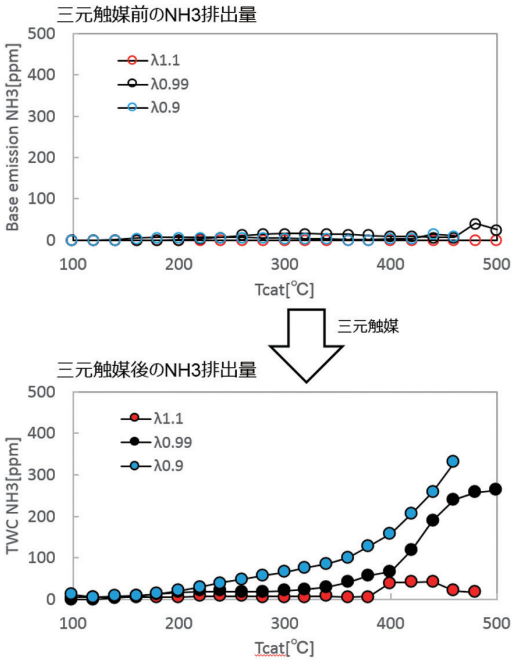


図３　三元触媒前後におけるアンモニア生成量

FT-IR計測から得られた排ガス成分より、NOのNH3転換率を分析した。排出特性を図4に示す。

(1)Tcat 200℃からの水性ガスシフト、320℃付近から水蒸気改質による水素供給により、NOからNH3が生成する。

(2)特に、還元雰囲気が強いリッチ条件λ0.9では、Tcat 400℃とするとNOからのNH3転換率は60%を上回る。

(3)リーン環境下ではNH3はほぼ生成しない。

これらの結果より、水蒸気改質領域において、THCの浄化やNH3転換率の抑制には、λリーン化が極めて重要である。NH3の生成に関わるCeは酸素の包有量が運転条件によって緩やかに変化する。このため、過渡で見ると、NH3生成はブロードに変化することも重要と考えられる。

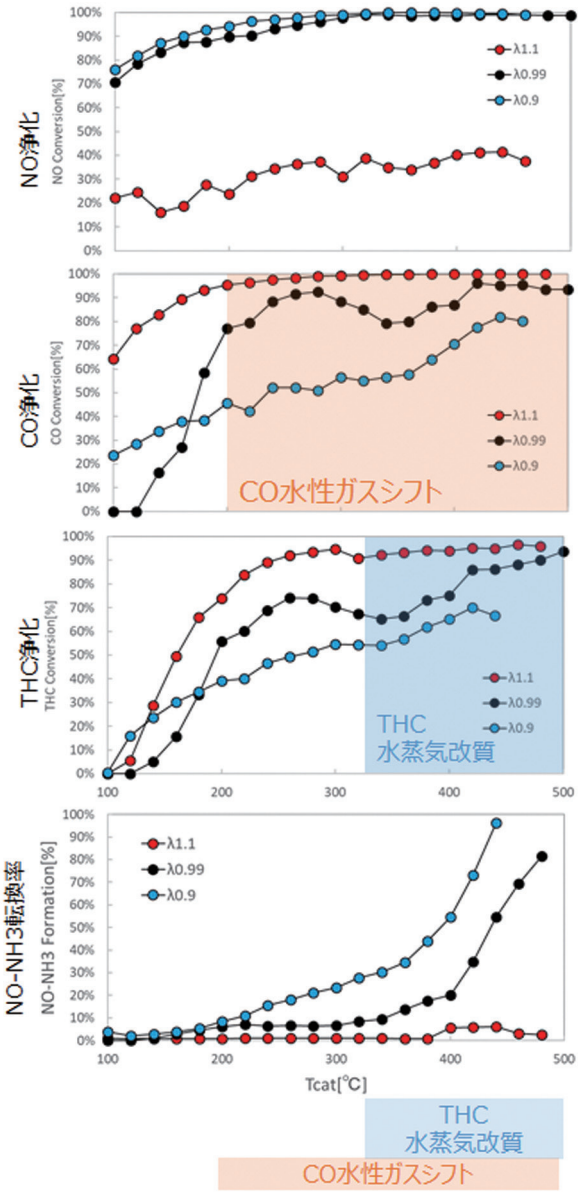


図４　触媒温度毎のNH3転換率、生成率

2.2　亜酸化窒素生成の調査

亜酸化窒素N2Oの生成は排ガス中のNOに対し、三元触媒上においてアンモニア同様にH2、CO、THCによる還元反応により生じる。これらは特に300～400℃で活発な反応である[(3)]。N2Oは基本的に、ストイキ付近～ややリーン条件で生成しやすく、リッチ条件では生成反応が進まない。さらに、NH3生成領域よりも低温側で生じ、450℃以上で生成が見られない特徴がある。これはN2OがN2に還元される反応が強く働くためと考えられる。

図5に触媒温度毎の触媒前後のN2O排出量を示す。N2Oはエンジンアウトエミッションにもわずかに存在する。リッチ条件で生じているN2Oは高温の触媒を通ると還元されてN2になる。一方、N2Oはストイキ～リーン条件ではエンジンアウトエミッションに含まれず、触媒上でN2Oが生じていることがわかる。

NH3と同様に触媒前後の排ガス濃度を触媒温度Tcat毎に比較することで転換率と生成率で分析した。

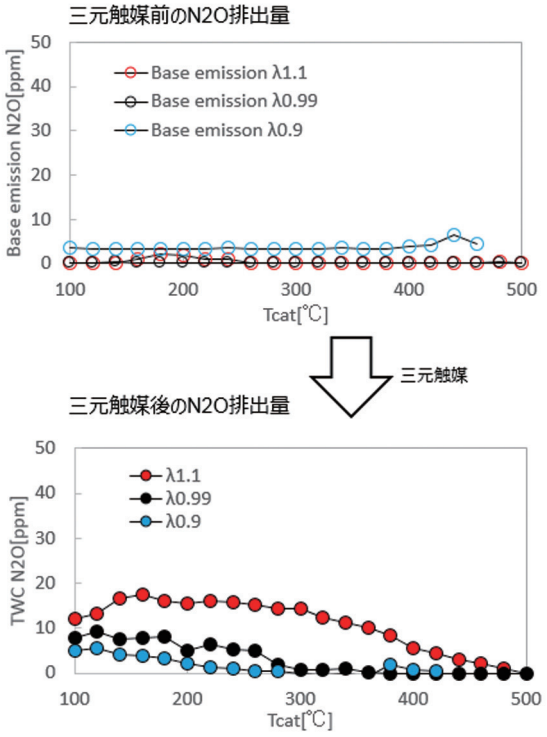


図５　触媒前後のN2O排出量

NH3と同様にFT-IR計測から得られた排ガス成分より、NOのCO/THC転換率、N2O生成率を分析した。排出特性を図6に示す。

(1)ストイキ条件においては、触媒温度100 ～ 300℃にてN2Oの生成が確認される。

(2)リッチ条件では100 ～ 300℃にかけて還元が進み、N2Oの生成は少ない。リーン条件では触媒温度450℃までになだらかにN2Oの生成が認められる。

(3)NOからN2Oへの転換はNH3の様に生成率は高くない。最大でも100℃から200℃の間で約3%強である。

2.3　ホルムアルデヒド生成の調査

ホルムアルデヒドHCHOは、燃焼期間中における生成分は化学反応で即座に消費されるため、膨張行程後半から排気管内での酸化反応で発生するものが主として挙げられる[(4)]。ガソリン燃焼の場合、λ 0.8 ～ 0.9で最も少なく、リーン化で増加、低負荷ほど生成しやすい特性を持つ。

図7に三元触媒前のHCHO排出量と三元触媒によるHCHOへの転換率を示す。HCHOの排出特性は、リーン条件でHCHOの排出が多い。特に、低温始動直後は未燃燃料の増加と同じHCHOの増加がみられる。三元触媒上での浄化率は低温から高く、触媒温度200℃以下の低温条件においてリーン燃焼を避けることが重要となる。

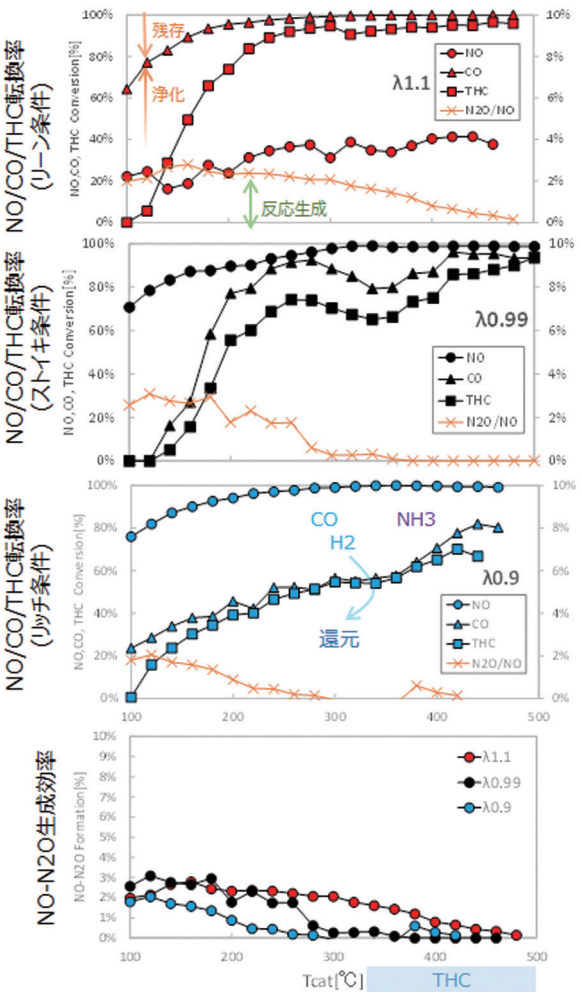


図６　触媒温度毎のN2O転換率、生成率

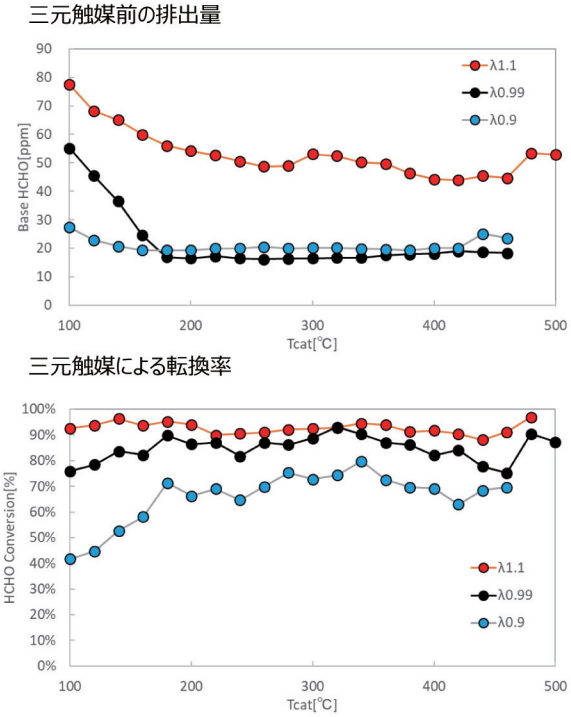


図７　触媒前のHCHO排出量と触媒によるHCHO転換率

3．混合気制御によるエンジンアウトエミッション改善

2章までの結果より、NH3の低減には、NOx排出低減が効果的であることが確認でき、また燃焼安定性が悪化することにより、特にリーン側に振れることでN2Oが増加する事象が確認できた。

したがって未規制成分の低減には燃焼安定性と低NOxの両立が必要となる。そこで未規制成分の低減検証のため､燃焼安定性と低NOxの両立を検討[(5)]した。以下3つの手段について評価を進めた。

(1)リッチ条件であるλ0.5弱の混合気を点火プラグ近傍に形成成層化させる。

(2)燃焼速度を上げ過ぎず、リタード燃焼中の膨張速度により急激に燃焼温度を2200K以下へ下げる。

(3)大部分の混合気は吸気行程前半に噴射し、弱リーンで燃焼させる。

このコンセプトを確認するために、エンジン回転速度1500rpm、図示平均有効圧(IMEP)200kPa、水温20℃、燃料圧力20MPaにて単気筒を用いた燃焼試験を行った。結果を図9に示す。起点となる噴射時期250deg.ATDCから遅角化させることで、NOx、THCの低減が確認できた。PN性能との両立を考慮すると、本仕様では、2ndSOI305deg.ATDC付近が最適と考える。

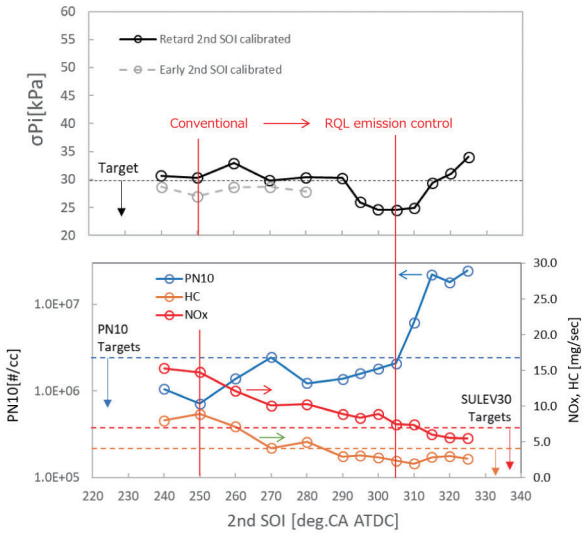


図8　成層燃焼を用いた触媒暖機運転時の排ガス特性

4．排ガス低減のため実証試験

調査結果を基に、未規制物質の低減を行い、NO、THCと合わせて、排ガス低減の実証試験を実施した。

4.1　実験装置概要

試験装置には、図9に示すように前章で用いた単気筒システムを用いている。ただし、触媒反応が排ガス成分の低減影響を調査するために、図10に示すように三元触媒にヒーターを巻き付け加熱できる仕様とした。電気加熱により、触媒は約700℃まで加熱することが可能となる。なお、触媒仕様は前章までの実証で使用した仕様と同一である。

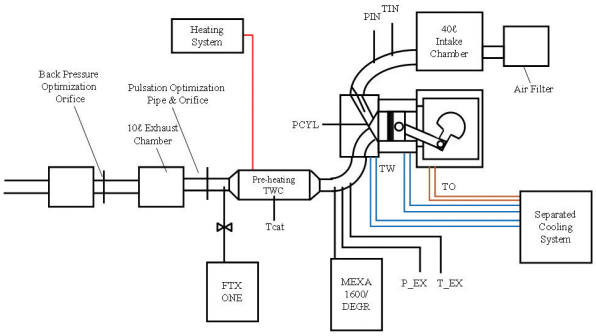


図9　試験装置の概要（電気加熱触媒仕様）

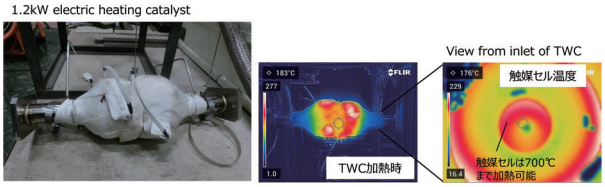


図10　電気加熱触媒（e-cat）の概要

4.2　試験結果及び考察

2章までの各種未規制成分の調査結果を基に、未規制物質の低減試験を行った。以下2通りの実証内容を検討し結果を得た。

実証①：NH3、N2の生成源であるNOを低減する。

実証②：N2Oを生じる触媒温度を使用しない。

NH3排出の少ない燃焼制御を実施する。

運転条件はエンジン回転速度1500rpm、IMEP200kPa、燃圧20MPaにて、触媒暖機条件にて排ガス計測を実施した。噴射時期や触媒温度が排ガス特性に及ぼす影響を把握するため表2に示す条件にて計測を実施した。各試験共に10secを基準として触媒暖機条件で運転を実施した。

図11は吸気行程噴射における排ガス挙動を示す。N2OやNH3の生成と触媒温度との関係性は、前章の結果と同じである。HCHOは運転前の排気管中に滞留する未燃分に伴う反応と考えられる。図12は噴射時期の遅角化による成層燃焼制御での排ガス挙動を示しており、成層化に伴いNOxとTHCが低減する。これに伴い、触媒温度200℃以上の広い領域でNH3の低減が確認できた。つまりNH3の生成源となるNOxの低減によりNH3生成量が減少した。また、図13は上記の条件に加えて、電気加熱触媒(e-cat)を用いて予め触媒温度を昇温させておくことで未規制物質の排出低減を示す。モータリング後の運転で触媒温度は一旦280℃程度まで下がるが、そこから昇温を始める。浄

化率の低い温度で、一時的にNOが排出されているが、それ以外ではHC、NO共に高い浄化率を維持する。

表２　運転条件

Operating Condition	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
Engine speed[rpm]	1500	←	←
IMEP [kPa]	200	←	←
2nd. Start of Injection [deg.ATDC]	250	305	←
θ_{IGN} [deg.BTDC]	-12	←	←
Injection Stages	2 stages (75%, 25%)	←	←
P_{FUEL}[MPa]	20	←	←
e-cat	-	-	○

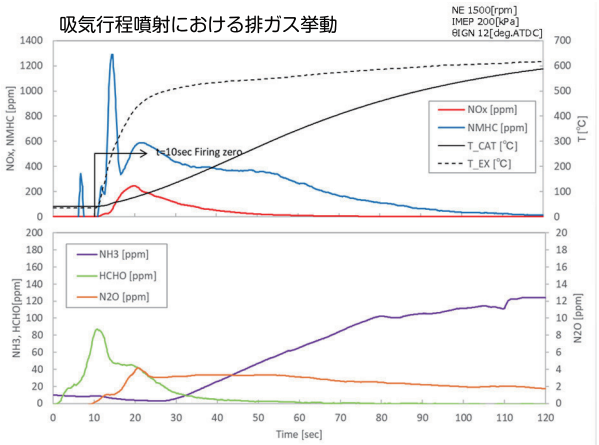


図１１　吸気行程噴射における排ガス挙動(I)

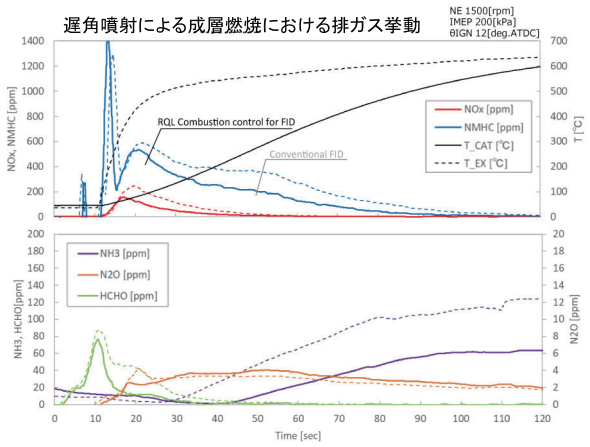


図１２　遅角噴射による成層燃焼における排ガス挙動(II)

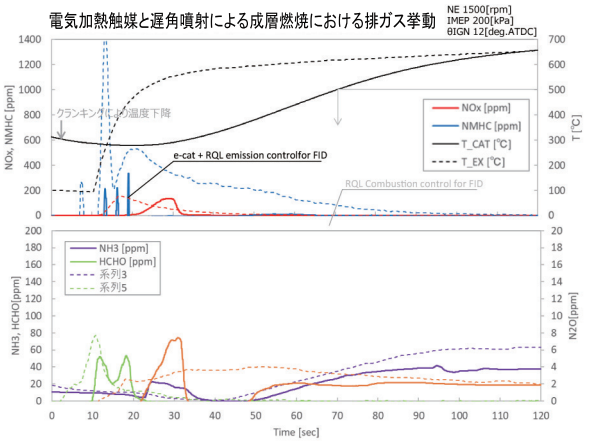


図１３　電気加熱触媒と遅角噴射による成層燃焼における排ガス挙動(III)

図14は、触媒暖機条件で触媒層内温度が500℃に達するまでの各成分の積算排出量、および触媒昇温時間t_heatを示す。成層燃焼による低NO燃焼、更に電気加熱触媒を用いた触媒温度制御を組み合わせることで、未規制物質の大幅な低減が見られた。単気筒エンジンでの試験結果ではあるが、その削減割合から将来の排ガス規制、および未規制物質対応技術の可能性を見いだすことができた。

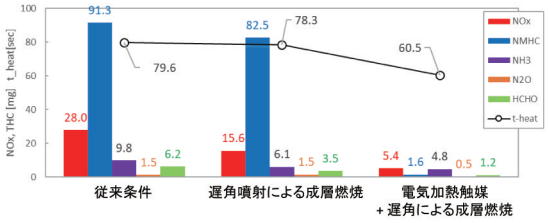


図１４　各運転条件における排ガス低減効果

５．まとめ

未規制物質に関する技術調査を行った。排ガス計測による各成分の生成特性を基に触媒暖機モード中の未規制物質を含む排ガス低減の実証試験を実施した。エンジンアウトエミッションと触媒後排ガスをフーリエ変換赤外分光法(FT-IR)による多成分計測で以下の知見を得ることができた。

また、表3に未規制物質に関する調査結果概要を示す。

表３　未規制物質に関する調査結果概要

成分		NH3	N2O	HCHO
エンジンアウトエミッション		生成なし	僅かにリッチの高NO条件のみ微量生成	膨張行程～排気ポート中の未燃分の酸化で生成
三元触媒　生成		200℃～CO水性ガスシフト 350℃～HC水蒸気改質反応 NO転換率は～60%	100～300℃までNOがH2, CO, THCと反応で生じるNO転換率は～6%	生成なし
燃焼制御	増加	リッチ条件のCO, HC高負荷・高回転の高ベースNO	触媒温度100～300℃のストイキから僅にリーンの触媒上で生成 ベースNO増	リーン 低負荷（燃焼・排気温度）
	低減	触媒温度350℃以上でストイキ～僅かにリーン化	触媒温度100～300℃リッチ化 NH3を含む還元剤増でN2に還元, NO低減	触媒温度200℃以上で浄化, 未燃成分低減

(1)燃焼制御により、NH3, N2Oの生成源であるNOを低減する。

⇒制御方法：強＋小　領域成層＋リタード燃焼による低NO燃焼。全体の燃焼はわずかにリッチ制御を維持しNH3によりN2O還元。

(2)上記燃焼技術(1)に加え、N2Oを生じる触媒温度を使用しない。

⇒制御方法：電気加熱触媒による300℃までの触媒加熱を実施し、それまではわずかにリッチ制御を施すことでNH3の少ない燃焼制御（300℃～）を行う。さらに触媒温度350℃以上でストイキとなるように燃焼制御を行う。

燃焼制御技術と電気エネルギを用いた触媒温度制御により、未規制物質の低減技術の可能性を示すことができた。本知見を活用し、今後も低排ガスエンジンの技術開発を進めていく。

参考文献

(1) 環境省中央環境審議会、今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について(第十四次報告)、https://www.env.go.jp/content/900400276.pdf(2020)

(2) Jacques Barbier Jr., et al., Steam effects in three-way catalysis, Apply Catalysis: Environmental 4(1994) 105-140

(3) Wo Bin Bae, et al., Emission of NH3 and N2O during NO reduction over commercial aged three-way catalyst (TWC): Role of individual reductants in simulated exhausts,　Chemical Engineering Journal Advances 9 (2022) 100222

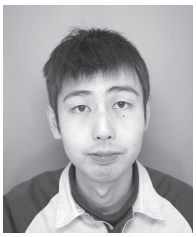
(4) 松本ら,アルコール含有ガソリンの組成と燃料性状について,　燃料協会誌, 第59巻第623号(1979)

(5) T. Kamimoto and M. Bae, SAE Paper 880423 (1988)

【著　者】

中山　智裕

桂　　拓未


原井　惇行

石坂　浩大

歩行者事故データを用いた深層学習による頭部衝突位置の予測と検証

Prediction and Validation of Head Impact Location Using Deep Learning with Pedestrian Crash Data

江　島　　晋*　　外　処　凌　雲*
EJIMA Susumu　　TODOKORO Ryoun

抄　録

米国における交通事故死者数に占める歩行者の割合は、過去10年間で17%まで増加しており、歩行者・自転車等の交通弱者への対策が急務である。歩行者事故における頭部外傷は致死率が高いことで知られており、頭部への被害軽減を目的とした様々な安全デバイスが開発されている。本研究では、市場事故データに深層学習を用いたサロゲートモデルを適用し、頭部衝突位置(X座標、Y座標)を予測した。その結果、Y座標については十分な精度が得られたが、X座標についてはY座標に比べて精度が低下した。また、頭部衝突位置を予測する上で、衝突速度、ボンネット先端の高さに加え、歩行者の身長、車両との衝突位置が重要であることを明らかにした。市場事故データを用いた検証を積み重ねることでサロゲートモデルを改良し、精度の向上が期待される。

Abstract

As a percentage of traffic fatalities in the U.S. pedestrians have increased to 17% over the past decade. It is well known that the fatality rate of head injuries in pedestrian crashes is high, and various safety features have been implemented to mitigate head injuries. In this study, head impact location (X-coordinate and Y-coordinate) was predicted and validated with field data utilizing a surrogate model based on deep learning. The surrogate model reflected the crash data accurately and Y-coordinate showed higher correlation than X. In addition to impact speed and bonnet leading edge height, pedestrian's height and impact point on vehicle were found to be important in predicting the head impact location. Further validation with field data will improve the accuracy of the model.

1．まえがき

国内における歩行者の交通事故死者数は、図1に示す通り年々、減少傾向を示しており、2022年の時点で995人[(1)]である。一方、米国における死者数は、増加傾向を示しており、国内と同じ時点で7,752人[(2)]となっている。過去10年間で米国における交通事故全体の死者数に占める歩行者の割合は、約17%まで増加しており、人・道・車が一体となった取り組みが急務となっている。米国運輸省(USDOT)は、交通事故死傷数の増加を深刻な問題と捉え、National Roadway Safety Strategy (NRSS)[(3)]を発表し、インフラの整備[(4-6)]や交通安全プログラム[(4)]の構築など、様々なプロジェクトが動き出している。当社においても2030年以降に販売する車両を用いて交通事故死者ゼロ[(7)]を目指しており、乗用車乗車中の事故だけでなく、歩行者・自転車等の交通弱者に対しても有効な安全対策を検討している。

歩行者事故における頭部の外傷は致死率が高い[(8)]ことが知られており、頭部への被害を軽減するために、様々な安全対策が講じられている。特に、頭部保護を目的として開発された歩行者保護エアバッグ[(9)](図2)の保護性能の効果を正しく見積もるには、市場事故に対して頭部が車両のどの位置に対して、どのくらいの速度で衝突するかを予測することが重要である。

近年、機械学習とComputer Aided Engineering (以下、CAEとする)を融合した技術が開発されており、歩行者と車両が衝突する現象を車載カメラで取得し

＊ 車両安全開発部

た画像情報を元にした予測[10]や、歩行者事故における頭部傷害の軽減を目的としたボンネットの設計に活用[11-12]されている。当社においても機械学習を用いた歩行者の頭部挙動の予測[13-15]を行っており、歩行者と車両の衝突シミュレーションより深層学習（以下、DNN: Deep Neural Networksとする）を用いたサロゲートモデルを構築し、頭部衝突位置、ならびに衝突速度を予測する手法を開発した。この手法は、従来までの膨大な時間を要するCAEを用いた解析を短縮化するだけなく、十分な予測精度が得られることから車両の設計・開発に貢献している。

本研究では、DNNを用いたサロゲートモデルの有効性を示すために、実際の歩行者事故データを用いて頭部衝突位置の予測、および検証を行う。事故データとしては、米国ミシガン大学（ICAM: International Center for Automotive Medicine）が取得したミシガン州における歩行者・自転車事故データ[16]（VIPA: Vulnerable road user Injury Prevention Alliance）を用いた。さらに、サロゲートモデルの特徴量として使用した各設計パラメータの予測精度に及ぼす影響について分析することにより、各パラメータの寄与度についても明らかにする。

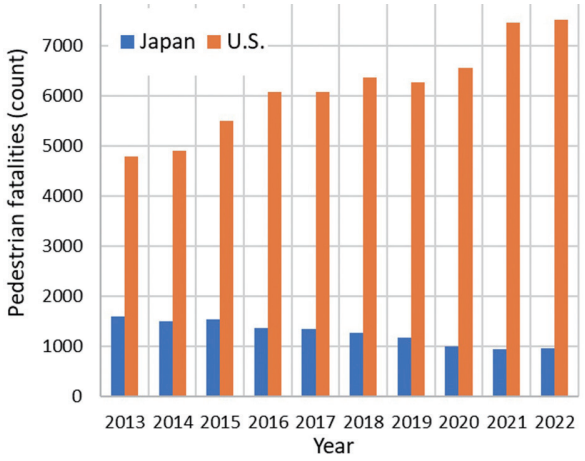


図１日米における歩行者死亡事故の推移[1-2]

図２歩行者保護エアバッグ[9]

2．方法

サロゲートモデルは、代理モデルとも呼ばれており、衝突シミュレーションの結果を機械学習させることで、複雑なシミュレーションの工程を省き、短時間で結果を予測することが可能となる。ここでは、歩行者の頭部挙動に着目し、様々な衝突形態を表現するために定義した設計パラメータと、それらを特徴量として予測を行うサロゲートモデルを構築する過程を説明する。さらに、得られたモデルに対して実際の事故データを適用し、モデルの有効性を示す。

2.1　設計パラメータ

歩行者モデルとしてMADYMO (Mathematical Dynamic Models)[17]に用意されている4体（6YO, AF05, AM50, AM95）と、車両モデルとして4車種（Passenger Car:2車種, SUV:2車種）を用いた衝突シミュレーションを実施した。なお、歩行者の衝突シミュレーションでは計算コストを低減するため車両は剛体モデルとした。衝突形態は、米国における死亡重傷の割合が高い、車両直進中に歩行者と衝突する形態（横断中: Crossing, 対面背面: Longitudinal）[18]とした。

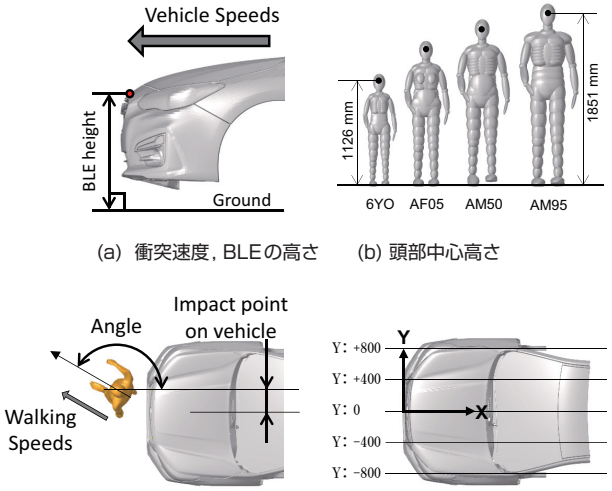
表１に各設計パラメータを示す。車両に関する設計パラメータとしては、衝突速度とボンネット前端（以下BLE: Bonnet Leading Edgeとする）の高さ（図3-(a)）である。衝突速度については、事故統計データ[19]より危険認知速度が30 km/h付近より歩行者の致死率が増加することから、その値を始点に3水準とした。なお、車両モデルは衝突後のブレーキ制動無しの条件で実施した。BLEの高さについては、衝突後に歩行者

表１サロゲートモデルに使用した各設計パラメータ

設計パラメータ（単位）		水準数	詳細							
車両	BLE高さ (mm)	4	596	710	940	1038				
	衝突速度 (km/h)	3	30	35	40					
歩行者	歩行速度 (km/h)	3	0	4	8					
	衝突角度 (deg)	8	0	45	90	135	180	225	270	315
	頭部中心位置 (mm)	4	1126	1468	1692	1851				
	衝突位置 (mm)	5	-800	-400	0	400	800			
合計		5760								

の上半身が車両に倒れ込む際の回転中心となることから、車両形状を表す代表的な寸法として用いた。なお、歩行者の上半身が倒れ込んだ際に衝突するボンネットの角度については、車両モデルの違いによる差は顕著に見られないことから、設計パラメータからは除外した。

一方、歩行者の設計パラメータは、体格を代表する頭部中心高さ(図3-(b))を4水準とし、歩行速度は、表1に示す停止中、歩行中、ランニング中を想定して3水準とした。図3-(c)に示す歩行者の車両との衝突角度は、車両に正対する歩行者の向きを0 degとし、反時計回りに45 deg毎に設定して8水準とした。また、車両の衝突位置は図3-(d)に示すように車両前端部中央を原点にとり、5水準とした。歩行姿勢はEuro NCAPの電子認証プロトコールTechnical Bulletin 024[20]に基づいた姿勢とした。これらの設計パラメータを元に歩行者と車両の衝突シミュレーション(5760ケース)を行うことで、頭部衝突位置が得られる。



(a) 衝突速度, BLEの高さ　(b) 頭部中心高さ

(c) 歩行速度,衝突角度,衝突位置　(d) 車両原点

図3 設計パラメータ

2.2 DNNによるサロゲートモデル

DNNの概要を図4に示す。DNNは人間の脳の神経回路の一部を数式的なモデルで表現したものであり、神経細胞を模したニューロンを層毎に並べ、入力層-中間層-出力層の多層構造で構成される。ここでは、入力層として各設計パラメータ(6ノード)が読み込まれ、中間層では1層辺り64ノード、深さは方向に対して5層並べて、歩行者の衝突挙動を学習する。最後に出力層で歩行者の頭部衝突位置(X座標,Y座標)が予測される。DNNには5760件のシミュレーション結果の内、ランダムに選択した80%を訓練データとして使用し、残りの20%はテストデータとして予測精度の検証に用いる。汎用性の高いモデルを構築するために、テストデータに対する性能向上が見込めなくなった段階で学習を打ち切ることにより、過学習になるのを抑制した。サロゲートモデルの構築にはPython 3.11[21]を用い、学習に用いたアルゴリズムの詳細については表2に示す通りである。

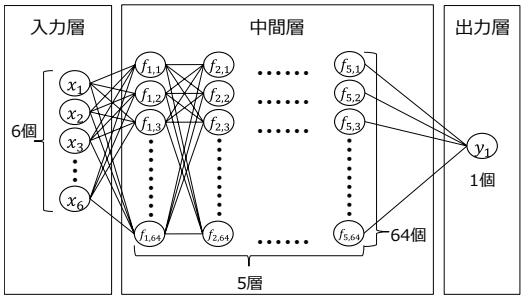


図4 Deep Neural Networks(DNN)

表2 学習アルゴリズム

Loss function	Sum of squared error
Activation functrion	ReLU
Optimaizer	RMSprop
Early Stopping	500
Epoch	1000
Patch Size	32
Learing rate	0.001

2.3 VIPAデータベース

サロゲートモデルで定義された6個のパラメータ(衝突速度、BLEの高さ、頭部中心位置の高さ、車両の衝突位置、歩行速度、衝突角度)を事故データから抽出する手順について説明する。車両と歩行者との衝突速度の範囲は30 ～ 60 km/hとし、車両前面が直進中に歩行者と衝突した事例の内、頭部と車両の接触痕があった33件を用いた。なお、車両はPassenger CarとSUVに限定した。BLEの高さは地上よりボンネット先端までの高さを用い、歩行者の頭部中心位置に関しては歩行者の身長で代用した。歩行速度、および衝突角度についてはデータベースに記載されているものを使用し、車両と歩行者の衝突位置については、下肢、または腰部が最初に接触した位置を衝突痕より求めた。これらの値を特徴量としてDNNに入力することにより、頭部衝突位置の予測を行う。また、サロゲートモデルに使用した各パラメータの精度に及ぼす影響についても検証する。ここでは、予測した結果と実際の事故データのイメージを図5に示す。

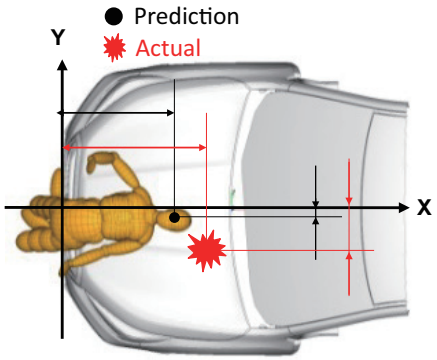


図５ サロゲートモデルによる予測値と実測値

３．結果

3.1　テストデータを用いた予測精度の検証

DNNによる頭部衝突位置(X座標,Y座標)に関する予測精度について訓練データから得られたサロゲートモデルとテストデータを用いた結果を示す。図6と図7は頭部衝突位置のX座標とY座標を用いて比較したものである。図中の緑線と橙線は誤差率±10%の境界を表している。頭部衝突位置はX座標、Y座標ともに誤差±10%の境界内に入っており、高い予測精度（相関係数：0.99以上）が得られていることが分かる。頭部衝突位置のX座標が2000mmを超えるケースについては、歩行者と車両の衝突位置が車両前端部（±800mm）であった。また、Y座標については、車両の全幅（±800mm）を超えるケースも見られ､2次衝突(地面)した可能性が考えられる。

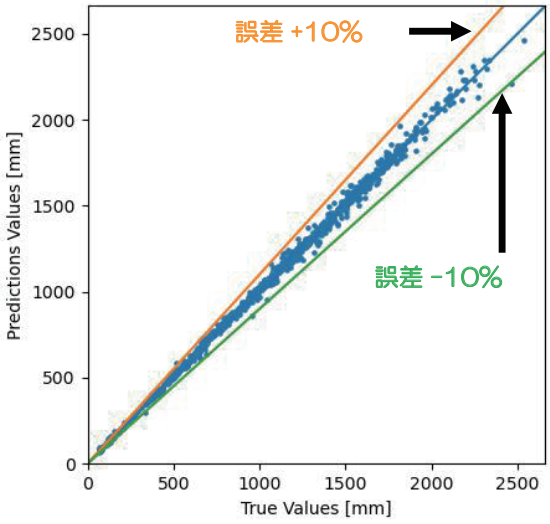


図６ テストデータを用いた頭部衝突位置 (X 座標) の予測精度
(相関係数 :0.998)

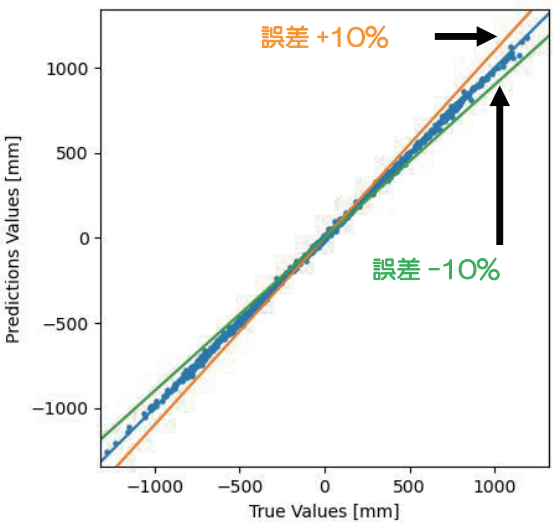


図７ テストデータを用いた頭部衝突位置 (Y 座標) の予測精度
(相関係数 :0.999)

3.2　歩行者事故データを用いた予測精度の検証

深層学習(DNN)を用いたサロゲートモデルは、高い精度が示されていたことから、実際の事故データを用いて予測を行った。図8と図9に頭部衝突位置について実測値と予測値の関係を示しており、図中の緑線と橙線は誤差率±20%の境界を表している。事故データについてはX座標の相関係数は0.716、Y座標の相関係数は0.930であり、X座標に比べてY座標の予測精度は高かった。X座標については、設計パラメータの頭部重心位置の高さにあたる特徴量を身長で代用したことにより､予測が高めの傾向を示している。また、サロゲートモデルは、車両のブレーキ制動の無しの条件で予測したことから、事故事例によってはX座標の予測を高めに評価した。さらに、歩行者が車両前端部（前照灯付近）と衝突した事例については、予測値が誤差率20%の境界を超える結果となった。一方、Y座標については、誤差±20%の境界の近傍、または、その内側に分布しており予測値と実測値で高い相関が得られた。図中の赤点は6歳児と衝突した事例であり、X座標とY座標ともに実測値に対して高めに予測された。

次に、歩行者に関係する特徴量が頭部衝突位置の予測精度に与える影響を調べるため、各パラメータを除いた条件での実測値と予測値の相関係数を表3に示す。歩行者の身長はX座標、車両に対する衝突位置についてはY座標に影響を及ぼしていることから、両者は必須のパラメータであることが分かる。衝突角度については、モデルの過学習を抑制したことによりX座標は僅かに改善したが、Y座標の精度は低下した。また、歩行速度を設計パラメータから除くとX座標の精度が低下した。

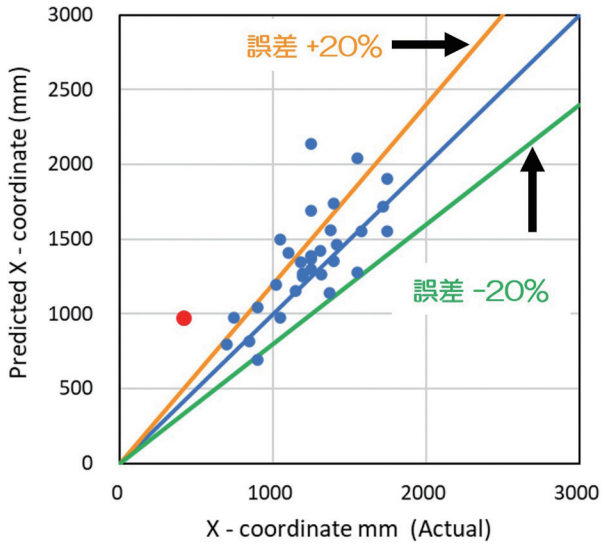


図 8 事故データを用いた頭部衝突位置 (X 座標) の予測精度
(相関係数 :0.716)

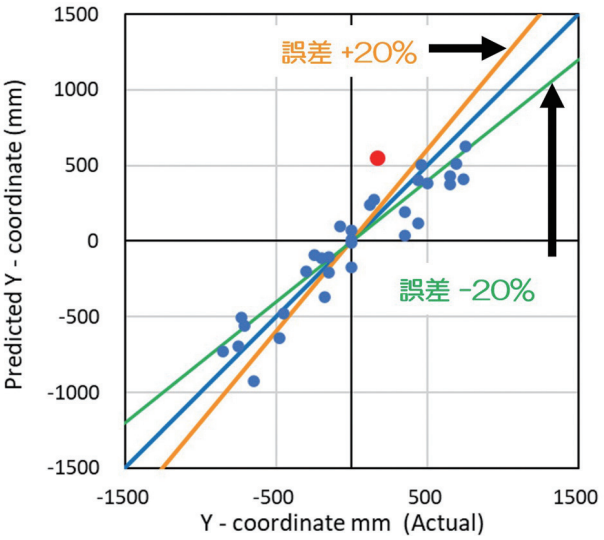


図 9 事故データを用いた頭部衝突位置 (Y 座標) の予測精度
(相関係数 :0.930)

表 3 歩行者に関する特徴量を除いた相関係数

Parameters	X	Y
All parameters	0.716	0.930
w/o Pedestrain height	0.123↓	0.925
w/o Impact point of vehicle	0.632	-0.217↓
w/o Pedestarin direction	0.727	0.816↓
w/o Pedestrain speeds	0.645↓	0.896

4. 考察

DNN を用いたサロゲートモデルの有効性を示すために、テストデータと事故データを用いて予測精度の結果について考察する。テストデータの結果より、相関係数の値は X 座標, Y 座標ともに 0.99 以上あり、非常に高い予測精度を示す結果となった。歩行者の挙動 (頭部軌跡) は、BLE の高さ、車体形状、衝突速度、歩行者の重心高さ、ならびにブレーキ制動の有無によって異なる[22]ことが示されている。テストデータでは、車体形状 (BLE の高さも含む)、および衝突速度が内挿された範囲内のデータであること、ならびに歩行者の頭部中心高さについても、既知のデータを用いたことから高い予測精度が得られたと考えられる。

事故データを用いて頭部衝突位置をサロゲートモデルを用いて予測したところ X 座標の相関係数は 0.716, Y 座標は 0.930 であり、Y 座標に比べて X 座標の精度の低下が見られた。主な要因としては、車両前部の形状が挙げられる。実際の事故データでは、様々な車両前部の形状を有するのに対して、サロゲートモデルは、BLE の高さのみで規定された車両モデルを用いたことが考えられる。Monfort ら[23]は車体前部形状の違いが歩行者の挙動に影響を及ぼすことを示唆しており、X 座標の精度を向上させるには BLE の高さだけでなく、車両先端部の形状も考慮することが重要である。また、ここでは衝突速度を 30 ～ 60 km/h の事故事例を対象にしており、40 km/h を超える速度については外挿していることから、衝突速度と相関のある X 座標の精度が低下したと考えられる。図 8、図 9 の赤点の 6 歳児の事例では、同様な現象が考えられ、Y 座標の精度の低下についても調べていく予定である。

サロゲートモデルの特徴量として使用した各設計パラメータの内、歩行者に関係するパラメータを用いて頭部衝突位置への寄与度を求めた。歩行者の身長は、衝突後に歩行者が車両に倒れ込む際の X 方向と関係があり、身長が高い程、X 座標が大きくなることが既報[15]でも報告されている。また、車両との衝突位置は Y 方向の位置を決定する上で重要であることから、両者とも歩行者の頭部衝突位置を予測する上で不可欠なパラメータであることが分かる。車両と歩行者の衝突角度、および歩行者の速度については、先の二つパラメータと比べて精度の低下は少ないが、歩行者の頭部衝突位置を予測する上で重要な設計パラメータであると考える。

ここでは市場事故データと構築したサロゲートモデルを用いて予測と検証を行ったが、X 座標については十分な精度が得られなかった。これについては、衝突速度を拡充すること、ならびに様々な車両モデルを用

いることで、歩行者事故データ（未知）に対して精度を改善することが可能であると考えられる。さらに、最近では歩行者・自転車に対して衝突被害軽減ブレーキが作動する車両も想定されることから、ブレーキ制動の有無についても設計パラメータとして考慮したモデルの構築を行っていく必要がある。

5. まとめ

本研究ではDNNによるサロゲートモデルを最新の市場事故データを用いて頭部衝突位置について比較検証を行った。Y座標は精度良く見積もることができたが、X座標の相関係数は0.716であり、衝突速度の水準数、ならびに車体前部の形状について設計パラメータを増やす必要がある。また、頭部衝突位置を予測する上で、歩行者に関するパラメータの影響度を示すことができ、歩行者の身長と車両との衝突位置については必須の設計パラメータであることを確認した。

サロゲートモデル構築に使用したCAEは、計算時間の短縮化を図るためにMADYMOを用いたが、今後、人体有限要素モデルを用いることも考えており、CAEモデルの精度の議論に繋げていく予定である。また、深層学習を用いたサロゲートモデルは、様々な用途に応用することが可能であり、歩行者の姿勢や体型を考慮した挙動の評価にも適用可能である。歩行者事故データを用いることの利点は、実測値と予測値で比較検証しながらモデルの改良、および精度向上が可能であり、安全な車両の設計・開発に貢献していきたいと考える。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、VIPAメンバーの協力を得ました。ここに記して謝意を表します。また、(株)SUBARUの山本健太郎氏と尾形海氏には、ご助言ならびにご指導を賜りましたことを深く感謝いたします。

参考文献

(1) 警察庁交通局：令和5年における交通事故の発生状況等について, https://www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/jiko/R05bunseki.pdf (2024-6-18)
(2) NHTSA USDOT: Traffic Safety Facts 2022 Data, https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/813590 (2024-5-20)
(3) NHTSA USDOT: National Roadway Safety Strategy, https://www.transportation.gov/NRSS (2024-6-18)
(4) NYC DOT: Five Lessons for the 10-years Anniversary of Vision Zero on New York City, Feb.12,2024, https://projects.transalt.org/lessons-from-vision-zero-new-york-city
(5) FHWA USDOT: Lower Citywide Speed Limits and Design Change, https://highways.dot.gov/safety/speed-management/lower-citywide-speed-limits-and-design-changes
(6) Bloomberg.: US Traffic Safety Crisis, https://www.bloomberg.com/news/features/2023-11-20/this-new-jersey-mayor-ended-traffic-deaths-with-a-vision-zero-plan
(7) SUBARU: https://www.subaru.co.jp/en/outline/about/zeroaccident/
(8) 警察庁：頭部の保護が重要です, https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/anzen/toubuhogo.html (2024-7-18)
(9) 橋本善之他：歩行者保護エアバッグの開発、自動車技術会学術講演会予稿集、2017年5月、20175260.
(10) S. Kunitomi et al.: Effect of pedestrian physique differences on head injury prediction in car-to-pedestrian accidents using deep learning, Traffic Inj. Prev. Volume 22, Issue sup1 (2021)
(11) O. Ito et al.：Prediction of pedestrian protection performance using Machine Learning. 26th ESV conference, Paper Number 19-0031 (2018)
(12) 中村博史他：機械学習を用いた歩行者頭部傷害予測手法の開発、自動車技術会学術講演会予稿集、2021年5月、20215356.
(13) 山本 健太郎他：機械学習を用いた衝突CAEの計算コスト低減, 計算工学講演会論文集, Vol.26, B-05-03 (2021)
(14) 尾形 海他：歩行者衝突安全性能評価におけるサロゲートモデルの構築, 計算工学講演会論文集, Vol.26, B-05-04 (2021)

(15) 外処 凌雲他：機械学習を用いた交通事故発生時の歩行者挙動予測、計算工学講演会論文集, Vol.27, C-08-03 (2022)
(16) Wang, S. et al.: Vulnerable Road User Injury Prevention Alliance (VIPA): Early Data and Insights, JSAE Annual Congress Proceedings (2019),20195095.
(17) Siemens Industry Software and Service BV: Siemens center Madymo Human Body Models Manual Release 2020.2
(18) 江島晋他: VIPAを用いたミシガン州(米国)における歩行者事故実態の把握、自動車技術会論文集,Vol.52, No.5 (2021).
(19) (財)交通事故分析センター:自動車と歩行者の事故“危ない！ 右から歩行者が横断!” イタルダ・インフォメーション, No.83 (2010)
(20) Euro NCAP Technical Bulletin 024, https://cdn.euroncap.com/media/66108/tb-024-pedestrian-human-model-certification-v301.pdf (2022-5-10)
(21) Python Software Foundation: Python, http://www.python.org/,(2022-11-28)
(22) B. Ravani et al.: Pedestrian Post-Impact Kinematics and Injury Patterns, 25th Stapp Car Crash Conference, SAE Paper 811024, 1981
(23) S. Monfort et al.: Vehicle front-end geometry and in-depth pedestrian injury outcomes, Traffic Inj. Prev. 2024;25(4):631-639.

【著　者】

江島　　晋

外処　凌雲

SUBARU BRZ「Cup Car Basic」を発表

2024年4月8日

SUBARU BRZ「Cup Car Basic」は、2022年から開催されているワンメイクレース「TOYOTA GAZOO Racing GR86/BRZ Cup」参戦用車両として開発したグレードです。
6点式シートベルト用アイボルトや空冷式のエンジンオイルクーラーなどを専用装備するとともに、レース参戦向けベース車両として、各種装備の仕様を最適な設定としました。また、アイサイト標準装備に伴い、2022年発表の「Cup Car Basic*1」に対し、ロールケージの形状を見直しました。

SUBARU BRZ「Cup Car Basic」

*1：2022年2月発表の「Cup Car Basic」(Bタイプ)

2030年死亡交通事故ゼロに向けた市場事故分析

Analysis for Zero Fatal Road Accidents in 2030

長谷川　晴　康*　　那　須　瑞　穂*
HASEGAWA Haruyasu　NASU Mizuho

抄　録

SUBARUの目指す2030年死亡交通事故ゼロに向けた市場事故の調査・分析内容についてまとめる。本稿では、主要販売国のアメリカ合衆国について分析を行った。2017年以降2021年までの各年販売から5年以内のSUBARU車における死亡事例545件を1年毎に調査。事故発生までを状況別に3つの段階に分け、それぞれの段階で事故や死亡に至った傷害の発生原因を分析した。現在、全体の94%の死亡事故事例に対応する技術開発を進めている。

Abstract

This paper summarizes the contents of market accident surveys and analyses aimed at achieving SUBARU's goal of zero fatal road accidents in 2030. We analyzed accidents in the United States, which is the major sales country. We investigated 545 fatal cases involving SUBARU vehicles sold from 2017 to 2021 and that are within 5 years from the purchase. The circumstances leading up to the occurrence of the accident were divided into three steps in chronological order, and the cause of the accident or injury that led to death was identified at each step. Currently, we are developing a technology that addresses 94% of all fatal accident cases.

1．まえがき

自動車が誕生して250年以上が経つ今もなお、交通事故は世界的な課題である。世界保険機構(WHO)によると、年間119万人、1日当たり3,200人が交通事故により命を落としている。特に近年では歩行者、サイクリストの死者数が急増しており、交通事故死者全体の3割を超えている[1]。

SUBARUの死亡事故の実態として、アメリカ合衆国(以下、米国)における100万台あたりの死亡事故件数の発生率の推移と、日本国内における100万台あたりの死亡重症事故の発生率の推移を図1、図2に示す。

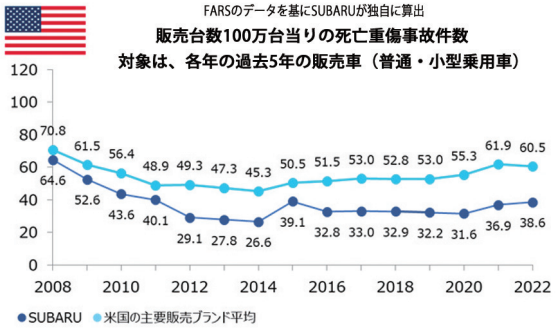


図1　米国における死亡事故件数の年次推移[2]

図1は米国の死亡事故件数の推移であり、米国運輸省道路交通安全局(NHTSA：National Highway Traffic Safety Administration)の定義する事故発生から30日以内の死亡件数を示している。米国では死亡事故の発生割合が減少傾向から一転、2014年を境に微増の傾向を示す。SUBARUにおいても、15年以上連続で米国主要販売ブランドの平均値よりも低い死亡

＊ 車両安全開発部

交通事故率を維持しているが、死亡事故率の減少が停滞している点は同様である。

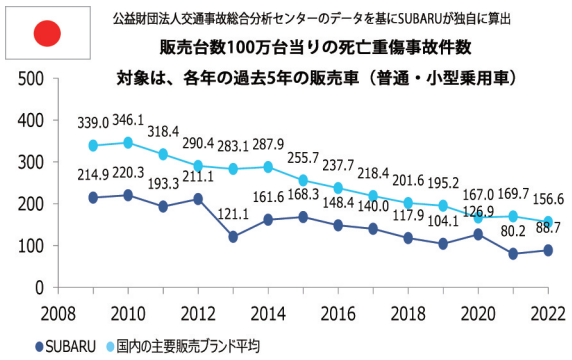


図２　日本における死亡重症件数の年次推移[3]

図2は、日本の死亡重症事故件数の推移であり、公益財団法人交通事故総合分析センター（ITARDA：Institute for Traffic Accident Research and Data Analysis）の定義する事故発生から24時間以内の死亡、治療に30日以上を要する重症者の合算値を示している。日本におけるSUBARUの死亡事故件数は非常に少なく、統計的な取り扱いができないため重症者を含めた年次推移を示す。日本については年々死亡重症事故率が減少している一方で、近年では減少率がやや鈍化している。

死亡交通事故の現状を受け、私たちSUBARUは“安心と愉しさ”を通してお客様の笑顔をつくることを目指し、2018年に発表した中期経営計画“STEP”の中で、“人の命を守ることにこだわり、SUBARU車乗員及び、SUBARU車と衝突した歩行者・自転車（以下VRU：Vulnerable Road User）を対象として、2030年に死亡交通事故ゼロを目指す”事を示した。本取組みでは、市場事故の分析結果を基に、死亡に至る事故、傷害を防ぐために自動車に必要な機能を検討している。

2. 分析条件

本稿では、SUBARU販売台数の7割を占める事から、SUBARU車の最も多様な事故が発生している米国について調査を実施した。

事故分析では、NHTSAが公開しているFARSデータ（Fatality Analysis Reporting System・・・米国内での全死亡事故が記載された一般公開データ）を基に、警察調書やニュース記事の情報を用いた。

また車両性能の年次進化を踏まえ適切に原因を抽出するため、各事故発生年から逆算し5年以内に新車販売を行った車両における死亡事例を対象とした。

3. 分析結果に基づく事故の分類手法

事故分析については、2017年より統計分析に着手を開始し、現在はFARSデータ中の2017年から2021年までのSUBARU車の死亡事例545件を一件毎に調査、それぞれの要因・原因に基づいた対策検討を進めている。本稿では、分析結果に基づき、事故発生前から発生後までを状況別に3つの段階に分け、それぞれの段階で事故や死亡に至った傷害の発生原因に基づき事故の大別を示す。

①潜在的な危険を含んだ段階

交通事故やその直前の回避困難な状況に至る前の状態において、SUBARU車のドライバー要因により事故の発生や傷害を重度化させた潜在的な要因について分類する。

②事故が発生する直前の段階

交通事故が発生する直前でかつ直接的な危険が生じている状態において、SUBARU車の車両挙動からみた衝突発生原因について分類する。

③事故が発生した段階

交通事故が発生した状態において、SUBARU車乗員が死亡に至る傷害を受傷した原因について分析を行った。また受傷から治療までの時間による救命率の低下も考慮し救命処置までの時間も含め分類する。

4. 各段階における事故分類

4.1　ドライバー要因による分類

潜在的な危険を含んだ段階おいて、全545件の死亡事故事例を基に事故発生や傷害を重度化させたドライバー要因について分類した結果を図3に示す。全事故のうち43%の事例において自車（SUBARU）のドライバー要因が確認された。

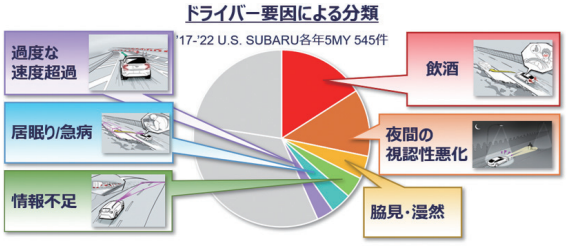


図３　ドライバー要因による分類[2]

最も割合の大きい要因は飲酒である。米国では運転に関する血中アルコール濃度の規制値が比較的高い州が多く存在するが、飲酒が認知能力や運動能力へ与え

る影響の度合いは個人によって異なるため、血中アルコール濃度が規制値以下であっても影響している可能性が考えられる。

飲酒は、車線逸脱と関連性が高く、飲酒ケースの内62%は車線逸脱に至っている。また、衝突事故発生の段階においては、飲酒ケースの内41%がシビア衝突に至っている。（図4）

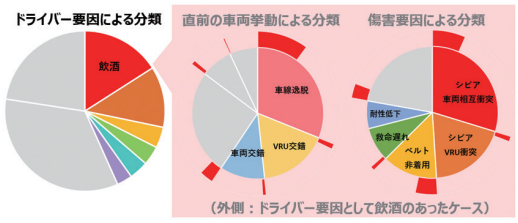


図4　ドライバー要因 "飲酒" のケース[2]

2つめの要因は薄暮期を含む夜間の視認性悪化である。特にVRU死亡事故は日没後から発生率が急増することがFARSデータから確認されており、道路の横断時だけでなく同一方向へ移動しているVRUと衝突する事例も確認された。また社内の調査結果から明るさによる視認性の悪化と発生率との強い相関は確認されず、暗順応のような生理学的な要因も含め幾つかの要因が関係していると考えられる。

夜間視認性については、衝突事故発生の段階において、夜間視認性悪ケースの内85%がVRUとのシビア衝突に至っている。（図5）

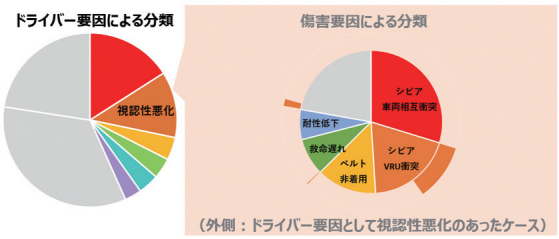


図5　ドライバー要因 "視認性悪化" のケース[2]

3つめの要因は脇見・漫然である。脇見には目や顔を他方に向ける物理的な脇見のほか、他の何かに気を取られたり、考え事をしたりしている漫然状態“意識の脇見”も含まれている。

4つめの要因は情報の不足、すなわちドライバーが安全運転における十分な情報を得られていない状態である。確認された事例には、ハイウェイ上で別の事故や車の故障などで降車した乗員と衝突した事例や、道路上の工事作業者と衝突をした事例、ドライバーが予測しづらい凍結などの路面環境変化により車両制御を喪失した事例、列車と交錯した事例などが確認された。列車との衝突に関しては、警報機や遮断機のない踏切や踏切での一時停止義務が一部の車両に限定されているなどの米国の社会的背景も影響していると考えられる。

5つめの要因は急病や居眠りによるドライバーの運転機能の喪失である。これらの事例の多くは自車線からの逸脱により高い速度のまま対向車や障害物と衝突する事例が多く確認された。

6つめの要因は過度な速度超過である。これらには走行速度が制限速度を30mph以上超過した事例とFARS上で危険運転（Aggressive Driving）に分類された事例が含まれる。

急病、居眠りが原因で起きたケースの内90%が車線逸脱に至っている。衝突段階における死亡の受傷原因は33%のシビア衝突、次いで29%の加齢よる耐性低下（65歳以上の高齢者）である。急病のみに限ると、3分の2が高齢者であり、年齢分布に対して明らかに割合が高いことからも加齢に伴う急病の発生頻度が影響していると考える。（図6）

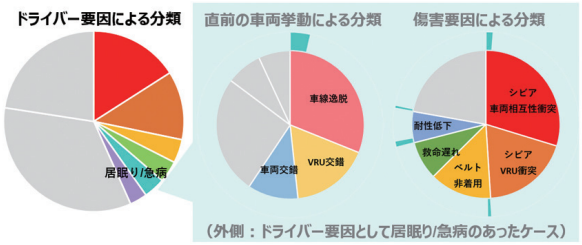


図6　ドライバー要因 "居眠り/急病" のケース[2]

4.2　車両挙動からみた衝突原因による分類

事故が発生する直前の段階において、全545件の死亡事例を基に車両挙動からみた事故発生原因を分析した結果を図7に示す。全事故のうち58%において自車(SUBARU)の車両挙動によって衝突に至った原因が確認された。

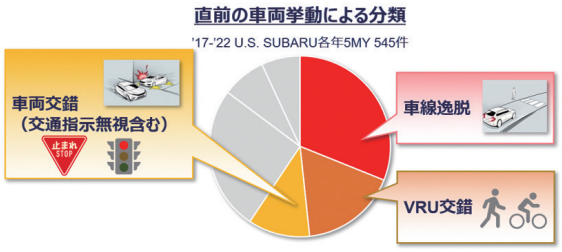


図7　直前車両挙動要因による分類[2]

最も割合の大きい原因は車線逸脱である。これらにはカーブの曲率や路面摩擦に対して車両速度が高すぎたために車線逸脱したケースなどが含まれている。

2つめの原因は車線に侵入してきたVRUとの衝突である。衝突前に回避行動をとった事例より、回避行動をとらず衝突した事例の方が多く、前述の薄暮期を含む夜間の視認性悪化に加え、日中においても米国では制限速度の高い道路にVRUが侵入しやすいなどの道路の構造的な問題も関係していると考える。

3つめの原因は赤信号無視や一時不停止といった違

反を含む交差点内の車両相互衝突である。ドライバーが意図せず違反に至った事例の他、認識するも意図的に違反した事例の両方が確認された。

4.3　死亡に至った受傷原因による分類

交通事故が発生した段階において、全545件の死亡事例を基に死亡に至った傷害を受傷した原因について分類した結果を図8に示す。全事例のうち78%において死亡に至った傷害が発生した原因、もしくは重傷化させた原因が確認された。

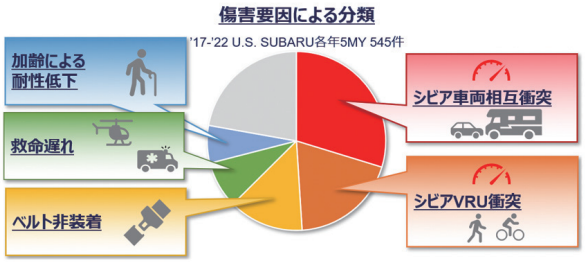


図8　死亡に至った障害要因による分類[2]

最も割合の大きい原因はシビアな車両相互衝突である。これらは安全アセスメントの条件を上回る事例を抽出しており、車線逸脱により対向車と衝突した事例が多く、乗員の生存空間が保たれていない事例も確認された。米国では走行速度が比較的高く対面通行のState HighwayやUS Highwayで発生している事例が多く、中央分離帯などにより非対面通行のInterstate Highwayでは少ない。また米国ではピックアップ等の大型車が多いことから相手車両との重量差による厳しさも含まれている。

2つめの原因はシビアなVRU衝突である。VRU衝突の死亡率は車両相互の衝突に比べ速度依存性が高く、制限速度が高い米国では、非常にシビアな衝突事故が多く確認された。

3つめの原因はシートベルト非装着である。乗員要因としての側面もあるが、米国ではシートベルト装着が義務化されていない州も存在するため、傷害を重傷化させた原因として分類した。SUBARUではシートベルト非装着時の警報機能を2011年から米国で販売しているモデルの前席に、2018年から後席にも搭載を開始しているが、警報機能搭載モデルにおいても事例は確認された。

4つめの原因は救命処置の遅れである。通報時刻や救命隊の到着時刻、医療施設への到着時刻、生存時間から救命開始を早めることで死亡を防ぐ事が出来た可能性のある事例が含まれる。この中にはより高次の医療施設へ再搬送された事例も確認された。

5つめの原因は高齢者等の加齢による耐性低下である。加齢に伴い骨格の変形や骨密度低下により耐性が低下するため、衝突の厳しさが法規や安全アセスメントと同等以下の衝突においても死亡している事例が含まれる。

5. 原因に対する対策検討

5.1　検討例

FARSのデータを元に検討例を示す。

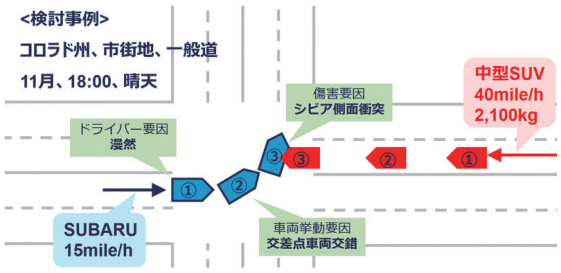


図9　事故事例イメージ[2]

“11月、18時、晴天のコロラド州の市街地の一般道で発生した事故。交差点にて、インプレッサが車両前方の直進車両を見落とし、15mile/h(24km/h)で左折を試みた結果、直進してきた相手車両が自車両右側に衝突。相手車両は40mile/h(64km/h)で走行しており、空車重量2,100kgを超える中型SUVであった。この事故により助手席の40代女性が傷害を負い、およそ2週間後に尊い命を失うに至った”[2]

本事例においては、ドライバー要因は漫然運転であったことがわかっており、運転者の意識状態を監視し、適時警告を行う機能が有効と考える。また、直前の車両挙動要因としては、比較的見通しのよい交差点での車両交錯であることから、車両前方から相手車両の接近を検知し衝突回避や減速する機能が有効と考える。衝突時の受傷要因はアセスメントの条件を上回るようなシビアな衝突によるものであり、車体の強化やサイドエアバッグ等の拘束装置の性能向上が有効と考える。

こうした事故事例を一件、一件調査することで、死亡交通事故ゼロとして必要な機能やその目標を設定し技術開発に取り組んでいる。

5.2　検討のまとめ

以上の様に3つの段階ごとに分析、抽出した原因に対し、SUBARU ALL AROUND SAFETYの考えに基づき0次安全、走行安全、予防安全、衝突安全、つながる安全の各性能を向上させ対応していく。(図10)

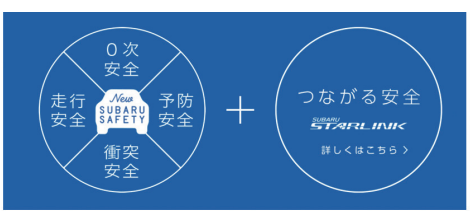


図10　SUBARU ALL AROUND SAFETY

これらの3つの段階の対策を相互的に組み合わせることで全体の94%の事故に対応する技術開発に取り組んでいる。また各段階の重なりを増やし冗長性を持たせることで、世の中で起きる様々な条件の衝突事故にも対応が出来ると考えている。（図11）

図11　3つの段階とALL AROUND SAFETYの関係性

またこれまでの分析、検討において、現時点では対応が困難な事例が6%確認された。現時点、これらをクルマだけでは解決できない事故と分類し、トレーラーの様な2台の大型車に挟まれた事例や夜間にハイウェイに侵入した歩行者と衝突した事例、衝突したヘラジカの様な大型動物がフロントガラスを破壊し乗員に直接接触した事例などが含まれる。こうした事故やドライバーが意図して行う危険な行為（過度な速度超過、飲酒、シートベルト非装着など）に対しては、車両の性能向上のみでの解決は困難であり、ユーザーへの教育や政府、国家機関への交通インフラの整備、規制・取り締まり強化の働きかけを行い社会全体での課題解決に取り組む必要があると考える。（図12）

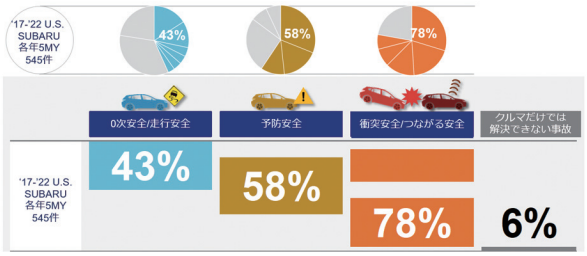


図12　段階ごとの事故対応割合(2)

6.　今後に向けて

我々は死亡交通事故ゼロという決して簡単ではない目標に対し粘り強く検討を進めてきた。こうした取組みが我々自動車メーカーだけでなく、協力会社や交通社会に係る人々の新たな技術的イノベーションに繋がっていく事を期待している。またどの様に優れた技術もお客様に購入頂き使って頂けなければ意味を成さない。そのためにお客様にご納得いただける価格・性能・品質に作り上げ一人でも多くのお客様の命を守り抜けるよう、お客様ひとりひとりの笑顔を想像しながら目の前の課題に取り組んでいきたい。

参考文献

(1)　公益社団法人日本WHO協会：WHO報告書、交通 安全は依然として世界的な緊急課題 https://japan-who.or.jp/news-report/2312-32
(2)　NHTSA：National Highway Traffic Safety Administration発　行、FARS(Fatality Analysis Reporting System)データを用い作成
(3)　公益財団法人交通事故総合分析センター(ITARDA：Institute for Traffic Accident Research and Data Analysis)データを用い作成

【著　者】

長谷川 晴康

那須　瑞穂

前面衝突における乗員体格差が傷害に与える影響

Effect of Difference in Body Shape on Occupant Injury in Frontal Impact

吉　川　満　晴*
YOSHIKAWA Mitsuharu

抄　録

交通事故において肥満乗員は非肥満乗員より致命的な傷害を負うリスクが高いことが報告されており、重要な課題となっている。本研究では、前面衝突事故における肥満乗員の傷害課題とその発生メカニズムの解明を目的として、北米自動車事故データベース(CISS)を用い、乗員傷害リスクに対するBMI増加の影響を分析した。事故分析結果から、肥満乗員は非肥満乗員に比べて胸部傷害の割合が高くなった。さらに、バーチャル人体モデルTHUMSを用いた車対車の衝突シミュレーション結果から、肥満乗員は非肥満乗員より前方移動量が多くなり、胸部がステアリングと強干渉する事によって、肋骨骨折本数が多くなる事が分かった。胸部傷害を低減するには乗員体重と衝突速度の増加に合わせてシートベルト等の拘束力を高め、前方移動量を抑制することが有効である。

Abstract

Studies have indicated that obese occupants have more risk of fatal injuries compared to non-obese occupants, and this is becoming an important issue.

In this study, we investigated the effect of increased body mass index against the risk of occupant injury in frontal crashes utilizing the database of the Crash Investigation Sampling System (CISS). The results of the accident analysis showed that obese occupants had a higher risk of chest injury compared to non-obese occupants. Furthermore, Car-to-Car crash simulation results showed that the obese occupants had more rib fractures than the non-obese occupants since forward movement increased and their chests strongly contacted with the steering wheel. In conclusion, it is effective to suppress the forward movement by increasing the restraint force such as of seat belts in line with the increase of weight of the occupant and collision speed.

1．まえがき

世界保健機関(WHO)によると、世界中の成人の肥満は1990年以降2倍以上に増加し、2022年には8億9000万人が肥満であると報告している[(1)]。また、体型と傷害率の関係を調査したいくつかの研究によると、肥満乗員は非肥満乗員と比べて致命的な傷害のリスクが高いことが報告されており[(2)]、前面衝突では胸部と下肢の損傷リスクが高いことが示されている[(3)(4)]。自動車にはシートベルトやエアバッグ等の乗員拘束システムが搭載されているが、平均的な体型の乗員だけでなく、様々な体型の乗員に対応することが重要である。

現在の衝突試験用ダミーは利用可能な体型が限られており、肥満の影響を考慮した傷害評価が難しい。そこで本稿では、前面衝突事故における肥満乗員の傷害発生メカニズムを明らかにする事を目的として、詳細事故データによる傷害課題の抽出と要因分析を行った。また、肥満体型のバーチャル人体モデルTHUMS Obeseモデル(Copyright (C) 2022 TOYOTA MOTOR CORPORATION and TOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC. All Rights Reserved.)を用いた衝突解析により、シートベルトの拘束力が肋骨骨折に及ぼす影響を明らかにし、胸部傷害低減の方向性について検討を行った。

＊車両安全開発部

2．手法

2.1　事故分析対象

本研究では、米国運輸省道路交通安全局（National Highway Traffic Safety Administration：NHTSA）が公開している北米自動車事故データベースのCrash Investigation Sampling System（CISS）を用いて、前面衝突事故における肥満乗員と非肥満乗員の比較を行った。

調査対象は、2010～2021年式の乗用車の前面衝突事故のうち、フルラップ衝突に近い事故を選定し、ロールオーバー、車外放出、多重衝突の事故ケースは除いた。傷害評価対象は、個々の外傷部位の重症度を示す尺度であるAbbreviated Injury Scale（以下、AIS）が2以上の傷害を負った運転席乗員とし、年齢は16歳～65歳（平均年齢は38.6歳）、3点式シートベルトを着用し、エアバッグが展開したと記録された事故を対象とした。Body Mass Index（以下、BMI）の区分は世界保健機関（WHO）の分類に基づき、24.9 kg/m^{2}以下の乗員を「Normal（標準）」、25.0～29.9 kg/m^{2}を「Over Weight（太り過ぎ）」、30.0 kg/m^{2}以上を「Obese（肥満）」とした。また、体重が高くなると乗員の持つ運動エネルギも大きくなる為、体重の範囲を「45～80kg（AF05～AM50相当）」、「81～100kg（AM50～AM95相当）」、「101kg～200kg（AM95相当以上）」の3つに分類した条件についても比較を行った。傷害重症度の評価は、先に述べたAISのほかに、人体を6部位（頭頸部、顔面、胸部、腹部および骨盤内臓器、四肢および骨盤、体表）に分けて、各部位の最大AISのうち上位3つをそれぞれ二乗し合計した値を評価する外傷全体の重症度：Injury Severity Score（以下、ISS）について比較を行った。衝突事故の厳しさは衝突前後の車両の速度変化を表すデルタVを用い肥満乗員と非肥満乗員のデルタVに対するISSの差異を比較した。

2.2　衝突解析条件

事故分析により得られた傷害課題に対し、メカニズムの解明と傷害低減の方向性検討を目的として、人体モデルを搭載した車対車の衝突解析を実施し、肥満と非肥満乗員の比較を行った。図1および図2に衝突解析モデルを示す。図3に使用した人体モデルを示す。比較的シビアな衝突条件を包含する為、自車はCompact Carモデルとし、衝突相手車はMidsize SUVモデルを用いた。表1に衝突解析ケースの一覧を示す。非肥満乗員としてTHUMS AM50モデル(BMI:24 kg/m^2)、肥満乗員としてTHUMS Obeseモデル(BMI:35 kg/m^2)を用いた。また、肥満乗員の体重が傷害に与える影響を調査する為、Case No.41（表1）ではTHUMS Obeseの皮下脂肪の密度を調整し、体重をAM50相当に変更したModified Obeseモデルによる検証を行った。肋骨骨折の閾値は皮質骨の塑性ひずみ値0.02とした。着座位置と姿勢はUMTRI（University of Michigan Transportation Research Institute）が開発した姿勢モデルに従って決定した[5]。車両の衝突速度は、事故分析結果に基づきBMIグループ間で傷害重症度に差が見られた60～80km/hの範囲とし、5km/h間隔で検証を行った。シートベルトフォースリミッタ荷重は2～5kNの範囲で変更し、乗員の前方移動量と肋骨骨折本数の関係を調査した。

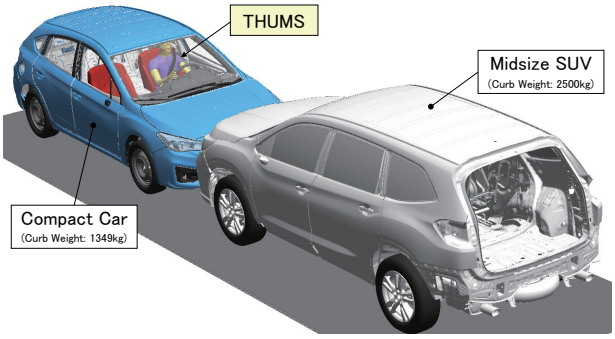


図1　衝突解析モデル（全体）

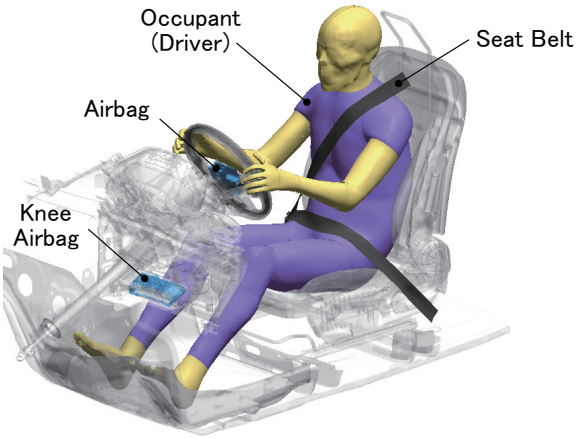


図2　衝突解析モデル（車室内）

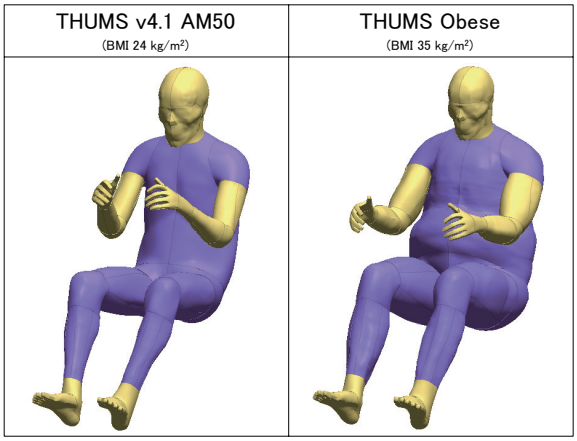


図3　人体CAEモデル

表１　衝突解析ケース一覧

Case No.	Human Body Model				Impact Speed [km/h]		SeatBelt Force Limitter [kN]
	Occupant (Comact car)	Height [cm]	Weight [kg]	BMI [kg/m^2]	Compact car	Midsize SUV	
1～20	THUMS v.4.1 AM50	178	77	24	60	60	2, 3, 4, 5
					65	65	2, 3, 4, 5
21～40	THUMS Obese	178	111	35	70	70	2, 3, 4, 5
					75	75	2, 3, 4, 5
					80	80	2, 3, 4, 5
41	Modified THUMS Obese	178	77	24	70	70	3

３．事故分析結果

条件に合致した124件の事故事例の傷害重症度とデルタＶの関係を3つのBMIグループ(Normal、Over Weight、Obese)に分類して示した結果を図4～図6に示す。ISSは、いずれのBMIグループにおいても、デルタＶが増加するにつれ高くなったが、デルタＶが同等の場合、BMIが高いグループほどISSは高くなった。特にデルタＶが60km/h以上の事故の平均ISSは、Normal:10.7、Over Weight:15.8、Obese:26.4となり、グループ間の差が大きくなった。ステアリングホイールの変形有りと記録された事故は、Obeseで多く確認された。

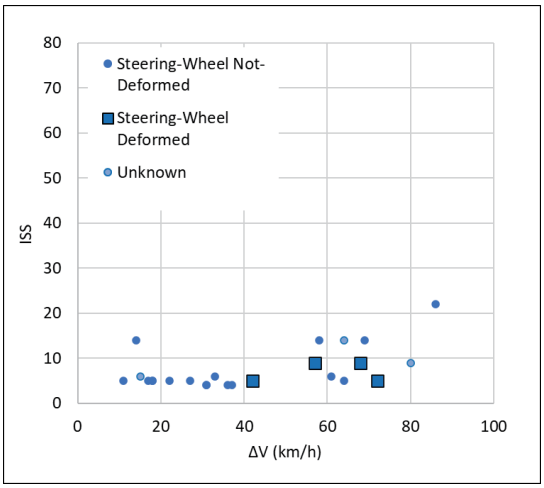


図４　ISS とデルタＶ（Normal）

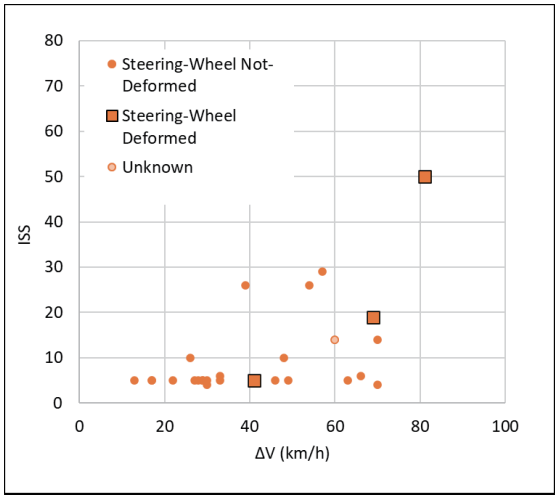


図５　ISS とデルタＶ（Over Weight）

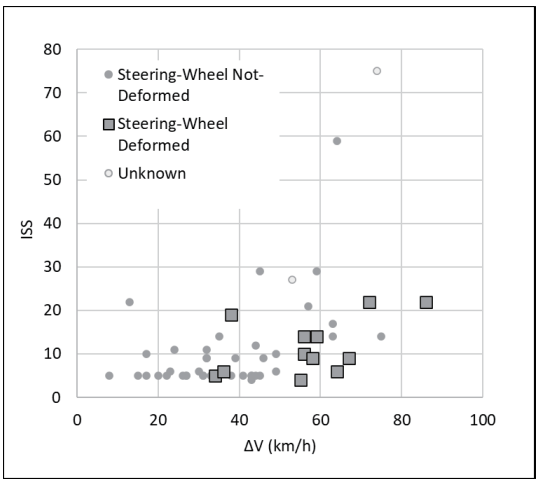


図６　ISS とデルタＶ（Obese）

図7にISSの元となるAISの高い上位3部位の割合を示す。Obeseは Normalに比べて、胸部傷害の割合が高くなっており、その内訳をみると、BMIが高いグループほどAIS3以上の胸部傷害の割合が高い事が分かった(図8)。図9～図11に肋骨骨折本数とデルタＶの関係を示す。BMIが高いグループほど肋骨骨折本数が多く、特にデルタＶが60km/h以上の事故の平均骨折本数は、Normal:0.4、Over Weight:1.5、Obese:2.2となり、グループ間の差が大きくなった。

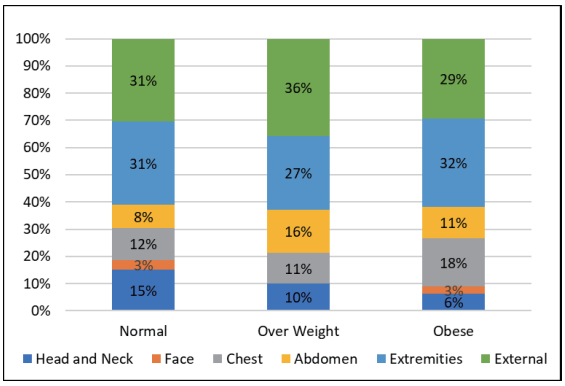


図７　ISS を構成する傷害部位の割合（BMI 分類）

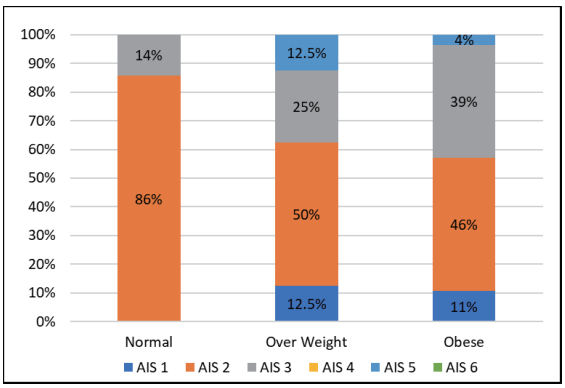


図８　胸部傷害の AIS の割合（BMI 分類）

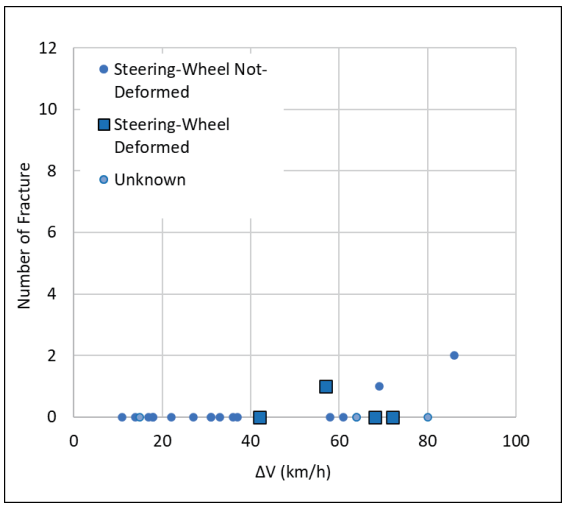


図９　肋骨骨折本数とデルタＶ（Normal）

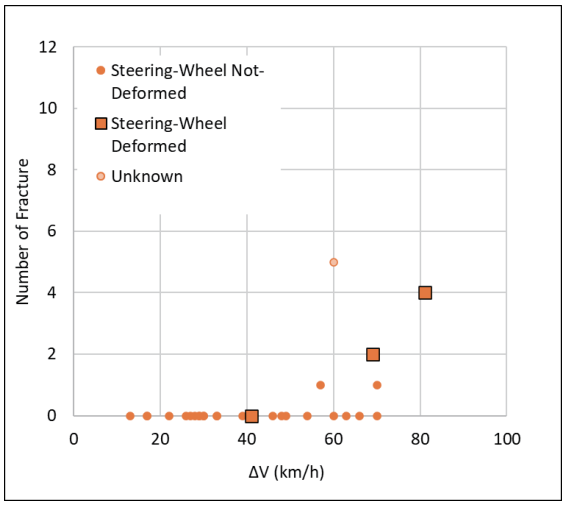


図 10　肋骨骨折本数とデルタＶ（Over Weight）

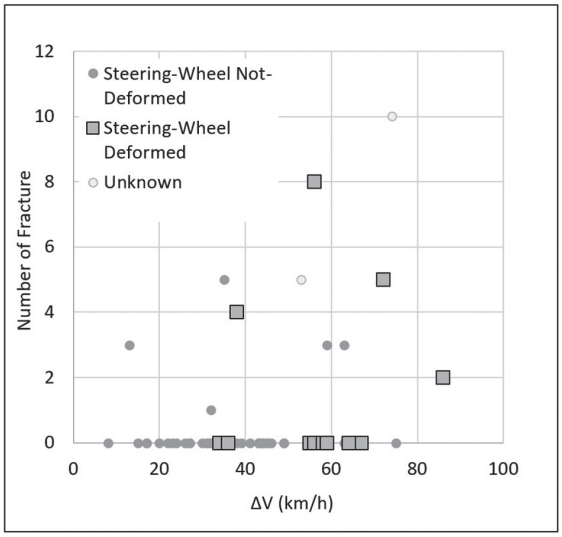


図 11　肋骨骨折本数とデルタＶ（Obese）

BMIの計算式では、乗員の体重が増加してもそれに合わせて身長も増えればBMIは変わらないが、前面衝突では乗員の体重が増えると乗員運動エネルギが増加し、傷害に影響を及ぼすと考えられる。そこで124件の事故データを体重グループ(30-80kg、81-100kg、101-200kg)ごとに分類した結果を図12～図19に示す。デルタVが同等の場合、体重が高いグループほどISSは高くなった(図12～図14)。特にデルタVが60km/h以上の事故の平均ISSは、30-80kg:11.8、81-100kg:17.3、101-200kg:35.8となり、グループ間の差が大きくなった。胸部傷害の割合は体重が高いグループほど高くなり(図15)、AIS3以上の胸部傷害の割合は101-200kgのグループで最も高くなった(図16)。肋骨骨折本数は、体重が高いグループほど多い傾向となり(図17～図19)、特にデルタVが60km/h以上の事故の平均骨折本数は、30-80kg:1.0、81-100kg:1.0、101-200kg:3.0となり、101-200kgのグループで最も多くなった。疑似的な乗員の運動エネルギとして、デルタVの二乗と体重の2分の1を掛けた値(以下、疑似運動エネルギ)をグラフの横軸にとり、縦軸にISSを示したものを図20に示す。疑似運動エネルギの増加に伴いISSが増加する結果となった。

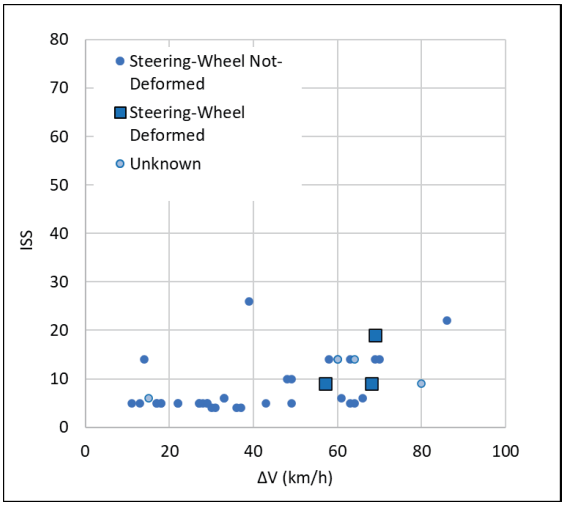


図 12　ISS とデルタＶ（30-80kg）

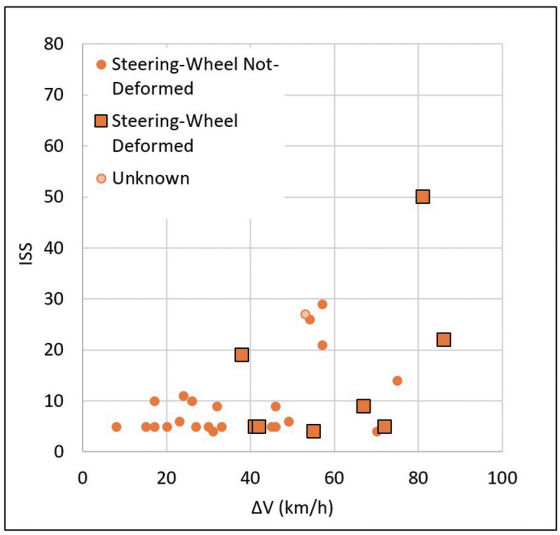


図 13　ISS とデルタ V（81-100kg）

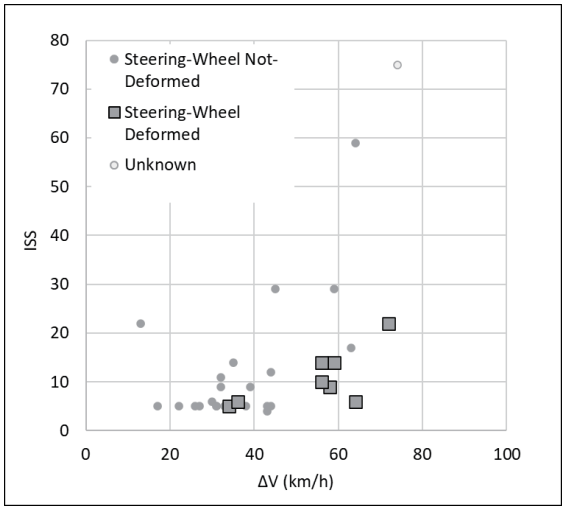


図 14　ISS とデルタ V（101-200kg）

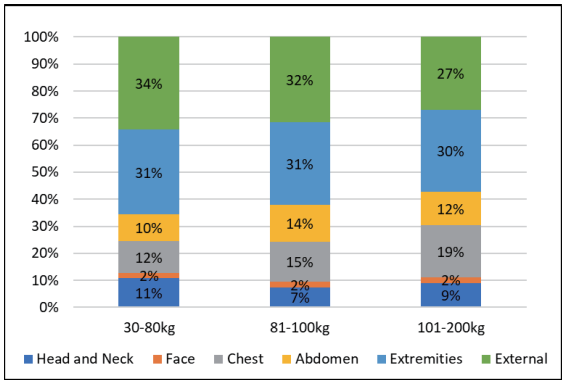


図 15　ISS を構成する傷害部位の割合（体重分類）

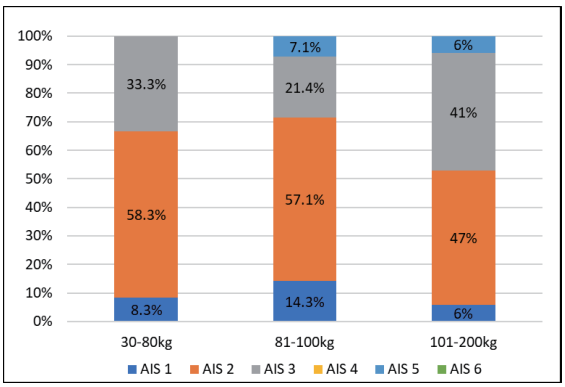


図 16　胸部傷害の AIS の割合（体重分類）

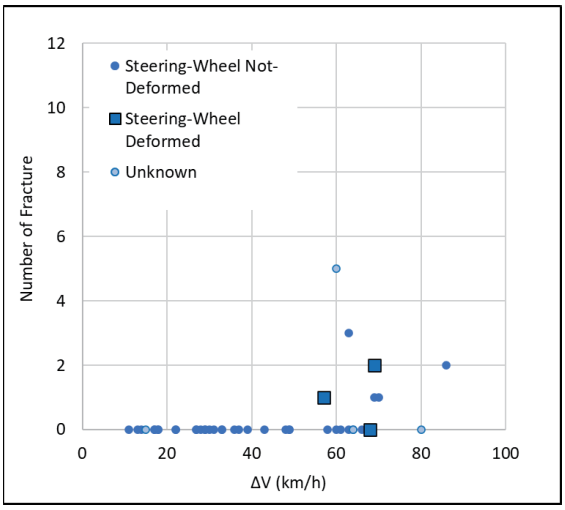


図 17　肋骨骨折本数とデルタ V（30-80kg）

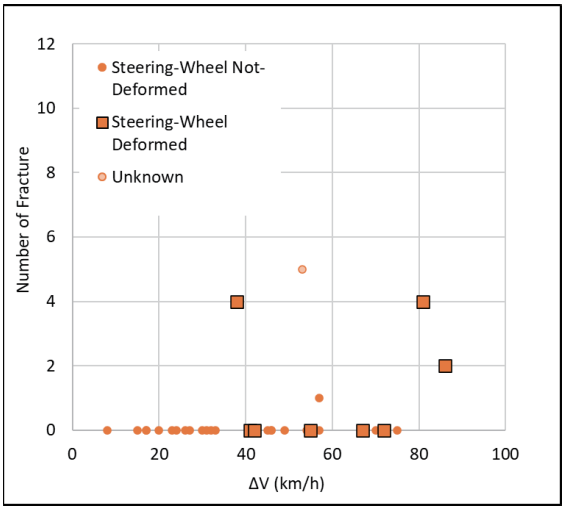


図 18　肋骨骨折本数とデルタ V（81-100kg）

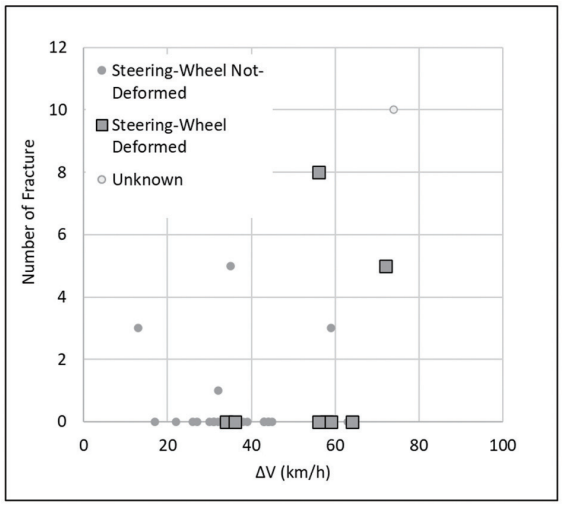


図 19　肋骨骨折本数とデルタ V（101-200kg）

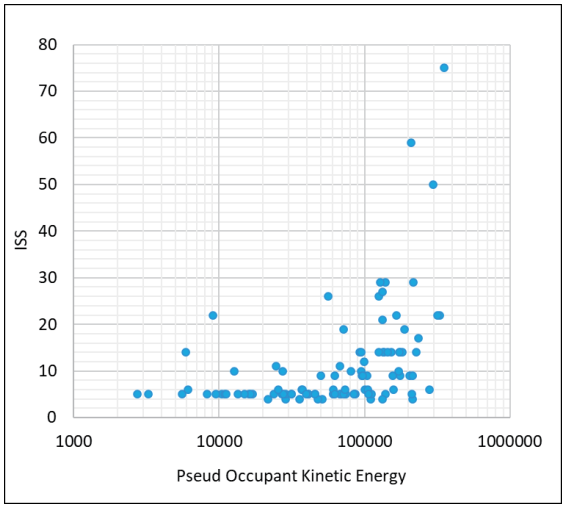


図 20　ISS と乗員の疑似運動エネルギ

4．衝突解析結果

図21に車対車の前面衝突解析の肋骨骨折本数を示す。乗員胸部とステアリングホイールの接触はすべての解析ケースで発生したが、衝突速度が高いほど、骨折本数は増加した。衝突速度が同等の場合、骨折本数はAM50よりObeseの方が多くなった。また、フォースリミッタ荷重が高いほど骨折本数は減少する傾向を示した。

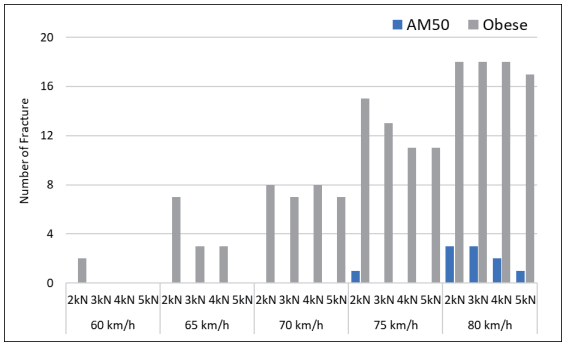


図 21　肋骨骨折本数

図22に乗員の前方移動量を示す。衝突速度が高くなるにつれて車体変形量が増加し、ステアリングが乗員側へ後退する為、乗員前方移動量はステアリングホイール中心を基準とした胸椎T8の移動量を計測した。衝突速度が同等の場合、乗員の前方移動量はAM50に比べてObeseの方が多くなった。また、フォースリミッタ荷重が高いと前方移動量は減少する傾向を示した。

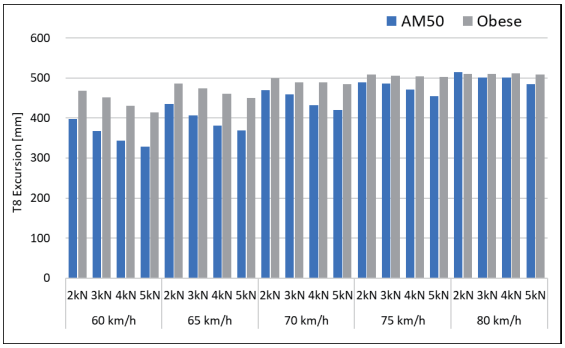


図 22　乗員前方移動量

最後に、ObeseとAM50、AM50相当に体重を調整したModified Obeseモデルの挙動の比較（衝突速度70km/h、フォースリミッタ荷重 3kN）を図23に示す。ObeseはAM50に比べてPelvisの移動量が168mm多くなり、最終的にシート座面から脱落した。胸椎T8の移動量はAM50に対し63mm多くなった。一方、Modified Obeseは、Obeseに対しPelvisの移動量が約112mm減少し、T8も54mm減少した。肋骨骨折本数は、AM50が0本、Obeseが7本、Modified Obeseが0本となり、Obese体型であっても、体重をAM50相当に変更することにより、前方移動量と肋骨骨折本数が大幅に減少した。

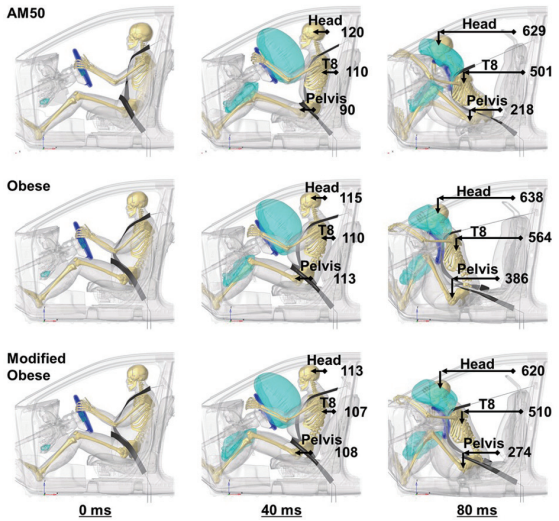


図 23　乗員挙動の比較

5．考察

事故分析の結果、特にデルタVが60km/h以上の前面衝突事故において、Obeseグループおよび、101-200kgグループは、他のBMIおよび体重グループに比べてISSが高くなった。また、乗員の疑似運動エネルギの増加に伴いISSが増加する傾向が見られた。Modified-Obeseモデルによる衝突解析では、体重をAM50相当まで減少させることによって乗員前方移動量と肋骨骨折本数が大幅に減少した。Mockら[2]は、米国自動車事故サンプリングシステム(CDS)の分析から、乗員体重の増加は自動車事故の死亡および重傷リスクの増加と関連していると報告しており、本研究でも同様の傾向が得られた。乗員が高体重で衝突速度が高い場合、運動エネルギが高くなる為、シートベルトやエアバッグ等の拘束装置で十分に吸収しきれていない可能性があると推測される。

またObeseグループおよび、101-200kgグループは、AIS3以上の胸部傷害の割合と肋骨骨折本数が多くなる傾向を示した。Cormierら[3]は、National Automotive Sampling System-Crashworthiness Data System (NASS-CDS)の分析から、正面衝突時の肥満乗員は痩せた乗員と比較した場合、AIS>2およびAIS>3の胸部損傷のリスクがそれぞれ26%および33%高くなると報告しており、本研究でも近い傾向が得られている。図24に全解析ケースの肋骨骨折本数と前方移動量の関係を示す。前面衝突解析の結果では、肋骨骨折本数はステアリングの胸部への侵入量が増すほど増加している事が分かった。Chenら[6]は、ステアリングの変形を伴う正面衝突事故において、シートベルトを着用した運転席乗員が重度の胸部損傷を負う確率は、ステアリング変形を伴わない事故に比べて2倍高いと報告しており、ステアリングとの強干渉を防ぐことが胸部傷害低減に重要であると考えられる。そのためには、乗員体重と衝突速度の増加(乗員運動エネルギの増加)に合わせて乗員拘束力を高めて、胸部がステアリングと強干渉しないように前方移動量を抑える必要がある。

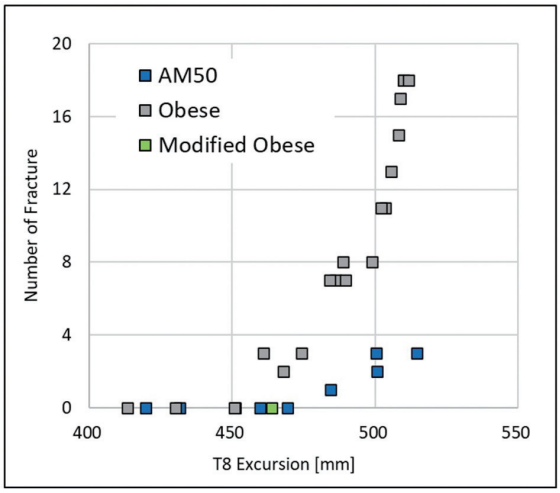


図24　乗員前方移動量と肋骨骨折本数

6．まとめ

本研究では、北米自動車事故データベースCISSを使用し、前面衝突事故における衝突速度と傷害重症度の関係をBMIおよび体重グループごとに調べた。また、人体モデルTHUMS-ObeseおよびAM50モデルを搭載した車対車の衝突解析により、肥満乗員と非肥満乗員の比較を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 事故分析結果から、BMIおよび体重が高いグループは胸部傷害の割合が高く、デルタVが60km/h以上の事故ではISSが高い傾向にあることが分かった。
- 車対車の衝突解析結果から、衝突速度60～80 km/hにおいて肋骨骨折本数は乗員前方移動量が増加するほど多くなる傾向となった。この要因として、体重および衝突速度の増加によって乗員運動エネルギが増加し、シートベルトやエアバッグ等の乗員拘束装置で十分に吸収しきれず、胸部がステアリングホイール等に強干渉する為と考えられる。このような傷害を低減するには、乗員体重と衝突速度の増加に合わせてシートベルトやエアバッグ等の拘束力を高め、前方移動量を抑制することが有効である。

参考文献

(1) World Health Organization: Obesity and overweight、https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight(2024-3-1)
(2) Mock CN, Grossman DC, Kaufman RP, Mack CD, Rivara FP. The relationship between body weight and risk of death and serious injury in motor vehicle crashes, Accident Analysis & Prevention, 34, 221-228.
(3) Cormier, J. M. (2008). The influence of body mass index on thoracic injuries in frontal impacts. Accident Analysis & Prevention, 40, 610-615.
(4) Ejima, S. et al.: Lower Extremity Fracture in Patients with Obesity in Real-World Crash Data. 25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Detroit, United States. Paper Number: 17-0035, (2017).
(5) Reed, M.P., Manary, M.A., Flannagan, C.A.C., Schneider, L.W.: A statistical method for predicting automobile driving posture. Hum. Factors 44(4), 557-568 (2002)
(6) Chen, R.; Gabler, H.C. Risk of thoracic injury from direct steering wheel impact in frontal crashes. J. Trauma Acute Care Surg. 2014, 76, 1441-1446.

【著　者】

吉川　満晴

車軸動荷重に寄与するタイヤモードの実験的同定

Experimental Identification of Tire Modes Contributing to Dynamic Axle Load

山田宏典* YAMADA Hironori
阿部啓介* ABE Keisuke
佐藤直人* SATO Naoto
田中　潤* TANAKA Jun

抄　録

ロードノイズに対するタイヤ振動特性の要件化を目的に、タイヤの車軸に発生する動荷重の計測技術、および動荷重に寄与するタイヤモードの抽出を検討した。400 Hz以下を対象に、非接地・非転動時、接地・非転動時、接地・転動時の3条件について、治具やホイールの共振を離間した高剛性の試験システムを構築した。これを用いた実験モード解析により、車軸動荷重に寄与するモードのみを抽出した。更に、これらモードに着目し、接地および転動それぞれが与えるタイヤの振動特性の変化を定量的に把握した。

Abstract

To establish requirements for tire vibration characteristics regarding road noise, we examined a measuring technique for dynamic axle load and extraction of tire modes that contribute to dynamic load. A highly rigid test system which isolates the fixture and wheel resonance at 400 Hz or less has been constructed for the following three conditions: unloaded/non-rolling, loaded/non-rolling, and loaded/rolling. Using this system, only the modes contributing to dynamic axle load were extracted through experimental modal analysis. Furthermore, we have quantified the changes in the vibration characteristics of the tire caused by loaded and rolling motion, respectively.

1. まえがき

ロードノイズはタイヤから車軸を介してサスペンション、車体へと振動伝達することにより発生する騒音現象である。よって、ロードノイズ性能に対するモデルベース開発(MBD)として全系の性能に紐づく分系目標へのカスケーディングを考える際、路面転動時に車軸に生ずる動荷重は重要な物理特性の一つである。

タイヤ単体開発の実現に向けて策定すべき物理的指標は、OEMとサプライヤ間で相互に計測・検証が可能であることや、他分系(例えば、サスペンション)に影響されないタイヤ分系の特性のみで決まることが求められる。このことから、著者らは車軸におけるBlocked Forceをタイヤ分系指標の候補とし、この計測技術の確立を目指している。

タイヤ単体の車軸部におけるBlocked Forceの計測上の課題は、(1)計測装置の観点：計測対象であるタイヤ以外の共振系(ホイール、タイヤ支持構造など)が連成しやすく、これら外乱を含まないタイヤ単体の振動特性のみを抽出することが困難。(2)計測条件策定の観点：モード波長が小さくなるがゆえ、モードを抽出するための加振点および応答点位置が緻密となり、客観的かつ再現性のあるデータを取得することが難しい。の両面が挙げられる。

本研究では、ロードノイズの主たる周波数とされる400 Hz以下を対象に、車軸動荷重に寄与するタイヤモードを抽出する計測技術を開発することを目的とする。まず、先述の外乱を含まないタイヤ単体特性を取得可能とする計測システムを開発し、多数存在するタイヤモードのうち車軸動荷重に対して寄与の大きいタイヤモードのみを同定する手法を検討する。次いで、接地および転動状態における計測システムも同様に開発し、これらの影響がタイヤモード特性に与える変化を定量的に把握する。

＊ 車両運動開発部

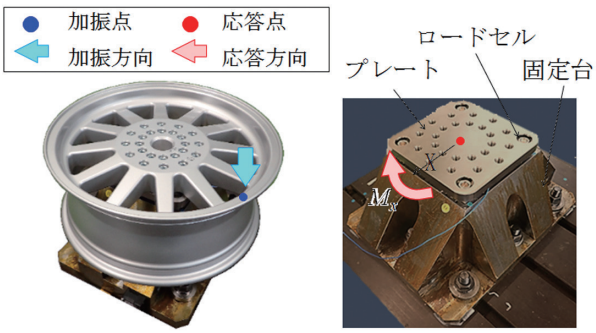
2．非接地状態のタイヤ振動特性

車軸固定、非接地、非転動条件でのタイヤ振動特性を把握することを目的として試験システムの製作、実験モード解析を行った。

2.1　計測システム

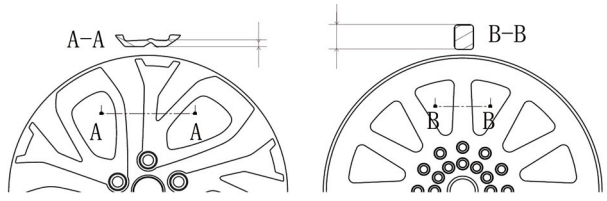
上記条件における車軸動荷重を取得するための計測システムを製作した。図1に計測装置の概観を示す。定盤に締結した車軸固定用の鋼製の装置（以下、固定台）の上面四隅に圧電型の3軸ロードセルを配置し、その上にステンレス製ホイール締結用プレートおよびホイールをボルト締結する構造である。ホイールが評価周波数帯で共振するとタイヤ単品の振動特性の取得が困難となる。市販ホイールと剛性が高い特殊ホイール（以下、高剛性ホイール）の概略を図2に示し、これらをプレートに取り付けリム部を鉛直方向に加振した際のX軸回りのモーメントM_xを図3に示す。高剛性ホイールはスポークを閉断面化し、断面積を増加させディスク面の剛性を向上させた。また、ホイール締結用プレートとの接触剛性確保のため、ボルト締結数を24点とした。市販ホイールで存在していた311 Hzの共振は、高剛性ホイールでは634 Hzに上昇し、評価周波数帯に、システムの共振が存在しないことを確認した。本システムにより400 Hz以下に存在するタイヤ共振を正確に取得することが可能と考えられる。

以降では、固定台に高剛性ホイールを装着したものを試験システムとしてタイヤモードを評価する。



（a）全系　（b）ホイール非装着時

図1　計測システムの概観（軸固定、非接地条件）



（a）市販ホイール　（b）高剛性ホイール

図2　市販ホイール及び高剛性ホイールの構造比較

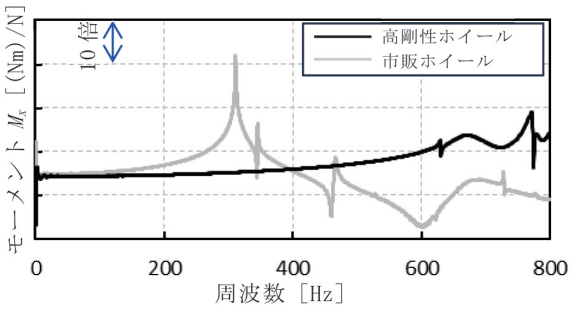


図3　計測システムの共振周波数

2.2　車軸動荷重に寄与するタイヤモード

試験システムにタイヤを装着し、タイヤ加振時の車軸動荷重を評価する。試験で使用するタイヤは、サイズ225/60R18、空気圧230 kPaとした。加振入力はインパクトハンマによる入力とした。加振位置は、タイヤトレッド中心の法線方向と接線方向、サイドウォールの法線方向の計4点、応答は加振点イナータンスおよび車軸動荷重を計測した（図4）。加振点イナータンスを図5(a)、並進、モーメントそれぞれの車軸動荷重の伝達関数を図5(b)、(c)に示す。並進およびモーメントの6自由度は（F_x、F_y、F_z、M_x、M_y、M_z）とする。図5(a)より、加振点イナータンスは多数のタイヤ固有モードに起因した共振峰が形成されるが、車軸動荷重は400 Hz以下の図中<1>～<7>に示すピークのみ（197 Hzは空洞共鳴であり除外）が形成される結果であった。

これらの車軸動荷重に寄与するタイヤモードを同定する。加振位置はタイヤ表面における一断面あたり13点を90 deg.間隔に配置した計52点（図6）とし、車軸動荷重をリファレンス、タイヤ加振力をレスポンスとした実験モード解析を行った。

同定した各モードシェイプを表1に示す。表中のモード番号は図5中の各ピークに示す番号と対応する。松原ら[(1)]の提案によるタイヤ周方向の波数を用いたモード分類を用いるため、断面方向（赤線）、周方向（青線）それぞれについてのモードシェイプを示した。 周方向についてはFEMモデルを援用しシェイプを示した。

100 Hz以下で抽出されるモード<1>～<4>については、既報[(2)]で述べられているため、<5>～<7>のみ述べる。断面のモードシェイプに着目すると、トレッド中心に対して、非対称のモードである断面2次非対称モードは、ビード-ビード間で腹（表1<5>、<6>中

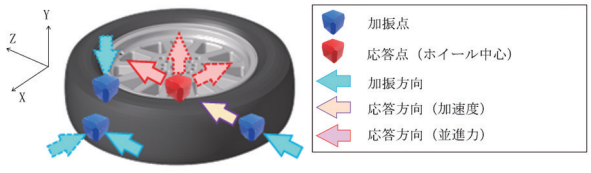


図4　加振および応答点

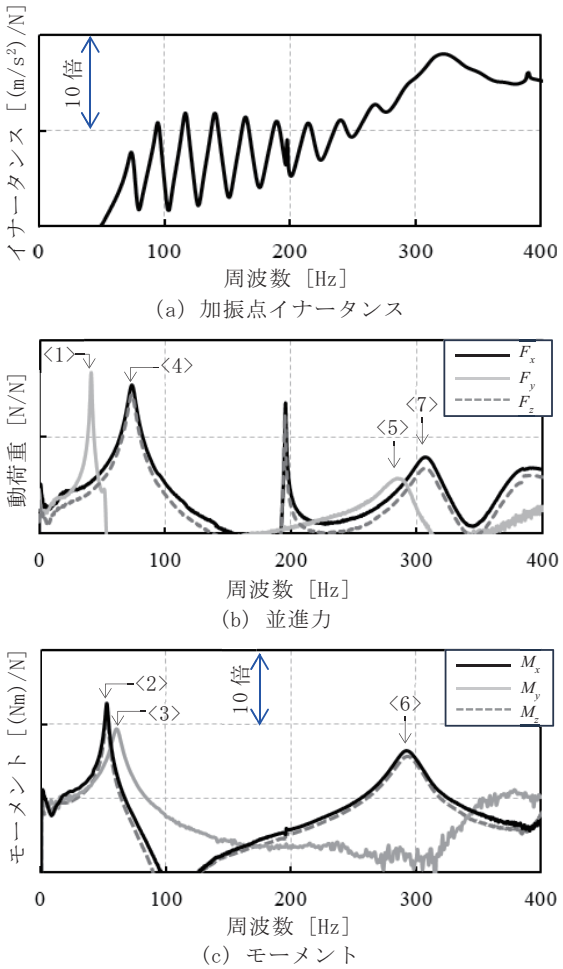


図5　車軸固定、非接地、非転動条件における
イナータンスと車軸動荷重（F_x、F_y、F_z、M_x、M_y、M_z）

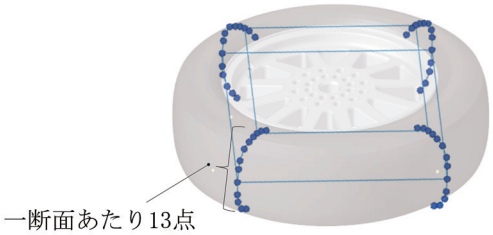


図6　加振点位置

の青矢印）が4個あり、周方向波数が異なる2モードが存在する。対称のモードである断面2次対称モードは5個腹（表1<7>中の青矢印）がある。以上より、断面2次モードは計3モード存在する。

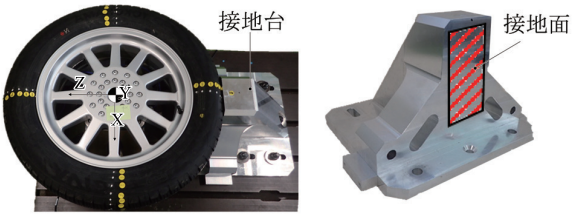
車軸固定、非接地、非転動条件であれば、周方向の対称性を有するモードにおいて車軸で生ずる力は相殺され、車軸動荷重に寄与するタイヤモードは、いずれも周方向に非対称性を有するモードとなる。

3．接地によるタイヤ特性の変化

タイヤが接地すると拘束条件および接地面形状が変わるため、振動特性が変化する。車軸固定、接地、非転動条件における計測システムを検討し、実験的評価を行った。

3.1　計測システム

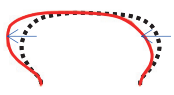
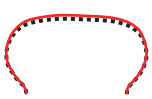
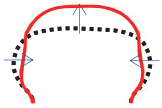
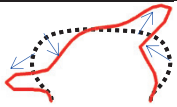
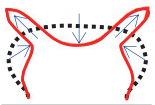
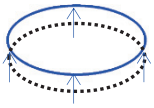
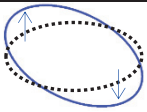
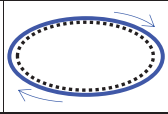
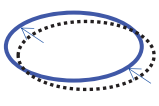
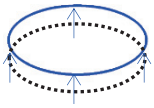
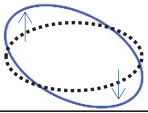
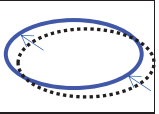
固定台に加え、タイヤを車重相当で接地させるためのアルミニウム合金製の治具（以下、接地台）を製作した。図7に試験システムの概観を示す。接地荷重の直接計測が難しいため、実車両のタイヤ変形量を計測しておき、接地台を押し付けて同等の変形量を与えた。接地台単体を定盤締結した状態での一次固有周波数は872 Hzであり、分析対象周波数から離間できている。加振入力はインパクトハンマを用いた。接地面近傍は形状変化が大きく伝達特性が変化することが予想されるため、多数（59点）の加振点を設定した。加えて全



試験システム全系　　接地台

図7　計測システムの概観　（軸固定、 接地条件）

表1　実験モード解析　（軸固定、 非接地、 非転動条件）

	〈1〉	〈2〉	〈3〉	〈4〉	〈5〉	〈6〉	〈7〉
	せん断 1 次		軸回り	径 1 次	断面 2 次（非対称）		断面 2 次（対称）
断面方向							
周方向波数	0	1	0	1	0	1	1
径方向							
固有周波数	41 Hz	53、54 Hz	59 Hz	74、75 Hz	291 Hz	292、293 Hz	309、310 Hz
力方向	F_y	M_x、M_z	M_y	F_x、F_z	F_y	M_x、M_z	F_x、F_z

体のモードシェイプを捉えるため非接地部一断面あたり13点、計98点加振した（図8）。

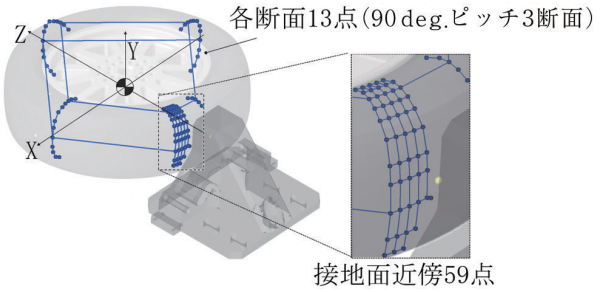


図8　加振点位置詳細

3.2　非接地および接地条件の特性差の評価

接地面近傍加振の伝達関数59個のスカラー和を図9に示す。M_yはF_xと略同等のため省いた。実験モード解析により同定した車軸動荷重に寄与するタイヤモードの代表例を抜粋し、表2に示す。接地により断面形状が変化し、拘束状態が非対称化することでモードの対称性が崩れ、伝達力を発生するモードが増加した。

2章と同様に、300 Hz近傍の断面2次モードである(11)～(14)のみ検討する。断面のモードシェイプは、トレッド中心に対する非対称モード((11)、(12))と対称モード((13)、(14))に分類される。周方向のモードシェイプは非接地時と比較し、より多くのモードが影響し、ピークとなっている。

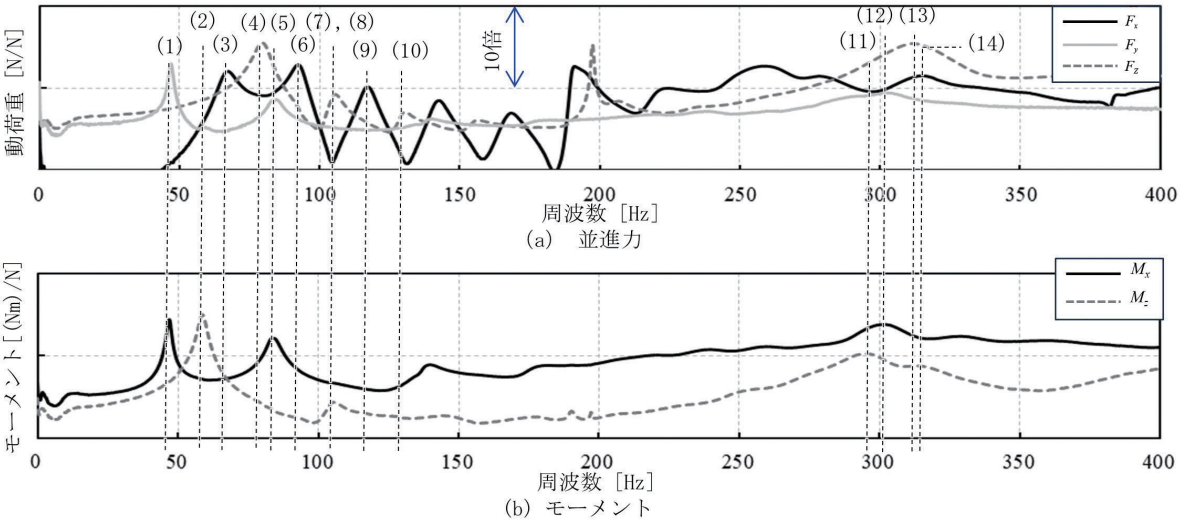
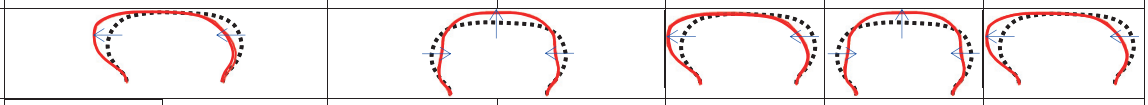
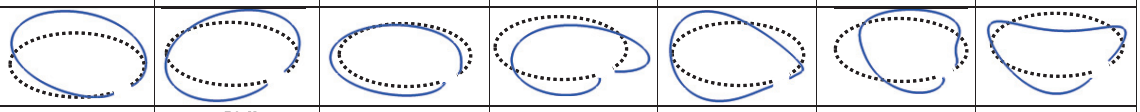
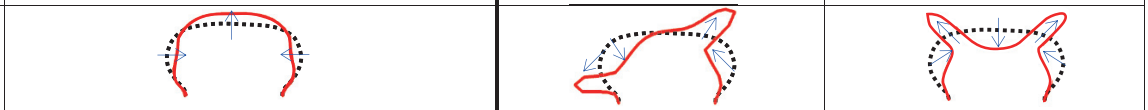
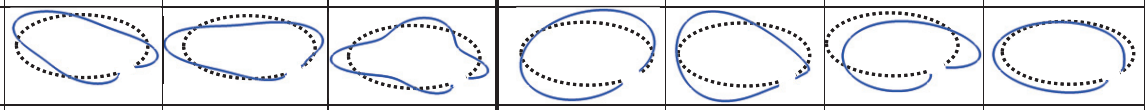


図9 車軸固定、接地、非転動条件における車軸動荷重（F_x、F_y、F_z、M_x、M_z）

表2　実験モード解析（軸固定、接地、非転動条件）

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	せん断1次		径1次（回転）	径1次	せん断1次	径1次	せん断1次
断面方向							
周方向波数	0.5	1	1	1.5	1.5	2	2
径方向							
固有周波数	47 Hz	59 Hz	67 Hz	80 Hz	84 Hz	93 Hz	104 Hz
力方向	F_y、M_x	M_z	F_x	F_z	F_y、M_x	F_x	M_z

	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
	径1次			断面2次（非対称）		断面2次（対称）	
断面方向							
周方向波数	2.5	3	3.5	1	1.5	1.5	1
径方向							
固有周波数	105 Hz	117 Hz	129 Hz	296 Hz	301 Hz	312 Hz	315 Hz
力方向	F_z	F_x	F_z	M_z	F_y、M_x	F_z	F_x

4．転動によるタイヤ特性の変化

4.1　計測システム

実路面を転動するタイヤホイールの車軸動荷重を計測するための計測用トレーラーを製作した。概観を図10に示す。ホイール6分力計二個を鋼製箱(一次共振650 Hz以上)に取り付けた。軸重は約900 kgである。トレーラーの剛体共振は7 Hz以下であり、20 Hz以上の計測データに影響は無い。高剛性ホイールを取り付けた状態にてシステムの弾性共振周波数は400 Hz以上である。ISO 8608 class A相当の路面を40～30、50～40、60～50 km/hで約260 m区間を惰行し、時系列動荷重データを取得した。

4.2　計測結果

進行方向をX方向、鉛直方向をZ方向、回転軸をY軸とし、40～30 km/hで計測した車軸動荷重の平均化パワースペクトル(F_x、F_y、F_z、M_x、M_z)を図11に示す。回転軸周りのモーメントM_yは応答の出力が小さいため割愛した。評価対象外の20 Hz以下は、図中にてグレーアウトした。

非転動から転動に伴い共振周波数は全般的に低下した。100 Hz以下に存在するモード(1)～(10)の共振周波数変化は、既報[3]の検討と対応が取れる結果である。260～300 Hzには軸固定、接地、非転動条件の断面2次モードによるピークと同様に、ブロードバンドのピークが形成されており、先述のモード(11)～(14)が存在していると考えられる。

惰行速度域を40～30、50～40、60～50 km/hと変化させた場合の測定結果の一例として、F_xを図12に示す。転動速度を変化させてもピーク周波数は概ね一定であることが確認できる。小泉らの研究[4]より、40～60 km/hでは約125 Hzまで共振周波数が概ね変化しないことが示されており、本結果も同様に400 Hzまでの顕著な共振周波数の変化が観測できない。

車速による車軸動荷重の変化率は、50 Hz以下では小さいが50 Hz以上では顕著であり、周波数域によって異なることが分かった。共振周波数は、30～60 km/hの速度域において車速依存性は認められなかった。

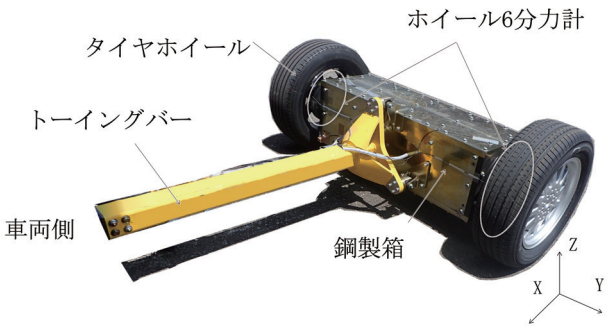


図10　計測用トレーラーの概観

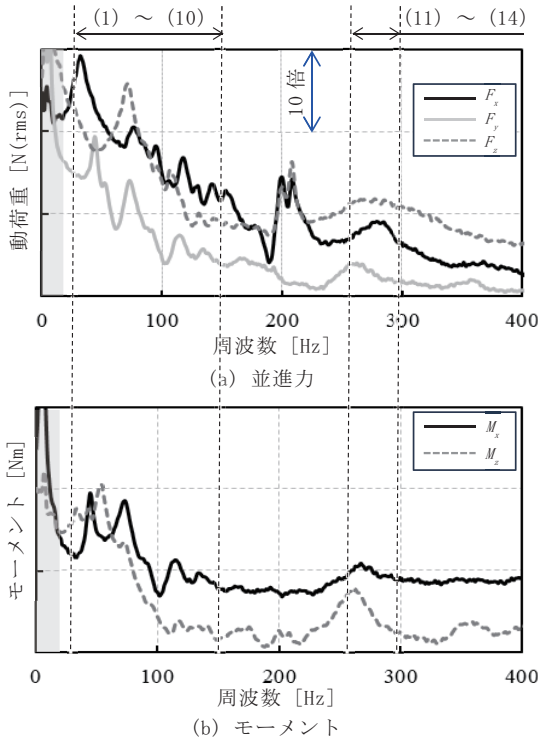


図11　惰行走行時　(40～30 km/h)における車軸動荷重　(F_x、F_y、F_z、M_x、M_z)

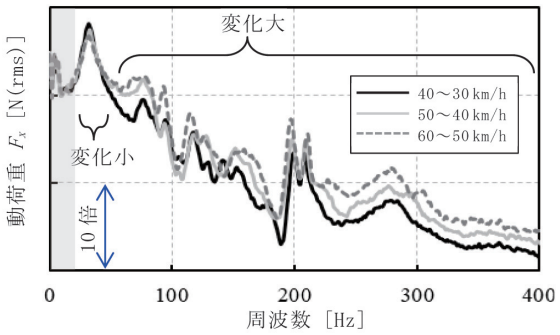


図12　車速違いによる車軸動荷重の変化 (F_x)

5．まとめ

ロードノイズの周波数領域である400 Hz以下を対象に、タイヤ単体の振動特性を把握可能な計測システムの開発、ならびに車軸動荷重に寄与するタイヤモードの抽出を行った。得られた結果と知見をまとめる。

(1)ホイール中心の6分力を測定できる固定治具および特殊な高剛性ホイールを製作した。タイヤトレッドとサイドウォール部のインパクト加振による実験モード解析を実施し、400 Hz以下のタイヤ共振周波数とモードシェイプを確定した。トレッド非接地状態においてホイール中心に動荷重を生じ得るタイヤ構造共振モードは7個認められた。

(2)車両相当荷重の接地状態ではタイヤ断面形状の変化と拘束条件の非対称化によりタイヤ構造共振モードが変化する。十分な剛性を有する平面部材をタイヤトレッドに押し付けて接地状態を模擬した実験モード解析を実施した。接地面近傍のタイヤトレッドを多点加振して力-力伝達関数を計測し、そのスカラー和を求めることで、接地面強制変位時にホイール中心荷重に対して寄与の高い振動モードを識別した。

(3)剛性の高い鋼製箱にホイール6分力計を組み付けたトレーラーを製作し、凹凸のある試験路面上をタイヤが転動した際の車軸動荷重を直接的に計測した。車速による荷重ゲインの変化率が、周波数域によって異なることが分かった。非転動から転動に伴いタイヤの共振周波数は全般的に低下した。ただし30～60 km/hの速度域において車速依存性は認められなかった。

参考文献

(1) 松原真巳ほか：接地拘束に着目したタイヤ半径方向振動挙動解析、日本機械学会論文集、Vol.80、No.811（2014）、p.DR0049

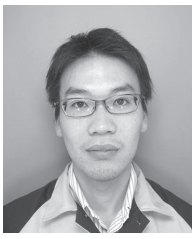
(2) 松岡久祥ほか：円筒形構造物に対する定常波離散化による新しい実験的モード特性同定法およびタイヤのモデル化への適用、日本機械学会論文集(C編)、Vol.68、No.675（2002）、p.3322-3328

(3) 三山栄仁ほか：ロードノイズスペクトル適正化のためのタイヤ固有値コントロール技術開発、自動車技術会論文集、Vol.40、No.5（2009）、p. 1133-1138

(4) 小泉孝之ほか：回転効果に着目したタイヤ転動時における振動挙動解析、日本機械学会論文集(C編)、Vol.77、No.777（2011）、p.2018-2029

【著　者】

山田　宏典


阿部　啓介

佐藤　直人

田中　潤

充放電装置に連携したバッテリHILSシステムの構築と評価

Construction and Evalution of Baterry-HILS Linked to Bidirectional DC Power Supply

黒田 一徳* KURODA Kazunori
工藤 聡* KUDO Satoru
古田 一樹* FURUTA Kazuki
菊池 淳* KIKUCHI Jun

抄 録

電動車のバッテリ制御開発は電池の安全性・品質を担保した上で、適切に制御誤差を見定め、電池出力の最大化と容量の拡大を高次元で両立する開発が求められる。

従来のバッテリ制御開発では、充放電装置を用いたバッテリパック評価や、実車評価により安全と品質を担保してきた。バッテリパックの製作に時間が掛かるため、バッテリ制御検証が完了するまでの期間が長いことや実車走行パターンを再現させ、制御検証することが難しいという課題を抱えていた。

この課題を解決すべく、バッテリモジュールの充放電装置とHILSを連携させ、バッテリ制御の評価で必要なパラメータをバッテリモジュールから取り込み、バッテリ制御で算出した入出力制限値をリアルタイムで充放電装置へフィードバック可能となるバッテリHILSを構築した。

Abstract

The development of battery control for electric vehicles requires achieving a high-level balance between maximizing battery output and expanding capacity while ensuring battery safety and quality.

Traditional battery control development has ensured safety and quality through battery pack evaluations using bidirectional DC power supplies and prototype vehicle evaluations. However, this approach has faced challenges such as the long time required to complete battery control verification due to the time-consuming for battery pack production, and the difficulty of reproducing prototype vehicle driving patterns for control verification. To address these challenges, we have developed battery- HILS that integrates bidirectional DC power supplies with HILS. This system allows for real-time feedback of input/output limit values calculated by battery control to the bidirectional DC power supplies, by collecting the necessary parameters for battery control evaluation directly from the battery modules.

1. まえがき

電動車のバッテリ制御開発は電池の安全・品質を担保した上で、入出力性能の出し切りと容量の使い切りを高次元で両立する開発が求められる。この開発を実現する為には、電池状態を高精度に推定できる制御ロジックの構築と定数適合が必要となり、膨大なLi-ion電池セル評価や、多種多様なパターンでの制御検証が重要となる。

従来のバッテリ制御開発では、バッテリパックの製作に時間が掛かるため、バッテリ制御検証が完了するまでの期間が長いことや実車走行パターンを再現させ、制御検証することが難しいという課題を抱えていた。この課題を解決するために我々はバッテリHILS（以降、BILS）を導入した。BILSはバッテリモジュール、充放電装置/恒温槽、HILSで構成されたシステムである。バッテリマネジメントシステム(以降、BMS)へバッテリモジュールのパラメータ（電圧・電流・温度）を入力することで、実車走行パターンに、より近いバッテリ制御検証が可能となった。本稿では、まずバッテリ制御開発の課題を提起する。次にこれらの課題を解決するBILSについて解説し、BILSを活用した検証の一例を報告する。最後に、今後の展望を示す。

＊ バッテリーシステム開発部

2．バッテリ制御開発の課題

従来のバッテリ制御開発では、Li-ion電池セル、バッテリパック、試作車を製作した後、実機検証を行うことで品質・性能向上を進めてきた。(図1)この開発手法では、バッテリパック、試作車の製作が完了しないと実機検証に移行できず、開発期間が長くなるという課題を抱えていた。バッテリモジュールのみの最小構成で、制御検証可能な設備の検討を行った。

2.1　バッテリパック製作の課題

バッテリパックの製作には、主要部品であるLi-ion電池セル、バッテリモジュール以外にも、バッテリケースや、高電圧バスバー、ジャンクションボックスなどの付属部品製作が必要となる。そのため、バッテリパックの製作期間は、膨大な部品費、工数と時間を要する。開発期間を短くするために、バッテリモジュールのみの最小構成で制御検証が可能なシステムの検討を行った。

2.2　充放電装置の課題

一般的な充放電装置は、定電圧、定電流での充放電やプログラムされた一定の充放電パターンしか実行できないため、簡素なパターンに限定され、バッテリ制御品質の作り込みに必要不可欠な実車走行パターンが再現できない。(図1)

今回、充放電パターンの評価中に、1.BMSからリアルタイムで、電池入出力制限のフィードバックを掛けられる機能。2.電動車のインバータ、リプルノイズを再現できる機能。3. バッテリモジュール電圧からバッテリ総電圧を模擬する機能。上記3機能を実現できる充放電装置との連携システムやリプルノイズを重畳できる電源装置の検討を行った。(図2)

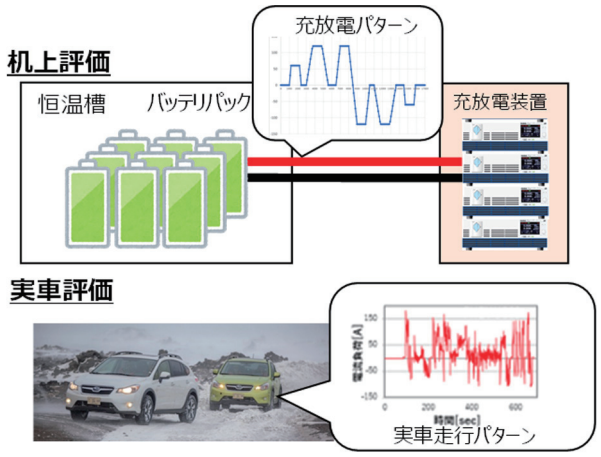


図１　従来のバッテリ制御開発

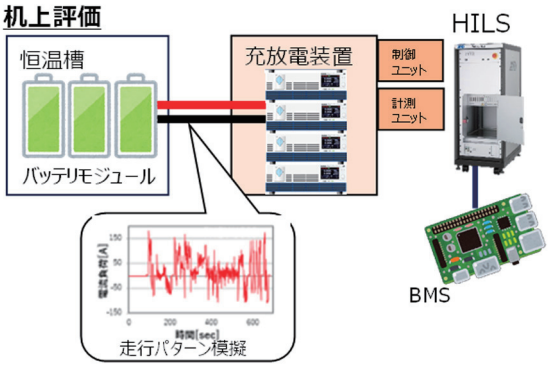


図２　今後のバッテリ制御開発

3．BILS概要

BILSは、充放電装置、恒温槽、HILS、Laboratory Automation(LA)システムで構成されている。(図3)

図３　BILS 概要

3.1　充放電装置連携したBILS

バッテリモジュールの電圧、温度、電流のパラメータをHILSで実車相当に変換して、BMSに入力できるシステム構成とした。これにより、Li-ion電池セルの電圧、温度ばらつきや配線抵抗の再現も可能となり、より実車に近い評価環境を実現している。充放電装置のプログラムされた一定の充放電パターンをHILSからリアルタイムでフィードバックを掛ける機能を織り込んだ。また、複雑な実車走行パターン(実車波形)の充放電指示を行う制御ソフトとして株式会社エー・アンド・デイ社製iTest LAを使用した。iTest LAを使う事で実車の走行データを基にした10msecの高分解能の充放電パターン、長時間の実車走行パターンの繰り返し、走行モードを複数組み合わせたシナリオ評価などが可能となる。

3.2　リプルノイズ重畳できる電源装置

充放電装置の電源構成を1つの主電源、2つの副電源および電子負荷からなる3つの電源・負荷構成とした。電動車のモータインバータのリプルノイズを再現させ、より実車の力行・回生挙動に近い電圧・電流波形の評価を実現している。

3.3　バッテリモジュール電圧からバッテリ総電圧を模擬する増幅回路

今回のBILSは、バッテリモジュール充放電装置との連携にこだわった。LAシステムの中にバッテリモジュール電圧を、バッテリパック相当の電圧に模擬する増幅回路を持たせた。この回路構成によって、バッテリモジュールが試作できた段階からバッテリパック相当のバッテリ制御検証が可能となる。また、本装置は、BEV/PHEV/HEVといった多彩な電動車のバッテリ制御検証が可能であり、汎用性が高い。

4．BILSを用いた評価例

BILSを用いた評価例として、「実車走行を模擬した評価」、「リプルノイズ影響確認評価」の結果を示す。

4.1　実車走行を模擬した評価

実車走行データをBILSの充放電装置に入力し、バッテリモジュール充放電を行った結果を示す。バッテリの温度変化も含めたバッテリ制御の入出力制限値が想定どおりに推移し、バッテリ制御が正常に動作していることを確認できた。(図4)

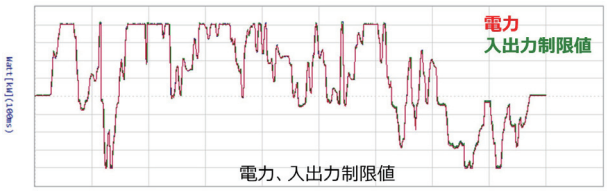


図４　バッテリ制御の入出力制限評価

4.2　リプルノイズ影響確認評価

電動車のインバータから発生するリプルノイズを模擬するために、高周波ノイズを充放電パターンに重畳させて、バッテリ制御への影響を確認した。BMSの取得しているセンサ値は、高周波ノイズ影響により、意図しないタイミングで大きく変化することが確認できた。従来のHILSでは模擬できなかったリプルノイズを作り出すことで、試作車を製作する前にバッテリ制御の課題抽出が可能となった。

5．まとめ

従来開発では、試作車やバッテリパックが製作されるまで、簡易プラントモデルの限定した領域での見通し立て評価しかできなかった。本装置を導入する事でバッテリパックの振る舞いを模擬できることとなり、バッテリ制御品質の作り込みの期間を充分に確保することや開発期間の短縮が可能になった。

執筆現在の電動車開発で、本装置を導入し、バッテリパック試作品完成予定日の数か月前から、バッテリ制御評価を開始できた。今後、自動化などの機能改善を図り、更なる開発期間の短縮を目指す。

本BILS構成では、恒温槽による温度調節しかできない課題がある。近年の電動車は冷却水(LLC)による温調が主流である為、バッテリサーマルシステムの評価が可能となる機能のアップデートも今後検討していく。

BILS評価と従来の車両評価の利点を最も効率よく活用できる新しい開発手法･プロセスを今後も模索し、バッテリ技術で「笑顔をつくる会社」づくりに貢献していきたい。

【著　者】

黒田　一徳

工藤　　聡

古田　一樹

菊池　　淳

SUBARUフォレスター特別仕様車「STI Sport Black Interior Selection」を発表

2024年4月11日

「STI Sport」にナッパレザー本革シートのほか、インテリア全体を質感高く精悍な黒一色でコーディネート。上質にしてスポーティなSTI Sportの魅力がさらに際立つ、特別な内装に仕立てました。 さらに、「オフショアブルー・メタリック」を、フォレスターとして初めて「STI Sport Black Interior Selection」専用色として設定しました。

フォレスター特別仕様車「STI Sport Black Interior Selection」

次世代モータの開発

Development of Next-Generatinon Motors

小　林　　淳[*1]　KOBAYASHI Jun
岡　田　朋　之[*2]　OKADA Tomoyuki
小名川　　真[*1]　KONAGAWA Shin
田　中　　豊[*1]　TANAKA Yutaka

抄　録

昨今、次世代モータとして注目されているアキシャルギャップモータ（以下ＡＧＭ）は軽量でハイパワーな特性を持ち、ＢＥＶにおいても走りの愉しさを具現化できるアイテムと考えている。

このＡＧＭの量産実現を目指すため、生産技術と技術研究所（以下ＴＲＣ）の協業を2021年より開始した。モータ製造に取り組むにあたり、情報収集をはじめ試作実証などでＰＤＣＡを回し、2022年には生産技術初の駆動ユニットを製作、先行開発台車への搭載を成功させた。

本稿ではモータの特長、設計、製造技術の取組みについて報告する。

Abstract

The axial gap motor (AGM), which has received attention as a next-generation motor in recent years, is lightweight and high-power. We believe that it can embody the joy of driving on BEVs as well.

In order to mass-produce this AGM, Manufacturing Engineering (ME) and Subaru Technical Research Center (TRC) have been collaborating since 2021. In working on motor manufacturing, we ran the PDCA cycle by collecting information and conducting prototype demonstrations, and in 2022, the first drive unit produced by ME was successfully installed on an advanced development mule.

In this paper, we report on the features and design of the motor and our commitment to manufacturing technology.

1．まえがき

ＢＥＶにおける電動ユニットの仕様面ではコモディティ化が進んでおり、水平対向エンジンやＡＷＤなどハード面などで差別化を図ってきたＳＵＢＡＲＵにとっては、商品力向上に繋がるアイテムが求められる。当社のＴＲＣでは以前より他社に埋もれない独自の技術開発を行っており、そのアイテムの中には、ＡＧＭというハイパフォーマンスな駆動ユニットが存在する。軽量ハイトルクなこのモータはＳＵＢＡＲＵらしさである走りの愉しさや商品価値向上を具現化できる可能性を秘めている。

このＡＧＭの量産実現に向けてモノ作りのコア技術を手の内化すべく、ＴＲＣと生技の協業を2021年より開始した。

2．AGMについて

2.1　モータの種類

現在、主にＨＥＶ及び電動車用の駆動モータとして採用されているモータの種類を表1に記す。

表1　自動車用駆動モータの種類

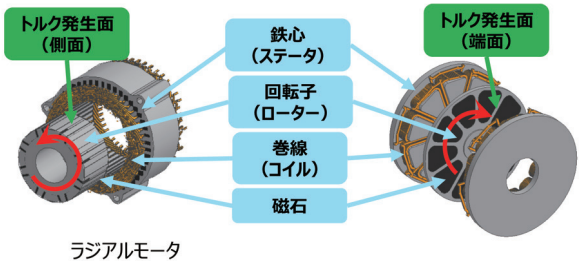
電源	回転	界磁	略称	磁束	採用
交流	非同期	誘導	IM	ラジアル	T社、M社、A社
	同期	巻線	ESM	ラジアル	N社、R社、B社
		永久磁石	IPM・SPM	ラジアル	T社、H社、N社etc
				アキシャル	F社、M社etc

＊1 電動車両生産技術部
＊2 技術研究所

永久磁石式のラジアルモータが小型・高出力を得られやすく、幅広いメーカーで採用されている。又、昨今は希土類の資源調達課題への対策で巻線界磁型モータを搭載する例も増加してきているが、永久磁石式と比較しモータサイズが大きくなることと、界磁ローターの製造コストが掛かることから、活発な採用には至っていない。尚、今回の開発対象として選定したＡＧＭは、欧州の一部のハイパフォーマンスカーなどに採用されているが、全体の約1%にも満たないユニークなモータに分類される。

2.2　モータの特長

広く普及しているラジアルモータとＡＧＭについて、図1に特長をまとめた。



項目	ラジアルモータ	AGM
トルク	1	2倍
軸長	1	1/3

図１　ラジアルモータと AGM の特長比較

モータの構成部品は鉄心(ステータ)、回転子(ローター)、巻線(コイル)、磁石と大きくは変わらないが、トルク発生面(磁束の流れ)がラジアルモータは径方向(側面)、ＡＧＭは軸方向(端面)にあるため、薄型で高トルクが得やすい構造となっている。ＡＧＭにおいて、ラジアルモータと同トルクを得ようとした場合、軸長が約1/3に収まるため、ラジアルモータ1つの設置スペースに、複数個搭載可能となる。そのため、低トルクタイプの車種にはモータ１基、高トルクタイプには２基搭載など幅広いパッケージングも可能となる。(図2)また、開発の観点からも、モータを新規で開発するより、同じものを複数個作るだけなので、開発工数、コスト低減にも繋げられると考えられる。

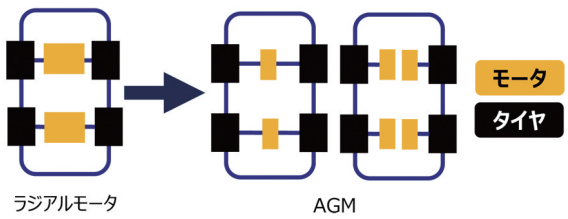


図２　ラジアルモータとAGMの搭載イメージ

更に、現在、Ｆ社のハイパフォーマンスカーなどに搭載されていることからも、今までのイメージである、水平対向＝Ｐ社＝ＳＵＢＡＲＵに置き換わり、商品力での差別化も可能と考える。

ＡＧＭではハイパフォーマンスという点が注目されがちであるが、材料の調達性、環境性能、技術の発展性など、事業活動の持続に必要な要素の多くを押さえられている事もメリットと言える。まず、鉄心についてであるが、ラジアルモータでは一般的に電磁鋼板が使用されるが、ＡＧＭではその特性上、圧粉コアに優位性がある。３次元の磁気回路が必要なＡＧＭでは、電磁鋼板の場合、面内での渦電流が多大となり、損失が増えてしまうが、圧粉コアのように絶縁被覆で覆われた粒子であれば、渦電流を最小限に抑えることが可能となる。また、プレス成形による製造のため、複雑な形状を製作し易く、生産性が高い。圧粉コアは性能や製造面でも優位となる上、鉄鉱石からではなく、スクラップから電炉で精製できるため、産出国の影響を受けにくく、安定調達が可能。次に、環境性能であるが、小型化による、製造時のCO_2発生量の削減、また、圧粉コアの採用により電磁鋼板では必須である圧延工程の削減、リサイクル性も良いことから、環境への配慮もされている。最後に技術の発展性であるが、ＨＥＶ、インホイールモータ、航空機への展開なども可能である。

一方、ＡＧＭの採用が進まない理由としては、マグネットトルクに依存するモータ構造のため、磁石使用量増によるコストＵＰや、性能を担保するための、冷却構造の適正化が難しい点などが主に挙げられる。

3．AGM設計

3.1　体格決定

上述の通り、前後車軸上の搭載を想定しているため、この周辺の既存部品と比較して決めた。大まかに以下のような考え方で体格を決定していく。まずは径の上限を考える。ＡＧＭ搭載を前提としている位置にはコンベ車ではデフがあり、径方向のサイズはこれを上限とする。次に、軸方向長さの上限を考える。基本的には、サスストロークとドライブシャフトの揺動角を満たせる範囲内としてとしている。これらは試作モータを設計する上での最大体格だが、実際には出力目標値を満たせる場合にはこれらよりも小さいサイズで設計を行っている。

3.2　設計方針とコイル断面積への影響

ＡＧＭの特長を生かすためにモータとしては高トルク寄りの設計としなければならない。大雑把に言って

しまうと、トルクを上昇させるためには起磁力すなわち巻数、電流値いずれかを上げる必要がある。コイルの直並列数の組み合わせも巻数と同等として今回は扱う。しかし、車両の最高速とシステム電圧により巻数は制約を受けることが多く、今回は主に電流値を調整することで高トルクを実現することとする。しかし、電流は際限なく流せるものでは無くコイル断面積によって制限される。例えば、許容銅損・目標効率や冷却方法などである。本試作モータは単純な冷却系を採用しており、コイルに対する冷却効率は車載用モータとして一般的に用いられているものと比べて低い。以上から本ＡＧＭは、一般的なラジアルモータと比較するとコイル断面積が必要となる。

４．AGM製造（レーザー接合技術開発）

4.1　コイル接合方法の検討

ＡＧＭではコイル成形、絶縁処理、組立など製造難易度が高い工程が多いが、本稿では特に開発要素が強い、コイル接合について紹介する。ＡＧＭのコイルの接合はラジアルモータと異なる点が3つある。（図3）

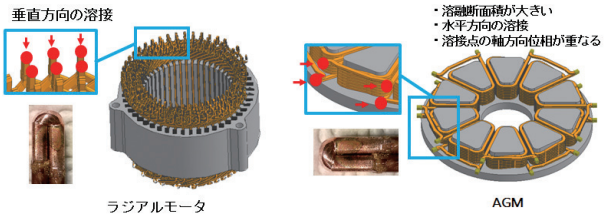


図３　接合方法の比較

まずは、コイル断面積が大きいことと、コイルが水平方向に張り出すかつ、溶接点が軸方向に位相が重なっている事である。このことから、大きな溶融部を得る事、そして溶接時の治具レイアウトの制約を受けづらい接合方法を模索し、まずはIR（近赤外）レーザーを用いた接合に絞り、取組を始めた。

4.2　レーザー溶接の懸念点

コイルの接合に対して、レーザー溶接は不向きだと言われている。その主な理由としては、コイルの光の吸収率にある。今回用いるＩＲ（近赤外）レーザーに対して、光の吸収率は5%程度と出力エネルギーに対し、変換効率が低い。（図4）溶融させるために高出力かつ、長時間の照射とすると、入熱量が多くなり、コイルのエナメル被膜を損傷させてしまう。そのため、定点照射ではなく、ウォブリングといった、円などを描きながら照射する技術が必要となる。また、溶融が開始されると光の吸収率が5%→20%まで急上昇するため、溶融部の急沸騰により、スパッタが発生することが懸念された。ＡＧＭでは上記の懸念点に加え、水平方向の張り出し部の溶接となるため、溶融部が重力により垂れ下がり、必要な溶融面積の確保が困難となる事も予想された。（図5）そのため、確かなモータを製作するため3STEPで念入りに試作手順を踏むこととした。それぞれの目的としては、STEP1：単品コイルでの溶接条件出し、STEP2：モータASSYでの溶接条件確認、STEP3：本番溶接（モノ出し）である。

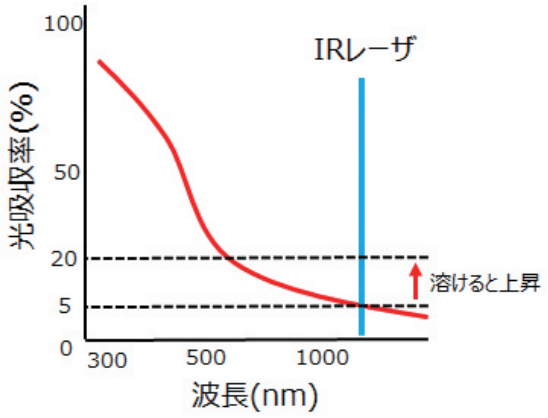


図４　コイルの光吸収率イメージ

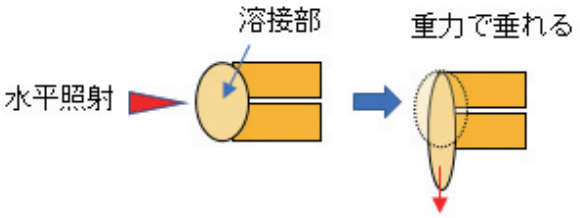
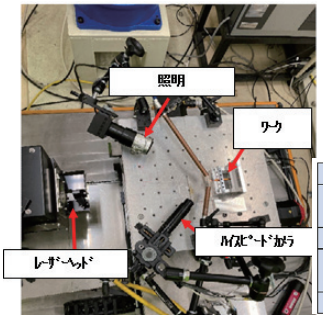


図５　溶融イメージ

4.3　STEP1（単品での条件出し）

STEP 1では、実際にモータに組まれるコイル材を70mmに切り出し、条件出しの試作を実施。コイルの熱容量を考慮すると、ASSYコイルの長さである約1600mmでの切り出しがベストである。しかし、治具での把持が困難であることや、条件出しには数百個のテストピースが必要であるため、最低限の確認が可能となるように、コイル張り出し部の直線長さ70mmを切り出し長さとして設定した。また、試作をスムーズに進行するため、ハイスピードカメラをセッティングし、条件を即座にフィードバック出来るように溶融部を監視した。



発振器	FO-8000-S-ARM	corelase社
最大出力	センター	4000W
	リング	4000W
波長	1070nm	
ファイバー	センター径	70μm
	リング径	180μm
実験場所	㈱ナ・デックス	

図６　治具レイアウトと設備仕様

当初の想定通り、条件出しは難航し、約20条件を試作した。品質が安定したワークの状態を図7に、条件を図8に記す。

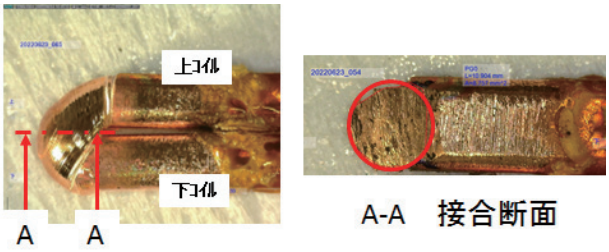


図７　良品ワーク外観

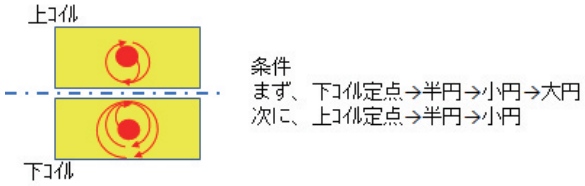


図８　良品条件

得られた結果としては、上下コイルの溶接の順番が溶接部の垂れ状態に寄与すること、ウォブリングによって､スパッタを大幅に抑制できることが分かった。溶接順と条件が適正でないと、図9のように大きく垂れ下がる。

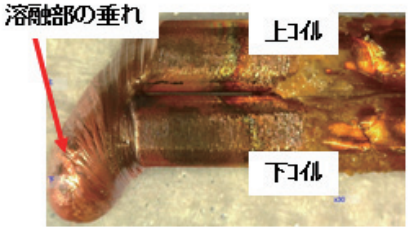


図９　条件が適正ではない場合のワーク

これは、上コイルと下コイルをほぼ同時に溶融させたときの状態である。メカニズムとしては、上下コイルを同時に溶融することで、溶融部が結合。大きな溶融玉となることで、溶融部の表面張力が重力に負け垂れたと推察。同時溶融はNGの結果を得られたため、最初のコイル溶融部が凝固してから次のコイルを溶融するように、タイムラグを設けることと、下コイル→上コイルの順に溶融させることで、比較的に安定する条件を得ることができた。（図10）

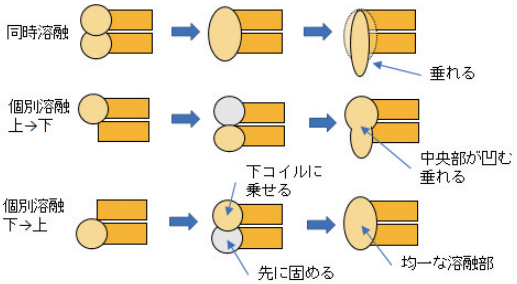


図１０　各溶接条件での状態イメージ

4.4　STEP 2（ASSYでの確認）

STEP1の単品条件とコイルが全て組まれた状態であるモータASSYでは、コイルの熱容量が変わり、溶接条件への影響が出る可能性があったため、ASSY状態でのTRYを実行した。

結果としては、STEP1の条件で同等の品質を得られることが分かった。ただ、事前にASSY状態とするため接着剤にてコイルを仮組していたが、接着剤が溶接の熱で溶け、溶融部に染み出ることで品質へ影響することが分かった。これは、溶融部に不純物が混じる事で、溶融時の放熱量が変わり、溶融部が固まりにくく、溶融部の垂れ下がりに繋がったと推察した。

図１１　正常品と接着剤混入品の比較

4.5　STEP 3（本番溶接）

STEP3ではSTEP2で問題となった、仮組時の接着に対し、クリップや治具で仮止めとすることで対応することとした。また、3DプリンタでASSYモデルを作成し、複雑な配線を間違いなく組める施策も同時に施すこととした。

上記の対策を織り込んだ結果、問題なく、ステータASSYの溶接を完了することができた。

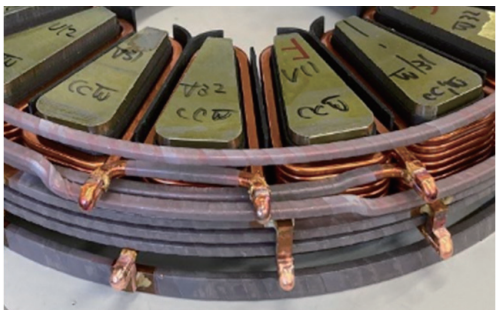


図１２　本番溶接 ASSY（溶接部拡大）

５．製作の結果

事前の解析結果と比較し、出力トルクなどに関しては想定通りの性能を確認することができた。しかし、駆動時のローターの温度上昇が想定より早く、磁石及び保持機構の見直しが必須と考えられる。試作モータに関しては、単体評価をはじめ、実車への搭載を実現した。

６．まとめ

今回ＡＧＭでのモータ製作に取り組んできたが、製造の要素技術としては、塑性加工、接合加工、熱処理、組立など、今までパワーユニットで培ってきた技術の応用であり、モノ作りとして共通している事が多くあることを実感した。本稿では、2022年上期の取組の一部の紹介であり、2024年の現時点では既に数仕様のモータを作り上げている。製造の要素技術についても、常に最新の情報をキャッチしながら進化させ取り組んでいる。ＡＧＭ開発については設計、製造とも一歩を踏み出した段階であり、量産実現までの乗り越えるべき課題は多いが､今後も試作サイクルを速く回し、早期の実用化を目指していきたい。

７．謝辞

本取組において、溶接のサポートをいただいた株式会社ナ・デックス様、製作をサポートしてくださった社内関係部署の皆様に、心から感謝の意を表すとともに、改めて深く御礼を申し上げます。

【著　者】

小林　淳

岡田　朋之

小名川　真

田中　豊

持続可能な航空燃料適用の研究に関する紹介

Introduction to the Study on the Use of Sustainable Aviation Fuel

中 村 寛 俊*　NAKAMURA Hirotoshi
小 川 俊 哉*　OGAWA Shunya
上 田 浩 司*　UEDA Koji

抄 録

航空業界においても2050年のカーボンニュートラルを目指し、世界各国で温室効果ガス削減に取り組む中、将来的に温室効果ガス削減量が高いとされるSAF（Sustainable Aviation Fuel）が現在、注目されている。一方、SAFは従来の航空燃料と物性が一部異なることが知られており、特に、Oリングをはじめとしたエラストマの膨張に影響する芳香族を含有していないSAFについて、機体燃料系統への影響が懸念されている。そこで、SAFによる機体の燃料系統への影響を把握することを目的として、弊社航空機へのSAFの適用に向けた取り組みを開始した。本稿では、機体の燃料系統に使用されているOリングをSAFに浸漬し、膨張率の変化を観察した浸漬試験及び社有機である富士Bell式205Bを用いたSAFでの飛行試験の結果を報告する。

Abstract

As the aviation industry strives to reduce GHG emissions and achieve carbon neutral by 2050, SAF (Sustainable Aviation Fuel) is attracting attention as a fuel with high GHG reduction potential. However, it is well known that SAF differs from conventional aviation fuels in some physical properties. Particularly, there are concerns about the impact of SAF, which lacks aromatics that affect the swelling of elastomers, on aircraft fuel systems. Therefore, we started to study the use of SAF in aircrafts to understand its impact on the aircraft fuel systems. This paper reports the results of the SAF swelling test on the O-ring used in the aircraft fuel systems and the flight test using Fuji/Bell 205B filled with SAF.

1．まえがき

カーボンニュートラルに向けて、世界各国が様々な分野で温室効果ガス（Greenhouse Gas、以下GHG）削減に取り組んでいる。航空機分野においては、将来的にGHG削減量が最も高いとされる持続可能な航空燃料（Sustainable Aviation Fuel、以下SAF）が現在、注目されており、当社においてもSAFでの航空機の運用を想定する必要がある。しかしながら、SAFは従来の航空燃料といくつか異なる物性があるため、既存航空機へのSAF適用においては、機体燃料系統への影響を把握する必要がある。

本稿では、航空業界のカーボンニュートラルに向けた動向やSAFの規格・物性について紹介する。また、SAFの物性において特に、エラストマの膨張に影響する芳香族に注目し実施した、機体の燃料系統のOリングの膨張を観察した浸漬試験及び社有機である富士Bell式205Bを用いた飛行試験について結果を報告する。

＊ 航空宇宙カンパニー　ヘリコプター技術部

2．航空機分野におけるカーボンニュートラル

日本政府は2020年10月に、2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。イギリスも同様に2050年でのカーボンニュートラルを宣言しており、EUは2030年までに1990年比で少なくとも55％のGHGの削減、米国は2050年以降ネット排出ゼロを宣言し、脱炭素社会の実現に向けて各国が取り組んで

いる[1]。上記のような各国の目標に基づき、航空分野でのカーボンニュートラルに向けた目標を本項にて紹介する。

2.1　航空分野における国際目標

国連専門機関である国際民間航空機関（International Civil Aviation Organization、以下ICAO）は2022年に長期的地球規模目標（Long Term Global Aspirational Goal、以下LTAG）を採択し、2050年までにGHGネットゼロを目指すことを宣言した[2]。目標達成にむけて、革新的な航空機技術（電動化、水素化、軽量化など）や効率的な航空機運航、そしてSAFの生産量及び導入量の増加の3つの施策に取り組むことを計画している。

LTAGの採択に向けてICAOは、技術、運航及び燃料の3つの施策から達成可能性及び将来予測を考慮し、3つのシナリオIS（Integrated Scenarios）を作成している。図1[3]にCO2排出量の3つのシナリオを示す。IS1が2022年時点で達成可能性が高いシナリオであり、IS3は達成可能性が低い野心的なシナリオ、IS2はその中間である。その中で、ドロップイン燃料（既存のインフラや設備、航空機の装備のまま使用できる燃料）は2050年までのCO2削減量に最も大きな影響を与えると考えられており、IS3のシナリオではSAFによるCO2削減効果（図中の緑色部分）の割合が50％以上を占めている。

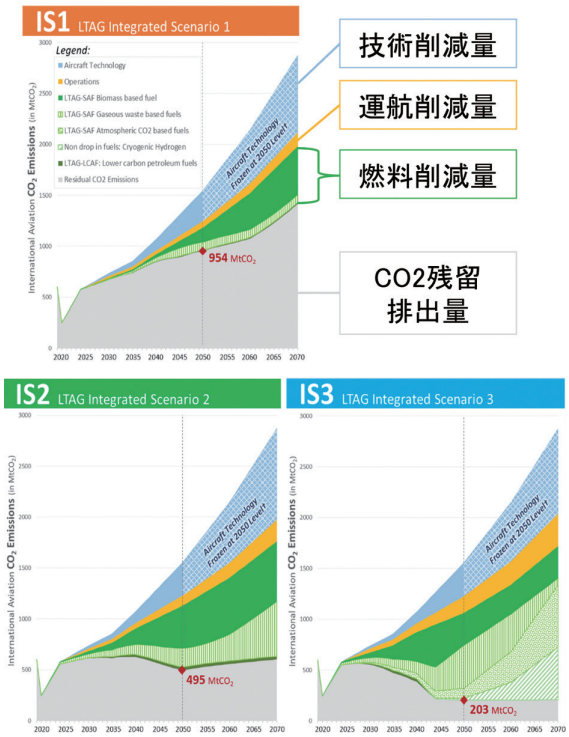


図1　LTAGシナリオ別の国際航空のCO2排出量

2.2　航空分野における国内目標

ICAOでのLTAG採択を受け、2022年に国土交通省は「航空脱炭素化推進基本方針」を制定し、航空の脱炭素化推進の目標や実施すべき施策を示した[4]。日本においてもICAOと同様に技術、運航及び燃料の3分野に取り組んでおり、SAFの導入促進では、2030年時点で本邦エアラインによる燃料使用量の10％（約170万トン、国交省の試算）をSAFに置き換えるとの目標を設定している（図2）[5]。目標の達成のため、SAFの官民協議会が2022年から設立されており、SAF製造や認証、サプライチェーンの構築等を議論している。

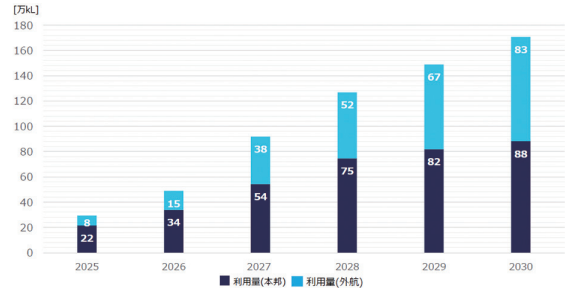


図2　SAF利用量の見通し（10%目標）[5]

3．持続可能な航空燃料（SAF）

SAFは1項で記載の通り、持続可能な航空燃料（Sustainable Aviation Fuel）の略である。言葉の通り、SAFは原料に廃食油などの廃棄物やサトウキビなどのバイオマス材料を使用し、原料の栽培によるCO2吸収、又は廃棄物の利用によって従来のジェット燃料よりもCO2削減が期待できるものである。本項では、SAFの規格及び物性について説明する。

3.1　SAFの規格

現在、SAFの規格は2種類あり、航空燃料として使用できることを認めるASTM D7566[6]及びGHGの削減効果があることを認めるCEF[7]（CORSIA Eligible Fuel）である。

ASTM D7566では、2024年6月現在で表1に示す8種類のSAFが航空燃料としての使用を認められているが、SAFの物性が従来の航空燃料と一部異なるため100％ SAFでの使用はできず、従来の航空燃料と混合して使用する。従来の航空燃料と混合し、SAFだけでは不足している物性を補うことで、従来の航空燃料と同様のインフラ・設備で使用でき、従来航空燃料と性能が変わらないこと（ドロップイン）を担保している。混合率はSAFの種類によって異なるが、現在は最大50％まで認められており、混合率及びASTM D7566の規定を満たしていれば、従来の航空燃料

（ASTM D1655）と同等として扱うことができる。

CEFはICAOが掲げるCORSIA（Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation 国際航空のためのカーボン・オフセット及び削減スキーム）におけるGHG削減効果がある燃料であることを示す規格である（図３）。つまり、SAFとしてASTMで使用が認められていても、CEFの認証がなければGHG削減効果は認められないということである。CEFの認証には原料の生産から燃料として消費されるまでのGHGのライフサイクル排出量を決定することが必要になる。

表１　ASTM D7566 認証 SAF 一覧

ANNEX No.	名称	原料	混合率上限[%]
A1	FT-SPK	合成ガス	50
A2	HEFA-SPK	廃食油、植物油	50
A3	SIP	バイオマス糖	10
A4	SPK/A	非石油由来芳香族	50
A5	ATJ-SPK	アルコール	50
A6	CHJ	廃食油、動物性油脂	50
A7	HC-HEFA	藻類	10
A8	ATJ-SKA	アルコール	50

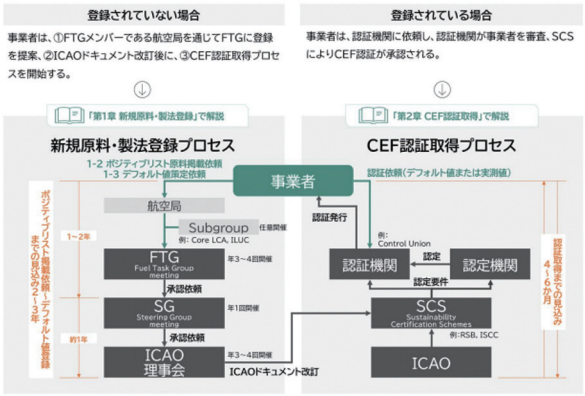


図３　CEF 認証取得にむけたプロセス[8]

3.2　SAFの物性

SAFは燃焼性や燃焼した際のエネルギーなど、従来の航空燃料と同等である部分が多いが、一部物性が異なっている。例として、エラストマの膨潤に影響する芳香族の含有量や静電容量式の燃料容量計の精度に影響する誘電率、燃料ポンプの寿命に影響する潤滑性、燃料の気化によるベーパー・ロックに影響する蒸気圧などが挙げられる[9]。本項では、燃料系統に多く使用されているエラストマに影響を及ぼす芳香族について、詳細に述べる。

従来の航空燃料成分は大きく分けてパラフィン、シクロパラフィン及び芳香族の3つで構成されているが、ASTM D7566 Annex 2 HEFA（Hydro-processed Esters and Fatty Acids）をはじめとして、芳香族の含有量が少ないSAFがある。芳香族は燃焼性が悪く、燃焼後の飛行機雲の形成にかかわるものであり、燃焼の観点からは含有量が少ないほど良いとされている[10]。一方、芳香族は機体の燃料系統で使用されるOリングの膨張やセルフシーリング・タンク（被弾した際、燃料タンク壁のゴムが燃料を吸収して膨潤し、穴を塞ぐ機能を持った燃料タンク）などの膨潤に強い関係があることが知られている[11]。そのため、既存の設備や機体などに芳香族の含有量が少ないSAFを適用した場合、従来の航空燃料と比べ、Oリングが膨張せず、配管等の継手部から燃料漏れが発生するリスクが高まる他、燃料タンクのセルフシーリングの機能が喪失する可能性も考えられる。

4．SAFを用いた浸漬試験及び飛行試験

これまで述べてきた世界的なSAFの動向を受け、航空宇宙カンパニーにおいても既存機へのSAF適用に向けた検討を開始した。ASTMの規定内のSAFの混合率であれば、従来燃料と同等として航空機に適用できるが、前述の通り、SAFの物性が一部異なるため、まずは、SAFの芳香族含有量によるOリングの膨張への影響を把握することを目的に、Oリング浸漬試験を実施した。また、ASTMの規定に基づき、社有機である205Bでの飛行試験を実施した。それぞれの試験結果を本項にて報告する。

4.1　Oリング浸漬試験

航空機の燃料系統に使用されているOリングをSAFと従来燃料の混合率の異なる燃料にそれぞれ浸漬し、膨張率を観察した。浸漬試験に使用したSAFは、芳香族の有無による膨張差を明確にするため、芳香族が含まれていないSAFと芳香族が含まれているSAFの2種類を用意した。また、供試体のOリングは、航空機の燃料系統で使用されているものを材料別にA～Dの4種類として試験を実施した。

芳香族が含まれているSAFに浸漬した結果を図４に、芳香族が含まれていないSAFに浸漬した結果を図５に示す。図４の芳香族を含有しているSAFでのOリング浸漬試験の結果は、SAFの混合率に関わらず、ほぼ一定であり、従来燃料との膨張率の差もないことから100％ SAFでの燃料漏えいのリスクが低いことがわかった。また、Oリングの材料においても、膨張しやすさに傾向があり、材料A＞B＞C＞Dの順番で平均膨張率が高い結果となった。

一方、図５の芳香族が含まれていないSAFでのOリング浸漬試験の結果は、SAFの混合率が増加する

につれて、材料A及びBのOリングの膨張率が減少しており、材料A及びBは芳香族の含有量によって膨張がかなり左右されることがわかった。また、材料C及びDの膨張率はほぼ変化がないため、膨張に対する芳香族の影響は低い材料であることが伺える。このことから、芳香族を含有していないSAFを適用した場合の燃料漏えいのリスクを低減するための1つの手法として、Oリングの材質を材料C及びDのような芳香族による膨張の影響を受けにくい材料に替えることで対応できる可能性があることが本浸漬試験で確認できた。

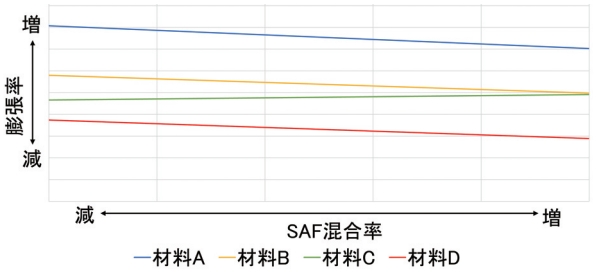


図4　Oリング膨張率（芳香族を含むSAF）

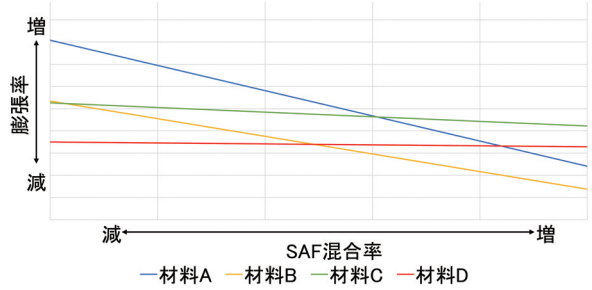


図5　Oリング膨張率（芳香族を含まないSAF）

4.2　富士ベル式205B機体試験

Oリング浸漬試験の結果に基づき、従来の航空燃料とSAFを混合し、社有機である富士ベル式205Bに給油して、地上試験及び飛行試験を行った（図6）。地上試験後、SAFによる燃料系統への影響を観察するため、燃料の漏えい試験を実施したところ、燃料の漏えいは見られなかった。地上試験及び飛行試験では、燃料が影響する項目を試験し、従来の航空燃料と同等の性能が発揮できることを確認できた。

図6　富士ベル式205B　SAFによる試験飛行の様子

5．まとめ

既存航空機へのSAFの適用を見据え、SAFによる燃料系統への影響を明らかにするべく、Oリング浸漬試験及び社有機205Bを用いた試験を実施した。Oリング浸漬試験では、芳香族を含有していないSAFの混合率が増加すると、特定材料のOリングの膨張に影響することを確認できた。また、従来の航空燃料とSAFを混合した燃料を航空機に給油して、飛行試験を行い、既存の航空燃料と同等の性能を発揮できることが確認できた。今後もSAFを適用した際の技術的課題に取り組んでいくとともに、SAFでの飛行実績を積み上げていく。

参考文献

(1) 国土交通省：航空機運航分野におけるCO2削減に関する検討会　第1回 資料2-1　検討会資料、https://www.mlit.go.jp/common/001395880.pdf(2024-6-28)

(2) International Civil Aviation Organization (ICAO): News Releases, States adopt net-zero 2050 global aspirational goal for international flight operations、https://www.icao.int/Newsroom/Pages/States-adopts-netzero-2050-aspirational-goal-for-international-flight-operations.aspx(2024-6-28)

(3) International Civil Aviation Organization (ICAO) Committee on Aviation Environmental Protection(CAEP)：REPORT ON THE FEASIBILITY OF A LONG-TERM ASPIRATIONAL GOAL (LTAG) FOR INTERNATIONAL CIVIL AVIATION CO2 EMISSION REDUCTIONS(2022)

(4) 令和4年法律第62号：2022、航空脱炭素化推進基本方針

(5) 経済産業省：第2回　持続可能な航空燃料（SAF）の導入促進に向けた官民協議会　資料6事務局（国土交通省）提出資料、https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/saf/pdf/002_06_00.pdf(2024-6-28)

(6) ASTM D7566: 2024、Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons

(7) International Civil Aviation Organization (ICAO)：CORSIA Eligibility Framework and Requirements for Sustainability Certification Schemes、1st Edition(2019)

(8) 国土交通省航空局カーボンニュートラル推進室：CORSIA 適格燃料登録・認証取得ガイド、第二版(2024)
(9) Robert Andrejczyk: Implications of Sustainable Aviation Fuel for the Rotorcraft Industry, Vertical Flight Society(2023)
(10) Holladay Johnathan: Sustainable Aviation Fuel: Review of Technical Pathways(2020)
(11) John l. Graham: Final Report for Alternative Fuels Task: Impact of SPK Fuels and Fuel Blends on Non-metallic Materials used in Commercial Aircraft Fuel Systems(2013)

【著　者】

中村　寛俊

小川　俊哉

上田　浩司

SUBARU「ボーイング777」製造及び出荷30周年を迎えて

2023年8月7日

2023 年8 月3 日に航空宇宙カンパニー宇都宮製作所(栃木県宇都宮市)、8 月7 日に同半田工場(愛知県半田市)において、「ボーイング777」製造および出荷30 周年記念式典を執り行いました。 当社は、1973 年にボーイング社の旅客機生産事業に参画して以来、50 年にわたり主要パートナーとして良好な関係を継続しています。

宇都宮式典

半田式典で展示された中央翼

空飛ぶクルマの実証研究について

Flight Demonstration Research of eVTOL（Flying Car Technology）

岡田悟史[*1] OKADA Satoshi
高谷亮太[*2] TAKAYA Ryota
岩本智文[*2] IWAMOTO Tomofumi
小谷和彰[*3] KOTANI Kazuaki
横田篤[*3] YOKOTA Atsushi

抄　録

電動化の波は自動車だけでなく、航空機の未来をも変える可能性がある。モビリティの大変革期と言われる時代において、SUBARUはSUBARUらしい価値を提供し続けられるのか。“価値づくり”は新たな発想から始まる。SUBARUは自動車と航空を持つ稀有な存在であるからこそ、独自の視点で皆がワクワクするようなモビリティを創造し、果敢に技術革新に挑戦できるのではないか。そんな思いから、“空飛ぶクルマ”の活動はスタートした。

今回、SUBARU の“空飛ぶクルマ”活動の位置づけや、技術開発の一部について紹介する。

Abstract

The wave of electrification has the potential to change not only the future of cars, but also that of aviation. In an era of great changes in mobility, will SUBARU be able to keep providing its unique value? “Value creation” begins with new ideas. SUBARU is a rare entity with both automobiles and aviation businesses, which is why it can create exciting mobility from a unique perspective and boldly take on the challenge of technological innovation. With this idea in mind, the “Flying Car” project has started.

This time, we will introduce the position of SUBARU's “Flying Car” activities and some aspects of its technological development.

1．まえがき

2023年度のジャパンモビリティショーにおいてSUBARUブースに展示された空飛ぶクルマ。SUBARUが目指す、「より自由な移動」の未来を示したコンセプトモデルとして発表した。

“空飛ぶクルマ”とは、必ずしも道路を走行する機能を有する乗り物を指すのではなく、身近で手軽な空の移動手段を表す言葉である。航空機の電動化、自律化技術の進展により、“空の移動の大衆化（空の移動革命）”を実現する新たなモビリティへの期待が高まっている。

空飛ぶクルマの特徴は３つ、「電動」「垂直離着陸」「自動」である。電気を動力源として、垂直に離着陸し、遠隔操縦や自動制御によって飛行できる乗り物であり、政府の定義では「電動垂直離着陸型無操縦者航空機」、諸外国ではeVTOL（Electric Vertical Take-off and Landing Aircraft）　や AAM（Advanced Air Mobility）などと呼ばれている。限定されたスペースでも離着陸できる利便性や、コストや環境面でのメリットが期待されている。

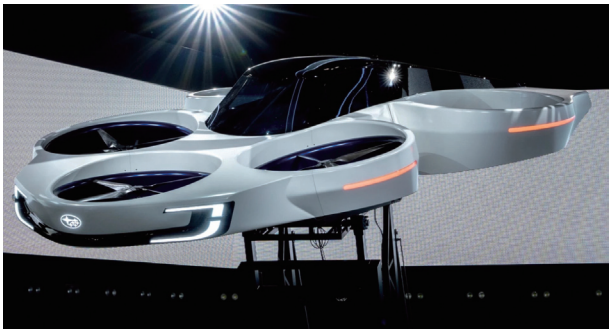


図１　SUBARU　AIR MOBIRITY CONCEPT

一方で機体の安全性や運航に関する法整備、離着陸

＊１ カンパニー企画部
＊２ 航空宇宙技術開発部
＊３ 基盤技術部

場などのインフラ整備の面でまだまだ課題は多くあり、国内では2018年に“空の移動革命に向けた官民協議会”が設置され、空飛ぶクルマに関する制度整備などについて、官民一体となって検討を進めている。

2．SUBARUの取り組み

SUBARUも官民協議会に設立当初から参加しており、第２回官民協議会においてSUBARUの取り組みステップを公表した(図2)。SUBARUの立ち位置は現在【STEP-1】におり、将来の市場参画機会をとらえるための準備として先行技術開発や技術実証に取り組んでいる段階である。

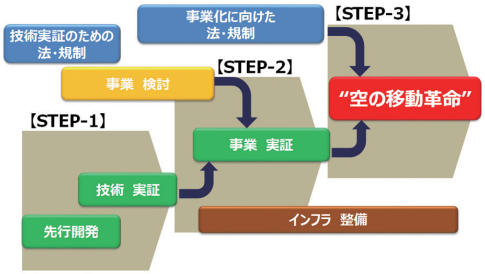


図2　SUBARUの取り組みステップ

空飛ぶクルマは従来にない新しいカテゴリーの航空機であるが、航空機である以上は安全が第一でなければならない。技術的な実現性だけでなく、社会受容性の獲得も重要であり、一歩一歩着実に取り組んでいる。

3．飛行実証機の開発について

そんな中、SUBARUでは人が乗れる大きさの飛行実証機の開発を計画した。技術実証の目的はeVTOLの中核技術である電動推進系統の設計技術(ロータ、モータ、バッテリ)及び複数のロータを搭載した機体の飛行制御技術の獲得である。そのため機体は最もシンプルなマルチロータ形態(翼は無く揚力はロータのみで発生し、ロータ軸の可動機構等も無しの形態)とした。

また、将来的な運用を見据え、回転部保護のダクトを有し、2名が搭乗できる室内空間を確保した上で垂直離着陸が可能なことを最低限の要件として開発した。技術実証に直接関わらない外観部分はワクワク感を重視し、“空飛ぶクルマ”をイメージしたデザインとした。今回開発した飛行実証機を図3に示す。

本資では、電動推進系統の設計概要として、ロータ設計(4章)及び電動システム(モータ、バッテリ)設計(5章)について紹介するとともに、短期間で飛行実証を実現した取り組み及び飛行実証(6章)についても紹介する。

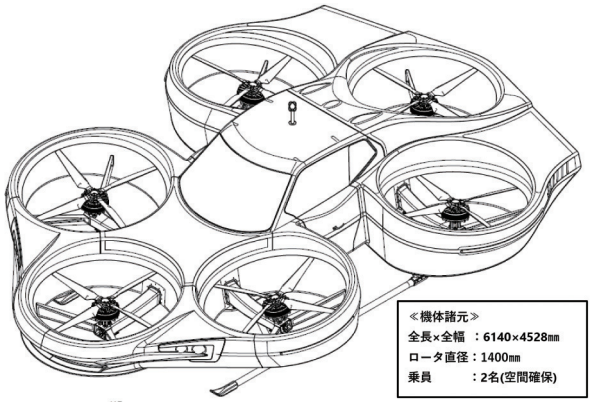


図3　飛行実証機

4．ロータ設計

本章では機体設計点の選択の概要とそれを実現する主要要素の一つであるロータ及びダクトの設計について紹介する。

4.1　コンパクト&高効率

機体サイジングにおける重要なパラメタの一つに、ディスクローディング(DL)がある。DLはロータの単位面積当たりの推力であり、図4に示す通りDLを大きくすると同じ推力を得る際にロータ面積が小さくなりコンパクトな機体となるが、大きな出力が必要となり効率が低下する[(1)]。一方で、DLを小さくするとロータ面積を確保するため、機体サイズが大きくなる。また、回転数により推力を制御する場合、面積確保のためロータ径を大きくすると推力制御の応答性が低下する。そのため、世の中において早期に飛行を達成している機体は、DLが小さい小径のロータを複数搭載することで、応答性と効率を両立させている。

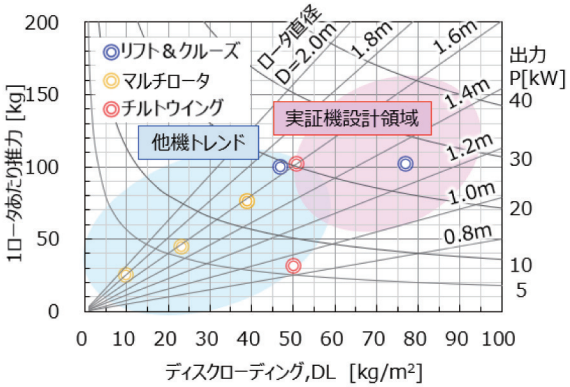


図4　DL他機トレンド及び飛行実証機設計領域

これはサイズを小さくしても高い効率が維持できるというモータの特性を活かしたレイアウトであるが、小径ロータを複数配置すると機体形状が複雑となることに加え、一般的なヘリコプタのような単一ロータと同じロータ面積を確保するためには、機体のフットプ

リントは更に大きくなってしまう。

将来的な都市部等での運用を考えると、機体サイズは重要な要素であると考えられるため、本飛行実証機では、高DLとなる機体の設計成立性検証を１つのテーマとして、世の中の機体の約2倍程度のDLとなる範囲を設計領域とした(図4)。

ここでは詳細を割愛するが、高DLの機体を実現するためには、4.2項に示すロータ及びダクト、5章に示すバッテリ及び電動モータシステムの特性及び性能を加味して、適切な設計点を選択することが重要となる。特に、5章の電動システムの質量は電動VTOL機の質量構成の大部分を占めるため、初期サイジングにおいて、システム電圧、モータ特性、最大回転数等の主要パラメタに関して、必要な推力重量比が実現可能となる領域の見極めが必要となる。

4.2　ロータ&ダクト形状設計

飛行実証機においては、回転部保護の観点よりダクトを搭載するレイアウトを採用するが、ダクトは表面積が大きいことに加えて、高速回転するロータの近傍に配置するため剛性の要求が厳しく、その結果質量が大きくなるデメリットがある。一方で、適切な形状設計を行うことでロータにより誘起される流れにより、ダクトが発生する推力が期待できることに加えて、ロータ翼端流れとダクトの干渉効果により、ロータ効率を改善させることができる[(2)]。飛行実証機の設計においては、図5に示すようにダクト形状およびロータ形状を定義する代表的なパラメタを変更した感度解析を実施することで、設計目標とした効率を達成可能な各パラメタの組み合わせの探索を行い、形状を設定した。ロータ及びダクトの性能評価においては、非定常CFD解析を適用することで、高精度にロータ性能を見積もることが可能となり、効率、推力ともに目標値を達成した(図6)。

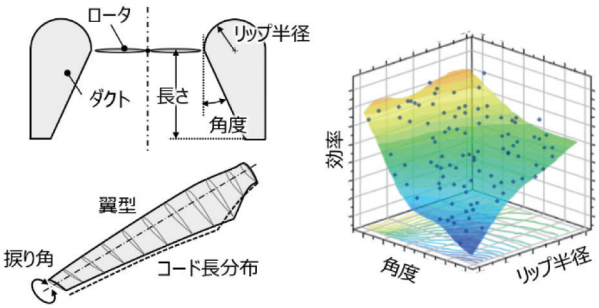


図5　ロータ及びダクト設定

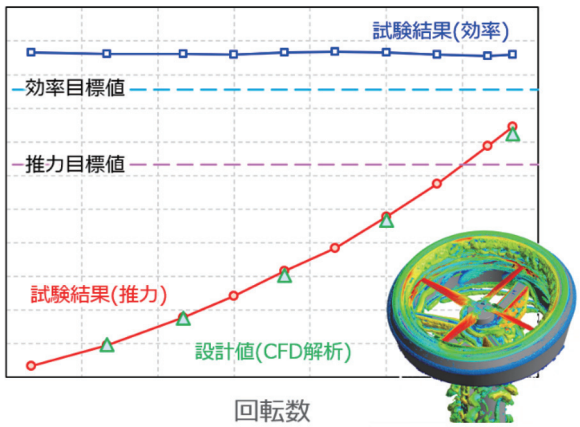


図6　推力試験結果

5．電動システム設計

今回の飛行実証機は、ホバリングするために必要とする総電力が180kW程度であり、各送電ラインに流れる電流量の制限を考慮し、推進用バッテリの最大電圧を403VDC(リチウムイオン電池96直列)とした。これは、航空で主に扱っている28VDCからの大幅なジャンプアップであり、新しいチャレンジであった。

なお、今回の飛行実証機に限らず、航空におけるシステムの電動化、推進源の電動化の流れの中で、機体必要電力エネルギーが拡大、それに伴い電圧も上昇していく傾向にある(図7)。今後、高電圧化に対応した設計を行う機会はますます増加するものと考えられる。

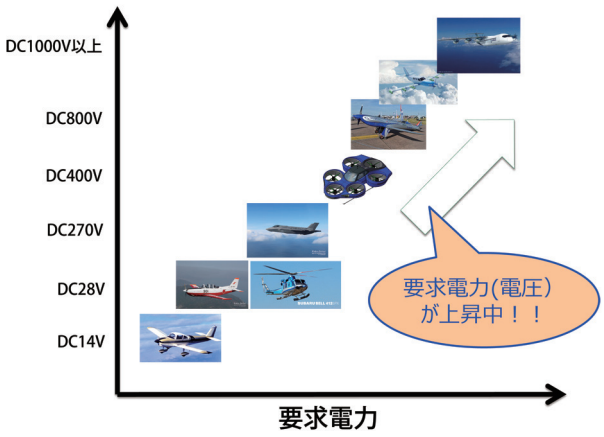


図7　設計領域

5.1　ハイパワーと軽量化の両立

高電圧化への期待に対して、バッテリのエネルギー密度は化石燃料に比べて低く、飛行実証機においても機体重量の30%近くをバッテリ重量が占めた。一方、バッテリは現行の能力では、容量一辺倒というわけにはいかず、離陸時や故障時に瞬時の出力も必要なため、出力密度とエネルギー密度のバランスを考量したバッテリが必要であった。

飛行実証機では、機体サイジングを繰り返し行い、エネルギー密度160Wh/kg、出力密度6500W/kg（非強制空冷のため3000W/kg程度に絞り使用）のバッテリセルを用いることで、瞬時の出力と機体重量の成立解を導き出した。

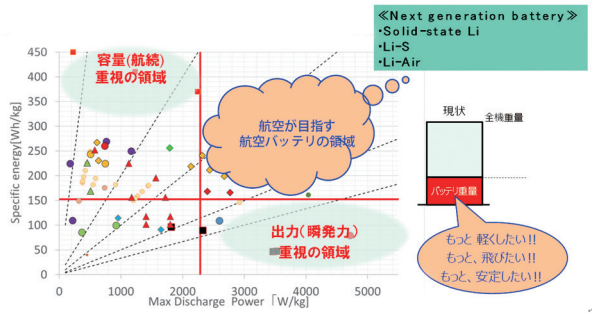


図8　航空が求めるバッテリ

5.2　バッテリ及び電動モータシステムの特性

マルチロータ形態の電動システムの特徴は、従来の航空機では推力はエンジン、姿勢制御は舵面と各々の機器が担っているのに対し、推力と姿勢制御の両方をモータ出力が担うことである。そのため、バッテリのSOC変化やモータの作動状況（消費電流）により電圧が変動、その影響で時々刻々と変化するモータ特性を飛行制御にて考慮、反映する必要がある。

上記課題を解決するため、宇都宮製作所本工場敷地内に電動推進実験場を設置、バッテリとモータシステムの特性把握を目的とした大小合わせて100を超える試験ケースを実施した。

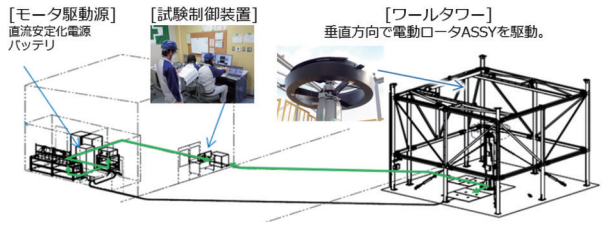


図9　電動推進実験場（ワールタワー）

5.3　安全への課題

推進源の電力化に従い、機体へのバッテリ搭載量が増加、飛行実証機においても、航空機電動化の未来に向けての一歩として、本項に示す安全に対する検討を実施した。いずれも、航空法で求める機体型式認証基準を満足するところまでは至っていないが、今後も引き続きこれらの課題に対応していく。

5.3.1　バッテリボックス圧壊予防設計

飛行実証機では、シミュレーション等を活用して、スキッド等の機体構造が衝撃を吸収する設計とした。これにより、バッテリボックスの変形を防ぎバッテリセルの内部短絡による熱暴走が発生しないようにした。

なお、機体型式認証基準では、さらに厳しく、バッテリボックス単体で15m落下に耐えることが要求されているため、軽量化と合わせて更なる工夫が必要と考えている。

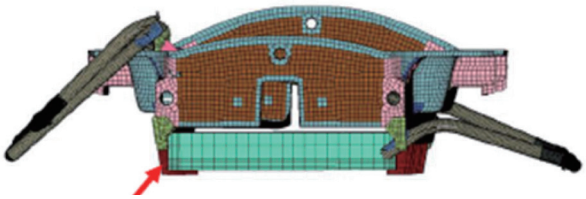


図10　落着シミュレーション

5.3.2　熱暴走対策

機体型式認証基準では、バッテリボックス内で一定範囲以上の熱暴走が発生したとしても、乗員の安全を確保するため、乗員から有害物質を隔離し避難する時間を確保することが要求されている。

飛行実証機は、まずは無人かつ限られた空域で飛行を行う計画としていたため、機体内での有害物質の分離等の対策は実施しなかったが、使用するバッテリセルの熱暴走試験（釘さし試験）の実施による状況把握や、熱暴走発生時の消火対応としての消火シートの活用検討など、将来に向けた知見の獲得も行った。

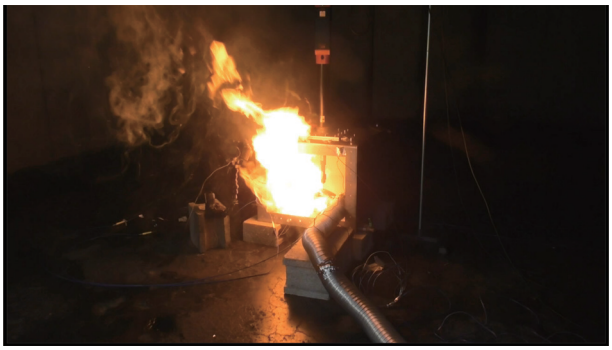


図11　熱暴走試験

6．飛行実証

6.1　実験環境の構築

飛行実証機の製作を含む実証実験の環境構築においては、短期間での飛行実証実現を目的にさまざまな手法を取り入れた。

アビオニクスは自動車試作技術を最大限活用。CAN通信プラットフォームをベースとし、自動車

開発で利用されているHILS（Hardware In the Loop Simulator）を使用したシステム検証を実施した。また機体を管制するための通信は、既存の携帯電話回線とクラウドを活用した遠隔無線通信を行うことにより、開発のコストと手間を省いた。

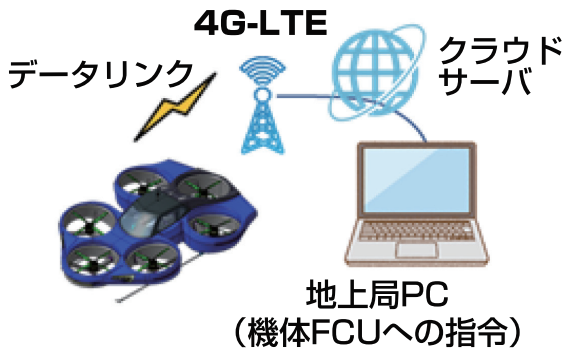


図12　通信システム

飛行制御については、ロータ配置はもちろんロータ傾斜、回転方向に応じて、4軸がトリム状態となるように独自に設計を行った。

機体の製作にあたっては、複合材一体成形の手法や、3Dプリンタを活用した部品製作など、敏速な試作を実現すると同時に構造重量低減を実現した。

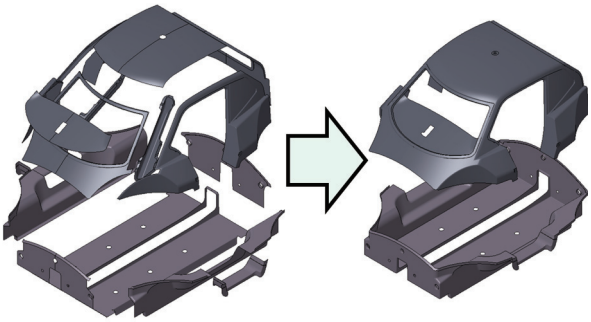


図13　一体成型

電動システムの設計開発においては、自動車部門と技術／人材交流をおこない、自動車部門のもつ高電圧システムに関する知見を学び、航空特有の使用条件に適応したシステムインテグレーションに応用した。また、飛行実証実験では、自動車部門の高電圧システムの取り扱いなどの実務知識を活用し、安全な試験の実施につなげた。

6.2　安全性の確認

着陸装置は着地時の衝撃を確実に吸収するためスキッド方式を選択した。設計段階では脚部の強度評価を中心とした落下シミュレーション解析により、着陸時にキャビン内の安全が確保されること、装備品に過大な荷重負荷がないことを確認。実際に機体各部にセンサを配置した落下試験を実施し、データを取得した（図14、図15）。

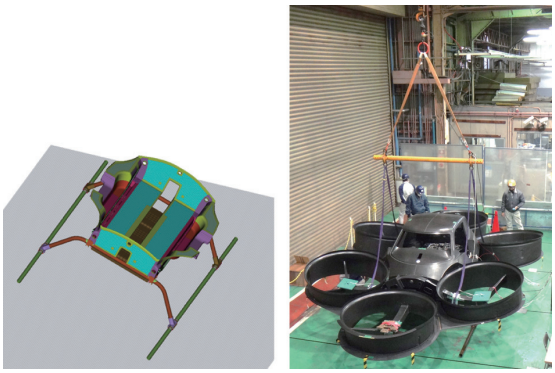


図14　落下シミュレーション及び落下試験

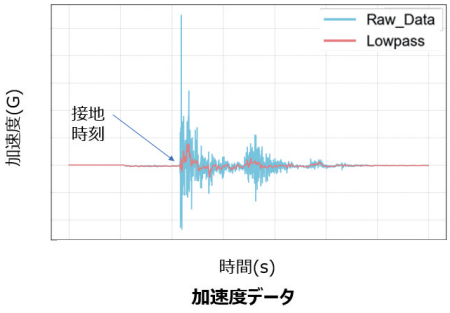


図15　落下試験によるデータ取得

また、緊急停止手段は複数の機器から異なる通信方法で可能となるように、システム構成や飛行制御を工夫した。

6.3　飛行試験

飛行実証機の開発をスタートしてから2年弱の期間を経て飛行実証機が完成した。その後、地上での技術確認試験（強度試験、HILS試験、振動／構造連成試験、電磁適合性確認試験、タイダウン試験など）をステップアップで実施したのち、飛行試験に臨んだ。

飛行試験はスバル研究実験センターの敷地内で実施した。飛行実証機は自動制御により、高度約15mまで垂直上昇し、必要な推力が出ていること、安定した飛行ができることを実証することができた。

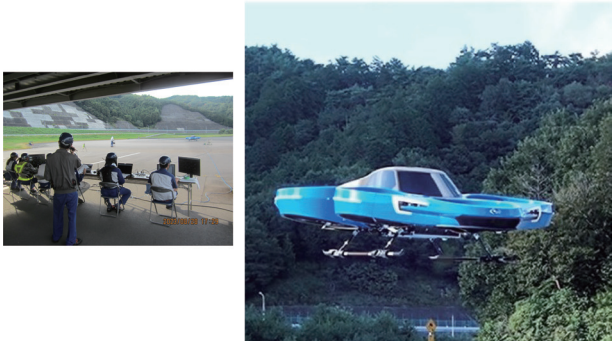


図16　飛行試験

7．まとめ

飛行実証機が浮揚した瞬間、それは新たなモビリティの実現に向けた第一歩となった。クルマのように身近に感じられる乗り物が空を飛ぶという実感を味わうことができた。自動車と航空機ではモビリティの領域は違うが、技術は共通な部分も多く、お互いの強みをあわせれば新しい挑戦ができることを証明できた。自動車と航空のコラボ活動のさらなる広がりが、これからのSUBARUの新たな価値づくりにつながると信じている。

本研究ではこれまでのやり方、既成概念を捨て、全員が失敗を恐れずに新しいやり方にチャレンジした。結果、従来にない短期開発を実現できたこと、そしてそこに技術者の大きな成長が見られたことが、本研究の一番の成果ともいえる。

参考文献

(1) Christopher A. Snyder, “More / All Electric Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Vehicle Sensitivities to Propulsion and Power Performance,” AHS Specialists’ Vertical Flight Society’s 76th Annual Forum & Technology Display, Virginia Beach, VA, 2020.
(2) 山名正夫：VTOLとSTOL、日本航空学会誌, 9, 91 (1961), pp. 255-269.

【著　者】

岡田　悟史

高谷　亮太

岩本　智文

小谷　和彰

横田　篤

海上保安庁より「SUBARU BELL 412EPX」を２機追加受注

2024年5月27日

本受注により、海上保安庁からのSUBARU BELL 412EPXの受注機数は累計６機となりました。これら機体は、海上における治安の確保、海難救助、海上災害対策などに従事し、被災地への物資輸送などでの活躍が見込まれます。

SUBARU BELL 412EPX

ヘリコプター動力伝達部品へのレーザピーニング適用

Application of Laser Peening to Power Transmission Parts of Helicopter

大澤知将[*1] OOSAWA Tomomasa
武藤雅彦[*2] MUTOU Masahiko
谷嶋真一[*1] YAJIMA Shinichi
中村尚人[*1] NAKAMURA Naoto
白井龍汰[*3] SHIRAI Ryota
小熊至智[*3] OGUMA Yoshitomo

抄　録

民間向けの新多用途ヘリコプターである「SUBARU BELL 412EPX」及び防衛省向けの新多用途ヘリコプターである「UH-2」の開発において、従来型より飛行能力向上を実現するべく、レーザピーニング技術を開発した。本技術をヘリコプターの動力伝達部品に適用することにより、従来型機体と部品サイズの変更、及び重量増加無く、部品の疲労強度を向上させることが出来る。本稿では、従来技術とレーザピーニングの基本原理、ヘリコプター動力伝達部品への適用と課題への対応について述べる。

Abstract

Laser peening technology was developed for the new multi-purpose helicopters, “SUBARU BELL 412EPX” for commercial use and “UH-2” for the Ministry of Defense. This technology was developed to improve flight performance over the previous models. By applying this technology to the power transmission parts, the parts’ fatigue strength can be enhanced without changing their size and weight. This article describes the basic principles of the existing technology and laser peening, application of laser peening to the parts, and the approaches to problem-solving.

1．まえがき

高い性能と安全性が求められる航空機は、部品ひとつにおいても軽量、かつ高い信頼性という相反する性能を求められる。その中でもヘリコプターは、エンジンから出力された動力をメインロータとテイルロータに伝達させることで飛行を可能とするため、動力伝達部品の損傷は、即飛行安全を脅かすものとなる。高速で繰り返し負荷が加わることから、ヘリコプターの動力伝達部品は疲労寿命を向上させることが必要不可欠である。疲労寿命改善の手段として、レーザピーニング技術を、民間向けの多用途ヘリコプター「SUBARU BELL 412EPX」及び防衛省向けの多用途ヘリコプターである「UH-2」の動力伝達部品に適用し、重量増加なく飛行性能の向上を可能とした。本稿では、従来技術とレーザピーニングの基本原理、ヘリコプター動力伝達部品への適用、適用効果と新たな課題への対応について紹介する。

＊1 基盤技術部
＊2 ヘリコプター技術部
＊3 事業計画部

2．従来技術とレーザピーニングの基本原理

2.1　部品疲労寿命の改善方法と従来技術

金属部品の疲労寿命を改善する手法として、表面に圧縮残留応力を付与することで、材質の変更なく疲労亀裂の発生を遅らせる方法がある。この圧縮残留応力は部品に引張応力が作用した際に、疲労亀裂の主な発生原因である部品表面の引張応力を緩和するように作用するため、部品の疲労寿命を向上させることが可能となる。圧縮残留応力を付与する一手法として、従来からショットピーニング(Shot Peening:以下SP)という技術が用いられてきた。レーザピーニング(Laser Peening:以下LP)の基本原理を理解するうえで、比較として以下にSPの基本原理を示す。SPは冷間加工の一種で、小さな鋼球を金属部品の表面に遠心力で投射、

あるいは高圧エアの圧送により高速で衝突させ、部品表面に圧縮残留応力層を形成する加工方法である。SPの基本原理の概略を図1に示す。

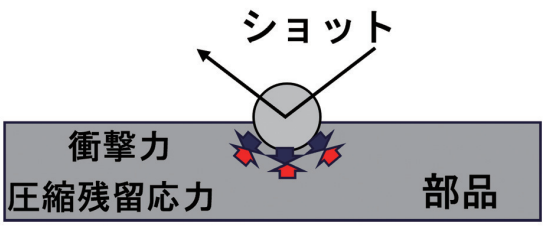


図1　SP基本原理

2.2　レーザピーニングの基本原理

次にLPの基本原理の概略を図2に示す。レーザ発振器から出たビームをレンズで集光させると、焦点付近では高いエネルギー密度になる。この高密度のビームが金属表面に照射されると、照射点の金属に衝撃波を伴うプラズマが発生する。発生したプラズマは膨張しようとするが、ここに透明体(水やガラス)を形成すると、透明体の質量が反力となることで衝撃波を効率的に部品に伝えることができる。この衝撃波が金属表層部に塑性変形を生じ、圧縮残留応力が付与される。

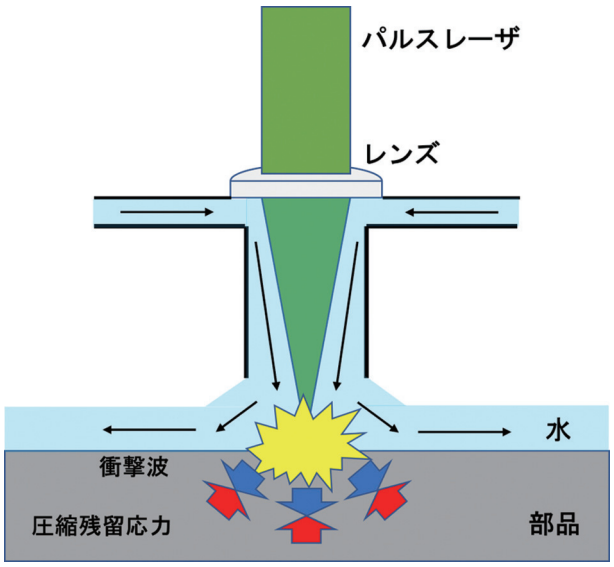


図2　LP基本原理

2.3　ショットピーニングとの比較

LPとSPの違いは材料表層を塑性変形させるエネルギーの大きさであり、LPはSPに比べてエネルギーが高いため、より深いところまで圧縮残留応力が付与される[(1)]。これにより、LPはSPよりも疲労寿命が改善される。この特徴から、高い安全性が求められる市場(航空産業や原子力産業等)で実用化が進んでいる。航空産業ではジェットエンジンのタービンブレード等へ適用が知られている[(2)]。図3に、当社で比較評価したLPの疲労試験の結果を示す。従来のSP施工と比較して、LPを施した場合は数倍から数十倍の疲労寿命改善効果が示されている。また、SPがショットを吹き付ける処理であるのに対し、LPはレーザの照射点を緻密に制御できる。そのためSPと比べて正確な位置にピーニングでき、付与する応力のバラツキを抑えることが可能となる。図4に実際の製品施工の様子を示す。

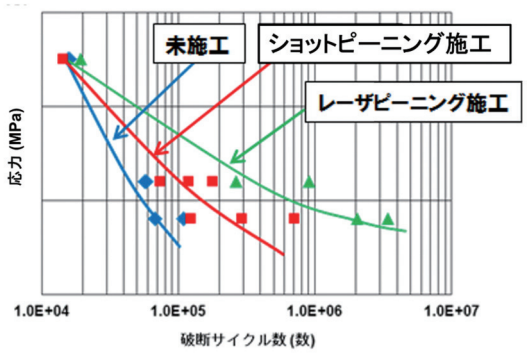


図3　疲労試験結果の比較

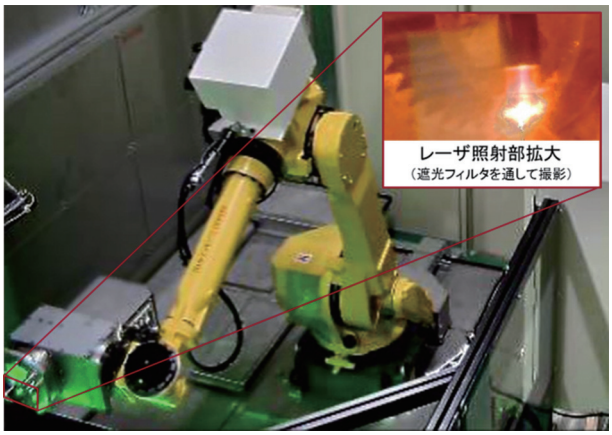


図4　動力伝達部品へのLP施工

3．動力伝達部品への適用

3.1　レーザピーニング適用部品

標準的なヘリコプターは、エンジンから出力された動力をメインローターギアボックスで所定の回転数に変速し、その回転をメインロータとテイルロータに伝達させることで飛行を可能とする。動力伝達部品にはスプライン形状の歯面同士を噛み合わせる部品があり、それらの歯元・歯面は機体の離着陸、機動により複雑で大きな繰り返し荷重にさらされる。したがって動力伝達部品の疲労寿命を向上させることが機体の信頼性向上、性能向上につながる。このような背景から、LPをヘリコプターのメインロータハブ-マスト結合部の動力伝達部(スプライン形状)に適用した。適用部品の概略機体取付部位を図5および図6に示す。

図５　機体における適用部位

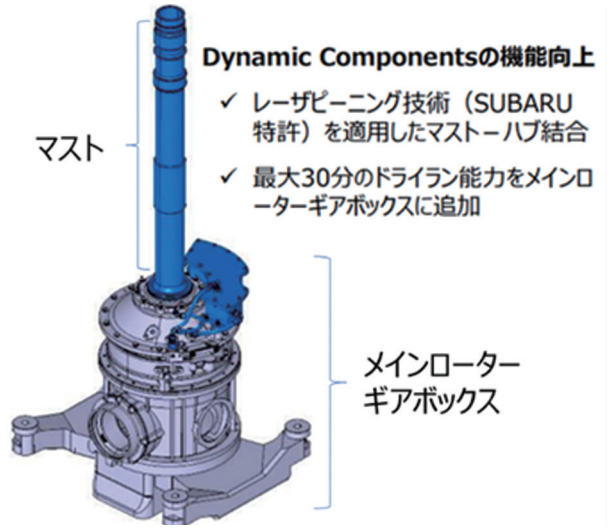


図６　メインローターギアボックスとマスト

3.2　適用に際しての課題

代表的な動力伝達部品を図7に示す。適用に際しては、部品に合わせた処理設備と治具を含めた工程開発が必要であった。すなわち、部品形状やサイズ、重量に応じたレーザ照射精度を確保し、スプライン歯面に対しある一定の照射距離と照射角度でレーザを照射できるシステムの構築と、非照射範囲を保護する治具の開発である。この開発の課題は「スプライン歯面のような複雑形状に要求される応力を付与すること」になるが、この課題は以下の4つ小課題に分類することができる。

① レーザ照射条件の設定
② レーザ照射ノズルの開発
③ ワーク駆動システムの開発
④ ワークを保護する治具の開発

これらの小課題の設定には次のような背景がある。要求される応力を付与可能な条件が設定できることは当然ながら、レーザの走査機構には三次元方向への移動軸と角度調整用の回転軸が必要となる。そして内歯形状への施工に関してはレーザ照射ノズルが干渉しないようにコンパクトにしなければならない。加えてLP照射条件で決まるレーザ走査機構は、高い位置決め精度が要求される。複雑形状物へのピーニングを実現するために、本システムのレーザスポットは部品表面にて非常に小径になっており、ピーニングされていない面がないように、レーザスポットをラップさせる必要がある。そのため、1/100mmオーダーの位置決め精度が要求される。さらにスプライン形状に合わせた非照射範囲を保護するマスク治具を開発する必要があり、セット時に位置決めを容易でかつピーニングを阻害しない形状である必要があった。表1に適用課題をまとめる。

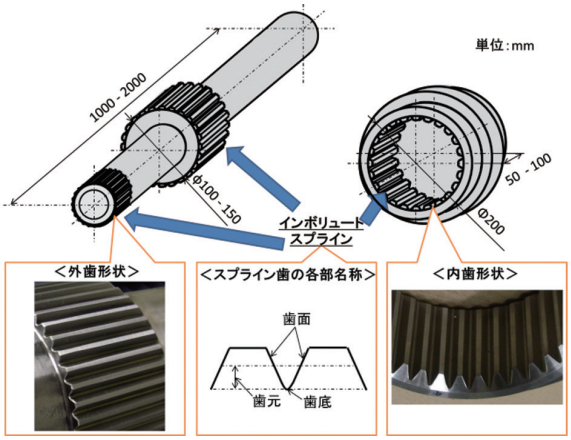


図７　代表的な動力伝達部品

表１　動力伝達部品への適用課題

課題	要求
①　レーザ照射条件	スプライン形状でショットピーニング以上の強度付与
②　レーザ照射ノズル	・レーザ照射ノズルと内歯形状の干渉
③　ワーク駆動システム	・スプライン等の複雑形状に合わせて照射距離（スポット径）を一定に維持しつつ、照射位置の精度を確保 ・スプライン歯面（内歯・外歯）に対する照射角度制御
④　マスク治具	・セット時に位置決めが容易 ・ピーニングを阻害しない

適用にあたっては表1に示すような要求を満足するための機能を実現する、治具を含めたLPシステムを構築した。3.3項ではレーザ照射条件の設定について述べ、3.4項ではLPシステムについて紹介する。

3.3　レーザ照射条件

ポイントとなるのは「1. 部品表面に照射されるビームのパワー密度(プラズマ発生量のコントロール)」と、「2. 発生したプラズマを部品表面に伝搬させる透明体」である。よってピーニングに用いる発振器の要件は、適度なプラズマを発生させる高いパワー密度のビームが得られ、部品への熱影響が最小である必要が

ある。そのため、短パルスレーザが適している。また、加工材料に効率よく吸収される波長の選定も重要である。参考として、図8に波長ごとの材料の吸収率を示す。

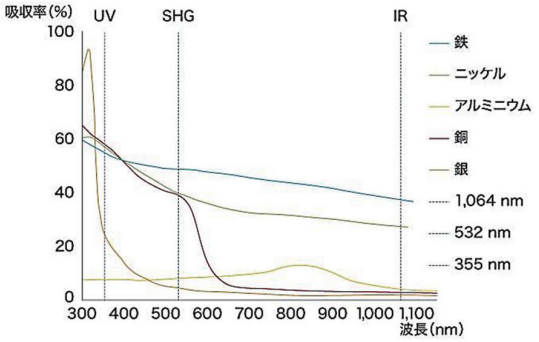


図８　波長ごとの材料の吸収率 (3)

LP適用部品は鉄系材料であるため、第二高調波(SHG ; グリーンレーザ)を選択した。パルス条件は設備検討当時入手可能だった、パルス幅 十数nsレベル、最大パルスエネルギー 数百mJ/pulseのパルス発振式固体YAGレーザを採用した。パワー密度はパルスエネルギー、スポット面積、パルス幅により規定される(4)。パルス幅はYAGレーザ等では発振器の固有値となるため、実運用上はパルスエネルギーとスポット面積、即ちエネルギー密度を調整することでピーニング強度をコントロールすることになる。よって光学条件は、部品表面で最適なスポット面積になるような条件を設定した。また透明体については水を用い、レーザ照射ノズル内部を通して部品表面に供給する方式とした。

3.4　レーザピーニングシステムの構築

上述のピーニングパラメータを実現する、LPシステムを構築した。LPシステムはレーザ発振器を含む光学伝送システムと、部品を照射点に位置決めするワーク駆動システム、そして透明体(水)を供給する水圧送装置から構成される。下記では光学伝送システムとワーク駆動システムについて紹介する。

3.4.1　レーザ照射ノズル

レーザ照射ノズルは図9に示すように、部品と干渉しないコンパクト設計となっている。

ノズルは、スプラインの歯面に一定照射距離と角度を維持しながら、ノズルと部品が干渉しないサイズに設定した。ノズル内部は集光レンズを設置したレーザの光路と、レーザを下向きに屈折させるためのプリズム、水を供給する水路から構成される。図10にノズルの概略図を示す。

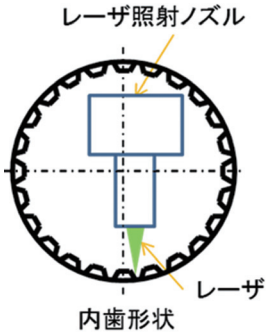


図９　レーザ照射ノズルと内歯形状の干渉

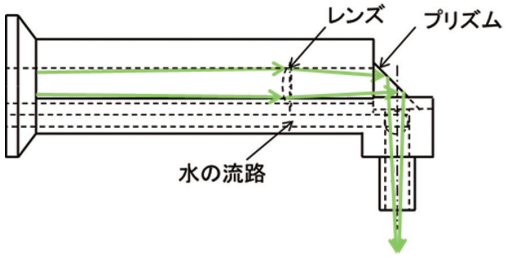


図 10　レーザ照射ノズル概略図

3.4.2　ワーク駆動システム

ワーク駆動システムは、光学系を駆動させる方式と固定する方式があるが、ハイパワー密度のパルスレーザを駆動(ファイバ伝送)する方法はコスト面とメンテナンス性の問題から、本システムでは光学系を固定する方式を採用した。光学系を固定する方式の利点は、複雑形状物の目標照射点に位置決めが容易にでき、ピーニング現象に直接的な影響を与える光線を固定でき、安定した水の流れを確保できるため、良好な施工品質を得ることができる。

対象となる動力伝達部品は大型 / 重量物から小型 / 軽量のものまで多品種にわたるため、それぞれに適した駆動系が必要となる。そこで装置の駆動系としては重量物を施工するためのNCテーブルと軽量物を施工するための多軸ロボットの2系統を用いた。

大型で重量のある部品はハンドリング容易化のためNCテーブルには位置決めやスプラインの位相出しの機構を設けることで、部品をテーブルにセットした後は機械が自動でセッティングをできるようにしている。ロボットは7軸目に回転軸を付与して、円筒面内も照射することが可能である。また、ATC(Auto Tool Changer)で異なる部品を自動交換する等今後の拡張性も持たせている。これら駆動システムの位置決め、繰り返し位置決め精度は、部品の要求精度と照射されるスポット径から設定した。ワーク駆動システムの概要を図11に示す。

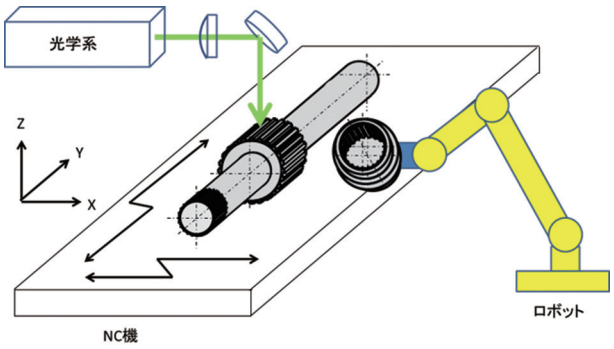


図 11　ワーク駆動システム概略図

3.4.3　マスク治具

レーザ照射範囲はスプラインの歯面と歯底で、スプライン面から外側が数mmの照射許容範囲を含む非照射範囲となる。レーザ照射範囲の模式図を図12に示す。この照射範囲の境界に沿った形状のマスク治具を開発する必要がある。この時に課題となるのが、セット時の位置決めとピーニングを阻害しない形状にすることである。図13に実際に製作したマスク治具とそのセット状態を示す。この治具は外歯形状部品に使用するマスク治具であるが、ワーク形状の都合で半割になっている。形状はマスクする側のスプラインと同じ形状にしている。そしてワークとの境界面だけでなく歯筋方向に長くその形状にしているのは、セット時にピンゲージを用いて位置決めを容易にするためである。また透明体である水の流れを阻害しないように、流路を確保する狙いもある。

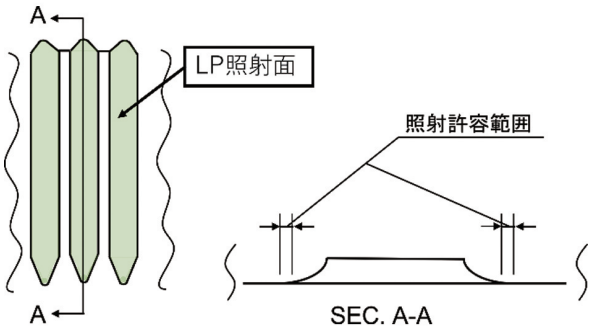


図 12　レーザ照射範囲

図 13　マスク治具

4．適用効果と新たな課題

4.1　適用効果と品質保証

部品毎に行うLPのピーニング強度保証はAMS2546[4]やSPの場合にならい、アルメンインテンシティとカバレージで行う。アルメンインテンシティの概念図を図14に示す。アルメンストリップの仕様はSAE J 442[5]を適用した。

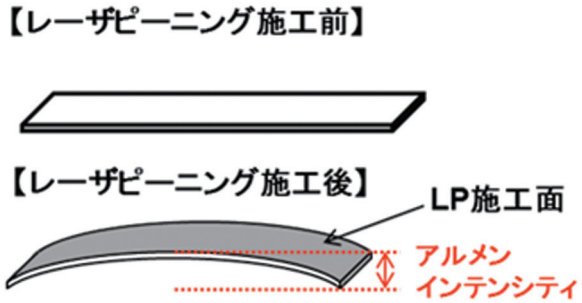


図 14　アルメンインテンシティ

一方アルメンインテンシティ値に対する残留応力値は、部品と同じ材質、調質のテストピースで事前に確認すると共に、残留応力値とアルメンインテンシティとの相関を把握しておくことでピーニング強度を保証する。図15に残留応力測定用テストピースを示す。残留応力値の測定は、ピーニング面を電解研磨しながら所定の深さを測定することで、深さ方向の残留応力プロファイルを取得し評価する。図16にテストピースの残留応力測定の様子を示す。測定はX線による cos α 法で実施した。図17にテストピースから取得した深さ方向の残留応力プロファイルを示す。一般的に機械加工された材料表面では引張り応力が入ることが多いが、LP照射後は材料表層付近で、ピーク値を示し、深くなるにつれて残留応力は減少する。

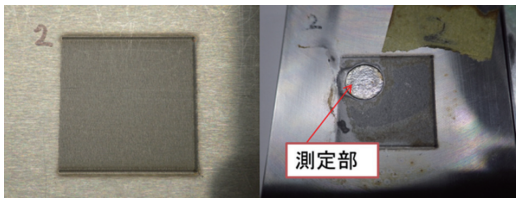


図 15　残留応力測定用テストピース

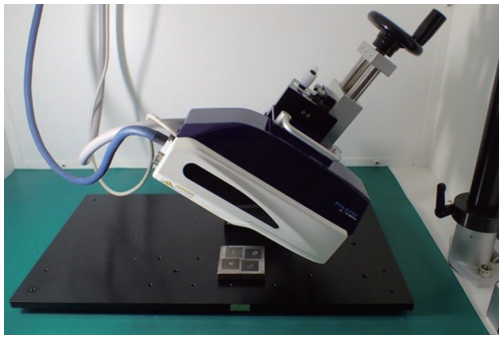


図 16　テストピースの応力測定

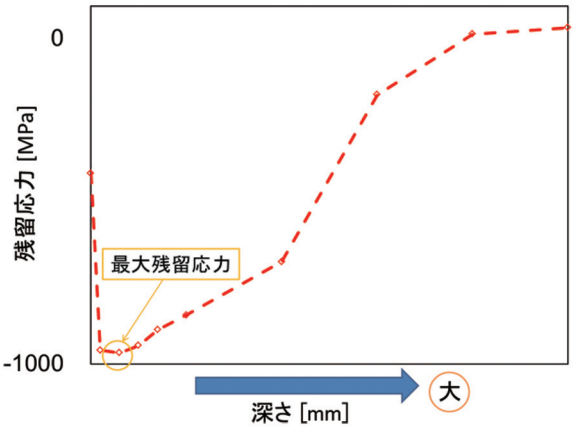


図 17　テストピースの深さ方向残留応力プロファイル

加えて今回の実機適用においては、実大供試体でも応力値を実測してテストピースと同等であることを確認した。測定面の様子を図18、測定結果を図19に示す。測定についてはsin2 ψ 法を用いて測定した。

歯面の溝方向、幅方向ともに同等の残留応力が付与されていることがわかる。また歯面A, Bの異なる場所で比較しても同等の残留応力が付与されていることから、問題なく部品が位置決めされ、ピーニングできていることがわかる。また歯底と歯面のプロファイルを比較すると、歯底に付与されている応力は低くなるが、深さ方向では同等レベルに付与されている。

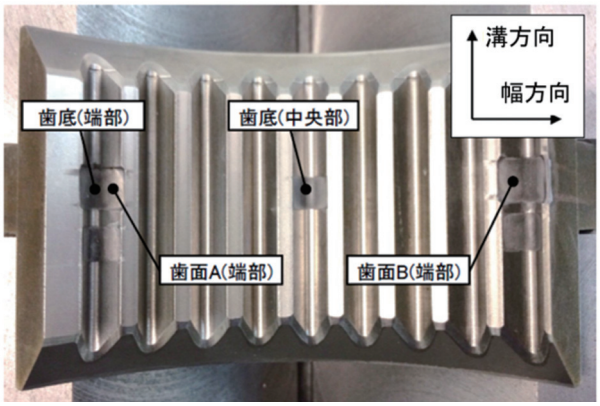


図 18　実大供試体の応力測定

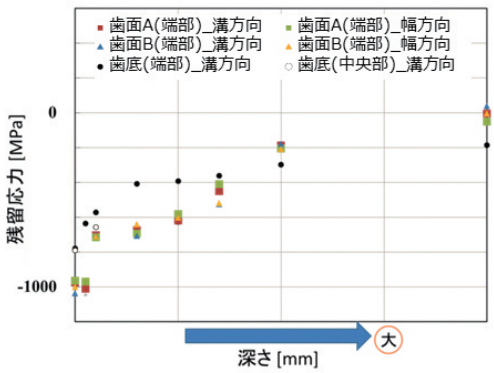


図 19　実大供試体の深さ方向残留応力プロファイル

4.2　新たな課題

LPによって所望の残留応力を実機部品へ付与することができた。しかし一方で、適用を経て以下2点の新たな課題に対応する必要が発生した。

① マスク治具の損耗/変形の抑制・阻止
② 加工時間の短縮

このうち①への対応を4.2.1項にて示す。

4.2.1　マスク治具の課題とマスクレス照射の開発

図20に損耗したマスク治具を示す。実際の加工では照射範囲をスプラインの歯筋方向にピーニングした後、マスク上でレーザを折り返すような走査になっている。この折り返しの際、駆動装置は減速せざるを得ず、レーザが集中的に照射されてマスクに掘り込みが生じてしまう。またワーク形状の都合で薄肉の設計となっており、使用するほどマスクに応力が付与され、変形してしまう。掘り込みによるマスク貫通のリスクと、変形によるセットのしづらさ、転じてセットミスによる照射範囲外への施工リスクが非常に高いことが運用する中で明らかとなった。この課題を解決するにあたり、マスク治具自体を無くせないかという考えの元、マスクレス照射の開発に取り組んだ。

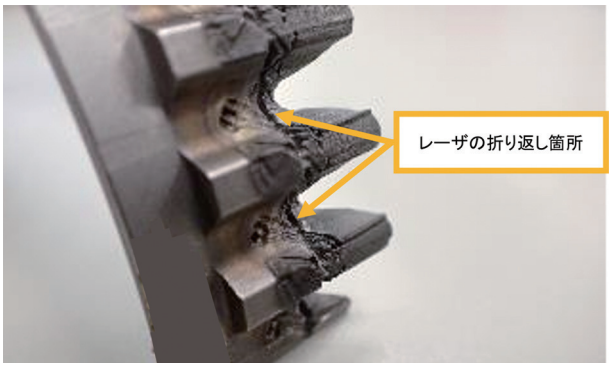


図 20　マスクの損耗

マスクレス照射の概念図を図21に示す。レーザ走査が照射範囲外に到達した瞬間に、レーザシャッタで光路を遮断、折り返して照射範囲に到達した瞬間にレーザシャッタを開けるという制御を実現することを目指した。ただし実際には、レーザシャッタの開閉指令信号の立ち上がりからレーザシャッタが動作するまでの応答遅れがある。そのため応答遅れについては制御パラメータのチューニングを行うことで対応し、要求される照射許容範囲内に応答遅れが収まるかを検証した。

図22にNC機におけるマスクレス照射の制御フローを示す。NCプログラムでレーザシャッタの制御を行おうとすると、制御文一行ごとに指令が処理されるため、NCテーブルを動かしつつレーザシャッタの開閉を行うことができない。そこで、NCプログラム

から照射範囲のデータを事前にProgrammable Logic Controller(以下: PLC)に送信、記憶させておく。そして逐次NCプログラムから現在の座標値をPLCに送信する。送信されてきた現在位置の座標を照合した結果照射範囲外であった場合、PLCからレーザシャッタに指令を出すことでNCステージとレーザシャッタの開閉を連動させることにした。応答遅れの問題に対してはあらかじめ補正値を設定しておく。これにより応答遅れ分を考慮して先行でレーザシャッタの開閉信号が立ち上がるようにした。

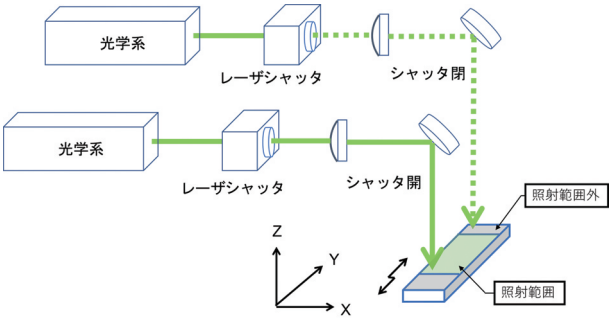


図21　マスクレス照射の概念図

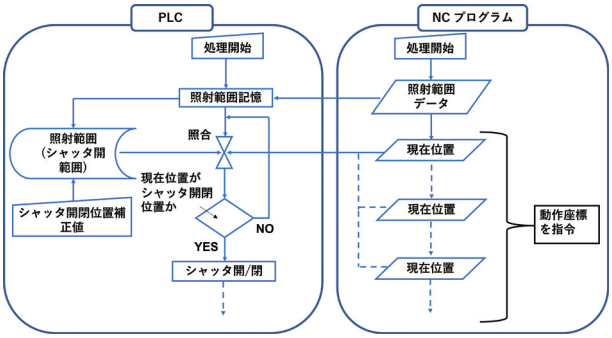


図22　マスクレス照射の制御フロー

図23にマスクレス照射の要素試験の結果を示す。アルメンストリップにレーザで基準線を引き、その線が引かれている位置でレーザシャッタの開閉指令を出してオーバースプレーされた範囲が照射許容範囲内かを検証した。その結果、要求されている照射許容範囲内でレーザシャッタの開閉ができていることが確認でき、実機部品に適用できる可能性を得た。

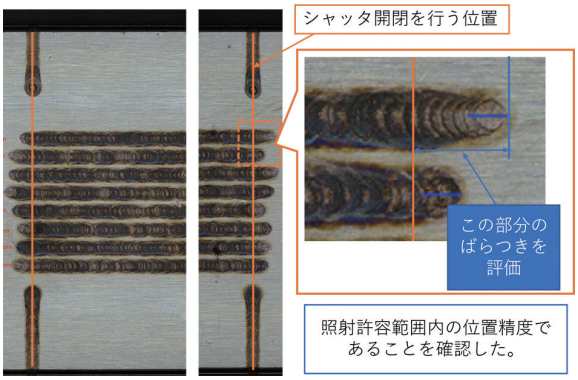


図23　マスクレス照射の要素試験

5．まとめ

今回開発したLPシステムにおいて、ヘリコプターの実機部品に対して要求される応力を付与することができた。また、マスク治具の課題についてはマスクレス照射の開発を行い、実機に適用できる可能性を得ることができた。これにより不具合リスクの低減だけでなく、作業工数の低減、マスク治具の交換コストの削減が期待できる。今後はマスクレス照射の実機適用と加工時間短縮の課題を解決し、適用拡大を図ってゆく。

参考文献

(1) 松本康太郎, 辻俊哉, 小林祐次, 部谷学, 沖原伸一郎：レーザピーニング作用に及ぼすパルス幅の影響, 2010
(2) LSP Technologies, Inc.：Laser Peen Process Services & EQUIPMENT, 2018 Rev.3
(3) KEYENCE ： レーザマーカの活用情報サイト マーキング学習塾　金属への吸収率について, https://www.keyence.co.jp/ss/products/marker/lasermarker/selection/metal_marking.jsp
(4) AMS2546 : Laser Peening, Issued 2004-08, Reaffirmed 2019-01
(5) SAE J 442 : (R) Test Strip, Holder, and Gage for Shot Peening, Issued 1952-01, Revised 2019-06

【著　者】

大澤　知将

武藤　雅彦

谷嶋　真一

中村　尚人

白井　龍汰

小熊　至智

SUBARU 最新のIIHS前面衝突予防性能試験において 運転支援システム アイサイトを搭載した「フォレスター」が 試験車両で唯一、最高評価を獲得（米国仕様車が対象）

2024年5月27日

米国IIHS*1が実施した最新の前面衝突予防性能試験において、運転支援システム アイサイトを搭載したSUBARU「フォレスター」（米国仕様車、2024年モデル）が、対象となった10車種の小型SUVで唯一、最高評価の「Good」を獲得しました。

*1：Insurance Institute for Highway Safety（道路安全保険協会）

フォレスター 2024 年モデル（米国仕様車）

ヘリコプターの周囲監視のための障害物検知・回避システムの開発の取り組み

Development of Obstacle Detection and Avoidance System for Helicopter Surrounding Surveillance

迫　　匠一郎＊　　高　桑　　真＊　　山　家　大　輔＊
SAKO Shoichiro　　TAKAKUWA Makoto　　YAMAGA Daisuke

抄　録

ヘリコプターは、「ホバリング（空中停止）が可能」「離着陸に滑走路が不要」といった特徴を活かし、山岳救助や災害時の救助活動などで活躍している。一方で、これらの任務は周囲の樹木、鉄塔、崖、送電線や索道などの障害物に意図せず接近し、接触事故に至る危険と隣り合わせの状況下で行われている。そのため、狭い場所での死角にある障害物や前方の障害物をセンサーで検知し、パイロットに障害物の有無と接触の危険性を知らせるシステムの開発に取り組んでいる。

本稿では、パイロットが視認しにくい送電線などの線状障害物、悪天候・悪視程時などでも障害物を検知し、表示と音声によりパイロットに警報を知らせるシステム研究開発の取り組みについて紹介する。

Abstract

Taking advantage of the ability to hover and the feature of not needing a runway for takeoff and landing, helicopters are used in mountain rescue and disaster relief operations. However, these missions are carried out at risk of unintentionally approaching obstacles. For this reason, we are developing a system that uses sensors to detect obstacles ahead or in blind spots in narrow spaces and notifies the pilots of the presence of obstacles.

This paper introduces the development of a system that can detect linear obstacles such as power lines which pilots struggle to see as well as objects in bad weather or poor visibility and that alerts the pilots by display and sound.

1．まえがき

国内における民間のヘリコプターの接触事故のうち、送電線への接触事故や、夜間や霧などの悪視程の状況が原因で墜落した事故の割合は高く、悪視程でも送電線等に接触しないように、事前に送電線との接近や悪視程の環境で障害物との接近を検知し、パイロットに警報を知らせることが重要である。

国内のヘリコプターが周囲の障害物に接触した事故例は2002年～2020年の間で累計21件発生[1]しており、高速で回転するローター（翼）が障害物と接触すると、大惨事に繋がる。図1のようにヘリコプターには各種安全装置が搭載されており[2、3、4]、様々な危険を検知・回避できるようになっているが、それでもすべての危険に対応できているわけではない。

このため、上記のような障害物への接触事故を無くし、将来的にはヘリコプターをはじめとした航空機の事故撲滅に向けて、障害物検知・回避システムの研究・開発に取り組んでいる。

図１　飛行安全のための装置例

＊ 基盤技術部

2．研究内容

2.1　線状障害物への対応

ヘリコプターが送電線や索道といった線状障害物に衝突する事故を無くすことを目的とし、機体の前方に搭載したLiDAR等のセンサーにより、送電線や索道などの線状障害物を測域するシステムを構築した。

2.1.1　システム構成、処理フロー

本システムの簡略化した構成を図２に、処理フローを図3に示す。機体前方に搭載するLiDARにより、障害物までの距離や方向等の位置情報(3次元の点群データ)を取得し、航空機に搭載可能なミッションコンピュータ等の信号処理装置に入力する。

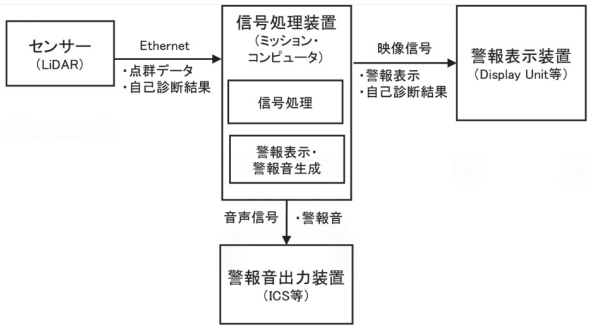


図２　システム構成

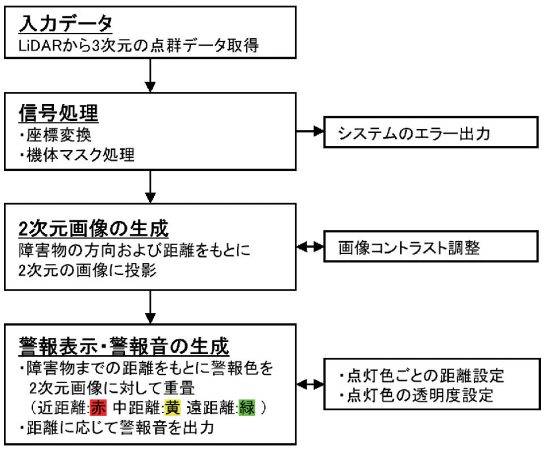


図３　線状障害物検知システム　処理フロー

信号処理装置では、LiDARから入力された点群データに対し、LiDAR基準の座標系からヘリコプターのテール・ロータ及びメイン・ローターの回転軸を基準とした座標系に変換し、ローターから障害物までの距離や方向を算出する。これは、ローターが障害物と接触した際に最も墜落に繋がる要因となるため、LiDARではなく、ローターから障害物までの距離に変換している。また、自機を障害物として誤検知し、警報出力しないよう、自機のテールや胴体等、既知の位置にある点群データは警報表示に使用しないようにマスク処理を行う。

座標変換及びマスク処理の信号処理後の3次元の点群データをもとにパイロットに障害物の検知状況を知らせるための警報表示用の2次元画像を生成する。画像の各座標は、検知した障害物の角度方向(水平・垂直)をもとに配置し、各画素の色合い(白黒の濃淡)は、障害物までの距離をもとに表現し、2次元画像を生成する。

2次元画像を生成した後、障害物までの距離が近い場合、パイロットに障害物との距離が把握できるよう、生成した画像に対して障害物までの距離に応じた警報色(赤色・黄色・緑色)を重畳し、Display Unit等のモニタへ映像信号を出力する。また、最近接の障害物までの距離に応じて、ICS等の音声装置へ警報音を出力するシステムを構築した。

2.1.2　地上でのシステム動作検証

地上でのシステムの動作検証では、検知対象の障害物として実際の送電線を使用した(図4)。LiDARを地上に設置し、遠方の送電線を指向した。重畳する警報色ごとの距離は任意に設定可能であり、地上での動作検証では、15m以内の距離にある障害物は赤色に警報表示し、15m ～ 100 mの範囲にある障害物は黄色に警報表示し、100m ～ 200mの範囲にある障害物は緑色に警報表示する設定とした。動作検証の結果より、100m以上先にある遠方の送電線を検知し、警報表示および警報音の出力を確認した(図5)。

一方で、LiDARが細かく検知した点群データを全て画像化した結果、警報表示の画面が複雑になってしまったため、より直感的に障害物の位置や回避方向が判断できる画面に改善することが今後の課題である。

図４　検証風景

図５　動作検証画面

2.2　悪視程環境での障害物検知

霧や雨等の悪視程の環境下においても障害物を検知し、警報表示するための処理を検討し、動作検証を実施した。悪視程環境での障害物検知では、機体がホバリング中に機体の後方及び下方にある比較的近距離にある障害物を検知する場面を想定して課題に取り組んだ。

2.2.1　悪視程環境における処理フロー

霧や雨を弁別し、その先にある障害物を検出するために、LiDARの光の反射率を用いた処理方法を検討した。LiDARは、光を放射し、物体に反射して再び光が入射するまでの時間をもとに周囲にある障害物の距離を計測するセンサーであるが、霧などの水分子に光が照射された際、光は散乱し、崖や樹木等の固形の障害物と比較すると放射した光が反射され、光の反射率が低くなると想定した(図６)。そのため、LiDARが取得した障害物の光の反射率が一定の閾値以下の場合、雨や霧として弁別する方法を策定した。策定した処理フローを図７に示す。

なお、LiDARが受光する障害物からの反射光の強度は障害物までの距離に応じて減衰するため、光の反射光の強度に対し、障害物までの距離で補正した値を反射率として弁別処理に使用する。

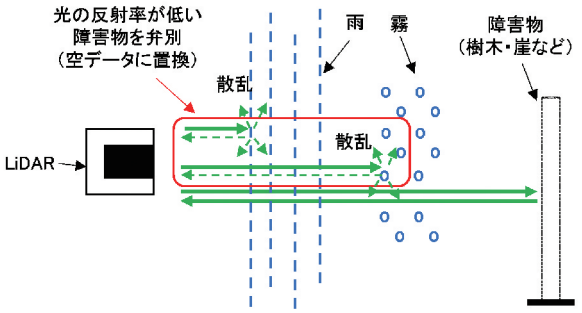


図６　弁別処理概要

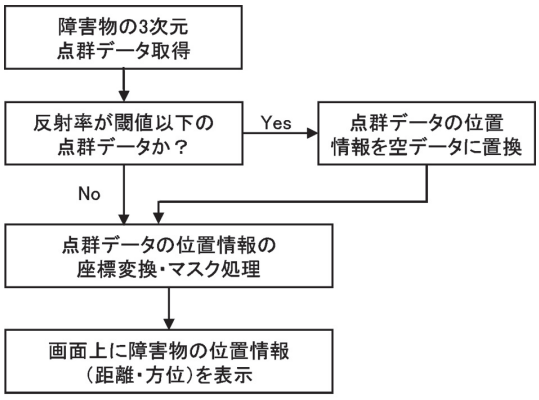


図７　悪視程環境における処理フロー

2.2.2　霧・雨の再現施設での反射率の計測

前述の処理フローの妥当性を確認するために、霧や雨を模擬する実験施設において光の反射率の計測を実施した。設置したLiDARの周囲に霧や雨を模擬的に発生させ、LiDARにより霧や雨を検出し、水分子の反射率を取得した。なお､霧の濃さを示す指標として、実際の航空機の山岳斜面への衝突事故の調査報告[5､6]を参考に、視程20m ± 10mを保持するように霧を発生させた。その後、障害物となる板を設置し、障害物の反射率を取得した(図８)。

表１に示す取得結果より、黒色の障害物は白色の障害物と比較して反射率が低く、霧の反射率は黒色や白色の障害物と比較して小さいことが分かった。そのため、霧等の悪視程環境における障害物検知として、光の反射率を用いた弁別処理の妥当性を確認した。なお、LiDARが雨を誤検出することはなかった。これは光が雨粒に当たると屈折し、LiDARに光が返ってこなかった可能性があると考えられる。そのため、雨に関して、光の反射強度による弁別処理は不要であることが分かった。

今後、策定した悪視程環境における処理フローをシステムの処理に反映し、実際の霧や雨の環境下での検証が必要である。

表１　LiDARで検出した光の反射率

	反射率
霧	0．4%以下
障害物（板・黒色）	5～8%
障害物（板・白色）	5～20%

図８　障害物配置風景(左：白色、右：黒色)

3．操縦支援技術への取り組み

パイロットに警報情報を知らせるだけでなく、今後LiDAR等のセンサーにより障害物との接近を検知した情報を元に、危険要因を回避する操縦支援の技術にも取り組む予定である。

機体に搭載されているAFCS(Automatic Flight Control System：自動飛行制御システム)と連動した操縦支援機能を試作し、パイロットシミュレーション試験等により、周囲や進行方向から接近する障害物に対して自動で隔離・回避できることを検証していく。

4．まとめ

本稿ではヘリコプターの接触事故防止のための障害物検知・回避システム構築の取り組みとして送電線などの線状障害物の検知、悪視程での障害物の検知を紹介した。現在は地上でのシステムの試作及び動作検証に取り組んでおり、今後、ヘリコプターに搭載して、実環境での試作したシステムの動作確認に進んでいく予定である。

また、パイロットに障害物との接近情報を映像や音声で知らせるだけでなく、今後ヘリコプターと障害物が接近した場合、自動で障害物との距離を取る操縦支援にも取り組み、より安全で事故のない航空機の実現を進めていく。

参考文献

(1) 運輸安全委員会HP: 航空事故の統計、https://jtsb.mlit.go.jp/jtsb/aircraft/air-toukei.php?init=1&category=CategoryRotator (2024-6-01)
(2) 全日本空輸株式会社:運航の安全を守る電子装備システム、ANA VISION 2011、p.5
(3) 国土交通省: 小型航空機に関する安全情報の共有について（別紙３）空中衝突防止装置（TCAS）について～ ,p.2
(4) 井之口ほか：航空機搭載型ドップラーライダーの高高度飛行実証、日本航空宇宙学会論文集、Vol.62(2014) 、p.198-203
(5) 運輸安全委員会：読売新聞社所属川崎ヒューズ式369HS型 JA9057に関する航空事故報告書、https://www.mlit.go.jp/jtsb/aircraft/rep-acci/50-4-JA9057.pdf
(6) 運輸安全委員会：航空事故調査報告書 大洋航空株式会社所属セスナ式172Nラム型JA3846、https://www.mlit.go.jp/jtsb/aircraft/rep-acci/63-5-1-JA3846.pdf

【著　者】

迫　匠一郎

高桑　真

山家　大輔

特許紹介

SUBARU Patent Review

最近登録になった特許の中から代表的なものを紹介する。

電動式全輪駆動車

【特許番号】US11577605
【発明者】塩川　弘晃/大黒　智寛

本発明は、前輪をフロント電動モータで直接的に駆動し、後輪をリヤ電動モータで直接的に駆動する電動式全輪駆動車であって、フロント電動モータ、リヤ電動モータの出力トルクが低下する高車速域において、アクセルペダルが踏み込まれた場合に、実際に発生する車両加速度(前後加速度)以上に、運転者に加速感を与えることが可能な電動式全輪駆動車を提供するものである。

【発明の背景】

近年、電動モータを駆動力源とし、排気ガスを排出しない電気自動車(ＥＶ)が実用化されている。例えば、特許文献には、前輪がフロントモータにより駆動され、後輪がリヤモータにより駆動される電動式の全輪駆動車が開示されている。このような電気自動車では、例えば、磁石をロータの鉄心内部に組み込み、小型で高効率なＩＰＭモータなどが好適に用いられる。

ＩＰＭモータ等の電動モータは、基底回転数以上の領域では回転数が高くなるほど、出力トルクが低下するという出力特性(Ｔ－Ｎ特性)を有している。そのため、電動モータと車輪とが直接的に接続された車両の場合､電動モータの回転数が高くなる高車速域では、例えば、アクセルペダルが大きく踏み込まれたとしても、車両を加速させることが難しくなり、運転者は加速感を得られにくくなる。

【発明の概要】

この課題を解決するため、前後輪を直接的に駆動するフロント電動モータおよびリヤ電動モータ、アクセルの操作量を検出するアクセルセンサと車両の速度を検出する車速センサ、アクセルの操作量及び車速に基づいて、フロント電動モータ及びリヤ電動の駆動を制御するコントロールユニットを備える。速度が所定速度以上である状態において、アクセルの操作量が所定速度以上で増大された場合に、駆動力の前後配分を後輪偏重側に変化させることを特徴とする。(図１)

例えば、フロント電動モータの駆動力が低下されるとともに、リヤ電動モータの駆動力が増大される。そのため、車両の後ろ側(リヤ側)が沈み込むように(スクォートするように)ピッチングが生じる。その結果、実際に発生する車両加速度(前後加速度)以上の加速感を運転者に与えることができる。

アクセルの操作量の増大速度(Δアクセル開度)が大きくなるほど、または車速が高くなるほど、後輪偏重の程度が大きくされる(リヤ電動モータの駆動力増大量が大きくされる)ため、アクセルの操作量が大きくなるほど、より大きな加速感(スクォート)を与えることができる。

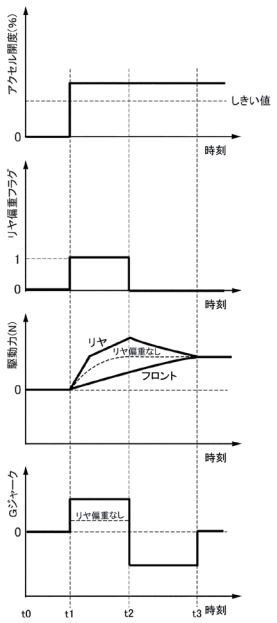


図１　後輪偏重制御におけるタイミングチャート

【発 明 者】

塩川　弘晃

大黒　智寛

電動車両

【特許番号】特許第7332552号
【発明者】末若　大輔

本発明は、車体のフロアパネルの下に電源が配置されており、さらに電源の下に冷却器が取り付けられている電動車両に関し、生産性に優れた構造を提供するものである。

【発明の背景】

電動車両では、走行用のモータに電力を供給する電源がフロアパネルの下に配置され、電源の下に冷却器が取り付けられる場合がある。電源と冷却器の間には、伝熱性の高い伝熱材が挟まれる。電源から冷却器への伝熱性を高めるため、伝熱材は電源と冷却器の間で圧縮される。伝熱材を強く圧縮するために冷却器を電源に強く押し付ける必要がある。一方、冷却器は軽いことが望ましいため、薄い金属板で作られており、剛性が低い。それゆえ、伝熱材の全体を圧縮した状態に保持するには、冷却器を多数の箇所で電源に押し付けておく必要がある。冷却器の多数の箇所を固定するのは生産性がよろしくない。本発明は、車体のフロアパネルの下に電源が配置されており、さらに電源の下に冷却器が取り付けられている電動車両に関し、生産性に優れた構造を提供する。

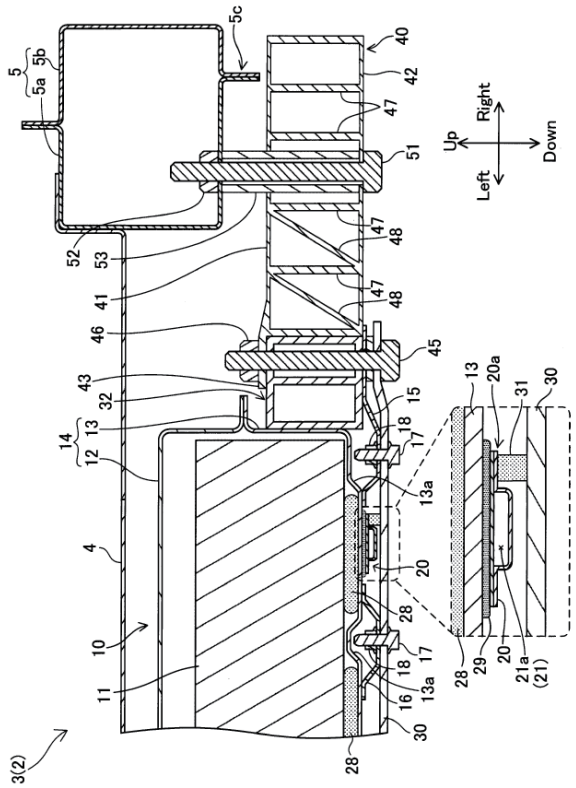


図１　車体断面図

【発明の概要】

図１は、車体の断面図を表している。電池パック１０は、天板１２と底板１３で構成されるハウジング１４と、ハウジング１４に収容される複数の電池セル１１で構成されている。電池セル11は、伝熱材28を介してハウジング１４の底板１３に固定されている。電池パック１０の下には冷却器２０が配置される。冷却器２０は、２枚の金属板を張り合わせて作られており、２枚の金属板の間に縦流路２１ａが形成されている。冷却器２０は伝熱材２９で電池パック１０の底板１３に接着されている。伝熱材２９は弾性を有しており、冷却器２０と電池パック１０の間に圧縮された状態で挟まれている。走行中に跳ね上がる小石などから冷却器２０と電池パック１０を保護するために、冷却器２０を下側から覆うように､冷却器２０よりも厚く、曲げ剛性が高い防護板３０が取り付けられる。冷却器２０と防護板３０の間には、弾性体３１が挟まれ圧縮される。弾性体３１は、冷却器２０の縁に沿った枠形状を有している。弾性体３１を介して防護板３０が冷却器２０を電池パック１０のハウジング１４の底面に押し付けることにより、伝熱材２９を圧縮した状態で保持するのに冷却器２０に多数の箇所を固定する必要がないため、生産性に優れる。

【発 明 者】

末若　大輔

車両制御装置

【特許番号】US11618436
【発明者】堀口　陽宣／水谷　亮一／長田　明久
川嶋　洋平／杉本　雄紀

本発明は、自動運転時の自動操舵制御中に、ドライバがステアリング操作（オーバライド操舵）を行った際にも、ドライバに違和感を与える事無く、かつオーバステアやアンダステアによる車両不安定挙動を抑制する制御装置を提案するものである。

【発明の背景】

自動運転時の様に、操舵制御に基づく自動的な操舵を行っている場合に、ドライバがオーバライド操舵を行った場合に、この操舵操作に起因して車両がオーバステア／アンダステアなどの不安定挙動を示す場合がある。

これに対して、例えば自動操舵制御を行っている場合には、オーバライド操舵時のステアリングギア比をスローにするなどして舵角（タイヤのトー角）を抑制する、あるいはオーバライド操舵自体を禁止する（自動操舵制御による指示舵角以上に転舵されないようにする）ことも考えられるが、この場合、ドライバは操舵したにも関わらず実際の舵角に反映されないことから、違和感に繋がることが懸念される。

【発明の概要】

上述した問題に鑑み、自動操舵制御中にオーバライド操舵を行った際の車両挙動を安定化するとともにドライバの違和感を軽減した車両制御装置を提供する。

図１のフローチャートに従い、制御の概要を説明する。

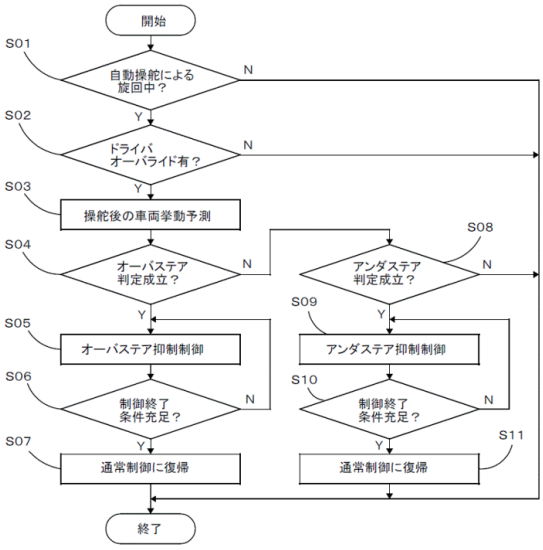


図１　実施例のフローチャート

先ず、自動操舵制御中であることを判定し（Ｓ０１）、オーバライド操舵がある場合（Ｓ０２）、その操舵量による車両挙動を予測する（Ｓ０３）。例えば、車両運動モデルと比較し、オーバステア挙動になると予測した場合（Ｓ０４）には、駆動力配分を前輪偏重とすることで車両がアンダステア傾向となり、オーバステア挙動を抑制できる（Ｓ０５）。逆に、アンダステア挙動になると予測した場合（Ｓ０８）には、駆動力配分を後輪偏重とすることで車両がオーバステア傾向となり、アンダステア挙動を抑制できる（Ｓ０９）。オーバステア／アンダステア挙動の収束を検知した場合に（Ｓ０６/Ｓ１０）、駆動力配分をベースに戻し、制御終了する。

上記は、説明を簡略化する為、前後駆動力配分の変更にのみ言及しているが、4輪駆動力配分を変更（左右輪の駆動力差も設ける）することで、オーバステア/アンダステアの抑制をより効果的に行える。

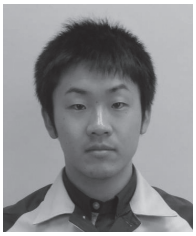
【発 明 者】

堀口　陽宣

水谷　亮一

長田　明久

川嶋　洋平


杉本　雄紀

運転支援装置

【特許番号】US11845435
【発明者】谷田貝 拓朗/熊谷　　光

本発明は、出会い頭事故の発生を抑止することができる運転支援装置を提供する。交差点において、物体を検知したときのみ回避制御を実施するのではなく、あらかじめ交差点の進入前後にわたって走行制御を行う事とした、事故の予防運転をシステムで実施する。

【発明の背景】

近年、車載カメラやレーダーといったセンサによって得られた自車周囲の情報に基づいて先行車両や各種障害物等を認識し、ドライバーの運転支援を行う装置が様々に提案されている。中には見通しが悪い交差点(建物の壁や塀などによって死角がある交差点)に着目し、ドライバーの死角を補って交差車両を早期に検知して運転支援を行う装置が販売されている。

上述の技術は、いわゆる出合い頭の事故の低減に効果的であると考えられるが、例えば、ドライバーが交差点へ急発進して突入してしまうとセンシングから減速までの処置が間に合わず、また、他車両や歩行者、自転車などの障害物によってセンシングが妨げられる場合があり、これらのような場面においては衝突回避をする事は困難である。

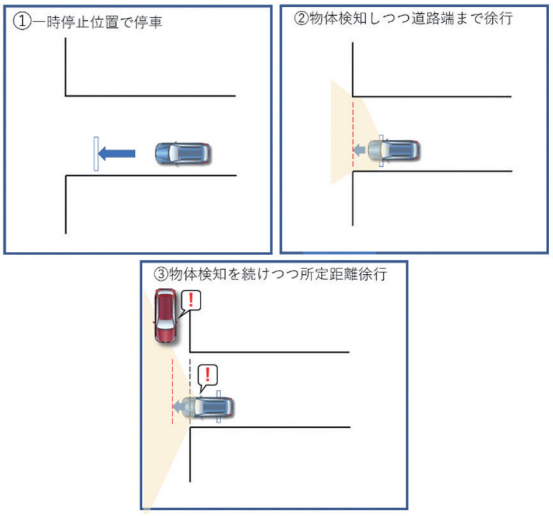


図 1　出合い頭事故の防止制御

【発明の概要】

本発明は、交差点の手前や一時停止線の手前で一時停止させた後の、車両走行制御の工夫(発進と徐行)によって、出合い頭事故の発生を抑止する。

本発明の装置は前方認識部、判断部、および車両制御部を備え、3段階の制御を行う事を特徴とする。

前方認識部はカメラやレーダー、地図情報を取得する事が出来るセンサを備え、自車前方の物体や停止位置を検出する。判断部は前方認識部からの情報をもとに、①車両を一時停止位置で停止させる。②一時停止位置で安全を確認出来た場合に道路端の手前まで徐行させる。③道路端で再度安全確認が出来た場合は所定の距離を徐行させる(その後は通常通り加速させる)といった各段階で判断を行い、車両制御部が実行する。①、②、③の制御作動シーンを図１に記す。

上記、②および③の状態においては、動体を検知し、安全に走行出来ないと判断した場合にドライバーへ通知を行いつつブレーキ制御を実施して衝突を回避する。

上記制御は②、③で自車の検知機会を増加させる事、周囲にとって自車認識を容易とする事を狙いとしており、この２つの恩恵によって事故を抑止する。

【発 明 者】

谷田貝 拓朗　　熊谷　　光

個人認識システム

【特許番号】US11830260
【発明者】中村　亮太/松橋　太陽

本発明は、車両の個人認識の精度を高めるため、ドライバーの顔向きと視線方向が一意に定められた顔画像を取得する個人認識システムを提案するものである。

【発明の背景】

一般的に、ドライバーモニタリングシステムは、車両内のカメラで撮影された顔画像やその特徴量を用いて、運転席に座っている人物を識別する。しかし、登録時の顔の向きや視線の方向によっては、一意に定められた顔画像を取得することができないため、正確な特徴量の抽出が難しく、個人認識の精度が低下する課題がある。

【発明の概要】

この課題を解決するために、運転席の前方で車幅方向の中央部に設けられた第１の表示部と、前記運転席の正面に設けられた第２の表示部と、前記第１の表示部の外縁に設けられた撮像部と､前記第１の表示部と、前記第２の表示部と、に表示させる表示画像を制御する表示画像制御部と、前記運転席の運転者が前記第１の表示部を視認した時に前記撮像部により撮像された前記運転者の顔画像である第１の顔画像と、前記運転者が前記第２の表示部を視認した時に前記撮像部により撮像された前記運転者の顔画像である第２の顔画像と、を少なくとも用いて前記運転者の個人登録と個人認識とを行う個人認識部と、を備えたことを特徴とする個人認識システムを提案する。(図1、図2)

これにより、個人の特徴量を登録する際に、運転者の顔向きおよび視線方向が一意に定められた顔画像を取得することができ、より精度よく運転者を識別できるようになる。

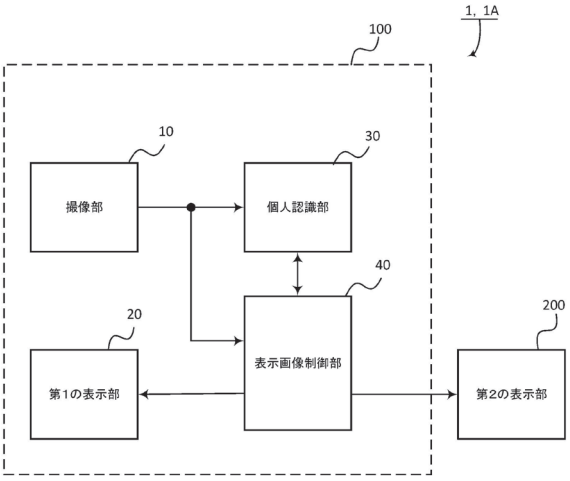


図１　個人認識システムの構成

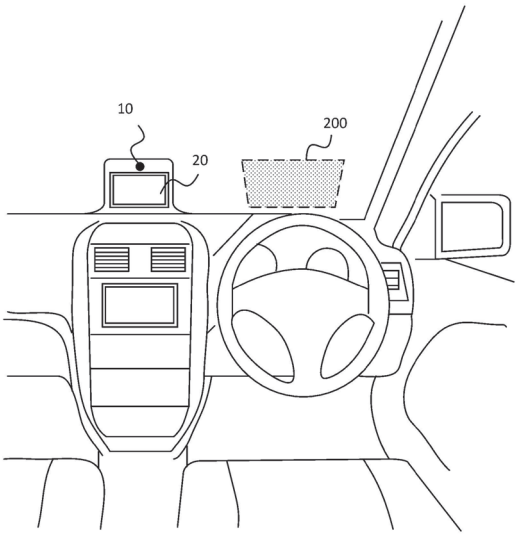
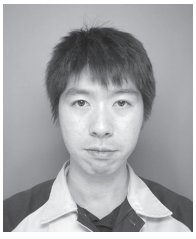


図２　本発明における配置図

【発 明 者】



中村　亮太

松橋　太陽

衝撃吸収装置

【特許番号】DE102014217033
【発明者】向中野 侑哉／池田　　聡／長澤　　勇

本発明は、衝突時の衝撃を吸収する装置であり、樹脂を繊維で強化した複合材料製のエネルギー吸収部材を用いて、高いエネルギー吸収量と滑らかな荷重-変位特性を両立した、衝撃吸収装置を提供するものである。

【発明の背景】

自動車などに搭載される衝撃吸収装置は、筒状に形成されたエネルギー吸収部材が圧潰することで、衝撃荷重を吸収する。従来から金属製のエネルギー吸収部材が用いられているが、座屈に由来する荷重変動や、つぶれ残りが多い。一方、樹脂を繊維で強化した複合材料製のエネルギー吸収部材は、軸方向への細かな連続破壊の圧潰により、高いエネルギー吸収特性を示すとともに、荷重変動とつぶれ残りが少ない特徴を持つ(図1)。しかしながら、複合材料はいったん座屈すると、エネルギー吸収量が低下してしまう。また、変位をほとんど伴わず大きな荷重に耐える特性を持つため、荷重と変位を制御する手法が求められる。

(a) 金属製　　(b) 複合材料製

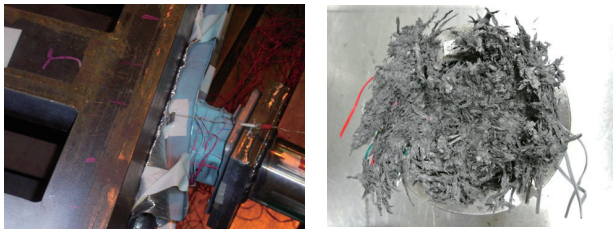


図１　エネルギー吸収部材の破壊形態

【発明の概要】

この課題を解決するために、所定の圧潰方向へ圧潰するエネルギー吸収部材(２)が、弾性率の異なる複数の繊維層(２１)を圧潰方向と直行する方向に積層すると共に、最初に押圧される前端部が押圧部材(３)の押圧面に対して傾斜させることで、押圧される際に弾性率の低い繊維層から高い繊維層へと順番に押圧部材に当接していく構造とした(図2)。

これにより、押圧初期時に弾性率の低い繊維層から当接して破壊が進むため、軸方向への細かな連続破壊を誘発し、エネルギー吸収量を最大化できる。さらに、押圧部材に押圧されるにつれて、当接するエネルギー吸収部材の断面積が次第に増加する。したがって、荷重もエネルギー吸収部材の圧潰方向への変位と共に増加することから、滑らかな荷重-変位特性を得ることができる。

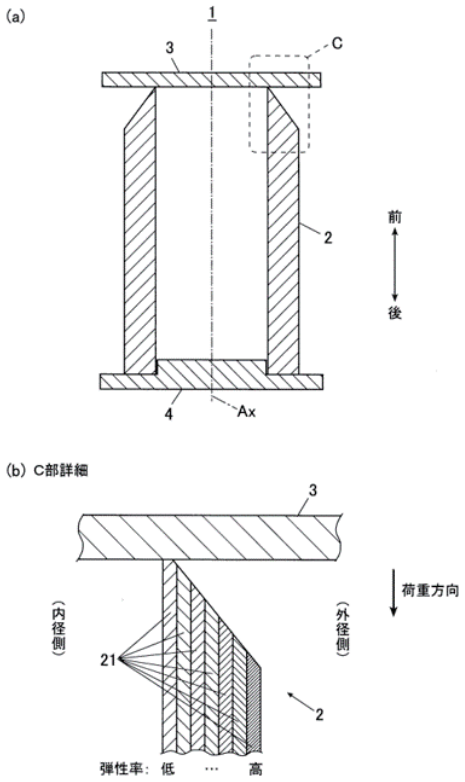


図２　複合材料製エネルギー吸収部材

【発 明 者】

向中野 侑哉

池田　　聡

長澤　　勇

車両の運転制御システム、及び、車両の運転制御装置

【特許番号】特許第7412603号
【発明者】小山　哉/小林　謙吾/海老沢 憲一
高橋　康宏/河村　浩彰/中西　優

本発明は、障害物との衝突回避制御等を行う車両の運転制御に関わるもので、コネクト機能によりサーバからの外部管制、遠隔制御機能を用いることで、高度な自車センサ群や高機能な制御ECUを持つことなく、最新の衝突回避機能をユーザが使えるようにした。

【発明の背景】

衝突回避機能をより高度なものにするためには、複数の自律センサを用いて自車両周辺の情報を多角的に取得する必要がある。また、多角的に取得した情報から自車両周辺の走行環境を認識し、運転制御のための制御情報を高い精度で演算するためには、演算能力の高い制御ユニットが必要である。

その一方で、障害物との衝突回避制御のような安全性に係る運転制御については、各種仕様の車両に対して広く展開され、このような安全性に係る運転制御等の制御アルゴリズムは、日夜開発される最新の制御プログラム等を随時適用することが望ましい。

しかしながら、上記のようなシステムはコストが高くなり、ユーザにとってアフォーダブルな価格での自動車での実現は困難である。

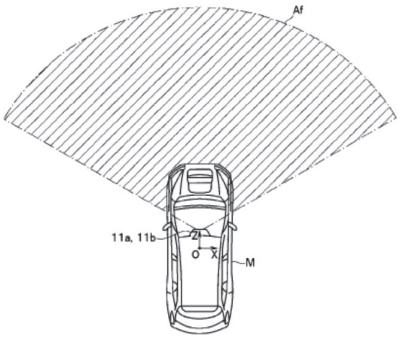


図１　車載されたカメラの撮像範囲

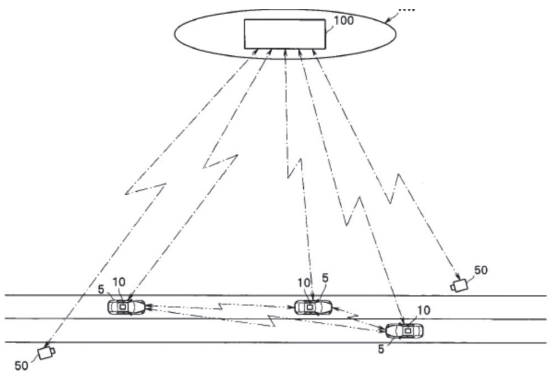


図２　各車両と道路管制サーバの通信構成

【発明の概要】

この課題を解決するためにコネクト機能によりサーバと連携した車両に対して以下の処理を行う。

車両に搭載されたセンサ情報(例えばカメラ映像(図1))を道路管制サーバにアップする。道路管制サーバではリアルタイムに他車の情報も把握しており、アップされたカメラ映像に対し高度な画像処理を実行するとともに、管制サーバの他車の情報と組み合わせることで、自車周辺の状況を多角的に把握することができる。これらの情報から将来の衝突を予測判断し、衝突に関わる車両に対する減速、回避操舵の指示値を計算する。最後にサーバからは各該当車両に対して減速度やハンドル角といった衝突回避の目標値を送信する(図2)。

本構成では、各車両は自車が持っているセンサ(例えばカメラ)のデータを送信し、制御目標値を受け取りアクチュエータの制御を行う機能を有するだけで良く、最小限の構成でプリクラッシュブレーキ機能を持つ車両仕様でも、サーバによる高度で最新の衝突回避機能を実現することが可能となる。

【発 明 者】

小山　哉　　小林　謙吾

海老沢 憲一　　高橋　康宏

河村　浩彰　　中西　優

孔検査装置の送り出し装置

【特許番号】特許第7498023号
【発明者】小野　遼平／渡邉　政雄／中畑　達雄

本発明は、検査対象となる孔が設けられた物体を測定器にセットせずに孔の表面粗さや形状等の特徴を検査できるようにする手段を提供するものである。

【発明の背景】

従来の孔の特徴の検査方法では、検査対象となる孔を有する物体を、３次元測定器等の正しい位置にセットすることが必要となる。このため、手持ち式の穿孔機で物体を穿孔した場合、速やかに孔の特徴を検査することができない。特に、穿孔対象となる物体が大型であり３次元測定器等にセットできない場合や、穿孔された物体が治具に固定された状態で次の工程のために搬送されたり、後続する切削加工、表面処理或いは組立等が行われたりするような場合には、孔の検査自体が困難となる。

そこで本発明は、検査対象となる孔が設けられた物体を測定器にセットせずに孔の表面粗さや形状等の特徴を検査できるようにすることを目的とする。

【発明の概要】

孔検査ユニット１は、物体Ｏに設けられた孔Ｈの特徴を検査する手持ち式の装置である。（図１）

孔検査ユニット１は、孔検査装置２及び送り出し装置３を有する。孔検査装置２は、検査対象となる物体Ｏの孔Ｈの中心軸方向にプローブ４を挿入して孔Ｈの検査を行う装置である。プローブ４は孔Ｈの内面に接触する接触式のプローブであっても良いし、孔Ｈの内面に接触しない非接触式のプローブであっても良い。

穿孔治具１２は手持ち式の穿孔機も使用するものであり、孔検査ユニット１は、これに取り付けできるブッシュ１１を有している。したがって、手持ち式穿孔機で穿孔後、手持ち式穿孔機を取り外して孔検査ユニット1に付け替えるだけで、孔に対して検査ユニットを位置決めでき、送り動作をさせることで孔検査装置によって孔の検査ができる。

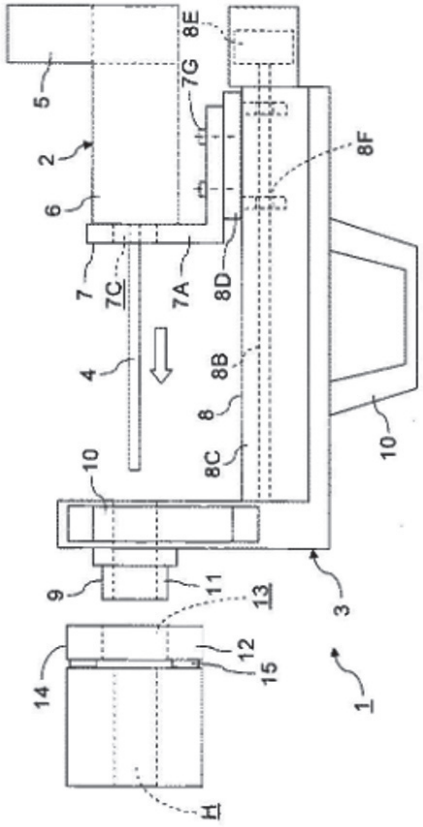


図１　孔検査装置の送り出し装置

【発 明 者】

小野　遼平

渡邉　政雄

中畑　達雄

プリプレグ積層装置、プリプレグ積層方法及び複合材成形方法

【特許番号】US11679570　EP3967479
【発明者】平林　大輔／青木　一行／小祝　　京
　　國谷　知可

本発明は、複合材料の自動積層装置において、積層中に材料の幅や厚さを変化させながら、構造物の荷重の流れに合わせて繊維を湾曲させる「可変幅ステアリング積層」に関するコンセプトである。本発明を軸に、その後　詳細に関する数多くの発明によって実構造を積層可能な自動積層装置を開発し、技術実証を行った。[(1)(2)]

【発明の背景】

複合材料は、一般的にプリプレグと呼ばれる炭素繊維と未硬化樹脂を組み合わせた材料を用いて、それを直線的な0°、+45°、-45°、90°の配向角の組合せで積層した後、樹脂を硬化させて部品にしている。複合材料は比強度・比剛性が高く、弾性率や強度を設計できる有用な素材ではあるが、プリプレグの板厚の制約や選択肢の少ない配向角により、複合材料の持つ真のパフォーマンスは発揮できていない課題がある。

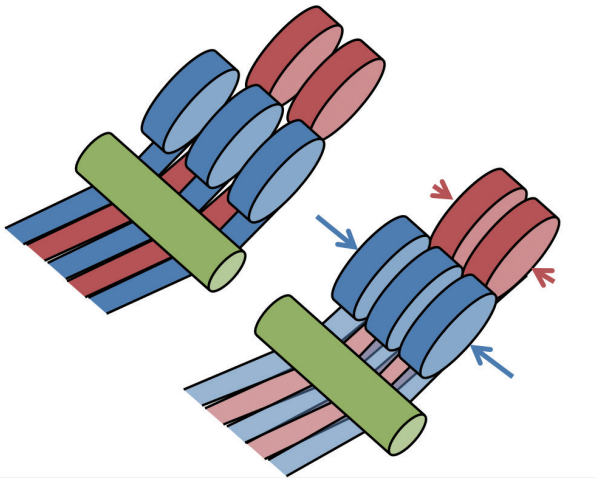


図１　可変幅積層の概念図

【発明の概要】

前述した課題を解決するため、湾曲させた配向角での積層が可能な、幅の狭い複数のプリプレグテープを同時積層する自動積層装置をベースにして、従来の固定されたテープピッチだったものを変化させる機構を組み込むことによって積層板厚や幅を変えながら積層できるようにした。また、テープが積層される前に隣接テープと接触してしまうとテープが樹脂の粘着力により一体化してしまい積層が困難となってしまうため、積層するテープを複数グループに分けて隣接テープと距離をとることでその対策としている。（図1）

本研究（の一部）は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（管理法人：JST）によって実施された。

(1)戦略的イノベーション創造プログラム　統合型材料開発システムによるマテリアル革命研究成果報告薄層材自動積層によるCFRPの3D高自由度設計技術の開発　p.139
https://www.jst.go.jp/sip/dl/p05/p05_results-report2023_1.pdf
(2)平林大輔 他：SUBARU技報50号　p.212

【発 明 者】

平林　大輔

青木　一行

小祝　　京

國谷　知可

社外発表一覧表（2023.4 ～ 2024.3）

1. 社　外　講　演

※所属は発表時点を示す。

発表時期	会　議　名 「発表タイトル」	講　演　者	所　　属
2023/4	The 27th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) Yokohama, Japan, April 3-6, 2023. Comparison of Injury Severity Prediction Using Selected Vehicles from Real-World Crash Data	江島　　晋	車両安全開発部
2023/4	自動車技術会　ガソリン機関部門委員会： e-fuelに関する技術調査と実証試験	中山　智裕	車両環境開発部
2023/4	SAE International WCX SAE World Congress Experience 2023 Experimental Study on the Relationship between Combustion and Vibration in a Gasoline Engine Part1 Study Overview and the Characteristics of Combustion's Exciting Force	佐藤　広直	車両運動開発部
2023/4	第67回「歯車技術研究会」 リヤデフ HYP ギヤの歯面摩耗型異音調査について	藤原　健太	車両運動開発部
2023/5	SAE International Noise and Vibration Conference & Exhibition 2023 Experimental Study on the Relationship between Combustion and Vibration in a Gasoline Engine Part 2 Characteristics of Structure's Exciting Force and Overall Research Summary	佐藤　広直	車両運動開発部
2023/5	公益社団法人自動車技術会 自動車技術会2023年 春季大会 学術講演会 骨格パネル間の点結合部における振動エネルギー伝搬メカニズム	阿部　啓介[*1] 山崎　　徹[*2]	＊1車両運動開発部 ＊2神奈川大学
2023/5	MathWorks MATLAB EXPO 2023 JAPAN 1D解析におけるAIサロゲートモデルの適用	小杉　寛明	車両環境開発部
2023/5	自動車技術会　計測診断部門委員会: 加熱平板への多成分燃料の高圧燃料噴霧の付着・蒸発挙動の計測	加藤　真亮	車両環境開発部
2023/5	東京大学工学部大学院　航空宇宙工学科　「燃焼現象論」講義 MBD、CAE × AIの事例紹介	湯村　洋典	技術開発部

発表時期	会　議　名 「発表タイトル」	講　演　者	所　　属
2023/5	電子情報通信学会　ヒューマンコミュニケーション基礎(HCS)研究会：操舵角度に応じた音提示の音高変化がカーブ走行時の操舵に及ぼす影響	渡邉　健斗*1 松田さゆり*1 中川　由貴*1 大石　琉翔*1 中村　聡史*1 小松　孝徳*1 鳥居　武史*2 澄川　瑠一*2 高尾　英行*2	＊1明治大学 ＊2技術研究所
2023/7	自動車用動力伝達技術研究組合「TRAMI」第3回 産×学連携講座 ミクロとマクロの世界でギヤを設計する	三好　慶和	技術開発部
2023/8	情報処理学会　第204回ヒューマンコンピュータインタラクション研究発表会：ドライビングシミュレータを用いた複合カーブを含む周回コースにおけるドレミハンドルの検証	松田さゆり*1 渡邉　健斗*1 中村　聡史*1 小松　孝徳*1 鳥居　武史*2 澄川　瑠一*2 高尾　英行*2	＊1明治大学 ＊2技術研究所
2023/8	INCE (Internatinal Institute of Noise Control Engineering) INTER-NOISE2023, Makuhari, Japan Instantaneous Structural Intensity Analysis on Vehicle Body	阿部　啓介*1 田中 勇之介*1 山崎　　徹*2	＊1車両運動開発部 ＊2神奈川大学
2023/8	アルテアエンジニアリング株式会社 ATC Japan 2023 振動エネルギー伝搬分析に基づく車内音低減技術	阿部　啓介	車両運動開発部
2023/8	INTER GROUP inter-noise 2023 Experimental study on the relationship between combustion and noise and vibration in a gasoline engine	佐藤　広直	車両運動開発部
2023/8	一般社団法人 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2023 ガソリンエンジンにおける燃焼と振動騒音に関する実験的研究	佐藤　広直	車両運動開発部
2023/9	一般社団法人日本機械学会 日本機械学会　2023年度 年次大会 産学連携の成果を自動車開発に生かす日々	阿部　啓介	車両運動開発部
2023/9	Altair Korea Altair Technology Conference Korea 2023（South Korea） Vehicle Interior Noise Reduction Technology Based on Vibrational Energy Propagation Analysis	阿部　啓介	車両運動開発部
2023/9	公益社団法人　自動車技術会 2023年　秋季大会 後輪増速機構を用いた車両運動挙動のメカニズム解析	伊藤　　奨	車両運動開発部

発表時期	会　議　名 「発表タイトル」	講　演　者	所　　属
2023/9	公益社団法人自動車技術会 シンポジウムNo.01-23　講習会『燃料・潤滑油入門』 潤滑油の規格 乗用車用エンジン油の規格	鈴木　裕美	材料研究部
2023/10	自動車技術会 2023年学術講演会秋季大会 ロバストで正確な先行車認識速度開発のためのデータセットとそのタスクに対する考察	小川　原也[*1] 齋藤　　徹[*1] 青井　紀之[*2]	＊1ADAS開発部 ＊2株式会社SIGNATE
2023/10	公益社団法人自動車技術会 2023年秋季大会 XPS分析によるロジウム表面状態と触媒ライトオフ性能の評価	見野越 洋行[*1] 田淵　大智[*1] 永井　　亮[*1] 藤原　弘邦[*1] 羽田　政明[*2] 吉田　秀人[*3] 町田　正人[*4]	＊1材料研究部 ＊2名古屋工業大学 ＊3大阪大学 ＊4熊本大学大学院
2023/10	自動車技術会　2023年秋季大会 「空燃比センサ外周部に生成するデポジットの生成メカニズムに関する研究」	吉田　一帆[*1] 古谷　健太[*1] 大草　見斗[*1] 戚　　洪彬[*1] 田中 光太郎[*1] 戸辺　祥太[*2] 長谷島　丞[*2] 北川　哲夫[*2] 小野　雅広[*2] 石坂　浩大[*3]	＊1国立大学法人茨城大学 ＊2車両環境開発部 ＊3パワートレイン設計部
2023/10	2023年自動車技術会秋季大会 講演予稿集No.037: 多成分燃料を用いた高圧燃料噴霧の加熱平板における付着蒸発挙動の計測	加藤　真亮 安達　　龍 椎名　義朗 中山　智裕	車両環境開発部
2023/10	自動車技術会　燃料潤滑油部門委員会： e-fuelに関する技術調査と実証試験	中山　智裕	車両環境開発部
2023/10	公益社団法人　自動車技術会 2023年　秋季大会 自動車通電部位の錆生成に関する机上検討手法	内田　　晃	パワートレイン設計部
2023/10	自動車技術会 自動車技術会 秋季大会 深層強化学習とAIサロゲートモデルを用いたトランスミッション自動適合技術の開発	小杉　寛明 平尾　公一 稲生　崇人 淡路　彩乃 山本　光夫	車両環境開発部
2023/11	日本機械学会　第32回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2023)：衝突対象物の急な出現・急な動作変更が関わる交通事故の分析	小林　春平 後藤　育郎 齋藤　貴太	技術研究所

発表時期	会　議　名 「発表タイトル」	講　演　者	所　　属
2023/11	日本航空宇宙学会 第61回飛行機シンポジウム CFD 解析と風洞試験によるメインローターハブ低抵抗化の検討	肥後　　歩	ヘリコプター技術部
2023/11	一般社団法人MBD推進センター 第11回MBD実践事例報告会 SUBARUパワートレイン開発の設計者CAEの紹介	原　　淳史	技術開発部
2023/11	プロメテックグループ株式会社、プロメテック・ソフトウェア株式会社、GDEPソリューションズ株式会社 Prometech Simulation Conference 2023 粒子法を用いた雪解析の実用化	大熊　伴哉	車両安全開発部
2023/12	防衛技術協会 防衛用無人機システム研究部会　第20回　報告会 UAVに関する調査内容	大木　　巧	航空宇宙技術開発部
2023/12	一般財団法人 防衛技術協会　防衛用ヘリコプタ研究部会 防衛用ヘリコプタ研究部会　第21回報告会 VFS (Vertical Flight Society)総会報告	角地　美幸	ヘリコプター技術部
2023/12	一般社団法人　先端材料技術協会 先端材料技術協会　2023 年度第２回技術情報交換会 次世代モビリティに向けた軽量化技術の取組み	関根　尚之	基盤技術部
2023/12	内燃機関シンポジウム　フォーラム～燃料多様化社会における内燃機関を考える～ e-fuelに関する技術調査と実証試験	中山　智裕	車両環境開発部
2024/1	電気学会 電気学会 高電圧研究会 FDTD Simulation of a Small-scale Charged Airplane Model in an Ambient Electric Field Between Two Flat Electrodes	岡田　翔吾[*1] 津端　裕之[*2]	＊1同志社大学 ＊2航空宇宙技術開発部
2024/2	2023年度MBD推進センター年度末報告会 MBD普及実践事例の紹介（アイシン、スバル、トヨタ）	梅津　　崇[*1] 平山　友貴[*2]	＊1エンジニアリング情報管理部 ＊2技術開発部
2024/2	千葉大学大学院 学位（博士）論文, 公聴会: 直噴ガソリンエンジンにおける粒子状物質の生成機構と排出低減に関する研究	加藤　真亮	車両環境開発部
2024/3	東京大学モビリティ・イノベーション連携研究機構 (UTmobI) 第17回自動車技術に関するCAEフォーラム2024 振動エネルギー伝搬分析に基づく車内音低減技術	田中勇之介	車両運動開発部

発表時期	会　議　名 「発表タイトル」	講　演　者	所　　属
2024/3	東京大学モビリティ・イノベーション連携研究機構 (UTmobI) 産学連携フォーラム 第17 回 自動車技術に関するＣＡＥ フォーラム 2024 粒子法を用いた雪解析の実用化	大熊　伴哉	車両安全開発部
2024/3	東京大学モビリティ・イノベーション連携研究機構 （UTmobI） 第17回 自動車技術に関するCAEフォーラム2024 人体有限要素モデルを用いた歩行者頭部傷害解析	吉川　満晴	車両安全開発部
2024/3	情報処理学会　INTERACTION2024：ドライビングシミュレータを用いたワインディングロード走行における運転技能の分類システム	佐藤 能英瑠 鳥居　武史	技術研究所
2024/3	日本機械学会 関東支部　第30期総会・講演会：表面微細テクスチャに関する空力制御研究	永野　弘樹[*1] 石間　経章[*2] 川島　久宜[*2] 岩瀬　　勉[*3] 荻原　　浩[*3] 関根　紀朗[*3]	＊1技術研究所 ＊2群馬大学 ＊3技術開発部
2024/3	国立大学法人 東京農工大学 ヒヤリハットデータ研究会 第4回ヒヤリハットデータ研究会2023：衝突対象の急な出現・急な動作変更が関わる交通事故の分析	小林　春平 後藤　育郎 齋藤　貴太	技術研究所
2024/3	株式会社キカガク DX-Education Hub vol.1 SUBARUでのソフトウェア人材育成のご紹介	斎藤　　誠	技術開発部

（公社）：公益社団法人、（一社）：一般社団法人、（公財）：公益財団法人、（一財）：一般財団法人

2. 寄　稿

発表時期	寄　稿　先 「発表タイトル」	著　　者	所　　属
2023/6	公益社団法人自動車技術会 自動車技術会論文集　Vol.54 No.5 骨格パネル間の点結合部における振動エネルギー伝搬メカニズム	阿部　啓介[*1] 山崎　　徹[*2]	＊1車両運動開発部 ＊2神奈川大学
2024/2	自動車技術会論文集, 55巻1号(2024) 2023年自動車技術会秋季大会において講演: 多成分燃料を用いた高圧燃料噴霧の加熱平板における付着蒸発挙動の計測	加藤　真亮 安達　　龍 椎名　義朗 中山　智裕	車両環境開発部
2024/2	IEEE 電気学会 共通英文誌 FDTD Simulation of a Small-scale Charged Airplane Model in an Ambient Electric Field Between Two Flat Electrodes	岡田　翔吾[*1] 津端　裕之[*2]	＊1同志社大学 ＊2航空宇宙技術開発部

編　集　後　記

今年はオリンピックイヤーです。様々な国と地域から集まった選手たちが、自身の最高のパフォーマンスを発揮する姿を見るのは、いつも感動的です。今大会はコロナ禍が明け、競技場に歓声と笑顔と感動の涙が戻り、素晴らしい大会となりました。また、我々の仲間である三浦龍司選手と唐澤剣也選手が出場し、選手たちの情熱をより身近に感じたオリンピックとパラリンピックであったかと思います。

当社でも、自動車産業の大変革時代において、技術者たちは未来のモビリティに向けた「モノづくり革新」と「価値づくり」に情熱を持って取り組んでいます。また、本号では、昨年10月のJAPAN MOBILITY SHOW 2023にて公開したSUBARU AIR MOBILITY Conceptの開発活動を掲載しました。会場ではお答えできなかった質問にも一部お答えしています。読者の皆様にも、ＳＵＢＡＲＵの技術者たちの情熱を感じ取っていただければ幸いです。

最後に、執筆者の皆様と編集に携わっていただいた関係者に感謝を申し上げると共に、ＳＵＢＡＲＵ技報を閲覧いただいた皆様に深く御礼申し上げます。　（山根）

SUBARU技報編集委員会構成表

委員長：古川　寿也　技術開発部
委　員：舟串　卓也　商品事業本部
　　宮下　大輔　デザイン部
　　三好　慶和　技術開発部
　　田口　隆敏　ボディ設計部
　　沼澤　浩二　内外装設計部
　　関　　淳也　ＡＤＡＳ開発部
　　阿部　幸一　ＡＤＡＳ開発部
　　沖　　修一　材料研究部
　　藤原　弘邦　材料研究部
　　吉積　輝和　Ｅ＆Ｃシステム開発部
　　熱田　匡昭　車両開発統括部
　　長澤　澄人　車両安全開発部
　　林　　憲孝　車両運動開発部
　　長谷川　巧　車両環境開発部
　　中山　智裕　車両環境開発部
　　山本　光夫　車両環境開発部
　　松田　一彦　車両環境開発部
委　員：鈴木　広行　車両環境開発部
　　関　　竜達　パワートレイン設計部
　　長屋　浩之　パワートレイン設計部
　　上田　逸央　バッテリーシステム開発部
　　武藤　正行　生産技術統括部
　　太田 宗之祐　生産技術統括部
　　鳥居　武史　技術研究所
　　山根　章弘　航空宇宙カンパニー
　　磯部　洋　航空宇宙カンパニー
事務局：森　　崇　技術管理部(群馬)
　　菊地　正雄　技術管理部(群馬)
　　木島　誉　技術管理部(東京)
　　平瀬　和代　技術管理部(群馬)
　　髙橋　弘起　ＳＵＢＡＲＵテクノ株式会社
　　塚本　啓了　ＳＵＢＡＲＵテクノ株式会社
　　小杉　富雄　ＳＵＢＡＲＵテクノ株式会社
　　宮島　昭宏　ＳＵＢＡＲＵテクノ株式会社
　　大塚　紀子　ＳＵＢＡＲＵテクノ株式会社

SUBARU技報第51号

発　　行　2024年11月
発行兼編集人　SUBARU技報編集委員会
発　行　所　株式会社SUBARU技術管理部
　　群馬県太田市スバル町1-1
編　集　所　SUBARUテクノ株式会社
　　群馬県太田市金山町27-1

©2024 SUBARU CORPORATION
禁無断転載