スバル技報

SUBARU TECHNICAL REVIEW

2016 No.43

SUBARU

XV

FORESTER

表紙デザイン

デザイン部　栗原一徳

スバルのクロスオーバー商品の中で特にアクティブな
フォレスターと XV。安心と愉しさを支える技術と供に、
明るく元気なカラーを用いてダイナミックに表現しました。

SUBARU TECHNICAL REVIEW

2016 No.43

巻頭言

お客様に笑顔を届ける

執行役員　内　田　雅　之

皆さん、日々の忙しい・厳しいその仕事は誰のためにやっていますか？

給料を貰って生活するため？好きなものを買ったり遊んだりするため？いやいや技術者として「新しい車を造るんだ」「○○を実現するぞ！」とチャレンジしている方も大勢いる事でしょう。その一方で目的を見失って、このまま辛い仕事を続けて行く事に疲れている人も少なくないかもしれませんね。

仕事をする上で、「お客様第一」「ユーザー視点」と日々言われ続けていますが、開発部門に居る我々エンジニアは、実際にお客様の姿や声を見聞きする事はほとんどありません。ところが幸運にも私は、お客様の声を直接伺えるという機会に巡り会えたのです。ちょうど5年前になりますが、現在販売しているレガシィの開発リーダーをやらせて頂く事になり、その企画を考える手始めに、アメリカのお客様のご自宅に伺って、実際のお客様がスバルにどんな期待を持っているのか調べる事にしたのです。

アメリカは広く豊かな国で車検制度もほとんどない事から、一軒のファミリーで何台も車を持つ方が多く、その日の用途に応じて車を選んで使います。そんな環境で、スバル車もお持ちのお客様のお宅に伺って、こちらはスバルとは名乗らずに、調査会社とそのクライアント（自動車メーカーの人間）という紹介で質問をさせて頂きました。

あるお宅の奥様は趣味で絵を描くとの事で、壁に掛かっている作品を紹介してくれました。見ているとその中につぶれた車の絵があり、理由を伺うと「家族旅行中に砂漠のフリーウェイで居眠り運転をしてしまい、横転大破する大事故にあった。 だけどかすり傷で済んだのはこのスバルのお蔭なのよ！」と、ぐちゃぐちゃになった事故車の油絵と共に、スバルの安全性がいかに優れているか、NCAPの話題も加えて我々に自慢してくれたのです。勿論、今も新車に替えて同じアウトバックを乗り継いでくれています。次は街造りプランナーの初老の紳士。毎日の日課で山歩きをされます。そのスタート地点までの山道を「どんな天候でも安心・確実に往復してくれるスバルが無いと、自分のライフスタイルは成り立たない。スバルは自分の生涯の相棒だ！」とまで言い切ってくれました。別の主婦の方は、友人との読書会が趣味で、その集会に使う立派な小屋をご自分で建てられたのですが、「どんな建築資材もこのスバルで運んだのよ。びくともしなかったわ！」と、これまた大いに自慢してくれました。法律事務所に勤める中年女性は「毎日長距離を通勤する。鉄の橋などで悪天候の時にも安定して走れるのはスバルだけよ！」と、事務所で提供される欧州高級車は格好良いけど実用的でないと言ってスバルに乗ってくれていました。取り立てて車好きではない普通のご婦人に「スバルの走りが一番安定している」と自慢されるなんて夢にも思っていませんでした。他にも、愛車のスバルに「スービーちゃん」と名付け、まるで家族の一員として大切にしてくれている方や、「スバルの方が安定しているし燃費がいいのよ」と、ご両親から譲られた高級SUVを「乗らないから持って行かないか？」と言ってくれたご夫婦・・・等々。実にお会いした方々全員が、ご自分のスバル経験を目を輝かせながら自慢してくれたのです。

そうです、皆さんの仕事の成果、商品に込めた思い、頑張って達成させた機能や性能は全て、その場では見えない世界のお客様に必ず伝わっているのです。

高い目標や厳しい日程に苦しむ事が多々あると思います。そんな時には、その仕事の成果を喜んで自慢してくれる沢山のお客様が、全世界に居る事を想像してみて下さい。

どうですか？高い目標に立ち向かう勇気が湧いて来ませんか？

目　　次

✦巻頭言

お客様に笑顔を届ける――――――――――――内田　雅之

✦小特集「スバル フォレスター・XV・レヴォーグ改良モデル」

1. 新型フォレスターの紹介 ――――――――――SUBARU FORESTER 開発プロジェクトチーム… 1

2. 新型SUBARU XVの紹介 ――――――――――SUBARU XV 開発プロジェクトチーム …… 13

3. レヴォーグ/WRX S4 年改モデル(B型)の紹介
～アドバンスドセイフティパッケージについて～
SUBARU LEVORG/WRX S4
開発プロジェクトチーム… 19

✦論文・解説

4. WRX S4 SporVita デザイン開発 ――――――中村　卓生 …… 25

5. 運転支援システムによる交通事故低減効果の分析
熊谷　　光…… 29

6. ADAS開発における自動操舵系の安定性解析
―ステアリング制御でのシミュレーション活用事例―
白石　英一・川越　邦亮・大岩　博之・
松野　浩二 …… 34

7. 滑らかな作動フィーリングを実現する配光可変型前照灯の開発(第１報)
小川　原也・友枝　　優・村松　悠太 …… 41

8. 滑らかな作動フィーリングを実現する配光可変型前照灯の開発(第２報)
村松　悠太・浅野　憲昭・友枝　　優・
小川　原也・山本　照亮…… 47

9. スバルのパワーユニット開発を支えるMBDの紹介
神丸　慎二・田辺　大樹・高田　知洋・
伊津井　裕・高橋 俊太郎・山本　俊介・
渡邉　　豪・湯村　洋典…… 52

10. ボディ電装系プラントモデリングにおける因果・非因果モデルに関する一考察
星野　欽哉・古賀 祐一郎 …… 60

11. プラネタリギヤノイズ予測手法の開発――――青木　寛子・三好　慶和・神田　和紘・
小川　雅人…… 68

12. 車両構造部材へのCFRP適用研究――――向中野 侑哉・飯野　準也・下山　　浩 …… 73

13. 台上試験装置を用いたサスペンション過渡応答の計測
峯　　隆馬・日向　俊行・矢吹　直人・
仲武　聖仁 …… 77

14. 非定常空力シミュレーションによる高速走行安定性検討
長谷川　巧・小林　竜也・坪倉　　誠・
池田　　隼…… 81

15. 米国向け　テレマティクスシステムの開発――柘植　政俊・野口　清成・丹羽　　真・
町田　紀人・野本　大志・佐藤　法子 …… 88

16. 市場を忠実に再現する三元触媒の評価法に関する研究
中野　　勉・木下　雅晃・永井　　亮・
福富　駿祐 …… 93

17. 単気筒エンジンの改良による開発プロセスの課題対応(第２報)
山口　　暁・中山　智裕・加藤　真亮・
木本　健太・原井　惇行・金子　　誠 …… 100

18. シャシ板金溶接部品の耐食性＆疲労強度向上技術の開発
中澤　嗣夫・上田　　聡・池田　倫正・
片岡　時彦・鈴木　康剛・藍原　梨恵・
周東　　孝・狩野 佐登視 …… 105

19. アルミの剥離改善による鉄・アルミ共用プレス機の生産性向上
岩永　　元・茂木　　寛・山田　龍也・
吉田　　猛 …… 111

20. 宇宙航空研究開発機構D-SEND#2システムの開発
山﨑　哲夫・奈良橋 俊之・佐々木　豊 …… 115

21. 中央翼自走式自動穿孔機の開発――――内藤　雅一・早川　　智・谷田　圭司・
齊藤　俊介 …… 121

22. スリーブファスナ取外し工具の開発――――斎藤　学・高橋　秀治・中畑　達雄・
渡邉　政雄・西野　利男…… 127

23. 産業機器用エンジン開発におけるCAEの活用(第２報)
杉浦　規郎・北嶋　祐介 …… 133

24. 近年のスバルの車体　取り組み紹介――――柳生　幸徳・綾部　俊宏・青田　裕之・
今田　晴之・五十嵐 正典 …… 141

25. 市販の機構解析ソフトが無い時代にサスペンションの
キネマティック解析はどのように行われていたか？
野村　章 …… 149

26. 米国自動車排出ガス規制と燃費規制の変遷――江川　洋・西山　三屋 …… 154

27. 空気の見える職人の養成について――――坂崎　明彦・高橋　修・高橋 伸弥 …… 165

28. 特許紹介――――――――――――――――技術開発部 …… 171

✦社外発表一覧(2015.1 ～ 2015.12 講演・寄稿) …… 178

CONTENTS

Foreword

Bring Smiles to our Customers——Masayuki UCHIDA

Special Issue : FORESTER・XV・LEVORG Annual Change Model

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

2. Introduction of New SUBARU XV——SUBARU XV Project Team …… 13

3. Introduction of LEVORG/WRX S4 Annual Change Model (B-Type) Advanced Safety Package
SUBARU LEVORG/WRX S4 Project Team …… 19

Techinical Paper & Explanation

4. Development of WRX S4 SporVita Design ——Takao NAKAMURA …… 25

5. Analysis of Decreasing Traffic Accidents with Driving Support System
Hikaru KUMAGAI …… 29

6. Safety and Stability Analysis of Automated Steering System in ADAS Development
– A Case Study of Steering Control System by Simulation –
Eiichi SHIRAISHI, Kuniaki KAWAGOE,
Hiroyuki OOIWA, Koji MATSUNO…… 34

7. Development of Adaptive Driving Beam System
to Achieve Smooth Operation Feel (Part 1)
Genya OGAWA, Yu TOMOEDA,
Yuta MURAMATSU …… 41

8. Development of Adaptive Driving Beam System
to Achieve Smooth Operation Feel (Part 2)
Yuta MURAMATSU, Noriaki ASANO,
Yu TOMOEDA, Genya OGAWA,
Teruaki YAMAMOTO …… 47

9. Introduction of MBD for SUBARU Power Units —
Shinji KAMIMARU, Daiki TANABE,
Tomohiro TAKADA, Hiroshi ITSUI,
Shuntaro TAKAHASHI, Shunsuke YAMAMOTO,
Go WATANABE, Hironori YUMURA …… 52

10. A Study of the Causal and Acausal Model of the Plant
Modeling in the Body Electronics of Automotive
Kinya HOSHINO, Yuichiro KOGA ····· 60

11. Development of Design Procedure for Planetary Gear Noise
Hiroko AOKI, Yoshikazu MIYOSHI,
Kazuhiro KANDA , Masato OGAWA ····· 68

12. Study on CFRP Application to Vehicle Structural Components
Yuya MUKAINAKANO, Junya IINO,
Hiroshi SHIMOYAMA ····· 73

13. Measurement Results of Transitional Handling Performance
with Bench Measurement System
Ryuma MINE, Toshiyuki HYUGA,
Naoto YABUKI, Masato NAKATAKE ····· 77

14. Study of Driving Stability on Highway using Unsteady Aerodynamics Simulation
Takumi HASEGAWA, Ryuya KOBAYASHI,
Makoto TSUBOKURA, Jun IKEDA ····· 81

15. Development of Telematics System for the United States
Masatoshi TSUGE, Kiyoshige NOGUCHI,
Makoto NIWA, Norihito MACHIDA,
Hiroshi NOMOTO, Noriko SATOH ····· 88

16. Study on Evaluation Method of Three-Way Catalyst
which Reproduces Market Faithfully
Tsutomu NAKANO, Masamitsu KINOSHITA,
Ryo NAGAI, Shunsuke FUKUTOMI ····· 93

17. Solutions to Difficulties on Engine Development Processes
Based on Improvement of Single-Cylinder Engines (Second Report)
Satoru YAMAGUCHI, Tomohiro NAKAYAMA,
Masaaki KATO, Kenta KIMOTO,
Atsuyuki HARAI, Makoto KANEKO ····· 100

18. Development of Welding Technology for Chassis Parts for Improvement of Corrosion Resistance & Fatigue Strength
Tsuguo NAKAZAWA, Satoshi UEDA, Rinsei IKEDA, Tokihiko KATAOKA, Yasutaka SUZUKI, Rie AIHARA, Takashi SYUTO, Satoshi KANOU ····· 105

19. Productivity Improvement in Common Press Machine between Steel and Aluminum based on Fissility Reduction of Aluminum Sheets
Hajime IWANAGA, Hiroshi MOTEGI, Tatsuya YAMADA, Takeshi YOSHIDA ····· 111

20. Development of JAXA D-SEND#2 System ——Tetsuo YAMAZAKI, Toshiyuki NARAHASHI, Yutaka SASAKI ····· 115

21. Development of Self-Propelled Drilling Robot —Masakazu NAITO, Satoshi HAYAKAWA, Keiji TANIDA, Shunsuke SAITO ····· 121

22. Development of Sleeve Fastener Removal Tool —
Manabu SAITO, Hideharu TAKAHASHI, Tatsuo NAKAHATA, Masao WATANABE, Toshio NISHINO ····· 127

23. CAE Analysis in Development of Engine for Industrial Equipment (Review 2)
Norio SUGIURA, Yusuke KITAJIMA ····· 133

24. Introduction of SUBARU BODY in Recent Years —
Yukinori YAGYU, Toshihiro AYABE, Hiroyuki AOTA, Haruyuki IMADA, Masanori IGARASHI ····· 141

25. How was SUBARU Handling Kinematic Analysis of Suspension in the Times when There was No Commercial Software?
Akira NOMURA ····· 149

26. Transition of Automobile Emission Regulations and Fuel Economy Requirements in the United States of America
Hiroshi EGAWA, Mitsuya NISHIYAMA ····· 154

27. How to Train Craftsmen who can See Air Flow —
Akihiko SAKAZAKI, Osamu TAKAHASHI,
Shinya TAKAHASHI ····· 165

28. SUBARU Patent Review ——————— Advanced Engineering Department ····· 171

✦List of Issued Reports ····· 178

新型フォレスターの紹介

Introduction of New SUBARU FORESTER

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

抄　録

フォレスターは1997年の初代誕生以来、お客様の期待に真正面から向き合った“ベストバランスSUV”を目指し開発して来たモデルで、乗用車感覚で誰もが使いこなせる「何でもできる、どこへでも行ける」SUV として地域・年齢・性別を超えて支持され続けてきた。

今回のビックマイナーチェンジでは、これまで高い評価を受けてきた基本コンセプトを継承しつつ、安全、動的質感の向上等を行い、新たな魅力を加えた。その新技術・新機構・従来型からの変化点を紹介する。

Abstract

Since its debut in 1997, SUBARU FORESTER has aimed to be the “best-balanced SUV” that meets customer’s expectations straightforwardly. As a SUV by which “you can do anything and go anywhere”, this model has been well appreciated beyond regions, generations and genders.

This big minor change offers appealing features for better safety and dynamic quality feel, while carrying over the basic concepts.

This article introduces these new technologies and what changes were made.

1.　まえがき

2012年に投入した4代目フォレスター。市場の評価として、従来からの強みである「AWD」「安全性」に加え、「燃費性能」「パッケージング（室内空間）」が新たな売りとなり、新規顧客の獲得に繋がった。今回のビッグマイナーチェンジでは、基本コンセプトを継承しつつ、動的質感の引き上げ、先進装備追加による予防安全性能トップの実現、所有する悦びに繋がる情緒的価値を表現したデザインの採用、各種機能の向上を行うことで新たな魅力を加えた。

2.　開発の狙い

フォレスターは本格SUVとしてのポジションを確立し、30 ～ 40歳代を中心に、各年代から幅広く支持されてきた。

今回の開発では更なる期待に応えるため、時代進化を超える全方位の性能を高め、「安全と愉しさ」に磨きをかけた（**表1**）。

表 1　新型フォレスターの強化ポイント

『安心と愉しさを』支える性能の進化

「本格 SUV」としての優位性をさらに磨き上げる	予防安全	一歩進んだ全方位の安全を提供
	走りの愉しさ	乗り心地と操縦安定性、ドライバビリティの向上
	快適空間の表現	静粛性の向上、安全・快適装備の充実
	燃費	AWD トップクラスを堅持

『安心と愉しさを』デザインで表現

新しい魅力を付加することで存在感を高めた	エクステリアデザイン	・車体のワイド感や SUV らしいリフトアップ感の演出 ・SUV の力強さとキレのあるスポーティー感を融合
	インテリアデザイン	・お客様との接点を大事にしたインテリア ・機能性を高めたコックピットデザイン

3.　デザインの狙い

デザインテーマ「SUVらしさと上質感・先進性の強化」

今回のビックマイナーチェンジでは、フォレスターの持つSUVの力強さとたくましさにさらに磨きをかけるとともに先進的でスポーティーなイメージへと進化、機能と共に造りこまれた上質で洗練された室内空間へと進化させるべくデザインを強化した（**図1**）。

図１　量産モデルのエクステリアとインテリア

3.1　エクステリア

SUVらしいたくましさと先進性を高めたエクステリア

SUVらしい力強さとたくましさに加え、最新技術をまとった精悍で先進性を高めたエクステリアデザインとした(図1)。

3.1.1　ヘッドランプ

上級グレードのヘッドランプは、コンパクトで高性能感溢れるLEDプロジェクタユニットと切れ長のコの字モチーフのポジションランプ/DRLを使い、前方を見据える鷹の目のような眼力ある精悍さを表現し、ワイド感の向上とスタンスの良さを実現した。ベースグレードのヘッドランプも機能向上を図り、新たにコの字モチーフのポジションランプを配置(図2)。

3.1.2　リアコンビネーションランプ

フロントとあわせた立体的なコの字モチーフを採用し非点灯時は赤色でコの字モチーフが見え、点灯時のみ赤色で発光するLEDのクリアーストップランプを採用することでSUVの持つ力強さ車体のワイド感、リフトアップ感を先進的なデザインで表現した(図2)。

図２　LEDフロントヘッドランプとリヤコンビネーションランプ

3.1.3　フロントグリル

SUBARUの特徴であるヘキサゴングリルには、立体感あるクロームの力強いフレームとメッシュグリルに緻密かつ立体的な構成をもつS字モチーフのパターンを採用し、シャープなウイングモチーフ、ヘッドランプとともに新しいスバルの統一感あるフロントフェイスをSUVとしての堂々としたバランスでデザインした(図3)。

3.1.4　フロントバンパー：NAモデル

ブラックのプロテクター部を左右に拡大しワイド感・低重心感を表現したL字型のクローム加飾を配置することで質感も高く、たくましいデザインとした(図3)。

図３　フロントグリルとバンパー

3.1.5　ホイール

18インチホイールは、SUVらしさ、車体をしっかり支える力強さ、伸びやかなスポーティーさを併せ持つデザインとし、切削光輝とブラック塗装の表面処理のコンビネーションで上質かつ精悍なデザインとした。

17インチホイールは、空力性能を追求しながらも立体感が出るデザインの切削光輝とダークカラーのコンビネーションで、力強くかつダイナミックなデザインとした(図4)。

18in

17in

図４　ホイール

3.2　インテリア

機能、先進感、触感にこだわった、上質で洗練されたインテリア空間

機能とともに造りこまれた上質で洗練された室内空間を目指し、仕立てにこだわり、人の触れるインパネ

センタピラーやドアグリップには、ディンプル加工の表皮を配し触感に配慮した。インパネ加飾にはシルバーのフレームとハイグロスブラックのコンビネーション加飾パネルを採用(図5)。

図５　量産モデルのインテリアと詳細

3.2.1　シート

ファブリック表皮は、柄のコントラストを強調し、立体感を高めた(図6)。

本革仕様では、表皮裏のクッション素材に厚みを持たせ、また、土手部の帯面追加と合わせることで、SUVらしい立体的で重厚感のあるシートを実現した。

図６　フロントシート

3.3　新外装色展開

上質さをアピールするセピアブロンズとアクティブなシーンをイメージしたクウォーツブルーパールを新色展開(図7)。

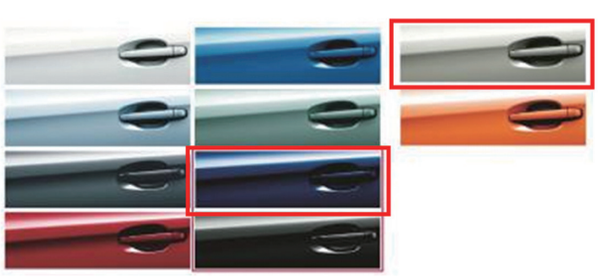


図７　エクステリア カラー

4.　予防安全

アイサイト(Ver3)の採用による機能拡張に加え、ヘッドランプ制御や後側方警戒支援システムを装備。全方位の予防安全技術を搭載し、運転時の負担を大幅に軽減させた(表2)。

表２　予防安全技術

(1) 前方視界	
夜間視界の確保 ・ADB (Adaptive Driving Beam) (日本) ・HBA (High Beam Assist) (北米仕様) ・SRH (Steering Responsive Headlight)	・対象物を自動認識し、配光パターンを切り替える ・ステアリング操作に応じて進行方向を照射
(2) 側方視界	
後側方警戒支援システムの追加 ・SRVD (Subaru Rear Vehicle Detection) ・BSD (Blind Spot Detection)	死角車両検地 車線変更支援 後退時支援
(3) 車両後方	
後方支援機能拡大 ・アイサイト AT 誤後進抑制制御 ・RAB (Reverse Automatic Braking) (北米仕様)	後退時支援

4.1　アイサイトVer3化

レヴォーグ、レガシィに採用したアイサイトVer3をフォレスターの国内、北米にも拡大展開する。さらにアイサイトによるヘッドランプ制御(ADB※1、HBA※2)や後退時自動ブレーキ制御(RAB※3)などの機能拡張を図ると共に、性能向上を狙いワイパーにウエットアームを採用した。

※１ ADB：Adaptive Driving Beam
※２ HBA：High Beam Assist
※３ RAB：Reverse Automatic Braking

4.1.1　ウェットアーム(北米仕様)

厳しい環境下でもアイサイトカメラの認識精度を安定化させるため、助手席側にウェットアームを採用した。ワイパーアームのウォッシャノズルからステレオカメラ前方付近にウォッシャ液を直接噴射することで、ガラス洗浄性を向上させた(図8)。

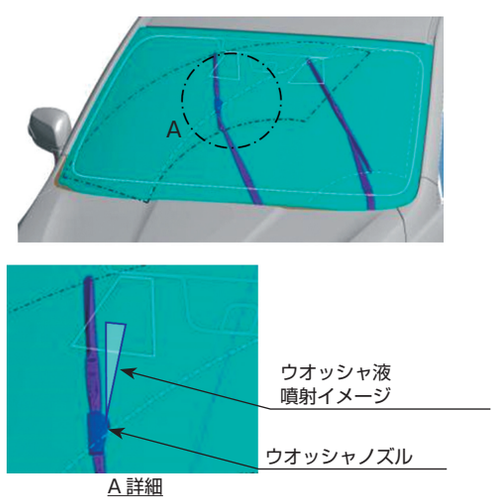


図８　ウェットアーム フロントワイパー

4.1.2　ヘッドランプ

夜間の視認性向上を狙いヘッドランプを新設計し、対象物を自動認識することで配光パターンを切り替えるADB（Adaptive Driving Beam）またはHBA（High Beam Assist）と、ステアリング操作に応じて進行方向を照射することができるSRH（Steering Responsive Headlight）を採用した。

・HBA（High Beam Assist）（北米仕様）

夜間走行時の視認性を向上させるため、車両前方の状況に応じて、アイサイトが先行車や対向車の有無を認識し走行ビームとすれ違いビームを自動で切り替えるHBAを採用した。

本システムを採用することにより、夜間のアイサイト性能も向上する（**図9**）。

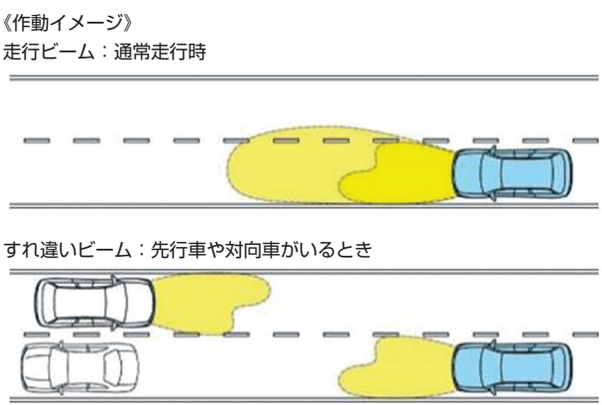


図９　HBA 作動イメージ

ADBとSRHについては別報にて解説しているため本報では割愛する。

4.2　後側方警戒支援システム

後方車両に対する注意喚起・警報を行う3つの機能を有する後側方警戒支援システムを採用した。

・BSD（Blind Spot Detection：死角検知）

Dピラー等の死角に存在する車両を検知

・LCA（Lane Change Assist：車線変更支援）

車線変更時の接近車両を検知

・RCTA（Rear Cross Traffic Alert：後退時支援）

後退時の接近車両を検知

レガシィで採用したシステムをフォレスターに拡大展開。機能詳細はスバル技報No.42にて紹介済み。

4.3　後退時自動ブレーキシステム（北米仕様）

後退時自動ブレーキ機能（RAB：Reverse Automatic Braking）を採用した。

アイサイトの拡張機能として車両後方に対する予防安全性能を大幅に向上させ車両後退時の安心・安全をサポートする。

RAB機能はリアバンパに装着した超音波ソナー（4個）を使用して壁等の後方障害物を検出→衝突可能性が高いと判断した場合は警報音出力とともに自動ブレーキを作動させ、衝突時の被害軽減を図る。

衝突可能性が低い場合は車両後方の障害物に対し距離に応じたパターンの警報音をコンビメータから出力、併せてMFD※4画面上に表示することでドライバに注意喚起する（**図10, 11**）。

※4 MFD：Multi-Function Display

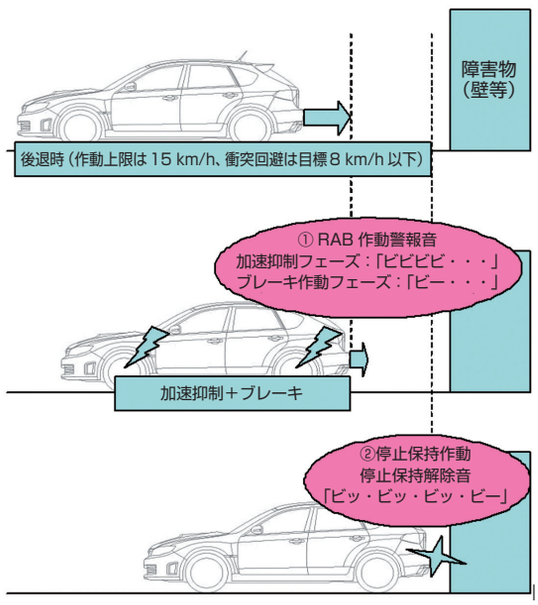


図 10　RAB 作動イメージ

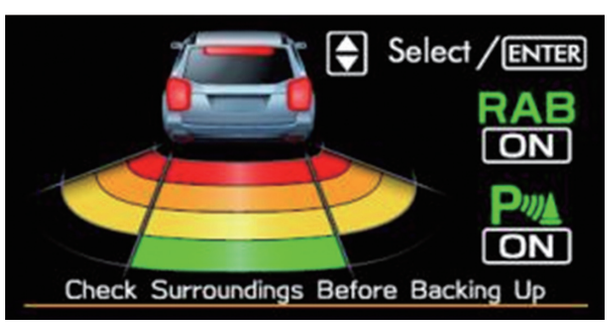


図 11　表示イメージ（MFD）

5.　走りの愉しさの追及

本格「SUV」としての優位性を更に磨き上げるべく、走りの愉しさを追求、乗り心地と操縦安定性を高次元でバランスさせた。

5.1　乗り心地と操縦安定性の最適化

走行時のフラット感及び、操舵時のロール感向上を狙い、以下の改善を実施した。

・フロントストラット＆リヤショックアブソーバのロッドガイドブッシュ、作動油を変更し、フリクションの低減及び極低速度域の減衰立ち上がり応答性を向上させた。
・リヤショックアブソーバ取付位置を外出しし、ダンパ効率を向上させた。

上記構造変更により、ダンパ減衰力を低速度域では高く、高速度域では小さくすることができ、操縦安定性と乗心地改善を両立することができた。

5.2　操舵時の車両応答性の向上

・フロントクロスメンバとアームを締結するブラケットを補剛し、トレッド剛性を向上させた。
・リヤトレーリングリンクのブッシュばね定数を高め、ホイールストローク時のたわみを減少させた。

これらにより操舵初期のブッシュ変形による瞬間的なアライメント変化を抑制し車両の応答性を向上させた(図12)。

5.3　直進安定性の向上

上記車両応答性の向上と合わせ、リヤのトーイン量を再チューニングすることで、寒冷地のスプリットμ路などを走行した際、路面μの差によるリヤタイヤ左右のコーナリングフォース変化幅を減少させ、直進時の安定性を向上させた(図12)。

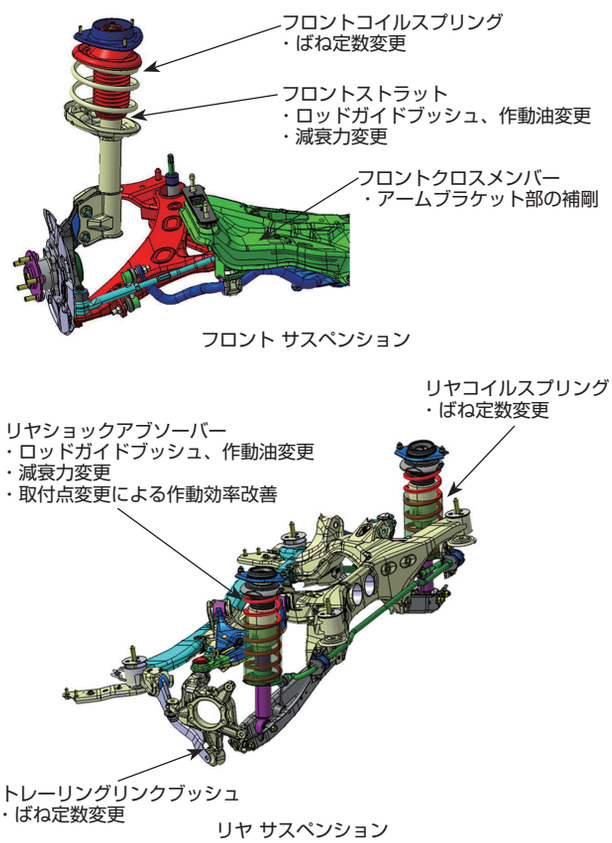


図 12　サスペンション

5.4　取り回し性と操舵フィーリングの向上

ステアリングギア比を従来の15.5：1から14.0：1に変更し、ラウンドアバウトやS字カーブではステアリングを持ち替えせずに通過でき、市街地走行や車庫入れなどの際の取り回しの良さを向上させた。

ステアリングギア比変更とサスペンションのチューニングに合わせてアシスト特性を最適化し、操舵フィーリングを向上させた(図13)。

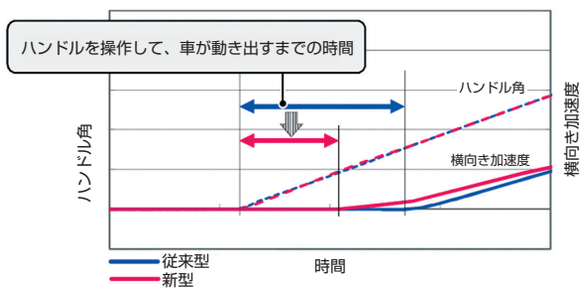


図 13　操舵時の車両応答性向上

5.5　アクティブ・トルク・ベクタリング採用

レヴォーグ、レガシィに採用しているアクティブトルクベクタリングをフォレスターにも採用した。

アンダーステア傾向のコーナリング中に、前後の内輪にブレーキをかけ、相対的に外輪の駆動トルクを多く配分することで、旋回トレース性を向上させた(図14)。

作動状況はMFDで確認できるようにした。

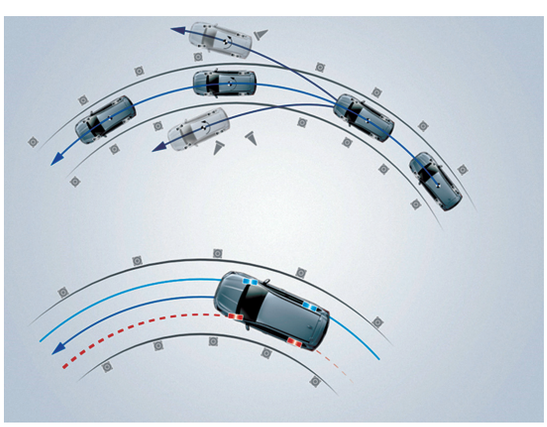


図 14　アクティブ トルク ベクタリング

6.　ドライバビリティの向上

SI-DRIVE の各モードの変速制御を変更し、運転の愉しさを引き上げた。

6.1　オートステップ変速

加速時にドライバーの気持ちとエンジン音、加速の一体感を実現するため、Dレンジ走行中、アクセル低開度時は無段変速、アクセル高開度時はステップ

変速に切り替えるオートステップ変速制御を採用した(図15)。これにより、高速道路への合流等で鋭い加速を行なう際、アクセル操作に対しエンジン回転数が速度より先行して上がってしまうCVT 特有の現象を解消。ドライバーの意志に反したエンジン音の高止まり感を抑えることで、加速時の不快な車内音を低減させるとともに、車速とエンジン音のリニアリティを向上させた(図16)。

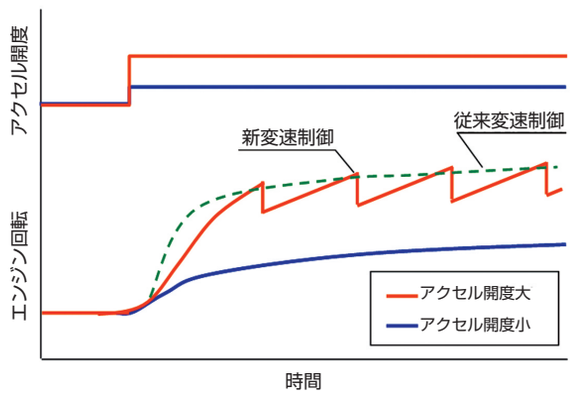


図 15　オートステップ変速制御

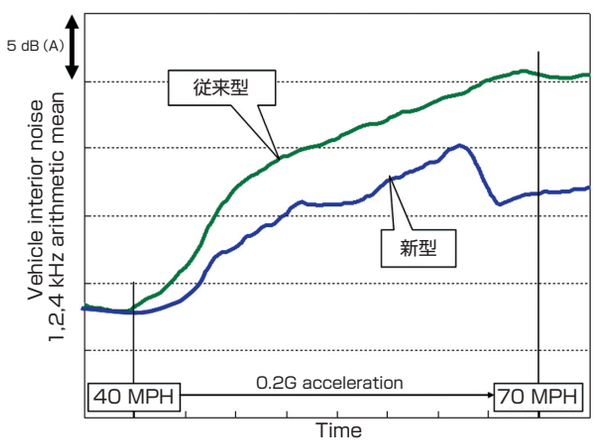


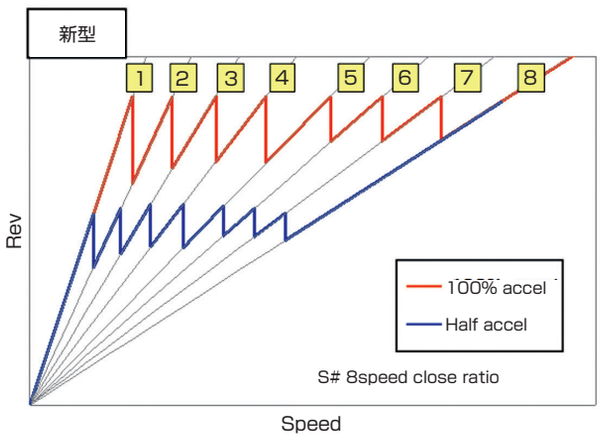
図 16　加速時車内音

6.2　S#モード変速比クロスレシオ化

従来車に引き続き2.0L ターボ車のS#モード選択時は、8速のステップ変速とし、トルクフルな小気味良い走りを愉しめる設定としているが、さらに8速のステップ比をクロス化することにより、パワーバンドをより使いやすい設定とした(図17)。

6.3　前後進ダブルピニオンプラネタリギヤの採用

後退時の登坂や段差乗越え性能を改善するため、レガシィに採用された前後進プラネタリギヤのダブルピニオン構造を新型フォレスターにも採用。2.0L ターボモデル(一部仕向け)用のリニアトロニックに対し、リバースギヤ比をローギヤ化する変更を行った(図18)。



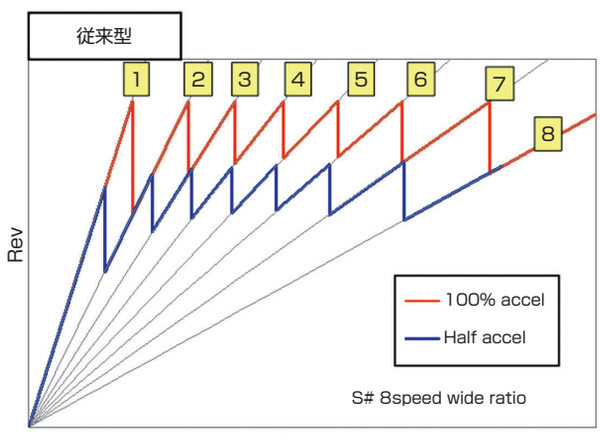


図 17　スポーツ リニアトロニックのシフトパターン

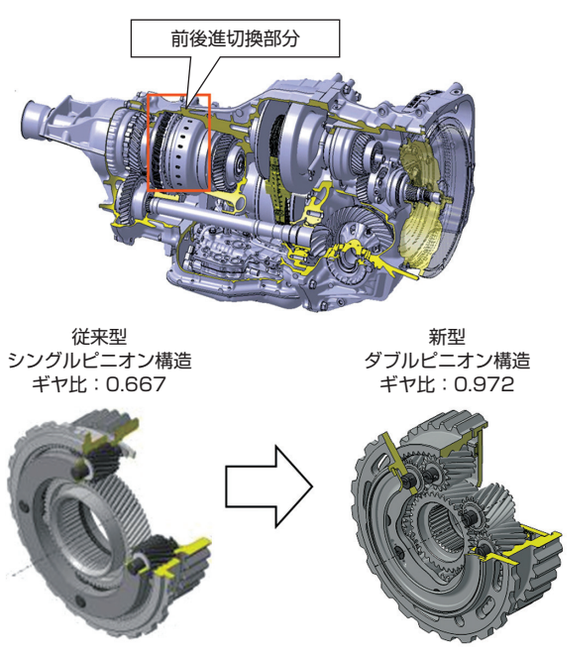


図 18　前後進プラネタリギヤの構造

7.　快適性向上(音・振動性能向上)

車室内の静粛性を高め、走行時の快適性を向上させた(米国仕様)(図19)。

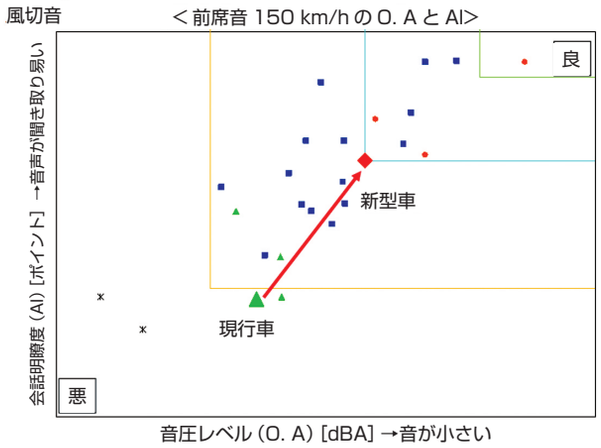
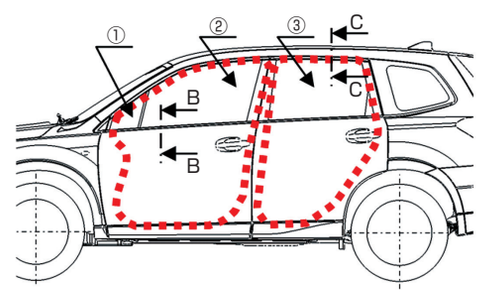


図 19　静粛性改善効果イメージ

7.1　ドア周り部品

車室内への透過音低減を狙い、ドアガラスの板厚を厚くすると共に、ドア周りのウエザーストリップを新設計した。

・窓肩ウェザーストリップ（ガラスの遮音性能向上）
・ドア周りウェザーストリップ（車体の遮音性能向上）
（図20～22）



	従来型 → 新型
①フロントドアパーテーションガラス	：t 3.5→t 4.0
②フロントドアガラス	：t 3.5→t 4.0
③リヤドアガラス	：t 3.1→t 3.5

図 20　ドアガラス板厚変更

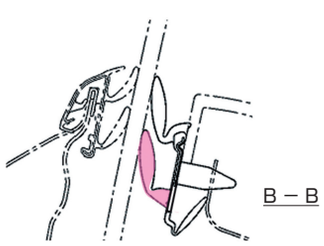


図 21　窓肩ウェザーストリップ断面形状

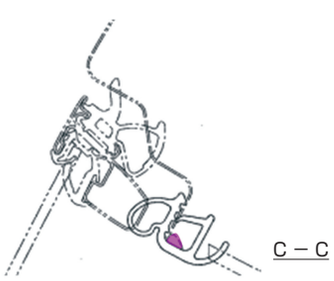


図 22　ドア周りウェザーストリップ断面形状

7.2　内装部品

静粛性を向上させるため、車外音の侵入経路を見直し、遮音材増量やシール強化、吸音材の再配置などを行った。

7.2.1　フロアマット

フロアマットに内蔵している遮音材（オレフィンシート）の板厚を増やした（図23）。

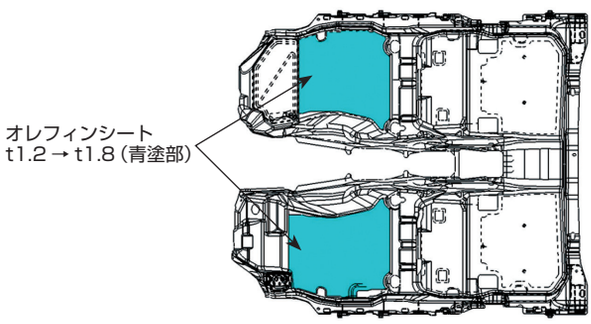


図 23　フロアマット上面視

7.2.2　エプロントリム

エプロントリムにおける音侵入経路を見直し、裏面に遮音材（エプトシーラ）を追加した（図24）。

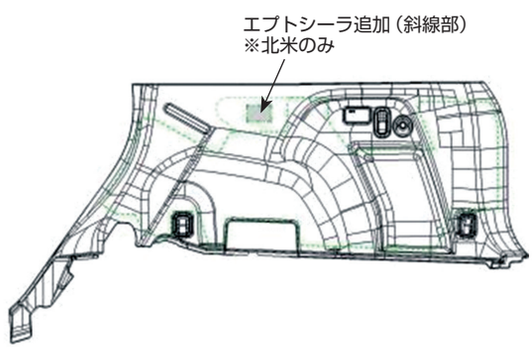


図 24　エプロントリム側面視

7.2.3　トンネルインシュレータ

車外からの透過音を遮断するため、トンネルインシュレータの表皮（遮音層）板厚を増やした（t1.8→t2.0）（図25）。

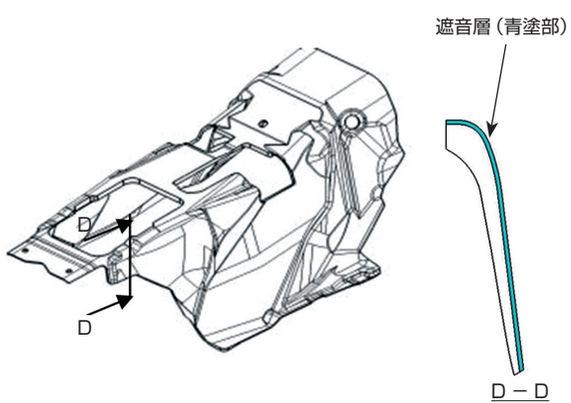


図 25　トンネルインシュレータ

7.2.4　カバートランク

荷室床下からの透過音を軽減するため、裏面に吸音材を追加した(図26)。

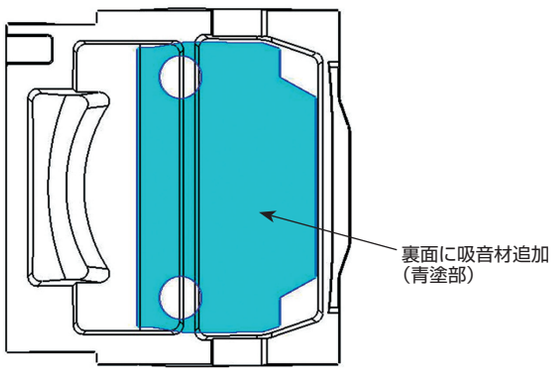
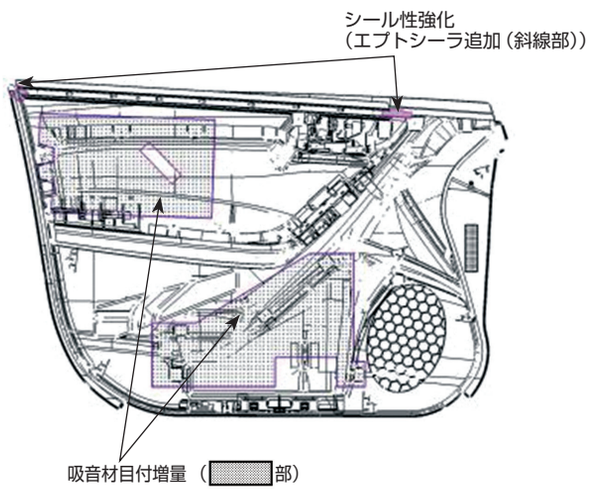


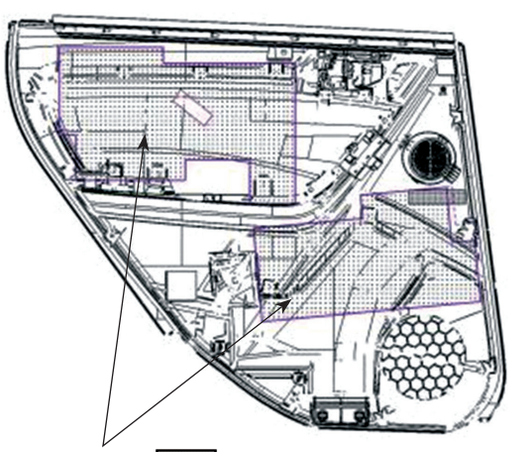
図 26　カバートランク（上面視）

7.2.5　ドアトリム

ドアトリム裏面の吸音材目付を増量(200 g/m^2→300 g/m^2)するとともに、ガラスシール部のシール性を強化した(図27)。



フロントドアトリム 裏面視



リヤドアトリム 裏面視

図 27　ドアトリム 裏面視

7.2.6　インストルメントパネル

インストルメントパネル周りの音の経路を見直し、遮音材強化や吸音材の追加などを行った(図28)。

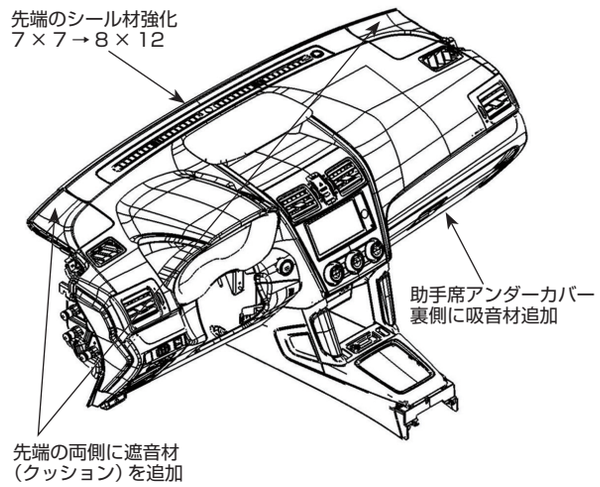


図 28　インストルメントパネル

7.3　床周り部品

車体パネルの制振及び遮音、吸音性能を高めた。

7.3.1　ロードノイズの改善

リヤホイールエプロンの板厚を0.65 mmから0.8 mmにアップすると共に、フロアサイレンサの強化により、ロードノイズを低減し快適性向上を行った。

・前席足元サイレンサの大型化及び厚さ3 mmから4 mmへアップすると共に材質を高比重タイプに変更。
・後席足元サイレンサの追加(図29)。

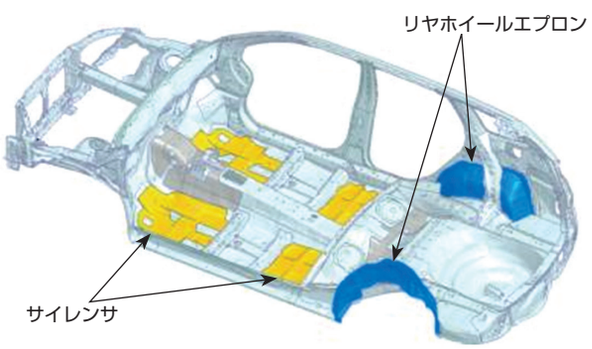


図 29　床周り改善部位

7.3.2　加速時の車内音改善

エンジンルーム内から侵入する放射音に対して改善効果が高いフロントガラス下端部付近のインシュレータを延長し、遮音と吸音性能の向上を行った(図30, 31)。

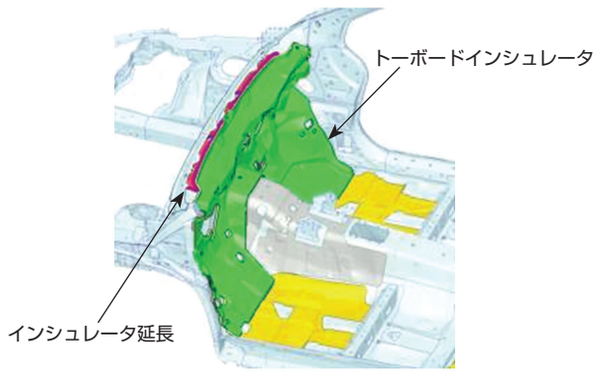


図 30　エンジン放射音改善

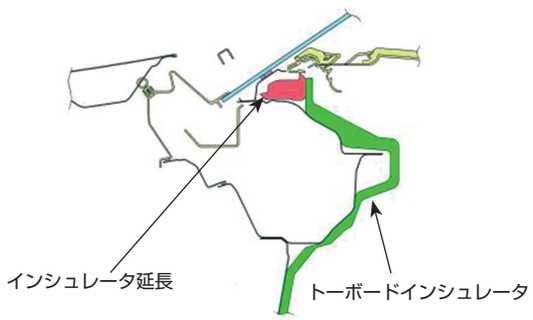


図 31　インシュレータ延長　断面図

7.4　トランスミッション

ケース剛性向上、プーリーのローラーベアリング化、防音カバー形状変更により、チェーン音を低減、オイルポンプロータの歯形を新設計し、オイルポンプ音を低減させた。これにより、走行中にトランスミッションから発生する振動・騒音を抑え、走りの質感を高めた(2.0L NA モデル)。

8.　安全・快適装備の充実

8.1　リヤシートヒータの追加

寒冷地においても快適なドライブを愉しんでいただくため、後席にもシートヒータを開発、設定した。

お好みで、HI-LOW 2段階の切り替えが可能である(図32、図33)。

図 32　リヤシート ヒータ

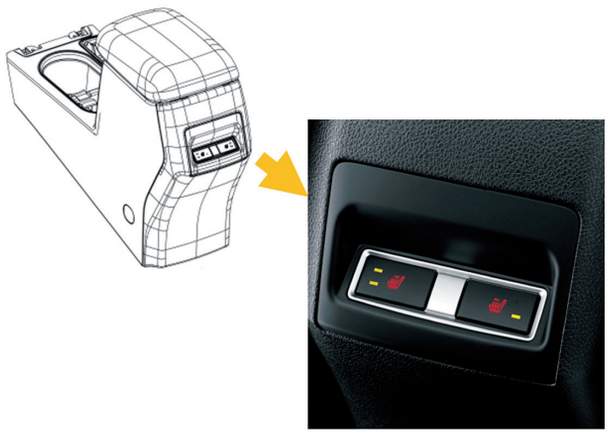


図 33　コンソール、リヤシートヒータスイッチ

8.2　ステアリングヒータの追加

寒い日でも快適なドライビングを実現するため、ステアリングヒータを採用した。

グリップを握った時に指先が触れる部分に電熱線を集中配置し効率良く温め、ヒータ用ECUにて一定温度を保てるようにした。

操作を容易にするため、スイッチをステアリング本体にレイアウトした(図34)。

(1) ステアリングヒータ加温範囲
(2) ステアリングヒータスイッチ

図 34　ステアリング ヒータ

8.3　パワーリヤゲートスイッチへの照明追加

パワーリヤゲートインナースイッチに照明を追加し、夜間時にもスイッチを視認しやすい様に変更した(図35)。

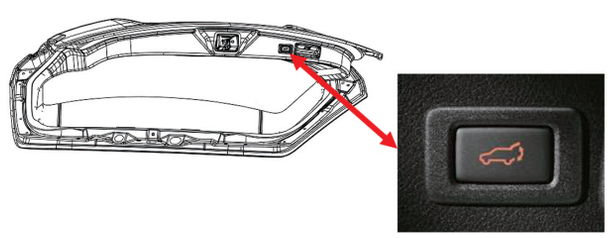


図 35　パワーリヤゲートスイッチ

8.4　運転席シートポジションメモリー機能追加

お客様がご自分のシートポジションを簡単に再現できるよう、シートポジションメモリ機能を追加設定した(図36)。

図 36　　ドアトリム（シートメモリ スイッチ）

8.5　パワーウィンドウにオート開閉機能追加

助手席にオート開閉機能を追加し、ワンタッチで窓の開閉をする事ができるようにした。

8.6　バニティミラーに照明追加

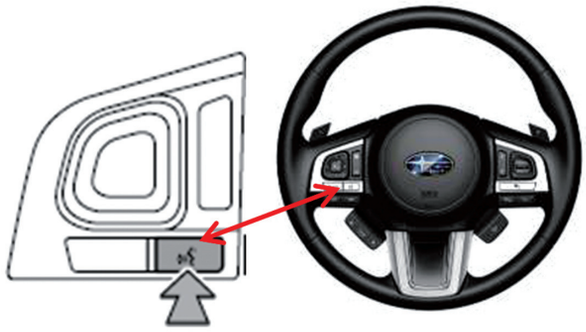
利便性を向上するため、バニティミラー照明付きサンバイザを新設定した(図37)。

図 37　サンバイザ

8.7　Siri Eyes free 対応

車載機とiPhoneをBluetooth接続し、Siri Eyes freeを運転中でも安全に利用できるようにした。

電話をかける、着信メッセージや電子メールを確認する、カレンダーへアクセスする、iTunesライブラリにある楽曲を再生する、スポーツのスコアを取得する、レストランを予約する等を手ではなく音声で操作可能とした(図38)。



対応機種：iPhone4S/5/5S/5C/6/6Plus

図 38　Siri ステアリングの発話スイッチ

ステアリングスイッチの発話スイッチを押すとSiri Eyes free（シリ アイズフリー）が起動する(図39)。

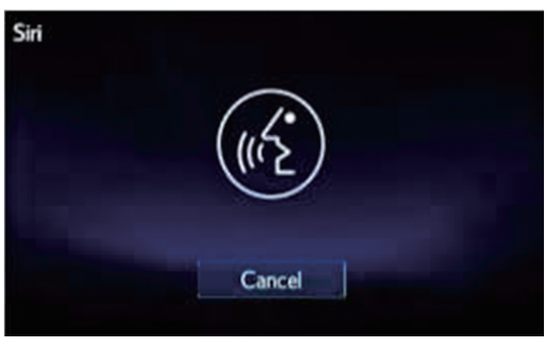


図 39　Siri ヘッドユニットの発話ボタン

または、ヘッドユニットに表示された発話ボタンをタッチすることでも、Siri Eyes freeが起動する。

※起動後の使用例

「○○さんへ電話」と話すと、ハンズフリー通話ができる。

8.8　カラー液晶ディスプレイ付コンビメータ

カラー液晶ディスプレイを内蔵する事により、先進性のあるデザインとし、視認性も向上させた。

また、オープニング画面を新たに設定し、車両乗り込み時のおもてなしに配慮した(図40)。

図 40　カラー液晶ディスプレイ付コンビメータ

9. 燃費向上

SUVトップクラスの燃費性能を維持するため、エンジン、ミッション、車体改善を実施した。

9.1 車体の燃費改善

車体の燃費改善として、
・空力改善
・電気負荷の低減
を行った。

9.1.1 空力改善

17 inアルミホイールは空力性能を考慮した意匠に変更し、床下アンダーカバーをNA車に拡大採用した。さらに、排気系及び燃料タンクのカバー形状、レイアウトを見直し、オイル交換用作業穴にもカバーを追加する事により(図41)、床下面のフラット化を徹底した。

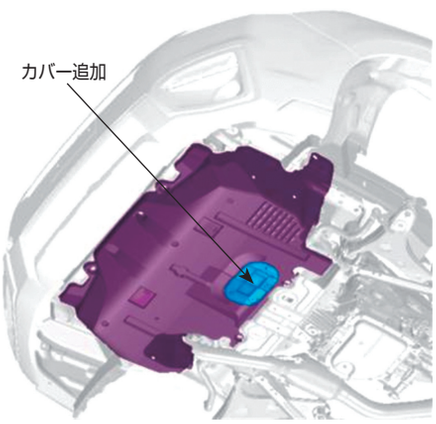


図41 エンジン下アンダーカバー

9.1.2 電気負荷低減

ストップランプにLEDを採用し、電気負荷低減を図った。

10. エンジンの紹介

新型フォレスターに搭載するエンジンは、環境性能の向上と各市場のニーズに応えるラインナップとした。搭載エンジンの諸元と展開仕様一覧を示す(表3)。

10.1 2.5L NAエンジン

2.5L-NAエンジンは新型フォレスターに搭載し、世界のお客様に満足いただける性能を目指して開発を行った。従来のFB25エンジンをベースに、実用域での扱いやすさを重視したトルク設定とした。また更なる高出力化と各国の環境性能向上要望に応え、且つ法規制対応をするために、吸排気系変更や圧縮比アップ、EGRの冷却性能を向上し充填効率を引き上げた。その結果、エンジン構成部品の80%を再設計している。そしてエンジンの振騒低減、軽量化、部品点数の削減、品質向上を実施した(図42)。

表3 エンジン諸元

E/G 型式	FB25	FB20	FA20	EE20
配置	水平対向	水平対向	水平対向	水平対向
燃料供給方式	ポート噴射	ポート噴射	筒内噴射	筒内噴射
使用燃料	レギュラーガソリン	レギュラーガソリン	ハイオク	軽油
気筒数	4気筒	4気筒	4気筒	4気筒
総排気量	2.498 cm^3	1.995 cm^3	1.998 cm^3	1.998 cm^3
吸気方式	自然吸気	自然吸気	過給吸気	過給吸気
弁機構	DOHC 4バルブ	DOHC 4バルブ	DOHC 4バルブ	DOHC 4バルブ
駆動方式	タイミングチェーン	タイミングチェーン	タイミングチェーン	タイミングチェーン
動弁系デバイス機構	吸気 AVCS	吸気 / 排気 AVCS	吸気 / 排気 AVCS	–
ボア×ストローク	94 × 90 mm	84 × 90 mm	86 × 86 mm	86 × 86 mm
圧縮比	10.3 : 1	10.5 : 1	10.6 : 1	13.0 : 1
国内		○	○	
欧州	○	○	○	○
中国	○	○	○	
豪州	○	○	○	○
ロシア、チリ、アルゼンチン等	○	○	○	

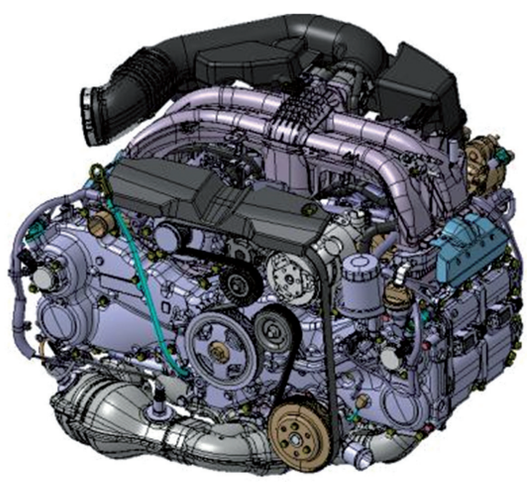


図42 New FB25 (2.5L NA)

主要部品の変更内容を以下に記す。

10.1.1 シリンダヘッド

吸気ポートを高タンブル化した新規形状とし、燃費および出力を向上。また同時に吸気バルブ径アップ(φ34 mm→36 mm)とバルブピッチ拡大(39 mm→41 mm)により、吸気流路面積を拡大している(図43)。

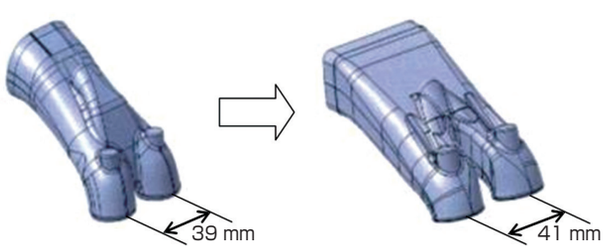


図43 吸気ポート

10.1.2　インテークマニホールド

従来型フォレスター2.5L NAエンジンのインテークマニホールド基本構造は踏襲しつつ、さらなる体積効率向上と吸気タンブル流強化を狙い、TGV（タンブルジェネレーションバルブ）のバルブ位置と吸気ポート形状をよりタンブル志向に変更した。これにより、高回転領域の体積効率と低回転領域の燃焼効率を両立させ、出力および燃費性能向上を実現させた。TGVの偏流させる通路の位置を従来機種より、燃焼室側に変えることで、タンブル指向性を高めている。

また、アルミ製TGVの材料置換（樹脂化）に伴い一体化による軽量化を実施している（図44）。

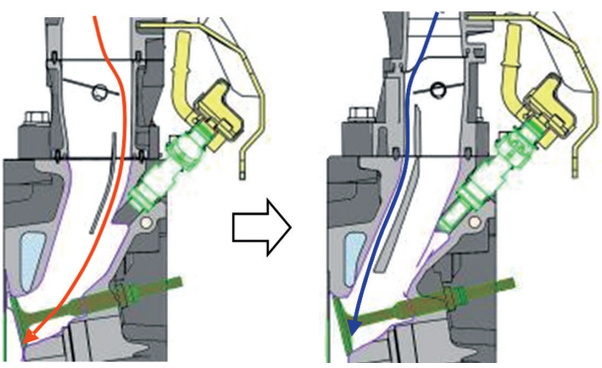


図44　TGV

11.　トランスミッション

11.1　トランスミッション回転抵抗低減

オイルスペーサやフロントバッフルを新採用するとともにプーリーバッフルを拡大、クラッチ潤滑オイル排出穴追加により、オイルによる撹拌抵抗を低減させた（図45）。

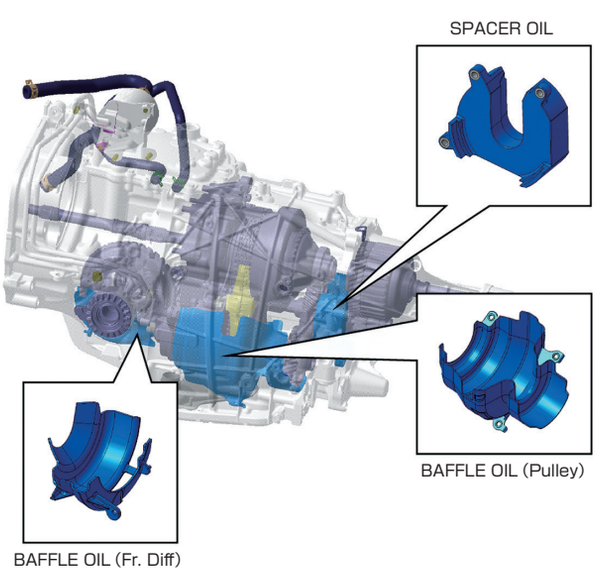


図45　トランスミッション回転抵抗低減部品

11.2　トルクコンバータロックアップダンパ低剛性化

レヴォーグより投入した新ロックアップダンパ構造を採用し、ダンパ特性の低剛性化を実施。これにより、ロックアップ領域の拡大に対応することが可能になり、低燃費とこもり音低減を両立させた。

12.　まとめ

アクティブ感を想起出来る優れた実用性、スポーティなフィーリングを感じさせる走破性の良さ、ワクワク感を感じる事が出来る内外装デザイン、また、快適を体感できる空間設計と、全域にわたり一格上の実力を備えた新型フォレスターは、信頼できる日常の相棒・仲間として、所有するお客様の様々なご期待に応えることができる進化を遂げた。多くのお客様にこのクルマの魅力を味わって頂けると確信している。

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

【著　者】

SUBARU FORESTER
開発プロジェクトチーム

［商品企画本部］	布目　智之
	中山　淳
	山内　直志
	岩﨑　真樹
［デザイン部］	大関　透
［車体設計部］	坂本　実
［外装設計部］	沢田　友孝
［シャシー設計部］	堀越　旭
［内装設計部］	中津　清和
［電子商品設計部］	石田　卓
	香取　雄作
［エンジン設計部］	永野　弾
［トランスミッション設計部］	下中　一彦

新型 SUBARU XV の紹介

Introduction of New SUBARU XV

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

抄　録

XVは、2012年の発売以来、その個性的で力強いデザインと鮮やかなボディカラー展開、実力の伴った本格的な走行性能でお客様の支持を確実に集め、インプレッサシリーズの柱のひとつに成長した。

本稿では、新型XVの主要項目である、内外装デザイン、安全性の強化、走りの愉しさ、快適性の向上を中心に商品紹介を行う。

Abstract

Since its introduction in 2012, SUBARU XV has been firmly supported by customers for its distinctively strong design and bright bodycolor lineup. XV has grown to be one of the main pillars among the Impreza series.

This article describes main features of the New SUBARU XV including the interior and exterior designs, enhanced safety and driving pleasure and improved ride comfort.

1.　まえがき

新型XVは、商品コンセプトを「XVらしさのさらなる追求」とし、XVの魅力をさらなる高みへ昇華させるため、「安心と愉しさ」を際立たせる仕様・装備、性能向上に注力した。

2.　開発の狙い

新型XVでは従来の5つのベネフィットを踏襲しそれをさらに強化することでお客様目線の「バリュー」向上を狙った(図1)。

特に、「都会的存在感とスマートで力強いデザイン」と「トップクラスの安全性能」の継承と強化は最重要と考え、時代に合わせた進化を図った。これにより、従来のユーザー層からの期待に応え、XVユーザーの拡大、ひいてはスバルユーザーの裾野の拡大を狙う。

図1　5つのベネフィット

3. 新型XVデザインの狙い

デザインテーマ 「XV を極める」

2012年に「スポカジ」のデザインコンセプトで登場したXVはグローバル市場で高く評価されている。一方、他銘柄から競合となる都会的コンパクトSUVが次々と発表されている。このような状況を踏まえ、XVの存在感をアピールすべく内外装のデザインを強化した(図2)。

図２ Production model exterior & interior

3.1 プロスペックの機能感と街で映えるファッション性を強化したフロントフェイス

・XVイメージを更に高めるためにオリジナルデザインをベースにメリハリの利いたデザインを採用した(図3)。

図３ Production model exterior

・シャープで立体感を出したフロントグリル、バンパーコーナーの力強さを表現したL字型の加飾、形状に変化を持たせたユニークな黒色部のデザインにより、本格的な機能と街で映えるファッション性を合わせ持つフロントフェイスとした(図4)。

図４ Front design

3.2 特徴的なXVのアルミホイールデザイン

・歯車のようなオリジナルデザインをベースに、躍動感と軽量感を高めたホイールデザイン(図5)とした。

図５ Wheel design

3.3　XVらしいスポカジ内装デザイン

・IMPREZAの内装と明確に差別化を図るとともに、XV専用のスポカジインテリアデザインへ進化させた。
・ステアリングやインパネ加飾の質感を高めるとともに、オレンジステッチによりスポカジのテイストでXVらしいインテリアを演出した。
・HYBRIDモデルはシルバーステッチでクールな先進感を演出した(図6)。

Normal Model

HYBRID Model

図6　Interior design

・シートのサイド部にはプロテクターデザインを施し、外装のクラッディングと共通性を持たせ、タフな使い方にも対応できる機能と外観を両立したデザインとした。XVの専用シートはXVタグを追加設定し、お客様のワクワク感を高めた(図7)。

図7　Interior & seat design

3.4　新いXVをアピールする新外装色

・メインキャラクターカラーは街で映える鮮やかで若々しいハイパーブルーを新設定した。
・タンジェリンオレンジパールやデザートカーキー等とともに、XVらしい多彩なカラーバリエーションを展開した(図8)。

図8　Exterior color

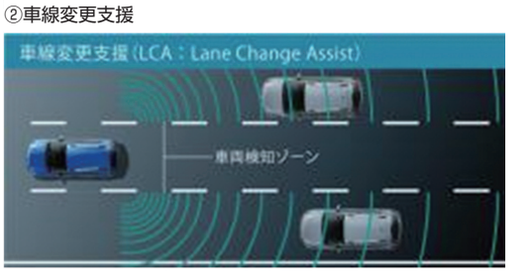
4.　先進安全装備（国内、米国）

4.1　スバルリヤビークルディテクション（SRVD）

EyeSightで築き上げたSUBARUの予防安全思想をさらに拡張させるべく、全周囲予防安全を目指すNext Stepとして、SRVD（図9①～③）を搭載し、後方車両に対する注意喚起・警報を行うことで、お客様に「安全かつ楽しいドライブ」を提供する。

①死角車両検知

②車線変更支援



③後退時支援

図９　SRVD

5.　走りの愉しさ

5.1.1　乗り心地の最適化

フロントストラット＆リヤショックアブソーバのロッドガイドブッシュ、ダンパーオイルを変更し、フリクション特性の最適化、及び減衰力特性の見直しを実施。その結果、車体への入力が低減し、また、振動の収束が速まった事により、タイヤの接地性に優れ、安心感の高い、快適でフラットな乗り心地を実現した（図10、11、12）。

5.1.2　操舵時の車両応答性向上

フロントサスペンションでは、クロスメンバのアーム取付け部ブラケット（図10）の剛性を上げ、路面入力に対するトレッド変化を抑えた。

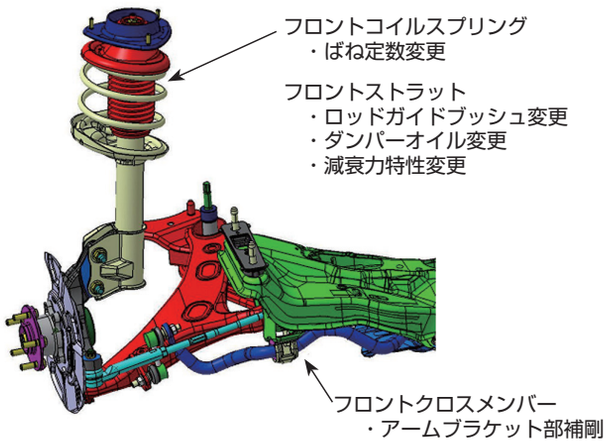


図 10　フロントサスペンション

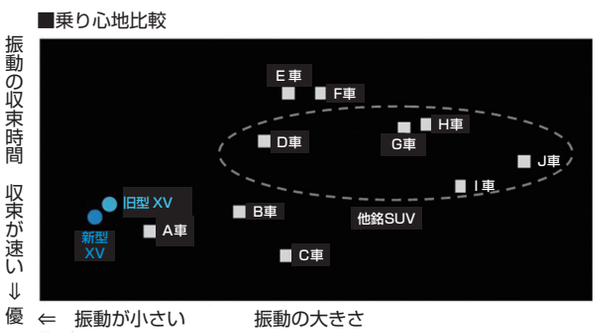


図 11　乗り心地比較

リヤサスペンションではトレーリングリンクブッシュのばね定数を高めて、ホイールストローク時のトー変化を抑える事で、コーナリングパワーの立ち上がりを速めた。

これらの変更により、操舵初期の瞬間的なアライメント変化を抑制し、操舵時のヨーレート応答を向上させた（図12、13）。

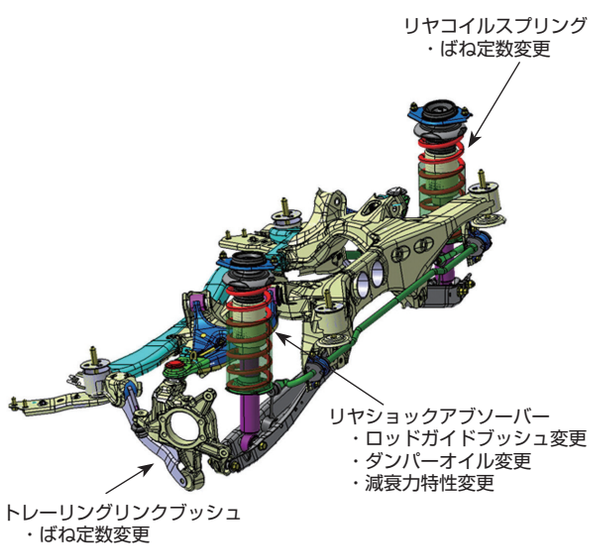


図 12　リヤサスペンション

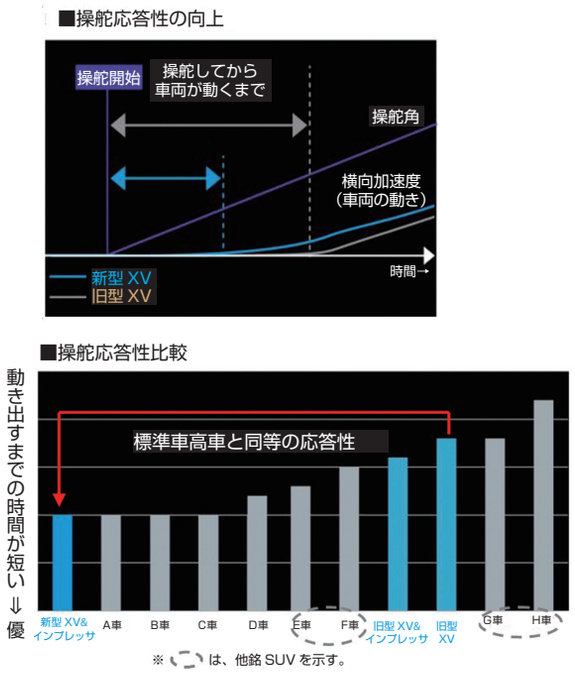


図 13　操舵応答性

5.1.3　直進安定性の向上

リヤのトーイン量を変更することで、寒冷地のスプリットμ路などを走行した際に、路面μの差によって発生する左右リヤタイヤのコーナリングフォース差を低減し、直進安定性を向上させた。

5.1.4　取り回し性と操舵フィーリングの向上

ステアリングギヤ比を従来の15.5：1から14.0：1に変更し、市街地走行や車庫入れなどの際の取り回しの良さを向上させるとともに、キビキビしたハンドリングによる気持ち良さも向上させた。

また、ステアリングギヤ比変更とサスペンションのチューニングに併せて電動パワーステアリングのアシスト特性を最適化し、操舵フィーリングを向上させた(図14)。

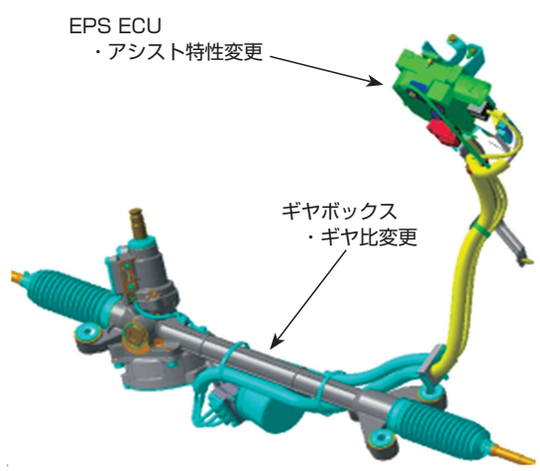


図 14　電動パワーステアリングシステム

5.2.1　ボディの振動・騒音対策

XVの魅力を更に高めるため、静粛性向上を図った。

①前後マッドガードにインシュレータを追加、フロア廻りでは、②後席足元にサイレンサーを追加し振動・騒音の低減を図った。③サイドレール断面内部にインシュレータを採用し、音の車内侵入を防いでいる(図15)。

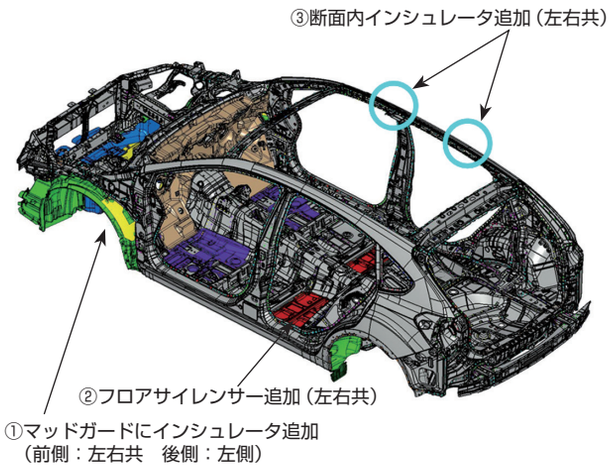


図 15　ボディの振動・騒音対策

5.2.2　外装部品(ガラス・ドア・カウル)

新型XVでは、エクステリア・インテリアのデザイン進化と合わせて、静粛性の向上にも注力しXVの“VALUE”を一段と高めた。

車両前面では、フロントウィンドシールドのガラス中間膜を遮音性中間膜へと変更し、車外透過音を抑制させ静粛性の向上を図った(図16)。

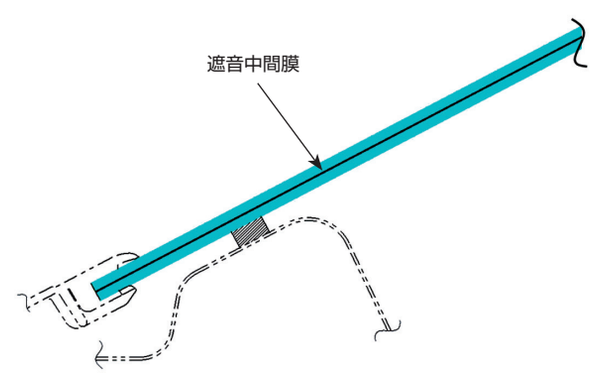


図 16　フロントウィンドシールド断面

カウルパネルでは、内部に吸音材を追加する事で車外透過音の軽減を図った(図17)。

車両側面においては、フロントドアガラスおよびフロントドアパーテーションガラスの板厚を上げ、風切音などの車外騒音の侵入を軽減させた(図18)。

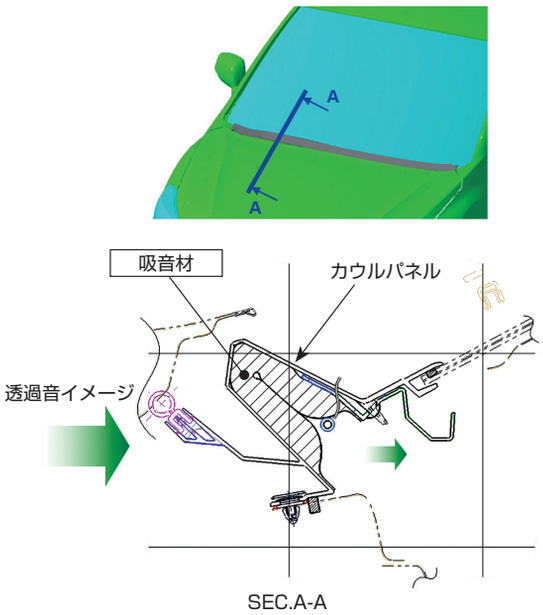


図 17　カウルパネル断面

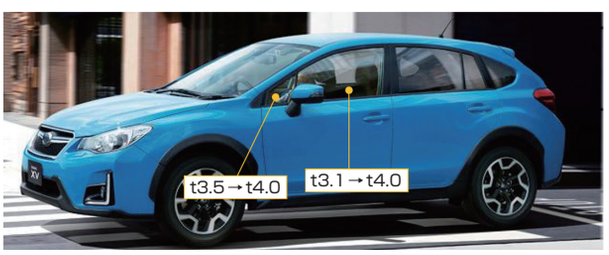


図 18　サイドガラス板厚変更

また、フロント・リヤドアサッシュ内部、ウェザーストリップの吸音材を追加、変更する事でドア廻りの気密性向上を図り、静粛性を向上させた。

加えてウェザーストリップのインナーリップの隔壁を1枚追加し二重化させた。これによりドアを経て侵入する車外騒音を軽減させた(図19)。

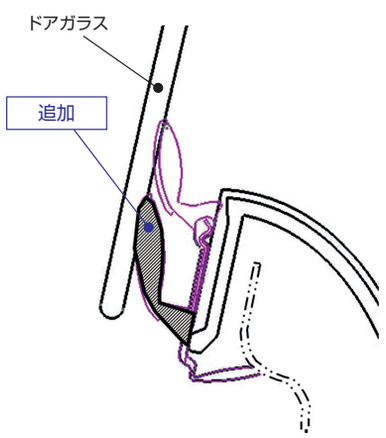


図 19　ウェザーストリップ断面

5.2.3　内装部品

北米向けは、振騒強化を図り、シンサレートをルーフトリム、Dピラートリム、エプロントリムに拡大展開し、フロアマットは遮音性に優れるマスバックタイプに変更した(図20)。

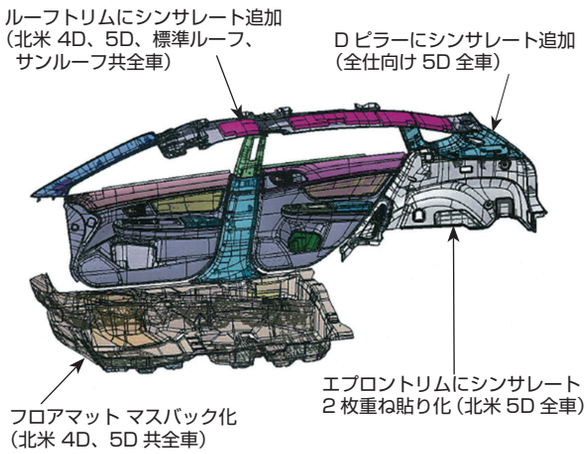


図 20　内装部品の振動騒音対策

6.　まとめ

XVは、2012年の発売以来、世界中の市場で好評を得ており、今回の新型XVにおいても世界中のお客様に満足いただけるものと確信しております。最後に関係各位のご尽力に対し、深く感謝し、紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

【著　者】

SUBARU XV開発プロジェクトチーム

[商品企画本部]	高津　益夫
	宮　　芳隆
[デザイン部]	中村　真一
[車体設計部]	柳生　幸徳
	星野　　司
	諏訪　恭平
[外装設計部]	小松崎啓之
	高山　圭介
[シャシー設計部]	中田　浩之
[内装設計部]	森岡　勇人

レヴォーグ/WRX S4　年改モデル（B 型）の紹介 ～アドバンスドセイフティパッケージについて～

Introduction of LEVORG/WRX S4 Annual Change Model (B-Type) Advanced Safety Package

SUBARU LEVORG/WRX S4 開発プロジェクトチーム
SUBARU LEVORG/WRX S4 Project Team

抄　録

B型レヴォーグ/WRX S4からスバル初となる『アドバンスドセイフティパッケージ』を採用した。

安全・安心を追及するスバルの基本コンセプト『SUBARU ALL-AROUND SAFETY』としてアイサイトを補完する4つの安全デバイスで構成され、全グレードにOP設定として展開した。

1.ハイビームアシスト
2.サイドビューモニター
3.アイサイトアシストモニター
4.スバルリアビークルディテクション

それぞれの機能詳細について紹介する

Abstract

LEVORG/WRX S4 B-Type is the first SUBARU model that adopted “Advanced Safety Package”.

With the basic safety concept “SUBARU ALL-AROUND SAFETY”in mind, this package supplements EyeSight with four safety devices provided as optional features to all LEVORG grades: 1. HighBeam Assist; 2. Side View Monitor; 3. EyeSight Assist Monitor; 4. SUBARU Rear Vehicle Detection. This article introduces the details.

1.　まえがき

SUBARUの安全への取り組みは、危険回避性能や衝突安全性能はもちろんのこと、予防安全を強化して『事故を起こさないクルマ』造りを目指している。

本章では、LEVORG/S4の1年目の年次改良で採用した4つのデバイスについて、それぞれの機能を紹介する。

2.　開発の狙い

総合安全の分野は日進月歩で進化し続けており、常にTOPレベルを維持するSUBARUにとって、運転支援システム『アイサイト』ではカバーしきれない後方・側方の死角が課題であった。これらを可視化または検知しお知らせする装備を採用して『アイサイト』を補完、全方位の安全性能を高めると共に『アイサイト』自体の作動状況もモニタリングし易いように表示系に改善を加えた。これらによって、ドライバーを支援し、さらなる安心と愉しさを提供するべく開発した。

3.　装備概要

以下4つの先進デバイスで構成されている。

1.ハイビームアシスト
　夜間の走行において、ヘッドランプのハイビーム／ロービームを自動的に切り替える装備。
2.サイドビューモニター
　助手席側前方の不可視エリアの画像を室内のモニ

ターに映し出し、死角を可視化する装備。
3.アイサイトアシストモニター
フロントガラス下方にアイサイトの作動状態を投影表示する簡易型ヘッドアップディスプレイ。
4.スバルリアビークルディテクション（SRVD）
レーダーにより後側方から接近するクルマを検知してドライバーに音と光で知らせる装備。

なお、4.SRVDについては42号で紹介済みなので、本章では割愛する。

3.1　ハイビームアシスト

3.1.1　ハイビームアシストの目的

ハイビームアシストは、夜間事故の未然防止を目的としたシステムである。平成27年の事故統計[(1)]によると、夜間対歩行者発生事故の97%がロービーム点灯状態であり、うち約50%はハイビーム点灯で事故を回避できた可能性があったと指摘している。裏付けとして、運転歴20年以上の被験者5名に夜間ロービーム状態で走行実験[(2)]をした結果、時速80 km/hにて障害物認知～停車に至るまでの距離はハイビーム比で平均76.4 m長くなり、時速100 km/hでは3/5名が障害物に衝突し、ロービーム点灯走行による認知遅れが立証されている。よって、夜間事故防止には可能な限りハイビーム照射を行い、対象物を早期認知する事が重要である。

一方、ドライバーがハイビームに切替え難い理由として、点灯を忘れる／ハイビーム消灯忘れにより相手ドライバーが眩惑し、嫌悪感を与える／咄嗟の切り替え操作に反応出来ない／自分は大丈夫と言う独善感を抱く傾向が慢性化している。

上述より、当社では夜間のハイビーム照射を自動且つ適切に行う制御を構築し、ドライバーに広範囲の路面情報把握／切り替え操作負担軽減により安心感を与え、夜間事故の未然防止に寄与させるためハイビームアシスト開発に着手した。

3.1.2　システム構成

図1で示すハイビームアシスト用カメラで夜間に車両前方の光源を検出し、先行車、対向車、街灯等を識別してハイビーム／ロービームの切り替え判断を行う。ハイビームアシスト用カメラは判断結果を車両ネットワークを介してボディコントロールユニットに送信、ボディコントロールユニットでメーター表示要求、ヘッドライトの切り替えをコントロールする。図2参照。

3.1.3　作動条件

操作と切り替え条件を満たす事で自動的にハイビームへの切り替えを行う。

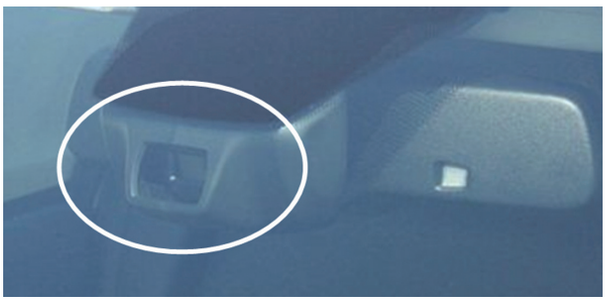


図1　ハイビームアシスト用カメラ外観

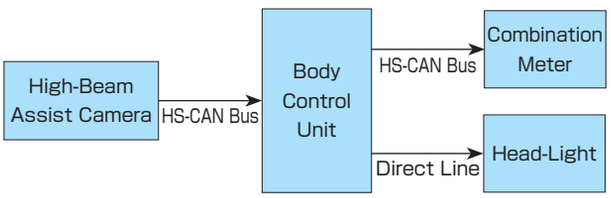


図2　ハイビームアシストシステム構成図

【操作】
ライトスイッチを『Auto』ポジションかつ『Hi』ポジションにセット
【ハイビーム切り替え条件】
・一定車速以上の時（国内40 km/h、欧州55 km/h ～）
・市街地等の街灯がなく周囲の照度が一定以下の時
・先行／対向車、街灯等（定数）光源を検出しない時
上記条件の成立が継続した場合ハイビームに復帰する。

3.1.4　市場環境への対応

当社のハイビームアシストを各国へ展開するにあたり各々の環境に応じて最適化が必要であった。要因は2つあり、①市場環境の違い②ドライバー嗜好の違いである。

① 市場環境面では法定車速／カーブ・坂道頻度／市街地／街灯／発光体の強さ／色味／反射板色／間隔等で各国に差がある。日本特有の例として、図3に示す見通しの良い高速道の標識／反射板／街灯等の出現頻度が高い中で、中央分離帯越しに見え隠れする対向車や遠方の先行車認識が難しかった。また、図4に示す降雪地域では自発光式のスノーポール／路肩表示版等が設置されており、非常に明るい赤／アンバー／緑系の発光物及びそれらの配置パターン等種々の組合せにより、不要なロービーム切り替え、高頻度な切り替え動作（ハンチング）を増やす誤反応の要因となっていた。

② 各国ドライバー特有の嗜好性の違いにより、灯体の認識遅れやHiビーム復帰遅延に起因した不快感をドライバーに与える可能性があった。

図３　高速道路の環境例

図４　降雪地域の環境例

本課題解決に向け、当社では各国の研究所を拠点としたリアルワールドでの夜間走行試験を繰返し行い、灯体／反射板の配置パターンを組み合わせた各場面に於けるロー／ハイビームの要求性能を灯体判定算法にフィードバックする事で誤反応の抑制を図った。

また、各国駐在員の協力を得て嗜好性を調査／検証し、最適化を行った。その他、市街地での不要な切り替えを避け、郊外で適切に反応する作動車速ロジックを各仕向地別に展開した。

3.1.5　まとめ

最後に、夜間視界への寄与度を検証した結果を図５に示す。ハイビームアシスト制御のハイビーム照射時間は手動切り替え（各被験者）比で平均2倍以上長く、夜間の運転視界確保に貢献するシステムである。

今後、ヘッドライト／カメラ性能等各デバイス技術向上により運転支援システムの活用幅を増やし、世界各国のドライバーが夜間運転時の安心／安全を高次元で体感出来るシステム構築に向け、0次安全開発の一翼を担って行きたい。

3.2　サイドビューモニター

サイドビューモニターとは、助手席側ドアミラーにカメラを設定し、その映像をマルチファンクションディスプレイ（以下、MFD）に表示することで、運転席からは見えにくい助手席側前方の不可視エリアを視覚的に把握できるシステムである。

3.2.1　本システムの目的

SUBARUの全ての車両は0次安全の思想に基づき、運転手の視界確保を徹底的に追求したレイアウトとなっている。しかし、車両構造上ドライバーが確認し難い“死角”はどうしても存在してしまう。サイドビューモニターは、この死角の代表的なエリアである助手席側フロントタイヤ横付近をカメラで撮像し、その映像をMFDに表示させることで、運転席からは状況を確認できない領域を、ドライバーが直接視覚的に確認できるシステムである。図６はサイドビューモニターが威力を発揮するシチュエーションの一例であるが、いずれもドライバーが確認したくてもできなかった状況において、ドライバーの運転を確実にサポートできるシステムとなっている。

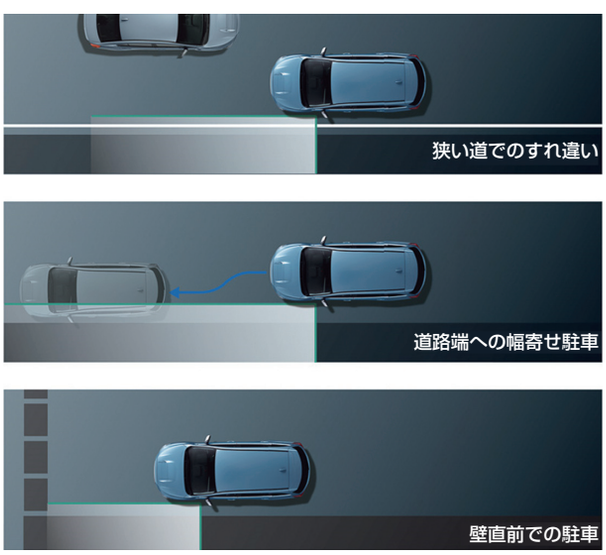


図６　サイドビューモニターが有効なシチュエーション

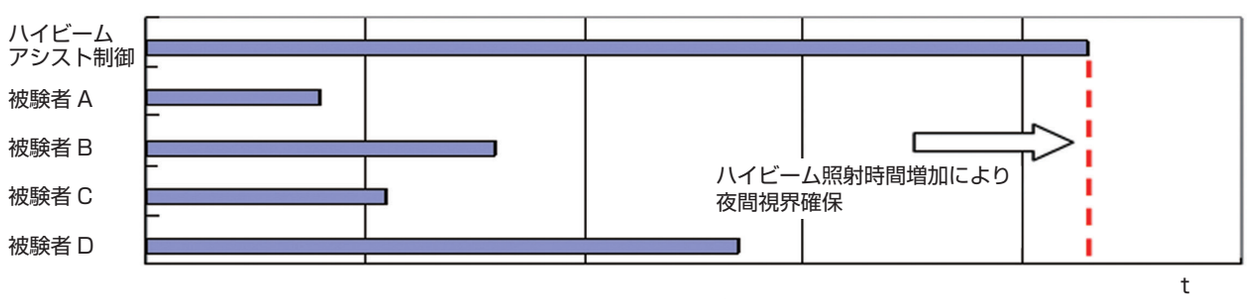


図５　規定ルート走行時のハイビーム照射時間

3.2.2　システム構成

図7にシステム構成を示す。カメラの映像信号はMFDに送られ、MFDにて画像処理を行い表示する仕組みである。カメラ映像への切り替えはMFDスイッチにて行う。カメラはドアミラー本体下部に車両前方を向いた形で装着している（図8）。

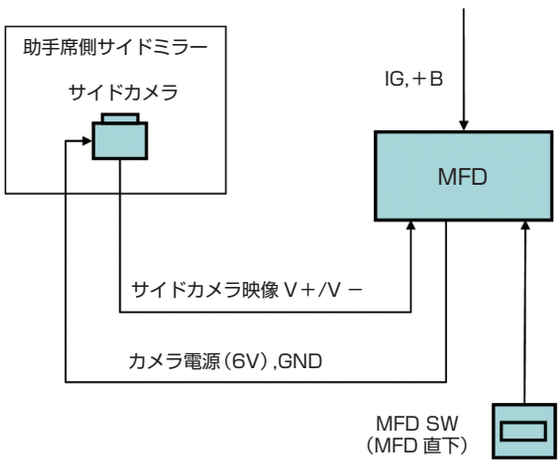


図７　SVM システム構成

図８　ドアミラーに装着されたカメラ

ドアミラーに装着されたカメラは助手席側車両側面から1.3 m、車両前面から6 mの必要視野（画角）範囲を包括する領域をMFDへ表示させている（図9）。

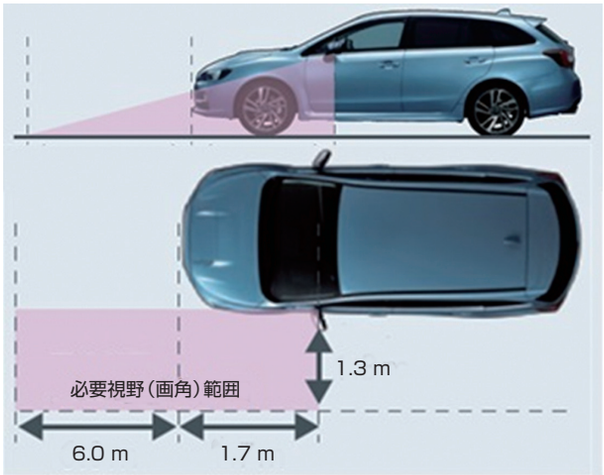


図９　サイドビューモニター必要視野（画角）範囲

3.2.3　機能概要

サイドビューモニターの映像表示は前進時と後退時にて制御が異なる。前進時においては、車速20 km/h以下で走行中、MFDスイッチを押したときにカメラ映像表示（図10参照）へ画面遷移する仕様となっている。カメラ映像表示中に車速が20 km/hを超えたり、表示時間が3分を超えた場合、カメラ映像表示を止めてMFD基本画面へ遷移する仕様となっている。

これは車速が高い状況においてカメラの映像を表示させてしまったり、カメラ映像を表示し続けた場合、ドライバーの視線がMFDに向いてしまい、かえって危険感を与える可能性が有るためである。後退時においてはギヤをリバースレンジに入れた時にMFD画面がカメラ映像表示へ遷移する仕様となっており、利便性を向上させている。

図 10　MFD 表示

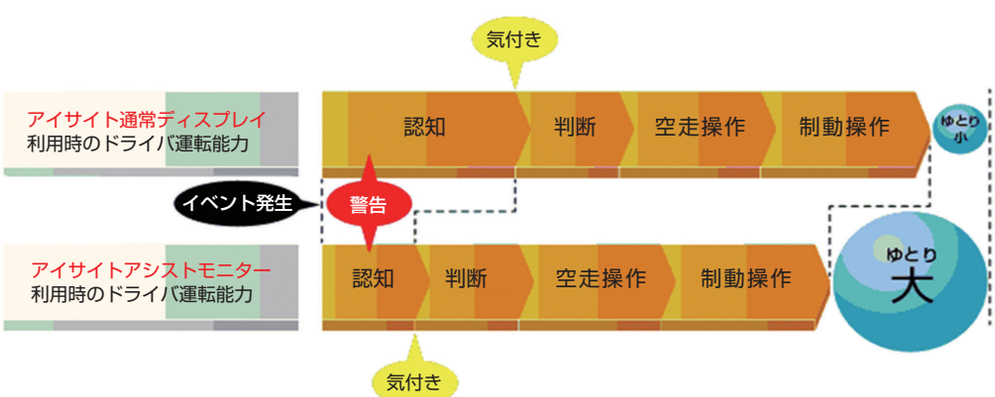


図 11　アイサイトアシストモニターの効果イメージ

3.3 アイサイトアシストモニター

アイサイトアシストモニターは、フロントガラスにLEDの光を反射させてドライバーに情報を伝える簡易型ヘッドアップディスプレイである。

アイサイトの作動状態や警告をより早く、分かり易くドライバーに伝えることで、安全・安心して運転できることを狙いとしている。

3.3.1 本システムの目的

アイサイトの作動状態や警告をシンプルに、緊急性の高い情報に絞って早くドライバーに伝えることを目的としている。運転中の周辺視野の中に情報を虚像として表示することで、ドライバーは、より少ない視線移動で情報を認知することができ、より早く危険回避のための操作に繋げられるようになる（図11）。

3.3.2 システム構成

アイサイトアシストモニターは、インパネ先端に搭載している。LEDの発光をフロントガラスに反射させ、表示（虚像）をドライバーに視認させている（図12、13）。

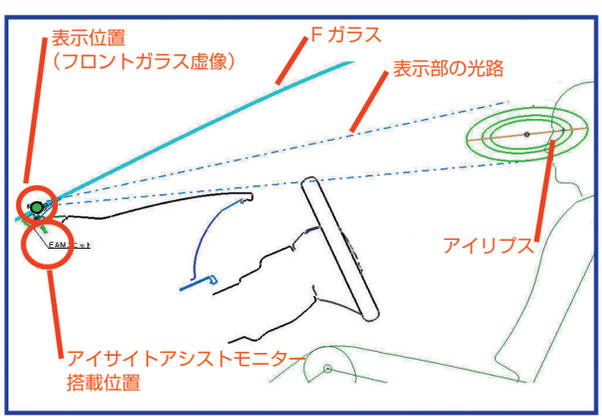


図 12 アイサイトアシストモニター投影模式図

図 13 アイサイトアシストモニター搭載図

表示のシステム構成を図14に示す。アイサイトからCAN通信で送られてくる情報を、アイサイトアシストモニターが受信し表示を行う。また、各種表示のON/OFFカスタマイズ設定はメーターで行う。

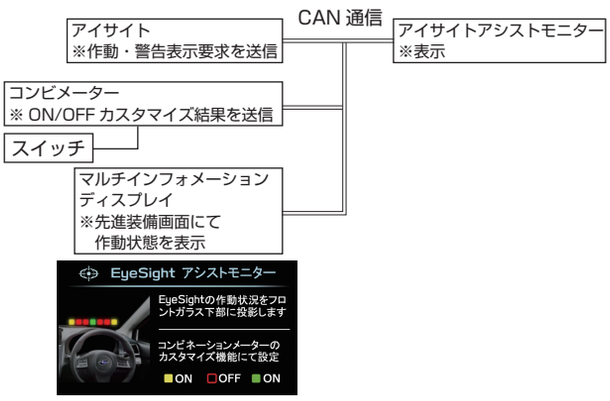


図 14 システム構成図

3.3.3 機能概要

アイサイトアシストモニターの機能概要を表1に示す。ドライバーに直感的に警告内容が伝わるように、シンプルに表示することに配慮した（図15）。

追従走行時に常時点灯する緑のLEDについては、イルミネーションコントロールスイッチで明るさの調整が可能で夜間時の煩わしさを回避。黄色のLEDは左端と右端に1灯ずつ配置し、車線逸脱警報を行う際、逸脱している側のLEDを点滅、反対側を点灯させることで、逸脱している方向も通知する。

また、各色毎に、ON/OFFを選択できるカスタマイズ機能を設け、お客様の使い勝手にも配慮した。

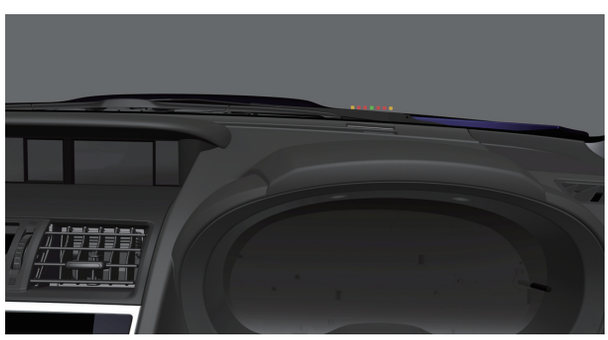


図 15 点灯イメージ

4. あとがき

乗る人すべての安全を何よりも大切にし、事故のない未来を創る。そこには常に人を中心にしたクルマ造りがあります。

本章で紹介した先進安全装備は他のSUBARU車にも順次 横展開を始めています。また、今後も更に最新装備の開発を継続、搭載していきます。すべてはSUBARU車を選んで頂いたお客様にこの上ない満足感と「所有する悦び」を、そして真の「安心と愉しさ」を提供したい、という思いからです。こういった我々

表１　アイサイトアシストモニター機能概要

表示色	動　作	イメージ	状　態
緑	点　灯	■	全車速追従機能付きクルーズコントロール使用中で 先行車を確認しているとき
赤	同時点滅	■■　■■	車間距離警報、プリクラッシュブレーキ（１次及び２次ブレーキ）、ブレーキ踏み増し要求警報、AT 誤発進制御が作動したとき
黄	同時点滅	■　■	一定時間、ハンドル操作を検知できなかったとき 前方カーブ限界お知らせが出たとき
	交互点滅		ふらつき警報が作動したとき
	片側点滅		逸脱回避要求警報、車線逸脱警報が作動したとき （逸脱している側が点滅、逸脱していない側は点灯）

技術者の思いが少しでもご理解頂ければ幸いです。

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

参考文献

(1) 茨城県警察本部交通企画課：ライト切り替えによる交通事故防止
平成27年11月末,交通安全かわら版　号外(2015)
(2) 日本自動車連盟：見えない！止まれない！ロービームの限界を知る(2013)

【著　者】

SUBARU LEVORG/WRX S4
開発プロジェクトチーム

［商品企画本部］　熊谷　泰典
　　卯埜　敏雄
［車両研究実験第２部］　大関　　実
　　浅井　恵二
　　坂口　貴浩
　　佐藤　秀樹
［電子プラットフォーム設計部］　青木　勇人
［電子商品設計部］　山崎まひろ
　　藤原　量太
　　早川　有香
［先進安全設計部］　上田　大輔
　　高木　秀倫
　　水谷　公一
　　小西　英祐
［外装設計部］　片山　幸信
［車両研究実験第４部］　野本　和男

WRX S4 SporVita デザイン開発

Development of WRX S4 SporVita Design

中　村　卓　生*
Takao NAKAMURA

抄　録

一昨年FMCを果たしたWRX S4は、スバルが様々なレース活動で培ってきた走りのパフォーマンスを、だれでも気軽に体感できる車である。上質な乗り味、環境性能、スバルの誇る安全技術を高次元で融合させている。WRX STiとの商品性の違いを際立たせ、新たなお客様を開拓するため、イタリアンテイストの華やかなデザインを採用した。ハイパフォーマンスのクルマを「余裕をもって楽しむ」と言うスバルとして新たな領域での付加価値創造を行った。そのデザイン開発を以下に紹介する。

Abstract

WRX S4, full model changed two years ago, is a car in which anyone can experience Subaru's race car pedigree performances built in various races. This model fuses high quality ride, environmentally friendly performance and Subaru's proud safety technology at high levels. To differentiate it from WRX STi and acquire new customers, we have adopted rich Italian tastes and created an extra value in a new field of "enjoy vehicles comfortably".

1．まえがき

スバルでは、お客様に提供する価値として「安心と楽しさ」を約束している。その愉しさの部分を最大化したのが今回紹介するスポルヴィータ(SporVita)である。

安心と愉しさの価値を表現する作法として、デザインでは「Dynamic × Solid」をフィロソフィーとして掲げている。これをカラーデザインとして因数分解し、「インパクトと深み」と定義づけている。インパクトは、一瞬で人を惹き付ける魅力。そして深みは、機能や安心感、温かみ等、じんわりと時間をかけて感じる要素である。外から見ても感じる華やかさ、実際に運転してわかる機能性の高さと充実感。これらを併せ持ったのがスポルヴィータである(図1、図2)。

図1　New WRX S4 SporVita Exterior

図2　New WRX S4 SporVita Interior

＊ デザイン部

2. インテリアデザインの狙い

新型WRX S4は上質な乗り味、時代が求める環境性能、スバルの誇る安全技術を高次元で融合させている。

その洗練された性能の高さから、従来のWRXファンだけでなく、欧州車から乗り換えて頂くお客様も多い。しかし、性能面では期待に沿っている一方で、内装質感についてはお客様の高い期待に対し、不足している実状がある。そこでWRX S4の商品性を明確に打ち出すため、今回のスポルヴィータを企画した。

デザインの狙いは、ハイパフォーマンスのクルマを「余裕をもって楽しむ」と言う、付加価値の高いオンリーワンの商品に仕立てる事である。

具体的には、華やかなワクワクする内装の提案を模索した。そしてパートナーとして選んだのがイタリアの老舗で、多くの高級車メーカーでの実績もあるマリオレビ社である。69年の歴史を持ち、革の鞣しから縫製まで一貫生産している、数少ない専門サプライヤーである。マリオレビ社の革を見て、触って、感じたのは、イタリアの革ならではの発色の良さ、ツヤ、香り。まさに「インパクトと深み」に繋がる質の良さであった。日本のスバルデザインとイタリアのマリオレビ社が出会い、作り上げた結晶がスポルヴィータである（図2）。

3. 専用シートデザイン

タンもブラックも新たに新色を設定し、2トーンカラーの専用本革シートデザインを採用した。シートで特にこだわったのは、ボルスター部におけるブラックとタンの分割ラインである。丸みを帯びると可愛くなり過ぎ、シャープにし過ぎると、華やかさが表現できない。生産性も考慮しながらカーブを何度も引き直し、議論や試作を繰り返し、ようやく実現した（図3）。

また、シートの肩口に取付ける専用タグもこだわりの1つである。ブラックのベース生地にイタリアントリコロールを配色し、お客様の所有欲をくすぐるアクセントとしている（図4）。

シート全体としては、肩口周りの立体表現には非常にこだわった。なぜなら車両を外から見た際の、窓越しのインパクトに直結するからである。この部位には、型紙を小さく作り、立体縫製を行うイタリアならではの技術が凝縮されている。まるで、イタリアンスーツの様な絶妙のフィット感がある。そのため、シートカバーリングの最終工程では、1脚づつ手作業による仕上げが必要となった。これにより今までにない仕上がりを実現する事が出来た。

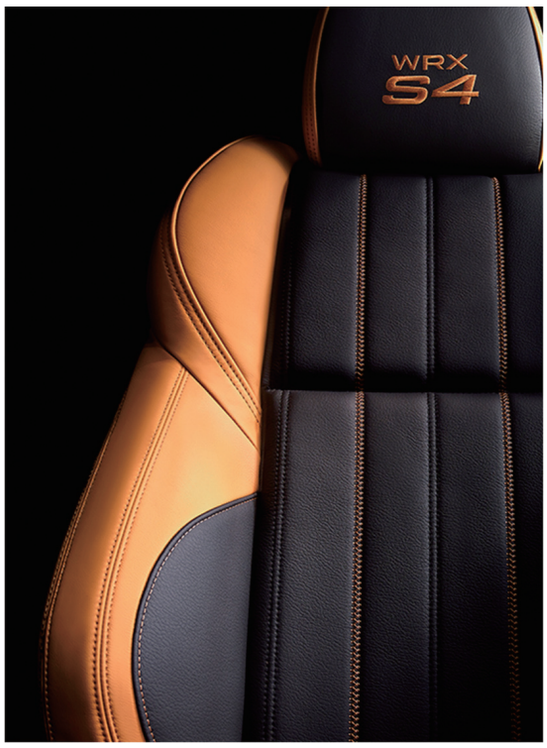


図3　New seat covering

図4　Special tag

図5　Special steering wheel

4. インテリアカラーへのこだわり

シートデザインのタンと黒のコーディネートを室内全体で徹底するために、内装部品の色や素材感は、大幅に変更した。部品色は全てタンと黒だけの色味に変更し、シルバーやメッキ等の金属表現は全て排除している（図5）。

さらにシートの革の触感やシボに風合いを合わせるため、ステアリングの革やMFDバイザーの表皮まで、手に触れる素材は全て見直している。量産時の作り込みは特に苦労した。まず発色の良いタン色や、引き締まった黒の色を再現する際、グロスや彩度のコントロールは非常に神経を使った。また特徴的なデザインステッチの再現も徹底的にこだわった。専用ミシンをさらに改造し、縫製糸も専用品に変え、縫製時の角度調整も行う事で、シートと同意匠のステッチをドアトリムに再現した(図6)。この様に数々のこだわりの積み重ねで、スポルヴィータの統一された世界観を実現した。

5. エクステリアカラー

エクステリアカラーは、メインカラーをラピスブルーパールとした。この色は、古代エジプトから天体を象徴する聖なる石として重宝されたラピスラズリをイメージした車体色である。赤味を帯びたブルーは、シチュエーションを選ばず存在感を放ち、吸い込まれそうに深く、そして濃い、ブルー。天体に由来する会社名を持ち、航空機メーカーのDNAを継承するスバルにとって、この色はとても意味の深い、大切な色である。

この色のポイントは、ブルーとレッドの干渉パールの配合バランスだ。シェードに行くほど赤紫に変化し深さを感じる。そして微量のシルバーパールを加える事で、派手さを抑え滑らかな質感表現にこだわった(図7)。

この車体色とアクセントになるベロアメッキパーツとハイパフォーマンスホイールとのコーディネートは、エレガントかつ、本物のスポーティーな走りを予感させるものとなった(図8)。

6. まとめ

スポルヴィータとは、イタリア語の「Sportiva(スポーティな)」と「Vita(人生)」を組合わせた造語である。スバル車の持つスポーツ性能と、こだわりぬいた華やかな室内空間によって、「お客様のライフスタイルをより豊かに彩る」と言う意味が込められている。

今回のプロジェクトは短期開発にも拘らず、企画やエンジニア、品質、購買、原価企画、サプライヤーも含め、開発チームが一致団結し、何度もイタリアや日本を往復し、議論や試作を繰り返し、文化の違いを乗り越える事で実現できた。それほど、このスポルヴィータの内外装デザインには、人の感情に訴えかける「色の魅力」が込められていると自負している。色や素材、製法にこだわる事で印象を一変させられる所に、クルマのカラーデザインの面白さと難しさがある。

スバルの掲げる安心と楽しさを最も分かりやすく具現化したスポーツセダン「WRX S4 SporVita」、スバルが展開する「新たな魅力」を是非お客様にご堪能頂きたい。

図6 Special door trim

図7 Lapis Blue Pearl

図8 18inch Alloy wheel (Highluster paint)

図9 New WRX S4 SporVita EXT. & INT.

【著　者】

中村　卓生

成長期（平成初期）のスバル紹介

レガシィ ツーリングワゴン 2.0GT spec.B
（2003年～ 2009年）

全長×全幅×全高：4680 mm × 1730 mm × 1470 mm
ホイールベース：2670 mm
エンジン：水平対向４気筒 DOHC ターボ 1994 cc
最高出力：191 kw（260 ps）/6000 rpm
最大トルク：343 N－m（35.0 kg－m）/2400 rpm

「走りと機能と美しさの融合」を開発テーマに、欧州市場への対応や衝突安全性能向上のため、全幅を前モデルより35 mm拡幅し、3ナンバーサイズとなった。ボディ剛性の向上、安全装備の充実、6気筒車AT車の5速化をしたうえで、アルミニウム等の軽量部品や高張力鋼板を活用し、前モデルに対しグレードによっては100 kg近く軽量化を実現している。ターボ車は、2ステージ・ツインターボからツインスクロールシングルターボを採用し、シーケンシャルターボに見られた中速～高速域における段付き感を解消した。2008年には量産車として世界初の水平対向ディーゼルターボ仕様も欧州向けに発売された。

運転支援システムによる交通事故低減効果の分析

Analysis of Decreasing Traffic Accidents with Driving Support System

熊　谷　　光*
Hikaru KUMAGAI

抄　録

運転支援システム“アイサイト”の交通事故低減効果を明確にするため、アイサイト装着車／非装着車の交通事故データを収集して、事故内容や事故類型などに着目して事故の傾向を分析した。その結果、装着車は、非装着車に比べて事故発生率が低く、特に追突事故に効果があることが明らかになった。本稿では、アイサイトの機能および性能、収集した交通事故データの詳細、それらを分析した結果について報告する。

Abstract

In order to confirm the effectiveness of SUBARU's driving support system “EyeSight”, we collected traffic accidents of vehicles with and without EyeSight and analyzed accident tendencies by focusing on accident scenarios and own vehicle's speeds. As a result, we found that traffic accident rates with EyeSight is lower than without it, and particularly the ratio of rear-end collision with EyeSight is lower than without it. This document shows functions and performances of EyeSight, details of collected traffic accident data and results of the analysis.

1.　はじめに

日本の交通事故件数および死傷者数の推移を図１に示す[(1)]。事故件数および死傷者数は減少傾向となっているが、2014年で依然として約4千人の死亡者、約70万人の負傷者がおり、今でも多くの人が交通事故で死傷している。

交通事故を減らす取り組みとして、当社は運転支援システム“アイサイト”を開発した。その安全性能は各国の定める基準によって評価され、それぞれで最高ランクの評価を獲得している。さらに、実路環境下での事故低減効果を明確にすることで、よりお客様が安全な車選びをしやすい環境を整えることができる。本稿では、アイサイト装着車／非装着車の事故データからアイサイトの事故低減効果を検証し、その結果について報告する。

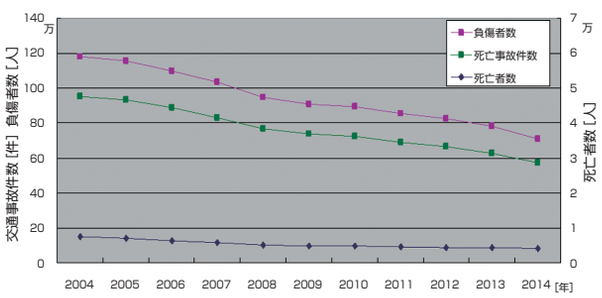


図１　日本の交通事故件数・死傷者数の推移 [(1)]

2.　運転支援システム“アイサイト”

2.1　開発の狙い

運転支援システムを開発するためには、障害物の存在や周囲の環境などを把握するためのセンサが必要である。代表的なセンサとして、レーザレーダ、ミリ波レーダ、単眼カメラ、ステレオカメラなどがあり、それぞれの特徴を考慮してセンサを選択する必要がある。

平成26年の状態別交通事故死者数を図２に示す[(2)]。自動車が全体の1/3に対して、交通弱者に該当する二輪車、自転車、歩行者が全体の2/3を占めている。

＊ 車両研究実験第4部

よって、交通弱者を含む道路上のあらゆる物体を検出できれば、より交通事故による死傷者数を減らすことができると考えられる。

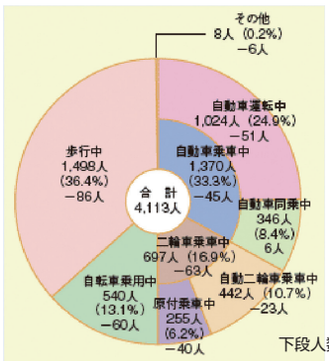


図２　平成 26 年の状態別交通事故死者数 [2]

そこで、当社は運転支援システムのセンサとしてステレオカメラに着目した。ステレオカメラは、距離、向き、大きさなどの３次元環境を認識できる、車両や歩行者など様々な立体を複数同時に検出できるなどの特徴がある。これらの特徴を生かすことで、実路環境下でより多くの事故を低減できると判断し、ステレオカメラを用いた運転支援システム“アイサイト”を開発した。

2.2　システム概要

ASV 技術の開発指針を以下に示す[3]。

・ドライバの意思を優先させる
・通常の運転時におけるドライバのヒューマンエラーをカバーする
・現行の交通ルールを遵守させる方向に機能する

これらの指針に基づき、当社が実現した機能を表１に示す。プリクラッシュブレーキ、AT 誤発進抑制制御、車間距離・車線逸脱・ふらつき・先行車発進の警報はヒューマンエラーによる事故回避、全車速追従機能付クルーズコントロール（ACC）は運転負担軽減を支援する機能である。また、アイサイト Ver.3 では AT 誤後進抑制制御、アクティブレーンキープなどの新規安全機能に加えて、既存機能の高性能化を実現した。

表１　アイサイト機能一覧

アイサイト (ver.2)	次世代アイサイト (ver.3)
プリクラッシュブレーキ （対車両、対歩行者、対二輪車） プリクラッシュブレーキアシスト	プリクラッシュブレーキの高性能化 （歩行者対応強化、回避速度向上） プリクラッシュブレーキアシスト
全車速追従機能付クルーズコントロール（ACC）	ACCの高性能化(ブレーキランプ認識など)
AT誤発進抑制制御	AT誤発進抑制制御 AT誤後進抑制制御
車間距離警報 車線逸脱警報 ふらつき警報 先行車発進のお知らせ	車間距離警報 車線逸脱警報 ふらつき警報 先行車発進のお知らせ
	アクティブレーンキープ 1 車線中央維持 2 車線逸脱抑制
	危険回避アシスト

赤字は Ver.2 からの変化点を示す

3.　各国の予防安全性能評価

運転支援システムの安全性能は各国で評価されており、お客様は安全な車を選ぶことができる。各国アセスメント評価結果のサンプルを図３, ４, ５に示す[4][5][6]。当社は、JNCAP：ASV ＋、EuroNCAP：5☆、IIHS：Superior など、それぞれ最高ランクの評価を獲得している。

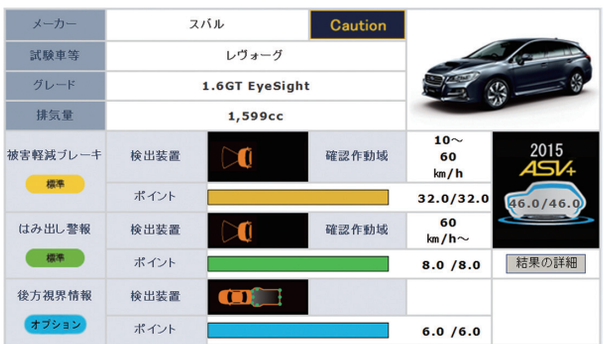


図３　JNCAP 予防安全性能評価の結果 [4]

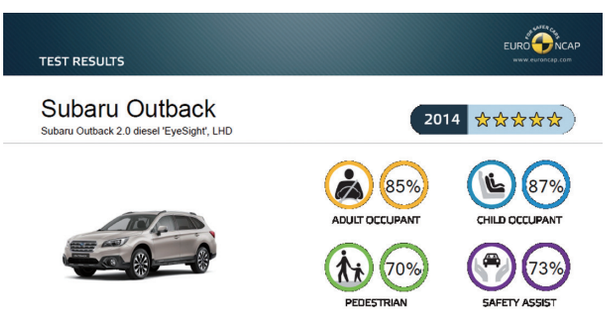


図４　EuroNCAP 総合評価の結果 [5]

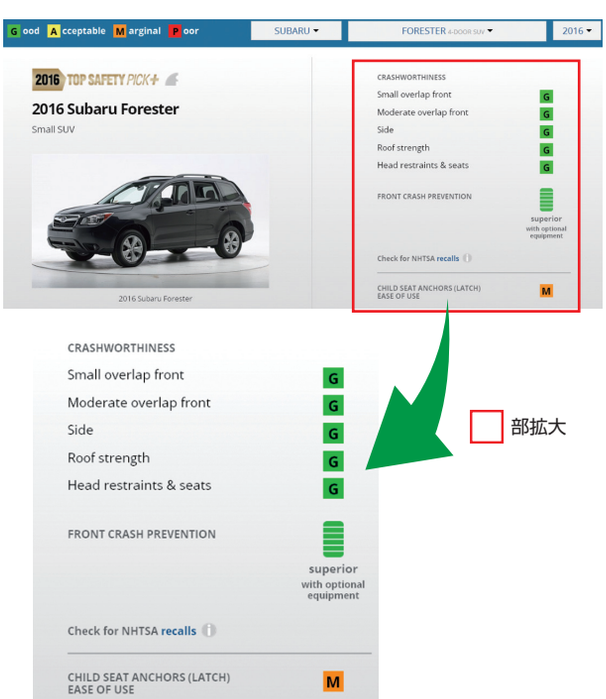


図５　IIHS 予防安全性能評価の結果 [6]

4. 事故低減効果の検証

実路での事故を調査することによって、アイサイト装着車／非装着車の実路におけるアイサイトの事故低減効果を検証することができる。また、今後どのような事故へ対応すべきか把握し、交通事故ゼロに向けてアイサイトの性能をどのように向上させる必要があるのかを明確にすることができると考えている。

4.1 事故データの収集

収集した事故データの条件について述べる。対象の車両は日本で販売されたSUBARU車かつVer.2アイサイト装着／非装着が選択できる車とした。販売台数を図6に示す。統計上、母数の少ない初代およびVer.3アイサイトの車両は対象外とした。販売期間を2010～2014年、事故発生年を2011～2014年とした。対象のデータは警察庁に届け出のあった交通事故データで、交通事故総合分析センター（ITARDA）が管理運用しているデータとした。

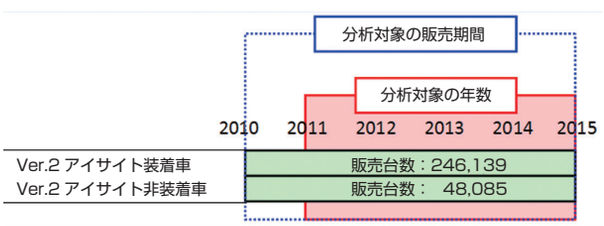


図6 分析対象車両の販売台数

事故類型		昼夜	危険認知速度	行動類型（1当者）	事故内容
人対車両	小区分の限定なし	昼	10 km/h 以下	限定なし	死亡事故
	対面通行中	夜	10～30 km/h	直進 or 発進	重傷事故
	背面通行中		30～60 km/h		軽傷事故
	横断中／対横断歩道		60～100 km/h		
	横断中／横断歩道付近		100k m/h 超		
	横断中／その他		不明		
車両相互	追突				
	出合い頭				
	左折時				
	右折時／右折直進				
	右折時／その他				
その他					

初度登録年	SUBARU 車	
2010	CY10 レガシィ	アイサイト装着車
2011		アイサイト非装着車
2012	CY10 アウトバック	アイサイト装着車
2013		アイサイト非装着車
2014	CY11 インプレッサ	アイサイト装着車
		アイサイト非装着車
	CY12 レガシィ	アイサイト装着車
		アイサイト非装着車
	CY12 エクシーガ	アイサイト装着車
		アイサイト非装着車
	CY12 フォレスター	アイサイト装着車
		アイサイト非装着車
	CY13 インプレッサ	アイサイト装着車
		アイサイト非装着車
：	：	：

図7 分析対象の集計項目一覧

事故の状況および車両の条件として、ITARDAが管理している交通事故集計項目（全46項目）の中から、事故類型、時間帯、危険認知速度、行動類型（1当者）、事故内容の計5項目を選択した。各項目の詳細を図7に示す。なお、事故類型については、一般的に発生頻度の高い項目のみ選定した。事故内容の定義は、死亡事故は事故後24時間以内に死亡した事故、重傷事故は30日以上の治療を要する事故、軽傷事故は30日未満の治療を要する事故となっている。また、アイサイト装着車／非装着車を判別するための項目として、初度登録年、車型・類別を選定した。例えば、「CY10レガシィ」は2010年発売のレガシィを表す。全ての組み合わせとして、計116640パターンの事故発生件数を集計した。

4.2 事故データの分析

アイサイト装着車／非装着車の交通事故件数を表2、交通事故発生比率を表3に示す。死傷件数全体では、非装着車が1000台中15台の事故率に対し、装着車が1000台中6台となっている。この結果から、アイサイト装着車は、非装着車に比べて事故率が約6割減少していることが分かる。

次に、事故類型別の交通事故件数を表4に示す。全体として、車両相互の追突、出会い頭事故が多くなっているが、先進国における事故類型別の割合と同じ傾向である。また、事故件数全体を100%としたときの事故類型別の内訳を表5に示す。アイサイト非装着車は追突事故の比率が最も高くなっているが、アイサイト装着車は追突事故の比率が大きく減少している。この結果から、アイサイトは追突事故の低減に効果があると推測できる。

次に、事故類型別の販売台数千台当り交通事故発生比率を図8に示す。アイサイト装着車は、非装着車に比べて全体的に事故率が減少しており、特に追突事故の事故率は約8割減少していることが分かる。

表2 Ver.2 アイサイトの交通事故件数

	2010～2014の販売台数［台］	2010～2014に発生した交通事故件数［件］			合計［件］
		死亡	重傷	軽傷	
Ver.2 アイサイト装着車	246.139	9	89	1395	1493
Ver.2 アイサイト非装着車	48.085	0	44	697	741

表3 販売台数における交通事故件数の比率

	2010～2014に発生した交通事故の比率［‰］			販売台数換算
	死亡	重傷	軽傷	
Ver.2 アイサイト装着車	0.04	0.36	5.67	1000台中6台
Ver.2 アイサイト非装着車	0	0.92	14.50	1000台中15台

［‰］：1/1000

表４　事故類型別の交通事故件数

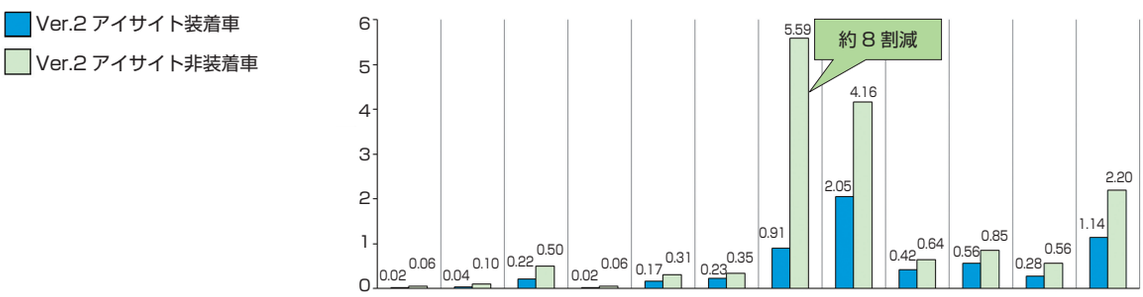
	販売台数［台］	事故件数	人対車両						車両相互					その他
			対面通行中	背面通行中	横断中／横断歩道	横断中／横断歩道付近	横断中／その他	その他	追突	出会い頭	左折時	右折時／右折直進	右折時／その他	
合計	294,224	2234	9	16	78	9	58	73	492	704	135	178	95	387
Ver.2 アイサイト装着車	246,139	1493	6	11	54	6	43	56	223	504	104	137	68	281
Ver.2 アイサイト非装着車	48,085	741	3	5	24	3	15	17	269	200	31	41	27	106

単位：件

表５　事故類型別の内訳

	人対車両					車両相互					その他
	対面通行中	背面通行中	横断中／横断歩道	横断中／横断歩道付近	横断中／その他	追突	出会い頭	左折時	右折時／右折直進	右折時／その他	
合計	0.4	0.7	3.5	0.4	2.6	22.0	31.5	6.0	8.0	4.3	17.3
Ver.2 アイサイト装着車	0.4	0.7	3.6	0.4	2.9	14.9	33.8	7.0	9.2	4.6	18.8
Ver.2 アイサイト非装着車	0.4	0.7	3.2	0.4	2.0	36.3	27.0	4.2	5.5	3.6	14.3

単位：%



	販売台数［台］	千台当り事故件数［件］	人対車両						車両相互					その他
			対面通行中	背面通行中	横断中／対横断歩道	横断中／横断歩道付近	横断中／その他	その他	追突	出会い頭	左折時	右折時／右折直進	右折時／その他	
Ver.2 アイサイト装着車	246,139	6.06	0.02	0.04	0.22	0.02	0.17	0.23	0.91	2.05	0.42	0.56	0.28	1.14
Ver.2 アイサイト非装着車	48,085	15.38	0.06	0.10	0.50	0.06	0.31	0.35	5.59	4.16	0.64	0.85	0.56	2.20

［‰］：1/1000

図８　事故類型別の販売台数千台当り交通事故発生比率

5.　おわりに

運転支援システム“アイサイト”の事故低減効果を明確にするため、市場に出ているアイサイト装着車／非装着車の交通事故データを調査した。収集したデータを分析し、アイサイトの事故低減効果を検証した。その結果、アイサイト装着車は非装着車に比べて事故率が約6割減少しており、特に追突事故の事故率は約8割減少していることが分かった。アイサイトVer.2では出会い頭や右左折などの事故がまだ多いため、今後はそれらの低減に取り組む。また、運転支援システムの安全性能をよりお客様へ理解していただくため、実路での事故低減効果について引き続き調査していく。

最後になりましたが、本原稿の執筆にあたり、多大なるご協力をいただいた関係者の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

(1) NPA 交通事故発生状況： 統計表一覧, https：//www.npa.go.jp/toukei/koutuu48/ichiran.htm
(2) 内閣府： 平成26年度 交通事故の状況及び交通安全施策の現況, http：//www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/h27kou_haku/zenbun/genkyo/h1/h1b1s1_2.html
(3) 自動車総合安全情報： 4.ASV開発指針の適用 http：//www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/japanese/asv2outline.html
(4) NASVA： J-NCAP予防安全性能アセスメント, http：//www.nasva.go.jp/mamoru/active_safety_search/list_search_subaru.html
(5) EURO-NCAP： Ratings & Rewards, http：//www.euroncap.com/en/results/subaru/outback/7895
(6) IIHS： Ratings, http：//www.iihs.org/iihs/ratings/vehicle/v/subaru/forester-4-door-suv

【著　者】

熊谷　　光

成長期（平成初期）のスバル紹介

アウトバック 3.0R（2003年～ 2009年）

全長×全幅×全高：4730 mm × 1770 mm × 1545 mm
ホイールベース：2670 mm
エンジン：水平対向6気筒 DOHC 2999 cc
最高出力：184 kw（250 ps）/6600 rpm
最大トルク：304 N－m（31.0 kg－m）/4200 rpm

全世界統一の「アウトバック」に改称（後のマイナーチェンジで「レガシィアウトバック」に改名）し、フルモデルチェンジ。エンジンは、EJ25型をSOHC化しレギュラーガソリン仕様としたことで経済性にも配慮した。EZ30型は吸気バルブにAVCSとダイレクト可変バルブリフトを採用し高出力化と低燃費化を実現した。

ADAS 開発における自動操舵系の安定性解析 ―ステアリング制御でのシミュレーション活用事例―

Safety and Stability Analysis of Automated Steering System in ADAS Development – A Case Study of Steering Control System by Simulation –

白石英一* Eiichi SHIRAISHI　川越邦亮* Kuniaki KAWAGOE　大岩博之* Hiroyuki OOIWA　松野浩二* Koji MATSUNO

抄　録

先進運転支援システム（ADAS）の進歩とともに、ステアリングホイールから手を放した状態で運転するケースが増加すると考えられる。

自動運転を実現するためには、ステアリングホイールから手を放した状態においても、車両の安全と安定性を保たなければならないが、車両制御システムにおける必要条件はこれまでに明白でなかった。

我々はステアリング系、特にパワーステアリング機構と制御に焦点をあて、ADAS車両に関連した安全と安定性について検討した。

その結果、ADASによる自動運転車両を実現するために問題となる安全性と安定性に関する事象の明確化と対策案について考察を行ったので報告する。

Abstract

Along with the progress of the Advanced Driving Assistance System (ADAS), vehicle driving without grasping a steering wheel becomes possible, and these cases increase. Although in these conditions, safety and stability of vehicle dynamics should be kept, but requirements for vehicle driving control systems were not clear yet.

We focused on a steering system, particularly power steering mechanism and control, and considered safety and stability of ADAS vehicle.

As a result, we clarified a phenomenon about safety and stability which became the problem for realization of the auto-pilot vehicle by the ADAS. In addition, we examined some solutions to these problems.

1. はじめに

先進運転支援システム（Advanced Driver Assistance System：以降ADAS）を高度化していく中で、自動運転を実現するためには、カメラ等で認識した外部環境や車両状態に応じた目標走行ラインをトレースさせるための操舵と加減速のコントロールが必要になる。従来は、運転・操舵するドライバが車両の操舵制御の一要素して大きく寄与しており、目標走行ラインを走行するためにフィードフォワード的な補償とフィードバック的な補償を状況により使い分けることで安定して走行していた。また、ドライバが常にステアリングホイールを握っているため、パワーステアリングの機能失陥などによりマニュアルステアとなった場合でも車両の操舵が可能である。

現状のレーンキープ制御などではドライバがステアリングホイールを握っていることを前提としているため、安全性や安定性が従来と同等に担保されている。しかし、ADAS機能の高度化に伴い、ドライバの関与が少なくて済むようになり、ステアリングホイールからの手放し状態での走行が可能になると想定される。これらのドライバの関与が少ない状態では、従来のドライバによる操作が上位制御として加わることで成り立っていた安全性や安定性が成立しなくなるという新たな課題が考えられる。

本稿の目的は、今後拡大していく自動運転において、最もドライバの関与が少なくなるステアリングホイールからの手放し状態での走行を想定し、安全、かつ、走行安定性の高い自動運転を実現する上で課題となる事象の明確化である。

特に、操舵系（パワーステアリング機構、および制御）に焦点を当て、操舵制御に関係する車両挙動の安全性、かつ、安定性要件の明確化と対策の方向性について報告する。なお、本稿では実車両を用いずに課題

＊ シャシー設計部

の事前検討を行うためシミュレーションを活用した考察を実施した。

2. 自動操舵系の概要、及び、検証条件

2.1 操舵制御に求められる安定性と安全性の要件

従来のドライバ操舵による車両挙動において、操舵系の安定性、安全性が担保されている事由は**表1**と考えた。これらを自動運転中のステアリングホイールからの手放し状態にも満足させるためには**表2**の事象による影響を検証する必要があると考えた。

表 1　従来の操舵系における安定性と安全性の定義

要件	事象
安定性	操舵系システムの発振、振動を発生させない
	外乱が車両に加わった場合、ドライバが補正し安定性を確保
安全性	ドライバが常にステアリングを保舵しており、機能失陥が発生しても車両の操舵が可能

表 2　自動運転車両の操舵系で検討すべき事象

要件	事象	検証内容
安定性	ステアリングホイール振動の有無	ステアリングホイール振動
	外乱入力による車両ふらつき（ヨレート変化）の有無 走行車線の幅員に対する偏り走行の有無	車両外乱の影響
安全性	機能失陥が発生した時にドライバへ操舵制御を引き継ぐために必要な猶予期間	機能失陥時の挙動

以降、**表2**で抽出した検証すべき事象（ステアリング振動、車両外乱の影響、機能失陥時の挙動）が自動運転中の車両挙動に与える影響をシミュレーションで確認し、自動操舵制御を構築する上で考慮すべき要件を明確化する。

2.2 自動操舵系の動作モデル

今回の解析に用いたシミュレーションモデルを以下に示す。動作モデルは、制御部、ステアリング機構部、車両部に分かれている（**図1**）。なお、制御部については、『従来のパワーアシスト制御部（ドライバ操舵に対するアシスト出力）』と『自動運転による舵角制御部』とに分かれており、制御を適宜切替えている。なお、レーンキープアシストシステムなどでは、ドライバのステアリング操舵を阻害しないように操舵トルクを制御入力としている物が多い。しかし、自動運転では高精度、かつ、応答性の高い位置制御が求められるが、操舵トルクによる制御では低車速域における舵角と舵力（路面反力）のヒスが大きいため要求を十分に満足することができない。そのため、今回は舵角制御を用いての制御モデルを構築し、シミュレーションを実施した。なお、以降で特に断りがなければ、ここで示す電動パワーステアリングの機構モデルを用いて検討を行う。また、車両モデルについてはCarSim(R)を用いた。

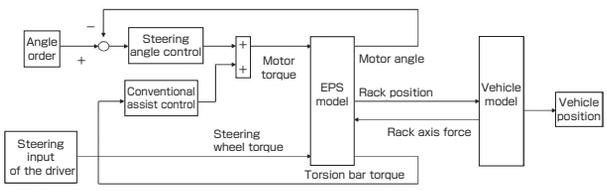


図 1　Control model of the Auto-pilot vehicle

2.3 電動パワーステアリングの機構モデル

今回の検証を行う上で、構築した電動パワーステアリング（Electric Power Steering ： 以降EPS）の機構物理モデルは**図2**に示すピニオンアシスト式EPSのモデルである。

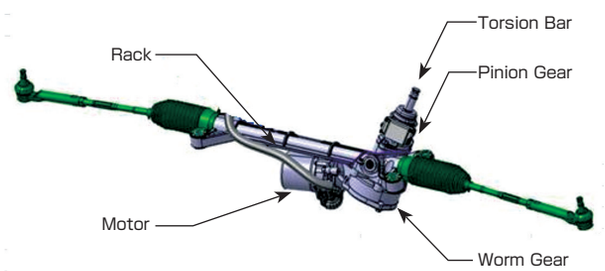


図 2　Pinion assist-type EPS

機構物理モデルにおいて、ウォームギヤやRack & Pinionのギヤ部分は、ギヤ歯面の接触点におけるジオメトリと歯面摩擦力でモデリングした。ギヤモデル（**図3**のf_{wg}, f_{rp}）は個々のギヤ速度を入力とし、出力はギヤ伝達トルクとなる形で構築した。なお、本稿では詳細を割愛するが、構築した機構物理モデルは各パラメータを合わせ込み、ベンチ試験等のEPS動作結果と十分な相関性があることを確認している。

3. ステアリング振動

3.1 振動要因の仮説

EPS機構部分を大別すると、モータとステアリングホイールの慣性体と、トーションバーの弾性体で構築される多慣性系とみなすことができる。通常のパワーアシスト機能においては、ステアリングホイールを回すことによりトーションバーが捩れ、その捩れに応じたトルクをモータから出力し、操舵をアシストする（ステアリングホイールの回転に対して、若干遅れてモータが回転）。一方、自動運転での舵角制御では、ステアリングホイールはモータによって回される自由端の回転慣性となるため、ステアリングホイールの振動が発生する可能性がある。加えて、従来であればステア

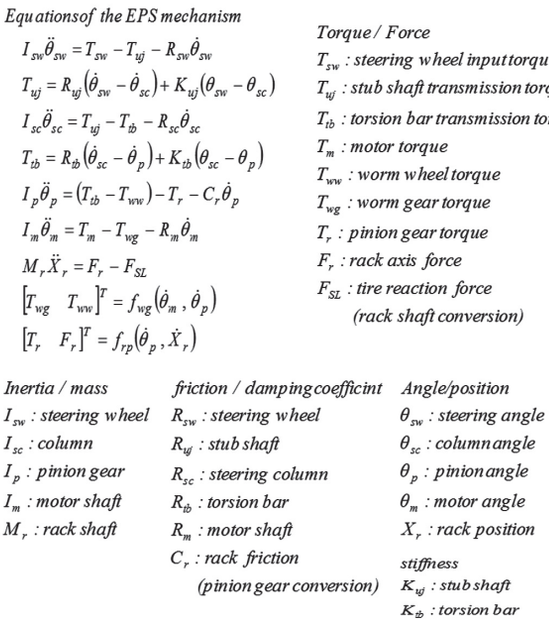


図３　Equations of the EPS mechanism

リングホイールを保舵しているドライバの腕がダンピングとして作用し、ステアリング振動を抑える効果があった。しかし、自動運転ではステアリングホイールからの手放し状態となるため、このダンピングが無くなり、ステアリング振動が悪化する懸念がある。以下、シミュレーションにより自動運転での舵角制御によるステアリング振動の発生有無を確認し、その対策案の検討を実施した。

3.2　振動現象の確認

舵角制御によるステアリング振動の有無を確認するにあたり、物理モデルのF_{SL}（タイヤからの反力）は、ベンチ試験に相当するばね負荷で設定すると共に、舵角指示値の変化速度（舵角速度）は通常走行と速めの操舵を想定した50 deg/sと200 deg/sでシミュレーションを実施した。

この結果（**図4**）を見るとピニオン角度に対してステアリングホイールの角度が振動し、かつ、舵角速度が速いほど振幅は大きくなる。

また、今回のEPS機構モデルについて線形解析、及び振動解析を実施した（**図5**）。その結果、2点の共振点があり、各共振点における振動モード（固有ベクトル）を見ると、次のことがわかる。共振特性の低周波側のものはモータ回転と同位相でステアリング系全体が振動するモードであるのに対し、高周波側は、モータ回転に対してステアリングホイールの回転が遅れた振動であり、主にモータの動き出しや停止時にトーションバーの捩れを制御系が助長する振動である。

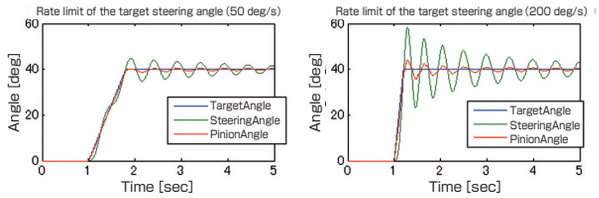


図４　Oscillation of steering angle control

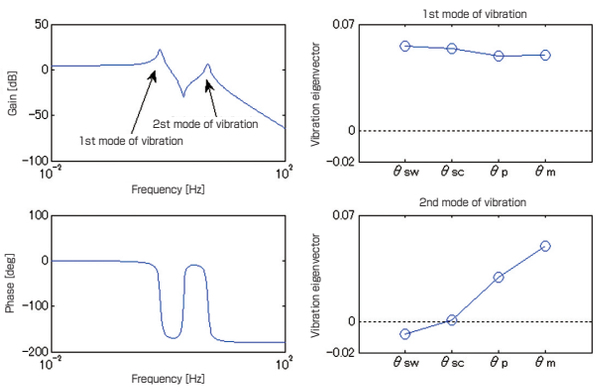


図５　EPS frequency response and vibration mode analysis

このように、舵角制御による操舵速度が速くなるほど、EPS機構自体の周波数特性によりモータ動作に対するステアリングホイールの角度変化が発振的になる傾向がある。

自動運転では、障害物回避などの急操舵が必要となる場面で共振的なステアリング振動が発生することが考えられる。走行安定性の高い自動運転を実現するためには、この振動現象を抑制、または防止する仕組みを組み込む必要がある。

3.3　ステアリング振動の抑制手段

ステアリング振動を抑制する手段としては、振動しているステアリングホイール側にダンピングを設けることが一つの対策として考えられる。ここでは、EPSの機構的なアプローチと制御的なアプローチの比較を行う。

機構的なアプローチとしては、ステアリングホイールとトーションバー間のフリクションを増やした場合の検証を実施した。この結果（**図6**）より、フリクションをノミナル値に対して10倍とすれば、ステアリング振動に十分な低減効果があることがわかる。ただし、ノミナル値に対して10倍ものフリクションを設けると、ドライバによる通常のステアリング操舵フィールが悪化するため、現実的な対応とは言い難い。

次に制御的なアプローチを示す。この方式としては機構的アプローチの代替として、ステアリングホイールの回転速度に応じたダンピング項を舵角制御に加え

る方法で検討した(図7)。この結果より、舵角制御へステアリングホイールの回転速度に対するダンピングを加えることで振動抑制が可能であることがわかる(図8)。制御で対策する利点は、舵角制御時の振動を抑制でき、かつ、通常のドライバ操舵時にはダンピング制御を停止させることで、ドライバの操舵には影響を与えないことである。背反としては、挿入したダンピング項の影響により舵角制御の目標舵角に対する応答遅れが発生するため、位相補償などの追加制御が必要になる。

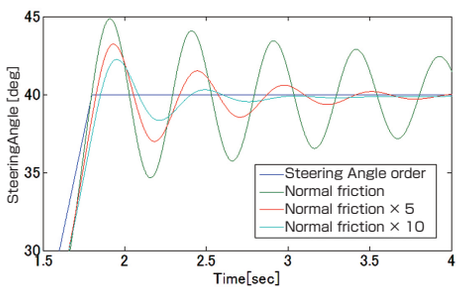


図6　Damping effect by the mechanical friction

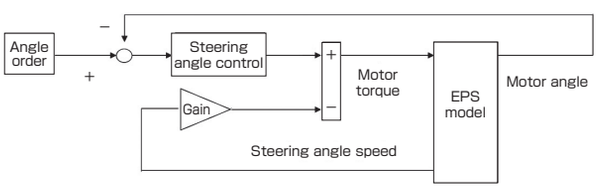


図7　Steering angle control model with damping function

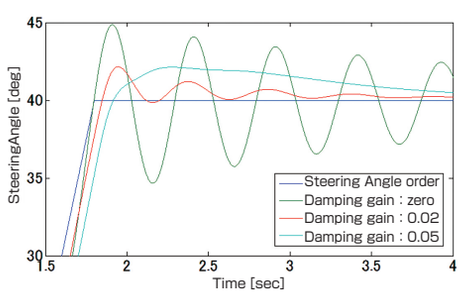


図8　Vibration reduction by the addition of the damping control

4.　車両外乱の影響

車両外乱に対する安定性については、ステアリングホイールからの手放し状態での自動運転中においても、従来のドライバによる操舵状態と同等の性能が求められる。今回は、ステアリングホイールからの手放し状態になる自動運転中において、外乱が車両運動に与える影響を改めて明確にする。ここでは、外乱の一例として、車両直進時に車両の片輪側が路面段差(凸凹路面)を走行するケースの検証結果を示す。

今回使用した車両モデルによるシミュレーション結果では、ヨーレートの変化が段差の大きさに比例するだけでなく、凹路面よりも凸路面の方がヨーレートの変化が大きい結果となった(図9)。凸路面のヨーレート変化が大きい理由としてはバンプステアやロールステアによるトー角の変化による影響と考えられるが、これらのサスペンションジオメトリの変化による影響については今後の検討課題としたい。

なお、ステアリングホイールを保舵しているドライバの腕は車両の運動を安定化する効果がある[(1)]ことが知られている。一方、自動運転ではドライバはステアリングホイールから手を放した状態となるため、車両の安定性に対する余裕代が低下し、ヨーレートの微小な変動であっても車両挙動に影響を及ぼす可能性が考えられるため、何らかの安定性補償機能が必要となる。

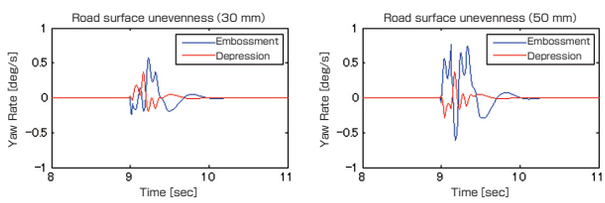


図9　Yaw rate fluctuation by the road surface unevenness

次に、ヨーレートとピニオン角を比較した結果(図10)、ヨー変化に対してピニオン角変化は瞬間的、かつ、微小な変化であり、これらの値を元にフィードバック系による外乱補償することは困難であると推測される。

そのため、外乱影響を抑える対策としては、オブザーバによる横風外乱推定などの考え方[(2)]を用いて外乱の影響を補償する手法により、車両挙動の安定化を図る必要がある。ただし、横風とは異なり、路面外乱は本章で示すとおり急峻な変化であり、より高度な外乱推定と補償制御を構築する必要がある。また、外乱検知後のモータの応答遅れ等のむだ時間により制御が不安定系になる[(3)]ことも示されており、これらのことを考慮しながら、安定で高精度な外乱補償を構築する必要がある。

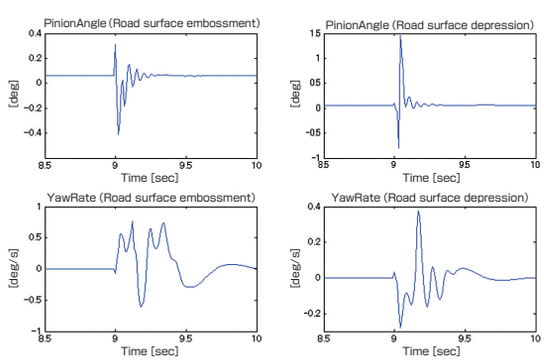


図10　Relations between yaw rate and steering angle fluctuation

5.　機能失陥時の挙動

5.1　フェイルセーフ要件

現行EPSシステムは、表3のように何らかの異常が発生しEPSとしての機能が失陥した場合、フェイルセーフ機能としてパワーアシスト制御を停止するソフトウェア設計が主流であり、ドライバがステアリングホイールを握っていることを前提にしている。

表３　既存 EPS システムでの異常発生時の移行順序

移行順序	状況
①	システム異常 発生
②	異常発生を検出するとフェイルセーフとして、EPS のアシスト制御を停止させ、マニュアルステアとする
③	マニュアルステアとすることで、ドライバの操舵を阻害せず、運転の継続が可能

一方、自動運転ではドライバがステアリングホイールから手を放しているケースが想定されるため、異常発生時は表4のような動作となる。

表４　自動運転車両での EPS システム異常発生時の移行順序

移行順序	状況
①	システム異常 発生
②	異常発生を検出するとフェイルセーフとして、EPS のアシスト制御を停止させ、マニュアルステアとする
③	システム異常により、自動運転が停止したことをドライバに警告、および通知する
④	警告や通知を認識、または車両挙動で異常発生に気付いたドライバがステアリングを握り、操舵を引き継ぐ

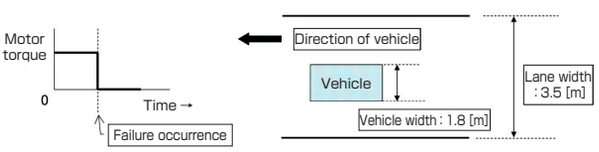
この表4で定義した②～④の動作に移るまでは、EPSシステムとドライバは共に操舵を実施しない（関与しない）状態となるため、車両運動状態によっては舵が取られ、車線から逸脱することも想定される。ここではシステム異常によりマニュアルステア状態となった場合に車線を逸脱するまでの猶予時間についてシミュレーションを用いて検討した。

また、昨今、各社よりモータを2系統巻線とすることでモータの駆動回路を冗長にした2系統駆動のEPS用モータ制御ユニットなどが発表されている[4]。今回、これらの冗長系モータにおける片系統の機能失陥時の動作についても検証した。

5.2　機能失陥時の猶予時間

機能失陥時のシミュレーションとして、定常円旋回中に機能失陥によりモータトルクがステップ的にゼロとなるケースを検討した（図11(a)）。なお、定常円の半径と車速は高速道路でのカーブを設定し、車速80 km/hで半径400 mの定常円旋回中とした。また、車線幅を3.5 m、車両全幅は1.8 m、フラット路面で、横風などの外乱は無い状態とした（図11(b)）。

検証の結果、舵角制御機能の機能失陥後はセルフアライニングトルクにより60 deg/s程度でステアリングホイールが直進方向に戻され、基準円に対して接線方向に車両が動く形となる（図12）。なお、この図は車両重心位置の移動を示しており、車両全幅を考慮すると失陥発生から車線逸脱となるまでの猶予時間は1.2秒となる。このような短い時間では、ドライバがシステムの異常発生に気が付いたとしても、修正操舵を開始する頃には車線から逸脱していると推測される。



(a) Motor torque at failure occurrence　(b) Vehicle travel direction , and width of road

図 11　A failure pattern and driving pattern in the simulation

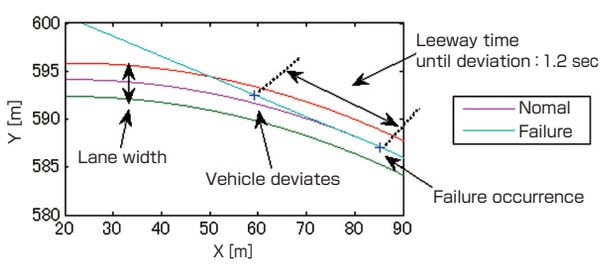


図 12　Course deviation in function failure occurrence

5.3　冗長系システムによる影響

次に、冗長系の舵角制御機能が片系統失陥した場合の挙動について検証結果を示す。動作の違いを単純に比較するため、前項での定常円旋回時の機能失陥と同条件で片系統の失陥が発生するケースとした。また、失陥発生前後の車両と操舵系の影響のみを比較するため、失陥発生前後で舵角制御の目標指示舵角は一定とした。

ここで、冗長系システムの方式を大きく分類すると下記の2つになる。

①ホットスタンバイ方式

2系統を常に動作させ、EPSに要求される総出力に対して、主系統、副系統にそれぞれの要求出力をある割合で割り当て、モータを駆動する。他系統に異常が発生しても、正常な系統のみで時間遅れなくEPS動作を継続することが可能。

②コールドスタンバイ方式

正常時は主系統のみを動作させ、副系統は停止させておく。主系統に異常が発生した場合に副系統へ切替えて、EPS動作を継続する。ホットスタンバイ方式と比較すると構成・設計が単純であるため低コストでの対応が可能。

次項では、この2種類の動作の違いによる影響を検討する。

5.3.1　ホットスタンバイ方式

今回のシミュレーションでは、主系統、副系統の出力割合をそれぞれ50%とする設定で実施した。この時の失陥発生モデルを図13に、動作結果を図14に示す。前項で示したとおり、冗長系システムが無い車両では失陥発生後はすぐに車線幅から逸脱してしまう(図12)。しかし、ホットスタンバイ方式では、失陥発生後も車線幅から逸脱することなく旋回が可能であることがわかる(図14)。

なお、シミュレーションにおいては失陥前後での指示舵角は一定値の舵角指示であるため、正常時の走行軌跡に対して失陥発生後は若干ではあるが偏差が発生している(失陥発生から4秒後に0.2 mの偏差)(図14(b))。原因は失陥時にモータトルクが一時的に低下し、目標走行ラインに対して車両位置がずれるためである。実際には、車線認識によって指示舵角が修正され、正常な系統だけで十分な出力が確保できれば、目標どおりの走行ラインへ復帰することになる。

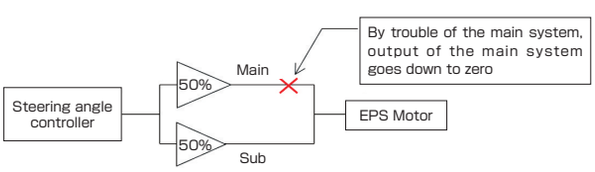


図 13　Failure model of the hot standby method

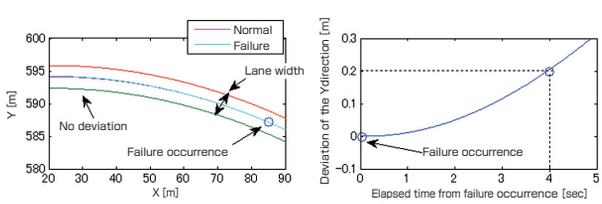


図 14　Behavior at function failure, in hot standby method

5.3.2　コールドスタンバイ方式

コールドスタンバイ方式については、通常時は副系統の機能は停止しているため、異常検知し主系統から副系統に切替えるまでに時間遅れが発生する。ここでは副系統への切替え時間による影響の確認結果を報告する。失陥発生モデルを図15に、失陥発生時の車両中心位置の軌跡を図16に示す。

これより、失陥発生から副系統への切替え時間が100 ms程度であれば、失陥発生後も車線幅から逸脱せず走行を継続することがわかる(図16)。ただし、副系統への切替えが500 ms以上遅れた場合、前項と同様に失陥発生前と同一指示舵角のまま走行を続けると車線幅から逸脱する恐れがある。例えば、車線幅3.5 m、車両全幅1.8 mの場合、失陥発生から2秒後には車線幅から逸脱する(図16)。これは機能失陥から2秒以内に車線認識による指示舵角の修正が必須であることを示している。また、2秒以内であっても車線認識による指示舵角の修正に遅れが生じた場合、車両のふらつきが発生してしまう。

これらのことより、コールドスタンバイ方式の場合は、失陥発生時に主系統から副系統へ切替える時間遅れを如何に短くするかが重要になると言える。なお、副系統への切替え時間が100 ms以下の短い場合でも失陥発生前と同一舵角のままでは位置偏差が発生するため、指示舵角の修正が必要となるのは、ホットスタンバイ方式の場合と同じである。

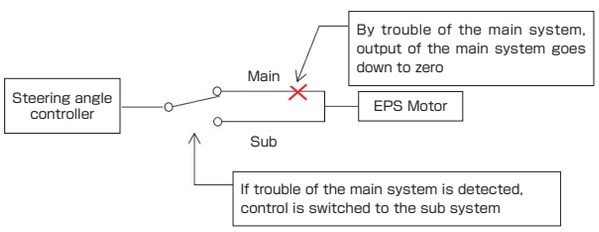


図 15　Failure model of the cold standby method

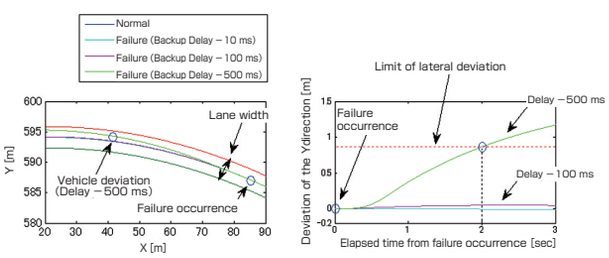


図 16　Behavior at function failure, in cold standby method

5.4　機能失陥時の挙動に対する見解

上記のように、機能失陥時においてはシステム異常発生から車線逸脱(道路幅員を超えての逸脱)となるまでの猶予時間は約1秒前後となる。 なお、シミュレーションの設定は、フラット路面で、外部環境からの外乱入力も一切ない状態であり、実際の走行状況では、検証結果での猶予時間よりも短くなる場合も想定される。この短い時間内で、『ドライバへ警告 ⇒ ドライバが異常発生を認識し、ステアリングホイールを

握る ⇒ ドライバが操舵を引き継ぐ』ことは、ほぼ不可能であると言わざるを得ない。

このため、自動運転においてはパワーステアリングシステムの冗長設計が必須であり、異常発生時においても冗長系によりパワーステアリング制御を継続し車両を安全な位置まで導いた上で停車するという設計が必要となる。これらに関して各社より代替機能、冗長系のシステムについて発表されている。しかし、これらは主にハードウェア（機構、回路）部分についてであり、今回検証したとおり、冗長系の方式などにより代替モードへ切替え後の影響は異なる。

今後は、ソフトウェアとしても、冗長系への切替え遅延や冗長系の1系統のみで出力可能な操舵トルクを考慮した走行ラインの設定など、代替、冗長系への切替え時の処理を検討していく必要がある。また、昨今、自動車の機能安全（ISO26262）要求を満たすことが求められる中、EPSにおいてもASIL-Dに該当する項目がある。そのため、システム検討の段階から機能安全に対応したプロセスに従って検討を進める必要がある。

6. まとめ

EPS機構モデルを用いたシミュレーションによる解析・検証を実施した結果、ADAS機能の高度化に伴う自動運転の実現に向けて改めて課題となる事象を明確化し、対策の方向性を考察した。

6.1 安定性 ― ステアリング振動

(1) EPSは、モータ慣性、トーションバーバネ、ステアリングホイールの回転慣性による多慣性系で構築されている。この系において、自動運転ではステアリングホイールがEPSモータにより回される側の自由端の回転慣性となるため、振動が発生する。

(2) ステアリング振動を抑制するには、舵角制御にステアリングホイールの回転速度に対するダンピング項を加えることが有効であり、制御で行うことで、通常時のドライバ操舵へは影響を与えない対策が可能である。ただし、ダンピング項による位相遅れに対する補償制御を検討する必要がある。

6.2 安定性 ― 外乱影響

外乱（路面凸凹）によるヨーレートの変化に対して、舵角変化は微小、かつ、瞬間的であり、舵角変化の検出値を元に外乱補償することは困難であると推測される。そのため、オブザーバなどによる外乱推定等を構築する必要がある。

6.3 安全性― 機能失陥

(1) 自動運転中の機能失陥に対して、従来のフェイルセーフの考えでは安全を十分に担保できない走行場面が想定される。安全を担保するには、代替・冗長系などのフォルトトレランスの考えが必須である。

(2) フォルトトレランスにおける代替・冗長系の設計においては、その方式の特徴と、主系統と副系統の切替え時間の遅れによる影響への考慮が必要である。

今後は自動運転における安定性や安全性についての課題に対する具体的な対策を更に検討し、自動運転としてユーザが満足できるような安心・安全を満たすシステムを設計していく。

参考文献

(1) 安部正人, “自動車の運動と制御 第2版 －車両運動力学の理論形成と応用”, 東京電機大学出版局

(2) 北野弘明, 西原修, 栗重正彦, 松永隆徳, “オブザーバによる横風外乱推定および電動パワーステアリングによる補償制御”, 日本機械学会論文（C編）78巻795号

(3) 斎藤健生, 藤本博志, 野口季彦, “スリップ及びヨーモーメントオブザーバを用いた電気自動車の操縦安定化制御法”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-03巻 52号

(4) 加藤良文, 鈴木知二, “デンソーの先進安全技術動向”, デンソーテクニカルレビュー , Vol.18 2013

【著　者】

白石　英一

川越　邦亮

大岩　博之

松野　浩二

滑らかな作動フィーリングを実現する配光可変型前照灯の開発（第１報）

Development of Adaptive Driving Beam System to Achieve Smooth Operation Feel (Part 1)

小川原　也[*1]　友枝　優[*2]　村松悠太[*3]
Genya OGAWA　Yu TOMOEDA　Yuta MURAMATSU

抄　録

新型フォレスターに新機能として配光可変型前照灯“アダプティブドライビングビーム”（以降、ADBと呼ぶ）を搭載した。

今回開発したADBは、アイサイトVer. 3（以下、アイサイトと呼ぶ）のステレオカメラを用いて検出した対向車、先行車へのハイビームを遮光しつつ、路肩等の周囲にはハイビーム照射を可能とする機能である。

アイサイトのステレオカメラで得られる3次元位置情報を有効に活用した高精度な遮光対象認識により、滑らかなヘッドランプ制御を実現した。

Abstract

SUBARU developed a light distribution variable headlight “Adaptive Driving Beam（ADB）” for SUBARU FORESTER.

This ADB can detect oncoming and preceding cars by “EyeSight Ver. 3” and irradiate the surrounding area with high beam. To give smooth operation feel of the headlight, we have developed a light control technology based on high-precision robust light-shielding object recognition system using three-dimensional position information obtained by EyeSight stereo cameras.

1.　まえがき

日本の交通事故件数で夜間の占める割合は全体の26%であるが、死亡事故件数は昼夜でほぼ同じである。これは夜間が昼間よりも死亡事故の危険性が約3倍高い事を示し[(1)]、原因としては夜間に視認性が低下し路上の歩行者や障害物の発見が遅れる事が考えられる。

ヘッドランプの照射距離はロービームが40 m迄であるのに対し、ハイビームは100 m以上となる。そのため、ハイビームを活用することで歩行者や障害物の早期発見が可能であると考えられる。しかし、前方車が存在する場合は、前方車への眩しさを与える事を防ぐためロービームに切り替える必要があり、路肩の視認性を十分確保できないという課題があった。

以上の様な背景から、前方車に眩しさを与えずに周囲をハイビーム照射可能な可変配光制御の搭載が進んでいる[(2)]。可変配光制御はハイビームと遮光領域の境界線（以降、カットラインと呼ぶ）を遮光対象の外側に設定し、前方車へのハイビーム照射を防ぐものである（図1）。

今回、アイサイトVer.3[(3)]を用いてADBを開発し、フォレスターに搭載した。本稿では、ステレオカメラから得られる3次元位置情報を有効に活用し、遮光対象の認識精度を向上させるとともに滑らかなヘッドランプの遮光制御を実現する技術を報告する。

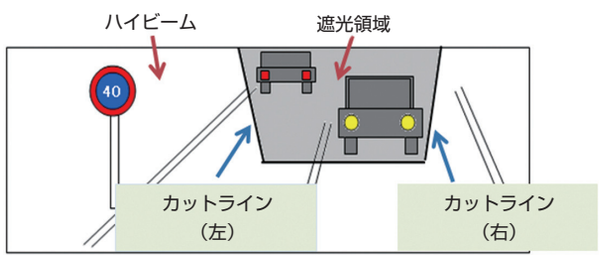


図１　ADBの動作イメージ

2.　システムの概要

本章ではシステム構成と処理の概要について述べる。

＊1 車両研究実験第4部
＊2 車両研究実験第2部
＊3 外装設計部

2.1　システム構成

システムはステレオカメラ、ヘッドランプECU、ADB用ヘッドランプから成る(図2)。

ステレオカメラは3次元位置情報を有効に活用し、対向車、先行車といった遮光対象を検出し、検出した対象に対しハイビームを遮光する左右のカットライン角度を算出する(図3)。算出したカットライン角度はヘッドランプECUにCAN通信で伝達され、ヘッドランプの遮光制御が行われる。また、ヘッドランプが実際に設定しているカットライン角度は、同じくCAN通信でステレオカメラに入力される。

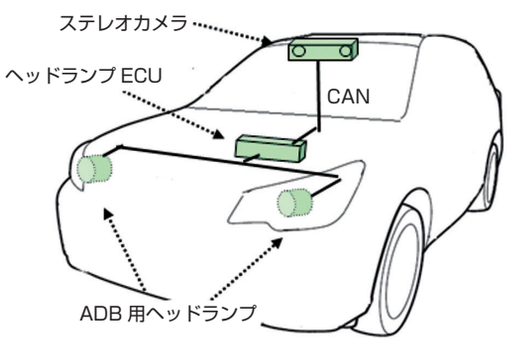


図２　システム構成

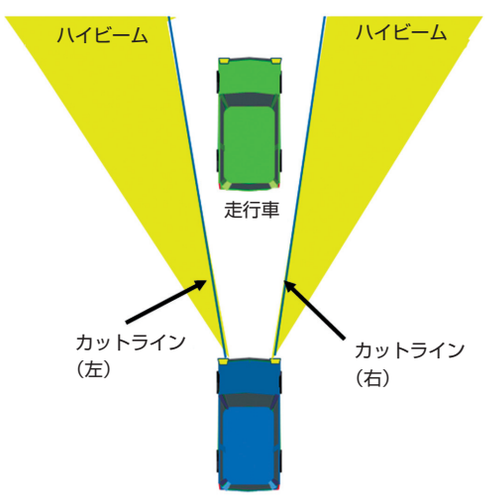


図３　カットライン例

2.2　処理の流れ

ステレオカメラでの処理の流れを説明する（図4）。

始めに、撮像された画像から対向車のヘッドランプ、先行車のテールランプ、街灯等の遮光対象候補の検出を行う。次に、3次元位置情報等を用いて、検出した対象が遮光対象であるかを判定する。さらに、市街地判定等によりハイビームの実施許可を判定する。最後に遮光対象の画像上の位置から左右のカットライン角度を算出し、ヘッドランプECUへハイビーム要否、カットライン角度情報を出力する。

単眼カメラの処理では得られない高精度な3次元位置情報を、遮光対象の認識、シーン判定、カットライン角度の算出の各処理で活用する事で滑らかな遮光制御を実現している。

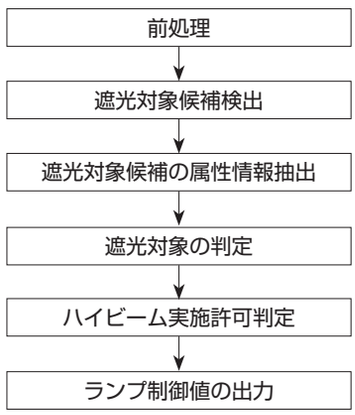


図４　処理の流れ

3.　遮光対象の認識処理

本システムでは画像上で検出した対向車のヘッドランプ、先行車のテールランプを遮光対象として判定する。本章では、3次元位置情報の活用により高精度化した認識処理を中心に説明する。

3.1　遮光対象候補検出

一定以上の輝度値、色味を持った領域を対向車のヘッドランプ、先行車のテールランプの構成要素として検出する(図5)。次に3次元上で距離が近い要素同士をグルーピングし、遮光対象候補とする(図6)。

図５　要素検出

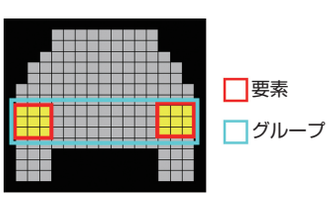


図６　要素のグルーピング

3.2　遮光対象候補の属性情報抽出

遮光対象候補に対して、後段の認識を行うための属性情報を求める。属性情報は、画像特徴、3次元位置、存在回数である。

ⅰ)画像特徴

輝度値統計情報(最大値、最小値、平均値)、色(RGB)、形状(面積、水平、垂直サイズ)を画像上から求める。

ⅱ)3次元位置

ステレオ視により候補領域の3次元位置を求める。

ⅲ)存在回数

候補のグループが処理範囲内に存在している時間を求める。撮像フレーム間で候補グループについて画像

上、及び3次元位置上のトラッキングを行い、トラッキングフレーム数を存在回数としている。

なお、単眼カメラの処理では誤グルーピングや誤トラッキングといった精度の点での課題があった。3.1のグルーピング、及び3.2のトラッキングでは、3次元位置情報を用いる事で精度を高めている。

3.3　遮光対象の判定

本システムではステレオカメラで得た距離の情報と画像上の特徴量との相関関係を用いることで、輝度、色といったシンプルな画像特徴であっても認識の精度を高めている。対向車のヘッドランプを例に遮光判定処理を説明する。

3.2遮光対象候補の属性情報抽出で算出した輝度の最大値と、ヘッドランプを判定するための最低限度の輝度値、すなわち閾値とを比較し、閾値よりも大きい場合はヘッドランプ、閾値よりも小さい場合は反射板や標識と判定する。

判定の閾値は、図7に示す様に距離別に設定することでヘッドランプと反射板や標識等の輝度が高いものとを認識している。

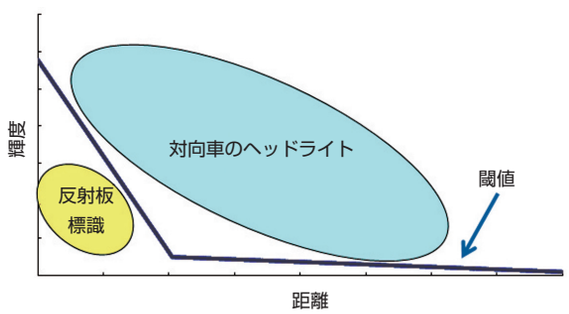


図７　距離別の閾値設定

3.4　ハイビーム照射範囲の認識処理へのフィードバック

本システムではステレオカメラは、ヘッドランプが実際に遮光している領域の情報をフィードバックし、認識に活用している。

路上の反射板や標識は、自車のハイビームにより明るくなるため、誤って遮光対象と認識、遮光され易い。誤って遮光された後は、反射板の輝度が低下し、遮光対象と認識されず再びハイビームが照射される。この様なヘッドランプ制御のハンチングが発生する場合がある。この課題を解決するために以下の処理を行う。

ⅰ）対象物へのハイビーム照射判定

各対象物に対して、3次元位置情報、ランプが設定しているカットライン角度を用いて、ハイビームが照射されているか否かを判定する（図8）。

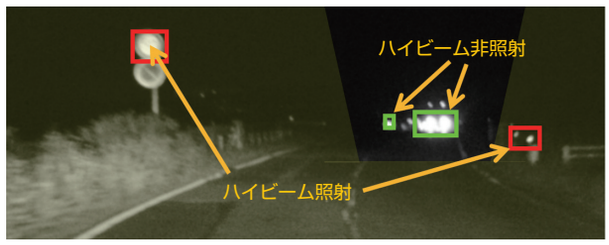


図８　ハイビーム照射判定

ⅱ）閾値設定

ハイビームが照射されているか否かに応じて、3.3で述べた閾値を変える。対向車のヘッドライトの例では、遮光対象候補にハイビームが照射されていると判定された場合は図7の閾値を用い、ハイビームが照射されてないと判定された場合は図7の閾値を全体的に低くしたものを用いて認識を行う。

これにより、ヘッドランプ制御のハンチングを防ぐことが可能となる。

4.　ハイビーム実施許可判定処理

本システムではハイビームを実施すべきかの判定を行い、不要と判定された場合はロービームに切り替える。

以下ⅰ）～ⅲ）の処理結果を用いてハイビーム不要なシーンであるかの判定を行う。

ⅰ）市街地判定処理

市街地は街灯が多数設置され明るく、視認性が確保できるため、ハイビームは不要となる。

この市街地らしさを判定するための指標として街灯の本数を用いている。画像上方の検出範囲で一定以上の輝度値を持つ領域を街灯として認識する（図9）。認識した街灯の本数は時系列で平滑化し、閾値以上となった場合に市街地であると判定する。

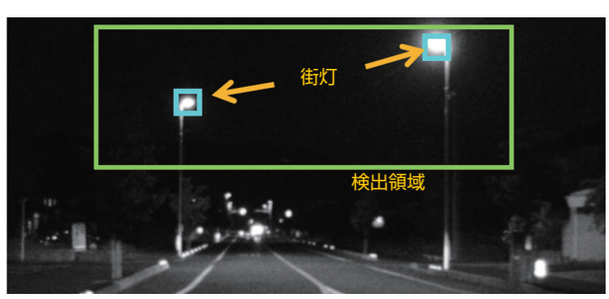


図９　街灯検出

ⅱ）周囲の明るさ判定処理

昼間の様に周囲の明るさが十分な場合、ハイビームは不要となる。

カメラは、露光時間等のカメラ制御値を調整し、認

識に最適な画像を撮像している。このカメラ制御値の情報をもとに周囲の明るさを推定し、十分な明るさであると判定された場合は、ハイビーム不要シーンと判定する。

ⅲ）車速判定処理

低速ないし停車時の場合は時間当たりの移動距離が短く、遠方視認性の確保が必要ないため、ハイビーム不要シーンと判定する。

5.　カットライン角度算出処理

3章で求めた遮光対象の情報からヘッドランプに送信するカットライン角度の算出を行う。

5.1　カットライン角度の平滑化処理

画像上で認識した遮光対象を全て遮光できる水平方向座標範囲をハイビーム遮光範囲とし、出力する左右のカットライン角度に変換する。

ここで、カメラの撮像フレーム毎にカットライン角度を決定すると1フレームの誤認識でカットライン角度が急激に変化するため、下記の処理によりハイビーム遮光範囲を決定する（図10）。

ⅰ）遮光範囲の判定およびカウンタの更新処理

画像上水平方向各位置でハイビーム照射判定用のカウンタを用意し、各カウンタにおいて、現フレームの遮光範囲結果がハイビームの照射OKの位置の場合は－1、照射NG位置の場合は＋1の加減算を行う。

ⅱ）遮光範囲の決定処理

カウンタが閾値以上の値の画素位置をハイビーム照射NG位置とし、NG画素の左右端をカットラインとして決定する。図10は閾値を3とした場合ものである。

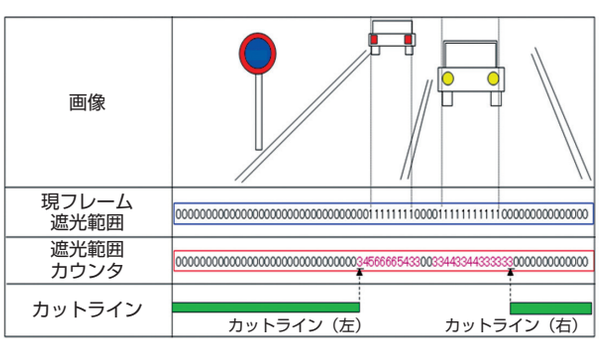


図 10　カットラインの算出の一例

5.2　対向車すれ違い時のカットライン角度補正

今回用いるカメラの画角はハイビーム照射角よりも狭いため、対向車とすれ違う時は、対向車が画角外に移動後もハイビーム照射範囲に位置する期間がある。そのため、すれ違う対向車に対し眩しさを与えないため、すれ違いを検出しカットライン角度を補正する。

すれ違いの検出は、対向車の距離、水平位置、自車速度から「すれ違いの有無」を判定し、「すれ違いが終わるまでの推定時間」を算出する。そして、すれ違い検出中はすれ違うまでの時間、対向車側へのハイビームの照射を禁止するようにカットライン角度を補正する。

6.　実験・解析結果

遮光対象認識、カットライン角度算出におけるフィードバックの効果、及びADBのハイビーム照射時間の検証を行った。

6.1　遮光対象認識（対向車認識）

一般道走行にて、対向車とそれ以外の反射板の距離と輝度の関係を計測した（図11）。距離別に設定した閾値でヘッドランプと反射板の認識が出来ている事が分かる。

ここで、仮に距離情報を用いず輝度情報だけで対向車の認識を行う場合、遠距離の対向車と近距離の反射板が同じ輝度値となると認識ができない。距離情報を用いる事で正確な認識が可能となることが分かる。

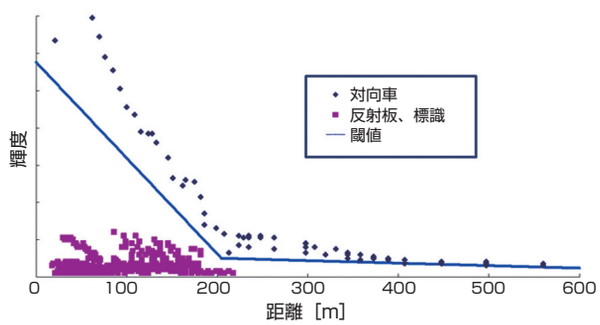


図 11　対向車認識

6.2　カットライン角度算出におけるフィードバックの効果

一般道走行において3.4.で説明したフィードバック有無それぞれでのカットライン角度算出結果の比較を行った。なお、フィードバック無しの場合に関しては、ハイビーム照射がされていない場合の閾値を使用した。

遮光範囲の差分が顕著に出るシーンの例を図12に示す。グラフにおいて横軸が時間、縦軸がカットラインの角度を示す。カットラインの角度についてはプラス方向に行くほど右側に移動する事を意味する。

フィードバック無しの場合は、所々でカットラインが大きく変動している。これは図13の様にハイビーム照射により輝度が高くなった路肩の反射板や標識を誤検出しているためである。

今回のフィードバック有りの手法では反射板の誤検出がなくカットラインは先行車のみを遮光する範囲で安定的に変化し、滑らかな動作を行っていると言える。

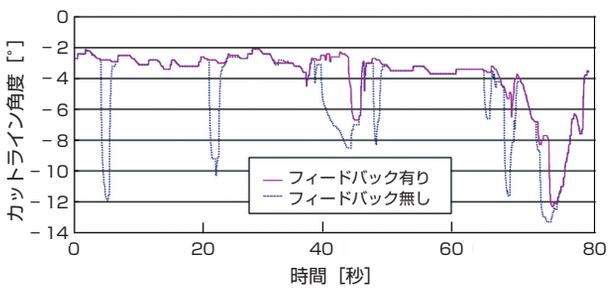


図 12　カットライン出力

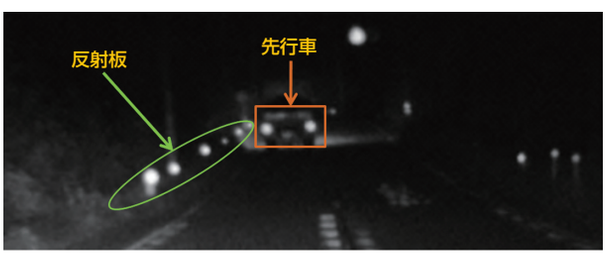


図 13　反射板の誤検出

6.3　ハイビーム照射時間

郊外の一般道を約1時間走行した結果に対し、夜間視認性の指標であるハイビーム照射時間を計測した。比較対象として、本システムをHBA（High Beam Assist）として動作させた場合を用いた。HBAは前方車を検知した場合に部分遮光ではなく、ロービームに切り替えるシステムである。

図14にADB、HBAそれぞれのハイビーム、部分遮光、ロービームの比率を示す。

ADBはHBAに比べて部分遮光のハイビームにより約36%ハイビーム照射時間が増え、夜間視認性が向上している事が確認できる。なお、ADBでもロービームとなっているのは、街灯の多い道や自車速が低速の時などハイビームがなくても必要な視認性が確保できるシーンがほとんどであった。

HBAのハイビーム - ロービーム切り替えはドライバのマニュアルランプ操作でも代替可能である。ADBの部分遮光はマニュアルランプ操作では出来ないものであり、ADBを搭載する事による夜間視認性向上の効果は大きいと言える。

また、ハイビームとロービーム（部分遮光を含む）の切り替わり回数を**表1**に示す。この結果からドライバがヘッドランプ操作を手動で行うとした場合は、1時間で53回も切り替え操作を行う必要がある。頻繁な切り替え操作は運転の負荷にもつながり、常にロービームで走るという選択をするドライバも多いと思われる。ADB、HBAによる遮光制御の自動化はドライバのヘッドランプ切り替え操作の負担軽減に寄与できていると考えられる。

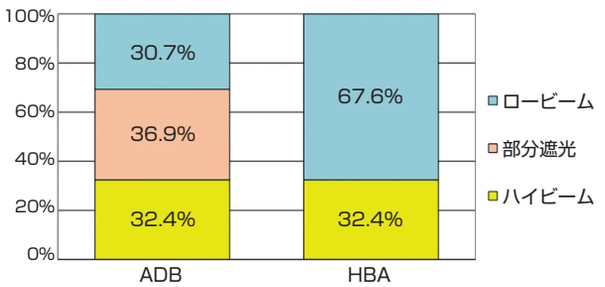


図 14　ランプ状態比率

表 1　ランプ切り替え回数

操作種別	切り替え回数
ハイビーム→部分遮光／ロービーム	27
部分遮光／ロービーム→ハイビーム	26
合計	53

7.　まとめ

3次元位置情報を用いることで正確な対向車、先行車の認識と、ドライバにとって不快なハンチング感を抑えたカットライン角度算出技術を開発し、滑らかなヘッドランプの遮光制御を実現した。

本システムにより、他の交通利用者へ眩しさを与える事を防ぎつつ、ハイビーム照射時間を増加させることが可能となる。これにより路肩の歩行者の発見が早期に可能となり、衝突事故低減に寄与すると考える。

また、夜間、ADBによるハイビーム照射範囲の拡大はドライバの視認性向上だけでなく、カメラでの路上の歩行者や白線の検知範囲を広げ、カメラを活用して行われる自動ブレーキやレーンキープアシストの夜間性能向上が期待できる。

カメラによるヘッドランプ制御は、ランプ操作の自動化とも言え、来るべき自動運転でも必須の技術となると考えている。今後はドライバにとってもカメラにとっても最適なヘッドランプ制御技術へ進化させていきたい。

参考文献

(1) ITARDA 平成19年 交通統計
(2) マツダ技報　No.32 No. 2, p.216-217 (2015)
(3) 柴田英司：新開発ステレオカメラによる運転支援システム「EyeSight」の開発, 自動車技術, Vol.63, No.2,p.93-98 (2009)

【著　者】

小川　原也

友枝　優

村松　悠太

成長期（平成初期）のスバル紹介

R2 S（2003年～2010年）

全長×全幅×全高：3395 mm×1475 mm×1520 mm
ホイールベース：2360 mm
エンジン：直列4気筒 DOHC　スーパーチャージャー 658 cc
最高出力：47 kw（64 ps）/6000 rpm
最大トルク：103 N－m（10.5 kg－m）/3200 rpm

「ワクワクするデザイン・パッケージング、驚きの燃費、なるほどの走り」を基本コンセプトに、居住性を重視した軽トールワゴンが主流の中、主に女性をターゲットに、居住性よりもデザインを重視して開発された。スバルの新しいデザインシンボル「スプレッドウイングズグリル」と名付けられた航空機をモチーフとしたデザインのフロントグリル、バックドアオープナーには六連星エンブレムが使われた。

滑らかな作動フィーリングを実現する配光可変型前照灯の開発（第２報）

Development of Adaptive Driving Beam System to Achieve Smooth Operation Feel (Part 2)

村　松　悠　太[*1] Yuta MURAMATSU
浅　野　憲　昭[*1] Noriaki ASANO
友　枝　　優[*2] Yu TOMOEDA
小　川　原　也[*3] Genya OGAWA
山　本　照　亮[*4] Teruaki YAMAMOTO

抄　録

新型フォレスターに新機能として配光可変型前照灯“アダプティブドライビングビーム”(ADB)を搭載した。

配光可変型前照灯を実現するために、ロータリーシェード方式のヘッドランプを新規開発した。これとアイサイトVer. 3(以下、アイサイトと呼ぶ)を組み合わせることにより、対向車・先行車に対しグレア(眩しさ)を与えずに､周囲へのハイビーム照射を可能とする。

ロータリーシェードの持つ連続的な配光の変化と走行シーンに応じた配光制御により、滑らかな作動フィーリングを持つ配光可変型前照灯を実現した。

本稿ではこれらの技術と走行シーンに応じた制御方法について報告する。

Abstract

SUBARU developed a light distribution variable headlight “Adaptive Driving Beam (ADB)” for SUBARU FORESTER.

For this system, we developed an optical control unit using a rotary-shade headlight as well as “EyeSight Ver. 3”. These techniques make it possible to illuminate high beam without giving glare to forward and oncoming cars.

To achieve smooth operation feel of the light distribution variable headlight, we controlled the light distribution movement pace and method depending on continuous light distribution changes.

We report on these technologies and the ADB system tailored to driving scenes.

1.　まえがき

日本の交通事故件数で夜間の占める割合は全体の26%であるが、死亡事故件数は昼夜間でほぼ同じである。これは夜間が昼間よりも死亡事故の危険性が約3倍高い事を示し[(1)]、原因としては夜間に視認性が低下し路上の歩行者や障害物の発見が遅れる事が考えられる。

ヘッドランプの照射距離は一般的にロービームが40 m迄であるのに対し、ハイビームは100 m以上となる。そのため、ハイビームを活用することで歩行者や障害物の早期発見が可能であると考える。しかし、前方車が存在する場合は、眩しさを防止するためロービームに切り替える必要があり、路肩の視認性を十分確保できないという課題があった。

以上の様な背景から、前方車に眩しさを与えずに周囲をハイビーム照射可能な配光可変型前照灯制御の搭載が進んでいる[(2)]。配光可変型前照灯制御はハイビームと遮光領域の境界線(以降、カットラインと呼ぶ)を遮光対象外側に設定し眩しさを防ぐものである(**図1**)。

本稿では第1報[(3)]で報告した“ステレオカメラを用いたヘッドランプ切替制御”技術を用いた配光可変型前照灯について、その構造と“滑らかなランプ作動フィーリング”を実現する手段について報告する。

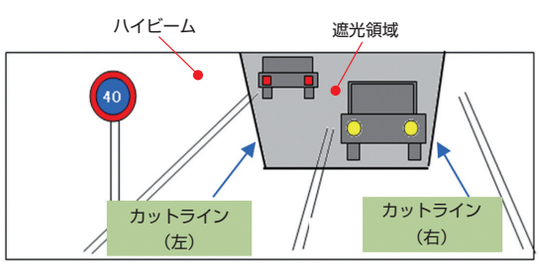


図１　ADBの動作イメージ

＊1 外装設計部
＊2 車両研究実験第2部
＊3 車両研究実験第4部
＊4 株式会社小糸製作所

2.　光学構造

本章では、滑らかな作動フィーリングの配光可変型前照灯を実現するための光学構造とその特徴について述べる。

2.1　光学構造概要

通常前照灯はシェードと呼ばれる部品で照射範囲を制御する。従来の配光可変型前照灯では複数のシェードを組み合わせることで照射範囲を制御している。この場合、限られたパターンでしか照射範囲を制御できないため、照射範囲を可変するためにユニット自体にスイブル（回転動作）を組み合わせる必要があった[(5)]。

そこで、よりシンプルな手段で滑らかな配光制御を実現するために、ロータリーシェード方式を採用する。通常のシェードと異なり、円柱形状のシェードの外周にハイビーム用、ロービーム用、配光可変用等、それぞれの配光を実現するための形状が連続的に生成されている（図2）。この連続的に生成された形状を、モータにて回転制御することによって、配光パターンを無段階に可変することが可能となり、繋ぎ目のない滑らかな作動フィーリングを実現できる（表1）。左側灯具と右側灯具はそれぞれ異なる形状のロータリーシェードを持ち、左側灯具のカットライン（左）、右側灯具のカットライン（右）を合成することで、遮光領域を生成する（図3）。

また、モータの速度や回転方向を左右灯具でそれぞれ適宜調整することで、走行シーンに合った制御が可能となる。

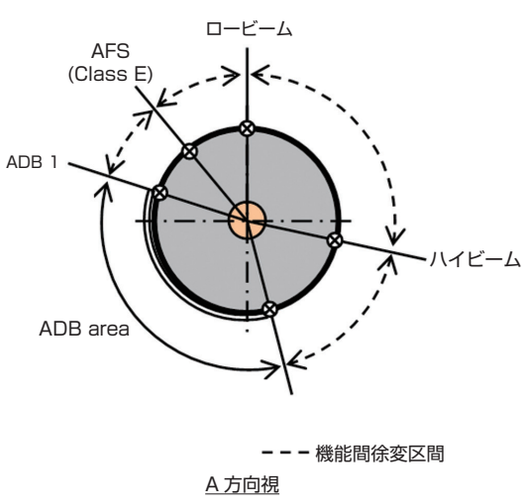


図２　ロータリーシェード概要

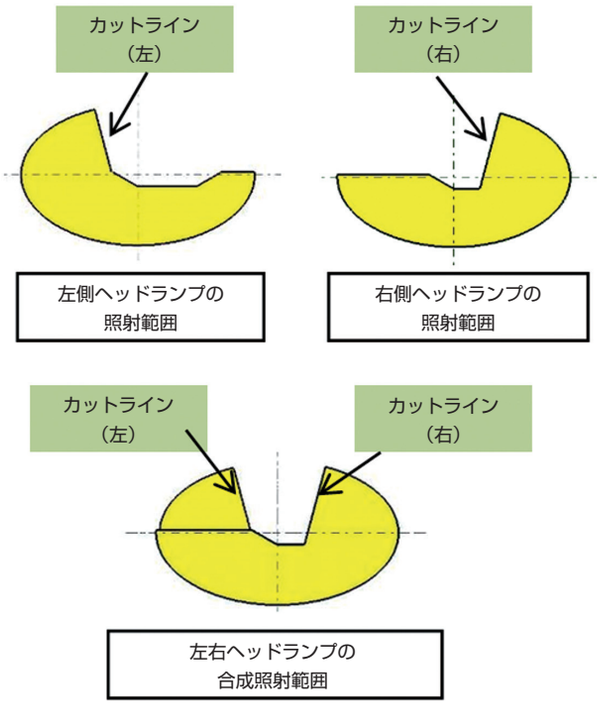
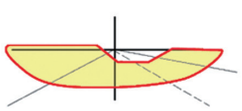
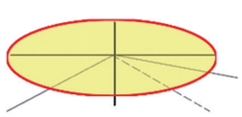
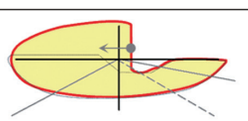
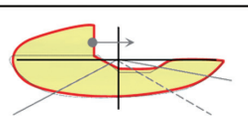
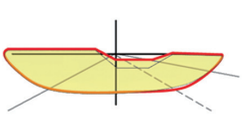


図３　左右灯具のカットライン

表１　ロータリーシェードと照射範囲

機能	照射範囲	ロータリーシェード
ロービーム		
ハイビーム		
ADB		
		
AFS (Class E)		

2.2　構造特徴

このロータリーシェード方式はロービーム、ハイビーム、配光可変型の各機能を1つの部品で切り替えることができるため、コンパクトな機構で実現可能である。この機構を高輝度光源と組み合わせることにより、1つのユニットですべての機能を実現することが

できる。今回、ベースとして使用したのは小糸製作所製のLEDユニット[5]である。ベースとなるユニットはハイビームを実現するために十分な光量を持ち、かつLED特有の省電力で小型なユニットである。ロータリーシェード機構自体がコンパクトであるため、ベースとなるユニットからの変化点はシェードの部分の組み換えで実現可能であり、配光可変型ユニットとベースユニットの互換性のあるユニットとすることができた（図4）。

図４　ロータリーシェードユニット分解図

2.3　光学特徴

従来の方式ではカットラインは決まったパターンを持ち、ユニットごと左右にスイブル（回転動作）することで配光可変を実現している。ユニット全体をスイブルする場合、それぞれのカットライン（左／右）の動きに合わせてヘッドランプの光軸方向（光を照射する方向）も移動する。

一方、本光学方式ではカットラインの左右移動をロータリーシェードのみで実現できるため、光軸方向が変わらない。そのため、配光可変作動時もヘッドランプで照射する最も明るい部分の移動がなく、ドライバの視線の方向を照らし続けることができる。また、カメラのような可視光で周囲の運転支援するシステムに対しても、光軸方向が変わらないことで画角内の照度が変わらず、認識性能への影響を抑制できる。

本来、スイブル制御は旋回時の前方視認性確保が目的である。本方式では、旋回時にはスイブル制御、前方車両がいる場合もグレアを与えない可変配光制御、これら2つの機能を独立して作動することができることも特徴である。

3.　システム構成

本章ではロータリーシェードユニットを用いた配光可変型前照灯システムとその制御方法について述べる。

3.1　システム概要

配光可変型前照灯システムは主にステレオカメラとヘッドランプECU、ヘッドランプで構成されている。それらが車両内通信網につながることで車両の状況及び周辺の状況に応じた制御を行うシステムとなっている（図5）。ステレオカメラとヘッドランプECUはそれぞれCAN通信にて情報を伝達する。このときCAN通信から車速情報やステアリング舵角情報を入手し、制御に用いている。また、ヘッドランプECUとヘッドランプはLIN通信にて接続している。

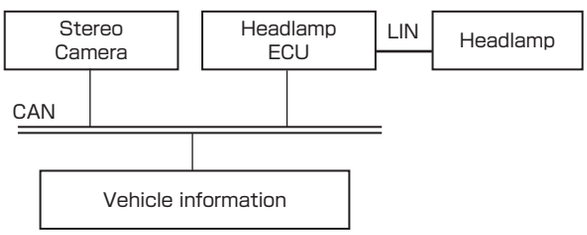


図５　システム構成

3.2　処理の流れ

第1報で述べた通り、ステレオカメラで自車前方の前走車及び対向車との関係や街灯の有無を算出し、配光可変型前照灯の作動可否、前方車両の有無、前方車両有の場合はカットラインの位置を指示する。また、作動した結果をヘッドランプECUからフィードバックを受けることで次回制御に活用している。

ステレオカメラからカットラインの位置指示を受けたヘッドランプECUは、ヘッドランプに対する作動指示を行う。まず、ヘッドランプECUは周辺照度や自車の走行状態の情報から配光可変型前照灯の作動可否を判断する。配光可変型前照灯作動条件が揃っている場合、ステレオカメラから指示のあったカットライン位置をヘッドランプに指示する。この際にスイブル装置を装備している場合、ステアリングの操作舵角と車速から、車両の挙動を算出しヘッドランプへの角度指示に補正を加える。これにより、配光可変型前照灯機能とスイブル機能の同時作動を可能にする。また、滑らかな作動フィーリングを実現するために、ヘッドランプECUは前回からの状況の変化を算出し、時系列での前走車・対向車の有無や位置情報を基に、シーンに応じた適切な制御を行う。ヘッドランプECUはヘッドランプ動作後のフィードバックを受けステレオカメラへ作動結果を出力する（図6）。

4.　シーンに合わせた配光制御

本章では、ステレオカメラや各センサーから得られた情報を基にした配光制御について述べる。

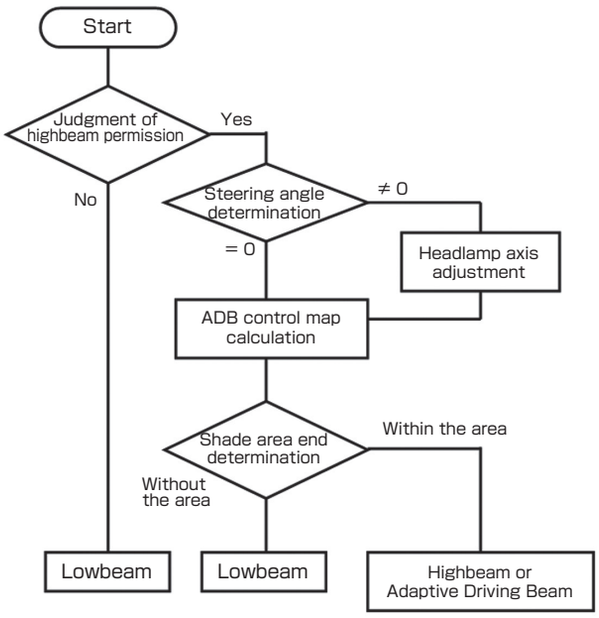


図 6　ADB 制御フローチャート

表 2　ロータリーシェードの作動速度

			現在の状態							
			Low Beam		High Beam	ADB1		ADB2		AFS
			先行車	対向車	–	先行車	対向車	先行車	対向車	–
次の状態	Low Beam	先行車			遅い	遅い	遅い	遅い	遅い	遅い
		対向車			普通	普通	遅い	普通	遅い	遅い
	High Beam	–	速い	速い		速い	速い	速い	速い	速い
	ADB1	先行車	速い	速い	遅い			遅い	遅い	速い
		対向車	速い	速い	普通			遅い	遅い	速い
	ADB2	先行車	速い	速い	遅い	速い	速い			速い
		対向車	速い	速い	普通	速い	速い			速い
	AFS	–	遅い	遅い	遅い	遅い	遅い	遅い	遅い	

4.1　前走車・対向車の挙動による制御

本システムでは前走車・対向車の状況変化によって配光可変型前照灯の作動速度を可変にしている（表2）。例えば対向車とすれ違った際には、前方に車両がないことが明確である。そのため、ステレオカメラの情報が対向車有から無に変わった際には、即座に対向車側へ光を照射する。一方、前走車がいる場合には、カーブや障害物で検出と未検出を繰り返すシーンがある。その場合、未検出時に即座に光を照射すると、照射と遮光を繰り返すハンチング状態となる可能性がある。このようなハンチングを防ぐために、前走車に対する作動はロータリーシェードのモータ制御を低速で行う。ロータリーシェード方式では各機能に移行する間のシェードが連続的な形状であるため、モータの回転速度を低速にすることで、配光の変化が緩やかになる。これによりハンチングを軽減し滑らかな作動フィーリングを実現できる。

4.2　連続的なフェンスの有無による制御

自動車専用道路のように中央分離帯にフェンスが設定されているシーンでは、フェンスの影響により対向車が断続的に検出される状況が発生する。このような場合に前述の制御方法で配光可変型前照灯を作動させると、対向車の出現に合わせて作動してしまい、ハンチングが発生する。そこで自動車専用道路走行状態で対向車が現れた場合に、一定期間対向車側（右側）灯具の配光可変作動を停止（ロービーム状態に固定）する。この際に左側灯具の配光可変制御は維持することで前方の視界を確保しつつ、ハンチングの発生を抑制した滑らかな作動フィーリングを実現する（図7）。

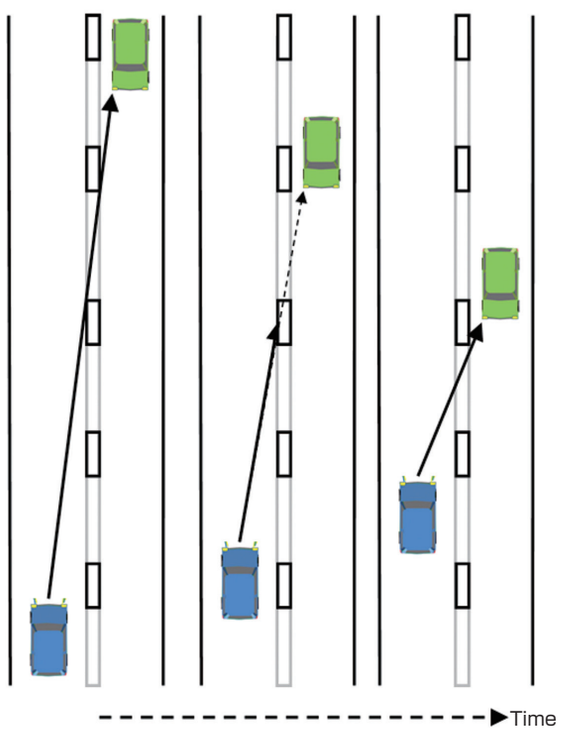


図 7　フェンスがあるシーン

5.　まとめ

ステレオカメラとロータリーシェード方式の機構を用いた配光可変型前照灯により走行シーンに応じた滑らかな作動フィーリングを持つシステムを実現した。

本システムは、他の交通利用者のグレアを防ぎつつ、ドライバに広い範囲での視界を提供できる。これにより夜間の歩行者や障害物の早期発見が可能となり、衝突事故低減に寄与できると考える。

また、ステレオカメラを用いて配光を制御し、ヘッドランプの照射範囲を広げることで、夜間のカメラの検知精度を向上させるという相乗効果が期待できる。現在、自動ブレーキやレーンキープなどでカメラを活用しているが、今後の自動運転に向けて照射範囲の拡大は必須の技術であると考える。

一方でヘッドランプに用いるLEDの技術は日進月歩であり、配光可変型前照灯の実現方法についても様々な新しい手法が提案されている。ロータリーシェード方式を含め、時代進化に合わせた最適な手法で、常に安心安全な夜間視界をドライバやカメラに提供できるよう、技術開発に取り組む。

参考文献

(1) ITARDA Information No.83
(2) 中村　正ほか：マツダの先進安全技術「i－ACTIVSENSE」の進化，マツダ技報 No.32 p.216-221（2015）
(3) 小川原也ほか：滑らかな作動フィーリングを実現する配光可変型前照灯の開発（第1報），スバル技報，No.43（2016）
(4) 大塩洋彦ほか：ハイビーム配光可変ヘッドランプの研究開発と商品化（技術開発賞），自動車技術，Vol.68 No.6 p.8-9（2014）
(5) 松本明浩ほか：ヘッドランプのハイビームとロービームを一つのLEDで切り替える小型・軽量ユニットの開発，自動車技術，Vol.69 No.5 p.96-97（2015）

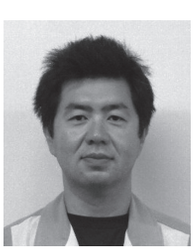
【著　者】

村松　悠太

浅野　憲昭

友枝　　優

小川　原也


山本　照亮

スバルのパワーユニット開発を支えるMBDの紹介

Introduction of MBD for SUBARU Power Units

神丸 慎二[*2] Shinji KAMIMARU
田辺 大樹[*4] Daiki TANABE
高田 知洋[*3] Tomohiro TAKADA
伊津井 裕[*5] Hiroshi ITSUI
高橋 俊太郎[*6] Shuntaro TAKAHASHI
山本 俊介[*1] Shunsuke YAMAMOTO
渡邉 豪[*1] Go WATANABE
湯村 洋典[*1] Hironori YUMURA

抄 録

市場における燃費性能の要求は高まっており、開発サイクル短縮・効率化が至上命題となっている。スバルでは燃費性能開発を効率良く実施するために、MBD（Model Based Development）に取り組んでいる。MBDを推進する上で、最も重要な事は「モデルを部署を跨いで共有し、各工程で利用する」ことにある。

本論文では「モデルを部署を跨いで共有」する仕組み“燃費ライトCAE”について紹介し、車両企画および車両検証における活用事例を示す。

さらに各システムに関する機能検証ではMBC（Model Based Calibration）の取り組みおよび統計モデルの活用事例について紹介する。MBCを実施する際に得られる統計モデルを“燃費ライトCAE”の車両モデルに追加する事で、より詳細なモデルが得られた。このモデルをHILS（Hardware In the Loop Simulation）を利用したECU（Engine Control Unit）の制御機能検証に流用する事で、大幅な試験効率化に成功した。

Abstract

Requirements for vehicle development speed and efficiency are getting stringent because the market has demanded lower fuel consumption. To meet this, SUBARU has adopted MBD. To take advantage of MBD, “sharing and reuse of the same model for every development phase” is the most important thing.

This report introduces “LiteCAE” which enables this, and shows its application examples in setting targets for power units and validating vehicles.

In the phase of validating power unit functions, application examples of MBC and statistical models for engines are utilized. The combination of LiteCAE models and statistical models can simulate more specific vehicle behaviors. This method also facilitates the quality check of ECU using HILS with greater efficiency.

1. まえがき

各国の燃費規制が厳しくなる中、同時にお客様の燃費志向も高まっており、市場における燃費性能の競争は激化している。そこで開発サイクルを短縮し、より早く市場に燃費性能の高い商品を投入する事が求められている。

スバルでは燃費性能開発の工程を①車両企画（機能目標設定）、②機能設計、③部品設計、④部品検証、⑤機能検証、⑥車両検証、の6つに分け（図1）、各工程を効率良く実施するために、MBDに取り組んでいる。

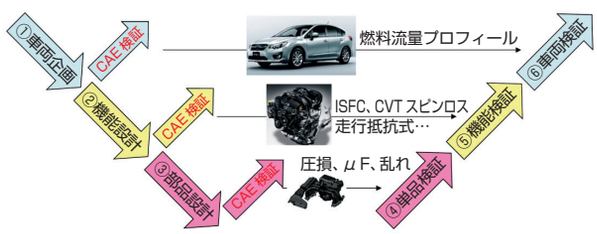


図1 V字プロセスとMBD

＊1 CAE部
＊2 パワーユニット評価実験部
＊3 PGM（環境対応）グループ
＊4 電子技術部
＊5 車両研究実験総括部
＊6 パワーユニット研究実験第1部

一方で、各工程で試験対象の試験品・試験項目とともに、関わるメンバーも異なるため、各々が個別の目的に沿う形でMBDを進めるケースが多い。しかし、個別にMBDを進めると自らの専門外のモデル構築に苦労する事が多く、また同じモデルを2つ以上の部署で作成していることが分からない場合があり、効率的な進め方とは言い難い。そこで、MBDを推進する上で、最も重要な事は「モデルを部署を跨いで共有し、各工程で利用する」ことにある。

本論文では「モデルを部署を跨いで共有」する仕組み“燃費ライトCAE”について紹介する。ここでは各工程でどのように共通のモデルを利用しているかについて、図1の①車両企画、⑥車両検証、における日程短縮と試算精度向上への活用事例を述べる。

さらに⑤機能検証ではMBCで取得した統計モデルを燃費ライトCAEの車両モデルに追加しHILSを利用したECUの制御機能検証に流用する事で、大幅に試験を効率化した事例を紹介する。

2. 燃費シミュレーションの概要

ガソリンエンジンとCVTを搭載した車両のシミュレーションモデル(図2)を示す。

車両モデルはエンジン・トランスミッション・車体およびコントローラユニットで構成され、MATLAB/Simulinkで記述・動作する[(1)]。以降ではそれぞれのモデルの詳細を示す。

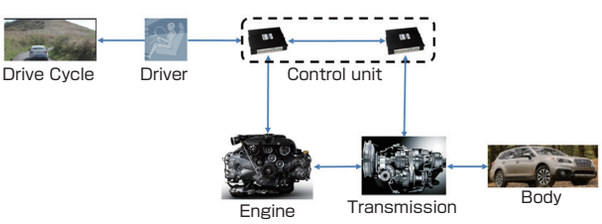


図2 燃費シミュレーションモデル概要

2.1 ドライバーモデル

燃費シミュレーションモデルでは法規で定められたドライブサイクル(以降、法規車速と表記)に追従するよう、ドライバーモデルでアクセル／ブレーキ操作を行う。ドライバーモデルは基本的にPID制御で構成されており、法規車速とシミュレーション車速の偏差をPIDゲインで調整することで法規車速に追従させている。しかし、PID制御だけでは車速追従性に限界があり、より良い車速追従を実現させるため、フィードフォワード制御も組み込んでいる(図3)。

2.2 エンジンモデル

エンジンモデルはエンジン単体試験データを元に作成される2次元マップで構成される。ECUから指示されるスロットル開度とエンジン回転数に基づき、図示トルク・エンジンフリクション・燃料流量を算出する。

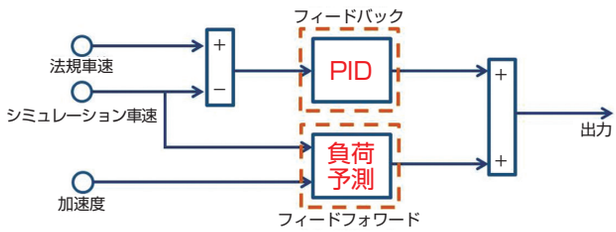


図3 ドライバーモデル概要

2.3 トランスミッションモデル

トランスミッションモデルはトルクコンバータ・オイルポンプ・CVTバリエータ、および各種ギヤで構成される(図4)。

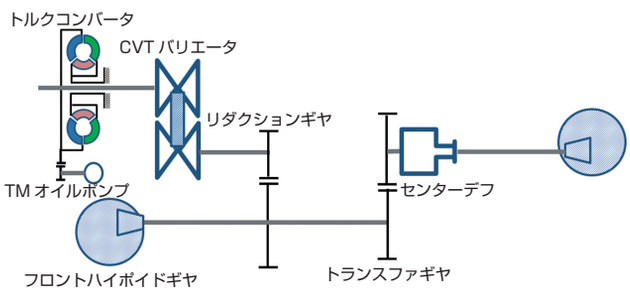


図4 トランスミッションモデルの概要（AWD）

トルクコンバータモデルは、流体特性とロックアップクラッチで構成される。流体特性はトルクコンバータ速度比に対するトルク比と容量係数で定義され、エンジンとCVTバリエータ間の伝達トルクを算出する。一方、ロックアップクラッチはロックアップダンパーの捻じれ角度からCVTバリエータへの伝達トルクを算出する。

オイルポンプはポンプ回転数・セカンダリ油圧・CVT油温に対する損失特性で定義し、エンジン正味トルクからこの損失を差し引いたトルクが、トルクコンバータに入力される。

CVTバリエータは入力されるトルク・回転数をプーリ比およびギヤ比で増幅・減速しドライブシャフトへ伝達する。その損失はCVT油温・入力トルク・プーリ比・回転数で定義するとともに、構成ギヤの伝達効率を加味している。

また、各構成要素の回転イナーシャは各軸上で考慮しており、支配的なものはトルクコンバータインペライナーシャである。

2.4 車体モデル

ドライブシャフトから伝達された駆動力から走行抵

抗（各国の認証試験で使用される走行抵抗式で表される抵抗力）を除いた力が余裕駆動力となり、車両重量と慣性モーメント分で除したものが車両の加速度として算出される。車速は加速度の積分として表現され、ドライバーモデルはこの実車速を法規目標車速へ追従するよう操作を行う。

2.5　コントローラモデル

コントローラはECUおよびTCU（Transmission Control Unit）で構成される。

ドライバーモデルから出力されるアクセル開度はECUおよびTCUへ入力され、ECUからはスロットル開度がエンジンモデルへ、TCUからはプーリ比がCVTモデルへ入力される。尚ECUからTCUへエンジン出力トルクをCANで送信しており、TCUは受信したエンジン出力トルクも考慮した上でプーリ比を算出している。

実際の車両に搭載されるコントローラの制御は複雑であるため、計算負荷軽減の観点から燃費試算に必要な機能のみ抽出してリダクションした制御仕様になっている。

3.　燃費ライトCAEの概要

本章では燃費シミュレーションモデルを誰でも簡単に構築できる“燃費ライトCAE”の仕組みについて解説する。ライトCAEとは、CAE専任者が行っている解析を自動化し、誰でも実行できるようにした解析自動化システムのことを指す。特にBPMS（Business Process Management System）と呼ばれるIT技術を特徴としており、プログラミングやネットワーク通信の知識が無いCAE専任者でも、Webブラウザを介したGUI（Graphical User Interface）上でワークフロー（図5）を作図することで、解析の自動化が可能となる[(2)]。燃費ライトCAEはこのシステムで提供する複数のアプリケーション（図6）の一つである。

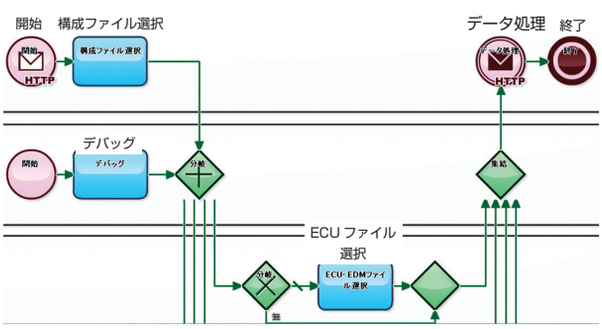


図５　燃費ライトCAEのワークフロー

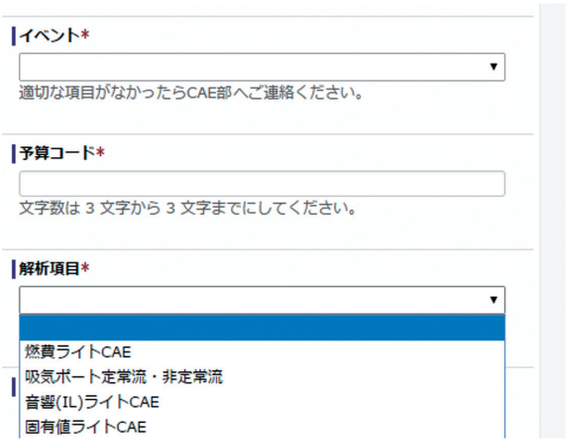


図６　メニュー選択画面

3.1　パラメータ取り込みの自動化

燃費シミュレーションモデルはMATLAB/Simulinkで記述され、車両モデルを表すSimulinkモデルファイルと車両諸元を表すM-ファイルに分かれる。Simulinkモデルファイルは各車両共通で使用可能だが、ハード諸元や制御ソフト定数はそれぞれの車両に合わせてM-ファイルの変更が必要となる。

一方、ハード諸元や制御ソフト定数はエクセルファイルで管理されているが、その中から膨大な量の数値を読み取り、手動でM－ファイルを変更することは、CAE専任者でも膨大な工数がかかる。そこでエクセルファイル→M－ファイル変換スクリプトを作成し、自動でM－ファイルを作成可能にした（図7）。このスクリプトはWebGUIでユーザが指定したエクセルファイルに自動で適用され、計算に必要なファイル一式が完成するとユーザにメールで通知される仕組みになっている（図8、9）。

この仕組みにより蓄積されている実験データが直接計算に利用可能になり、準備工数の効率化と誰でも解析できる環境を実現した。

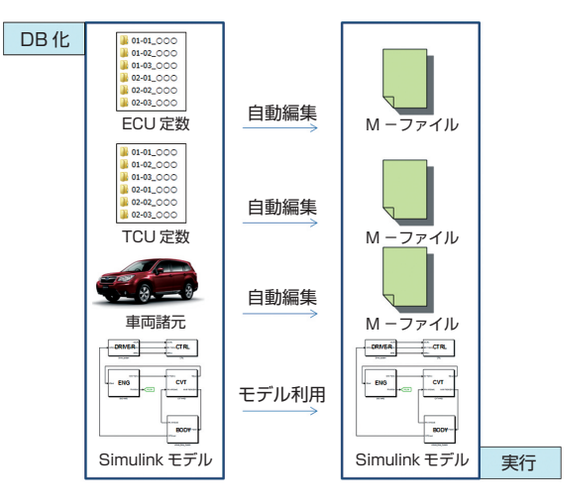


図７　エクセルファイル→M-ファイルの自動変換

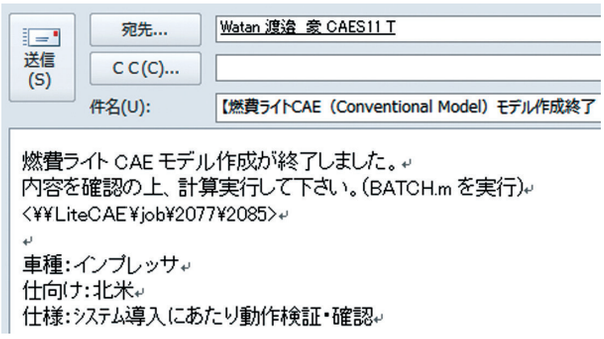


図８　モデル作成完了通知メール

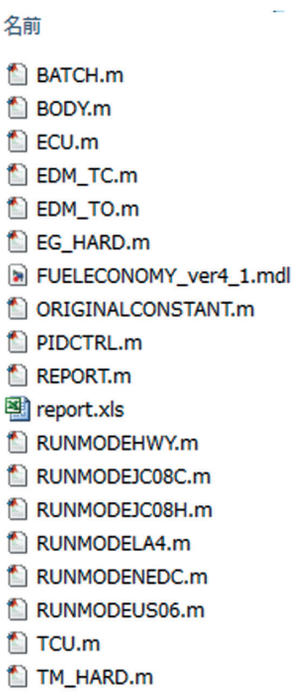


図９　自動作成された計算モデル一式

3.2　計算・結果処理自動化

計算モデル一式をユーザへメール配信後、ユーザはローカル端末で計算を開始する。計算実行から結果出力までM－ファイルにより自動化をしている。レポートファイル（エクセルファイル）に複数の計算ケースの入力パラメータを記入すると、順次これを読み込み、連続で計算実行する（表1）。計算が一度終了する度に計算結果をレポートファイル（シート追加）およびMAT－ファイルに出力していく。

計算後はレポートファイル上で比較したい計算ケースを2つ選択すると自動で可視化する。可視化は時系列データ（車速・目標車速との誤差・エンジン各状態量・CVT各状態量・各部損失エネルギー・燃料流量など）と数値結果（モード燃費・消費燃料流量・モード平均ISFC（Indicated Specific Fuel Consumption）・各部損失エネルギー・車速追従性評価など）で構成される（図10）。

表１　入力パラメータ画面（レポートファイル）

	A	B	C
1	Fuel_dens	mfile	mfile
2	0.72	BODY1	RUNMODEHWY
3	0.72	BODY2	RUNMODEHWY
4	0.72	BODY1	RUNMODEUS06
5	0.72	BODY2	RUNMODEUS06
6			
7			
8			

			単位	結果①	結果②
評価結果	運転モード評価	⊿距離	-	A	A
		⊿車速	-	A	A
		加速度	-	B	B
		仕事量	-	100.4%	100.4%
		図示エネルギ	kJ	10000	11000
		正味エネルギ	kJ	9000	9900
		ミッション Out エネルギ	kJ	8000	8800
燃費結果	燃費	Fuel consumption	[g]	500.0	550.0
		Total distance	[mile]	10.0	10.0
		Fuel economy	[mile/gal]	40.0	35.0

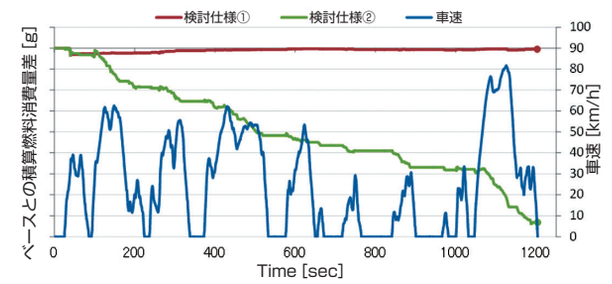


図 10　計算結果可視化画面（レポートファイル）

3.3　結果・ノウハウの共有

以上の計算環境により、燃費開発関係者であれば誰でも燃費シミュレーションが出来るようになった。さらに道具の使い方を誤ることなく、効率良く開発を進めるための教育の場が重要であると考え、スバルではユーザ会制を導入している。燃費ライトCAEユーザを定期的に招集し、モデルの解説・各ユーザの困りごと解決をはじめとして、ユーザの活用事例や開発状況、ライトCAEの機能向上要望などを共有し、ユーザの計算スキルアップやライトCAEのバージョンアップ計画立案に役立てている。ユーザの所属部署は様々で専門分野が異なる事から、一つの議題について多面的な議論が交わされ、ユーザの知見向上に貢献している（図11）。

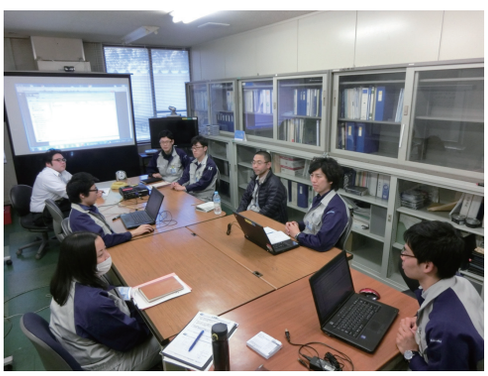


図 11　燃費ライト CAE ユーザ会の光景

4.　燃費ライトCAEの活用

燃費ライトCAEは、主に図1の①車両企画と⑥車両検証の工程で幅広い部署に活用されている。燃費ライトCAEの適用方法について、具体的な事例を交えながら工程毎に説明する。

4.1　車両企画工程における活用

車両企画工程では、開発車の要求燃費性能と実現手段を物理指標で紐付け、開発目標値を決定することが求められる。本工程では、要素毎の目標指標を元にモード走行状態を予測するツールとして燃費ライトCAEを活用している。

燃費ライトCAEには、ISFCおよびエンジン機械損失特性マップ、補機ロストルクマップ、CVT損失特性マップ、車両走行抵抗式が必要となる（表2）。

要素専門部署は、要素毎の目標性能を上記指標に反映するため、要素単独の燃費改善効果や貢献度を試算するケーススタディに燃費ライトCAEを使用している。

燃費企画部署は各専門部署から提供された各物理指標を燃費ライトCAEに反映してモード燃費値を試算し、開発車の燃費目標値を設定する。

競合車の燃費性能を比較して、商品力となるモード燃費値の目標達成シナリオが完成するまで、燃費企画部署-要素専門部署間で調整・折衝を繰り返す。

このサイクルは以前から存在したが、各要素の燃費影響度が見えず、改善の切り口発掘に苦慮していた。

燃費ライトCAEの導入により、燃費性能の伸び代が見える化され（図12）、要素目標と目標燃費達成シナリオの構築日数を約1/3に圧縮した。

表2　燃費ライトCAEに必要な物理指標（一部）

要素	特性
燃焼損失	ISFCマップ
EG損失	図示トルクマップ
	ファイヤリングフリクションマップ
	エアコンフリクション
	オルタ負荷
	回転慣性
TM損失	オイルポンプ特性
	トルコン特性
	バリエータ特性
	ギヤ効率
	回転慣性
BY損失	走行抵抗式
	回転慣性
	車両慣性

目標燃費達成シナリオが決定すると、設計部署を中心に各要素目標の図面化が行われ、関連全部署のデザインレビューを経て試験車製作に移行する。

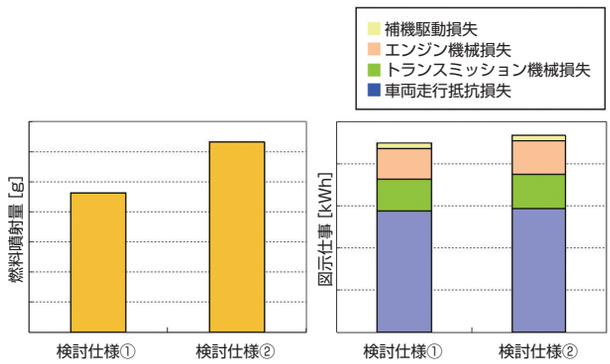


図12　モード全体の燃料噴射量と要素毎図示仕事

4.2　車両検証工程における活用

試作車に搭載する各要素の単体性能を確認した後に、車両検証工程へ移行する。車両検証では、車両企画時に実施したシミュレーションの時系列データと試験結果を比較し、全ての時刻において各状態量が目論見通りに推移しているかを検証する。特に試験バラつきの主要因である、法規車速に対する試験車速の追従性を、SAEJ2951を参考に作成した運転評価シートを使用して定量化し、バラつきが一定値以内になるように管理している（図13、14）。

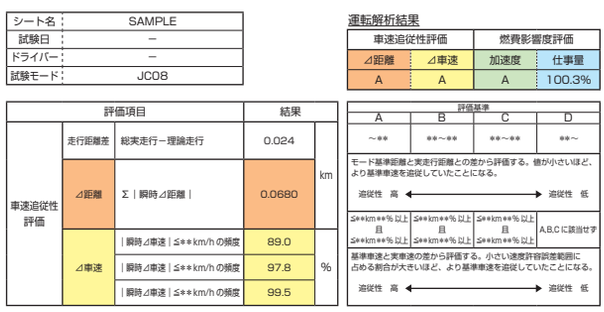


図13　運転評価シートによる車速追従性の定量化

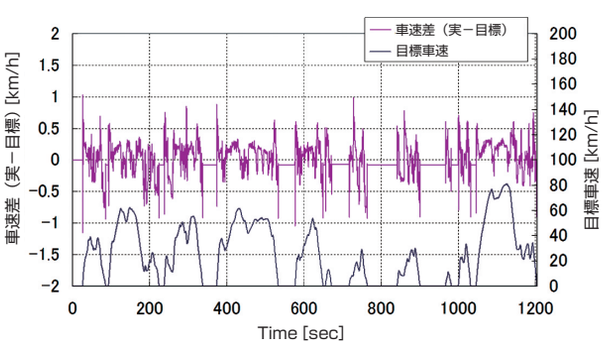


図14　時系列データによる車速誤差の評価

ISFCと図示仕事量へ分離し、ISFCはISFCマップで、図示仕事量は時系列で検証する事で、燃焼系と慣性・機械損失系における燃費の改善ポイントを抽出している（図15、16）。

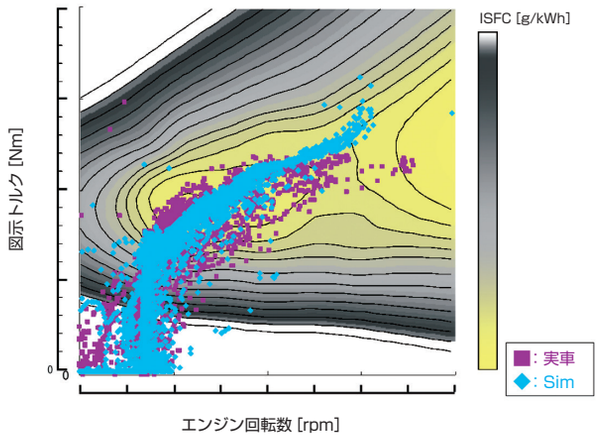


図 15　ISFC マップによる走行領域確認

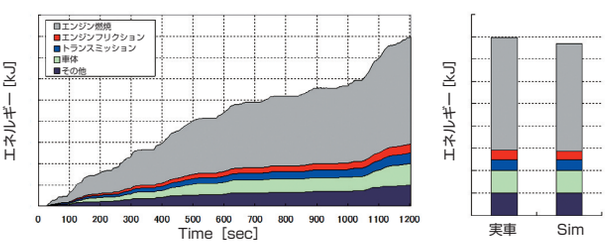


図 16　積算図示仕事量とその内訳

燃費ライトCAEを導入することで経験則によらず、最適な仕様を試算する日程を大幅に短縮し、検証精度を飛躍的に向上することができた。

5.　部門間におけるMBD協力事例

ここまでは車両レベルのMBDについて述べてきたが、本章では機能レベルのMBDに焦点を移す。エンジン開発で実施しているMBDとして、MBCを利用したエンジン制御定数適合とHILSを利用したECUの制御機能検証を取り組み事例として取り上げ、これらと燃費ライトCAEを組み合わせる事で大きく効率化が図れた事例を紹介する。

5.1　MBCを利用したエンジン制御定数適合

MBCは実験計画法(DoE：Design of Experiments)により決定した試験点の計測結果よりエンジン統計モデルを作成し、各エンジンデバイス動作の最適な値を算出する手法である。

これまでは各エンジンデバイスの格子点を網羅的に計測する事で全体の傾向を掴み、最適化を実施していた。しかし、近年のエンジンは環境規制対応のためエンジンデバイスが増加し、従来の最適化手法では膨大な試験点数が必要となる事から、MBCによる効率化が必須となっている。MBCにより適合工数の削減が可能となる理由は、DoEを用いた最小限の試験点計測結果により作成されるエンジン統計モデルを用いて各エンジンデバイス動作の最適化を行うためであり、適合を実施するパラメータ数が増すほど試験点数の削減が可能となる(図17)。

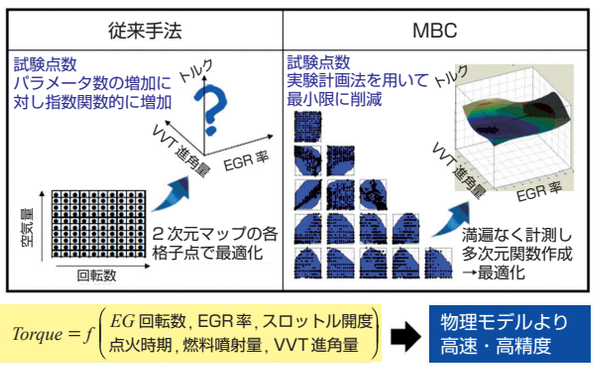


図 17　従来適合手法とMBC

エンジン制御定数適合の目線では、MBCの過程で算出したエンジン統計モデルは工数削減を実現させるために必要となるツールであるが、車両開発の目線では異なる役割を持つ。一例として、「2.2 エンジンモデル」に示される2次元マップのエンジンモデルと入れ替える事により、従来よりも詳細なエンジンモデルを搭載した車両モデルにて燃費シミュレーションが実施可能となる(図18)。さらに後述するHILSにもMBCの過程で算出したエンジン統計モデルは用いられている。つまり、エンジン制御定数適合にMBCを用いる事でハードの持つ能力を最大限に引き出すのみでなく、高精度なエンジン統計モデルを取得でき、さまざまな工程で再利用できる[(3)]。

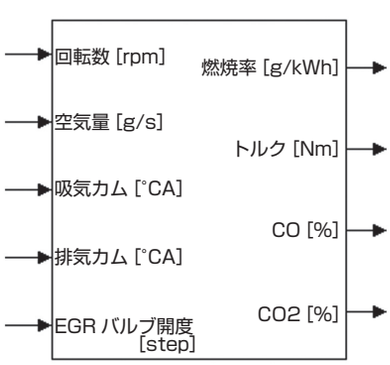


図 18　MBC からエクスポートされたエンジンモデル

5.2　HILSを利用したECUの制御機能検証

HILSとは実物のコントロールユニットと連成して実施するシミュレーションであり、HILS試験機の中で車両モデルを動かして疑似信号を生成する事で、試験車が無くても同等のバーチャルテストが可能になる(図19)。

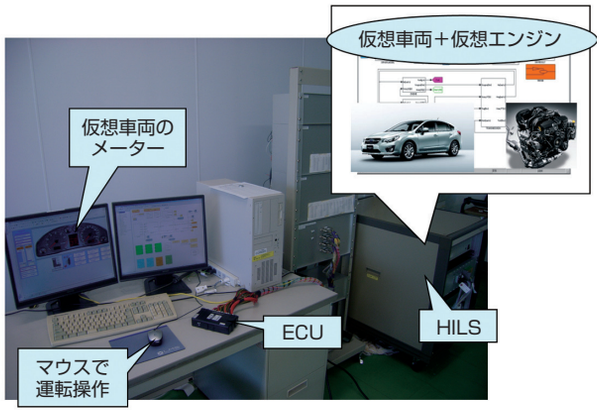


図 19　HILS 試験環境

ECUのソフトウェア開発・ハードウェア開発において、あらゆるユースケースの中で意図せぬ挙動が発生しないように網羅的な試験を実施する必要がある。大量の試験を限られた期間で実施するためにも、HILSを利用した試験は大きな効率化をもたらしている。

但しHILS上で可能な試験項目は車両モデルの詳細度に依存する。特に制御対象となる要素のモデルが詳細であればあるほど、テスト項目を増やすことが出来るため、大きな効率化につながる。

5.3　燃費ライトCAE・MBC・HILSの融合

HILSでは従来、燃費ライトCAE相当のシンプルなプラントモデルを利用しているが、ECUの検証効率を向上する上でエンジンモデルの詳細度を上げる必要があった。そこで2入力（スロットル開度・エンジン回転数）、3出力（トルク・燃料流量・吸入空気量）だったエンジンモデルをMBCで作成したエンジン統計モデルへ変更する事で、6入力（スロットル開度・エンジン回転数・インジェクタ通電時間・バルブタイミング・EGRバルブ開度・点火時期）、9出力（トルク・燃料流量・吸入空気量・マニフォールド圧力・A/F・各排ガス成分）へ増やす事が出来た。その結果、テスト実施におけるシミュレーション利用比率を2倍以上に向上することができた（図20）。

また、上流工程で作成したプラントモデルを下流工程で利用するため、開発で要求する時期にHILSを準備する事ができた。

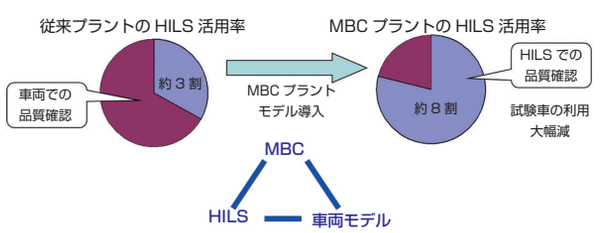


図 20　MBC モデル流用の効果

6.　まとめ・今後の展望

燃費ライトCAEを導入し、燃費性能開発の各工程の効率化を実現した。車両企画では物理に基づく企画を実施し、各要素性能の目標値を明示する事が可能になった。車両検証では各要素性能の未過達および時系列データの検証により、目論見との差異や燃費性能向上ポイントを検討出来るようになった。

機能検証においては、ISFC最適化定数適合にMBCを利用し、適合試験の効率化と性能の最適化を実現した。このMBCを通じて得られる統計モデルを燃費ライトCAEの車両モデルと結合し、HILSを利用したECUの制御機能検証に適用する事で、検証試験効率の飛躍的な向上とタイムリーな開発適用を実現した。

実際の現場における異分野へのモデル適合にはI/Oの整備や不足する入出力モデルの追加作成など、“他人の庭を掃く”行為が要求され、一日にしてならず、である。しかし、他人の庭を関係者同士お互い少しずつ掃く事で、今まで見えてなかった制約条件や物理法則が体得され、各専門分野のエンジニアが各々の新しい視点でアイディアを創出できる。今後も効率化という側面だけではなく、人材育成とイノベーション促進という観点からも、より多くの分野でMBDを推進していきたい。

参考文献

(1) 久保孝行：自動車業界MBDエンジニアのためのSimulink入門, TechShare株式会社, p.153（2012）
(2) 湯村洋典：BPMを利用した次世代ライトCAEの開発, スバル技報, No.40, p.152-156（2013）
(3) 柿崎ほか：モデルベース開発－モデリング、プラント・モデル、コントロール・モデル－, 日経BP社(2013)

【著　者】

神丸　慎二

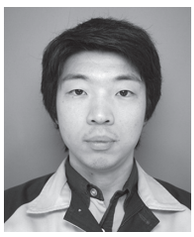
田辺　大樹

高田　知洋

伊津井 裕

高橋 俊太郎

山本　俊介


渡邉　　豪

湯村　洋典

成長期（平成初期）のスバル紹介

R1（2005年～2010年）

全長×全幅×全高：3285 mm×1475 mm×1510 mm
ホイールベース：2195 mm
エンジン：直列4気筒 DOHC　658 cc
最高出力：40 kw（54 ps）/6400 rpm
最大トルク：63 N－m（6.4 kg－m）/4400 rpm

走りや安全といった「自動車としての基本」はしっかりと踏まえたうえで、デザインや質感にも十分にこだわり、大人2人のための最適空間を追及した「スペシャリティ・ミニ」として開発された。乗車定員は4人だが、2人乗車をメインとして2＋2シーターパッケージ。取り回しの良さとして、R2と比較して、全長を110 mm、ホイールベースを165 mm短縮している。

ボディ電装系プラントモデリングにおける因果・非因果モデルに関する一考察

A Study of the Causal and Acausal Model of the Plant Modeling in the Body Electronics of Automotive

星　野　欽　哉*　　古　賀　祐一郎*
Kinya HOSHINO　　Yuichiro KOGA

抄　録

ボディ電装系における制御品質向上手段の一つとして、制御器、制御対象をそれぞれ数式等によりモデル化し、シミュレーションを様々な工程で活用するModel Based Development（以下：MBDとする）がある。制御対象のモデルはプラントモデルと呼ばれ、このモデルの精度（＝実機再現度合い）に、制御シミュレーション全体の精度が依存する。

プラントモデリングでは、因果モデル（微分方程式ベースのデータフローを表現した数学モデル）、非因果モデル（物理モデリングツールによるモデル要素を組み合わせたモデル）など様々な方式をとることができ、それらにより抽象化の度合いが異なる。また、プラントモデルの精度は、モデリングツールに依存するところが大きい。

本稿では、各プラントモデリング手法に着目し、因果／非因果でのプラントモデリング、モデリング環境及びコントローラモデルとの接続性について考察する。また、ボディ電装系におけるプラントモデルとそれらの活用フェーズについて検討した。

Abstract

Model based development（MBD）is an effective development method to improve quality in the body control domain. The model of controlled objects within a control system is called the plant model, the accuracy of which determines the accuracy of the simulation.

Engineers can choose from various plant modeling methods, such as the causal model（mathematical modeling based on differential equations）and the acausal model（modeling which components are combined in physics-based tool）. The abstraction level of the model varies according to which plant modeling method is used. Moreover, the accuracy of the plant model largely depends on which modeling tool is used.

In this paper, we considered all available plant modeling methods and plant modeling tools as well as connectivity to controller models. We also examined the state of plant models within the body control domain with a particular focus on the utilization phase.

1．まえがき

プラントモデリングは、制御系開発において重要な開発プロセスであるが、現時点では、業界共通のモデルが確立されていない事と、モデルに対する認識の違いや、開発環境の整備が十分でない事等により、さまざまな意見の混乱が見受けられる。

●プラントモデルの実現性と可用範囲が非現実的
・「プラントモデルは現象を100%再現すべき」
・「車両一台分のシミュレーションが前提条件」
●プラントモデルの適用範囲と運用への誤解
・「プラントモデルがあれば実験はいらない」
・「部品モデルの組合せで車両全体モデルが出来る」
・「粒度を上げれば、すべての現象に対応できる」

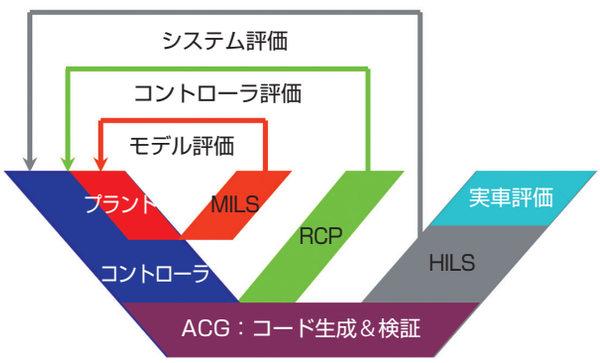
これらはプラントモデリングに対する十分でない理解に起因する。そこで、現時点で得られる技術的な知見から、モデリング技術、システム同定技術を概観し、ボディ電装制御系の開発においてプラントモデルをどのように活用するか、そのあり方について考察する。

＊ 電子プラットフォーム設計部

2. ボディ電装系のモデルベース開発

2.1 V字プロセス

モデルベース開発のV字プロセスがエンジン制御のみならずボディ電装系でも用いられる。制御モデル（コントローラモデル）と制御対象モデル（プラントモデル）、MILS、RCP、HILS、ACGの関係は図1となる。モデルは各所で必要な情報を付加され、形を変えて活用される。



MILS：Model In The Loop Simulation
RCP ：Rapid Control Prototype
ACG ：Auto Code Generation
HILS：Hardware in the Loop Simulation

図1 モデルベース開発のV字プロセス

2.2 モデルについて

モデルベース開発でいうモデルは、制御アルゴリズムやプラントモデルを何らかの数式、図及びプログラムで表現したものを指す。このモデルはシミュレーション環境上でその動的な振る舞いをシミュレーションできる。物理モデリングツールでは、モデルは最終的には数式群、微分方程式、代数方程式に明示的に、または、開発ツール内部処理により変換される。

シミュレーションツールは、この数式を近似的に各種の解析ソルバで逐次解く事により、シミュレーションの計算を進行する。

3. プラントモデリング

制御系開発におけるプラントモデリングとは、制御対象の動的振る舞いに関する知見を収集して、所望の特性を得られる様に、抽象化する事である。

物体の形状が無くても、数式群で表現する事で、制御に必要な情報が得られる。図2では、ギヤの形状が無くとも出力トルクと回転数を計算できる。

プラントモデリングには、物理モデリングツールを利用する方法、実機を用いて制御対象の特性を同定する方法、制御対象の特性を伝達関数などの数式で表し、

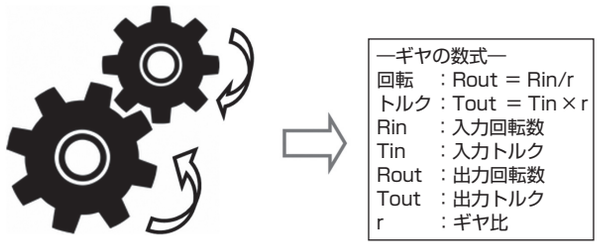


図2 ギヤの数式例

Simulinkでモデル化する方法等がある。次にプラントモデリングに頻出するキーワードを簡単に説明する。

3.1 モデルの表現

■パラメトリックモデル

パラメトリックモデルとは、有限個のパラメータで特徴付けたモデルである。数式やテーブルがよく知られる。

例：伝達関数、状態空間方程式

■ノンパラメトリックモデル

無限個のパラメータを用いてモデルが構成される。実験測定で得られることが多い。

例：周波数応答、インパルス応答

3.2 物理モデルと実験モデル

■物理モデル

物理則の第1原理に基づくモデル。物理システムは、システムを構成する要素からなり、外部と要素間及び要素間の相互作用によって振る舞いが時間的に変化する。

■実験モデル

実験で得られたデータから計算される。調整パラメータを持つモデルで、調整パラメータは、実験データとモデルの振る舞いの誤差を小さくする様に調整される。

■近似物理モデル

物理モデルに実験モデルを組み合わせる。系の物理則の一部が不明な場合にその箇所に実験式、テーブルデータや経験式を組み込む。

3.3 モデリング手法

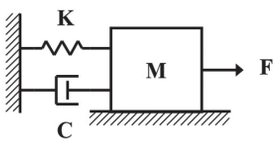
■ホワイトボックスモデリング

第1原理モデリングや、物理モデリングといわれるもので、運動方程式などを作って物理モデリングする方法。系を支配する物理則が自明であり、定式化が容易なときに用いられる（図3）。

■グレーボックスモデリング

第1原理モデリングをベースに、一部の未知なパラメータをブラックボックスモデリングの手法で推定す

る。系の一部の物理則が不明な場合、その箇所を実験式や折れ線テーブルで表現する（図4）。



$M\ddot{x}+C\dot{x}+Kx=F$

図３　ホワイトボックスモデリング

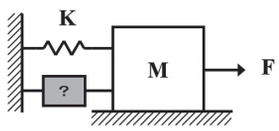


図４　グレーボックスモデリング

■ブラックボックスモデリング

実験などで得られた対象からの入出力データを基に、統計的にモデリングする方法。対象の内部を知る必要はない。系の物理法則が自明でないが、系の入力に適切な信号を与えて出力の時間的な振る舞いが測定できる場合に用いられる（図5）。

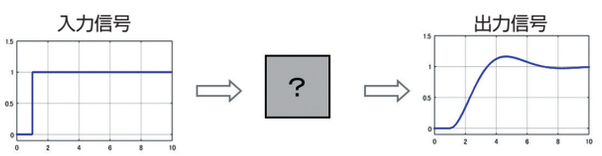


図５　ブラックボックスモデリング

3.4　システム同定

システム同定とは、プラントモデルを物理的知見や実験データに基づき制御対象を同定（パラメータ定数の決定、構造を確定）する事である（図6）。

得られるモデルは線形を前提とする。系の線形性が強い場合系の振る舞いを十分表現するが、系に非線形が多く含まれるとモデルと実物の乖離が大きくなる。

例：ARX モデル（Auto-Regressive Exogenous）
　　FIR モデル（Finite Impulse Response）

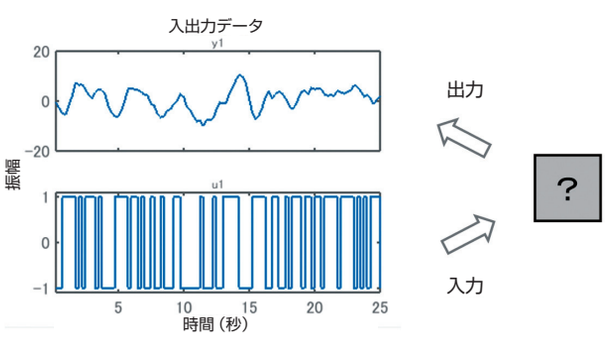


図６　システム同定によるモデリング

3.5　スルー変数とアクロス変数

多くの物理モデリングツールでは、内部変数としてスルー変数とアクロス変数が計算される。これらは物理ドメイン（領域）で異なる（表1）。

■スルー変数

キルヒホッフの第一法則（電流則）を満たす様な変数、モデル上の任意の接点に流れ込む量の総和がゼロとなる変数。

■アクロス変数

キルヒホッフの第二法則（電圧則）を満たす様な変数、モデル上の任意の閉回路にそって積分した総和がゼロとなる変数。

表１　スルー変数とアクロス変数

物理ドメイン	スルー変数	アクロス変数
電気	電流 [A]	電圧 [V]
油圧	流量 [m^3/s]	圧力 [Pa]
機械回転	トルク [Nm]	角速度 [rad/s]
機械並進	力 [N]	速度 [m/s]

3.6　因果モデリングと非因果モデリング

■因果モデリング（数式モデリング）

因果的モデリングとは、入出力が定義されたモデリングである。信号の流れは単方向となる。ツールの都合により、物理法則とは無関係な制約が課せられている（図7）。

例えば、電圧信号と電流信号では抵抗モデルが異なる。

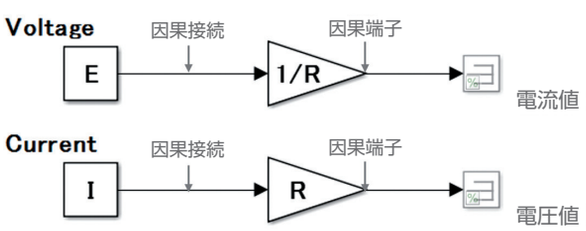


図７　抵抗要素の因果モデリングの例

■非因果モデリング（物理モデリング）

非因果的モデリングは入出力を定義しないモデリングである。 信号の流れは単方向とならず双方向になる。同じ構成要素には、同じモデルを利用する（図8）。

例えば電圧源と電流源で抵抗モデルは共通。

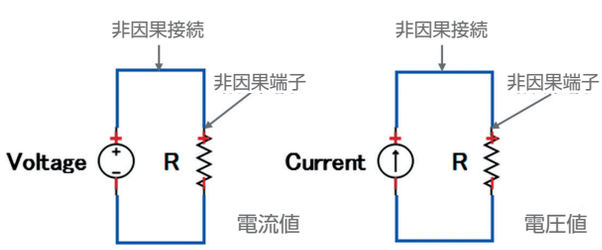


図８　抵抗要素の非因果モデリングの例

因果モデルと非因果モデルの比較は表2となる。

表２　因果モデルと非因果モデルの比較

	因果モデル	非因果モデル
入出力	必要	不要
シグナルフロー	代入式	相互作用
ソルバ	ODE	DAE
製品例	Simulink	Modelica 系
FMI	不可	可

ODE：Ordinary Differential Equation
DAE：Differential Algebraic Equation

3.7　FMI/FMU

異なる開発ツールでモデリングされた構成要素モデルを相互に接続し、全体としてシミュレーションするために、モデルの交換と統合を行う際の規格として、FMI（Functional Mock-UP Interface）の標準化が進んでいる。部分的には、すでに規格化されている（図9）。

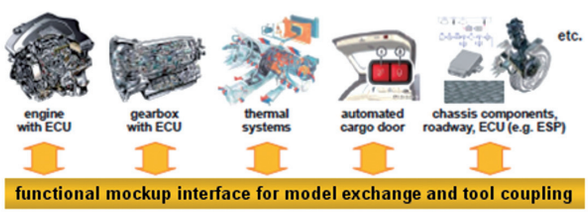


図９　FMI 構成 [13]

FMIで連携をおこなうためのモデルは、FMU（Functional Mock-up Unit）で、Model Exchange とCo-Simulationにより実行される（図10）。

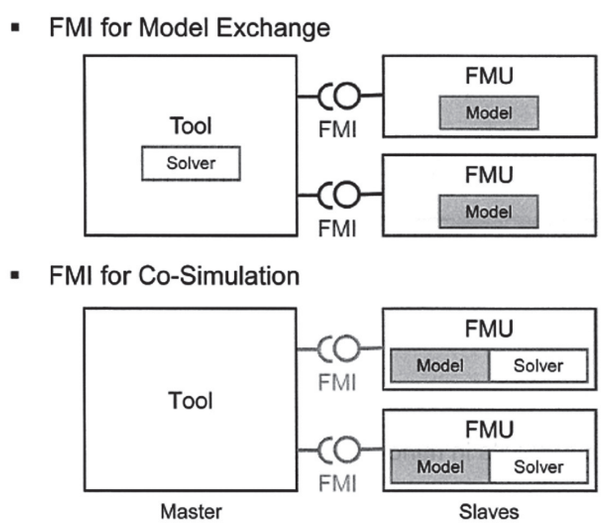


図 10　FMI/FMU 接続図 [13]

4.　モデルの接続

制御モデルとプラントモデルの接続方法を概観する。MATLAB/Simulinkを主体とした実装例とFMI接続を以下に示す。

4.1　同一ツールチェーン

同一ツールチェーン内に連携機能がある場合は、比較的スムースに接続できる。MATLAB/Simulinkでは、ほとんどシームレスに動作する。

Simulink上から他のツールを呼び出す場合には、サブブロック（S-Function等）で他のツールと入出力信号をやり取りする仕組みが必要になる（図11）。

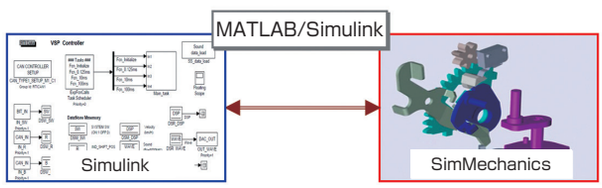


図 11　同一ツールチェーンでの接続

4.2　異機種間ツール接続

SimulationX等のマルチドメインツールは、ほとんどの場合、MATLAB/SimulinkとのI/F（Interface）を持つ。

通常は、プラント側が、サブブロック（S-Function等）化される例が多い。

接続には、S-Functionの部分で相応の作業が必要な場合もある（図12）。

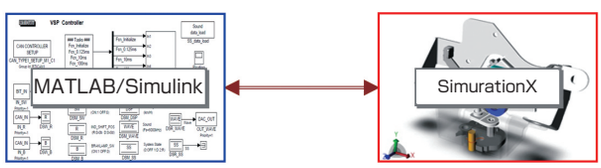


図 12　異機種間ツール接続

4.3　FMI接続

標準化I/Fであり今後の普及が期待される。Model Exchange、Co-Simulationにより実行される（図13）。

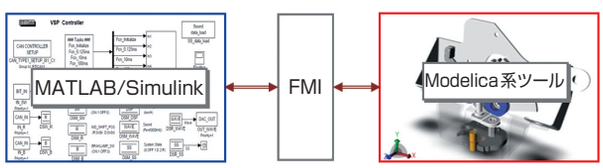


図 13　FMI 接続

4.4　MBSE連携

プラントモデルは、MBSE（Model-Based Systems

Engineering）ツールとFMI接続可能であり、上位工程の要件定義段階でのシミュレーションも可能となる。目的の異なる複数のツールを連携することで、エンジニアリングの効率向上とコスト削減を模索する方向性が広がる。プラントモデルを制御器と接続したシミュレーションだけでなく、いかに工程全体で活用するかが今後の大きな課題である（図14）。

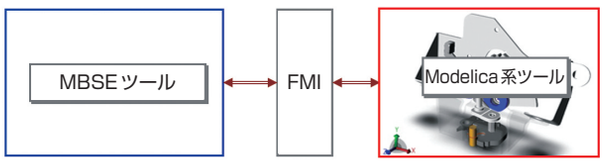


図14　MBSE連携

5.　プラント実装例からの考察

5.1　制御系設計での課題

開発工数の観点から、制御対象の物理モデリングには時間を割けない場合が多い。そのため適切な工数で対象をモデリングできるよう、モデルの適用範囲と表現精度を見極めることは重要である。以降では、ボディ電装系の制御設計において、いかに物理モデリングを適用・活用するか、試行から得られた知見をまとめる。

5.1.1　課題

試行からいくつかの課題が明らかになった。それら課題を以下に示す。

【数式化】

・数式化したプラントモデルが複雑すぎて簡単にモデリングできない。

・3次元上で振る舞う動的機構の数式化が難しい。

【抽象度】

・プラントモデル作成の精度、詳細度に明瞭な指標がない。

・モデルを適切な抽象度にするのが難しい。モデルに含める要素と含めない要素とそれらの有無によるシミュレーション精度の関係の見極めには相当のノウハウを要する。

【接続性】

・制御モデルと簡単に接続できない。

5.1.2　対策

本稿で、概説してきたプラントモデリングの技術要素を組み合わせての対応例となる。

【数式化】

数式モデルを物理モデリングツールの表現に置き換える。物理モデリングツールは、モデルがグラフィカルな表現で表され、モデルの可読性が向上される。

その結果、数式表現に起因したいくつかの問題点が軽減する。

【抽象度】

モデルの適切な抽象度を決めるにあたり、重要なのは、物理モデルの用途を明確にすることである。

解析用途、制御設計用途では、各々のモデルを必要な粒度で構築する事が必要になる。物理モデルを利用して、何が見たいのかを明確にすべきである。モデルの詳細度とシミュレーションの計算時間はトレードオフにあり、詳細度が高ければその分シミュレーションの計算時間は多くなる。効率的なエンジニアリングには適切な計算時間が重要となる。

例えば、ボディ電装系の制御では、多くの場合、制御対象の各部品は剛体とみなしてよい。剛体間の接続にバネや粘性、非線形要素を加えることで、制御の視点から見た動特性が表現される。部品のひずみやねじれまで考慮することは、制御の視点ではオーバースペックであり必要無い。

また、システムに含まれるロスの要因を詳細に細分化することも適切ではない。ロスをある定数とみなせば、パラメータ推定ツールにより、その定数の推定値を計算し現実の振る舞いに近づけることが可能になる。

ただし、プラントモデリングにおいては、物理モデリングツールのみにこだわる必要はない。物理モデリングツールで表現するのが難しい部分は、実験式、テーブルデータや数式モデルを活用する等の適切な役割分担も必要である。

【接続性】

制御モデルとプラントモデルを接続するには、以下のポイントを抑えることが重要である

・制御モデルとプラントモデルの入出力の関係

・制御モデルは離散系であり、プラントモデルは連続系である。離散系と連続系を接続する仕組みが必要になる。

・他ツールとの接続は、機能的に十分成熟していないことがしばしば見受けられる。各ツールベンダーの今後の開発に期待したい。

5.1.3　所見

ボディ電装系でのプラントモデリングでは次の利点が挙げられる。

【机上での振る舞い確認】

ボディ電装系では、多くが電気機械の組み合わせである。そこで、比較的容易にプラントモデリングが可能となり、対象物の動きを机上で確認できる様になる。

その結果、適切な試験信号をモデルに入力することで、制御系に何が起きているか?や、何が起きそうか?が把握できる様になる。

【システムの俯瞰】

システム全体を俯瞰する事で、システムの全体構造を検討・評価できる可能性が広がる。例えば各種制御理論の比較検討やパラメータチューニング、定格を満たす制御器の選定等にも活用できる。

5.2　コントローラ&プラントの階層

本稿では、制御系設計の各段階に合わせて、便宜的に、①簡易モデル、②詳細モデル、③検証モデルの3階層＋④解析モデルに分類している(図15)。

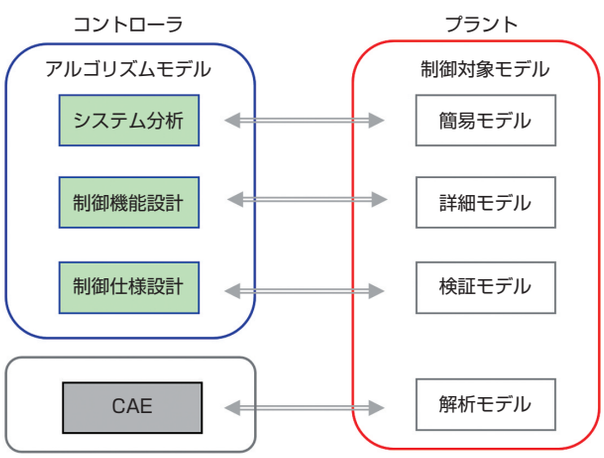


図 15　モデル階層の対比

各階層での活用ポイントをまとめる。3階層のモデルが制御系設計で活用されるモデルになる。詳細度は下に行くほど高まる。各段階に適切なモデルは詳細度により定まる(表3)。

表では、◎は最適、○～△は適、×不適を表している。前述の様に、プラントモデルの使用目的に合わせた粒度で構築する事も重要である。

表 3　プラントモデルの活用ポイント

	システム分析	制御機能設計	制御仕様設計	CAE
簡易モデル Simulink LabVIEW	◎	○	△	×
詳細モデル SimMechanics (1st. Gen.)	○	◎	○	×
検証モデル SimMechanics (2nd. Gen.)	△	○	◎	×
解析モデル SimulationX	×	×	○	◎

5.3　プラントモデルの実装例

①簡易モデル

数式ベースのモデリングであるが、アルゴリズム開発における、システム分析、制御機能設計及び制御仕様設計まで、オールマイティに使える(図16)。

HILS用プラントとしても、ほぼそのまま実装できる。

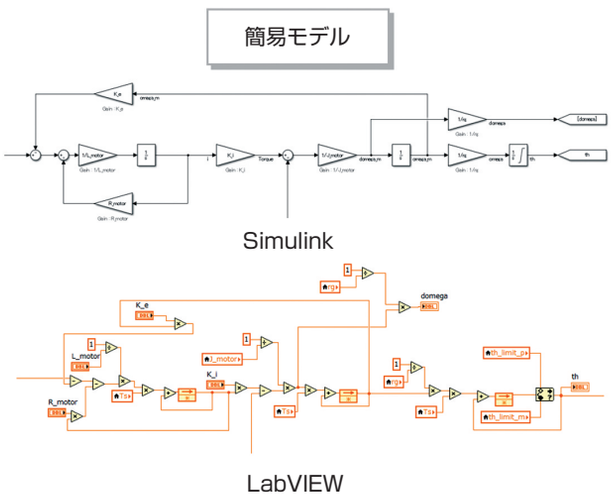


図 16　簡易モデル

②詳細モデル

制御系設計アルゴリズム開発に必要な電気系と機械系を物理モデリングツールで作成する。

複雑な微分方程式での記述不要でシミュレーションできる。

物理特性を内包しており、システム分析、制御機能設計で有効である(図17、図18)。

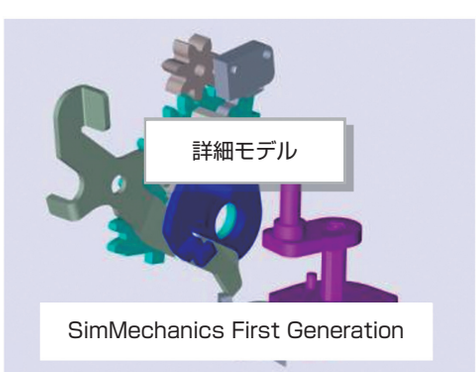


図 17　詳細モデル

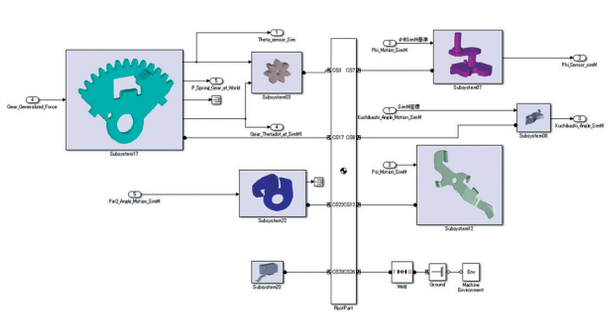


図 18　SimMechanics ブロック図

③検証モデル

制御系設計ツールチェーンの物理モデリングツールを用いた高精細度モデリング。

モデルに表現したい機構的な仕組みが不足する場合は、それをモデルに付加することで比較的簡単に拡張できる。但し制御系設計では、外乱抑制と制御対象の個体差を抑え込むよう制御系を設計するので、制御設計に不要な情報まで含めた高精細度なプラントモデリングは必要無い。

実機での連続運転が不可能な場合や、実機テストに危険が伴う網羅性検証の場合には、このレベルのモデルを準備したい（図19）。

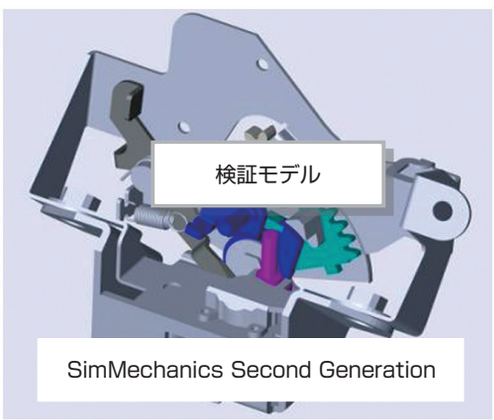


図19　検証モデル

④解析モデル

ほぼCAE領域に近いが、実機レスで制御系を開発する場合には、威力を発揮する。

但し、ボディ電装系の制御系設計では、このような専用の物理モデリングツールを活用しての高度シミュレーション技術が必要となる場合は、あまり多くはない。

今後の自動検証技術の採用（テストパターンの自動生成）時の検証パターンの自動実行には必要となる（図20、図21）。

5.4　プラントモデルの留意点

■代数ループ

プラントモデリングでは、意図しない代数ループが発生する場合がある。代数ループとは、現在のある変数値を計算するのに、その変数値自体が自身の計算に影響する現象で、想定外の動作を引き起こす可能性がある。

■スティフ系

固有値のオーダーが大きく異なる複数要素が混在する系をスティフと呼ぶ。例えば、高周波のスイッチングで回転機械を動かす系、剛性と弾性が大きく異なる

図20　解析モデル

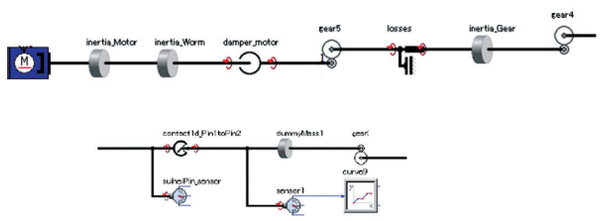


図21　SimulationX ブロック図

多自由度系等が例である。スティフなシステムの場合、全体のシミュレーション時間と、収束、発散防止に対する特別な処置が必要になる。

■発散・収束

ソルバの破綻等により、実機ではありえない動作をする事が計算上起こり得るので、シミュレーション結果を盲信せずに、その妥当性の定性的・定量的な評価は必須である。

5.5　考察

MBSEと連携する事で、新たな要求や、想定外の動作に柔軟に対応し、すばやい手戻りを実現できる。

プラントモデリングも、スパイラル型の開発プロセスに近く、アジャイル型の開発手法を用いて、素早い手戻りを実現する事で、要求の不備やシステムの問題点を上流工程で発見し、品質向上の手段になり得る。

制御系コントローラ開発と同様に、プラントモデリングの抽象度の選定は重要であり、モデルを使う工程に応じた粒度が必要になる。

6.　おわりに

新規システム開発で、実機アクチュエータが存在しない段階でのプラントモデルは、制御系開発に絶大な効果を発揮するが、モデリングにも相応の労力を必要とする。

①簡易モデルでも、制御設計の初期アルゴリズム開

発には十分供試できるが、②詳細モデルまでは、制御仕様をより詳細に詰めるために準備したい。

網羅性検証を考慮すれば、数式ベースの①簡易モデルでの対応は難しい事から、③検証モデルは必須となる。

さらに、実機レスで、制御系を開発する必要がある場合には、④解析モデルが活躍するであろう。

謝辞

本論文の執筆にあたり、技術支援、査読等ご協力を頂いた、MathWorks GK 三田 宇洋様をはじめ、関係者の皆様に感謝致します。

なお、本稿中での製品名は、各社の登録商標です。

参考文献

(1) 古賀 祐一郎 他：ボディ電子装備アクチュエータの物理モデリング開発, スバル技報, No42（2015）, 105-109
(2) 星野 欽哉 他：制御系モデルベース開発のボディ電装系への適応研究, スバル技報, No42（2015）, 110-115
(3) 三田　宇洋：MATLAB/Simulinkによるモデルベースデザイン入門, オーム社(2013)
(4) 足立　修一：システム同定の基礎, 東京電機大学出版局(2009)
(5) 大畠 明 他：モデルベース開発のための複合物理領域モデリング, TechShare（2012）
(6) Peter Feitzson：Introduction to Modeling and Simulation of Technical and physical systems with Modelica 日本語訳本, TechShare（2015）
(7) スキルマネジメント協会：モデルベース開発とエンジニア育成の最前線, TechShare（2014）
(8) 久保　孝之：MBDエンジニアのためのSimulink入門, TechShare（2012）
(9) dSPACE Japan 監修, モデルベース開発, 日経BP社(2013)
(10) 西村 秀和 総監修, モデルに基づくシステムエンジニアリング, 日経BP社(2015)
(11) 非因果モデリングツールを用いたFMIモデル接続ガイドライン Ver.1.0, 自動車技術会(2015)
(12) MathWorks GK http：//jp.mathworks.com/（2016-3-28）
(13) Modelica Association https：//www.modelica.org/（2016-3-28）

【著　者】

星野　欽哉

古賀 祐一郎

プラネタリギヤノイズ予測手法の開発

Development of Design Procedure for Planetary Gear Noise

青木寛子[*1] Hiroko AOKI
三好慶和[*2] Yoshikazu MIYOSHI
神田和紘[*3] Kazuhiro KANDA
小川雅人[*3] Masato OGAWA

抄　録

トランスミッションの静粛性は乗用車の品質を決める重要な性能のひとつであり、ノイズ性能を机上で設計できる手法の開発に期待が高まっている。本研究ではプラネタリギヤを題材とし、実機の加工精度を含めたギヤノイズ起振力推定プロセスと、構造への振動伝達系のモデル化を合わせて行うことで、プラネタリギヤノイズの生成メカニズムを検証できるCAE予測技術を開発し、諸元変更の効果を実機で検証した。

Abstract

Quietness of transmission is one of the important performances to define quality of passenger cars. Therefore, the development of design procedures for noise performance within deskwork is gradually expected. In this article, a CAE noise prediction method developed for planetary gear noise is introduced: an estimation process for gear noise generation that takes account of manufacturing errors and a modeling process of transmission structure that explains vibration propagation through structural elements are combined. This method is verified by actual transmission tests.

1. まえがき

自動車を取り巻く環境の急激な変化により、短期開発の要求が高まっている一方で、製品の高度化や複雑化などの要因により開発環境はますます厳しくなっている。自動車用トランスミッションにおいても低燃費・静粛・軽量・低コストを、短期間に高次元で成立させることが求められる。さらに昨今、地球環境保護の観点から重要性を増しているハイブリッド車や電気自動車では、エンジン停止状態での走行シーンの増加により、エンジン騒音によるマスキング効果が得られず、トランスミッション本体の静粛性を劇的に向上させる必要性に迫られている。本研究では、AT・CVTを構成する重要な変速機構のひとつであるプラネタリギヤについて、リニアトロニックの前後進切替機構を題材に、起振力メカニズムに着目し静粛性の高いシステムを設計する手法を構築する。

＊1 パワーユニット研究実験第3部
＊2 CAE部
＊3 トランスミッション設計部

プラネタリギヤ機構はサンギヤ(外歯)とリングギヤ(内歯)の間に複数のピニオンギヤを配置した構成となっており、常に複数の歯車が噛み合っている。今回着目したプラネタリギヤノイズの起振力は各歯車の噛合反力であるが、通常の平行歯車対のように噛合点ひとつずつを考慮するだけではプラネタリギヤ機構全体での起振力としての予測精度は低く、振騒性能を机上で設計することは難しかった。そこで精度良く起振力を予測するために、全噛合点に作用するギヤ起振力ベクトルと構造系への伝播を総合的に評価する手法を構築する。噛合位相の異なるプラネタリギヤ諸元を基に、起振力ベクトルとプラネタリギヤ挙動の差から発生メカニズムを検討することによって最適仕様を決定し、その効果をトランスミッション実機で検証する。

2. 解析モデルの構築

プラネタリギヤノイズを精度良く解析できる手法を構築するため、トランスミッション全体で振動特性が予測できる構造系モデルを構築した。

図1に、本研究で題材としたリニアトロニックの主

断面図を示す。対象としたプラネタリギヤは前後進切替機構を構成し後退時に作動する(図1のオレンジ色塗部に図示)。

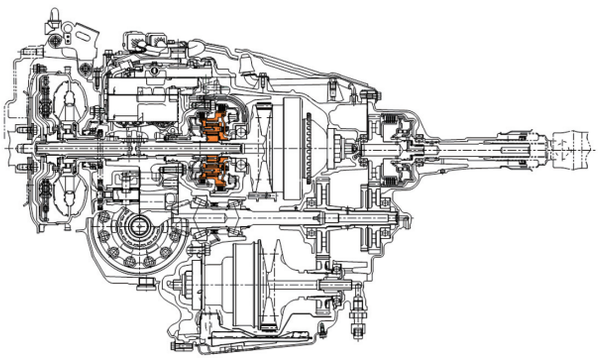


図1　リニアトロニック

2.1　FEMモデルの構成

解析モデルは有限要素法を用いて部品単品、部分組立品、トランスミッション全体の3段階で精度検証して構築した。図2にフローチャートを示す。

その際、解析精度を向上させるためにFEMモデルの形状再現性向上、部品結合部の物性値最適化、検証試験の境界条件反映などを行った。

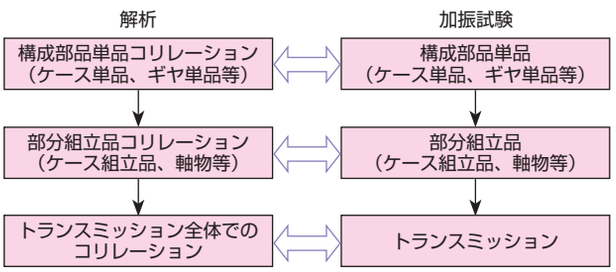


図2　フローチャート

2.2　FEMモデルの妥当性検証

図2のフローチャートに沿って構築したモデルがトランスミッション振動の周波数特性を再現出来ているか検証した。

2.2.1　周波数特性の検証

加振試験結果と解析結果の周波数特性の比較図を各段階で1例ずつ示す。図3が部品単品(キャリア)、図4がキャリア部分組立品、図5がトランスミッション全体である。各段階で精度検証と改善を積上げることで固有値誤差目標値5%以下を達成した。

2.2.2　実動条件での検証

次に、トランスミッションの実動条件での精度を検証した。なお本研究では後退時に作動するプラネタリギヤノイズを対象としているため、車速20 km/h以下(周波数では2.0 kHz以下)を評価対象とした。

図6に実測結果と解析結果を示す。実測、解析共に約1.6 kHzにピークを持ち、誤差は目標値10%以下に対し約7%であった。この結果から、本章で構築したFEMモデルはトランスミッションの振動特性を精度良く再現できることを確認した。

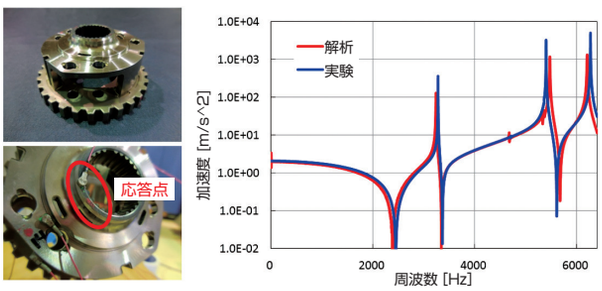


図3　周波数特性：キャリア単品

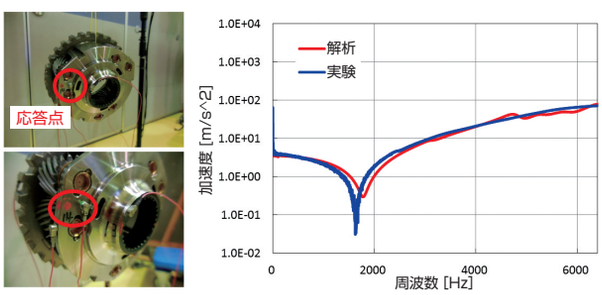


図4　周波数特性：キャリア部分組立品

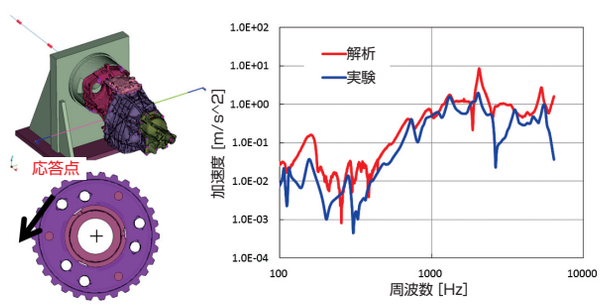


図5　周波数特性：トランスミッション

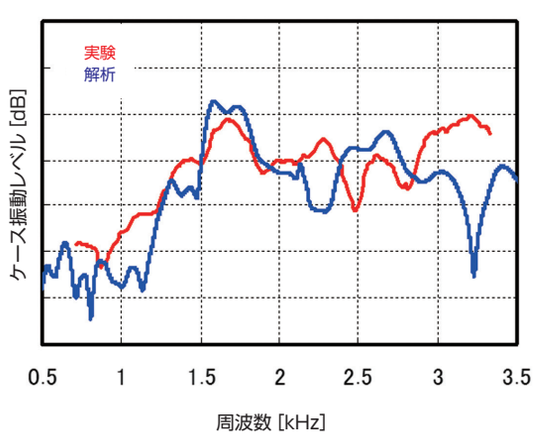


図6　実動条件での振動応答

3.　ギヤノイズ生成メカニズムの検討

3.1　振動伝達系のメカニズム検討

振動モード形状からメカニズムを分析する。構築したFEMモデルを用いて、ハウジング振動の周波数特性を解析した結果を図7に示す。1.6 kHzのピークはプラネタリキャリアとインプットシャフト（サンギヤ）が振れ回る振動挙動である（図8）。

本構造は、2.0 kHz以下の周波数帯において上記振動現象によりハウジング振動レベルが高くなっていることがわかった。

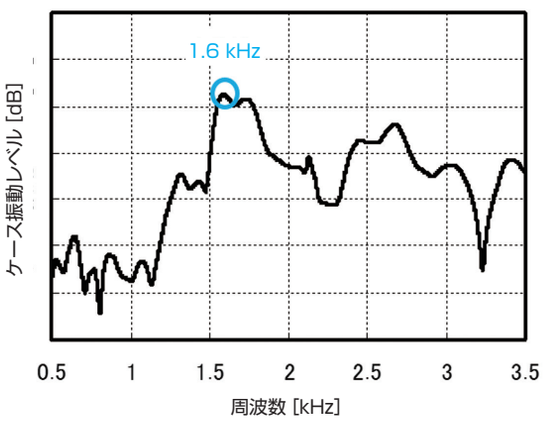


図7　ハウジング振動の周波数特性（解析）

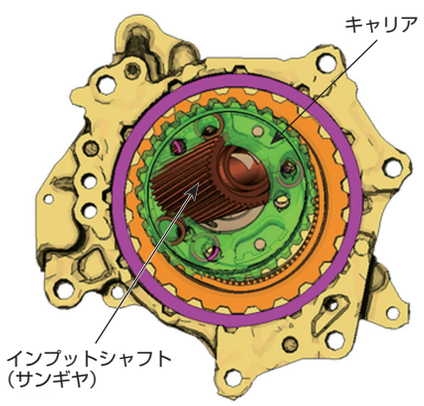


図8　プラネタリキャリアとインプットシャフトの変形モード

3.2　歯車諸元（位相差）と起振力の関係

プラネタリギヤでは噛合位相差が振動や騒音の起振力に影響を及ぼすことは良く知られている[(1)(2)]。対策検討の前に、プラネタリギヤの起振力と噛合位相差による特性について検討し、振動伝達系の特性とあわせて仕様の最適化を図る。

現仕様（以後「仕様A」と表記）は、各ピニオン間の噛合位相が等分にずれる位相差等分（Sequentially Phased：SP）の歯車諸元である。

各ピニオンの噛合伝達誤差に起因して噛合部に作用する荷重を合成することで、プラネタリギヤ全体の起振力を分析した。

i番目のピニオンについて、各噛合部の円周、半径および軸方向変動荷重は(1)、(2)、(3)の式で計算できる。

（サンギヤ－インナーピニオン噛合部）

$$\begin{aligned} F_{STi} &= k_{SP} \times \delta_{SPi} \\ F_{SRi} &= F_{STi} \times \tan\alpha_{bsSP} \\ F_{SAi} &= F_{STi} \times \tan\beta_{bsSP} \end{aligned} \quad (1)$$

（インナーピニオン－アウターピニオン噛合部）

$$\begin{aligned} F_{PTi} &= k_{PP} \times \delta_{PPi} \\ F_{PRi} &= F_{PTi} \times \tan\alpha_{bsPP} \\ F_{PAi} &= F_{PTi} \times \tan\beta_{bsPP} \end{aligned} \quad (2)$$

（アウターピニオン－リングギヤ噛合部）

$$\begin{aligned} F_{RTi} &= k_{RP} \times \delta_{RPi} \\ F_{RRi} &= F_{RTi} \times \tan\alpha_{bsRP} \\ F_{RAi} &= F_{RTi} \times \tan\beta_{bsRP} \end{aligned} \quad (3)$$

δ_i：噛合伝達誤差、k：噛合剛性

α_{bs}：噛合圧力角、β_{bs}：噛合ネジレ角

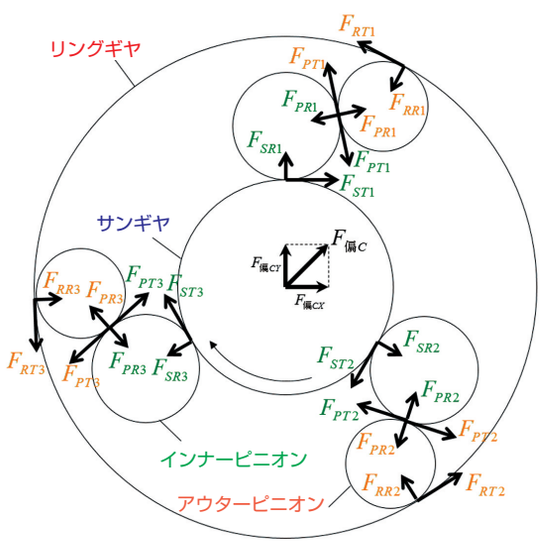


図9　プラネタリギヤ 荷重ベクトル図

噛合位相差を考慮して(1)～(3)式で算出した変動荷重をベクトル合成することでサンギヤ、キャリア、リングギヤの各起振力波形を算出する。各噛合部について、円周および半径方向に作用するギヤ荷重ベクトル図を図9に示す。

キャリアの半径方向および軸方向起振力について、仕様A（SP諸元）と各ピニオン間の噛合位相差を持たない同位相（In Phased：IP）諸元（以後「仕様B」と表記）を比較した結果を図10に示す。

仕様A（SP諸元）は、仕様B（IP諸元）と比較して、軸方向の起振力は小さいが、半径方向の起振力は大きくなることがわかった。

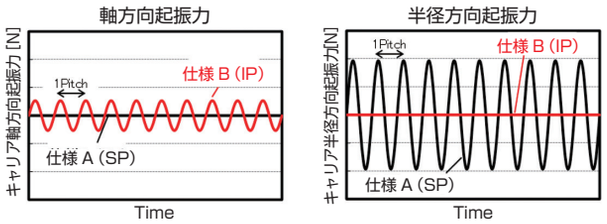


図 10　起振力比較

3.3　振れ回り挙動の対策検討

上記の結果より、特に着目している1.6 kHzピークのメカニズムを分析すると、仕様A(SP諸元)は半径方向の起振力が大きく、プラネタリキャリアとインプットシャフトが振れ回る振動モードを励起していることがわかった。構造感度の高い半径方向の起振力が小さくなる仕様B(IP諸元)を選択することで効果的にプラネタリギヤ音改善が図れると考えられる。

構築したFEMモデルを用いて、ハウジング振動の周波数特性を解析した結果を**図11**に示す。仕様A(SP諸元)に対して、広い周波数範囲でハウジング振動レベルが大幅に低減しており、プラネタリギヤの噛合位相差変更(IP←SP)は、ギヤノイズ改善に有効と予測できる。

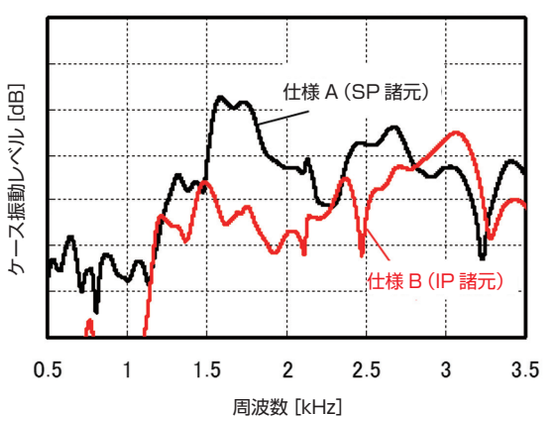


図 11　ギヤ諸元による振動レベル差比較（解析）

4.　検証試験

上記の解析結果をトランスミッション実機試験で検証した。

4.1　供試諸元

表1に供試仕様の比較を示す。位相差設計による性能差を明確にするため、ギヤ比等に極力差が出ない諸元とした。加工バラツキの影響を避けるため、外歯車に歯面研磨加工を追加した。また各ギヤ単体の伝達誤差が同等かつ歯面の範囲内での正常な噛み合いを保つようにクラウニング等の各加工修正量を決定した。

表 1　歯車諸元比較

		仕様 A (SP 諸元)	仕様 B (IP 諸元)
ギヤ比		1.024	1.076
歯数	サンギヤ	41	39
	インナピニオン	18	18
	アウタピニオン	17	17
	リングギヤ	83	81
中心間距離 (mm)	S − I pinn	34.65	34.40
	I pinn − O pinn	20.30	21.00
	O pinn − R	38.40	38.80

4.2　実測結果

以下に検証試験の内容を述べる。

4.2.1　歯当たり確認とギヤ単体起振力比較

本予測手法の妥当性を実機で検証するためには、ギヤ単体の噛合起振力に差がないプラネタリギヤを供試する必要がある。

歯当たりと歯面形状から噛合伝達誤差を推定した結果、各ギヤ単体の噛合起振力に有意差はない(**図12**)。また、歯当たりが歯面からはみ出す現象や2段当たりなどのイレギュラもない。従って、このギヤを用いて検証試験を実施できると判断した。

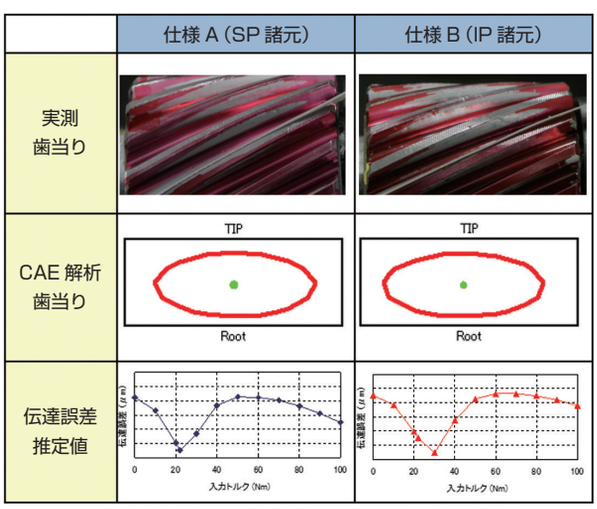


図 12　歯当たり確認と起振力比較

4.2.2　台上計測結果

図13(a)にハウジング表面振動、**図13(b)**にトランスミッション近傍音圧の計測結果を示す。振動と音圧の周波数特性に相関があり、採用した振動計測点はトランスミッションの騒音性能をよく表現している。

図13(a)振動計測結果より、代表点で仕様B(IP諸元)は仕様A(SP諸元)より振動レベルが2.5 kHz以下で10 dB前後低減する。振動計測点の周波数特性は解析どおりの結果であった。

さらに、モード形状を確認するために、レーザードップラー振動計でハウジング表面振動を多点計測し

た(図14)。解析結果と実測結果を比較して、両諸元の振動モード形状の違いが良く再現できていることと、ハウジング全体の振動レベルが低減していることを確認した。

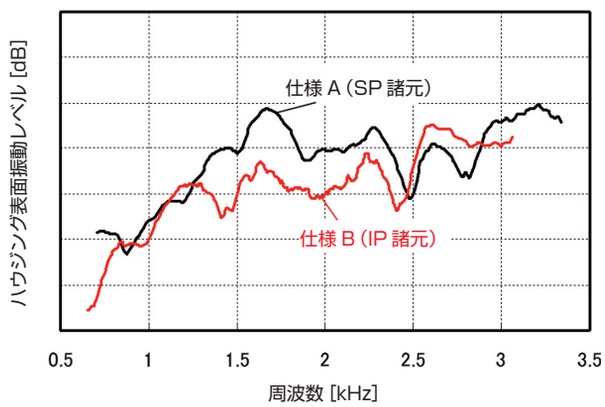


図 13（a）　ハウジング表面振動計測結果

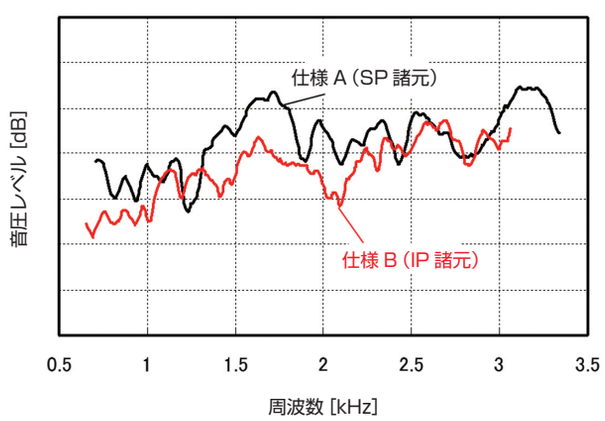


図 13（b）　トランスミッション近傍音圧計測結果

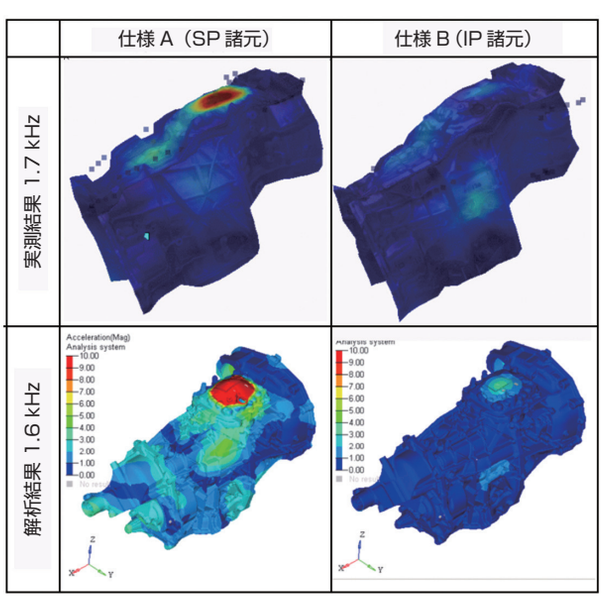


図 14　モード形状比較

4.3　検証結果

仕様B(IP諸元)を採用することにより2.5 kHz以下の振動騒音のレベルが予測どおり低減することを確認した。これにより、ギヤノイズ起振力ベクトルと構造系への伝播を総合的に評価するプラネタリギヤノイズ設計手法の妥当性が確認できた。

5.　まとめ

本研究では、リニアトロニックの前後進切替機構を対象に起振力ベクトルとプラネタリギヤ振動挙動からプラネタリギヤノイズ生成メカニズムを分析し、噛合位相差変更によるトランスミッション振動レベルの変化を予測した。IP諸元化によるギヤノイズ低減をトランスミッション実機で検証し、本設計手法の妥当性を確認した。

6.　謝辞

本研究を行うにあたり、ご協力を頂いた株式会社エステックの皆様および、当社関係者各位に深く感謝いたします。

参考文献

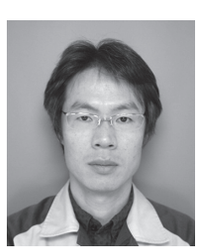
(1) 西野隆之：遊星歯車のかみあい伝達誤差連成解析，マツダ技報，No.26, p153-158（2008）
(2) 森川邦彦ほか：遊星歯車装置のサイドバンド現象解析，日本機械学会論文集，Vol.80, No.815, p1-16（2014）

【著　者】

青木　寛子

三好　慶和

神田　和紘


小川　雅人

車両構造部材へのCFRP適用研究

Study on CFRP Application to Vehicle Structural Components

向中野　侑　哉*　　飯　野　準　也*　　下　山　　浩*
Yuya MUKAINAKANO　　Junya IINO　　Hiroshi SHIMOYAMA

抄　録

将来の大規模な軽量化要求に備えた取り組みとして、車両構造部材に炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を適用した研究例を紹介する。研究対象部位は、車両構造部材の基礎性能が評価可能なロアアームを選択した。CFRP製ロアアームを製作し、実機試験を通じてスチール製ロアアームと同等の性能が得られる可能性を見出した。本稿では、①ロアアームをCFRPへ材料置換した際の軽量化検討、②CAEを用いた予測技術、③実機試験結果の三点を紹介する。

Abstract

As preparation for future large-scale weight reduction, we introduced a study which applies carbon fiber reinforced plastic (CFRP) to vehicle structural parts. In this work, we chose a lower control arm by which the basic performances of vehicle structural parts can be evaluated. Through this examination, we found the possibility that the performance of CFRP lower control arm is equal to the product made of steel. Technologically introduced contents are these three: (1) weight reduction consideration when doing material substitution of CFRP for the lower control arm made of steel, (2) prediction technique using CAE, and (3) test results using CFRP lower control arm.

1.　まえがき

環境規制や安全性能向上の要求に伴い、車両重量は年々増加の傾向にあることから、自動車の軽量化は重要な課題となっている。軽量化の手段としては、スチール部品の構造合理化や部品統合、アルミや樹脂、複合材料などへの材料置換が存在する。複合材料の一つである炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は、スチールやアルミと比べて比強度・比剛性が高く、軽量化効果が高い材料として注目されている。これまでの自動車への適用事例は、高級スポーツカー等に限定されていたが、近年ではBMW社がi3や7シリーズの車体にCFRPを使用しており、今後の採用拡大が予測される。

これまで我々のグループでは、複合材料の持つ「軽量かつ高エネルギー吸収」という特性に着目し、衝突時のエネルギー吸収部材への適用研究を通じて、複合材料の知見を蓄積してきた[(1)(2)]。本研究では、将来の大規模な軽量化要求に備えた取り組みとして、車両構造部材であるロアアームを研究対象部位に選定し、CFRPの適用可能性を検討した。ロアアームとは、サスペンションの構成部品のひとつである(**図1**)。車両の足回りを構成する部品であることから、高い剛性・強度が要求されることに加えて、耐久性能も求められる。このため、CFRPの適用可能性を見る部品としては、非常に難易度の高い部品である。本稿では、車両構造部材へのCFRP適用研究として、(1)ロアアームをCFRPへ材料置換した際の軽量化検討、(2)CAEを用いた予測技術、(3)実機試験結果の三点を紹介する。

＊ スバル技術研究所

2.　部品設計

2.1　構造コンセプト

当社で採用しているロアアームをベースに、CFRP化の検討を行った。今回の検討では、スチール製のロアアームと同等の剛性と強度性能を有し、40%の軽量化を達成することを目標とした。部品構成は、実車へ

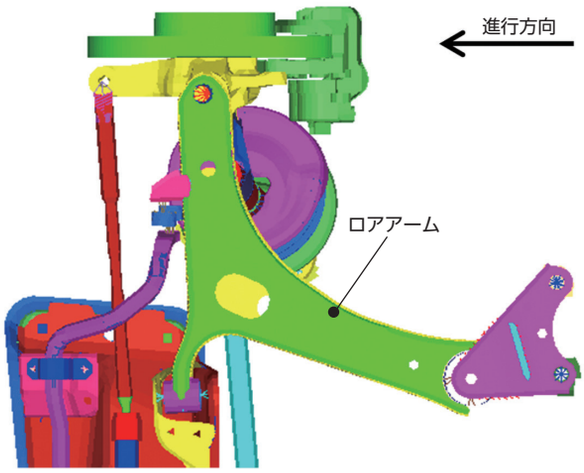


図１　ロアアーム

の取り付けが可能となるよう、取付位置と取付部品は現行品を維持し、アーム部分をCFRPに材料置換した。本研究で検討した、CFRP製ロアアームの構造コンセプトを図2に示す。アーム部分は剛性と強度を確保するため閉断面構造を採用し、UPRとLWRは接着剤を用いて接合させた。

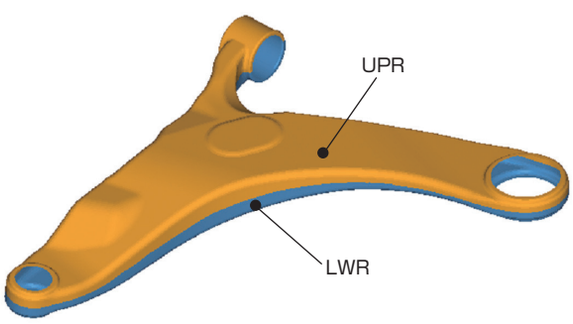


図２　CFRP製ロアアームの構造コンセプト

2.2　材料設計

本検討における材料設計は、スチール製のロアアームと変位量が同等となるように、CFRPの積層構成を設定した。使用した材料は、炭素繊維に連続繊維を用いた熱硬化性CFRPである。変形量と破壊箇所の予測は、CAEを活用することにより求めた。ブッシュ部中心2点を完全拘束し、リンクに荷重を付加した時の最大変位量と、破壊が予測される箇所を算出した。変位量を解析した一例を図3に示す。CAEで得られた結果に基づき、CFRPの積層構成を最適化していくことで、机上検討での軽量化限界を求めた。最終的に、CFRPに材料置換することで軽量化量は43%となり、目標達成の見込みを得た。

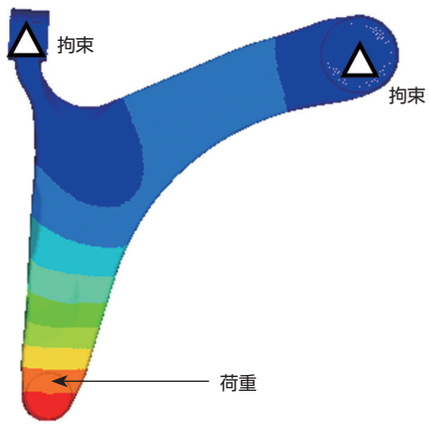


図３　CAE解析を活用した材料設計

3.　実験方法

3.1　強度試験

CFRP製ロアアームの強度に関する成立性を検証するため、本研究では共鳴法を用いた強度試験を実施した。共鳴法とは、対象部品と設定荷重に対して最適化された周波数で負荷することで、短時間で強度と疲労の知見を得ることができる実験手法である。試験方法は2点を固定し、残り1点に走行中に想定される荷重を、単純な引張・圧縮の繰り返しで負荷した（図4）。本試験では、負荷する際の周波数が数十Hzとなることが想定される。周波数が数十Hzとなる条件で試験すると、熱の影響でブッシュのゴムが溶けてしまう恐れがある。そのため、今回の試験では、ロアアームからブッシュを取り外して試験装置に固定した。また、ブッシュを取り外すことにより、材料の違いによる性能差を明確にすることを狙った。試験中に亀裂が発生することで剛性が低下し、荷重を負荷する際の周波数が低下する。本試験は、事前に設定した周波数に到達した時点を閾値として、試験を終了させた。試験が終了したサンプルは外観観察を行い、亀裂が発生した箇所を目視で確認した。一方、試験終了時の負荷回数については、耐久性能として評価した。

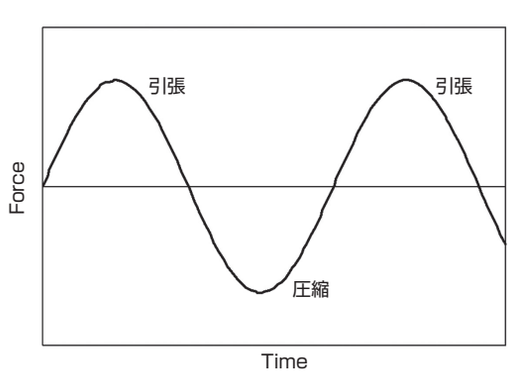


図４　共鳴法を用いた強度試験の荷重負荷方法

3.2　断面観察

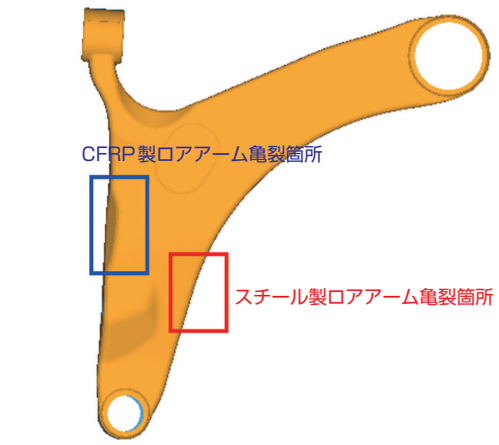
強度試験後のCFRP製ロアアームを切断し、光学顕微鏡を用いて部品内部における亀裂発生箇所の有無を調査した。光学顕微鏡を用いた観察箇所は、事前にX線CTで計測した断面写真を参考に、亀裂が顕著に発生している箇所を選択した(図5)。

図５　X線CTによるCFRP製ロアアームの断面観察

4.　実験結果

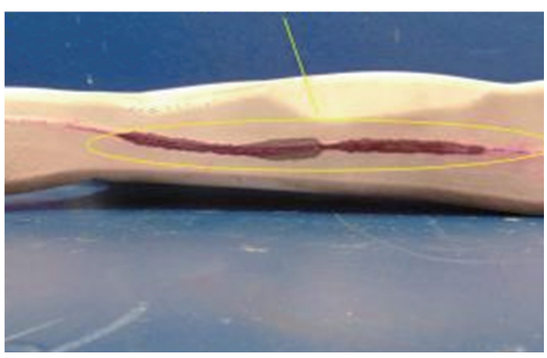
初めに、CFRPとスチールの材質の違いによる、ロアアームの亀裂発生箇所を比較した(図6(a))。スチール製のロアアームは、リンクとブッシュ間のアーム本体に亀裂が発生した(図6(b))。CFRP製ロアアームは、スチール製ロアアームとは反対方向の接着界面の亀裂が見られた(図6(c))。CFRP製のアーム本体に目立った外傷は確認されなかった。CFRPの強度に比べて接着層の強度が低いため、接着層を起点に亀裂が発生し、ロアアーム全体の剛性が徐々に低下していったと考えられる。再現性を確認するため、複数のサンプルを試験したが、目視で確認できる亀裂の発生箇所は同様であった。

次に、耐久性能を比較した。CFRP製ロアアームは試験停止までの負荷回数が最も多かったものと、少なかったものとでは、約3倍の乖離が生じた(図7)。最も負荷回数が多かったサンプルは、スチール製ロアアームと同等レベルの負荷回数であり、本研究で検討した構造が耐久性能を有する部品にも適用できる可能性を示す結果となった。一方、性能差が生じたCFRP製のロアアームの外観観察では、明確な違いが得られていない。このことから、CFRPのアーム本体内部に亀裂等が発生していることが推測される。そこで、試験停止までの負荷回数が最も多かったCFRP製ロアアーム(CFRP 1)と、最も少なかったCFRP製ロアアーム(CFRP2)を選択し、断面観察することによりCFRP製ロアアーム内部の層間剥離や亀裂、ボイド有無を比較した。



(a) 亀裂箇所比較

(b) スチール製ロアアーム亀裂箇所



(c) CFRP製ロアアーム亀裂箇所

図６　CFRP製ロアアームとスチール製ロアアームの亀裂箇所比較

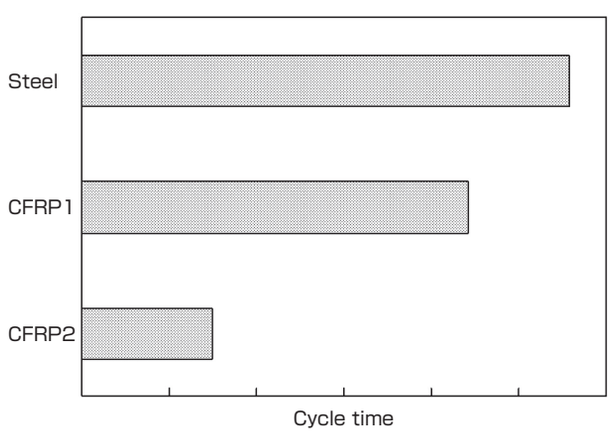
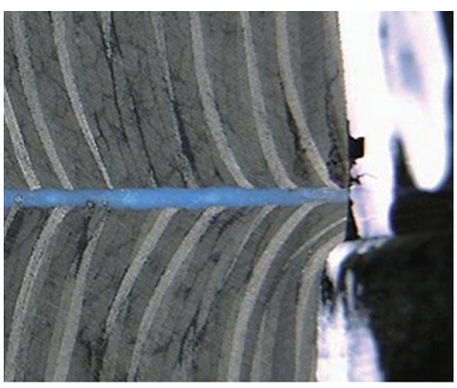
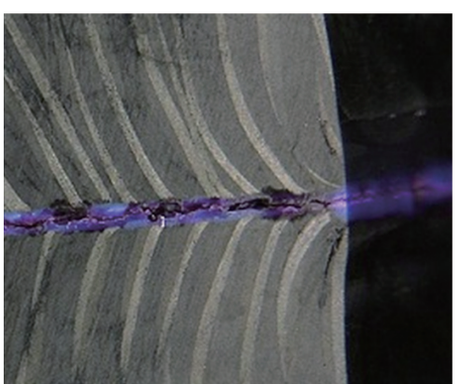


図７　耐久性能比較結果

断面観察の結果を図8に示す。断面観察より、内部損傷やボイドは、X線CTで観察された箇所と一致していることが確認できた。光学顕微鏡を用いて耐久性能の高いサンプルと低いサンプルの観察結果を比較した。CFRP部分の内部損傷は、2サンプルともに樹脂リッチ層のクラックと、CFRPの層間剥離であった。一方、接着層に関しては、どちらのサンプルも亀裂が確認できたが､亀裂発生までの負荷回数の少なかった、すなわち耐久性能の低かったサンプルは亀裂が顕著に発生していることが明らかとなった。今回の強度試験については、接着状態の良し悪しが亀裂発生箇所と、疲労性能に大きく寄与したと考えられる。接着状態や接合部構造などが改善できれば、スチール製のロアアームと同等の強度と耐久性能を得られる可能性が、本検討により明らかとなった。



(a) CFRP1



(b) CFRP2

図８　CFRP 製ロアアーム内部構造の亀裂箇所比較

5. まとめ

サスペンションの構成部品の一つである、ロアアームを研究対象部位に選定し、車両構造部材へのCFRPの適用可能性を検討した。評価したCFRP製ロアアームは、スチール製のロアアームに近い性能を発揮したサンプルがあり、将来的に車両構造部材への適用可能性を見出すことができた。スチール製ロアアームと同等の性能を得るための構造設計・材料設計検討を引き続き実施し、車両構造部材の軽量化を推進していく。

1. CAE解析を活用し、スチール製ロアアームと同等の剛性・強度が得られるCFRPの積層方法を最適化すると、軽量化量は43%となることが分かった。
2. 最も負荷回数が多かったCFRP製ロアアームは、スチール製ロアアームと同じレベルであった。
3. CFRP部分の内部損傷は、2サンプルともに樹脂リッチ層の亀裂と、CFRPの層間はく離であった。接着層に関しては、耐久性能の低かったサンプルにより多くの亀裂が発生していることが分かった。

参考文献

(1) 池田,加藤, 長沢, 向中野, 塩崎：複合材料を用いたエネルギー吸収部材の研究, スバル技報, No.41 (2014), p.114 - 119
(2) 加藤, 池田, 長沢, 沼内, 塩崎：円筒形状・複合材料エネルギー吸収部材の開発と研究Ⅱ, スバル技報, No.42 (2015), p.85 - 88

【著　者】

向中野　侑哉

飯野　準也

下山　　浩

台上試験装置を用いたサスペンション過渡応答の計測

Measurement Results of Transitional Handling Performance with Bench Measurement System

峯　　隆　馬[*1]　日　向　俊　行[*1]　矢　吹　直　人[*2]　仲　武　聖　仁[*3]
Ryuma MINE　Toshiyuki HYUGA　Naoto YABUKI　Masato NAKATAKE

抄　録

我々は、操縦安定性の更なる向上のため、過渡域に着目し評価指標を定め、改善に取り組んでいる。これまでは最新計測技術を採り込み実車での計測を行ってきた。しかし、実走状態での計測には限界があり、また環境要因による影響もあるため、実走を模擬した2輪フラットベルト式の台上試験装置で試験を行った。本装置を用いることで、ハンドルを切り始めた直後のサスペンション挙動の定量化が可能となった。

Abstract

For achieving better handling performance, we have carried out the improvement of transitional handling performance. Vehicle tests with the latest measurement technology have been done, but as for transitional behaviors, it is difficult to detect the performance and it is greatly influenced by test conditions. So a bench test system using front two wheels flat-belt which simulates the actual vehicle inputs has been installed. With this system, it is now possible for us to detect suspension behaviors immediately after turning a steering wheel.

1.　はじめに

我々は、これまで操舵入力を加えてから車両の運動が定常状態になるまでの過渡域における性能向上により、お客様の感性に訴えられる質感が獲得できると考え、過渡現象を高い分解能、高いサンプリング周波数でデータ計測が行える環境を構築してきた。しかし、実走試験では環境要因による影響を受け、常に同じ条件でのデータ計測は困難であった。そこで我々は環境条件が整えられる試験室内で2輪フラットベルト式試験装置を使用して計測することとした。

本稿では、こうした過渡域における操縦安定性を定量化するための2輪フラットベルト式試験装置の紹介と装置を用いた計測事例の一端を紹介する。

2.　2輪フラットベルト式試験装置の紹介

実走行においてサスペンションには荷重条件や車速、ハンドル角、タイヤ特性、路面状態等々の条件により非常に複雑な力が加わる。

タイヤ力を実走行で計測し、アクチュエータを用いて疑似的に再現させることは可能である。しかし、仕様変更毎に実走行試験を行い、タイヤ力を計測する必要があり、効率的ではない。図1に示す2輪フラットベルト式試験装置は実走行時と同様にタイヤを転動させタイヤ～路面間で反力を発生させるため、仕様変更毎に実走行試験を行い、タイヤ力を計測する必要がない。

図1　Two wheel flat belt system

＊1 技術開発部
＊2 車両研究実験第1部
＊3 シャシー設計部

2.1　2輪フラットベルト式試験装置の特徴

フラットベルト式試験装置は金属製のベルトを無限軌道として用いる。図2に示すようにリング状のスチールベルトを2つの小型プーリーで張り、プーリー間のスチールベルト上にタイヤを接地させる構造となっている。タイヤ接地面を実走路同様に平坦にできる。

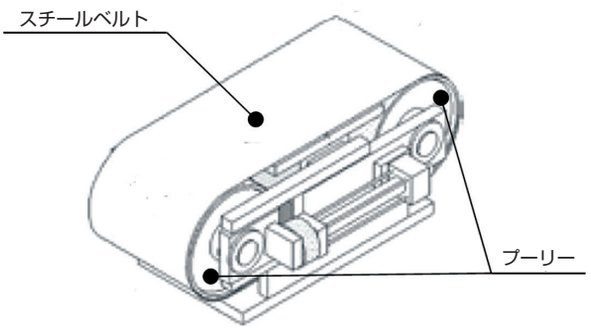


図2　Flat belt system

本試験装置は上記フラットベルトを左右輪に1台づつ設置することで左右のタイヤを転動させ、ステアリングマシーンを用いて試験条件に合せた転舵入力を加えることができる。試験実施時は図3に示すホイールに内蔵した6分力センサ、タイロッドに貼りつけたひずみゲージでそれぞれに入力される力を計測でき、変位については光学式3次元変位測定装置を用いて計測する。光学式3次元変位測定装置は、図4に示すように、ステレオカメラによって3次元変位を計測するシステムである。

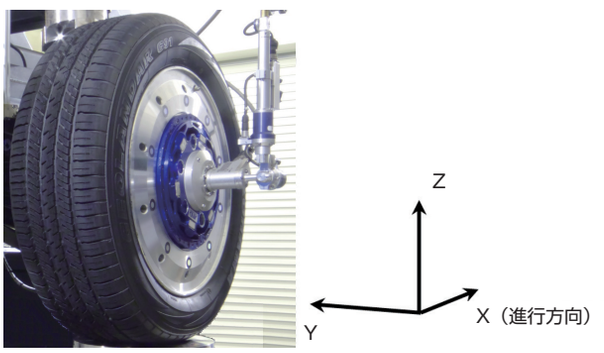


図3　In wheel load cell

2.2　2輪フラットベルト式計測装置を用いた計測事例

まず、一定速での走行時に転舵入力を加えた際、タイヤ～路面間に発生する反力をホイールに内蔵した6分力センサを用いて計測した事例を紹介する。図5に試験結果を示す。ハンドル角入力により実走同様の力およびモーメントも再現できることが確認できる。これにより入力方向や大きさを考慮したサスペンションの剛性検討ができると考えている。

図4　Optical 3D deformation measurement system

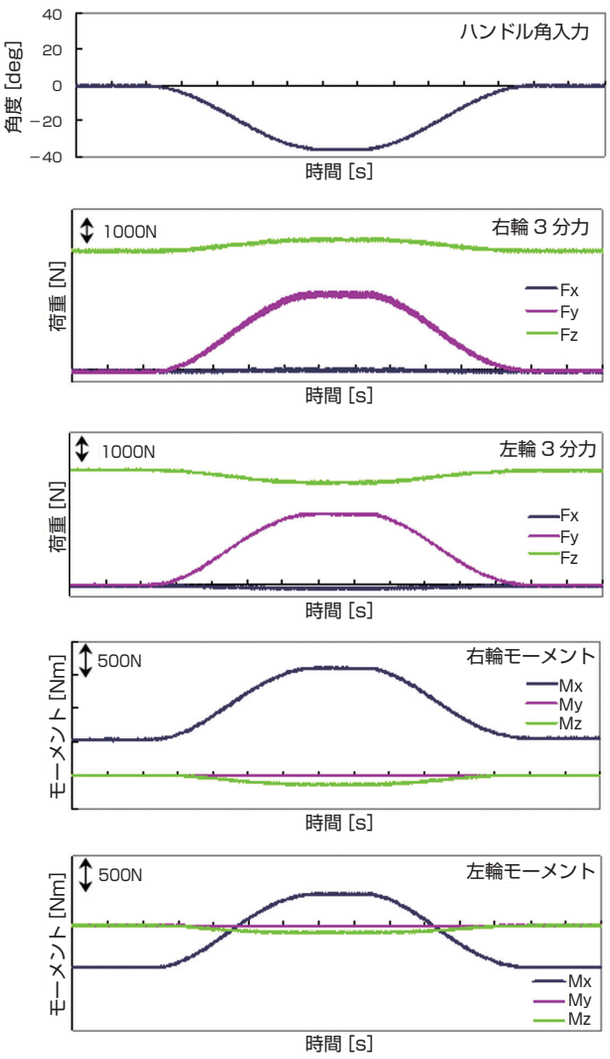
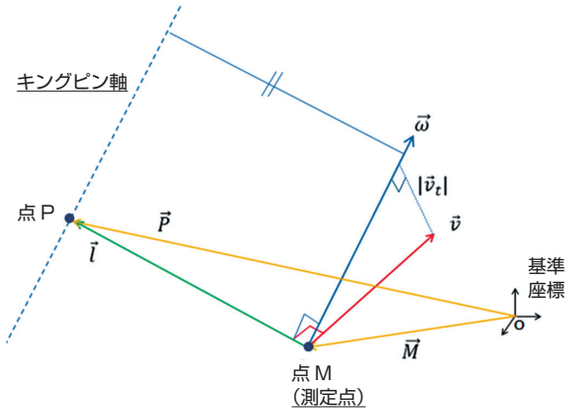
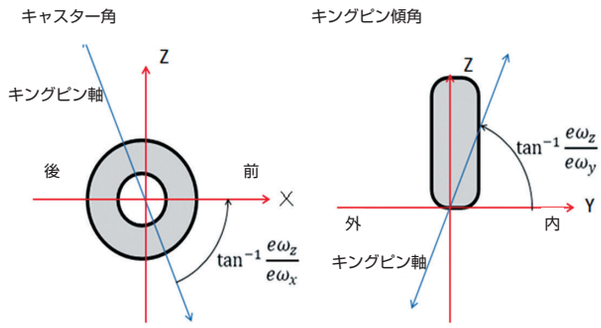


図5　Outputs of in-wheel load cells

2.3　2輪フラットベルト式試験装置の活用事例

本節では、実走行でフィーリングに差異が感じられるが、定量的に差異が計測できなかった事例について本試験装置を用いて計測した事例を紹介する。





キングピン傾斜　$90-\tan^{-1}\dfrac{e\omega_z}{e\omega_y}$

キャスター角　$\left(-90-\tan^{-1}\dfrac{e\omega_z}{e\omega_x}\right)$

点Pの計算

$$\vec{ev}=\frac{\vec{v}}{|\vec{v}|}\qquad \vec{e\omega}=\frac{\vec{\omega}}{|\vec{\omega}|}$$

$$\vec{el}=\frac{\vec{\omega}\times\vec{v}}{|\vec{\omega}\times\vec{v}|}=\frac{\vec{e\omega}\times\vec{ev}}{|\vec{e\omega}\times\vec{ev}|}$$

$$|\vec{v}_t|=|\vec{v}\times\vec{e\omega}|=|\vec{v}||\vec{ev}\times\vec{e\omega}|$$

$$|\vec{l}|=\frac{|\vec{\omega}|}{|\vec{v}_t|}$$

$$\vec{l}=|\vec{l}|\ |\vec{el}|$$

$$\vec{P}=\vec{M}+\vec{l}$$

変数の定義

$\vec{M}$	測定点座標
$\vec{v}$	測定点並進速度
$\vec{\omega}$	測定点回転速度
$\vec{l}$	点M→点Pの位置ベクトル（ωのアーム）
$\|\vec{v}_t\|$	ωに直交する速度成分
$\|\vec{l}\|$	lの大きさ（ωのアーム長）
$\vec{P}$	キングピン軸上点の座標

変数の定義

$\vec{ev}$	vの単位ベクトル
$\vec{e\omega}$	ωの単位ベクトル ＝キングピン軸ベクトル
$\vec{el}$	lの単位ベクトル

図6　Method of calculating the king-pin

2.3.1　サスペンション動的アライメントの計測事例

サスペンション特性上大きな差異の無いピボット点のわずかな変更でも、転舵時の応答性に差異が感じられる事例に対して適用した。

本装置と光学式3次元変位測定装置を用いて動的キングピン軸変化を計測し、定量評価を試みた。算出方法を図6に示す。

一定速度でのタイヤ転動時に図7のハンドル角入力を加えた場合の計測結果を示す。サスペンションピボット点変更前のキングピン軸動きを図8a、変更後を図8bに示す。本計測結果から、変更前後でキングピン軸動きに差異があることが確認できた。図8aに示した変更前は切初め・切戻し時のキャスター方向へのアライメント変化が大きく、応答性に差が出ていると考えられる。

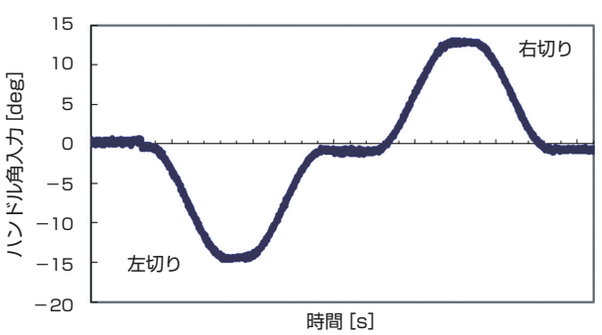


図7　Input steering

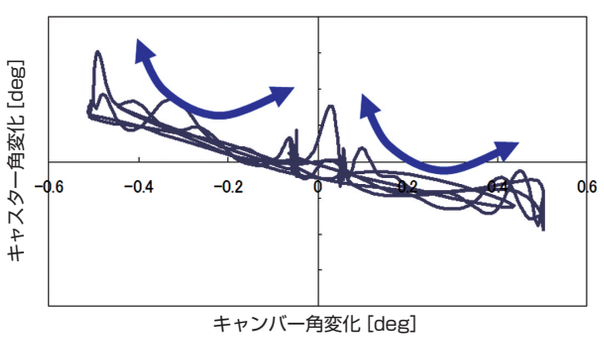


図8a　Transitional KPI change with the previous suspension geometry (before)

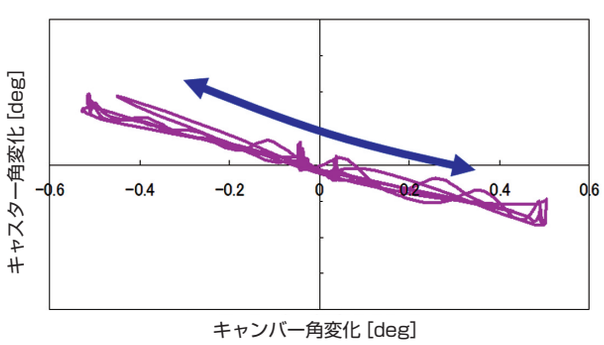


図8b　Transitional KPI change with the improved suspension geometry (after)

2.3.2　サスペンション剛性違いの計測適応事例

サスペンション剛性を変更することでも実走行での微小ハンドル角におけるフィーリングの応答性に差異

があることがわかっている。本装置でタイロッド軸力を計測することで定量化を試みた。

図9は計測時のハンドル角入力、図10aに変更前、図10bに変更後タイロッド軸力の計測結果を示す。本試験はハンドル角で4 deg、スリップ角としては0.4 deg以下と微小舵角であるが平滑処理等行わなくても外乱の影響が少なく計測できている。変更前は変更後に対し、ハンドル角入力に対するヒステリシスが大きいことが確認できた。

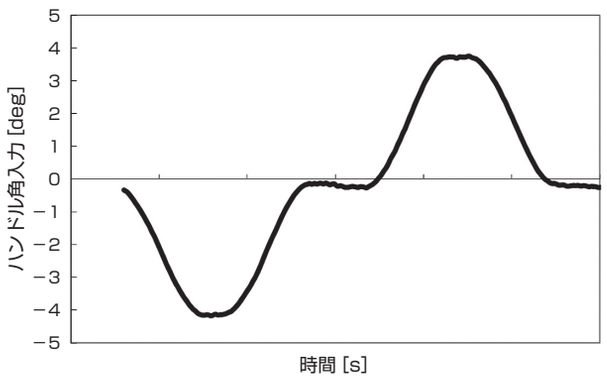


図9　Input steering

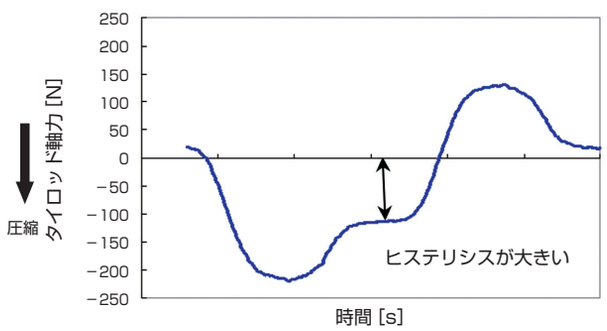


図10a　Results of tie rod axial force (before)

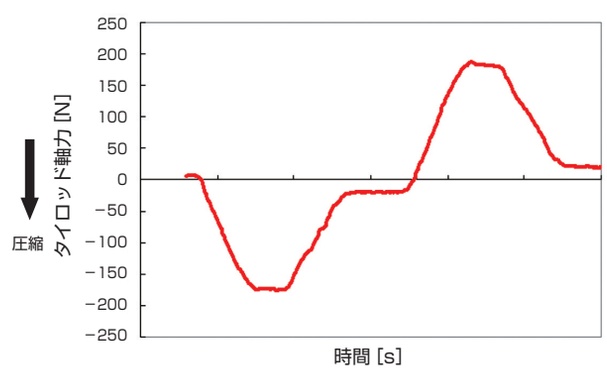


図10b　Results of tie rod axial force (after)

3.　まとめ

操舵初期のサスペンション動きを台上で再現できる2輪フラットベルト試験装置を用いて、これまで定量化が難しかった事例に関して、キングピン軸の動き、およびタイロッド軸力により定量化した計測事例を紹介した。

今回の様に実走行でのフィーリングで差異が感じられても定量化できていなかった事例を定量化できるよう、今後も引き続き計測技術の開発に取り組み、スバルの目指す安心と愉しさの更なる向上に繋げていく。

最後に、計測に当たって株式会社エー・アンド・デイ殿には多くの協力をいただきました。特に同社の開発に対する熱意と試験装置制御技術に対し、我々開発者一同ここに謝辞を表します。

参考文献

(1) 木戸一希ほか　タイヤ特性を計測するフラットベルト試験機の紹介とその展望，自動車技術 Vol.69 No.7 Jul.2015

【著　者】

峯　　隆馬

日向　俊行

矢吹　直人

仲武　聖仁

非定常空力シミュレーションによる高速走行安定性検討

Study of Driving Stability on Highway using Unsteady Aerodynamics Simulation

長谷川　巧[*1]　Takumi HASEGAWA
小林竜也[*1]　Ryuya KOBAYASHI
坪倉　誠[*2]　Makoto TSUBOKURA
池田　隼[*2]　Jun IKEDA

抄　録

高速走行時に車両が受ける空気力の中で上下力の低周波変動に着目し、走行安定性との関連性を検討した。車両周りの非定常流れは、時系列で変動する多様な周波数の流れが混在するため、特定の周波数変動を取り出して評価することが求められる。本稿では、非定常空力シミュレーションに、DMD（Dynamic Mode Decomposition）モード解析を加え、低周波変動の流れ構造を抽出することにより、走行安定性向上の指針が得られた取り組みを紹介する。

Abstract

Driving stability was examined, with the focus on low-frequency fluctuations in vehicle aerodynamics lift force while driving on highway. Extraction and evaluation of a specific frequency is required, because unsteady flow around vehicles has various frequencies. This paper describes a study of guidelines for stability improvement obtained by extracting flow structures of low-frequency fluctuations using an unsteady aerodynamic simulation and DMD（Dynamic Mode Decomposition）mode analysis.

1．はじめに

車両走行時に働く空気力は6分力に作用し、走行安定性に影響を与える。車両開発では空気抵抗低減を妨げずに走行安定性を高いレベルで両立させることが求められる。また、近年、走行安定性については、自動運転を想定し、ドライバーが操縦しなくとも、安定走行できるように、空気力をコントロールする必要性が増している。その重要なファクターの一つであるリフトを基点に検討をスタートした。リフトは、直接作用する車体の上下運動、ピッチ運動に加え、リフトによるタイヤ接地荷重の変化により、タイヤ接地点で生じる横力やヨーイングモーメントにも変化を与えることになるため、車両挙動や操縦性にも影響していると考えられる。加えて、これまで行われたリフトの車両運動への影響の調査[(1)(2)(3)(4)(5)]から、平均値としての定常リフトに増して、過渡的な非定常リフトが車両運動に与える影響が注目されている。一例として、車両形状の各ピラーに生じる縦渦構造や各部形状で生じる剥離によって車体周りの流れ場は複雑な乱流場となり、様々な周波数の速度、圧力の変動を持つ流れが混在している。したがって、リフトの応答も様々な周波数が含まれる。このうち、車両のサスペンション機構の固有周波数と一致する低周波変動は共振により、車両挙動の不安定さを誘発して、増幅させる可能性が報告されている。この低周波変動を生じる流れ構造が特定できれば、対策が可能になり、走行安定性を向上させることができる。しかし、様々な周波数が存在する車両周りの流れ場の中から低周波変動の流れ構造を特定することは困難である。加えて、低周波シミュレーションはその性格上、強力なハードウエアと長時間の計算時間を要し、膨大なデータ処理手法の構築が必要になるが、北海道大学との共同研究やHPCIコンソーシアムの活用を通して、この課題をクリアした。これにより可能となった長時間の非定常空力シミュレーションのアウトプットに、DMD[(6)]モード解析手法を適用することで、変動する流れ場を周波数毎に分解する試みを行った。結果として、低周波変動を発生させる流れ構造を抽出し、走行安定性向上の改善手法を構築することが可能となった。

＊1 車両研究実験第3部
＊2 北海道大学工学院

2. シミュレーション概要

2.1 解析手法

本研究の空力シミュレーションでは非定常空力特性を高精度に再現できるLESを採用する。LESの基礎式は、次に示す空間フィルタを施した連続の式(1)とナビエ・ストークス方程式(2)で与えられる。ここで、空気は非圧縮性ニュートン流体であることを仮定する。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\bar{u}_i\bar{u}_j = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + 2\frac{\partial}{\partial x_j}(\nu + \nu_{SGS})\bar{S}_{ij} \tag{2}$$

$$\bar{P} = \frac{\bar{p}}{\rho} + \frac{1}{3}\left(\overline{u_k u_k} - \bar{u}_k\,\bar{u}_k\right) \tag{3}$$

変数上のバーは、空間フィルタを施した変数を示している。ひずみ速度テンソル$\bar{S}_{ij}$は以下で定義される。

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}\right) \tag{4}$$

サブグリッドスケール（SGS）の渦粘性はSGS乱流モデルにより表され、モデル化には以下に示す標準スマゴリンスキーモデル[7]を用いた。

$$\nu_{SGS} = (C_s f_s \Delta)^2 \sqrt{\bar{S}_{ij}\,\bar{S}_{ij}} \tag{5}$$

空間フィルタ幅は計算格子の各要素体積の三乗根で定義される。スマゴリンスキー定数Csは文献[8]を参考にCs = 0.15とした。また、壁面近傍での渦粘性の減衰はVan Driest型の減衰係数により再現を行った。

$$f_s = 1 - \exp\frac{-y^+}{25} \tag{6}$$

ここでy^+は壁面からの無次元距離であり、以下で表される。u^*は摩擦速度、νは動粘性係数である。

$$y^+ = \frac{u^* y}{\nu} \tag{7}$$

支配方程式は、節点中心有限体積法によって離散化される。空間微分には主に二次精度中心差分法を用いた。ただし、非構造格子を用いた有限体積法では、中心差分を用いた場合、格子品質の悪い場所での数値振動が避けられない。そこで、対流項については計算の安定化のために三次精度風上差分スキームを10%含ませている。また、車両の遠方場では粗い計算格子における数値振動を抑制するために対流項には三次精度風上差分スキームを用いている。時間積分法には運動量に対して一次精度Euler 陰解法を用いた。圧力と速度のカップリングにはSMAC法[9]を用い、圧力のポアソン方程式の解法にはICCG法[10]を用いた。

2.2 モード解析手法

動的モード分解の計算手法を示す。手法の記述については、Schmidら[6]およびTuら[11]の記述に従っている。また動的モードからの流れ場の再構築についてはRowleyら[12]の表記にしたがって記述した。本解析におけるDMDでは、次式のような流れ場を考える。

$$\mathbf{V}_0^m = \{\boldsymbol{v}_0, \boldsymbol{v}_1, \boldsymbol{v}_2, \ldots, \boldsymbol{v}_m\} \tag{8}$$

ここで線形写像Aによってi番目の流れ場とその次の流れ場が$\mathbf{A}\boldsymbol{v}_i = \boldsymbol{v}_{i+1}$のように関係づけられると仮定する。このとき、流れ場全体は以下のようなKrylov列によって表記される。

$$\mathbf{V}_0^m = \{\boldsymbol{v}_0, \mathbf{A}\boldsymbol{v}_0, \mathbf{A}^2\boldsymbol{v}_0, \ldots, \mathbf{A}^{m-1}\boldsymbol{v}_0\} \tag{9}$$

流れ場が非線形である場合、Krylov列は線形接線近似（linear tangent approximation）を示す。また、このとき行列Aは以下のように表記することができ、流れ場の動的プロセスのシステム行列となる。

$$\mathbf{A}\mathbf{V}_0^{m-1} = \mathbf{V}_1^m \tag{10}$$

DMDの目的は、システム行列Aによって記述される動的挙動を抽出することである。 Schmidら[6]は、ロバスト性の高いDMD解析手法として、特異値分解を用いて行列Aの固有ベクトルの低次元近似を行っている。

まず、$\mathrm{V_o}^{\mathrm{m-1}}$の特異値分解を以下のように計算する。

$$\mathbf{V}_0^{m-1} = \mathbf{U}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{W}^* \tag{11}$$

ここでシステム行列Aを左特異ベクトルUへ射影した行列を以下のように定義する。

$$\tilde{\mathbf{S}} \equiv \mathbf{U}^*\mathbf{A}\mathbf{U} \tag{12}$$

また、システム行列Aは式(10)と特異値分解から、疑似逆行列を利用した最小二乗法によって以下となる。

$$\mathbf{A} = \mathbf{V}_1^m(\mathbf{V}_0^{m-1})^\dagger = \mathbf{V}_1^m\mathbf{W}\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\mathbf{U}^* \tag{13}$$

†は疑似逆行列を示している。式(12)および式(13)より、射影DMD演算子は以下のように計算される。

$$\tilde{\mathbf{S}} = \mathbf{U}^{*}\mathbf{V}_{1}^{m}\mathbf{W}\boldsymbol{\Sigma}^{-1} \tag{14}$$

最後に、システム行列$\mathbf{A}$の固有ベクトルの低次元近似であるダイナミックモード$\hat{\boldsymbol{\phi}}_i$は、$\tilde{\mathbf{S}}$の固有ベクトルより以下のように計算される。

$$\hat{\boldsymbol{\phi}}_i = \mathbf{U}\boldsymbol{y}_i \tag{15}$$

$$\tilde{\mathbf{S}}\boldsymbol{y}_i = \lambda_i \boldsymbol{y}_i \tag{16}$$

Rowleyらの記述によると、元の流れ場はダイナミックモードの線形結合によって再構築することができる。

$$\boldsymbol{v}_i \approx \sum_{k=1}^{r} \lambda_k^i \boldsymbol{\phi}_k, \quad i = 0, \ldots, m-1 \tag{17}$$

行列形式では以下のように表される。

$$\tilde{\mathbf{V}} \approx \boldsymbol{\Phi}\mathbf{T} \tag{18}$$

$\mathbf{T}$はVandermonde matrixであり、以下のようになる。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & \lambda_1 & \lambda_1^2 & \cdots & \lambda_1^{m-1} \\ 1 & \lambda_2 & \lambda_2^2 & \cdots & \lambda_2^{m-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \lambda_r & \lambda_r^2 & \cdots & \lambda_r^{m-1} \end{bmatrix} \tag{19}$$

ただし、式(16)～(18)におけるダイナミックモード$\boldsymbol{\phi}_i$は、Schmidらの手法で計算された$\hat{\boldsymbol{\phi}}_i$を流れ場の初期条件 によってスケーリングしたものとしている。すなわち、流れ場の初期条件$\boldsymbol{v}_0$は式(16)よりスケーリングされたダイナミックモードの線形結合で表される。

$$\boldsymbol{v}_0 = \sum_{k=1}^{r} \boldsymbol{\phi}_k \tag{20}$$

これより、スケーリングベクトル$\boldsymbol{d}$とスケーリングされたダイナミックモード(Scaled dynamic mode)は以下のように計算される。

$$\hat{\boldsymbol{\Phi}}\boldsymbol{d} = \boldsymbol{v}_0 \tag{21}$$

$$\boldsymbol{\phi}_i = d_i\hat{\boldsymbol{\phi}_i} \tag{22}$$

2.3 計算モデル

車両モデルを図1に示す。モデルはフルスケールで車種はインプレッサG4で、エンジンルームや床下の複雑な形状を再現している。また、ラジエータ・コンデンサーの通風は圧力欠損によってモデル化した。

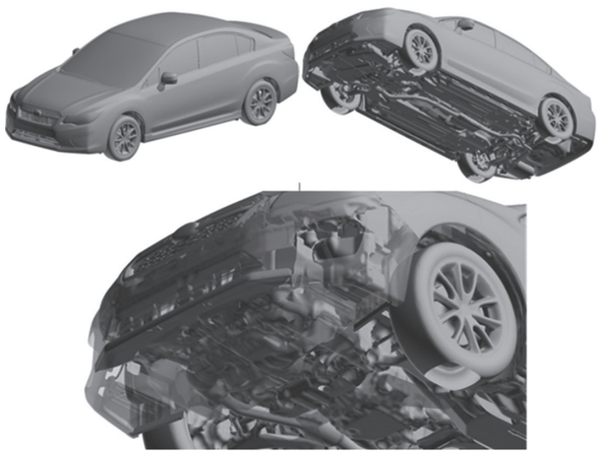


図1　モデル形状

モデル表面および解析領域内の格子を図2に示す。表面格子は三角形要素で、その解像度は4 mmから10 mmとした。解析領域のサイズは主流方向に車長の19倍、横方向に車幅の10倍、高さ方向に車高の7倍とした。空間格子は、車体近傍に密な格子を配置し、遠方では計算コスト節約のために粗い格子を配置した。総節点数は約400万で総要素数は約4500万となった。

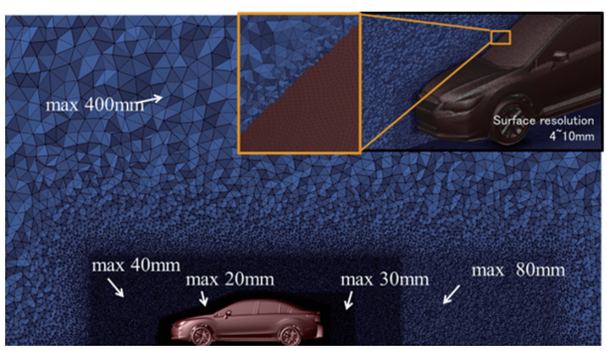


図2　計算格子

2.4 解析条件

各境界に設定した条件を図3に示す。入口境界には一様流速38.89 m/s(140 km/h)を与えた。出口境界は圧力を固定し、速度勾配が0となる自由流出条件を設定した。側壁および天面には自由滑り境界条件を与えた。床面には同じ車両形状を用いて行われた風洞実験に合わせ、風洞の境界層吸い込み装置までを自由滑り条件、それより下流の車体近傍は対数則条件を与え、遠方の床下はすべて自由滑り条件としている。車体表面には対数則条件を与えた。タイヤ回転は本解析では模擬せず、静止した条件を与えている。

流体は大気として、密度は1.204 kg/m^3、粘性係数は1.82×10^{-5}Pa·sとした。車長を代表長としたレイノルズ数は1.18×10^7となる。1ステップの時間刻みは2.0×10^{-5}秒で、計1050000ステップ、実時間で21

秒間の計算を実施した。最初の1秒間で流れを発達させ、残りの20秒間でモード解析用のデータを取得している。

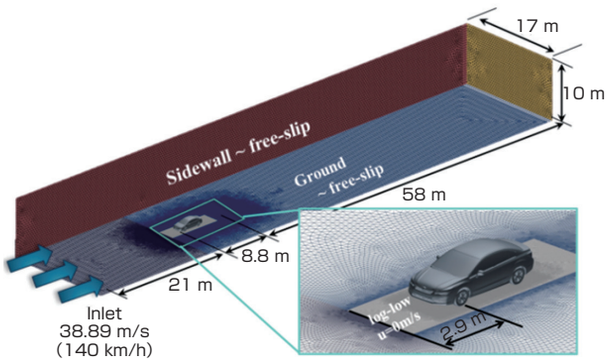


図３　計算領域と境界条件

3.　シミュレーション結果

得られたトータルリフト、フロントリフト、リアリフトの時系列を**図4**に示す。フロント、リアとも低周波変動が含まれているように見える。この低周波変動周波数を調べるため、トータルリフトにDFTを適用した。その結果を**図5**に示す。サスペンション機構の固有周波数に近く、車両運動に影響があると思われる5 Hz以下で、振幅が大きな周波数は0.30 Hz, 2.25 Hz,4.59 Hzが挙げられる。この周波数変動を生じる流れ構造を調べるため、圧力場に対してDMDモード解析を行う。**図6**にDFTで振幅の大きかった0.30 Hz, 2.25 Hz, 4.59 Hzに対応する圧力変動のDMDモード分布を示す。図中のRealパートとImaginaryパートは位相がπ/2ずれた関係にある。0.30 Hzのモード分布のImaginaryパートを見るとトランクデッキ上で負のモードが分布、床下後方のスペアタイヤパン周りで正のモードが分布している。これはトランクデッキ上とスペアタイヤパン周りの圧力は正負逆位相で変動していることを意味する。2.25 Hz、4.59 HzのRealパートではトランクデッキ上方では正の分布、フロントタイヤハウス後方で負の分布が見られる。これらも、トランクデッキ上とフロントタイヤハウス後方の圧力は正負逆位相で変動していることを意味する。これらから、トランクデッキ上、スペアタイヤパン周り、フロントホイルハウス後方の床下で圧力変動が生じ、低周波のリフト変動が生じているものと考えられる。

次に、DMDで得られたモードから圧力の時系列データを再構築し、着目したモードで変動する圧力に

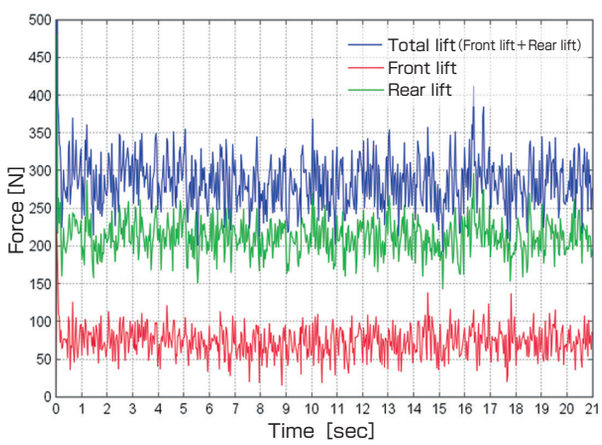


図４　リフトの時系列データ

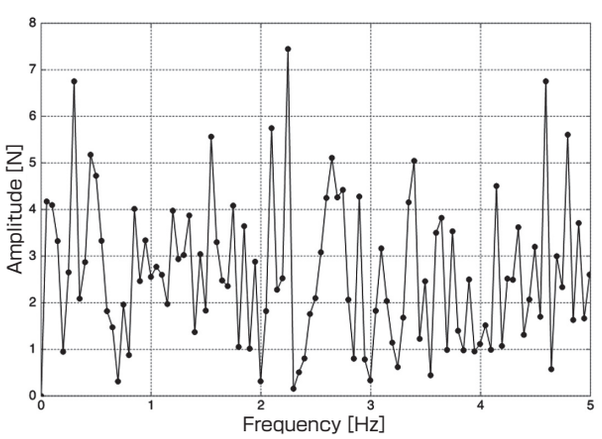


図５　リフト変動の周波数分析結果

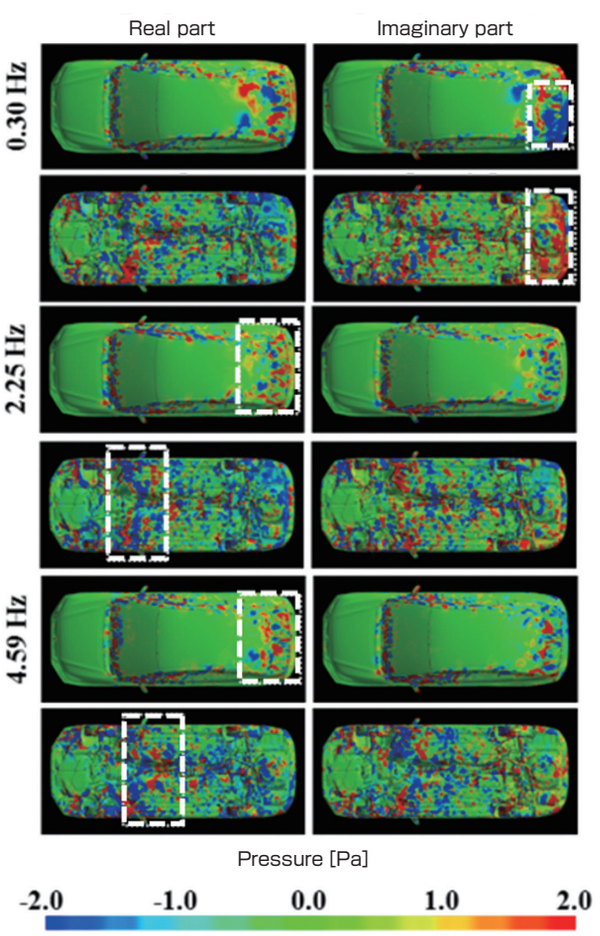


図６　車体表面の圧力変動 DMD スペクトル分布

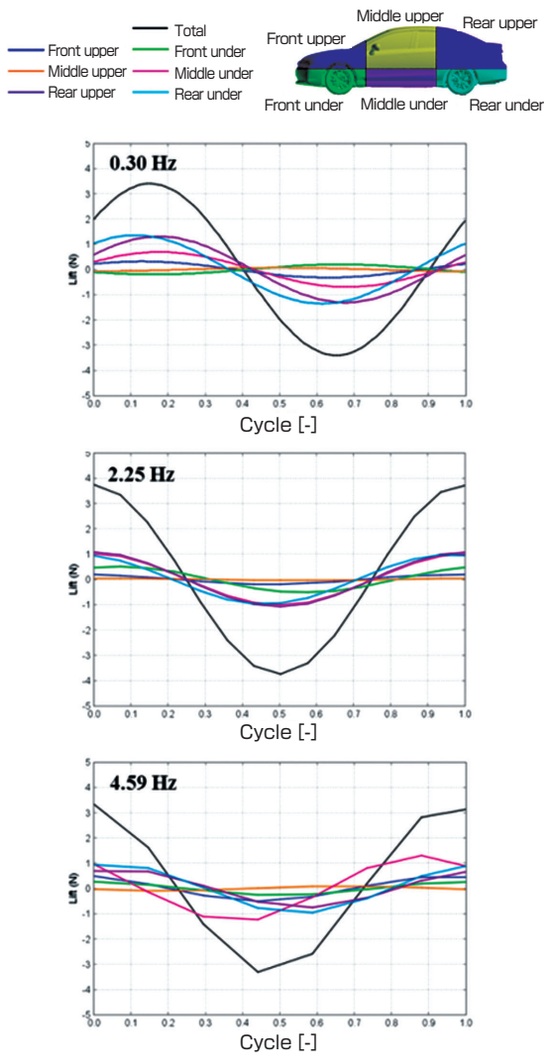


図７　各モードでの部位ごとのリフト比較

より生じるリフトの時系列変化を算出した。図7に示すのは、それぞれの周波数に対応するリフトの変動である。図7の上に示したように車体を6分割し、モードごとにトータルリフトに対する各部位のリフトを比較することで寄与の大きい部位を調査した。その結果、0.3 Hzでは車体後方、2.25 Hz、4.59 Hzでは床下中央(フロントホイルハウス後方)と車体後方の寄与が大きく、前述のモード分布の予測と一致する結果が得られた。これにより、低周波リフト変動を発生させる低周波圧力変動の発生部位はトランクデッキ、スペアタイヤパン周り、フロントタイヤハウス後方付近であることが特定された。

さらに、低周波変動が生じる流れのメカニズムを調査するため、これら部位を通過する流れを時間平均の流れ場から特定した。図8で、黄色はトランクデッキ上を通過する流れ、青はスペアタイヤパン周り、赤はフロントタイヤハウス後方を通過する流れである。トランクデッキ上の低周波圧力変動は左右Cピラー付近からトランクデッキ上へ抜ける流れとエンジンルー

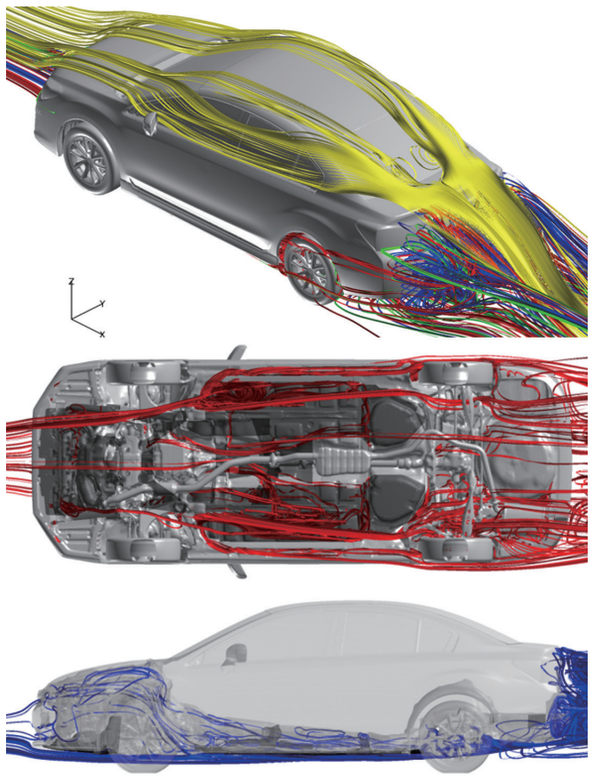


図８　低周波変動の発生部位の流線

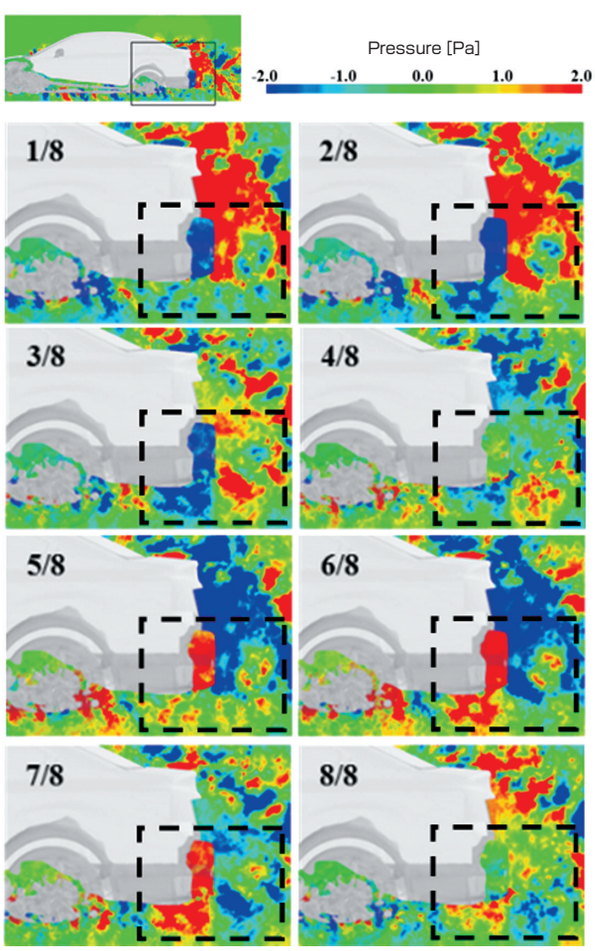


図９　0.3 Hz の DMD モードから再構築した圧力変動

ム、タイヤハウスを通り床下後方へ抜けて、床下から巻き上がった流れの相互作用で発生していると思われる。さらに、0.3 HzのDMD結果では床下のスペアタイヤパン付近に変動がみられるため、一例として、その流れに着目し、DMD結果から圧力場を再構築した。車両中心断面での圧力時系列を図9に示す。これを見ると、リアバンパ裏側で圧力変動が生じた後、時間遅れを持ちながらスペアタイヤパン周りの圧力が変動している。このように床下の凹み付近を通過する流れが低周波の圧力変動を強め、リフトに大きく影響するような変動になっていると考えられる。

4. まとめ

本研究では、車両の非定常空力シミュレーションを行い、空気力変動データをDMDで処理することで、低周波のリフト変動に寄与の大きい低周波圧力変動の発生部位を特定した。さらに、その部位の周辺の流れを可視化し、構造を調べた。低周波変動の1つの要因として、床下の凹部付近に生じる圧力変動が原因になっており、走行安定性を向上には、このような凹形状の修正する必要があることを推定できた。

以上の結果とその後に本指針に基づき対策を行った実走フィーリングで走行安定性が高まる結果を得られたことから、本手法が走行安定性向上の空力改善指針を得る有効な手法であるとがわかった。

記号・変数一覧

C_S ＝スマゴリンスキー定数
f_s ＝ Van Driest型壁面減衰関数
i, j, k = x, y, z単位ベクトル
p ＝静圧
S_{ij} ＝ひずみ速度テンソル
u_i ＝i方向速度
u^* ＝摩擦速度
y^+ ＝壁面からの無次元距離
Δ ＝空間フィルタ幅
ν ＝動粘性係数
ρ ＝密度

参考文献

(1) Ogawa, A. et al.,“Quantitative Representations of Aerodynamic Effects on Handling Response and Flat Ride of Vehicles”, SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. 5（1）：304-323, 2012.

(2) Aschwanden, P. et al.,“Experimental Study on the Influence of Model Motion on the Aerodynamic Performance of a Race Car”, SAE Technical Paper 2006-01-0803, 2006.

(3) Sato, N. et al.,“LES analysis of incompressible flows around an automobile in motion using ALE method：3rd report, unsteady aerodynamic analysis around a simplified car model in heave motion”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Series B, Vol.76, No.770（2010）, pp.1515-1524

(4) Sato, N. et al.,“LES analysis of incompressible flows around an automobile in motion using ALE method：4th Report, Unsteady Aerodynamic Analysis around a Simplified Car Model in Pitch Motion”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Series B, Vol.77, No.773（2011）, pp.43-55

(5) Okada, Y. et al.,“Flow Structures above the Trunk Deck of Sedan-Type Vehicles and Their Influence on High-Speed Vehicle Stability 1st Report：On-Road and Wind-Tunnel Studies on Unsteady Flow Characteristics that Stabilize Vehicle Behavior”, SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst. 2（1）：138-156, 2009

(6) Schmid, P.J.,“Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data,”J. Fluid Mech. 656（2010）5–28.

(7) Smagorinsky, J., General Circulation Experiments with the Primitive Equations, Monthly Weather Review, 91（3）, 99-164.

(8) S.Y. Cheng, M. et al.,“Aerodynamic stability of road vehicles in dynamic pitching motion”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 122, November 2013, 146-156.

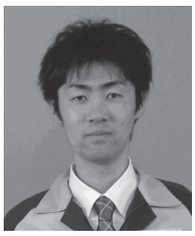
(9) Amsden, A.A. and Harlow, F.H.,“A simplified MAC technique for incompressible fluid flow calculations”, Journal of Computational Physics, Vol.6（1970）, pp.322-325.

(10) Kershaw, D. S.,“The Incomplete Cholesky-Cojugate Gradient method for the iterative solution of systems”, Journal of Computational Physics, Vol.26（1978）, pp. 43-65.

(11) Tu, J.H.,“Dynamic Mode Decomposition：Theory and Applications”, Princeton University, 2013, Doctor Thesis

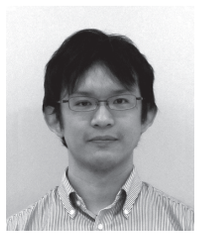
(12) Rowley, C.W. et al.,“Spectral Analysis of Nonlinear Flows”, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 641, 2009, pp. 115,127.

【著　者】


長谷川　巧

小林　竜也

坪倉　　誠


池田　　隼

成長期（平成初期）のスバル紹介

B9 トライベッカ Limited 5＋2 passengers（2005年～ 2014年）

全長×全幅×全高：4822 mm × 1878 mm × 1686 mm
ホイールベース：2749 mm
エンジン：水平対向6気筒 DOHC 2999 cc
最高出力：250 hp/6600 rpm
最大トルク：219 lb.-ft/4200 rpm

当初は米国・カナダのみで販売されたクロスオーバーSUV。製造拠点はアメリカ・インディアナ州のSIA工場。卓越した走行性能やスポーティなデザインの他、航空機メーカーでもある富士重工業らしく、航空機をイメージした「スプレッドウイングズグリル」やインテリアなどをウリにしていたが、スプレッドウイングズグリルやヘッドライトは不評で、2008年モデルで大きくイメージを変えたフェイスリフトモデルに変更された。

米国向け　テレマティクスシステムの開発

Development of Telematics System for the United States

柘植政俊[*1] Masatoshi TSUGE
野口清成[*2] Kiyoshige NOGUCHI
丹羽真[*3] Makoto NIWA
町田紀人[*4] Norihito MACHIDA
野本大志[*5] Hiroshi NOMOTO
佐藤法子[*6] Noriko SATOH

抄　録

ITインフラの整備やスマートフォンの普及により、米国では「Connectivity＝繋がっている事」が車に期待する重要な要素になってきている。「繋がっている事」自体が不測の事態に対する心理的な安全・安心の要素となり、車が起点で車の状態(事故・盗難・メンテナンス)を知らせる本システムはスマートフォンとは一線を画すものであると考える。

開発に当たって考慮したのは、電話回線への接続性、衝突時(車両バッテリ破損時)でも継続してサービスを受けるための部品レイアウトや補助電池の採用、各種機能の使い易さである。セキュリティ性にも配慮し、長く安心して使えるシステムを構築した。

スバルの安全戦略のさらなる強化と、サービス・利便性の向上のためにテレマティクスを導入し、お客様に今までにない安心と愉しさを提供するシステムの内容について本稿で述べる。

Abstract

As IT infrastructure has been developed and Smartphone spreads, it becomes an important factor to expect a car which is connected in the United States. “Connected” becomes a psychological safety and security element under unforeseen circumstances.

This system informs the car of its states (accidents, theft, maintenance) and it is quite different from Smartphone.

In the development, connectivity to telephone networks, component layout for continuous service and adoption of an auxiliary battery when a collision occurs (or vehicle battery is broken), usability of various functions, were considered. To build a system that can be used with confidence, security was considered.

To further strengthen the safety strategy of Subaru, telematics is introduced to improve service and convenience. This paper describes the contents of this system that offers safety and pleasure to our customers.

1. まえがき

ITインフラの整備やスマートフォンの普及により、米国では「Connectivity＝繋がっている事」が車に期待される重要な要素になってきており、車とスマートフォンを繋げてインターネットを活用するサービスの提供が始まっている。スバルも2013年からスマートフォンを活用した機能を装備した車を開発・販売している。

一方、市場では「常に繋がっている事」によって不測の事態に対応するという、より心理的に安心・安全なサービスのニーズが高まっている。特に米国では車の利用頻度の高さ、郊外ハイウェイでの事故通報の難しさ、治安の問題などから、車が起点となって車の状態(事故・盗難・メンテナンス)をお知らせするサー

＊1 電子商品設計部
＊2 スバルコネクトビジネス部
＊3 車両研究実験第2部
＊4 車両研究実験第3部
＊5 Subaru Research & Development, Inc.
＊6 Subaru of America, Inc.

ビスが強く求められるようになってきた。

スバルはConnectivityの分野でもお客様に「安心と愉しさ」を提供すべく、初の独自開発によるテレマティクス(※1)システムを16MYフォレスターに搭載し、全米市場でサービス展開を開始した。

本稿では、このシステムの開発の狙い、システム構成、要素技術について述べる。

(※1) テレマティクス（Telematics）とは、テレコミュニケーション(Telecommunication＝遠隔通信）とインフォマティクス(Informatics)の造語で、車など移動体でモバイル通信システムを利用して提供するサービスの総称。

2. 開発の狙い

本システムを開発するに当たり、熟慮したのはConnectivityを通じてスバルが提供すべき「安心と愉しさ」は何か？である。

スバルは「Active、Passive、Preventive」の3つのSafetyを柱にフルタイムAWD車を展開しており、トップセイフティビークルとして評価を頂いている。そして今回、新たなサービスを開発するにあたって「Connected Safety」という新たな安心をお客様に提供することを目指した。そのためにAutomatic Collision Notification（ACN）やSOS Emergency Assistanceなど緊急時に繋がる基本的なサービスの提供はもちろん、速く確実に「繋がる」こと、また不測の事態の際も「繋がり続ける」という基本性能も確実に開発する事で、何時でも何処でも常に適切なサービスを受けられる安心感を提供し、その信頼を確保することを開発の狙いとした。

また、車というものは乗っている人の快適性・利便性を中心に設計されているが故に、車から離れてしまうとその状態確認や操作は出来なかった。例えば車を子供に貸し与える場合、子供が未熟なために車の故障に気が付かずに運転してしまう心配がある。繋がっていることにより、常にネットワークを通じて車の健康状態を把握し、より安心して使っていただくことにも配慮した。

一方、サービスを使う上での「愉しさ」にも開発の力点を置いた。お客様は普段からスマートフォンなどの最新IT端末を使いこなしており、その使い勝手に馴染んでいる。遠隔にある車との通信には、どうしても遅延時間が発生してしまうが、それがサービスを使う上でのストレスになってはならない。開発の過程では、小気味よいレスポンスで各機能が動作するようにチューニングを行っている。

3. 各種サービス概要

テレマティクスサービスに関して、お客様のニーズに合わせた2種類のパッケージを用意している。

【STARLINK SAFETY PLUS】

・Automatic Collision Notification（ACN）

エアバッグが展開する程の衝突事故が発生した時に自動でオペレータに接続し、救急車等を呼ぶことができる。（万が一気を失って会話が出来ない場合は状況に関係なく救急車等が手配される。）

・SOS Emergency Assistance

乗員が緊急事態の時に、車内の「SOS」ボタンを押すことでオペレータに接続し、救急車等を呼ぶことができる。

・Enhanced Roadside Assistance

車が故障した時に、車内の「i」ボタンを押すことでオペレータに接続し、レッカー車等を呼ぶことができる。

・Diagnostic Alerts

車の故障データをサーバに送信し、必要に応じて入庫を促す。

・Maintenance Notifications

車の走行距離データをサーバに送信して、規定距離に達したらメンテナンス案内を出す。

・Monthly Vehicle Health Report

車のメータに表示される、各種警告灯データをサーバに送信して、毎月の車の健康状態をお知らせする。

【STARLINK SAFETY PLUS & SECURITY PLUS】

※上記SAFETY PLUSに下記SECURITY PLUSを加えたサービス。

・Stolen Vehicle Recovery

車が盗まれてしまった時に、車の位置情報を取得して警察に情報提供し、より早く車を取り返すことに繋げる。

・Vehicle Security Alarm

車の盗難警報が作動したことを、ユーザーにメールで通知する。

・Remote Lock/Unlock

スマートフォンのアプリ等を通じて、車の鍵の施錠／開錠をすることができる。

・Remote Horn and Lights

広い駐車場等で自分の車の位置が分からなくなってしまった時に、スマートフォンのアプリ等を通じて、車のハザードランプ点滅及びホーンを鳴らすことができる。

・Remote Vehicle Locator

スマートフォン等の地図アプリと連携して、車の位置情報を表示する。

4.　テレマティクスシステム構成

DCM（Data Communication Module）を中心にマイク・スピーカ・GPSアンテナ・TELアンテナ・各ECU等でシステムが構成される。DCMは3G/LTE電話網を介してプロバイダに接続し、各種サービスを行う。万が一衝突時でも確実に動作させるため、重要な衝突信号は専用線で接続される（図1）。

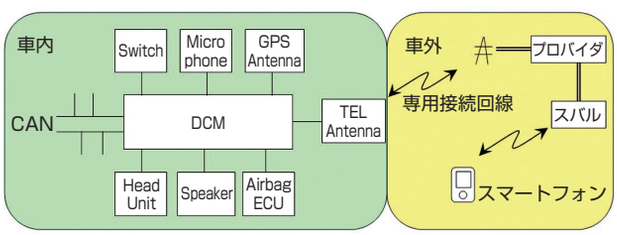


図1　System Architecture

5.　技術概要

5.1　アンテナ性能

目標としたのは“最新のスマートフォンを凌ぐ、必ず繋がるクルマ”。

テレマティクスの主機能となる緊急時の通報は、お客様の安全を守る機能の特性上、いかなる状況でもつながるべきである。

スマートフォンなど携帯電話がつながるのに、車がつながらないでは意味がない。

米国最大のカバレッジエリアを誇るAT&Tの電波網を活用した本機能は、カバレッジ圏内においてスマートフォン以上の送受信性能を確保すべく、アンテナ性能として“放射効率”、“感度”、反射波による信号損失を“VSWR（Voltage Standing Wave Ratio）”を指標として開発（図2は放射効率結果を抜粋）。

米国現地での弱電波地域における送受信性能において、スマートフォン以上の性能を達成している。

加えて、今後のテレマティクス機能拡大に対応すべく、LTE通信帯域にも対応しており、より大量のデータ送受信し、LTE回線を利用した音声通話システムVoLTE（Voice over LTE）にも対応可能となっている。

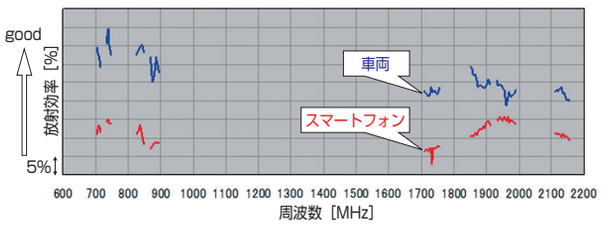


図2　Radiation efficiency of the antenna

5.2　部品レイアウト

・アンテナレイアウト

LTEに対応するために、2つのアンテナを搭載している。ルーフのシャークフィンをメイン、インパネ内（メーター裏）のアンテナをサブとして設定している。

2つのアンテナを車両前後（車外と車室内）に置くことで、衝突時等で万が一どちらかのアンテナが破損しても1つのアンテナだけで通信が出来るように配慮している（図3）。

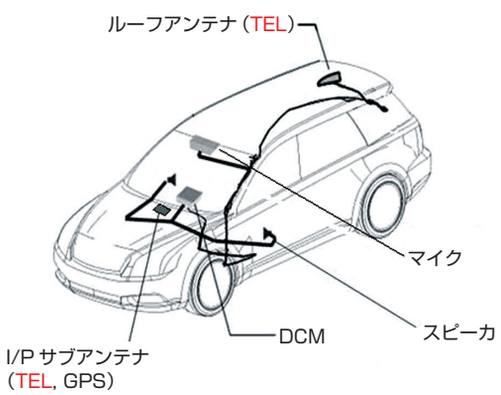


図3　Parts Layout

・DCM概要

テレマティクスシステムの心臓部である通信モジュールを、衝突時に影響が少ない車の中央且つ車室内に搭載（インパネ内　ヘッドユニット直下）（図4）。

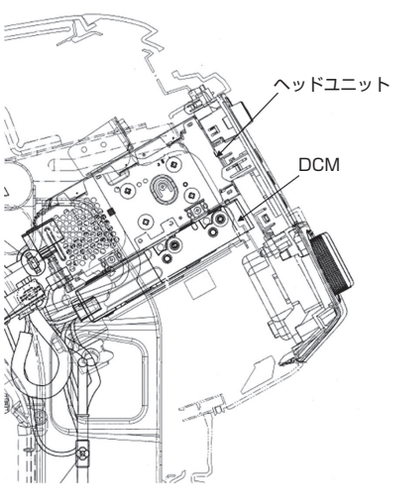


図4　DCM Layout（Instrument panel center side view）

衝突(前突)時やSOSコール中に車両のバッテリーから電源が供給されなくなっても、DCM内蔵電池(BUB: Back Up Battery)で動作し緊急通報を継続することができる。

2次電池を採用し、走行中に車両バッテリから充電をする。寿命がきたらインジケータで、電池の交換時期をお知らせする。

・マイク・スピーカ接続構成

万が一、衝突(側突)時に片方のスピーカが壊れても、反対側のスピーカで相手の声が聞けるようにするために、駆動するスピーカはフロント出力左右を使う。左右から音を出すことで、通常のハンズフリー通話と同様に相手の音が聞き取り易くなるというメリットもある。

5.3　HMI（Human Machine Interface）

テレマティクスシステムには、車室内の操作と車室外からの遠隔操作の2つの使用方法がある。今回、緊急時も慌てずに操作できるHMIの開発に取り組んだ。

5.3.1　テレマティクススイッチ

2種類の通話サービスの専用ボタンと、システム状態を示すインジケータを一体化したスイッチモジュールを設定し、衝突時でも確実に操作できるルーフのマップランプ近傍に配置した。インナーミラー内蔵型と比較して、万が一フロントガラスが破損してもスイッチが脱落しない利点がある(**図5**)。

・SOSボタン(赤)
・ロードサイドアシスタンスボタン(青)
・システム状態を示すインジケータ(緑／赤)

図5　Telematics switch

5.3.2　ディスプレイ

テレマティクスシステム作動中を示す専用画面をセンターディスプレイに設定した。コールセンターとの接続状態の通知に加え、Stolen Vehicle Recovery(盗難追跡)機能が作動したことを(車内にいるであろう)盗難者に示して監視状態にあることを認知させるために使用する。北米法規を考慮して、通話中でもバックカメラ画面を表示可能にしている(**図6**)。

図6　Telematics screen image

5.3.3　スマートフォンアプリ

最後に、開発したスマートフォンアプリを紹介する。

Remote Lock/Unlock・Remote Horn and Lights操作のための大きなボタンを配置し、他者の不正アクセスを防止するためにPINコード入力による認証機能を設定した。

Remote Vehicle Locator(自車位置表示)機能ではGoogleMaps(TM)の地図表示と航空写真表示を選択可能とし、自車位置と自分の現在位置の2つを表示することで車の場所をわかりやすくした。

HMIの品質確認は、初めての開発で試行錯誤を繰り返しながら、スバルグループ関係部署とサプライヤ・プロバイダとの現地合同試験を中心に進められた。計4回の合同試験＋米国に4拠点を設定したモニター評価を通じ、様々な使用方法への対応やユーザーが不満を感じないレスポンスとなるよう改善を行い、市場品質を確保した(**図7**)。

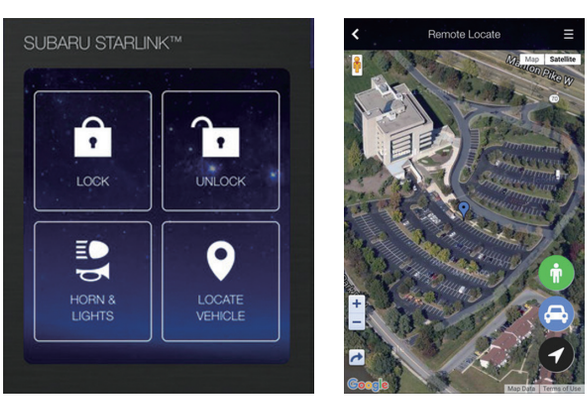


図7　Mysubaru Smartphone App screen

5.4　サイバーセキュリティ対策

テレマティクスによって車が外部とつながることで想定される脅威の一つが“サイバー攻撃”である。

攻撃の入り口で確実に悪意ある攻撃を防御することが必要である。

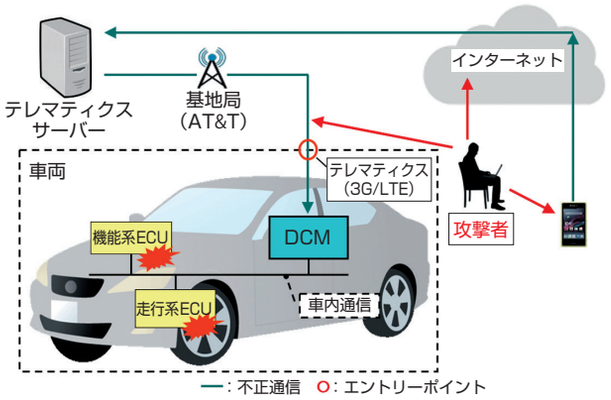


図８　Cyber attack route

図8にテレマティクスシステム全体の概念図を示す。様々な攻撃の入口から想定される脅威を洗い出し、車の安全を脅かすリスクに発展するかについて検討した。その結果、攻撃を防御する方策としてスバル専用の回線を用いること、さらに認証や暗号通信を施すことが外部からのサイバー攻撃を防ぐことにつながっている。

セキュリティ性能の特性上、詳細な記載は出来ないが、お客様のスマートフォン操作から車が動作するまでの間に幾重にもセキュリティ技術を織り込むことで、車の安全を脅かすことのないセキュリティ性を確保している。

6.　あとがき

本システムは、スバルにとって初の独自開発であり、「より良い顧客体験」「求められるサービス」「使い易さ」など、IoT(※2)時代に求められる「スバルらしいクルマ」を実現する第一歩となった。特にサービス展開地域である米国のお客様と地域性をよく理解する米国販社Subaru of America（SOA）が、現地目線でサービスの必要性とその意義を提案し、SOAおよび米国開発拠点Subaru Research and Developmentと富士重工業が同じ目線で協議するCFT活動を通じて、協力して開発を行ったスバル史上初のプロジェクトであった。

開発の過程ではSOAを中心に米国で受容性が高いサービス展開が出来るよう仕様やユースケースの検討、販社と共同で開発・評価を行った。その結果、量産以降のサービス対象車の95%以上（2016/3末時点）のお客様に契約を頂き、ご好評をいただいている。

本サービスを通じて、スバルが提供する新たな「Connected Safety」を体験いただきつつ、より一層の「Customer Engagementの向上」を目指していきたいと考えている。

（※2）IoTとはInternet of Thingsの略。あらゆる物をインターネットに接続・統合して、複合的かつ付加価値の高いサービスを組み上げていく概念。

7.　謝辞

本システムの開発に多大なご協力を頂いた、Continental社、Sirius XM社、AT&T社、Subaru of America、Subaru Research & Development、富士重工業社内関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

【著　者】

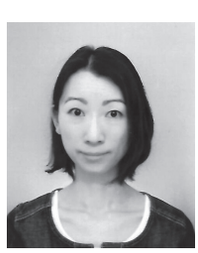
柘植　政俊

野口　清成

丹羽　真

町田　紀人

野本　大志


佐藤　法子

市場を忠実に再現する三元触媒の評価法に関する研究

Study on Evaluation Method of Three-Way Catalyst which Reproduces Market Faithfully

中　野　　勉[*1]　Tsutomu NAKANO
木　下　雅　晃[*2]　Masamitsu KINOSHITA
永　井　　亮[*1]　Ryo NAGAI
福　富　駿　祐[*1]　Shunsuke FUKUTOMI

抄　録

地球環境保護のため、実路走行も見据えた排ガス浄化性能向上が世界的に求められている。自動車開発においては、多様な実路走行によって発生する触媒の劣化形態を把握し、その劣化形態を正確に再現するための評価手法が要求される。

本研究では車両の走行データと触媒を解析し、抽出した劣化因子と影響度の定量化により市場を忠実に再現する三元触媒の評価法を見出した。今回、北米市場での取組みについて紹介する。

Abstract

Performance improvement of vehicle exhaust emission purification which contemplates real driving for global environment protection is desired worldwide. A lot of driving data and catalysts in the market were analyzed to grasp the kind of catalyst degradation in various real driving. Influences of the catalyst degradation factor picked out were analyzed, and an evaluation method of the three-way catalyst which faithfully reproduces market was built. This paper introduces our efforts to reproduce the North American market.

1.　まえがき

多様な実路走行によって発生する触媒の劣化形態を把握するために、米国市場における多様な走行パターンと、それによって発生する触媒の劣化状態を調査する必要がある。今回の研究においては、実際に米国市場における多数の車両の走行データを収集するとともに、その車両の触媒を収集し、直接調査することによって、走行による触媒の使われ方と劣化状態の関係についての解析を実施した。

2.　調査方法

2.1　車両サンプル収集地域の選定

車両サンプルの収集にあたっては、全米としての代表性を表現するため、気候区分、気温、標高、人口密度、燃料性状の観点から23の地域を選定し、各地域から5台程度のユーザーに呼びかけを行い、合計で124台を収集した。**図1**に米国内で収集を行なった18の州を示す。また、**表1**に収集するにあたって考慮した23の地域性を示す。

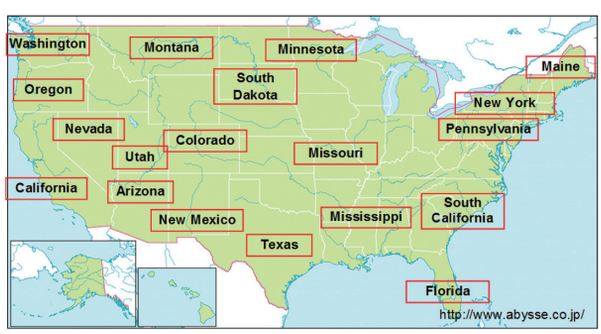


図1　Investigation area in the United States

2.2　触媒と走行データの収集方法

米国における既販車1車種について、サンプリングした車両の走行データと触媒をセットで収集した。走行データの収集は、サンプリングした各ユーザーの車両にドライビングレコーダーを装着し、車両速度、エンジン回転速度、エンジン負荷、A/F（Air Fuel Ratio）センサ出力値を計測した。計測期間は各車両に

＊1 パワーユニット研究実験第1部
＊2 Subaru Research & Development, Inc.

表１　Locality in investigation area

NO	State	City	Average temperature	Sea level	Population density	Market fuel	Climatic division
1	Oregon	Eugene	11.7	129			West coast marine climate
2	Washington	Seattle	11.3	47	High		
3	California	Los Angeles	18.5	77	High	Low-sulfur	Mediterranean climate
4	California	San Jose	16	26		Low-sulfur	
5	Nevada	Las Vegas	19.7	629	High		Desert climate
6	Utah	St. George	17.5	790			
7	Nevada	Carson City	8.8	2064		Low-sulfur	Alpine climate
8	Utah	Salt Lake City	11.1	1305	High		
9	Colorado	Silverthorne	0.6	2677		Low-octane	
10	Colorado	Salida	4.8	2161		Low-octane	
11	Colorado	Denver	10.3	1623	High	Low-octane	Steppe climate
12	New Mexico	Silver City	9.7	1600			
13	Texas	El Paso	18	1125	High		
14	New Mexico	Alubquerque	14.2	1511	High		
15	Montana	Billings	8.3	1088		Low-ethanol	
16	Minnesota	Minneapolis	7.2	262	High		Cool in summer and Cold zone humid climate
17	Maine	Bangor	8	51			
18	New York	NeW York City	12.7	16	High		Warm in summer and Cold zone humid climate
19	Missouri	Springfield	13.4	403			
20	Texas	Houston	20.6	19	High		Humid subtropical climate
21	South California	Charleston	13	11	High		
22	Mississippi	Jackson	17.7	88			
23	Florida	Tampa	24.8	10	High		Savannah climate

つきWeekdayとHolidayを含む約2週間において実施し、日常的な走行を記録した。

2.3　触媒劣化の評価方法

収集した触媒の劣化度評価として、車両によるモードエミッション（emission）計測、触媒単体の浄化性能計測を実施した。また、各々の触媒の劣化形態を物性として捉えるために、触媒物性の分析を実施した。

車両におけるモードエミッション計測の方法は、触媒としての劣化レベルを把握するために、同一車両、同一試験室、同一ドライバーにて設備と計測ばらつきを抑制した。触媒単体の浄化性能については、エンジン台上運転での定常流れにおいて、ライトオフ（light-off）性能、及び、三元浄化性能を計測した。触媒の分析については、モードエミッションと単体浄化性能計測を終えた各触媒を分解し、**表2**に示す分析手法[(1)]を用いて行なった。

2.4　走行データの解析方法

収集した走行データは、計測した各運転パラメータの使用頻度についての解析を行い、触媒劣化度合いとの関係について調査を実施した。各車両の走行データは、限定された一定期間の計測結果であり、必ずしもその車両の触媒が経験した運転状況を完全に表現できるものではない。今回は各車両のユーザーの日常的な走行を計測したことを前提に、取得した運転データが使用過程中に繰り返されたと仮定して解析処理を行なった。

表２　Catalyst analysis method

Analytical method		Measurement item
XRF	X-Ray Flouresscence	Precious metal, Chemical additive, Poisoning amount
BET	BET method	Specific surface area
XRD	X-Ray Diffractometer	Precious metal crystallite size, CeO_2-ZrO_2 crystallite size
STEM	Scanning Transmission Electron Microscope	Precious metal particle size
EPMA	Electron Probe Micro Analyzer	Phosphorus poisoning distribution
Hg-P	Mercury Porosimeter	Micropore distribution (100-10000 nm)
MSA	CO adsorption method	Precious metal surface area
CHN	CHN Analyzer	Amount of carbon
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy	Solid solution, Rhodium oxide
N2-P	Nitrogen adsorption method	Micropore distribution (1-100 nm)

3.　解析結果

3.1　エミッション悪化と触媒性能の関係

図2に収集した触媒の走行距離に対するFTP（Federal Test Procedure）[(2)]のエミッション分布を示す。走行距離が同等でもエミッションレベルは広く分布している。また、**図3**に触媒単体のT50ライトオフ性能（50%浄化温度）分布を示す。ライトオフ性能も走行距離が同等でも約50℃の幅で分布している。

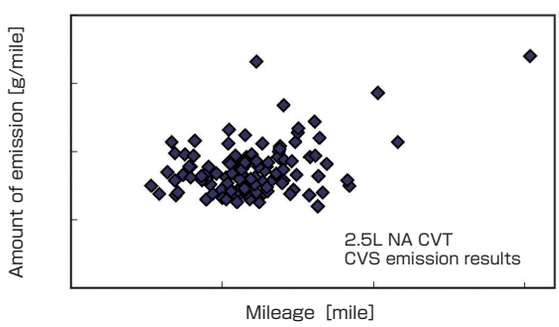


図２　Emission distribution of the FTP mode

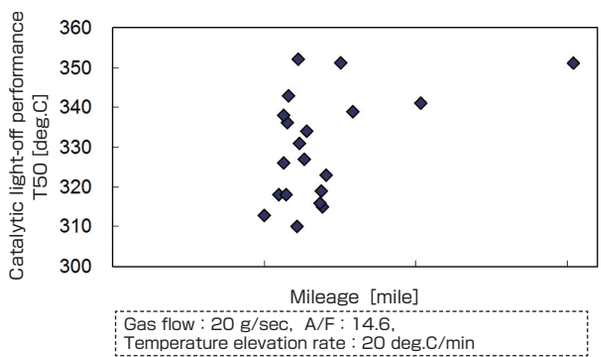


図３　Relation between the mileage and the catalytic light-off performance

図4にFTPのエミッション計測結果と、触媒単体のT50ライトオフ性能の関係を示す。エミッションの悪化は触媒ライトオフ性能に相関関係があり、ライトオフ性能が大きく低下する触媒についてはエミッションが著しく悪化することも確認された。これに対し、暖機後の三元浄化性能とは明確な相関関係が確認されなかった。以上のことから、市場におけるモードエミッションの悪化要因として、触媒のライトオフ性能が悪化する要因の調査が重要と考えた。

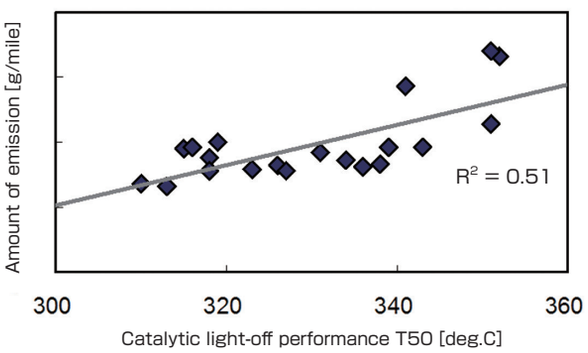


図4　Relation between the catalytic light-off performance and the amount of emission

3.2　触媒性能と物性の関係

ライトオフ性能の低下について、触媒の物性として起こっている現象の解析を行なった。

図5に触媒物性値に対するT50ライトオフ性能の関係を示す。触媒分析による各物性値の結果の中で触媒ライトオフ性能との相関関係が特に大きかったのは、BET比表面積、Pd（Palladium）粒子径、およびCeO_2－ZrO_2（Ceria-Zirconia）固溶体の結晶子径、の3つであった。複数の物性変化が重なり合う中で、3つの関係は高い相関係数を示していることから、ライトオフ性能を低下させている物性変化の因子として影響が大きいことが示唆された。

3.3　触媒劣化要因の推定

走行データの解析結果から、エミッションを悪化させている要因についての推定を行なった。

図6にモードエミッションの悪化傾きと、単位距離あたりのSBC（Standard Bench Cycle）[3]熱負荷、燃料カット経験時間、A/Fリッチ経験時間との関係を示す。走行距離に対するエミッション悪化傾きが特に大きい触媒は、温度が高いだけでなく、燃料カット時間と、A/Fリッチ時間が共に大きいことが確認された。その他の地域性やエンジン回転数、エンジン負荷などの計測したパラメータからは、特別な傾向は確認されなかった。このことから、米国市場におけるエミッション悪化は、熱とA/F雰囲気による触媒の劣化で整理できると仮説を立てた。

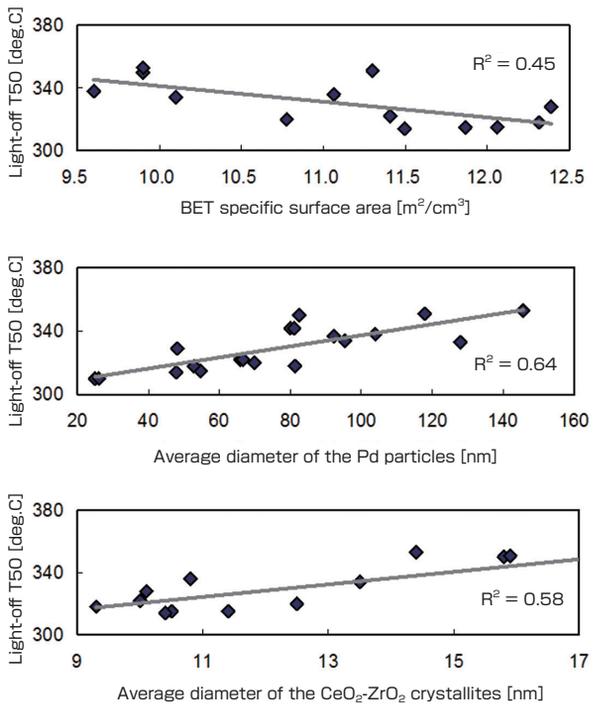


図5　Relation between the catalytic light-off performance and the state of catalyst materials

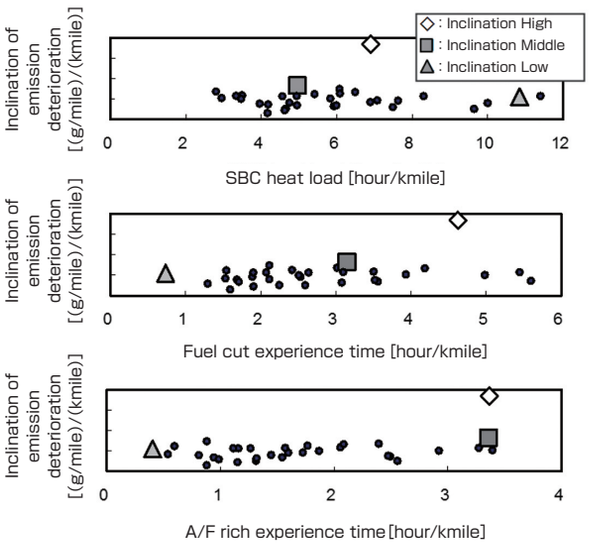


図6　Relation between environment experience time and inclination of emission deterioration

3.4　触媒劣化要因の検証

モードエミッション悪化、触媒性能低下、および物性変化に対する走行データ解析結果との関係から、推定した劣化要因についての検証試験を実施した。

図7にエンジン台上運転において、λ（空気過剰率）＝1、燃料カット、λ＝0.85のリッチを触媒温度ごとに単独で200時間与えた触媒のモードエミッション悪化量から算出した劣化感度を示す。各雰囲気を同一時間与えた場合の劣化感度は、触媒が晒される温度によって大きく変化する。さらに、燃料カットやA/Fリッチによる雰囲気劣化は、λ＝1雰囲気に比べて特に影

響度が大きいことを示している。これは、触媒温度が高い状態で燃料カットやA/Fリッチを多用する運転環境において、触媒劣化が促進されることを意味する。

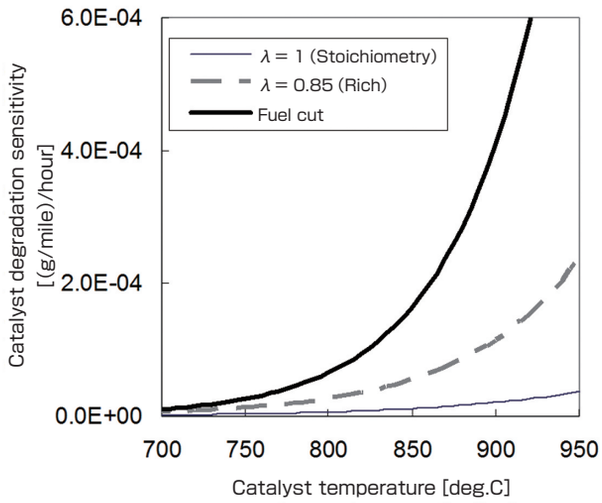


図７　Catalyst degradation sensitivity

図８にλ＝1、燃料カット、λ＝0.85のリッチを単独で200時間与えた触媒の耐久温度に対するライトオフ性能と各物性の関係を示す。燃料カットによる酸化雰囲気に長時間晒された触媒はPd粒子径が最も大きく、シンタリング(Sintering)によりライトオフ性能が低下することを確認した。またA/Fリッチによる還元雰囲気に長時間晒された触媒は、CeO2 - ZrO2固溶体の結晶子径が最も大きくなっていることから、OSC(Oxygen Storage Capacity)性能が低下したと考えられる。

以上のことから、米国市場における触媒劣化、およびエミッション悪化の要因は、熱とA/F雰囲気の2つの因子が支配的であると結論付けた。

4. 評価法の作成

市場における触媒の劣化要因を特定することにより、目標とする劣化形態を正確に再現するための評価手法の検討を行なった。

自動車開発における触媒劣化評価方法として必要とされるものは、車両で実走して耐久性を評価する「実走耐久評価モード」、およびその評価と同等の触媒劣化を短期間で再現が可能な「促進耐久モード」である。車両の使われ方の中で発生しうる触媒劣化レベルを把握し、開発の中で目標とする劣化レベルを評価モードによって正確に再現することができれば、実路走行も見据えた排ガス浄化性能の向上が可能となる。

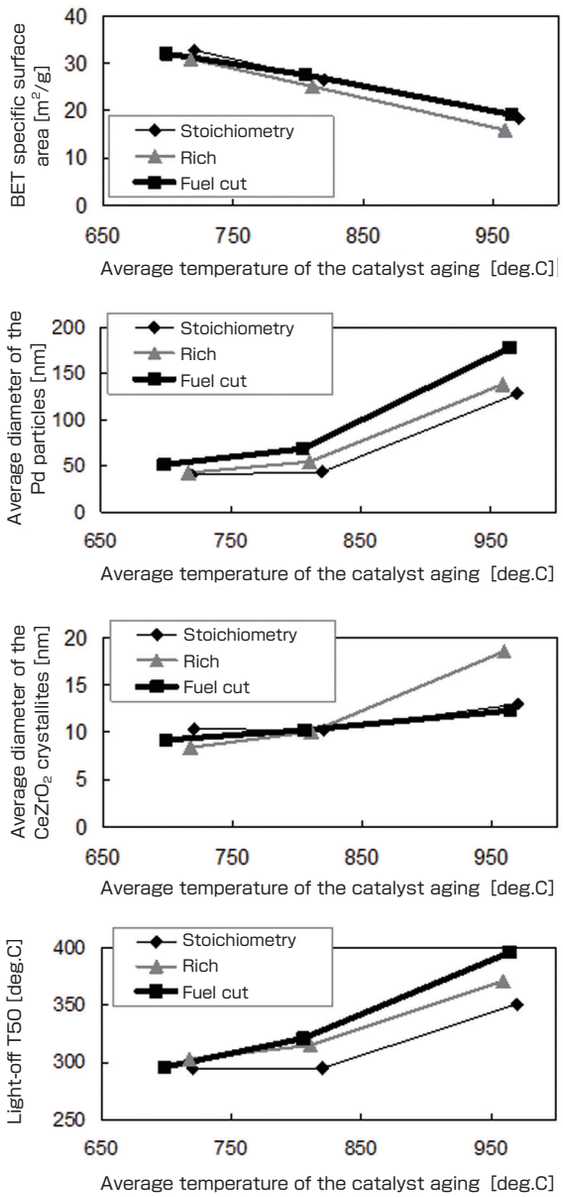


図８　Relation between the state of catalyst materials and the catalytic light-off performance to the catalyst aging temperature

4.1　実走耐久評価モードの作成

実走耐久評価モードの作成においては、①市場のエミッション悪化分布に対し目標とする触媒劣化を表現できること、②市場での車両の使われ方に即した走行モードであること、の2つの観点を重視した。

図９に①の観点について、エミッション悪化分布に対し目標とした劣化レベルを示す。エミッション計測結果から、走行距離に対するエミッション悪化値を補間算出し、目標走行距離における推定悪化分布を作成した。この推定悪化分布に対し90%の劣化レベルを表現できることを目標とした。

図10に②の観点について、市場の走行データから解析した速度と加速度の分布を示す。一般ユーザーに

おける車両の使われ方は、各地域の法定速度や交通事情によって変化する速度と加速度で代表的に表現されるものと考えられる。従って、市場の速度と加速度の分布に対して偏ったモードにならず、分布の網羅性を持つことを目標とした。

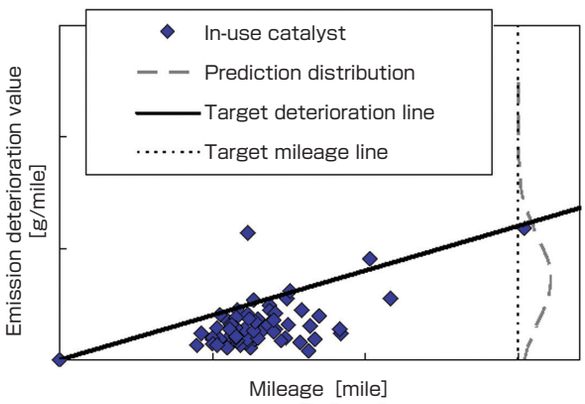


図９　Target catalyst degradation

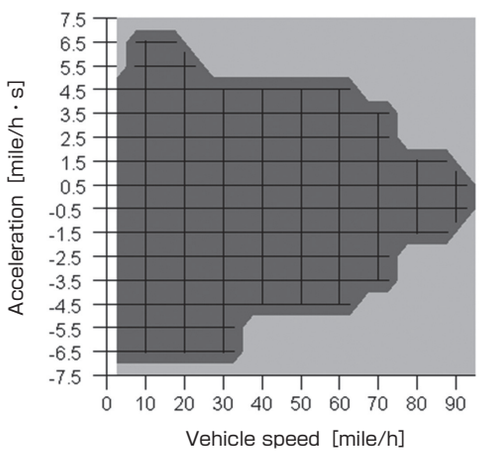


図 10　Distribution map of the speed and the acceleration in an American market

図11に市場における劣化因子別のエミッション悪化分布を示す。計測を実施した全車両の走行データについて、触媒の温度ごとにA/F雰囲気の経験頻度を解析し、取得したデータの走行距離から目標走行距離相当の頻度へ換算した。この頻度と図7の触媒劣化感度係数を使用して、λ =1による劣化、燃料カットによる劣化、および$\lambda < 0.97$のリッチによる劣化、それぞれ単独でのエミッション悪化値を算出した。この3つのA/F雰囲気それぞれのエミッション悪化値についての度数分布を作成した結果から、A/F雰囲気ごとのエミッション悪化分布は正規分布を形成すると定義した。

算出した劣化要因ごとの正規分布の平均値をU_a、U_b、U_c、標準偏差をσ_a、σ_b、σ_cとした場合、独立した異なる3つの正規分布の組み合わせによって形成される1つの正規分布の平均値Uと標準偏差σは式(1)、(2)で算出される[4]。

$$U = U_a + U_b + U_c \tag{1}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + \sigma_c^2} \tag{2}$$

市場のエミッション悪化が3つのA/F雰囲気による悪化分布の組み合わせで整理できるとした場合に、式(1)、(2)で算出した平均値と標準偏差によって表現される1つの正規分布を、市場のエミッション悪化分布として考えることができる。

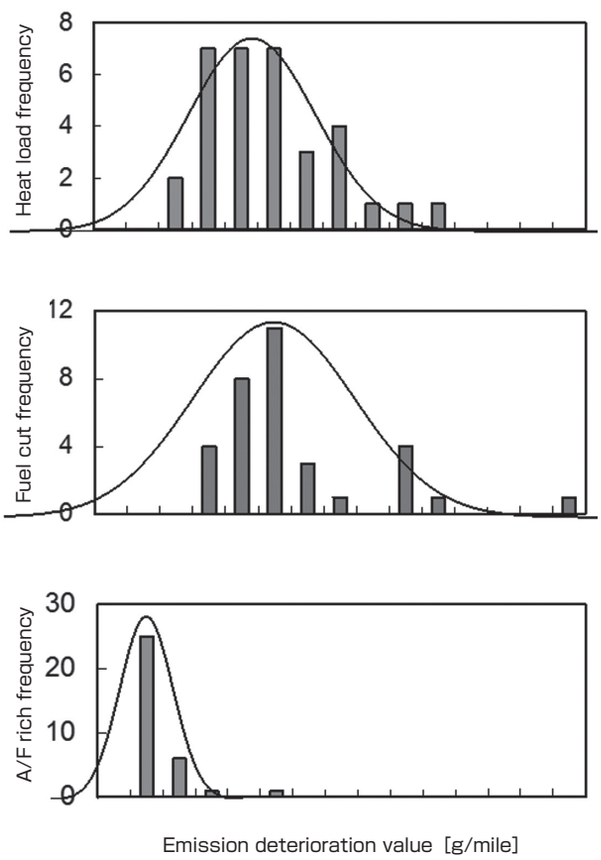


図 11　Emission distribution by each degradation factor

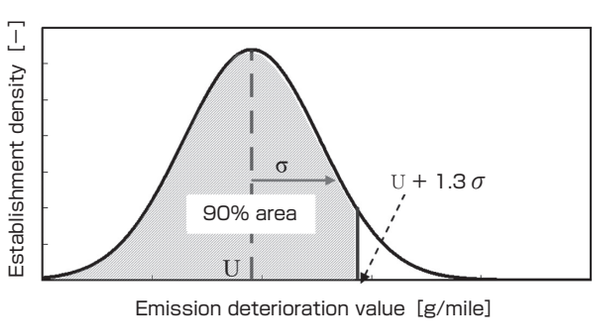


図 12　90% area of the combined normal distribution

本研究での走行評価モード作成では、市場のエミッション悪化分布に対して90%をカバーできる厳しさを目標として設定した。**図12**に3つのA/F雰囲気の正規分布を組み合わせた場合に算出される正規分布と、その90%面積を満足するために必要なエミッション悪化レベルを示す。90%の劣化レベルを表現するためには、**図12**で作成された1つの正規分布の面積の90%をカバーすることができるU + 1.3σ相当のエミッション悪化値になるように、3つのA/F雰囲気の経験頻度を確保することが必要とされる。**図13**に最終的に作成した走行評価モードを示す。3つのA/F雰囲気の経験頻度によって90%のエミッション悪化値が表現できるように、収集した多数の実路走行データの車速をランダムに組み合わせ、モード作成を行なった。

また、速度・加速度についても市場の分布に対し網羅性が確保できるように車速と勾配の組み合わせを調整しながら、触媒の劣化レベルと使われ方における目標を達成できる走行モードを検討した。**図14**に作成した走行モードの速度と加速度の分布を示す。**図10**に示した市場の速度・加速度分布に対し、偏り無く設定できていることを確認し、走行評価モードを決定とした。

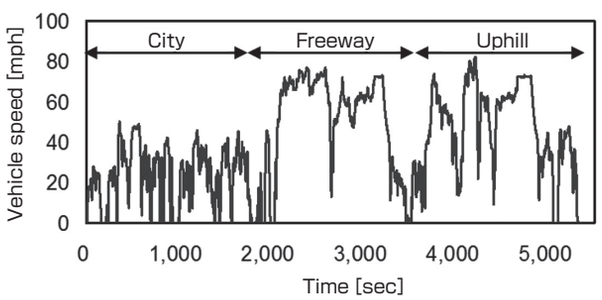


図 13　Vehicle driving evaluation cycle

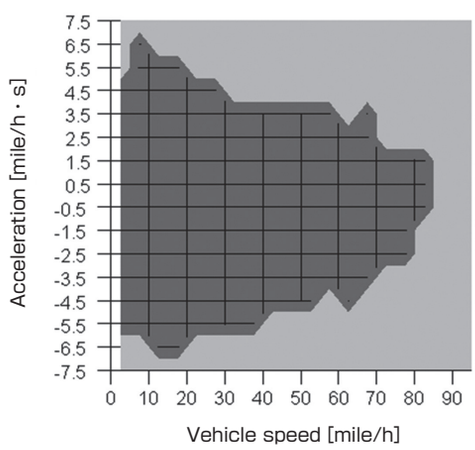


図 14　Distribution map of the speed and the acceleration by driving an evaluation mode

4.2　促進耐久評価法の作成

図15にエンジンベンチでの運転における促進耐久評価サイクルの作成結果を示す。促進耐久評価法の作成においては、**図14**の実走耐久評価モードを目標耐久走行距離まで走行した場合と同等の触媒性能となる劣化状態を、短時間で作成できることが要求される。触媒劣化は、**図7**に示す触媒劣化感度のように、温度によって加速的に促進される特性が得られている。従って、実走耐久評価モードを走行することによって得られる3つのA/F雰囲気の経験頻度を、温度による劣化感度特性によって高温の経験頻度へと換算し、エンジンベンチでの運転によって、必要とされる頻度を直接的に触媒へ与えることで、短時間の運転にて劣化状態の促進を可能とした。

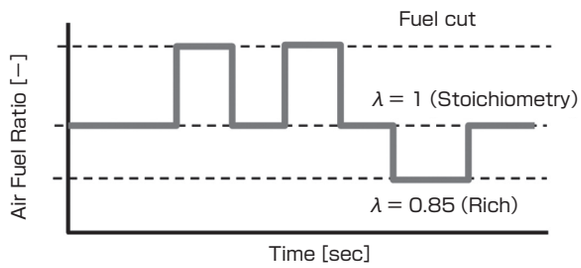


図 15　Bench aging cycle

4.3　評価モードの妥当性検証

図16に今回作成した触媒評価モードにて、実走耐久を行なった触媒、および促進耐久にて作成した触媒について、エミッション悪化を計測した結果を示す。促進耐久触媒では、目標とした悪化ラインに沿った結果の推移が確認できた。実走耐久触媒においては、本論文作成時点では目標走行距離の半分までの結果となるが、目標とした悪化ラインに沿った結果の推移を確認した。継続的に実走評価の推移を確認していくが、本評価モードの作成手法により、狙いとする市場の触媒劣化状態を再現していることが検証できたと考える。

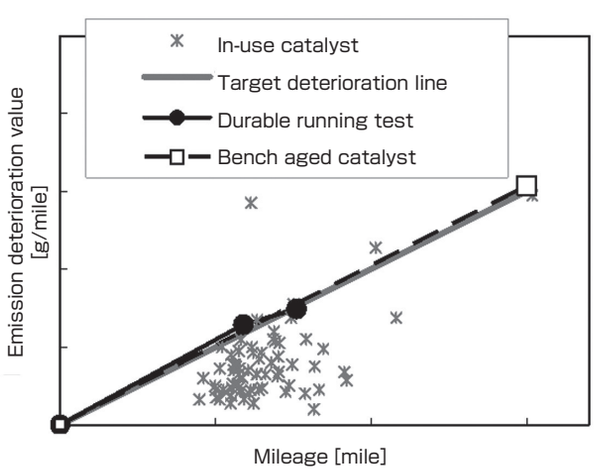


図 16　Validity inspection result of the evaluation method

5. まとめ

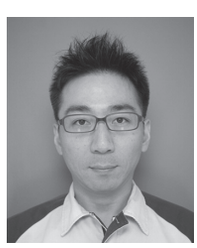
米国市場の各地における124台のユーザー車両から、触媒と走行データを収集することにより、下記の知見を得た。

(1) 実路走行における三元触媒の劣化要因は、熱とA/F雰囲気の2つの因子が支配的である。
(2) 触媒劣化によるエミッション悪化と、浄化性能の低下、および物性変化は、3つのA/F雰囲気下における温度と経験時間で表現できることを確認した。
(3) 触媒の温度劣化感度と3つのA/F雰囲気の経験頻度から、目標とするエミッション悪化が得られる走行評価モードを作成することで、触媒劣化レベルを忠実に再現できることを確認した。
(4) 今回作成した実走行耐久モードは、市場における車両の使われ方として、速度と加速度の分布を考慮している。そのため、別の車両においても使われ方は同じと定義する範囲においては、計算過程の中でその車両の触媒劣化感度へと置き換える事により、汎用性を持った触媒評価が可能と考える。

参考文献

(1) 村木　秀昭ほか, 自動車触媒の最新技術および劣化対策と貴金属低減, 東京, 株式会社　情報機構, 2010, 370p.
(2) Electronic Code of Federal Regulations 40CFR 1066
(3) Electronic Code of Federal Regulations 40CFR Part86 EPA86 Subpart S S86.1823-08
(4) 浅野　晃, 情報統計学(2010 年度後期 第6回) ウェブページ, http://kougi.racco.mikeneko.jp

【著　者】


中野　　勉

木下　雅晃

永井　　亮

福富　駿祐

単気筒エンジンの改良による開発プロセスの課題対応（第２報）

Solutions to Difficulties on Engine Development Processes Based on Improvement of Single-Cylinder Engines（Second Report）

山口　暁* Satoru YAMAGUCHI
中山智裕* Tomohiro NAKAYAMA
加藤真亮* Masaaki KATO
木本健太* Kenta KIMOTO
原井惇行* Atsuyuki HARAI
金子　誠* Makoto KANEKO

抄　録

単気筒エンジンは製作コストが低く仕様変更が容易なことから、エンジン開発の初期段階で活用されている[(1)]。しかし、多気筒エンジンと単気筒エンジンの特性が一致しないことがあり、エンジン開発プロセス上の大きな課題となっている。

第1報では、吸排気チャンバ容量や排気管長さ、シリンダライナ温度の調整によってエンジン開発のプロセス改善に役立つことを示した[(2)]。

第2報では、第1報で残課題としていた全負荷時の脈動に対し対応策を見出し、さらに、計測手法の高度化で単気筒で評価できる応用範囲を拡大することができた。

Abstract

Single-cylinder engines are used in the early stages of engine development because of their ease of specification optimization. The characteristics of multi-cylinder engines can, however, differ from those of single-cylinder engines even though their structure is based on that of single-cylinder types. This can cause difficulties in the development process.

In the first report, we have reported that adjusting the intake and exhaust-chamber sizes, the exhaust-pipe lengths and the cylinder-liner temperatures can help improve engine development processes.

In this second report, we have found a measure against full-load pulsation, which is one of the remaining difficulties, and succeeded in extending the application range of single-cylinder engines by means of an advanced measurement technique.

1．まえがき

エンジン開発においてやり直し発生を防止する目的で、V字プロセス開発という手法が一般的になりつつある[(3)]。この手法では、開発工程を機能確認のための工程に分解し、各工程で設定した目標値をクリアしない限り次の工程に進ませないことで、問題発生すなわちやり直しが発生することを防止する。同時に、可能な限りこれら機能確認をCAEに置き換えて開発期間とコストを削減する。

しかしながら、現状ではある頻度でやり直しが発生してしまうのが実状である。原因として、各工程で設定する目標値を、燃費・排ガス・出力等のエンジンの最終性能に確実に紐づけることが難しい、などが挙げられる。また、ガソリン直噴の触媒暖機時の点火リタードにおける燃焼安定性やモード燃費域のEGR限界、全開時のノック特性をCAEで予測することは現状難しい。

そこで、多気筒エンジンを試作する前に機能を確認する手段として単気筒エンジン活用に利点があると考え、第1報[(2)]にて、単気筒エンジンの特性が4気筒エンジンとほぼ同等にできる方策を提案したが、いくつか課題が残っていたのでその対応について述べる。

2．課題対応の方針

第1報[(2)]で示したまとめは、以下のとおりであった。

①各部位の温度調節によって燃焼室壁温を4気筒に合わせた結果、トレースノック点火時期の4気筒との差が半減した。

②排気チャンバ容積、排気管長を設定した結果、内部EGR率が4気筒に近づき、図示燃費率を4気筒にほ

＊ 技術本部PGM

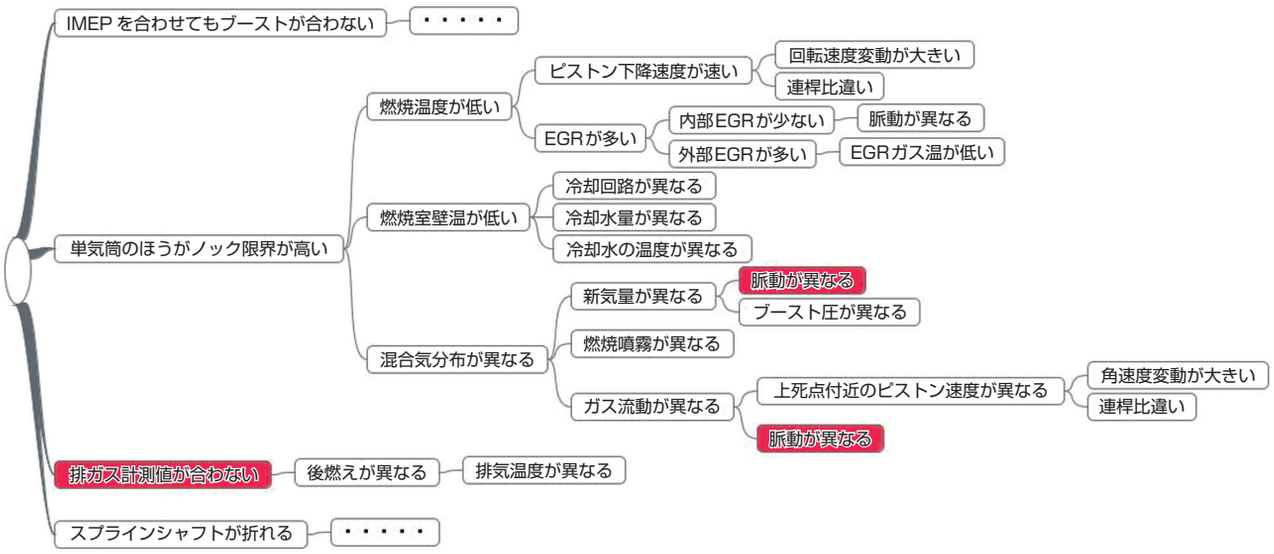


図１　Example of factor analysis

ぼ合わせることができた。

③部分負荷において、吸気チャンバの導入により、吸気行程中の圧力降下を抑えることができた。

④全負荷において、吸入管入口部にダンパ効果を持つエアクリーナー設置により、吸気脈動の振幅を抑えることができた。

このうち④について、効果は確実に認められたものの吸気チャンバの下流に抵抗物が挿入されたことにより、跳ね返りとして③の目減りすなわち吸気行程中の圧力降下が発生する課題が残った。また、触媒暖機運転中の排気温度が異なり、それによるとみられる排気ガス（THC）濃度の差異等の課題も残されていた。

図１は第１報で示した要因分析の一例であるが、残課題とそれぞれの要因を絞り込むのに活用した。**表１**は単気筒エンジンと４気筒エンジンの特性差の主要因と対応策である。残課題に該当する部分を赤く示した。

表１　Main factors of characteristics differences and solutions

Main factor	Solution
Cooling	Adjust wall temperature
Internal EGR	Set up exhaust chamber
Intake pressure drop	Set up intake chamber
Intake pulsation	Helmholtz resonator
Engine speed fluctuation	Low inertia dynamo meter
Exhaust temperature	Measurement method

第１報と同様、着火前の筒内状態が同じであれば、燃焼は同様となるとの考えの基に、内部EGR、ガス流動、燃焼室壁温、ピストン運動に着目するが、後述するように、機能確認に必要な多気筒エンジンの特性を、現実的な手段を用いて単気筒エンジンにて再現することを本研究の方針とした。

3.　残課題対応の詳細

本研究で用いた単気筒エンジンはボア×ストローク、コンロッド長、吸気ポート、燃焼室・ピストン形状を含め４気筒エンジン[(1)]と同じ仕様である。**表２**に供試機関の仕様を示す。

表２　Test engine specifications

	Single cylinder engine	4 cylinder engine
Bore × stroke [mm]	φ84 × 90	←
Conn-rod length [mm]	129.3	←
ε	12.0	←
Fuel injection	DI	←
Intake system	Special	Equivalent of product
Exhaust system	Special	Equivalent of product

単気筒エンジンでは、４気筒エンジンとは異なり吸排気管内での脈動が、内部EGR、筒内ガス流動違いに影響を及ぼすが、排気管内温度違いや、他気筒からのブローダウン影響のため、単気筒エンジンの吸排気脈動を４気筒エンジンと完全に一致させることはできない。

そこで第１報と同様、燃焼への主影響要素である内部EGRと吸気行程中の脈動に着目し、現実的な手段として吸排気システムの変更を選択し、機能確認に必要な４気筒エンジンの特性を単気筒エンジンにて再現

している。吸排気システムを含めた単気筒エンジンの概略図を図2に示す。

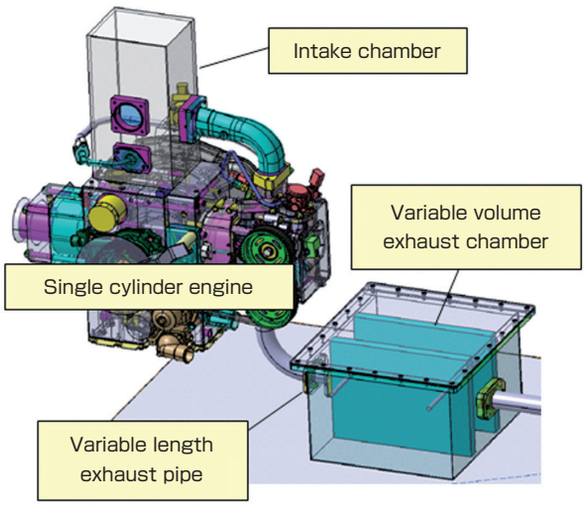


図2　Intake & exhaust systems

3.1　全負荷時の脈動対応

ノックに影響する一因と考えられる全負荷時の脈動を、可能な限り4気筒エンジンに近づけることを試みた。第1報では、吸気チャンバの下流にダンパ役割を持つエアクリーナー設置により、吸気脈動の振幅を抑えることができることを示したが、跳ね返りとして吸気行程中の圧力降下が発生してしまった[2]。

単気筒エンジンでは、4気筒エンジンと比較して排気からの吹き戻しが吸気脈動に大きく影響すると考える。図3に吸気チャンバのみ設置した場合の全負荷時の吸気脈動をシリンダ内圧力と共に示す。

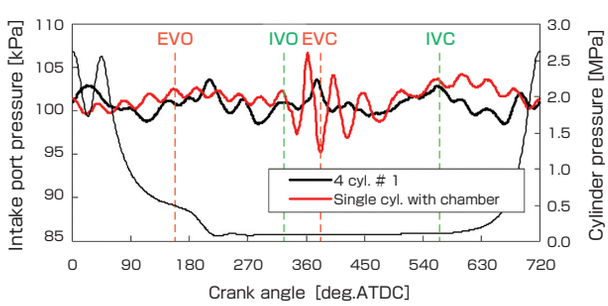


図3　Intake port pressure at full load

吸気チャンバのみでは、単気筒エンジンに生じる高周波の脈動を抑えることができないとわかる。この高周波の吸気脈動の周波数成分は、FFT解析によれば170 Hzである。そこで、この170 Hzの脈動成分を抑える方策として、式(1)から共鳴周波数を設定したヘルムホルツ共鳴器[4]を、脈動が往復する吸気系の中間位置に設置することにした。

$$f = \frac{c}{2\pi} \times \sqrt{\frac{S}{VL}} \qquad (1)$$

f：ヘルムホルツ共鳴周波数
c：音速
S：共鳴器接続管断面積
L：接続管長さ
V：共鳴器ボリューム

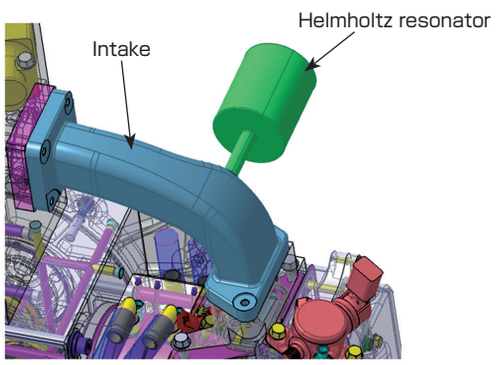


図4　Layout of the Helmholtz resonator

図4に今回設定したヘルムホルツ共鳴器の配置を示す。図5に全負荷時の吸気脈動とシリンダ内圧力を、図6にFFTによる吸気脈動の周波数解析結果を示す。これらからヘルムホルツ共鳴器設置により単気筒特有の吸気脈動のみが低減されることが確認できる。吸気系の中間位置にヘルムホルツ共鳴器を設置することで、全負荷時の吸気脈動の振幅を4気筒エンジン相当に減少させIVCにおける吸気管内圧力をほぼ同じにすることができるとわかった。

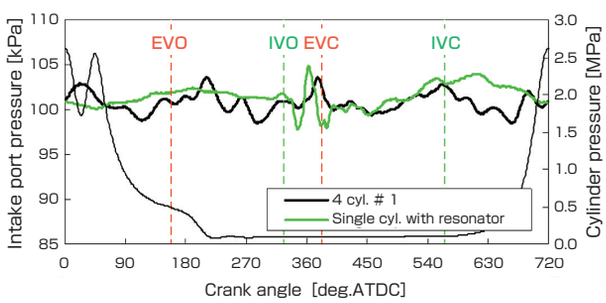


図5　Intake port pressure at full load with the Helmholtz resonator

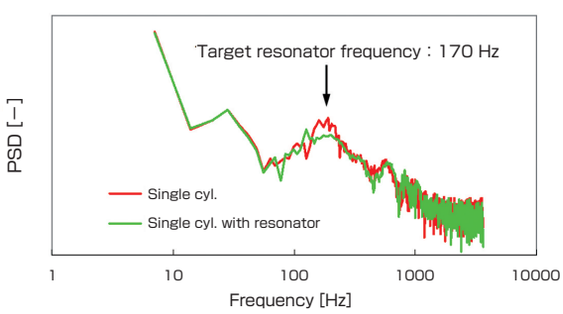


図6　Power spectral density

3.2　排気温度違い（THC濃度違い）の対応策

排気管内の温度は、単気筒エンジンの方が低くなる傾向がある。**図７**に単気筒エンジンと4気筒エンジンの排気温度とTHC濃度の違いを示す。ポート直下およびポート下流の温度の違いが、後燃え状態に影響を与え、その影響を受けるTHC濃度に違いが生じている。

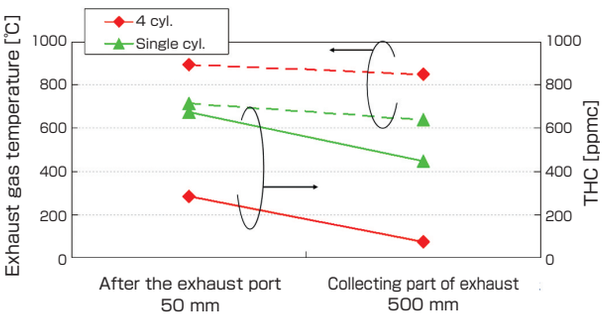


図７　Characteristics of exhaust gas

通常の排ガス分析計（堀場MEXAシリーズ）は定常計測のため、THC濃度は排気バルブが閉じている期間も含めた平均的な値を示す。そのため、4行程で1回しか爆発しない単気筒エンジンでは排気管温度が低く、排気行程以外の期間で排気管に滞留している排気ガスの後燃えが少ないことから、通常の排ガス分析計ではTHC濃度が高く計測される。

後燃えの影響を受けずにTHC濃度の計測を行うには、排気ポート直下での高速水素炎イオン検出器（FID）計測が有効である。**図８**に高速FID（Cambustion HFR500）を用いた触媒暖機モード中の排気ポート直下におけるTHC濃度の計測結果をシリンダ内圧力と共に示す。

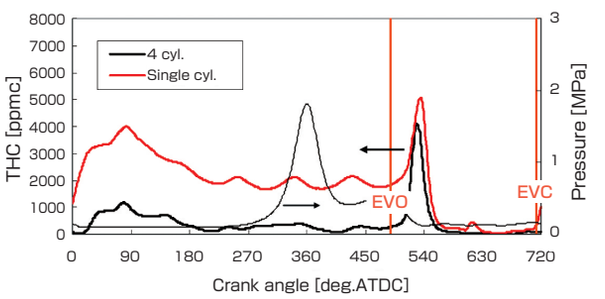


図８　THC variation in a cycle

図８によれば、排気行程中におけるTHC濃度のピーク値は単気筒エンジンと4気筒エンジンでおおよそ一致していることが分かる。このことから、後燃えの影響を受けない排気行程中のTHC濃度であれば、単気筒エンジンも4気筒エンジンと同等であることがわかる。

排気温度の違いは、爆発回数の違いが本質的な要因がありいかんともしがたいが、機能確認に必要な多気筒エンジンの特性はTHC濃度である。高速FID手段を用いることにより、単気筒エンジンにて4気筒エンジンのTHC濃度を再現する目的は達成できたと考える。

4.　まとめ

エンジン開発プロセス改善に役立つ単気筒エンジンを提案するべく行った対応について、結果を以下に示す。

①全負荷において、同調点を合わせたヘルムホルツ共鳴器を吸気管に設置することで単気筒エンジン特有の吸気脈動の振幅を抑えることができた。

②触媒暖機モード中のTHC濃度については、時間平均ではなく超高速FID計測による排気中のTHC濃度であれば、単気筒エンジンは、4気筒エンジンとほぼ同等であることがわかった。

5.　あとがき

単気筒エンジンは、開発の初期だけでなく環境変化で開発期間中に目標引き上げが必要になった時や、市場不具合発生時の対応にも活用できる可能性があるため、今後も引き続き、変化に強く開発プロセスに活かせる単気筒エンジンの改良を継続し、さらなるエンジン開発プロセス改善を追求していきたい。

参考文献

(1) 秋本ほか8名，新世代水平対向ガソリンエンジンの開発（第2報）－燃焼設計と燃費性能改善について－，自動車技術会学術講演会前刷集（秋季），No.110-10, 20105781 (2009)

(2) 山口ほか5名，単気筒の課題対応によるエンジン開発プロセスの改善－スバル技報，第42号（2015）

(3) 藤川智士，マツダの目指すモデルベース開発，マツダ技報，第31号（2013）

(4) 深野ほか1名，ヘルムホルツ共鳴器による減音（その1，設計周波数の実験による検討），日本機械学会論文集（B編），53-494，(1987)，pp3034-3037

【著　者】

山口　　暁

中山　智裕

加藤　真亮

木本　健太

原井　惇行

金子　　誠

成長期（平成初期）のスバル紹介

インプレッサ 15S（2007年～2011年）

全長×全幅×全高：4415 mm×1740 mm×1475 mm
ホイールベース：2620 mm
エンジン：水平対向4気筒 DOHC 1498 cc
最高出力：81 kw（110 ps）/6400 rpm
最大トルク：144 N-m（14.7 kg-m）/3200 rpm

「新快適スタイル」を商品コンセプトに、前モデルまで存在したスポーツワゴンに代わり５ドアハッチバックとセダンの２モデルとなった。両モデルとも全幅が1700 mmを超え３ナンバーとなる。全長は抑えたうえでホイールベース拡大等により、室内居住性を大幅に向上させた。シャシーは、レガシィのプラットホームを基にした「SI-シャシー（Subaru Intelligent Chassis）」を新たに採用し、リアサスペンション形式をストラット式から新開発のダブルウィッシュボーン式へと変更した。

シャシ板金溶接部品の耐食性＆疲労強度向上技術の開発

Development of Welding Technology for Chassis Parts for Improvement of Corrosion Resistance & Fatigue Strength

中澤嗣夫[*1] Tsuguo NAKAZAWA
上田聡[*1] Satoshi UEDA
池田倫正[*2] Rinsei IKEDA
片岡時彦[*3] Tokihiko KATAOKA
鈴木康剛[*4] Yasutaka SUZUKI
藍原梨恵[*4] Rie AIHARA
周東孝[*4] Takashi SYUTO
狩野佐登視[*4] Satoshi KANOU

抄　録

シャシ板金部品の溶接部は強度耐久性を確保する上で重要な部位である。耐食性確保のために溶接部は電着塗装を施すものの早期発錆による防錆力の低下や、溶接ビード止端部への応力集中による疲労強度の低下を考慮する必要があり、厚板を使って強度、防錆設計している。このため軽量化を図ろうと高強度材料を用いても、溶接ビード止端部の切欠きの影響で疲労強度が向上しないと言われている[(1)]。

本報では、溶接部の早期発錆と溶接ビードへの応力集中を抑制する手法として、溶接シールドガスの低CO_2化の検討を行ったので結果を報告する。

Abstract

Welding of chassis parts made of steel sheet plate is very important in securing strength and durability. It is necessary to perform a part design using thick steel plates, because weld strength is decreased due to poor corrosion resistance on welded areas and stress concentration on weld toes. Therefore, the fatigue strength does not improve under the influence of weld toes even if high strength steel is used for weight reduction.

This paper presents the results of examination to adopt low CO_2 shielding gas for better corrosion resistance on weld beads and less stress concentration on weld toes.

1. まえがき

シャシ鋼板溶接構造部品は、耐食性を確保するために、溶接後に電着塗装を施すが、アーク溶接部は電着塗装後でも溶接以外の一般部と比較し、早期に錆が発生し、腐食が進行しやすい。

アーク溶接部に錆が発生しやすい原因は、先の技報でも述べたとおり[(2)]、溶接ビードの止端部に発生するスラグや酸化皮膜､或いは溶接ヒュームの付着により、化成皮膜が形成されず、電着塗装皮膜の欠陥が発生し易いためである。また、腐食原因のうち、溶接スラグによる塗膜欠陥が錆発生の主要因であることが分かっている[(3)]。

鋼板のアーク溶接では、一般にシールドガス中にCO_2などの活性ガスを含有させているが、このCO_2がアーク中で解離反応を起こし、解離した酸素と溶接ワイヤおよび鋼板中のSi、Mn、Tiなどの元素が反応することで、酸化物(スラグ)が形成される。溶接部の耐食性を向上させるには、このスラグ低減に取組む必要がある[(4)]。

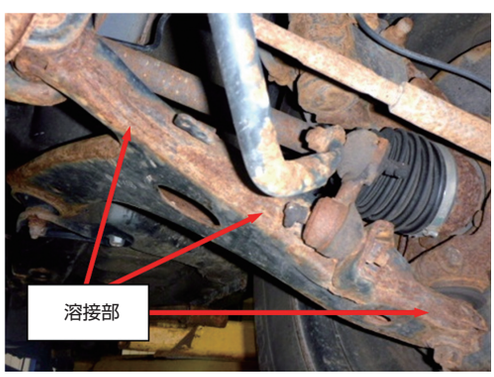


図１　Examples of the corrosion of chassis parts in the deicing salt usage area

一方、シャシ部品に要求される重要特性の一つとして溶接継手の疲労特性がある。溶接ビード止端部の応力集中が問題となり、材料を高強度化しても疲労特性

＊1 材料研究部
＊2 JFEスチール(株) スチール研究所
＊3 JFEテクノリサーチ(株)
＊4 東亜工業(株)

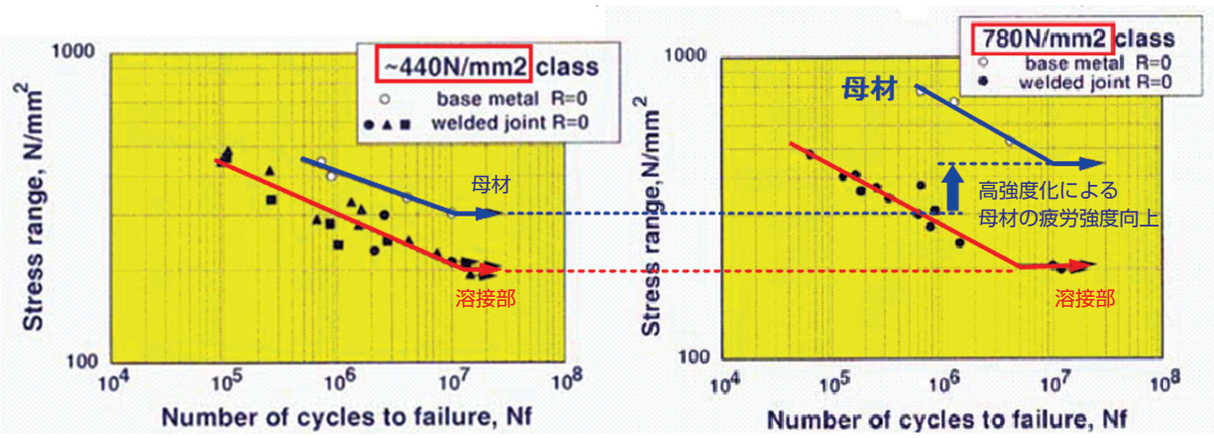


図２　Fatigue properties of fillet welded lap joints of high strength steel sheets [1]

の改善は図れず（図2）[1]、軽量化の阻害要因になっており、応力集中の緩和にも取組む必要がある。

そこで、耐食性向上のため、溶接スラグ低減に取り組むと共に、溶接ビード止端部の応力集中緩和を検討した。

2.　錆発生のメカニズムとスラグ低減溶接工法の検討

2.1　錆発生メカニズム

塩害地域の車両の錆は溶接ビードの止端部に発生し、その後、溶接ビード上を進展した後、一般部へと進展している（図3）。溶接ビードの止端部に錆が発生するのは、止端部に発生したスラグが化成皮膜の生成を妨げて塗膜欠陥となるからであり、塗膜欠陥を起点に塗膜下腐食が進行し、さらには止端部近傍の塗膜剥離部で穴あき腐食が進行する[5]。

図３　Examples of the initial corrosion and corrosion progress of the chassis parts in the deicing salt usage area

2.2　スラグ低減溶接工法の検討

スラグは、溶接ワイヤおよび鋼板中のMnやSiが溶接アーク中の酸素と結合し生じた酸化物であるため、スラグが発生する1つの要因であるシールドガス中のCO_2などの活性ガス低減は、スラグ抑制に効果があると考えられる。

また、シールドガス中の低CO_2化で溶接アークが広がり、溶接ビードの止端部平滑化に伴う応力集中緩和による疲労特性向上も期待されるため、シールドガス中のCO_2含有比率の低減に取り組んだ。

2.2.1　テストピースでの溶接スラグ発生状態の評価

シールドガス中のCO_2含有比率を種々変更し、溶接ビード上に発生するスラグ量を評価した。溶接試験は図4に示す重ね隅肉溶接試験片を用いた。

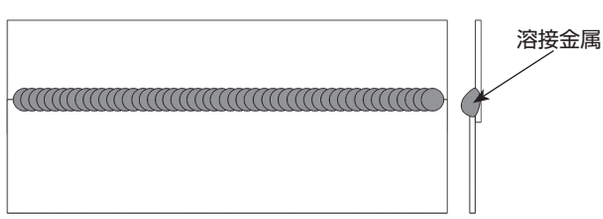


図４　Schematic of weld joint test specimen

シールドガス中のCO_2濃度とスラグ発生量の関係を図5および図6に示す。エルナックス（Ar＋2～3%O_2）＋20%CO_2、或いは純Ar＋20%CO_2をシールドガスとした溶接の場合と比較し、CO_2濃度を低減した溶接ではスラグ発生量が低減する傾向にあることが分った。

2.2.2　シャシ実部品での溶接スラグ発生状態の評価

次に、シャシ実部品を用い同様の評価を行った結果を図7に示す。テストピースの場合と同様に、シールドガスの低CO_2化によりスラグ発生量が低減することが示された。

以上のように、低CO_2シールドガスはスラグ低減に対する寄与度が高い結果を得たことから、次章ではシャシ部品の溶接部耐食性を腐食試験により効果を確認した。

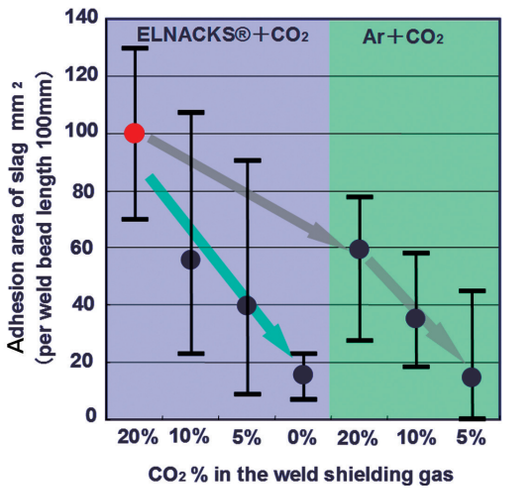


図５　Effect of CO_2 content in shielding gas on adhesion area of slag in weld bead

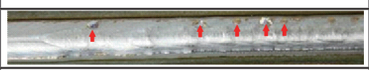
シールドガス成分	溶接ビード外観 ↑スラグ発生箇所	スラグ面積 mm²
エルナックス＋20% CO_2		67～130
エルナックス 100%		7～23
純 Ar ＋10% CO_2		18～58
純 Ar ＋5% CO_2		0～45

図６　Schematic of the slag in each CO_2% shielding gas

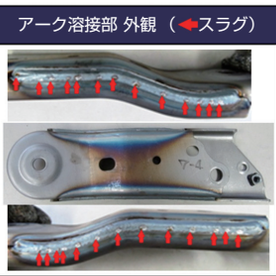
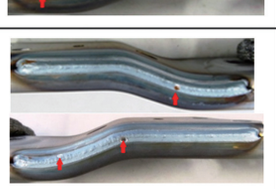
ガス成分	アーク溶接部 外観（←スラグ）	スラグ面積
エルナックス＋20% CO_2		239～259 mm²
エルナックス 100%		52～56 mm²
純 Ar ＋10% CO_2		22～26 mm²

図７　Comparison of the adhesion area of slag of the chassis part in arc welding with various shielding gases

3.　シャシ部品による耐食性向上効果の検討

3.1　シャシ部品の腐食試験方法

溶接したシャシ部品に電着塗装を施し、複合サイクル試験(CCT)によって耐食性を評価した。CCTの条件は、塩水噴霧、乾燥、湿潤のサイクルを1サイクル8時間で繰り返し、300サイクルまで実施した。

3.2　溶接部耐食性に及ぼすシールドガス低CO_2化の影響

2章で用いたシャシ部品を用いて腐食試験を実施した。試験後の外観を図８に示す。エルナックス＋20%CO_2シールドガスでは溶接ビード部全体に錆が発生し侵食しているのに対し、低CO_2シールドガスではスラグが発生したいくつかの箇所のみに錆が発生し侵食する結果であった。

また、腐食試験後のシールドガスと侵食量の関係を図９に示す。低CO_2シールドガスでは、錆侵食量はおよそ1/4以下に減少し、実部品でも大幅な耐食性改善効果が得られることが分った。

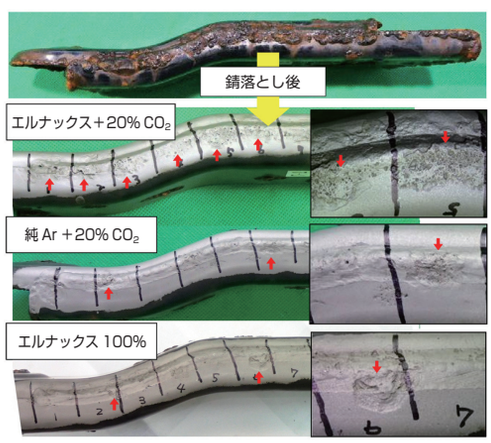


図８　Appearance of weld joints in chassis parts after the corrosion test

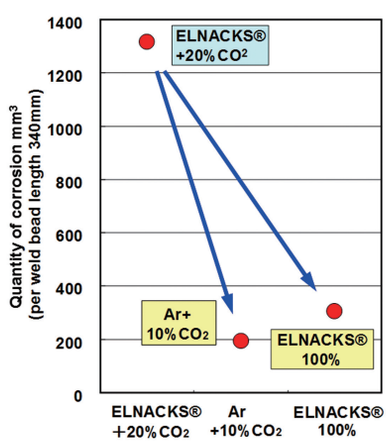


図９　Effect of the kind of shielding gas for arc welding on corrosion depth after the corrosion test

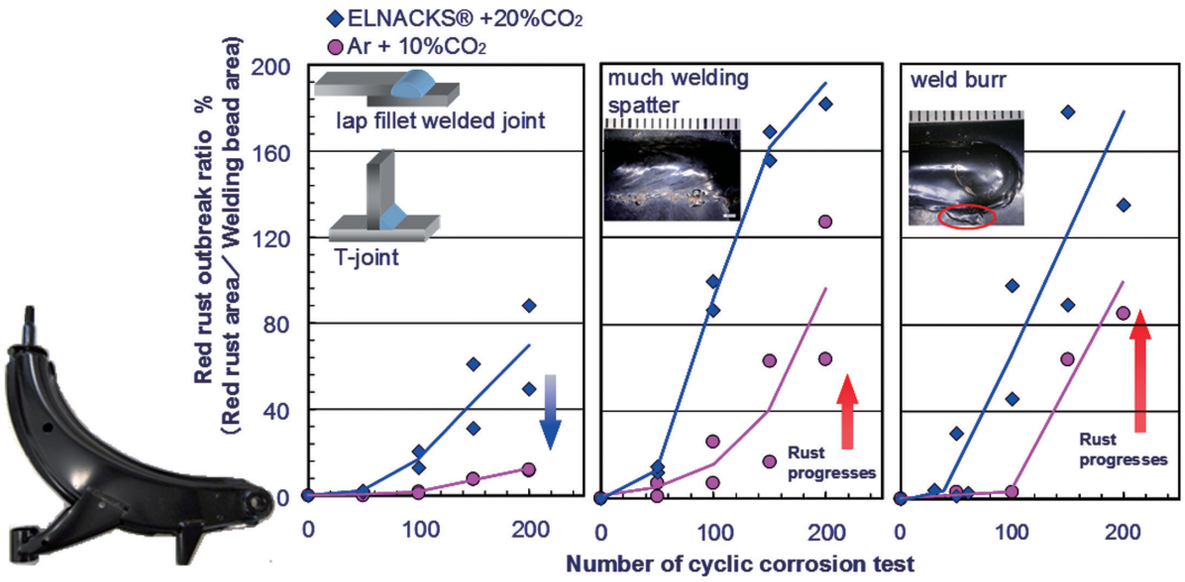


図 10　Result of corrosion area of the front suspension arm after corrosion test

3.3　溶接部耐食性に及ぼす溶接条件の影響

前節で評価したシャシ部品は、溶接長が短く、溶接姿勢や電流、電圧などの溶接条件がほぼ一定であったことから、さらに溶接長が長く、溶接条件が様々に変化する溶接施工難易度の高い部品において評価を行った。

腐食試験の結果を図10に示す。一般的な重ね隅肉継手やT字継手部では、エルナックス+20%CO_2シールドガスの場合と比較し、低CO_2シールドガスの錆発生面積はおよそ1/7に減少しており、前節で評価した部品と同様に、良好な耐食性改善効果が得られることが分った。

一方、溶接スパッタが多く発生している部位や溶接バリが発生している部位では、溶接スパッタやバリからの錆が多く発生し、スラグ低減の効果が十分得られない箇所があった。このため、実溶接施工においては、スパッタやバリを極力抑える溶接機器の使用や溶接条件を設定する必要があるといえる。

4.　シールドガス低CO_2化による疲労特性向上効果の確認

冒頭でも述べたとおり、シールドガスの低CO_2化は、溶接ビード形状を平滑化し、疲労強度改善の効果があると考えられる。そこで、低CO_2シールドガスを用いた溶接継手を作製し、溶接ビード止端部形状と疲労強度を評価した。

なお、疲労強度は腐食試験後の継手においても評価した。

4.1　接継手の疲労試験方法

供試鋼板としてシャシ部品に一般に用いられる板厚2.3 mmの引張強さ400 MPaの普通鋼を、溶接ワイヤはJIS YGW-16に相当するワイヤを使用した。溶接継手の疲労試験は、図11に示す疲労試験片形状にて、周波数20 Hzの平面曲げ片振り条件で行なった。

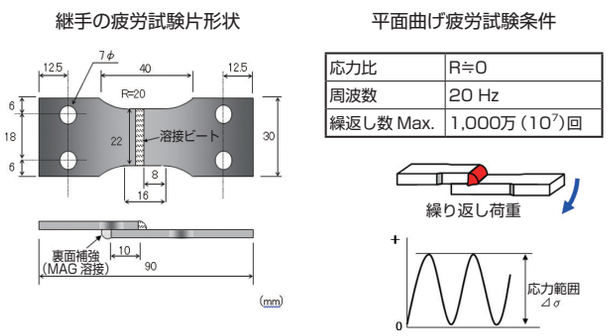


図 11　Schematic of weld joint specimen and fatigue test condition

4.2　溶接継手の疲労特性

エルナックス+20%CO_2シールドガスと低CO_2シールドガスで溶接した継手のマクロ断面組織とフランク角を図12に示す。

低CO_2シールドガス溶接の方が、フランク角が大きい平滑なビード形状となっており、良好であった。

疲労試験の結果を図13に示す。疲労強度は繰返し数10の7乗回での疲労限とした。

低CO_2シールドガス溶接の疲労強度は、エルナックス+20%CO_2シールドガス溶接の250 MPaに対し、約1.1倍の270 ～ 280 MPaとなり、疲労強度の改善効果が認められた。

4.3　腐食試験後溶接継手の疲労特性

続いて、腐食試験後の疲労強度を評価した。腐食試験片形状と試験条件を図14に示す。

CCT300サイクルまでの腐食試験の後、図11に示した試験片、試験条件で疲労試験を行った結果を図15に示す。

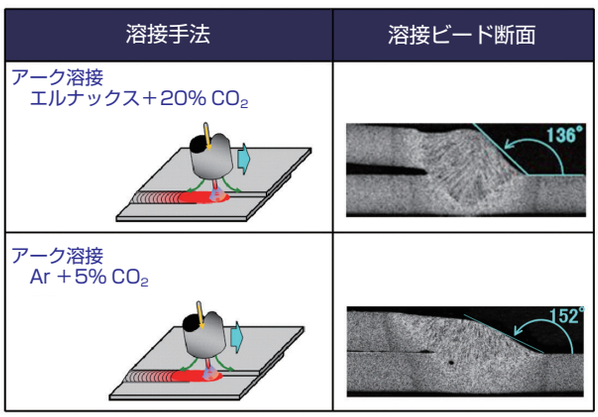


図 12　Macrostructure in cross section of weld joints

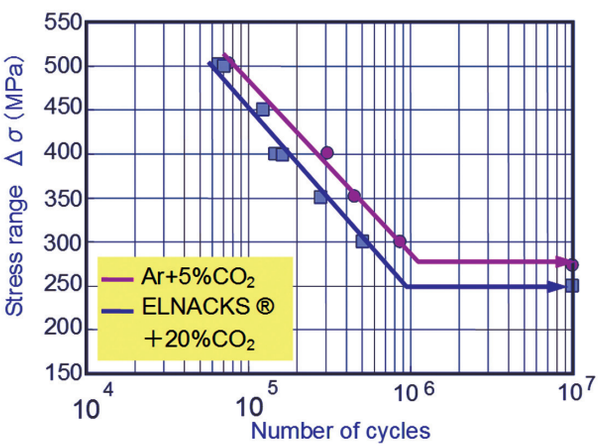


図 13　Result of fatigue test of arc welded joints

低CO_2シールドガスでは、エルナックス＋20%CO_2シールドガスの場合と比較すると、CCT300サイクルの腐食試験後の疲労強度が大幅に改善されることが分った。

破断後の疲労試験片の外観および断面マクロを図16に示す。低CO_2シールドガスでは腐食による板厚減少が少なくなっており、この結果、腐食試験後も良好な疲労強度を示したものと考えられる。

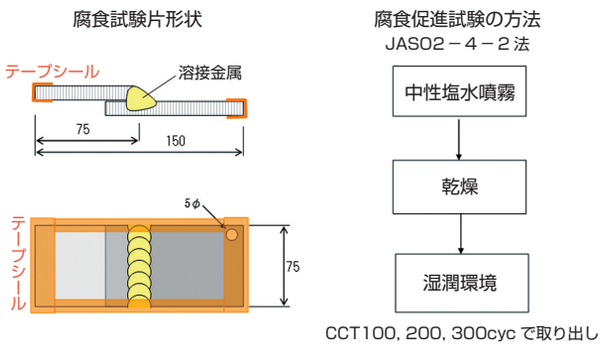


図 14　Method of corrosion test

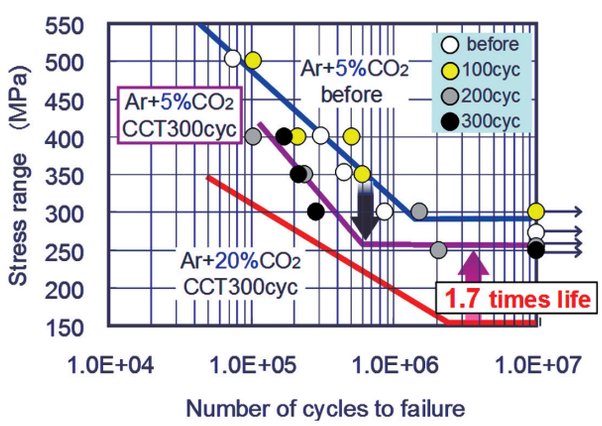


図 15　Result of fatigue test after corrosion test

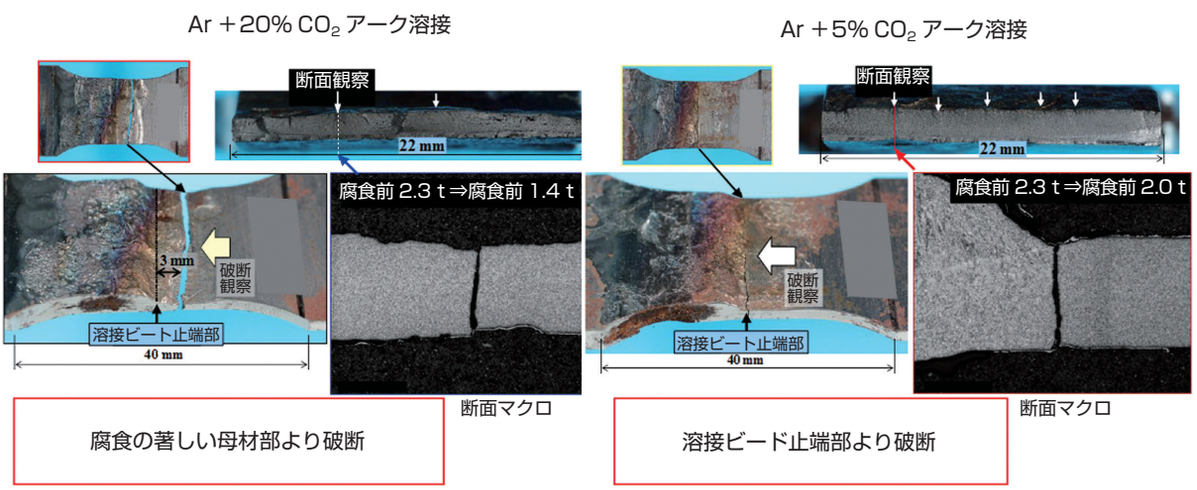


図 16　Macrostructures in cross section of weld joints specimen after corrosion test

5. まとめ

・低CO_2シールドガスの採用により、耐食性の改善効果が認められた。
・低CO_2シールドガス溶接は溶接ビード形状の平滑化と良好な耐食性の効果により、疲労強度が改善された。

参考文献

(1) A. Yoshitake, M. Kinoshita, K. Osawa, K. Ogawa, H. Nakagawa and M. Kabasawa： "Fatigue properties of fillet welded lap joints of high strength steel sheets for automobiles", SAE Technical Paper Series 940249 (1994).
(2) 中澤嗣夫, 小池正俊, 小暮　崇：「シャシ部品の耐食性＆疲労強度向上溶接手法の研究開発」, スバル技報Vol.41 2014.p131-137
(3) 高橋通泰 , 内原正人, 迫田章人, 植木光彦, 新里文明：「アーク溶接部の塗装後耐食性－第1報：溶接部腐食挙動の解明」, 自動車技術会論文集 Vol.28,No.2,April 1997.p143-148
(4) 池上祐一, 中田実雄, 中原雄治, 宮内秀樹, 内原正人：「ガスシールドメタルアーク溶接用シールドガス”エルナックス”について」, 第145回溶接アーク物理研究委員会 2008改訂
(5) 山本俊祐、鈴木幸子, 安藤　聡, 池田倫正, 片岡時彦, 上田　聡, 中澤嗣夫　溶接学会予稿集No.336, p304-305,（2015）

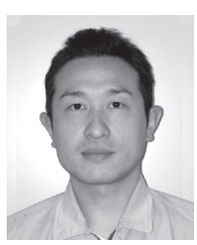
【著　者】

中澤　嗣夫

上田　　聡

池田　倫正

片岡　時彦


鈴木　康剛

藍原　梨恵

周東　　孝

狩野 佐登視

アルミの剥離改善による鉄・アルミ共用プレス機の生産性向上

Productivity Improvement in Common Press Machine between Steel and Aluminum based on Fissility Reduction of Aluminum Sheets

岩永　元*　茂木　寛*　山田龍也*　吉田　猛*
Hajime IWANAGA　Hiroshi MOTEGI　Tatsuya YAMADA　Takeshi YOSHIDA

抄　録

鉄･アルミ共用プレス機の生産性向上の紹介。昨今、車両軽量化に伴いアルミ材のプレス部品が多用されている。アルミ材は非磁性体であることから従来のマグネット式の剥離ができずエアーによる剥離が主流である。アルミ部品生産において洗浄油で材料同士が固着し2枚取りとなりライン停止が多発し、生産性低下の主要因となっていた。

今回、アルミ材の端部(板コバ)をつぶす事でエアーの供給を促進する対策により生産性向上を実現した。

Abstract

This paper introduces productivity improvement of steel and aluminum press machines. Recently parts made of aluminum are frequently used for vehicles to reduce weight. We cannot use magnetic separation for aluminum production and we mostly use air blow. However, the double blanking of washer oil adhesion causes production line stop. Hence, we improved productivity by taking measures to promote air supply by smashing the edges of aluminum materials.

1. まえがき

本稿は2013年に当社本工場に導入した、鉄・アルミ共用プレス機の生産性改善の紹介である。

当社矢島工場では2002年に鉄・アルミ共用プレスを導入しているが、今回は新たな仕様を有する設備における改善事例である。

金属製のプレス部品を造るためには、材料をコイルの状態から必要サイズに切断し重ねた後、さらに1枚ずつ剥がし、プレス金型に投入する必要がある。

軽量化を目的として多用され始めたアルミ材は、非磁性体であることから旧来方式のマグネット剥離が不可能であり、マグネットの代替としてエアー圧による剥離を行っている。しかし、本方式では、洗浄油による材料同士の固着を確実に剥離させることが出来ず、材料2枚取りによるライン停止が多発していた。

今回、ブランキング工程にて板の端部(板コバ)をつぶす機構を設けてエアーの供給を促進するという対策を行った。これによりアルミ部品の生産性を大きく向上させることが可能となった。

2. 従来技術

2.1　従来の剥離方法

自動化された高速プレスラインにおいて、シート材を正確に1枚ずつ剥がしプレス型へ投入する事は、プレス金型の破損に繋がる2枚打ちを防止する上で非常に重要である。自動車のプレス部品は、旧来より鉄が主流であったため、鉄のシート材を1枚ずつ剥がすために磁力を用いたマグネットフローターという剥離装置を用いることが業界の常識であった。しかし、非磁性体のアルミ材を剥離するには磁力を利用できず、安価な工場エアーの圧力に頼りつつ、既知の方法や現場改善により剥離を行っていた(図1)。

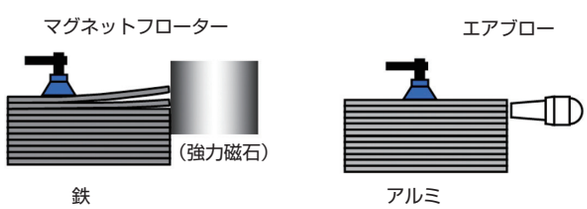


図1　剥離方式

＊ 第1生産技術部

なお、プレス機にはシート材が重なったままプレス機に投入されない様に、2枚取り防止センサーによりプレス機を停止させる装置が設定されている。

2.2　既存の同等プレス機（矢島工場）との差異

既導入の矢島工場での鉄アルミ共用プレス機は2枚取り防止の対策がほぼ完了している（図2）。

図２　既存のエアブロー方式

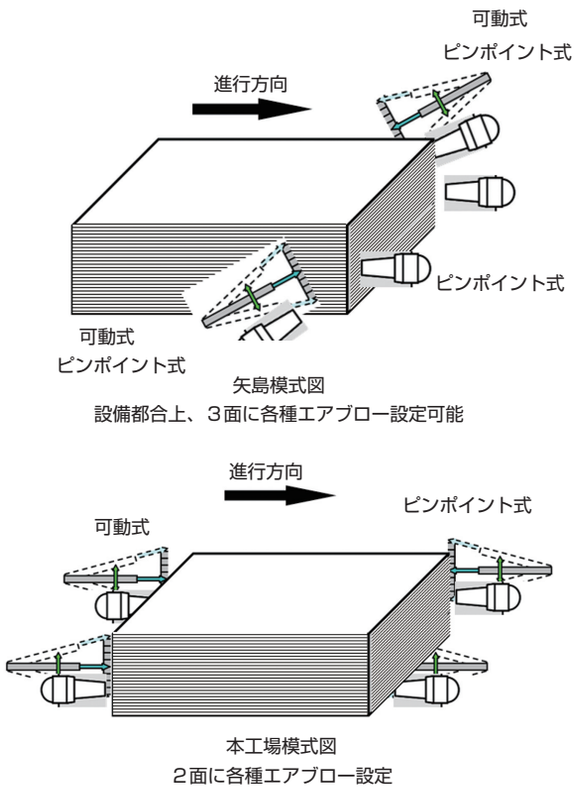


図３　矢島と本工場のレイアウト差

振り子の様に動きながらエアーを材料コバに吹き付ける方法で、人がエアーを吹き付ける動きを再現している。

この方法に至るまでに、下記の3つの方法を検証した。

①材料端をヤスリで引掛けるタイプ。ゴミが多発。

②エアーを均一に全体に吹き付けるタイプ。
流量が少なく効果少。

③太い管でピンポイントにエアーを浮き付けるタイプ。
材料の隙間は均一ではないため、隙間のまったくない場所に対し効果が出ない。

結果として、それぞれの利点を併せ持つ振り子式が最も効果的であると判断し、矢島工場の2枚取り防止対策として定着していた。

本工場プレス機も同じく振り子式を取り入れたが、矢島工場同等の効果を発揮することが出来なかった。これは、本工場のプレス機はロボット搬送式、矢島工場はバキューム装置式という設備仕様差に起因するものである。ロボット搬送方式は、近年の産業用ロボットの機能の発達により、旧来のバキューム装置式よりも安価な方式である。さらに世の中はロボット搬送で高速生産を実現しているため、安価な設備でかつアルミの高速生産を実現させる必要があった。

本設備仕様は、図3に示すようにエアブロー設定可能な面に制約が発生することにより、本工場は矢島に対し不利な状況であった（矢島３面、本工場２面）。

2.3　他社状況（洗浄油差）

他社や当社の米国工場においては、この2枚取りの不具合はほとんど問題になっておらず、その大きな要因は洗浄油の種類の差が大きいと考えられている。

しかし、洗浄油の交換は2000㍑を超える油をトライ用に変更する上、トライ後、元に戻さなければならない事。さらに全車種における脱脂性の再評価が必要。また、消防法との合致が必須と非常にハードルが高いため、安価かつ安易な改善案を求めていた。

3.　現状の分析

取組み前の生産性阻害要因は図4のとおり、2枚取りがその主因を占めている事は明らかだった。

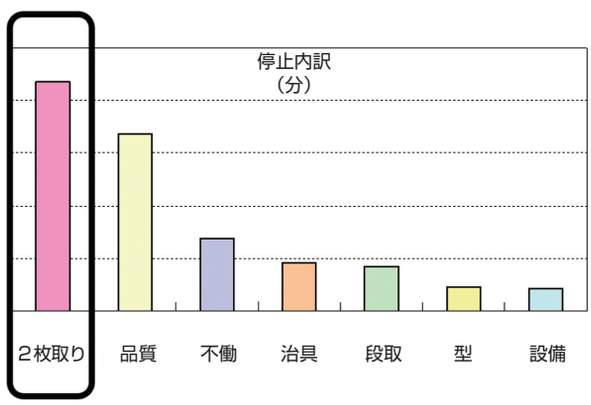


図４　阻害要因

4. 板コバ潰し

今回の発想は大変シンプルであり、エアブローの効率をさらに上げる方法が無いか模索したものである。既存のエアブロー方式は、図5の様に板と板の間の凹みに向けてエアーを吹き付けその圧力で板と板の間をこじ開けて、空気の層を造り剥離に繋げている。つまり、板と板の隙間に空気が入り込む余地がある。

この断面を変え、空気を取り込み易くすれば良いと考え、図6の様に板コバ(板の端)を潰しエアーを捉え易くすることでエアブローの効率を上げる方策を講じた。

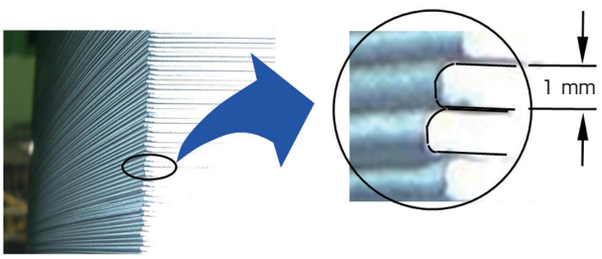


図5　通常のシート材の積載状況(断面)

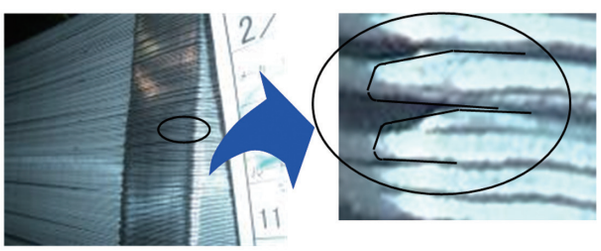


図6　板コバ潰し後(矢視)

4.1 型構造

今回の取組みは、板の端面(板コバ)を部分的に潰す(圧造する)手法を取り入れたものである[(2)(3)]。

本案を汎用のブランキング型への改修工事を行う事で実施した(図7)。

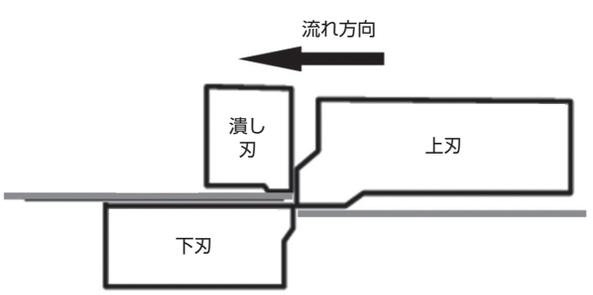


図7　板コバ潰し部の型の断面図

4.2 実機トライと課題

板を潰すという事は、残りの板は板コバからはみ出してしまう。この“はみ出し”は突起と同じであり、外部から力が加わると応力が集中し破損し易い。破損するとゴミとなりプレス金型内に侵入し、ピンプルディボットという製品が凸凹になる不良品を造り出す。従って、はみ出し方を上手くコントロールし容易に破損しない様にし、さらに金型や設備に触らない位置を選んで板コバ潰しを設定する必要がある。

例えば図8の様にマグネットフローターの位置を避けて板コバ潰しの位置を設定する。図9は一つの潰し刃のイメージ図である。

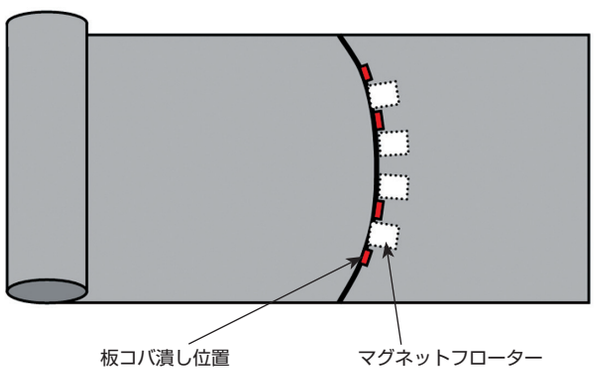


図8　板コバ潰し設定位置

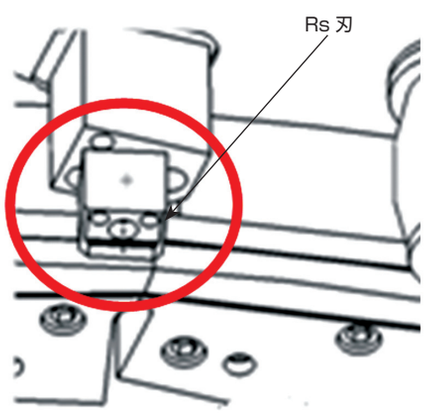


図9　上型イメージ

4.3 効果と考察

対策後、2枚取りによるライン停止は、ほぼ0分/月に激減しSPH[*1]向上に大きく寄与した(図10)。

今回は大きな改善効果を得ることが出来たが、本来であれば、ロボット搬送方式にした事によるアルミ生産性への弊害をライン導入前からもっと“しつこく“検討するべきであった。生産技術部門における事前検討の重要性を改めて認識し、今後への反省としたい。

＊1 SPH : Stamping Per Hour

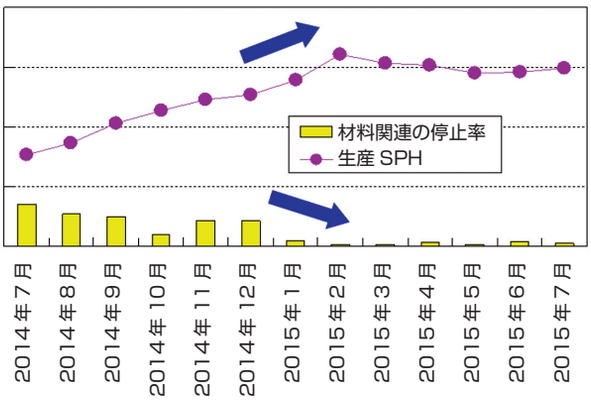


図 10　板コバ潰し実施前後の生産性変化

5.　謝辞

本件を実施する2014年までに1年強の間、本件の実行に携わった方々にはこの場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

(1) 茂木寛：新プレスラインの生産性向上について，薄板研究会報告資料，(2014)
(2) 富士重工業株式会社：板材及び板材の製造方法：特開188537号(2014)
(3) 富士重工業株式会社：ロール材の製造方法：特開188538号(2014)
(4) 吉田猛：汎用BK型アルミ剥離性改善工事，工事依頼No.3A 4GK06 (2014)

【著　者】

岩永　　元

茂木　　寛

山田　龍也

吉田　　猛

宇宙航空研究開発機構 D-SEND#2 システムの開発

Development of JAXA D-SEND#2 System

山　﨑　哲　夫*1　Tetsuo YAMAZAKI
奈良橋　俊　之*2　Toshiyuki NARAHASHI
佐々木　　豊*2　Yutaka SASAKI

抄　録

超音速旅客機を実用化するためには、超音速飛行の際に地上に騒音となって届くソニックブームと呼ばれる衝撃波を低減することが課題となっている。この課題に対して、宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、超音速飛行時のソニックブームを低減するための機体形状設計技術を発案し、これを適用した飛行実験機であるD-SEND#2システムを開発して飛行実証を試みた。2015年7月24日に本システムを使用した超音速での飛行実験がスウェーデンにおいて実施され、低減されたソニックブームのデータが取得でき、飛行実証が成功した。本システムの開発は当社が担当し、2010年8月に開始、設計・製造・機能確認試験を実施した上で、2013年5月にJAXAに納入した。本システムは、飛行実験機(無人機)と、飛行実験機の状況モニタ及び整備のための地上システムから構成されており、これらの開発の概要について報告する

Abstract

There is a problem that sonic boom occurs while a supersonic transport flies at supersonic speed. For solving this, JAXA developed D-SEND#2 system, applied it to non-axisymmetric low-boom design concept and planned a flight test. On 24th of July 2015, JAXA successfully completed the supersonic flight test. FHI designed and manufactured the D-SEND#2 system from August 2010 to May 2013. This system consisted of two unmanned air vehicles, a ground monitoring system, and ground support equipment. This paper reports the outline of the development.

1. まえがき

超音速旅客機が超音速飛行をする際には地上にソニックブームと呼ばれる衝撃波が騒音となって届く。このために超音速旅客機コンコルドは、陸上での超音速飛行が許されず、海上のみとなっていた。次世代の超音速旅客機の実用化には陸上での超音速飛行が必要であり、ソニックブームを低減するという課題を克服することが必須となっている。

これに対して、JAXAは、ソニックブームを低減するための機体形状を設計する技術を検討し、これを適用した機体での飛行実証を行う低ソニックブーム設計概念実証(D-SEND)プロジェクトを計画した。

D-SENDプロジェクトはD-SEND#1及びD-SEND#2から構成されているが、このうちD-SEND#2システムの開発は当社が担当した。当社では2010年8月から設計をスタートし、製造と機能確認試験を実施して2013年5月に納入した。その後、JAXAによるスウェーデンでの飛行実験を支援した。本プロジェクトの概要や飛行実験の経緯等は参考文献[1][2]を参照されたい。

本報では当社が開発を担当したD-SEND#2システムについて解説する。

＊1 航空宇宙カンパニー　研究部
＊2 航空宇宙カンパニー　航空機設計部

2.　D-SEND#2システムの概要

2.1　飛行実験の概要

D-SEND#2の飛行実験概要を図1に示す。実験機は大型の成層圏気球によって、高度約30 kmまで上昇し、係留気球とマイクロフォン等で構成されたブーム計測システム（BMS）に対して所定の距離に達したところで、分離される。実験機は自由落下で超音速に加速し、BMS上空まで滑空し、飛行状態の制御により、BMS上空でマッハ1.3、揚力係数CL = 0.12かつ所定の経路角でダイブ飛行させ、機体形状の設計条件でのソニックブームを計測する。

飛行実験は、スウェーデン宇宙公社（SSC）が成層圏気球を運用しているスウェーデン王国のエスレンジ実験場で実施した。

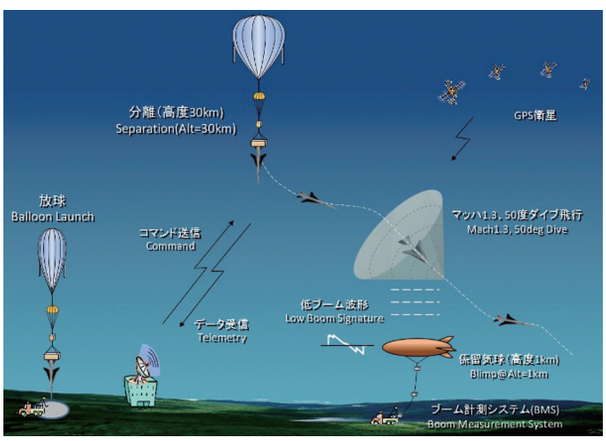
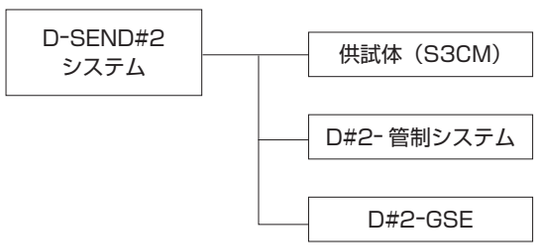


図1　D-SEND#2 飛行実験概要 [1]

2.2　D-SEND#2システムの構成

システムの構成を図2に示す。供試体（S3CM）が飛行実験機であり、D#2-管制システムは飛行実験中のS3CMの状態を監視するものである。D#2-GSEはS3CMを地上で点検・整備するための器材である。



GSE：Ground Support Equipment

図2　D-SEND#2 システムの構成 [2]

2.3　供試体（S3CM）の概要

D-SEND#2実験機である供試体（S3CM）の主要諸元を表1に示す。全長は気球の放球に用いるクレーンの長さから8 m以下であることが要求された。これを基準として、JAXAが想定している小型超音速旅客機の諸元を考慮しつつ、低ブーム設計コンセプトを適用して機体形状を設定した。実験機の三面図を図3に示す。

表1　D-SEND#2 実験機の主要諸元 [3]

項　目	諸　元
全　長	7.913 m
全　幅	3.510 m
主翼面積	4.891 m^2
平均空力翼弦長	1.912 m
質　量	1000 kg

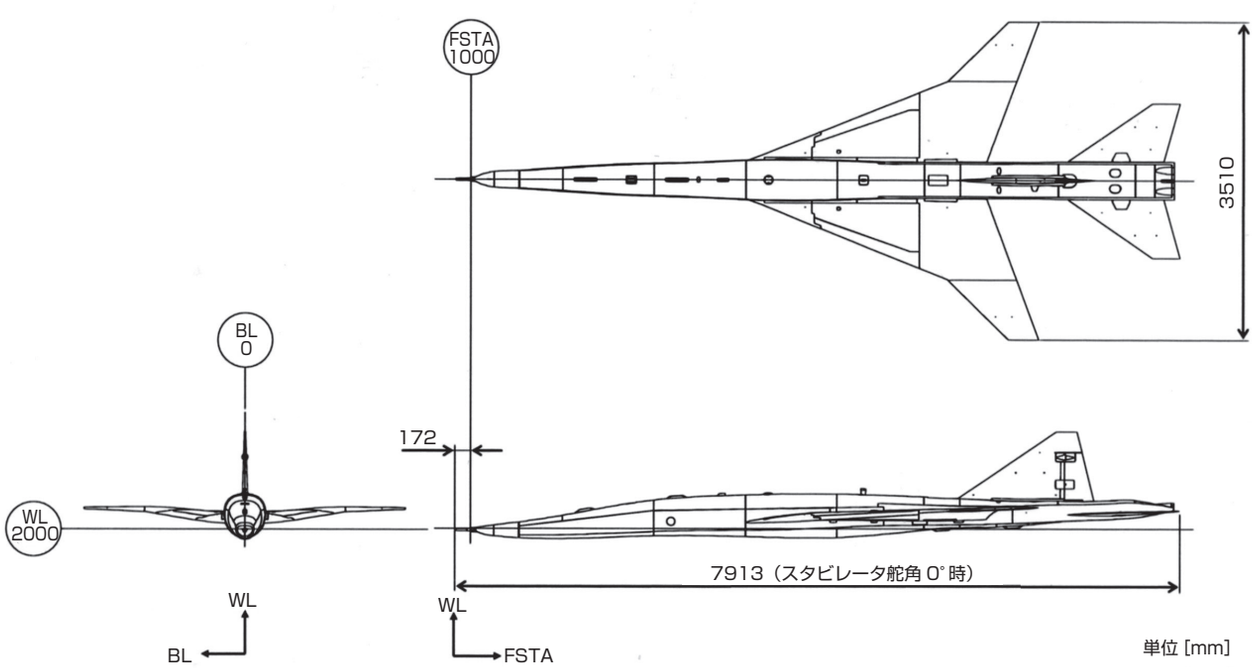


図3　D-SEND#2 実験機三面図 [3]

質量については、自由落下と滑空で所要の速度を得るためにある程度の重さが必要で、システム検討で得られた飛行諸元に対応した値が設定されている。

飛行を制御するための操縦舵面は、左右独立に動くスタビレータと、ラダーの3舵である。機体に搭載された飛行制御プログラムの指令で舵面を操作して、気球からの分離点からBMS上空まで、自律的に飛行する機能を有する。

2.4 関連システムとのインタフェース

D-SEND#2の全体システム構成は、参考文献[2]に述べられている。D-SEND#2システムとBMSの間にはインタフェースは無い。気球実験システムは気球システムと実験場システムから成るが、気球システムは実験機との間に、懸吊中の実験機に電源を供給するためや、実験機を分離するため等のインタフェースを有する。また、懸吊中に実験機が使用するGPSのアンテナと受信機は、気球のゴンドラ側に設置される。実験場システムは、機体と地上の通信アンテナ、送受信機を含んでいて、実験機や管制システムとのインタフェースを有する。

3. D-SEND#2機体システムの設計[3]

3.1 開発方針

実験機の設計に当たっては、開発済みの技術を活用してリスクを低減することを重視した。本プロジェクトの鍵となるソニックブーム低減を実現する機体外形形状設計[4]及びソニックブームを計測するための飛行方式・経路を決定する誘導制御則設計[5]はJAXAが担当し、その他を当社が担当した。装備スペースとコストの制約から、各装備品は基本的に1式のみの搭載とし、飛行安全に関係する装備品のみ冗長化することとした。実験機の装備品の配置を図4に示す。以下に各系統の設計概要を記載する。

3.2 機体構造

システム検討で得られた飛行経路では荷重倍数が最大で±3.5 Gとなる。突風や姿勢制御による変動を考慮して、機体の制限荷重倍数を±4.5 Gとした。質量に余裕があるため、構造材料はアルミニウム合金とした。

3.3 電源系統

実験機にはバッテリ（リチウムイオン2次電池）を搭載し、分離10分前から着地までの間、搭載機器を動作させる。気球に懸吊されている間は、気球のゴンドラに搭載されたバッテリから、機体後端のアンビリカルコネクタを経由して電源が供給される。

3.4 飛行制御系統

飛行制御のためのセンサとして、5孔ピトー管と処理装置であるエアデータセンサ（ADS）、GPSと慣性センサを複合した航法装置であるEGI（Embedded

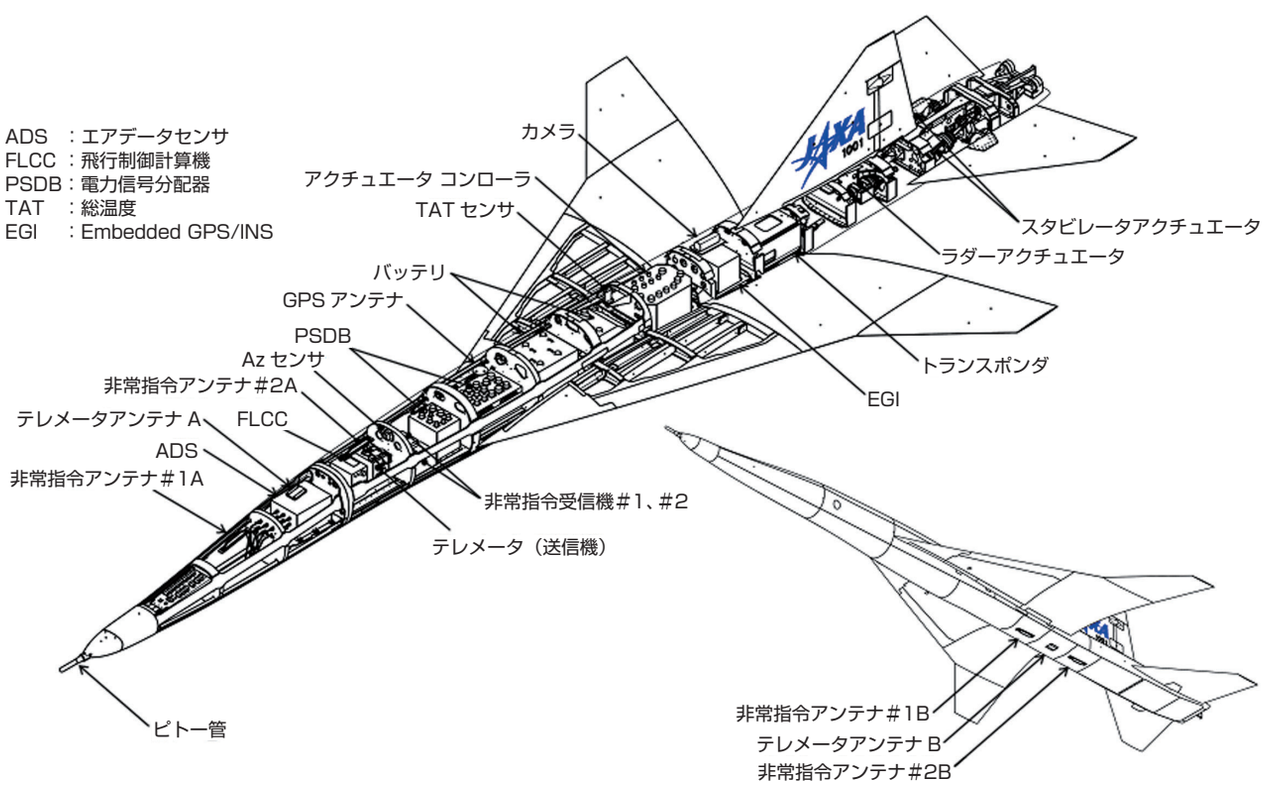


図4 装備品の配置[3]

GPS/INS)、機体上下方向の加速度を検知するAzセンサを装備した。EGIには高精度のリングレーザジャイロ(RLG)を使用し、JAXAが開発したGPS/INS複合航法ソフトウェアを搭載した。

センサのデータは飛行制御計算機(FLCC)に入力され、飛行制御プログラムによる誘導制御にしたがい、操舵指令を生成する。誘導制御則はPC上でのモンテカルロシミュレーションで性能を評価しながら設計を進めた。

3.5　操縦系統

3つの操縦舵面は、それぞれ電動アクチュエータで駆動する。作動角度は3舵とも±20 degである。アクチュエータは、既開発品をベースに、周辺機器を機体のスペースに適合するように改修したものである。

3.6　通信系統

飛行中の機体データをSバンドで送信するテレメータを搭載した。機体の姿勢に関わらず通信が成立するように、アンテナ2台を機体上下に配置し、送信信号を分配した。

3.7　非常系統

非常系統は、飛行安全のために、地上からのUHF帯の電波で指令を受けて飛行を中断させる機能を持たせた。飛行中断は、FLCCの制御をオーバーライドする形で舵面を一定舵角に動かして、機体をスピンに入れる方式である。非常指令受信機は2台搭載し、3つの舵面のうちいずれか一つが作動すればスピンに入るようにして、冗長性を確保した。非常指令の受信アンテナも機体の上下に装備し、2系統分で計4台を搭載した。

3.8　D#2-管制システム

D#2-管制システムは、実験機を運用するために地上に設置するシステムで、テレメータのデータを画面表示する監視システムと、非常指令を送信する非常システムで構成される。監視システムの使用状況を図5に示す。大型画面2台と4台のノートPCで実験機の状態を表示するシステムである。非常システムは、監視システムと同様の表示機能と指令スイッチ2式で構成される。テレメータの受信アンテナ及び受信機、非常指令の送信機及び送信アンテナはエスレンジ実験場の既存設備を用いた。

図5　D#2-管制システム（監視システム）[3]

4.　D-SEND#2システムの製造と試験

4.1　製造・試験項目

D-SEND#2システムに関して行った製造・試験作業は、以下のように分類できる。

(1) 設計データ取得のための試験
(2) 装備品製造、単体試験
(3) 機体製造、全機試験
(4) 現地試験

4.2　設計データ取得のための試験

低ブーム設計概念を適用した機体形状に対して、各系統の詳細設計に反映するデータを取得するために以下の試験を実施した。

(1) アンテナパターン試験

実験機のアンテナ配置を決定するために実施した。20%スケールの模型(図6)を製作し、電波暗室でアンテナパターンを計測した。

(2) ADS位置誤差補正データ取得風洞試験

ピトー管の位置誤差補正テーブルを作成するために、実機のピトー管を、前胴部の実寸模型に装着して、遷音速、超音速の風洞試験を実施した(図7)。

図6　アンテナパターン試験模型[3]

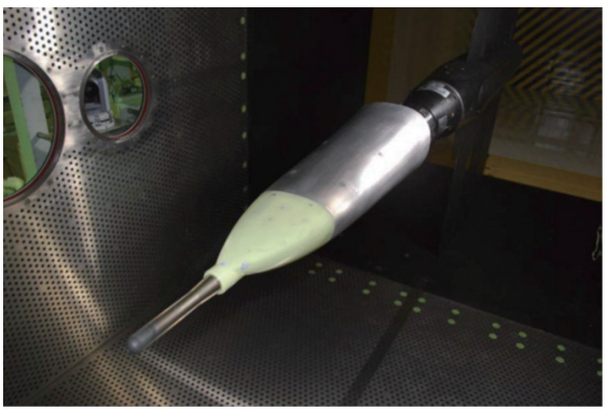


図7　ADS位置誤差補正データ取得風洞試験状況[3]

4.3　装備品製造、単体試験

新規開発または改修開発を行う装備品については、搭載品と同一設計の環境試験用の供試体を製造して、環境試験を行った。搭載品については、振動、温度、電圧ストレスを印加するバーンインを行った後、単体での機能性能試験を実施した。

4.4　機体製造、全機試験

機体は同一設計で2機製造し、設計で計画した性能を確認する設計確認と、製造図面通りに製造されたことを確認する製造確認を実施した。製造確認は2機とも実施する一方で、設計確認は2機で分担して並行実施することにより、開発期間の短縮を図った。機体製造から製造確認及び設計確認の流れを図8に示す。

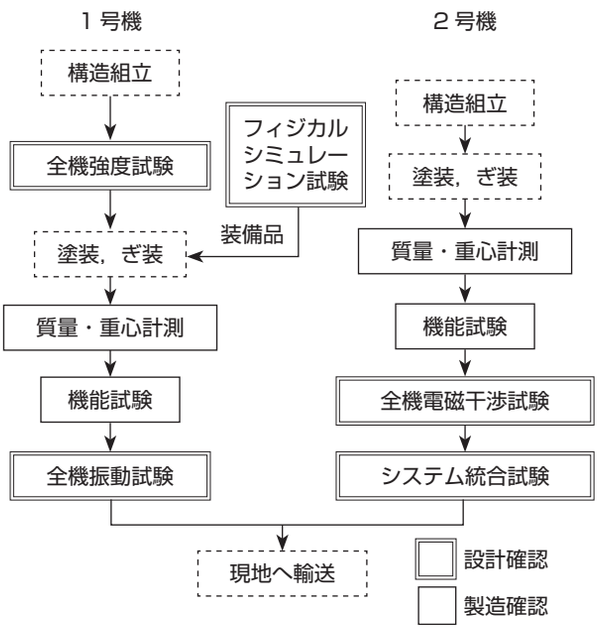


図 8　機体製造から製造確認及び設計確認の流れ [3]

4.5　現地試験

国内での検証を完了した実験機とD#2-管制システムを現地に輸送し、組立確認後、各系統の機能試験を実施して、輸送による破損がないことを確認した(図9)。BMSの位置はエスレンジ実験場の設置可否の確認を経て決定されたため、現地で誘導制御則のパラメータを更新して、フィジカルシミュレーションで誘導制御則の最終確認を行った。

D#2-管制システムは管制室への設置、接続を行った後、エスレンジ側の設備との連接確認を実施した。最後に、機体、D#2-管制システム、エスレンジ側設備を組み合わせた機能確認試験を行って、飛行実験の準備を完了した。

図 9　エスレンジ実験場での実験機点検状況 [3]

5.　飛行実験

飛行実験では、2015年7月24日に低減されたソニックブームのデータが取得でき、飛行実証が成功した。スウェーデンでの実験は2013年6月から始まったが、実証成功までの経緯に関しては参考文献[1][2]を参照されたい。この間、当社はシステム開発担当としてJAXAを緊密にサポートし、現地飛行実験でのD-SEND#2システムの準備・点検・運用を支援した。図10に放球直前の実験機を示す。

図 10　放球直前の D-SEND#2 実験機 [3]

6.　まとめ

D-SEND#2システムの開発は、JAXAの技術と当社が長年蓄積してきた無人機技術を活用して、短期間で開発を完了することができた。

ご指導いただいた宇宙航空研究開発機構(JAXA)、ご協力いただいた装備品・部品製造会社の方々に深く感謝致します。

参考文献

(1) 吉田憲司,本田雅久：D-SENDプロジェクトの全体概要,（特集）低ソニックブーム設計概念実証第2フェーズ飛行試験(D-SEND#2) 第1回,日本航空宇宙学会誌, 64（2016）, pp3-8.
(2) 川上浩樹,原田賢哉,本田雅久,Töyrä, M D-SEND#2試験計画,（特集）低ソニックブーム設計概念実証第2フェーズ飛行試験(D-SEND#2) 第2回,日本航空宇宙学会誌, 64（2016）, pp44-51.
(3) 冨田博史,本田雅久,佐々木豊,奈良橋俊之,山崎哲夫：D-SEND#2機体システムの開発,（特集）低ソニックブーム設計概念実証第2フェーズ飛行試験(D-SEND#2) 第3回,日本航空宇宙学会誌, 64（2016）
(4) 牧野好和：D-SENDプロジェクトにおける低ソニックブーム設計概念,（特集）第2回「低ソニックブーム設計概念実証(D-SEND)」プロジェクト, 日本航空宇宙学会誌, 60（2012）, pp.313-249
(5) 二宮哲次郎,鈴木広一,川口純一郎,冨田博史,佐藤維大,板橋直亮：D-SEND#2誘導制御系設計,（特集）低ソニックブーム設計概念実証第2フェーズ飛行試験(D-SEND#2) 第5回,日本航空宇宙学会誌, 64（2016）.

【著　者】

山﨑　哲夫

奈良橋 俊之

佐々木　豊

成長期（平成初期）のスバル紹介

フォレスター 2.0X（2007年～ 2012年）

全長×全幅×全高：4560 mm × 1780 mm × 1675 mm
ホイールベース：2615 mm
エンジン：水平対向４気筒 DOHC 1994 cc
最高出力：109 kw（148 ps）/6000 rpm
最大トルク：191 N－m（19.5 kg－m）/3200 rpm

前モデルよりも車高を高くし、よりSUVらしくなった。前モデルの後席居住性に関する要望から、ボディサイズが若干大きくなりながらも、リアオーバーハングを抑え込んでいる。よりSUVスタイルへの転換は、主要マーケットの北米で高い評価を受けた。 シャシーはインプレッサと同様、SI-シャシー（Subaru Intelligent Chassis)、リアサスペンションはダブルウィッシュボーン式となった。

中央翼自走式自動穿孔機の開発

Development of Self-Propelled Drilling Robot

内藤雅一[*1] Masakazu NAITO
早川智[*1] Satoshi HAYAKAWA
谷田圭司[*2] Keiji TANIDA
齊藤俊介[*1] Shunsuke SAITO

抄　録

本稿では、自走式自動穿孔機の開発についての報告をする。当社はボーイング777中央翼の製造をしている。組立の中の多くの工程は人の手による作業であり、自動化された工程はごく一部である。組立工程の生産性を向上するために、当社は各製造工程を調査し、特定の穿孔工程について自動化することに至った。

Abstract

This paper reports the development of self-propelled drilling robot. Fuji Heavy Industries (FHI) is manufacturing the Boeing 777 Center Wing Section. There are lots of manual operations and only a small portion of its manufacturing is automated at the assembly. In order to productively improve the assembly operation, FHI investigated each process step and decided to automate a specific limited area in drilling.

1. まえがき

当社ではB777中央翼を製造し、主脚格納室との結合作業を行い米国ボーイング 社へ納入している。図1に当社が製造している中央翼の鳥瞰図を示す。

B777中央翼は図1に示す様に複雑な構造であるため、大がかりな機械設備による自動化工程の適用は一部に限られており、手作業に頼っている。

手作業による工程の中でも、特に、Seat Track CrownとOver Wing Beamの穿孔作業は長時間の中腰姿勢のため、作業者の負担が大きい。

本研究では、作業者の負担軽減と工数低減を図るためにSeat Track CrownとOver Wing Beamの穿孔の自動化に取り組んだ。

本稿では、前記の自動化を目的とした自走式自動穿孔機の開発概要について述べる。

＊1 航空宇宙カンパニー　生産技術部
＊2 航空宇宙カンパニー　製造部

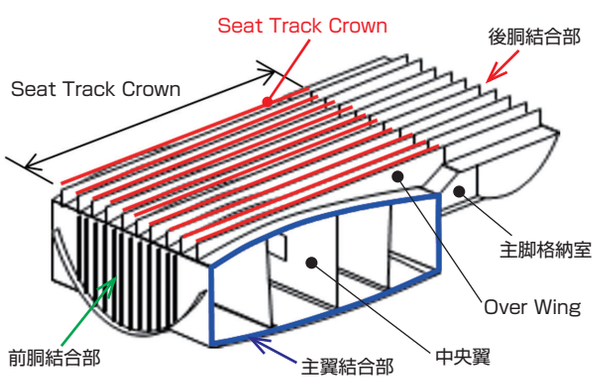


図1　中央翼 鳥瞰図

2. 機体構造概要と適用部位

2.1　機体構造概要

最初に当社の製造担当部位の一部である中央翼の特徴について述べる。

中央翼とは、図1に示す様に、左右の主翼と胴体を接合する部分、航空機の中心にあり客室の真下の構造部材である。

次にSeat Track Crownとは、客室の座席を固定するための部品で中央翼の上部に取付く部品である。Over Wing BeamとはSeat Track Crownを結合する

ための支柱で客室の床板を支える構造部品である。

2.2　適用部位と穿孔方法詳細

適用部位は前述の通り、Seat Track CrownとOver Wing Beamの結合孔とした。拡大図を**図2**に、断面図を**図3**に示す。

Seat Track Crown は部品段階で本孔径で加工されており、その本孔をガイドにしてOver Wing Beamを穿孔する。

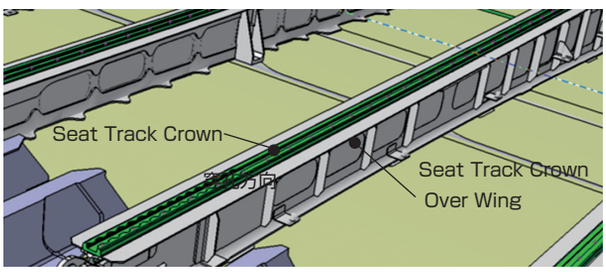


図２　適用部位拡大図

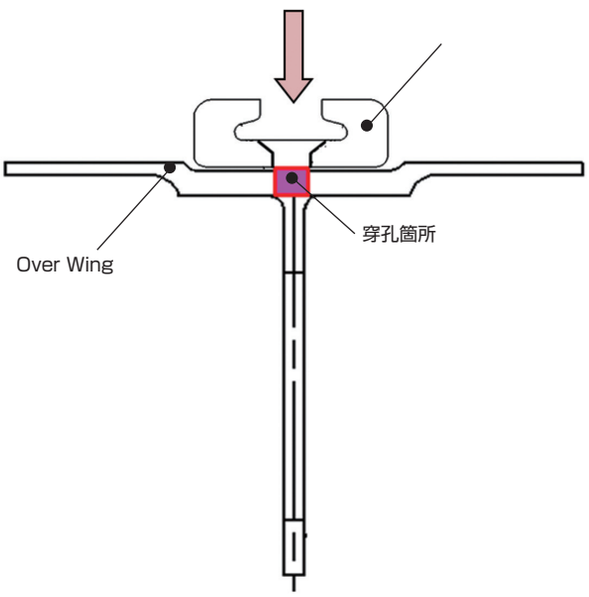


図３　適用箇所の断面図

3.　現行の手作業による穿孔方法

一機当たり420箇所の穿孔を**図4**に示す様に穿孔台（ドリルガイド）、位置決めピンとエアードリルを用いて一本一本穿孔する。

現行の穿孔フローは**図5**の通り、まず初めに穿孔台のセット、位置決めピンを使用してSeat Track Crown にあいている本孔と穿孔台の関係について位置を決める。次に、穿孔中に穿孔台が動かないように固定する。固定方法は穿孔板に装備されているクランプ機構による固定。次に位置決めピンを取外し、穿孔台に装備されているドリルブッシュとSeat Track Crown にあいている本孔をガイドにして機体側（Over Wing Beam）に穿孔する。穿孔完了後、クランプを解放し次の孔に移動し穿孔台の位置決めから穿孔まで実施。これを繰り返す。

また、一本一本穿孔台の位置決めを行う理由はドリルガイドとするSeat Track Crownの孔ピッチが部品単品レベルでばらつきがあるからである。

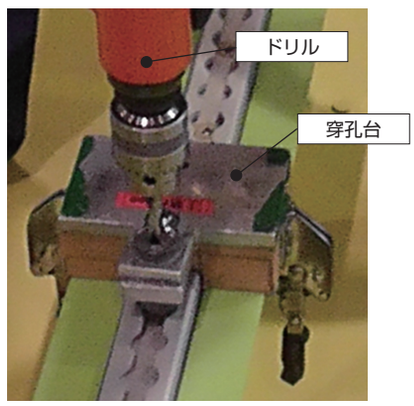


図４　現行の穿孔時の写真

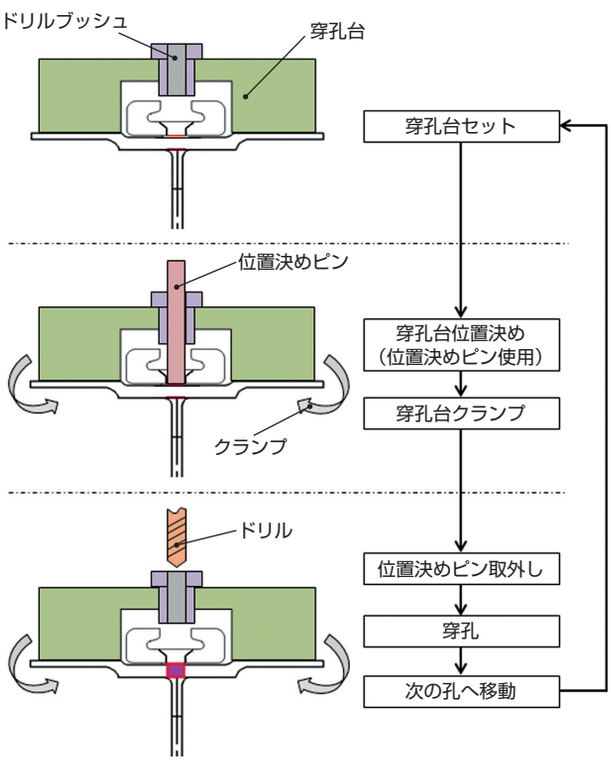


図５　現行の穿孔フロー

4.　自動化への技術的課題の抽出

前提として今回の研究で適用対象とした機体（B777中央翼）は穿孔機開発計画時点で月産レートが高く、長期にわたる組立治具改修は不可能である。従って、

組立治具フレームの改修が必要となるような大型のガントリータイプ等の穿孔機の適用は望ましくないと判断した。よって、コンパクトで組立治具改修を伴わない『自走式』タイプを採用することとした。

自動穿孔機を開発する上でまずは以下に示すように作業工程単位で技術的な課題を抽出した。

a. 穿孔機のセット
　→課題：穿孔機の軽量化
　（クレーン等の特別な設備を使用せずに簡単にセットが可能であること）
b. 穿孔機走行（加工孔への移動）
　→課題：操作性（エアー、ケーブルの取り回し）
c. 穿孔機の位置決め
　→課題：加工孔のスキャン、ドリル位置決め方法の確立
d. 穿孔
　→課題：小型、軽量、高速切削を目的としたスピンドルモータの開発

各課題に対する詳細な検討内容を次項目に示す。

4.1　穿孔機の軽量化コンセプトの確立

開発した自動穿孔機は前述で述べたとおり自走式であり脱着式としたが、装置の機体へのセットについては天井クレーンやその他の重量搬送装置を使用することは望ましくない。これは同じ工場内でのクレーンの取り合い、待ち時間が生じ、非効率的な時間が発生してしまうということと重量搬送装置等を採用した場合、その装置自体の準備、段取り時間を要してしまうからである。よって、少人数の人の手により短時間で容易に装置を機体へセットできるようにコンパクトで軽量な装置を追求することとした。

一般的に自動穿孔機と呼ばれるものは専用の走行レール等のガイドや保持治具を必要とする。当然走行レールをセットしてから穿孔機のセットを行うこととなるが今回ターゲットにした適用部位は穿孔範囲が広く走行レールもかなりの重量となり、セットするだけでも時間がかかってしまう。また、サイズの大きい走行レールは保管場所についても課題となる。従って、専用の走行レールを必要としない軽量、且つ自走式タイプの穿孔機とした。

4.2　穿孔機の操作性

穿孔装置は機体上を自走することに伴い、エアーホース及びケーブル類の並走が伴う。Seat Track Crown一列の穿孔で6.5 m近くの移動をするため、エアーホース、ケーブル類が長い。よって取り回しが非常に困難である。

また、穿孔機の走行エリアには穿孔対象以外の部品等の障害物が存在しているため、エアーホース、ケーブル等に余分なたるみ等が発生するとその障害物に引っかかる可能性があり、それは穿孔機の走行の阻害となる。従って、エアーを必要としない電気駆動式とした。

4.3　孔のスキャンとドリル位置決め方法の確立

本稿2.2項で示した穿孔方法のとおり、穿孔位置はSeat Track Crownにあいている本孔を基準にする。Seat Track Crownにあいている本孔の孔位置についてピッチにばらつきがあるため、全孔位置をスキャンする必要がある。

ドリルの位置決め精度について、基準となるSeat Track Crownの孔と機体側（Over Wing Beam）の孔の孔径の要求により、Seat Track Crownの孔の中心に対して0.05 mm以下の位置決め精度とした。

4.4　小型、軽量な高速切削ドリルモータの開発

4.1項の穿孔機の軽量化を実現するためには**表1**の通り、穿孔機全体の重量に対して計画重量配分が15%を占めるドリルスピンドルモータについての軽量化が課題となる。

表1　自動穿孔機の計画重量分配値

a.	穿孔機フレーム	30%
b.	制御ボックス	20%
c.	ドリルスピンドルモータ	15%
d.	走行用モーター等他装備品	25%

市販品のモーターでも小型・軽量なものはあるが、回転数とトルクのバランスがとれた金属構造切削向けの所要性能を満足するものが少ない。逆に、所要性能を満足するものは大型になってしまう。エアーモータにすると小型で所要性能は得られるが、エアーホースを装置に接続しなければならないので機械の取り回しが難しく操作性が悪くなるため、電気式を採用することとした。

次に穿孔機の移動～穿孔完了までのサイクルタイムを短縮するには高速穿孔が必要となる。これを達成するには高出力、高トルクの高速スピンドルモータが必要となる。加えて今後の他部位、他材質への展開を視野に入れ回転域300 rpm ～ 6500 rpmのドリルスピンドルモータを開発することとした。

5.　自走式自動穿孔機（開発品）の仕様

穿孔装置全体を図6に示す。主要な構成品は次のとおりである。①穿孔機本体②制御ユニット③ペンダント式コントローラ

穿孔機のセットから穿孔完了までのサイクルは図7に示すとおりで、従来の手作業での方法に比べ時間にして30%削減できることとなる。

①穿孔機本体

②制御ユニット

③ペンダント式コントローラ

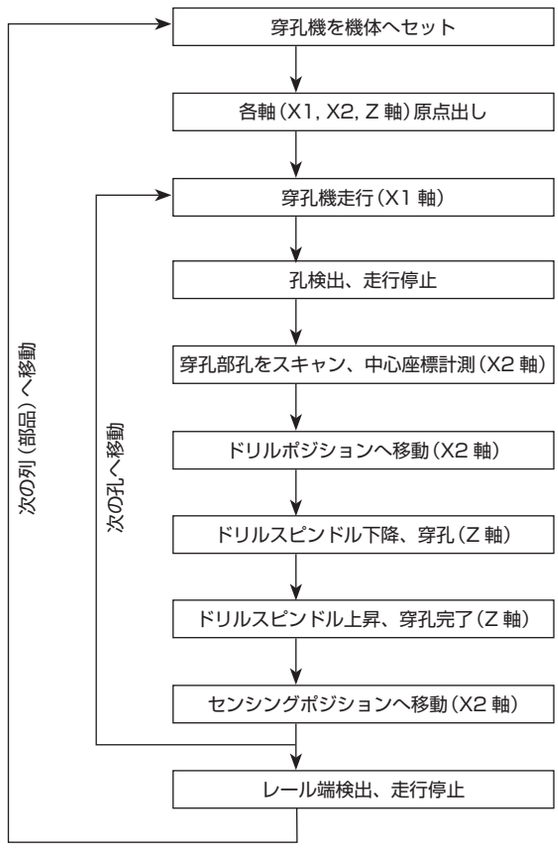
図６　穿孔機主要構成品

5.1　穿孔機の軽量化について

実際に機体（製品）にセットする穿孔機本体を軽量化する為に図8に示すとおり制御ユニットを走行装置本体から分離した。つまり、実際に機体にセットして穿孔する装置本体はドリルスピンドルユニット、走行機構、孔位置検出機構及びその他センサ類の検出部、制御通信ボックスのみとなる。穿孔機本体と制御ユニットは電源ケーブルのみの接続とし通信は無線通信とした。

また、開発した穿孔機は一般的な自動穿孔機に比べ走行レールを必要としない。機体（製品）をガイドにし、穿孔機本体の保持についても機体（製品）自体をそのままクランプし自走する。これにより、走行レール等の重量補助具のセットを必要としない。

その他下記施策により軽量化を実現。結果、穿孔機本体の総重量が19.7 kgと他社開発製品（60 kg以上）



＊各軸の用途：X 1→穿孔機本体走行軸
X 2→ドリル／センサ移動軸
Z　→ドリルスピンドル昇降軸

図７　自動穿孔機の穿孔サイクル

に比べ1/3以下を達成。

・穿孔機本体フレームの一体化構造
（ボルト組立を削減）
・アルミ材を多用
（穿孔機本体の約80%がアルミ構造）

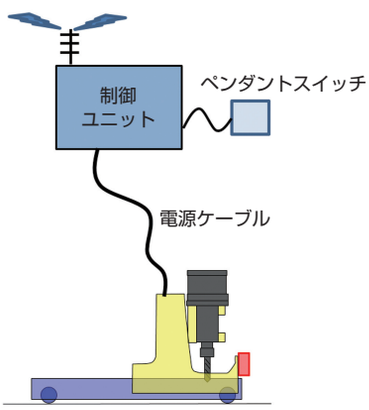


図８　穿孔機本体、制御ユニットの分離

5.2　機械の操作性

エアーホースやケーブル類の取り回しを改善するために、穿孔機本体につなぐケーブルは電力電源ケーブルの一本のみとし、ケーブルのたるみやつっぱりを避

けるために穿孔機本体と分離した制御ユニットに装備したドラム式コードリールが穿孔機の動きと同期して送り出しと巻き取りを行うシステムとした。

5.3　加工孔のスキャン、ドリル位置決め方法

孔スキャンからドリルポジションへの移動までのプロセスを図9に示す。

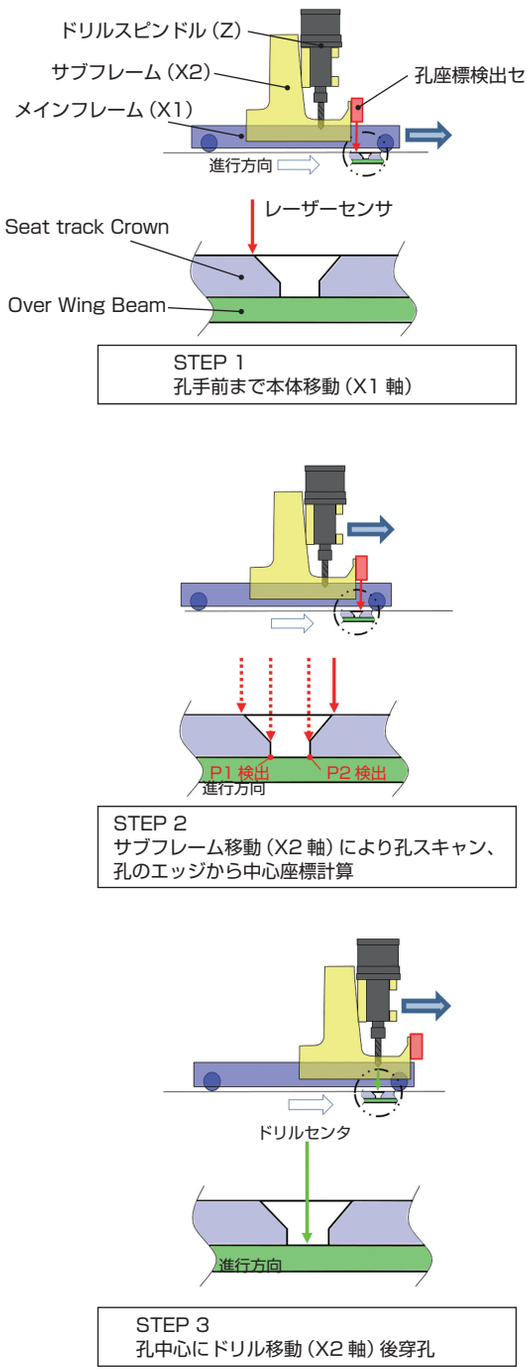


図 9　孔スキャン～ドリル位置決めフロー

穿孔位置はSeat Track Crownにあいている本孔を基準にするため、最初にSeat Track Crownの孔位置をスキャンする必要がある。孔位置測定方法はレーザー変位センサを使用し、走行軸方向に1/100 mm間隔でレベル変位測定を行い、2次元プロファイルを形成する。次に孔のボトム部でデータ変位を取得し、データ演算により孔の中心位置座標を決定する。これを基準にX2軸を移動しドリルポジションにて穿孔加工を開始する。孔のスキャン速度は5 mm/secでスキャン開始から完了まで3.5 secである。

また穿孔機本体の走行・移動軸(X1軸)とSeat Track Crownの孔(穿孔基準孔)のスキャン、ドリルスピンドル移動軸(X2軸)を分離することにより、ドリル位置決め精度±0.05 mm以下を達成した。

5.4　小型、軽量、高速切削スピンドルモータ

小型で軽量かつ穿孔能力に特化した高速切削スピンドルモータを開発する上で、まずは、次の条件を満足する所要性能の検討を行った。①一本のドリルで連続穿孔可能(150孔以上)②孔品質要求を満たす③切削スピードが目標値(手作業に比べ▲20%)を満足すること。図10のように所要性能が確定。上記から図11に示すモータを製作した。

製作したモータの性能と一般市販品のモータとの比較表を表2に示す。

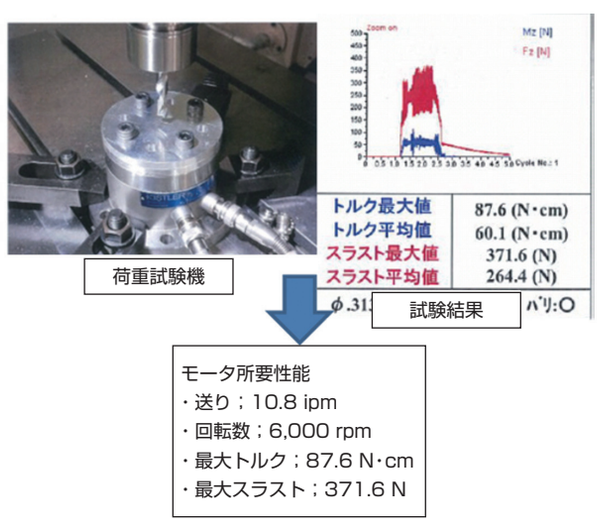


図 10　モータ所要性能検討

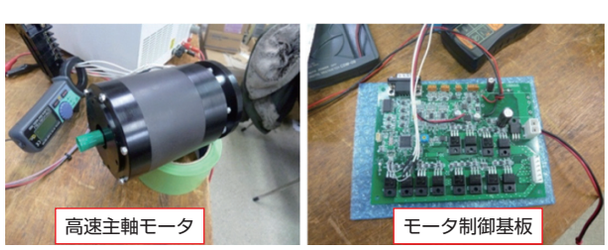


図 11　モータ仕様概要

表２　モータの性能比較

	開発モータ		一般市販モータ
定格出力	1,100 W	2.8 倍 ⇦	400 W
定格トルク	1.75 Nm	1.2 倍 ⇦	1.57 Nm
最大回転数	6,500 rpm	1.2 倍 ⇦	4,000 rpm
重量	3.0 kg	−0.4 kg ⇦	3.4 kg
サイズ	ϕ80 mm × L120 mm		□88 mm × L134 mm

6.　まとめと今後の課題

今回の開発で、実機に適用できるレベルの中央翼向け自走式自動穿孔機を開発できた。重点課題であった軽量化については、20 kg以下と人の手で持ち運べることができ、品質を維持して高速穿孔を行うことが可能となった。

一方、軽量化を達成することを目的としエアーホースレスとしたため、切粉の吸塵機能を持たせることが出来ず、機体の上に残された切粉は人の手による清掃に頼っている。

今後は上記の吸塵対策を含め、更なる軽量化及びサイクルタイムの削減を達成する計画である。

【著　者】

内藤　雅一

早川　　智

谷田　圭司

齊藤　俊介

成長期（平成初期）のスバル紹介

エクシーガ 2.0i－L（2008年～　）

全長×全幅×全高：4740 mm × 1775 mm × 1660 mm
ホイールベース：2750 mm
エンジン：水平対向４気筒 DOHC 1994 cc
最高出力：109 kw（148 ps）/6000 rpm
最大トルク：191 N-m（19.5 kg-m）/3200 rpm

コンセプトを「7シーターパノラマツーリング」として、ワゴン作りで培ったノウハウを注ぎ込み、乗員の全てがしっかり乗れる居住性を確保しつつ、走りの性能も引き上げた。リアサスペンションにはインプレッサやフォレスターと同様にダブルウィッシュボーンを採用し、高い操縦安定性や静粛性に加え、しなやかで上質な乗り心地を実現したSIシャシー（SUBARU intelligent Chassis）を採用。当初は国内のみの販売であったが、豪州にも販売された。2015年には大幅改良を施し、クロスオーバーSUV「エクシーガクロスオーバー7」として発売した。

スリーブファスナ取外し工具の開発

Development of Sleeve Fastener Removal Tool

斎藤　学*　Manabu SAITO
高橋秀治*　Hideharu TAKAHASHI
中畑達雄*　Tatsuo NAKAHATA
渡邉政雄*　Masao WATANABE
西野利男*　Toshio NISHINO

抄　録

近年の航空機は、機体の軽量化に大きく寄与するCFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics）の適用率が増加の一途をたどっている。そのため、部材同士の締結に用いられるファスナも変化している。スリーブファスナは、ボルトの外側に肉厚の薄いスリーブが組み込まれており、一度締結してしまった後の取り外しが非常に難しい。そのため、誰でも容易にスリーブを取外すことのできる工具の開発を行った。

本稿では、航空機組立に用いられる、「スリーブファスナの取外し」についての課題克服方法、工具開発の経緯、手順について詳しく報告する。

Abstract

Recently more airplanes have used Carbon Fiber Reinforced Plastics（CFRP）because it contributes to weight reduction of the fuselage. Therefore, the fastener used to connect parts is also changing. Sleeve fastener, for example, is very difficult to remove. Hence, we developed a tool which anyone could use for removal.

In this paper, we report the technology development progress about the sleeve fastener removal tool.

1.　はじめに

近年の航空機は、省燃費化や大型化が進んでいる。これまで主要材料として適用されてきたAL合金をはじめとする金属材料に加え、機体の軽量化に大きく寄与するCFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics）の適用率が増加の一途をたどっており、その適用範囲は一次構造部材にまで及んでいる。そのため、部材の締結に用いられるファスナも変化してきており、締結の技術も進化してきている。しかしながら、ファスナの取外しについては、非定常作業となるため、研究や改善は乏しい。中でも、スリーブファスナと呼ばれるファスナは、取外しが非常に困難であり、取外し作業において高い技術が要求される。

本稿では、航空機組立における「スリーブファスナの取外し」に焦点を絞り、そのツール開発経過について詳しく報告する。

＊ 航空宇宙カンパニー　製造部

2.　スリーブファスナとは

スリーブファスナとは、**図1**に示す通り、ボルトの外側に筒状のスリーブと呼ばれる部品が組み込まれたファスナである。部材の孔にスリーブ及びボルトを打ち込んで締結作業を行う。部材の孔径に対し、スリーブの外径は若干大きく設定されているため、スリーブ自体は孔の中でかしまった状態で締結される。締結の際、孔内面（スリーブの外側）にシール剤を適用することもある。

スリーブの材質は、靱性の高い金属であり、肉厚が薄いことが特徴である。

3.　スリーブファスナ取外しについて

3.1　スリーブファスナ取外しを必要とするケース

通常の作業工程において、スリーブファスナの取外しは行われないが、下記の場合、スリーブファスナを取外す必要が生じる。

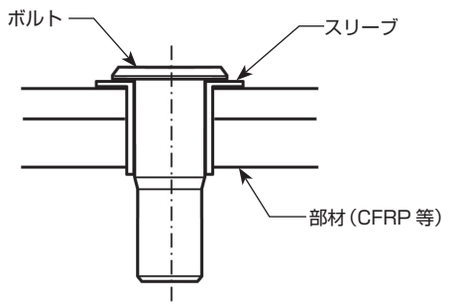


図１　Sleeve fastener

①ボルトのグリップ変更

部材の板厚に対し、ファスニングを行ったボルトのグリップ（長さ）が不適切であった場合、スリーブファスナを取外し、適切なグリップのボルトに交換する必要がある。部材の板厚測定を行っているため、変更の頻度は少ない。

②打ち損じ

ファスニング時になんらかの不適合、不具合、エラー等が生じた場合、スリーブファスナを取外す必要がある。

③リワーク

一度締結した部品を何らかの理由により、分解する必要が生じた場合、スリーブファスナを取外す必要がある。

上記はいずれも頻度が少なく、非定常作業である。

3.2　スリーブファスナ取外しにおける技術的課題

スリーブファスナにおいて、ボルトの取外しは比較的容易であるが、スリーブの取外しは困難な作業であり、技術的ハードルが高い。取外しが困難な理由は下記の通りである。

①部材へのかしまり

スリーブは、部材に圧入されかしまっているため、容易に引き抜くことができない。また、シール剤が接着材のような働きをし、さらに引き抜き難くなっている。

②肉厚が薄い

スリーブの肉厚は薄く、打撃や押圧による取外しが困難である。**図２**に示す通り、ツバの反対側に打撃や押圧を与え押し出そうとすると、端部に潰れが生じ、取外しが出来なくなる。

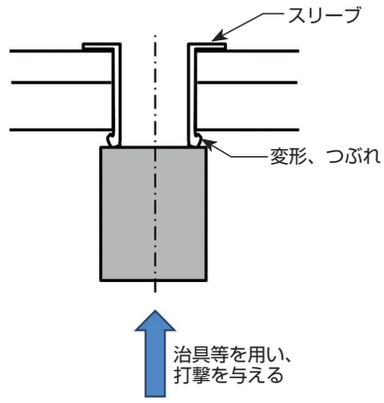


図２　Removal by impact

③部材がCFRPであることが多い

スリーブの材質は、靱性の高い金属であるのに対し、部材はCFRPであることが多いため、取外しの際、孔内面に損傷を与える恐れがある。

4.　スリーブファスナ取外し方法の検討

スリーブを取外す方法として、以下の4種類の方法の検討を行った。

4.1　治具ピンを用いた取外し

図３に示すような、スリーブ孔内径にフィットした治具ピンを製作し、打撃や押圧による取外しを行った。結果は、スリーブ端部が外側に変形し取外し不可であった。スリーブの板厚が薄く、外力に対し変形しやすいため、この方法は適切ではないと言える。

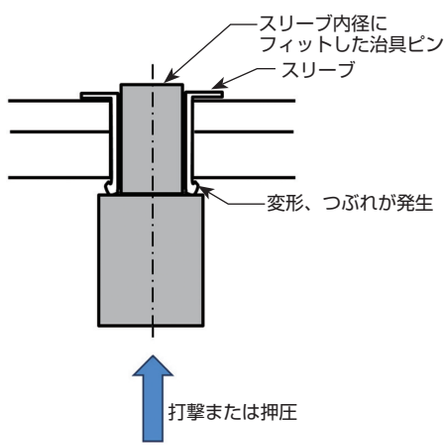


図３　Removal by a jig pin

4.2　逆タップを用いた取外し

図４に示すような、逆タップを回転させながらスリーブ内面に押し付けることにより取外しを試みた。結果は、回転数や押圧力を適正にコントロールすれば取外すことができたが、部材を損傷させる不具合も発生した。

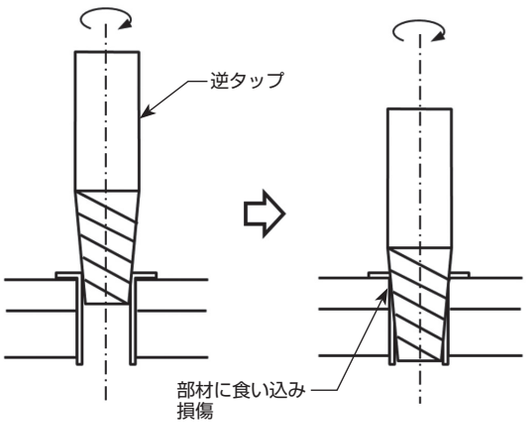


図４　Removal by a inverse tap

4.3　リーマを用いた取外し（除去加工）

部材の孔加工に使用したリーマを用いて、スリーブの除去加工を試みた。結果は、適正な加工条件かつ切粉除去を行うことにより、スリーブの除去加工を行うことはできたが、切粉が部材内面に傷をつけることもあり、高度な穿孔スキルを必要とする。またスリーブの材質が靱性の高い金属であるため、早期にリーマが摩耗して工具費増の要因となる。

4.4　正タップを用いた取外し

結果的に、正タップを用いた取外し方法が、最も安定した取外し方法であった。5項で詳しく説明する。

5.　正タップを用いた取外し方法

5.1　取外し工具構成

取外し工具の構成は、図5の通りであり、タップ、ブリッジ、ハンドルで構成されている。タップの切刃部は正タップとなっており、右回転によりスリーブ内面に噛み込む構造となっている。先端部にはパイロットと呼ばれる案内が設けられており、孔の中心軸に沿った締め込みが行えるようになっている。また、タップの外径は、

スリーブ内径　＜　タップ外径　＜　部材孔径

となっており、部材を損傷することなくスリーブに噛み込むよう設計している（図6）。タップ後方部は左ネジであり、ブリッジとの組み合わせにより、右回転でスリーブに噛み込ませながら後方側に引き抜くことが可能な構成となっている。ハンドル先端部にはワンウェイベアリングがはめ込まれており、タップに対するハンドルの挿入方向を変えることにより、締め込み、緩めのいずれの作業も容易に行える構造となっている。

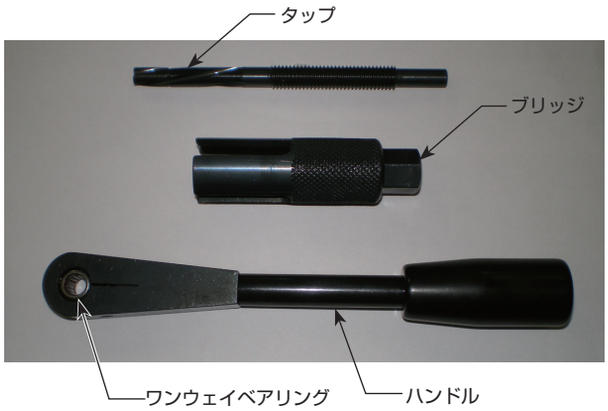


図５　Sleeve fastener removal tool

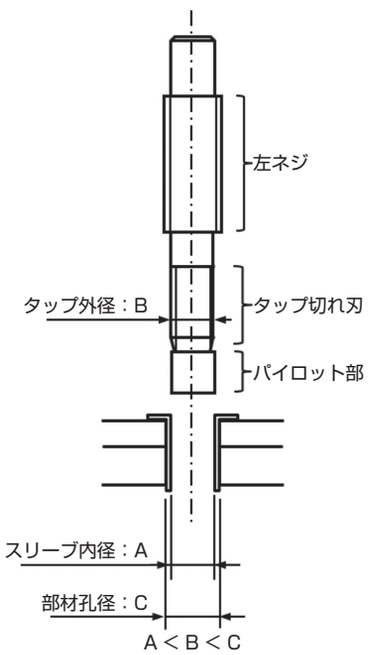


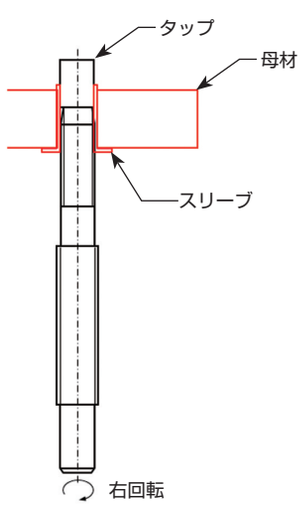
図６　Diameter of the tap

5.2　取外し手順

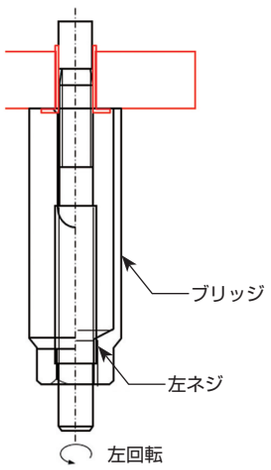
図7に、取外し手順を示す。

【工程1】

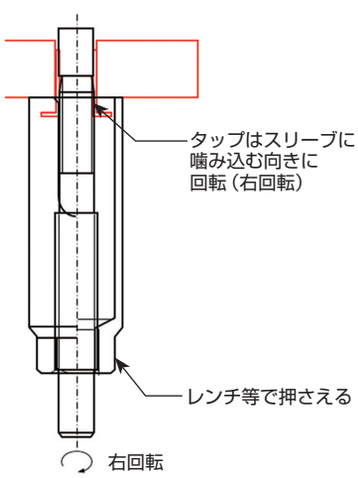
タップを右回転でねじ込み。



【工程2】
ブリッジ(左ネジ)を、母材に接触するまで左回転で取付け。



【工程3】
レンチ等でブリッジを回転しないように押さえた状態で、タップを右に回すと、ブリッジが母材に突っ張り、タップがスリーブと共に、母材から浮き上がってくる。



【工程4】
工程3を続け、タップ及びスリーブを母材から完全に抜き取り、ブリッジを外す。

図７　Operation procedures

6.　課題

6.1　タップからのスリーブの取外しと対策

前記5項において、部材からスリーブを取外すことは可能となったが、取外されたスリーブはタップにきつく噛み込んだ状態となっているため、タップからスリーブを外すことが困難である。取外しの方法としては、タップに噛み込んだスリーブをプライヤー等で固定し、タップを逆回転させることにより引き抜く方法が考えられるが、前述の通りスリーブの肉厚が薄いため、スリーブ自体が変形し、容易に取外すことができない。

タップからスリーブを取外す方法として、図８に示す工具を考案した。取外しの手順は図９の通りで、容易に取外すことが可能である。

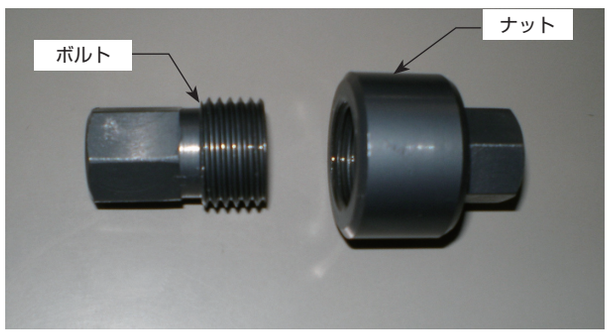
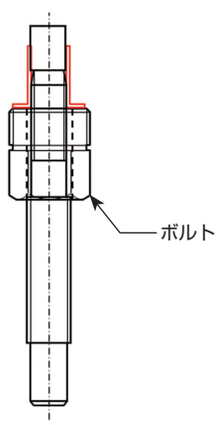
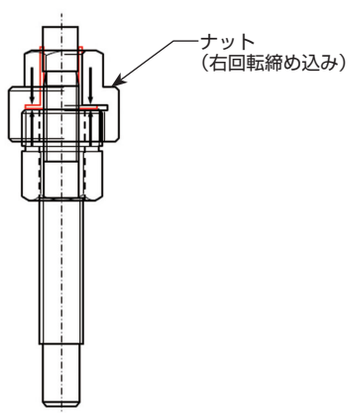


図８　Sleeve fastener removal tool
(bolt and nut)

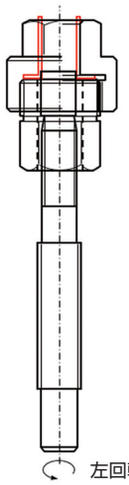
【工程1】
図の位置に、ボルトを装着する。



【工程2】
ナットを装着し、締め込み。スリーブのツバ部をナットとボルトで挟み込む。



【工程3】
ナットを押さえた状態でタップを左回し(緩める)。タップとスリーブが分離する。



【工程4】
ナット、ボルトを分離し、スリーブを取出し。

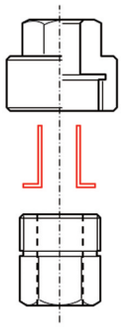


図９　Operation procedures

6.2　狭隘部の取外し(狭隘部用工具の開発)

前述の工具は、ツールクリアランスが十分な箇所でのスリーブ取外しが可能であるが、航空機の構造は、様々な部品が組み合わさっており、十分なツールクリアランスが確保できない箇所も多く存在する。そのため、狭隘部用工具の開発も行った。基本的な構成はほぼ同等であるが、長手方向に短くした点、ブリッジをスペーサでかさ上げしながらスリーブを取外す点が異なる。以下に工具の構成(図10)と取外し手順を示す。

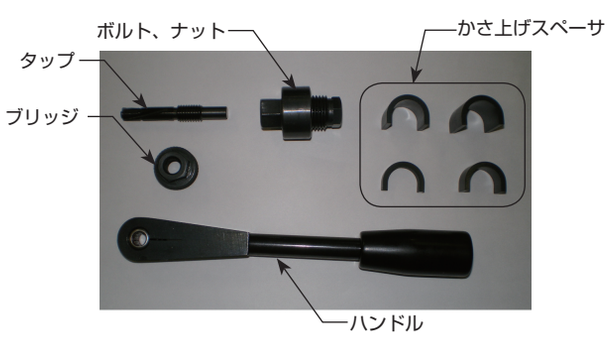
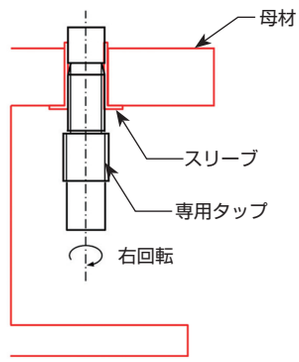


図 10　Sleeve fastener removal tool
(for narrow space)

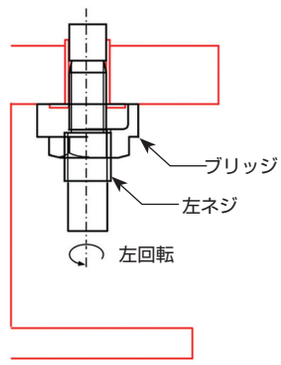
6.3　狭隘部の取外し手順

図11に、取外し手順を示す。

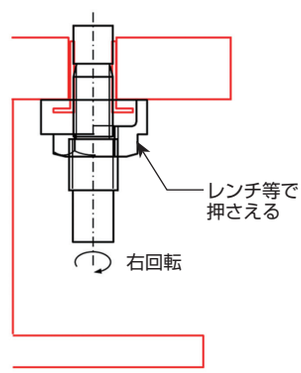
【工程1】
タップを右回転でねじ込み。



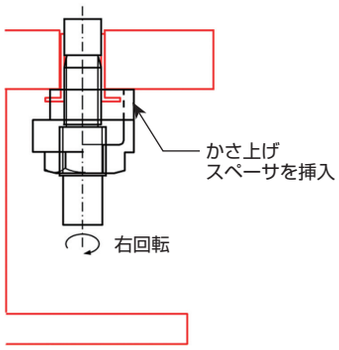
【工程2】
ブリッジ(左ネジ)を、母材に接触するまで左回転で取付け。



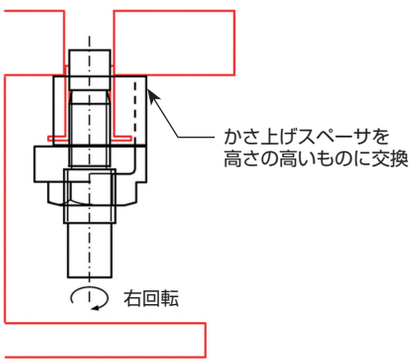
【工程3】
レンチ等でブリッジを回転しないように押さえた状態で、タップを右に回すと、ブリッジが母材に突っ張り、タップがスリーブと共に、母材から浮き上がってくる。



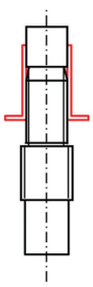
【工程4】
工程3を続けると、ブリッジとタップの左ネジ部の噛み代が少なくなってくるため、ブリッジを一度ワークから離し、かさ上げスペーサを横から挿入し、タップを再度締め込む。



【工程5】
さらに締め込みを続け、より高さの高いかさ上げスペーサに交換しながらスリーブを抜き取る。



【工程6】
専用タップ及びスリーブを母材から完全に抜き取り、ブリッジを外す。



【工程7】
一般部用と同じ手順で、タップからスリーブを取外す。

図 11　Operation procedures

7.　まとめと成果

今回の開発で、狭隘部も含め誰でも簡単にスリーブを取外せる工具を開発することができた。通常作業での出番は少ないが、非定常作業時の二次不具合防止等に威力を発揮し、成果を出すことができた。

8.　謝辞

今回の工具開発にあたり、株式会社早坂精密工業様には、多大なる御支援御協力頂きましたこと、御礼申し上げます。

参考文献

(1) 森北出版：新編JIS機械製図第2版
(2) 株式会社 早坂精密工業ホームページ
http://htd-m.com/

【著　者】

斎藤　　学

高橋　秀治

中畑　達雄

渡邉　政雄

西野　利男

産業機器用エンジン開発におけるCAEの活用（第２報）

CAE Analysis in Development of Engine for Industrial Equipment (Review 2)

杉　浦　規　郎*1　　北　嶋　祐　介*2
Norio SUGIURA　　Yusuke KITAJIMA

抄　録

製品開発における一般的な課題として、「設計品質の向上」、「商品開発コスト低減」、「開発スピード向上」が挙げられ、これらの課題開発に向け、産業機器用エンジン開発においても、「CAE」を導入し製品開発に大きな影響を与えている。 産業機器用エンジン開発における設計者CAE活用展開の取り組みと活用事例は既に紹介した(1)。その第2報として、新たな解析技術とその活用事例について紹介する。

Abstract

As common issues in product development, "design quality improvement", "development cost reduction" and "development speed-up" are considered. To address these challenges, we use "CAE" analysis in engine development for industrial equipment and it has had great effects. We introduce our new CAE analysis as a sequel to previous report (1).

1.　まえがき

産業機器カンパニーは、5つの業界のお客様へ、動力源（エンジン）を提供している（図1）。エンジンの仕様も多種あり、それぞれの業界により要求される機能・スペックが大きく異なる。エンジンの開発製造にあたり、「環境対応」の考慮とともに、お客様からの「要求仕様」に合った製品をタイムリーに提供すべく、開発の質の向上に取り組んでいる。

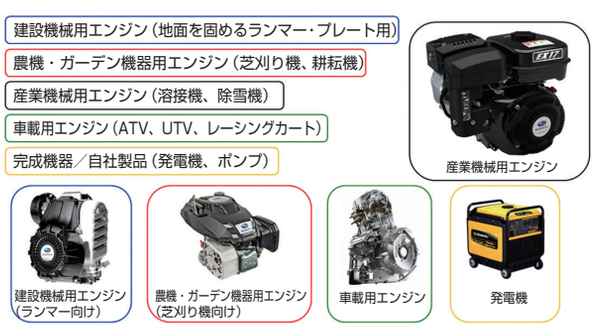


図 1　Product introduction

既報(1)において、製品開発における課題として、次の3つを示した。

・「設計品質の向上」
・「商品開発コスト低減」
・「開発スピード向上」

これらの課題を解決するための一つの手段として、CAEの活用に取り組んでいる。

第2報では、CAE技術の中でも比較的高度な「非線形構造解析」と「流体騒音解析」の設計者活用展開について紹介する。

2.　CAEツールの設計者展開

エンジン開発の現場は、設計者4名程度の少数精鋭のチームで構成されている。一人が受け持つ業務範囲は広く、エンジン設計から、試作手配、生産準備の全てを行っている。設計者は、エンジン部品を幅広く設計できるため、自分のアイデアが様々な部品（製品）へ込められる機会が多くなる一方、そのアイデアの妥当性を、机上検討の段階で素早く把握しておく必要がある。

アイデアの妥当性を確認するツールとして、設計者自らがCAEを実施する「設計者CAE」が有効と考え

＊1 産業機器カンパニー　技術部
＊2 富士テクノサービス株式会社

活用している。

設計者CAEツールに求める機能として、以下に3つを挙げる。

①複雑なオペレーションを必要としないツール

②CAD（3D）⇔CAEの往来が容易であること

③解析精度＜スピード（評価数）を優先

特に、①は、重要なポイントであり、設計者は、2D/3D-CADを用いて設計をしながらCAEを実施するため、複数のCAEツールに対し、オペレーションを習得することは負荷になる。そこで、解析モデル作成（プリ処理）には、CAD上に搭載されているCAEツールを活用し、境界条件設定やメッシュ作成を行い、外部の様々な種類のCAEが実行できるようなツール環境を構築している。これにより設計者のオペレーション習得負荷を低減させている。

図2に、設計者が実施しているCAEの種類を示す。次項より、現在、設計者展開を進めている「非線形構造解析ツール」と「流体騒音解析ツール」について、紹介する。

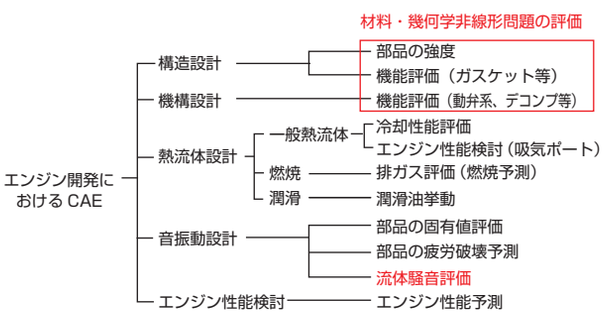


図 2　CAE for designer

3.　非線形構造解析ツール

従来、設計者CAEとして、CAD上に搭載されている線形静解析の構造解析ツールを展開し活用してきた。エンジン構成部品の設計検討をする上で、非線形性（材料・幾何学非線形）を考慮しないと精度よく評価できない場合が多々ある。そこで、今回、設計者からの要望も合わせて、設計者向け非線形構造解析ツールの構築に取り組んだ。活用事例も含めて紹介する。

3.1　非線形解析ツールの構築

設計者CAEツールとして、前述の「①複雑なオペレーションを必要としないツール」が重要なポイントである。そこで、従来から設計者が使用している線形静解析の構造解析ツールの延長で、非線形解析が使用できるように非線形解析インターフェイスを導入した。

図3に、ツール詳細を示す。設計者は、まず、CADで解析モデルを作成し、CAD上のCAEツールにて解析条件を定義する。従来から線形性解析で使用しているため、ツールのオペレーションは、難なく行える。次に、今回、導入し構築した非線形解析インターフェイスを用いて、解析ソルバを起動し、解析を実行する。解析終了後は、解析結果をCAEツールに転送し結果整理（ポスト処理）を行う。解析の実行から、結果の転送までを、非線形解析インターフェイスにより自動処理をする環境を構築した。これにより、設計者は、従来の線形性解析と同様のオペレーションで、非線形解析ができるようになった。

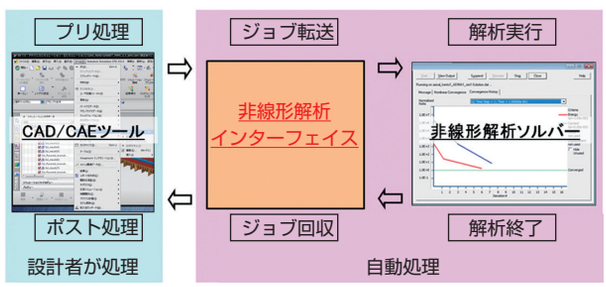


図 3　Interface of non-linear analysis

3.2　非線形構造解析の活用事例（ボールチェーンの破断解析）

設計者が行うCAEは、主運動系（ピストン、クランク、コンロッド）や、大物鋳造部品（シリンダーヘッド、シリンダ、ケース）、補機類（エアクリーナ、マフラ）等のエンジン部品だけでなく、お客様からの要求により取り付けられる小さな機能部品も設計する。ここでは、前述の非線形解析インターフェイスを用いた設計者CAE事例の一つとして、図4に示す発電機の燃料タンクとタンクキャップをつなぐボールチェーンの解析を紹介する。

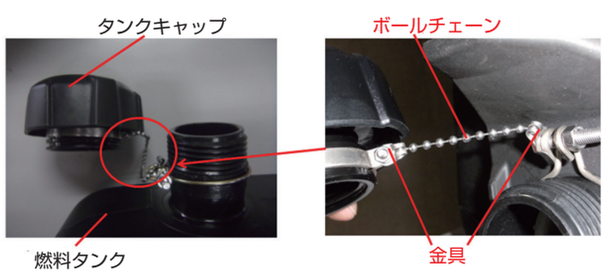


図 4　Tank cap and ball-chain

3.2.1　ボールチェーンの機能評価とモデル

北米で販売される発電機には、ボールチェーンの設置が、アメリカ合衆国環境保護庁（EPA）により義務付けられている。破断によるタンクキャップの紛失がないように、引張強度等の社内基準を設けて、厳しく

管理している。本件の初期設計は、CAE等の検討ツールを使用せずに、過去の経験より形状を決め、試作部品を手配していた。初期設計試作品は、実機評価試験において、既定の60%の荷重でボール部が金具から外れ破断してしまった。そこで、CAEを用いて対策形状の検討を行った。

図５に、実機評価試験と解析モデルを示す。実機評価試験では、タンクキャップに荷重計を設置し、ボールチェーンが金具から外れ、破断する瞬間の荷重を計測する。解析モデルは、金具と接しているボール部に、引張方向への強制変位拘束を与え引張を模擬することとした。引張荷重は、ボールが受ける反力とした。

解析は、前述の非線形解析インターフェイスを用いて非線形ソルバで実施した。

図６に、初期設計試作品と対策品における実測と解析結果の比較を示す。初期設計試作品に対し、対策品は、ボール部を挟んでいる金具部分の幅を広げることで剛性アップを実現した。両仕様の解析結果と実測結果の引張り荷重の差は、10%以下の精度で確認できた。

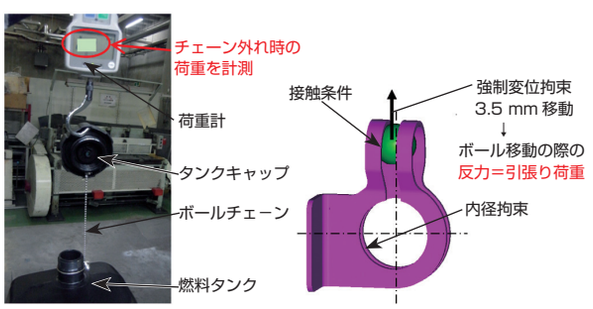


図５　Evaluation method and analysis model

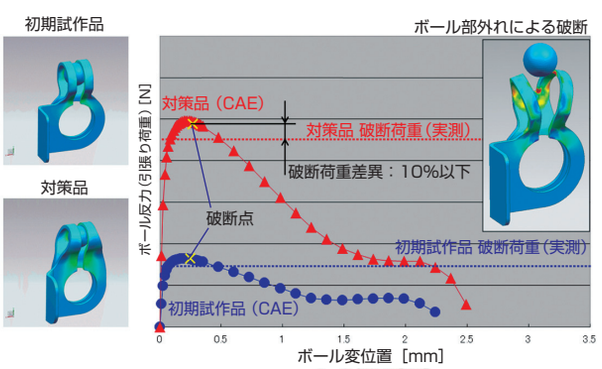
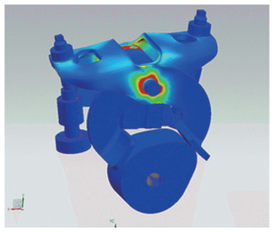
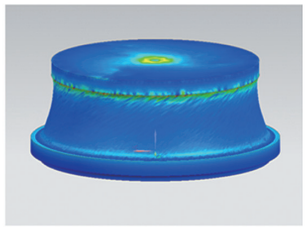


図６　Comparison of strength（CAE & experiment）

以上のように、非線形解析インターフェイスの導入により、従来まで敷居が高かった非線形構造解析を、設計者CAEとして、設計者に展開することができた。現在、本事例の他に、図７に示すような、ロッカーアームの動解析やエンジンマウントゴムの解析についても、非線形解析インターフェイスを用いて設計者が実施しており、適用範囲が広がっている。



非線形ソルバーによる
ロッカーアームの動解析



エンジンマウントゴムの捩じり解析

図７　Application of non-linear analysis

4.　流体騒音解析ツール

昨今の汎用エンジン市場においては、低騒音化のニーズが高まっている。特に人の近くで運転され、一定の回転数で使用する発電機のような製品では、音を不快に感じやすい傾向にあることから、その低減が課題となっている。発電機における従来の騒音低減対策は、エンジンを外装カバーで覆ったり、消音材を取付ける等の遮音であった。このような方法では対策した分だけコストや取り付けスペースが必要になる。

当社の製造する汎用エンジンは、主に強制空冷方式を採用している（図８）。そのため、ファンから翼通過音（以下、ピッチ音と呼ぶ）が発生し、人間がより不快に感じやすい１ kHz帯に音圧レベルのピークを持つ特徴があり、機械騒音以外の高周波帯では最も高い音圧レベルとなる。そこで、そのファンピッチ音をCAEを用いて評価・検討する。

4.1　流体騒音解析技術の構築

汎用エンジンの3Dモデルを用いて、ファンの流体騒音解析を行った。同時にファンをモータで回転させる評価用試験装置を製作し、FFTスペクトル解析を行い比較検証した。

4.1.1　ファンの流体騒音解析モデル

実際の汎用エンジンは図８のような部品構成でコンパクトにまとめられている。リコイルスタータは手動方式のエンジンスタート機能のほか、冷却空気の吸入の役割も果たしている。リコイルスタータから吸入した冷却空気はファンとブロワハウジングによって冷却対象部品のシリンダヘッドに効率よく送られるように設計している（強制空冷）。また、ファンはクランク軸と直結しており、エンジン回転数によってファンの風量も変動する。

今回用いた解析モデルを図９に示す。ファンの種類は生産品の遠心式シロッコファンとする。回転方向はリコイルスタータ正面から見て時計回りである。

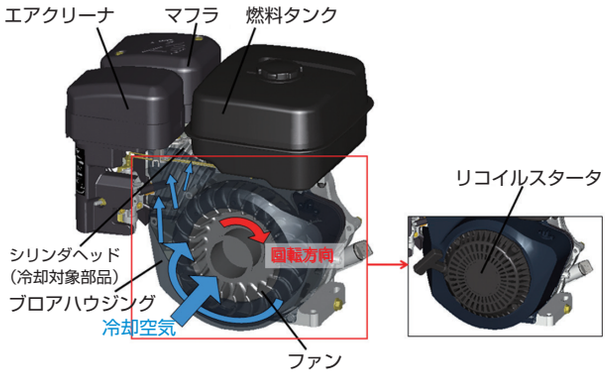


図 8　Layout of engine for industrial equipment

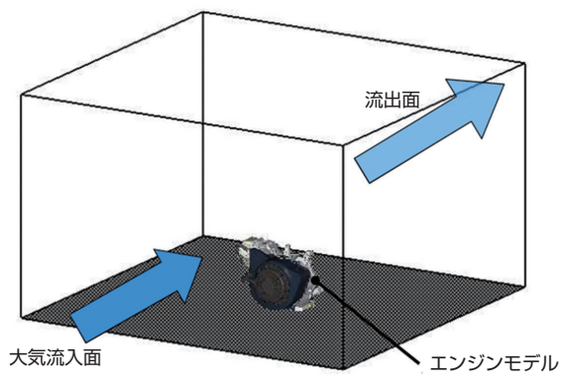


図 9　Cooling fan analysis model

回転数は発電機で使用する3600 rpmとし、エンジンモデルは図8に示す構成に対して、燃料タンク、エアクリーナ、マフラ等の冷却空気の流れに影響を与えない部品は省略した。

解析領域は、ファン径を基準として、エンジンモデル周りに必要十分な立方体の空気体積空間とし、大気流入面、流出面により空気の出入を自由とした。ファン部には回転移動境界条件を定義した。

空気の物性値として、1気圧、15℃における密度と粘性係数を定義した。

要素サイズは、音場の翼通過周波数付近1 kHz帯の波長を精度良く表現できるものとした。また流体場の翼面では、はく離などの流れの急変部を正確に解析するため、バッファ層に節点が来るように乱流境界層メッシュを定義して乱流現象を表現できるものとした。

解析のタイムステップは、回転体に対するタイムステップ（以下、回転分解能と呼ぶ）に幅を持たせて何例か解析を行い、圧力や速度分布を比較し、音圧レベルに大きく影響を及ぼさない値に設定した。

4.1.2　解析手法

汎用熱流体解析ソルバを用いて、乱流解析の精度や計算負荷のバランスから、本事例を実施するにあたり適当であると考えたDES（Detached Eddy Simulation）乱流モデルにて解析を行った。

騒音に関する解析では、数値音響解析（CAA：Computational Aero Acoustics）等、音伝播専用コードを用いた計算が一般的である。当カンパニーでは設計者向けCAEに注力しており、計算コストの増加と連成解析による複雑化を避けるため、今回は流体コードだけでファン近傍の音源及び伝播解析を行う方法を採った。

ファン周りでは圧縮性流体解析で密度変化が発生している事を確認したが、大気圧下では空気密度変化による音圧振幅は非常に小さい（1 Paの振幅で94 dB）、逆に言えば音波によって空気が密度変化するときの圧力振幅を流れ場の解析で表現するには、相当厳密な解析精度が要求される。したがって、密度変化による圧力振幅は非常に小さく、音圧レベルに影響を与えないものとして考え、密度一定の解析とした。ただし密度変化が無いということは、ある点からある点への音速は無限大とされ、遠距離場での音の伝播は表現できない。今回は音源近傍の問題と考えて数値解析を実施した。以上のことから、非圧縮性流体問題として解き、音源近傍の計測点における微小圧力振幅を読取り、音圧レベルに変換して、音響スペクトル解析を行った。

4.1.3　評価用試験装置

評価用試験装置を図10に示す。騒音試験は、半無響音室にて行った。モータにて回転数を制御してファンを回転させる。このモータ制御装置に、図9の解析モデルと同様の部品を組み合わせて、空気空間を設けた。ダクト等を設置して圧力及び風量の計測を行った後、数値解析と同じ位置で音圧スペクトルの計測を行った。

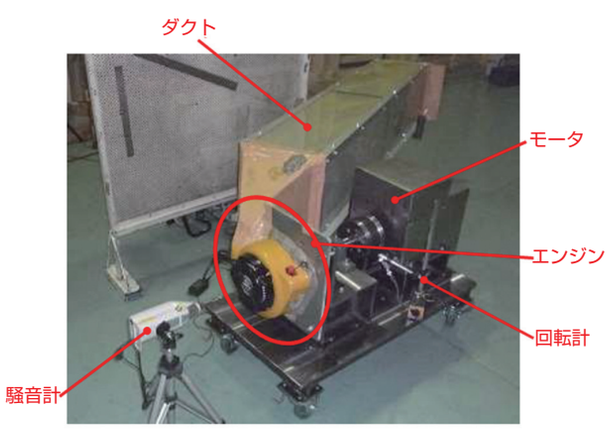


図 10　Test bench of cooling fan

4.1.4　解析結果の検証

以下に、数値解析結果と実験結果の比較を示す。

(1) 風量の比較

生産品シロッコファン「FAN1」、「FAN1」と形状

が全く異なるファン「FAN2」の風量の比較結果を図11に示す。

解析値は実験値に比べて、両仕様ともに同割合（約30%）で低い値となった。また、仕様差による風量の大小関係は、解析結果と実験結果で一致していることが確認できる。この結果から、CAEによるファンの風量予測が、一定の偏りを考慮した上で可能であると言える。風量の絶対値の差は、計測誤差もしくは境界条件の違いによるものである。

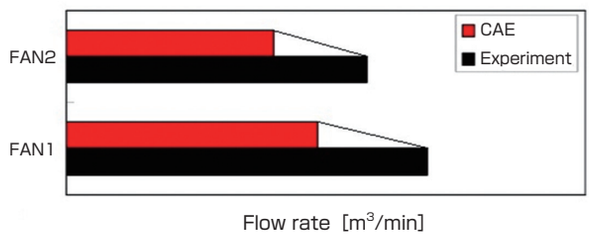


図 11　Flow rate of cooling fan

(2) 圧力分布の比較

数値解析の流れの様子と実現象が同じであるか確認するため、ブロワハウジング周りの圧力分布を計測した。ファンは「FAN1」とした。計測点及び圧力分布を図12に示す。それぞれの計測点で解析結果と実験結果を比較すると、相対的に圧力分布の様子が同じであることがわかった。

流量と圧力分布の様子から、非圧縮性流体解析で流れの構造を再現できることがわかった。

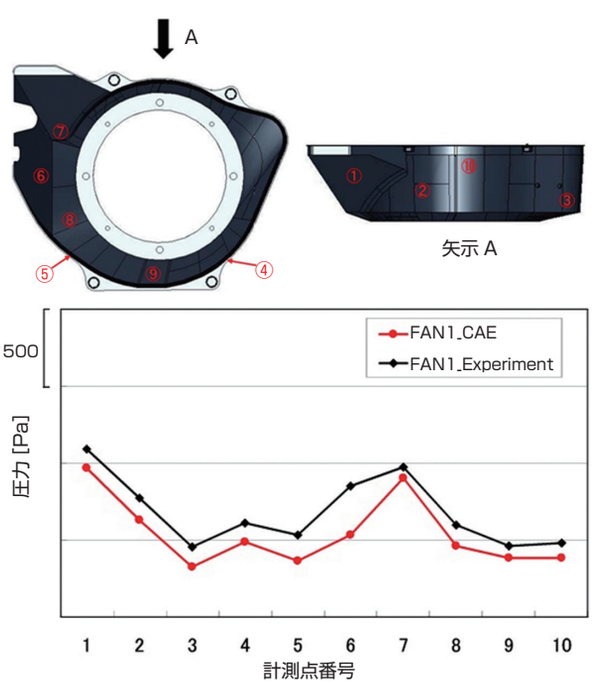


図 12　Pressure distribution of blower housing

(3) 音圧スペクトル解析

ファンを「FAN1」として、リコイルスタータ正面の大気流入の影響を受けない位置における音圧スペクトルの実験結果と解析結果の比較を図13に示す。

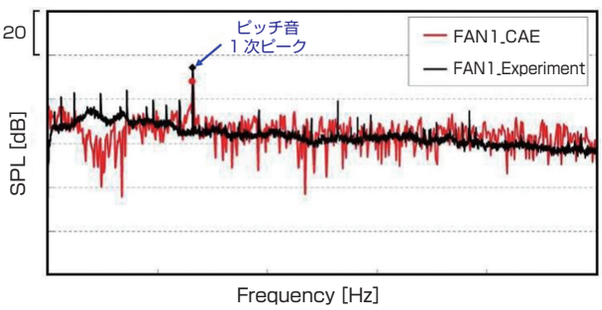


図 13　Sound pressure spectrum（FAN1）

ピッチ音の1次ピークが解析と実験で同じ周波数に現れることを確認し、そのピークは全周波数帯で解析値実験値共に最も高い音圧レベルとなった。

今回の騒音解析手法では、空気の流れ場から圧力変動を読み取っており、ファン周りの圧力レベルを考えると、各周波数での音圧レベルに幅を持つことが解析結果から確認できる。また、ピッチ音1次ピークより低周波側で、実験値のSPL（Sound Pressure Level）値が解析値より高くなっている。これは、モータによる影響と実験装置の機械的騒音によるものと確認している。高周波帯においては要素サイズとファンの回転分解能を調整することで、必要な周波数帯まで精度良く一致した。

4.2　流体騒音解析の活用事例（冷却ファンの設計検討）

冷却に必要な風量の向上、翼による昇圧の確保、トルク損失低減など流体解析でファン性能を洞察し、今回構築した流体騒音解析から低騒音化検討を行った。

4.2.1　冷却風構造の確認

ファンの最も重要な役割は、冷却対象であるシリンダヘッドに適当な冷却空気を送ることである。このときの流れの様子を把握することが、設計において重要である。図14に、シリンダヘッド周りの冷却空気風速の解析結果を示す。シロッコファンを用いたこの開発エンジンでは、シリンダヘッド周りに満遍無く冷却空気が送られていることが確認できる。また、この解析結果より、空気が逆流していると考えられる箇所が確認できた（図15）。実験にて、この位置の空気の流れを計測したところ、同様の箇所に逆流が確認できた。

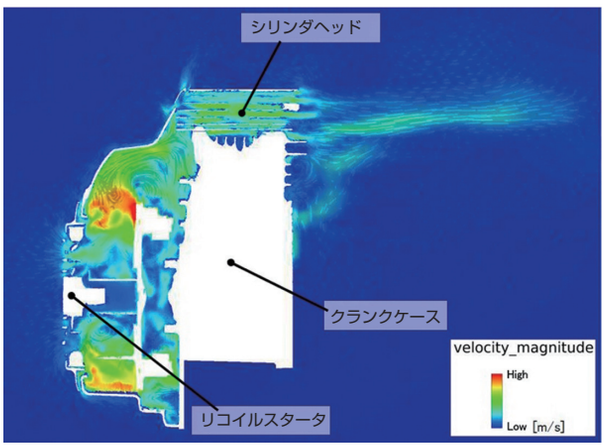


図 14　CAE analysis result（velocity）

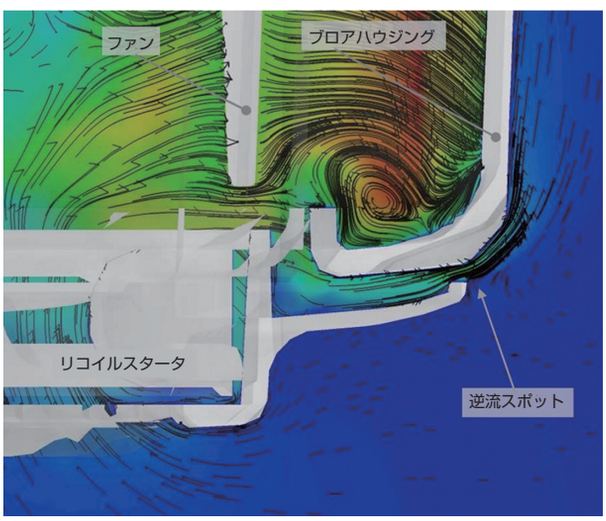


図 15　Backflow spot（velocity）

4.2.2　翼形状の違いによる風量への影響

シロッコファン「FAN-A」、ターボファン「FAN-B」、「FAN-A」の翼プロフィールを変更したもの「FAN-C」、「FAN-A」を相似倍縮小したもの「FAN-D」の4形状を製作し風量を比較した（図16）。図17に各形状の風量差を示す。

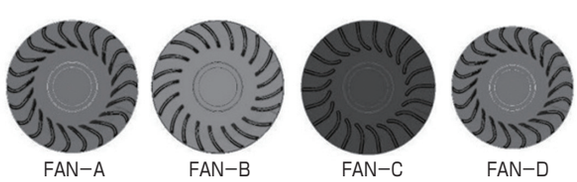


図 16　Cooling fan type

図11と同様に、解析値は実験値に比べて同割合（約30%）で低い値となり、その解析値の仕様差は約2%程度であった。

「FAN-A」は、生産品の相似設計形状である。ファン選定にあたっては比速度を目安にしており、本件はターボファンの使用領域ではないが、翼端圧力が低いことで低騒音化が予測されることから「FAN-B」を試みた。風量は大幅に減少し基準を満たさなかった。しかしながら、音圧レベルが大幅に低下したことは大変魅力的であり、今後ターボファンの比速度域を使用するエンジンを開発する場合、採用の検討を行う。

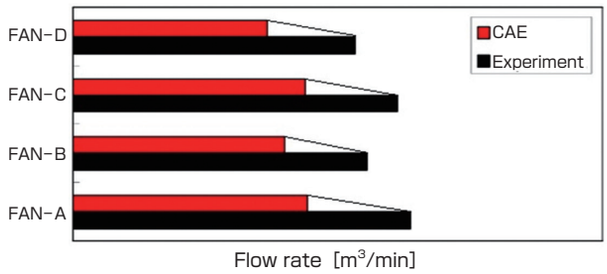


図 17　Flow rate of cooling fan

「FAN-C」に関しては、「FAN-A」に対して翼出口角度をターボファンに近い形状にしたもので、騒音・風量共に低減したが、風量は基準を満たさないほどではなかった。

「FAN-D」は相似ファンの比例法則によって、ファン外径は風量に大きく影響することがわかり、冷却基準を満たすことができなかった。

4.2.3　羽枚数による影響

解析モデルにて、羽の枚数を1枚少なくした場合のSPLへの影響を確認する。

図18は、図16中の「FAN-C」の解析モデル（羽22枚）と、「FAN-C」から羽枚数を変えた実験用ファン（羽23枚）のSPLを比較したものである。ピッチ音の1次ピークの差は、エンジン回転数3600 rpmで60 Hzと算出され、実際に、解析値のピークは60 Hz低く現れた。

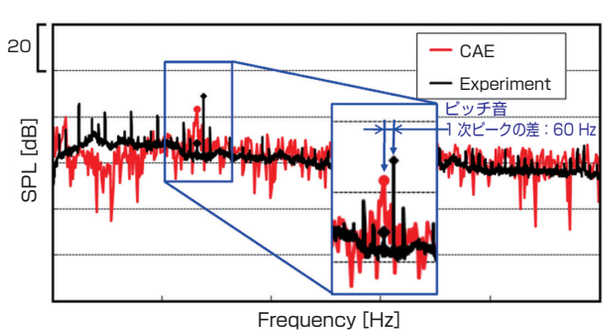


図 18　Sound pressure spectrum（number of blades）

このことから、人間がより不快に感じやすい1 kHz帯にピッチ音1次ピークを持つ「FAN-A」から「FAN-D」に対して、羽枚数を倍に増やした場合、等

倍の周波数で1次ピークが現れて聴感が良くなるのではないかと考えた。この考えを基にして「FAN-E」を図19のように設計した。

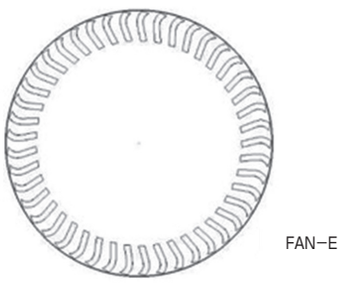


図 19　Blades of FAN-E

図20に、「FAN-E」の解析結果を示す。基準としている「FAN-A」から倍の周波数でピッチ音1次ピークが見られた。さらに「FAN-A」と「FAN-E」を比較した実験値（図21）より、「FAN-E」は1次ピークの音圧レベルが約18dB低いことがわかったが、高周波側で全体的に音圧レベルが高くなっていることから、オーバーオール値は、約2 dBの低下となった。1次ピークは設計通り、高波域で出ることを確認した。エンジンの燃焼運転時にどのような聴感になるか、官能評価を用いた試験を行っていく。

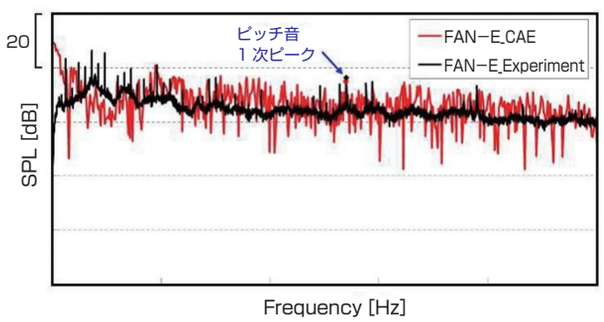


図 20　Sound pressure spectrum（FAN-E）

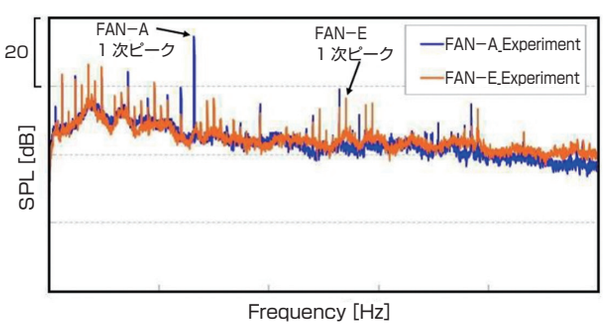


図 21　Sound pressure spectrum
（FAN-A and FAN-E）

4.2.4　ブロワハウジング形状の影響

現状のブロアハウジング形状はファンによる冷却空気を受け止める形状（図22）である。瞬時に、舌部の広い領域で圧力振幅が生じている。そこで、舌部形状を図23のように変更することで、圧力振幅領域を狭くして低騒音化を図った。

この舌部形状の変更による効果は、ピッチ音1次ピークで約15 dBの低減、オーバーオール値で約2 dBの低減となった。この実験結果を図24に示す。

さらに、風量は約6.5%増加した。これは図23の速度ベクトルで見てみると、舌部形状に沿って冷却空気が整流されているからと考えられる。

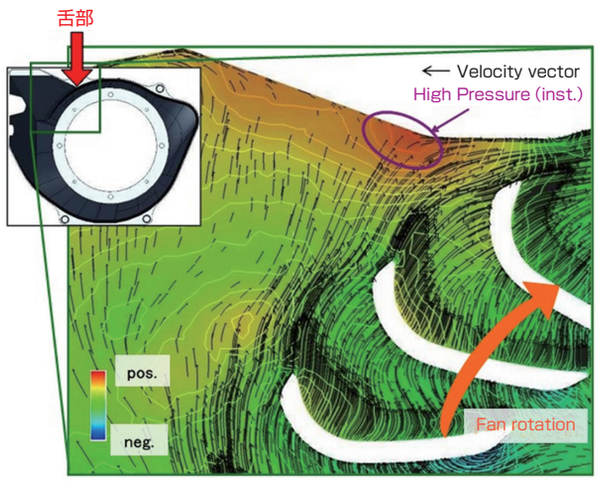


図 22　Pressure distribution map
（original blower housing）

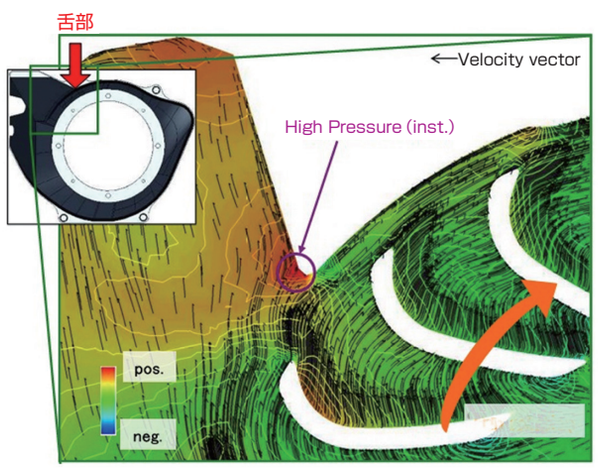


図 23　Pressure distribution map
（new blower housing）

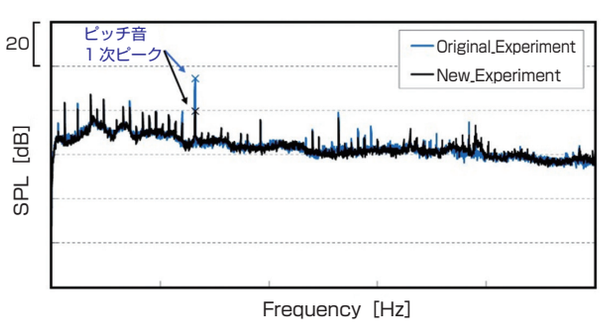


図 24　Sound pressure spectrum（experiment）

4.3 流体騒音解析のまとめ

圧力の分布の様子や流速の状態、渦エネルギー発生の様子など騒音発生メカニズムを洞察しつつ、音響スペクトル解析で音圧レベルに関して一定の評価ができるようになった。

設計者が行える流体騒音解析環境を構築したことで、数多くのファン形状やブロワハウジング形状の検討が可能になった。大胆な形状変更も可能になり、デザイン性を兼ね備えた設計など、設計者CAEとしての方向性を見出すことができた。

また、変更形状の組み合わせから、翼と舌部のパラメータが各評価要素に与える影響を確認し、データを蓄積した。このようなノウハウを得たことで、次期開発では外観形状をデザインする段階からファンとブロワハウジングの組合せ性能を予測することができると考える。

5. あとがき

第1報の産業機器用エンジン開発におけるCAE活用のアップデートとして、「非線形構造解析ツール」と「流体騒音解析ツール」の導入と設計者活用展開について紹介した。

設計者によるCAE活用も定着しつつあり、エンジン開発における重要なツールとなっている。一方、各設計者が自由にCAEを活用するため、解析手法もまちまちであるという課題がある。今後は、各設計者が実施した解析案件の手法や結果を、組織知として共有・蓄積し、設計者CAEの質の向上を図っていく。

この場をお借りして、関係各位のご尽力に対し厚く御礼申し上げます。

参考文献

(1) 柿崎敬一, 杉浦規郎：産業機器用エンジン開発におけるCAEの活用, スバル技報, No.41, p.194-200（2014）

【著　者】

杉浦　規郎

北嶋　祐介

近年のスバルの車体　取り組み紹介

Introduction of SUBARU BODY in Recent Years

柳　生　幸　徳*　Yukinori YAGYU
綾　部　俊　宏*　Toshihiro AYABE
青　田　裕　之*　Hiroyuki AOTA
今　田　晴　之*　Haruyuki IMADA
五十嵐　正　典*　Masanori IGARASHI

抄　録

スバル車は衝突安全性能の高さや、走りの良さで好評を頂いている。上述の性能には、車体骨格（ボディ）の強度や剛性が重要な鍵を握り、高強度、高剛性、軽量化の3つの要素を主体にバランス良く開発する事が求められる。本稿では、既販車に対する各要素のポイントを説明しつつ、当社の車体骨格を紹介する。さらに、5代目インプレッサから刷新するスバルグローバルプラットフォームの考えや構造についても紹介する。本構造は、さらなる安全性能へ向けたポテンシャルの向上、動的質感、開発の合理化にも配慮したスバルの次世代商品を担う新プラットフォームである。また合わせて、設計として日頃取組んでいるボディ構成部品の生産性向上の取り組みを紹介し、性能向上との両立へ向けた活動についても述べる。

Abstract

Subaru is highly evaluated for its high crash safety and fine driving performance vehicles. Strength and stiffness of body structures are the key to achieving the above performances, and three factors of high strength, high stiffness and weight reduction need to be developed with good balance. This document shows Subaru's body structures while explaining each factor on current models. Also the concept and structures of "SUBARU GLOBAL PLATFORM" renovated for 5th generation Impreza are introduced. This platform is a Subaru's next generation platform considered to further improve the safety and drive performances and to streamline vehicle development. And our daily actions as body design engineers to improve productivity of body structure parts and our efforts also to improve vehicle performances are described.

1.　まえがき

車体骨格（ボディ）は車両の屋台骨であり、性能を司る重要な部品の1つである。年々、各国の衝突評価はより厳しく改変されており、また操安・振騒性能についても、各社力を入れている。このため近年、各社ともにボディ性能は著しく向上しており、その中で優位性を保ったボディを開発し続けるには、多大な努力を要する。

また昨今は環境性能への配慮から、前述の性能向上に加えて、軽量化という相反する課題に今まで以上に注力する必要がある。

このような厳しい環境の中、当社は性能と軽量化を高レベルに両立した､スバルらしいボディを突き詰め、製品化する事に力を注いできた。

本稿では2010年に寄稿した本書『スバルの車体、衝突安全技術の紹介』以降の商品群における、性能向上、軽量化の取り組みについて記述する。また、初期設計時点から生産性合理化へも配慮する取り組みを紹介する。

さらに、先日公表したスバルグローバルプラットフォームの特徴についてもふれる。

2.　車体剛性向上の取り組み

2.1　車体剛性の考え方

車両の操舵性、静粛性を向上するには、車両を構成するサスペンションなどの機能部品を効率良く作動させる必要がある。そのためには、サスペンションの取り付け部剛性向上はもとより、車体全体の剛性を高めることが重要となる。全体剛性が高ければ、車両の質量を効果的に使い、サスをしっかりストロークさせる

＊1 車体設計部

ことで、不快な振動を抑え、快適な乗り心地が実現できる。また、転舵時の前後サスの荷重伝達がスムーズとなることで、操縦者の意のままに反応する、心地良いハンドルリングを演出できる。さらに、ドアの閉まり性が向上する等、車両全体の質感が上がる。

当社では、インプレッサをベースとして、目標性能に応じて補剛アイテムの組み合わせを変え、車に応じた剛性を実現している。図1に、車種ごとのねじり剛性の変遷を示す。車格とモデルイヤーに応じて、ねじり剛性を高めている。

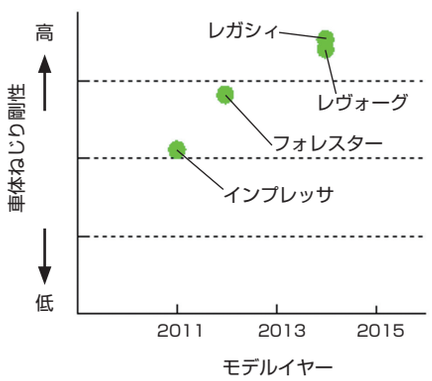


図１　車体ねじり剛性の変遷

2.2　補剛アイテムの紹介

表1に各車の補剛アイテム一覧を示す。インプレッサを起点として、車格に応じて補剛アイテムの採用数を順次増やすことで、図1で示した各車のねらいの車体剛性を実現している。

表１　各車のアイテム一覧

	No.	補剛アイテム	2011 インプレッサ	2012 フォレスター	2014 レヴォーグ	2014 レガシィ
車体骨格	①	フロントサス取付ブラケット補剛	採用			
	②	フロントピラー補剛		採用		
	③	トルクボックス補剛	採用			
	④	ガセットフレームサイドリヤ	採用			
	⑤	リヤゲート開口補剛		採用		
	⑥	スカート形状スムーズ化			採用	
	⑦	断面発泡剤				採用
艤装	⑧	ステーリヤフロア	採用			
	⑨	ステーリヤフレーム		採用		
	⑩	サポートサブフレームリヤ			採用	

以下、レガシィを例に補剛アイテムを紹介する（図2～図6）。

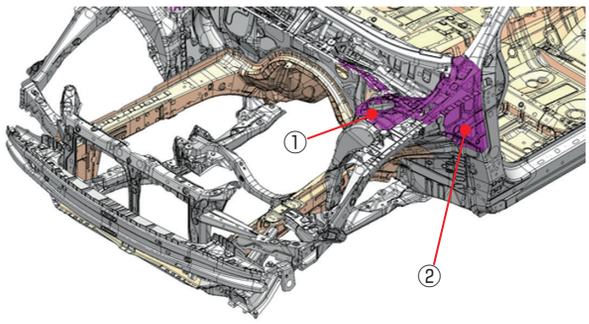


図２　フロントストラット廻り補剛

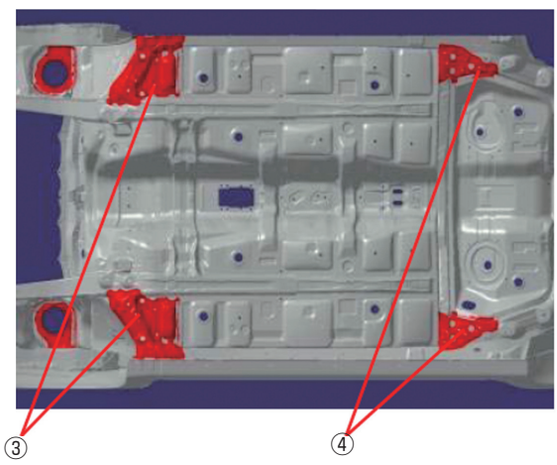


図３　床下骨格補剛

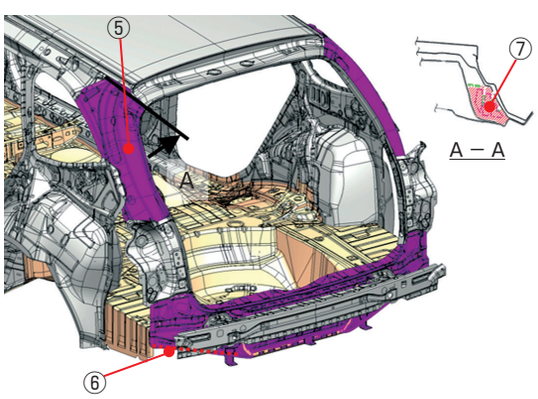


図４　リヤゲート廻り補剛

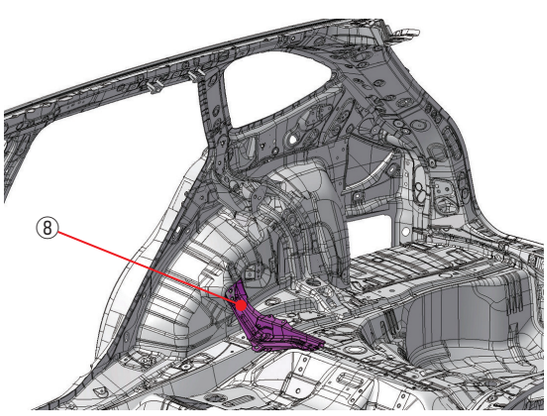


図５　リヤフロア上艤装品

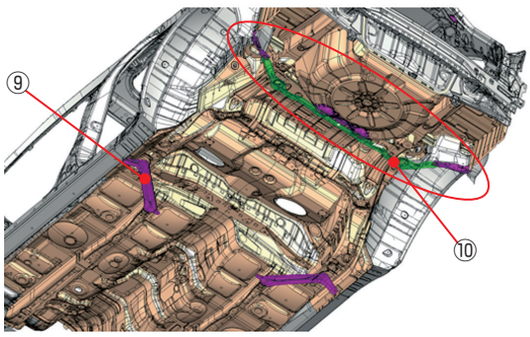


図６　床下艤装品

各補剛アイテムのねらいは以下の通りである。

①：フロントサス取付ブラケット補剛
　マウントを固めることでサスペンションをしっかりと働かせ、乗り心地を向上する。
②：フロントピラー補剛
　トップマウントとフロントピラーの結合を強化し、トップマウント部の変形を抑制。
③：トルクボックス補剛
　フロントフレームとサイドシルの結合を強化し、フレームのねじれを抑制。
④：ガセットフレームサイドリヤ設定
　リヤフレームをつなぐ三角形の部材を設定し、リヤフレームの横曲げ、ねじり剛性を向上。
⑤：リヤゲート開口補剛
　リヤゲートのコーナー部をセパレーターで固め、ゲート開口の変形を抑制。車体全体のねじり剛性を向上する。
⑥：スカート形状スムーズ化
　スペアタイヤパンからサイドストラクチャをつなぐスカートの稜線をストレートにすることで、リヤゲート開口の変形を抑制する。
⑦：断面発泡剤
　前述⑤のセパレーター（板金）に代えて、高剛性の断面発泡剤を適用し、軽量化と剛性向上を両立する。
⑧：ステーリヤフロア設定
　フロアクロスメンバー、リヤフレーム上面、ホイールエプロンを結合し、リヤフレームのねじれ変形を抑制する。
⑨：ステーリヤフレーム設定
　前述④のガセットを補助し、リヤフレームの横曲げ、ねじり剛性をさらに向上する。
⑩：サポートサブフレームリヤ設定
　左右のホイールエプロン、リヤフレーム、フロアを結合し、車体全体のねじり剛性を向上する。

3.　衝突安全と軽量化の両立

3.1　衝突安全と高張力鋼板適用の考え方

　軽量化を促進するには、より高張力な鋼板を採用したいが、高張力になるほど圧壊モードが安定せず、衝突エネルギーを安定して吸収しづらい傾向にある。
　そこで、衝突エネルギー吸収のために潰すゾーンは、圧壊モードのコントロールが容易な590 MPaまでの高張力鋼板（ハイテン）を使用する。また、乗員保護のために潰さないキャビンに対しては、必要強度と成形性に応じて、590 MPaから1470 MPaホットプレスまでの、より高張力な鋼板を適用し、軽量化を図っている（図7）。この考え方は、2011インプレッサから2014レガシィまで、共通思想である。

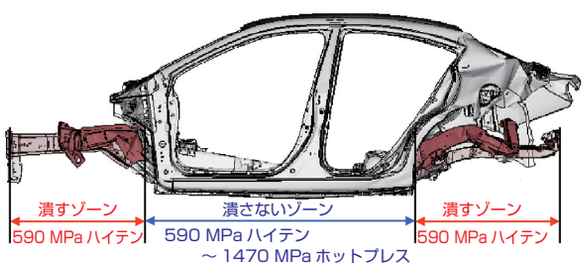


図７　衝突と材料の考え方

3.2　高張力鋼板使用率

　以下に各車系の高張力鋼板の使用率を示す（図８～図11）。 高張力鋼板使用率は、ボデコン＋バンパービームを示してあり、各クロージャーは含まない。

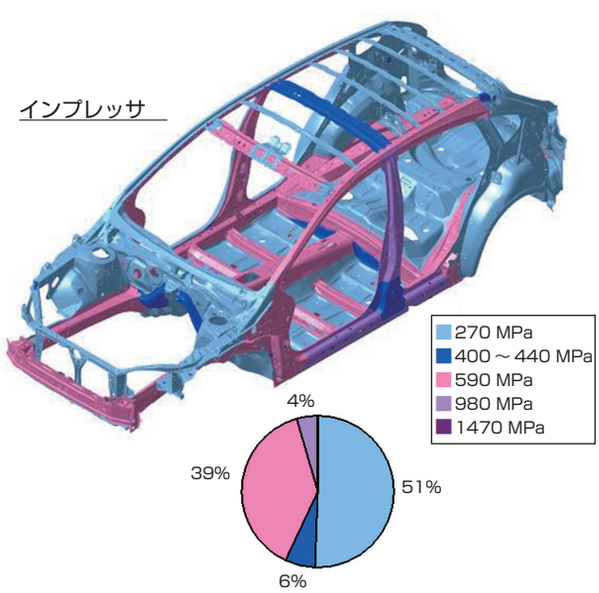


図８　インプレッサの高張力鋼板比率

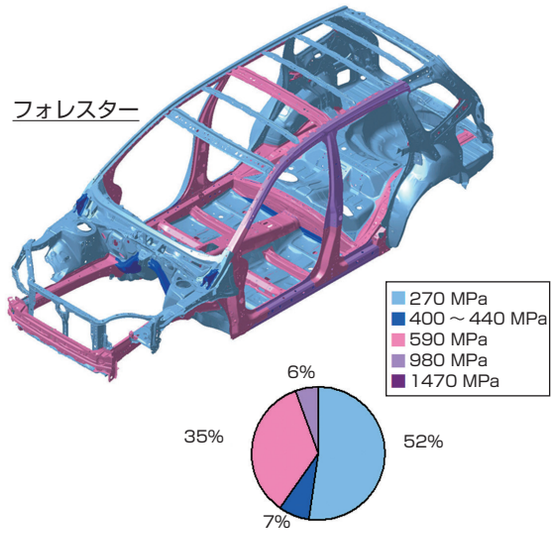


図９　フォレスターの高張力鋼板比率

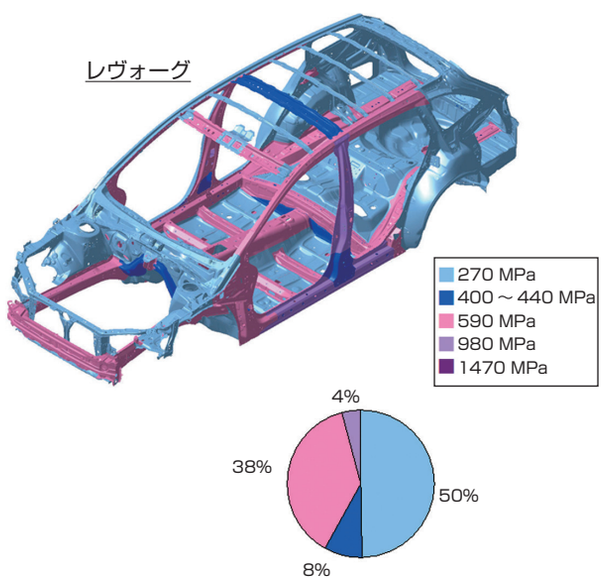


図 10　レヴォーグの高張力鋼板比率

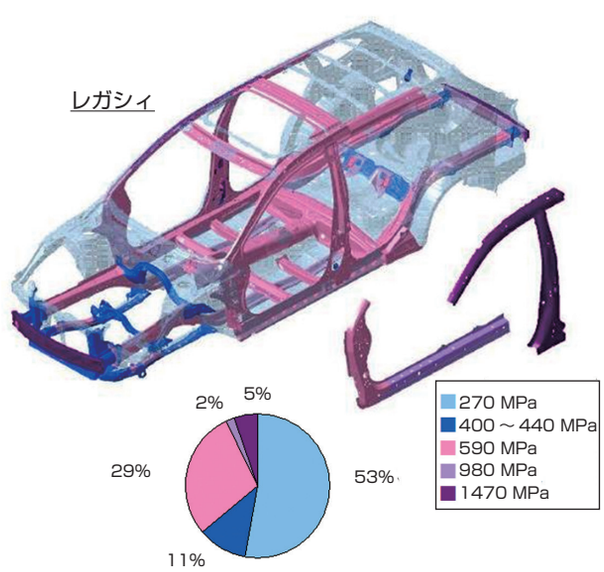


図 11　レガシィの高張力鋼板比率

3.3　ボデコン重量の変遷

主要車体骨格の超高張力鋼板の採用拡大、骨格断面形状の最適化、骨格結合部の合理化により、当社の車体は高い衝突安全性能、車体剛性を備えつつ、各セグメントにおいてトップクラスの軽量化を実現している。

表１は、車両諸元から算術する３面和(※)とボデコン重量比較表である。

※：３面和=L×W+L×H+W×H（m^2）

【L=全長、W=全幅（ミラー除く）、H=全高－最低地上高】

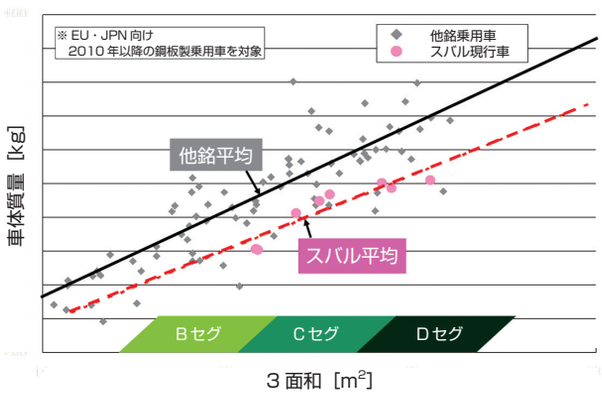


図 12　スバル車のボデコン重量

4.　生産性合理化の取組み

車体部品を設計するにあたり、性能・質量以外に、生産合理性も同時に作り込んでいく必要がある。設計者としては、

・いかに少ない材料で、
・いかに短時間で、
・いかに少ない金型・治具で、

生産出来る形状、構造にできるかがポイントになる。

当社では、車体設計部の中に生産技術の専門チームを設定し、設計初期段階から生産性に配慮した構造を織り込む取り組みをしている。具体的取り組みを以下で紹介する。

4.1　材料を合理的に使う取り組み

性能不変で、材料を合理的に使うには、主に以下の3つの手法がある。

①成形グレードダウン
②材料歩留りの向上
③スクラップ材の活用

それぞれについて、以下で紹介する。

4.1.1　成形グレードダウン

軟鋼（270 MPaクラス）には、材料の伸びによってC～Gグレードに分類されており、C→Gグレードになるに従い成形性は良くなるが、材料単価は高くなる。

近年は成形シミュレーションの活用により成形性改善の技術が進み、基本的にCまたはDグレードが大半であり、深絞りの難成形部品にのみEグレードを使っている。今後の開発では、さらにEグレード撤廃を目指して取組んでいる。

4.1.2　材料歩留りの向上

コイル材からいかに無駄なく部品を取れるかが、材料歩留り向上の取り組みである。部品の最終形状から、展開形状をシミュレーションで正確に予測し、効率の良い板取りとすることで、歩留りを向上させている。

また、コイルの端部をそのまま製品の外形ラインにする“カットレス”も積極的に採用している。その際、外形ラインの公差が大きくなるので、部品同士が干渉等しないように隙を取る等の工夫を織り込んでいる。

さらにBLPI（ブランクピアス）型やPRG（プログレッシブ）型では、製品同士のピッチをゼロにすることで、スクラップ材（製品として使わない部分）を出さない手法を織り込んでいるものもある。

これらの取組みにより現在では、65%以上の歩留り率（製品重量÷材料重量）が安定的に出るようになっている。**図13**に、2005年以降の歩留りの推移を示す。

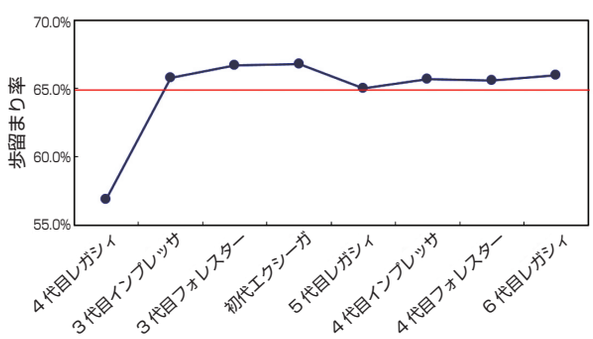


図 13　平均歩留り率の推移

4.1.3　スクラップ材の活用

スクラップ材活用とは、大物プレス部品のスクラップ材を使って、別の部品を作ることである。主にパネルサイドアウターのドア開口部のスクラップ材を使うことが多い。Dピラー周りやホイルエプロン周りの、比較的小さな部品に採用している（**図14**）。スクラップ材のサイズに収まるように、設計初期から部品形状に配慮した設計を行っている。

4.2　合理的に部品を作る取り組み

4.2.1　プレス加工の合理化

プレス加工を合理化する手法として、主に以下が挙げられる。

①　1個製作あたりのプレス速度を上げる
②　プレス1回あたりの部品取り数を増やす

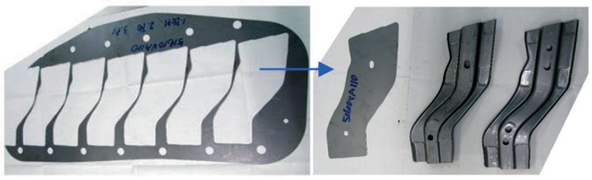


図 14　スクラップ材活用の例（ホイルエプロン FF）

①の手法は主に、1製品製作当たりのプレス速度に優れる、PRG（プログレッシブ）型化の促進である。**図15**に、開発毎にDR（ドロー）型→FO（フォーム）型→PRG型と、部品の取り方の工夫によって、工程変更を実施していった事例を示す。

図 15　成形工程改善の例（DR → FO → PRG）
部品名：ブラケットバンパービーム F

②の手法としては、左右、または異なる部品を型内で組み合わせて、同時に製作することである。

いずれの手法を選択するにしても、設計初期段階からどの部品をどのような工程で作るかを決めて、型の中で部品のどの部分を繋ぐか、どの方向からプレスするか等、形状に配慮した設計を行っている。

4.2.2　集成工程の合理化

集成工程の所要時間を短縮するには、アーク溶接や、SPW（スポット溶接）打点数を減らすことが効果的である。そのため、最低限のSPW数とするために、部材への荷重の入り方を考慮し、全てのSPWに均等に荷重が入るように留意した設計としている。また極力

アーク溶接は使わず、SPWができる板組になるように配慮している。

4.3　設備（型、集成治具）合理化の取組み

4.3.1　プレス型数削減

当社では“型3活動”と称し、一つの部品を生産するための金型数（工程数）を3型以下にすることを目標としている。図16に、2005年以降の平均工程数の推移を示す。3工程化するために、製品形状や穴位置等の型の制約条件を明確にし、設計初期段階から配慮している。

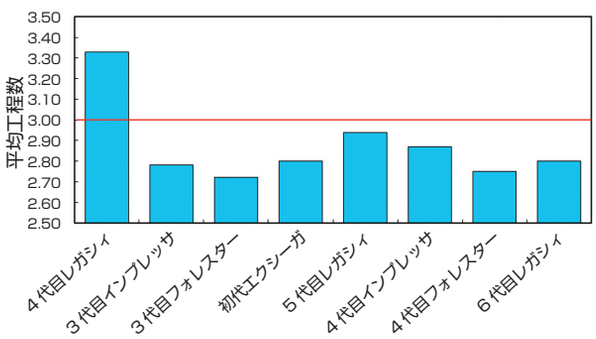


図16　平均工程数の推移

4.3.2　集成設備の合理化

集成設備は汎用設備と専用設備で構成される（図17）。汎用設備はモデルチェンジしても流用する部分（ロボット等）である。汎用設備で製作する部品を設計する際には、生産ラインの制約をよく確認し、出来るだけラインをそのまま使えるように配慮した設計としている。

専用設備とは、例えば意匠部品をセットする治具のような、車種ごとの専用形状部品用の治具設備を指す。1工程でセットして、一度に溶接できるような板組の工夫を行うことで治具数を減らす取り組みをしている。

また近年は、製品受け形状や位置規制用のG.H.（ゲージホール）位置を同一とすることで、複数車種間で治具を共用する取り組みを行っている。この考え方は次のスバルグローバルプラットフォームにも継承されている。

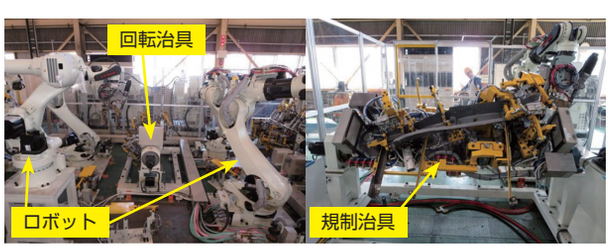


図17　集成治具（左：汎用設備、右：専用設備）

5.　当社のプラットフォームの今までと今後

5.1　プラットフォームの変遷

時代背景と市場ニーズへの対応のために、各世代でプラットフォームの開発・改良を進めてきた。初代レガシィで第1世代プラットフォームを開発し、それをベースにインプレッサ、フォレスターを派生開発した。

その後、2004年に4代目レガシィでプラットフォームを刷新し第2世代プラットフォームへ移行した。このプラットフォームから3代目インプレッサ、3代目フォレスター等を派生開発した（図18）。

5代目レガシィでは振騒性能、衝突安全性能向上を目的に、パワーユニット搭載方式を、従来からのフロントサスクロスメンバーマウントからクレードルマウントに変更。この変更に伴い車体もフロントストラクチャーを刷新している。クレードルの採用により車両大型化のネガを払拭し、期待した性能向上を果している。

現在では車体性能に関する研究開発が進み、構造と性能の相関とそのメカニズムが明らかになりつつある。これまでスバルが培ってきた運動性能や衝突安全をさらに高いステージへと引き上げ、全車統一した設計思想で効率よく開発することを目的に、スバルグローバルプラットフォームと称し新たなプラットフォームを開発した。今年、発表される5代目インプレッサから、第3世代目にあたるスバルグローバルプラットフォームに移行する。

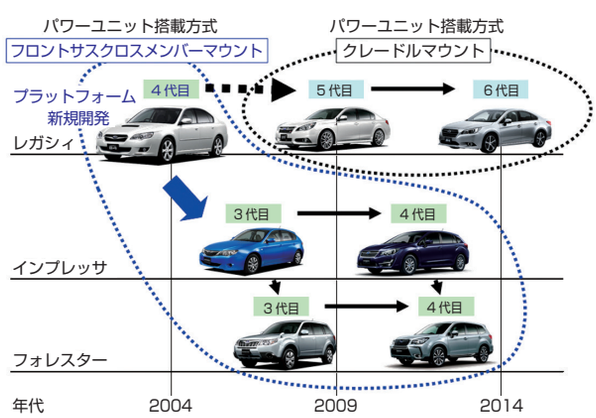


図18　第2世代プラットフォーム採用車種

5.2　スバルグローバルプラットフォーム

5.2.1　概要

新しいプラットフォームの考え方は、従来、各車両開発スタート時に企画していた主要諸元を一括企画することで合理化を図ることがスタートにある。全車系で性能の肝となる部位の設計思想・構造を統一化して、高性能で高品質な商品を作る事を目的とした。部品共用という意味での統一ではない。

ひとつのパワートレーンレイアウト・サス形式・車

体フレームワークを基準とし、共用する所、変化する所を決め、変化させる所は相似形にしている。車両重量範囲を明確にした上で、部品耐力を定め、仕様を最適化した。これにより関係者の誰もが、企画・設計・評価・製造・購買活動をイメージし易い体制を構築し、開発全体を効率化していることも特徴といえる。

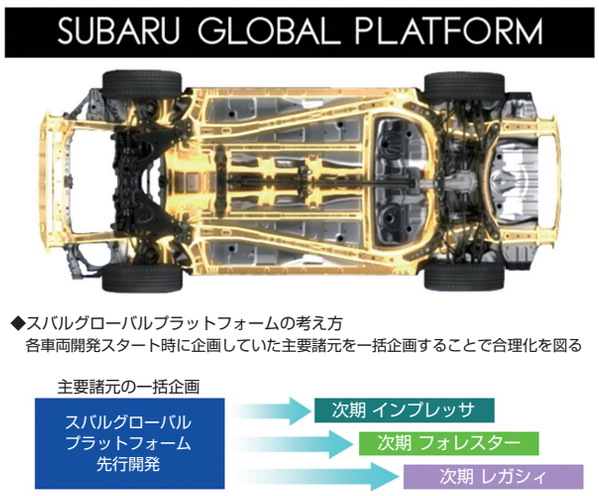


図 19　スバルグローバルプラットフォームの思想

5.2.2　構造の特徴

スバルグローバルプラットフォームにおける車体構造の特徴を以下に示す。

1) フレームワークの刷新

現行車及び開発車のフレームワークの比較を図20に示す。滑らかなフレームの「通し」と荷重伝達経路の多重化により、弾性域では高剛性かつ剛性の連続性を確保する。また外部からの大入力をしっかりと受け止め、効率的よく車体全体に分散しエネルギー吸収力を高めた。

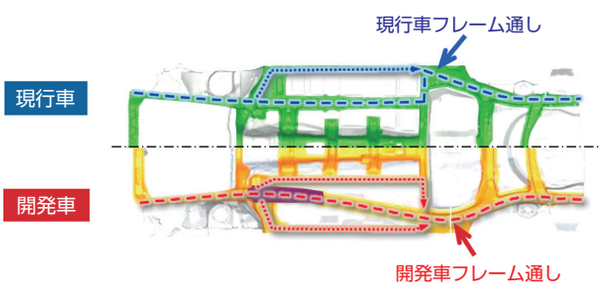


図 20　現行車・開発車のフレームワーク比較

2) 板組見直しによる骨格結合の強化

荷重伝達効率を向上させるため、主要骨格の結合部の板組みを見直した(図21)。特にフロントバルクは製造ラインの車体集成工程を変えて対応した。

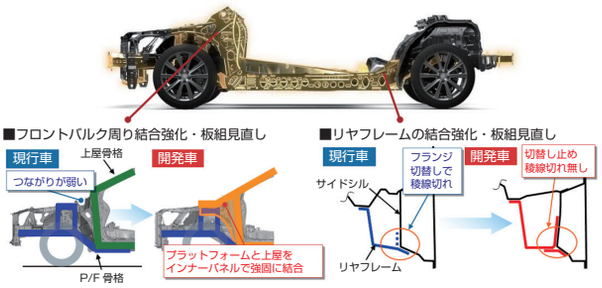


図 21　骨格結合部の強化事例

3) 骨格の断面最適化

周辺部品との整合をはかり、車体全体の強度、剛性バランスを取りながら、骨格そのものの断面最適化を図った。

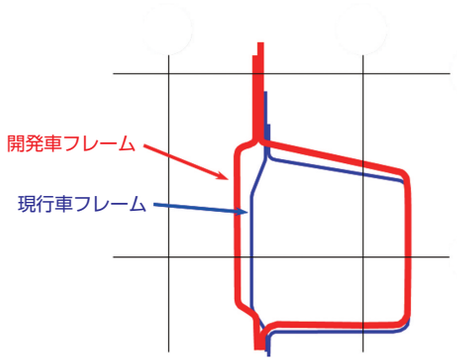


図 22　骨格の断面最適化事例

これら構造・工法の見直しによる合理化で得られた軽量化分を、総合性能向上に活用し、動的質感・安全性能向上のために、剛性・強度を大幅に高めながらも、前述の図12に示した従来からのスバル平均レベルの重量を実現する。

5.2.3　生産性合理化

今後の当社の車体は、“スバルグローバルプラットフォーム”のコンセプトである設計思想の統一と相似形設計を貫いていく。これにより前述した生産性合理化をより伸長することができる。ラインを選ばないフレキシブルな生産を実現させ、生産数の増減に柔軟に対応する体制を構築していく。また材料の高強度化や接着材等の新工法導入等の変化点に対しても、作り易い車(＝精度の出し易い構造)を実現するために、設計、製造がより密接に取り組んでいく。

6.　まとめ

以上のように、スバルの車体構造は一貫した思想の元に設計されており、その考え方はスバルグローバルプラットフォームのベースとなっている。

スバルグローバルプラットフォームは、2025年頃

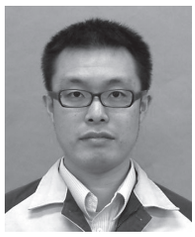
までを見据えた質感や安全性能に加え、自動運転や電動化に対応可能なポテンシャルを持たせており、スバルの新たなコア技術と位置づけ、時代、市場のニーズに合わせ磨きをかけていく。

今後、このプラットフォームを基盤に、スバルのクルマづくりを『かつてないレベルへ進化』させていきたい。

参考文献

(1) 塚田他：新型レガシィ車体構造の開発，スバル技報No.42, p.24-29（2015）

【著　者】


柳生　幸徳

綾部　俊宏

青田　裕之

今田　晴之

五十嵐 正典

成長期（平成初期）のスバル紹介

B4 2.5i（2009年～2014年）

全長×全幅×全高：4730 mm×1780 mm×1505 mm
ホイールベース：2750 mm
エンジン：水平対向4気筒 SOHC 2457 cc
最高出力：125 kw（170 ps）/5600 rpm
最大トルク：229 N−m（23.4 kg−m）/4000 rpm

北米からの要望に応え、室内長・室内幅・室内高さを広くし、十分にゆとりのある室内空間を確保しつつ、最小回転半径を5.5 mと取り回しの良さを実現している。車体の大型化に当たっては、標準ボディを車幅1780 mmで設計し、北米仕様やアウトバックはフェンダーの拡張で1820 mmとしている。2.5LSOHCには縦置きパワーユニットを搭載する量産四輪駆動車として世界初のチェーン式CVT「リニアトロニック（6速マニュアルモード付）」を新採用した。

市販の機構解析ソフトが無い時代にサスペンションのキネマティック解析はどのように行われていたか？

How was SUBARU Handling Kinematic Analysis of Suspension in the Times when There was No Commercial Software?

野　村　　章*
Akira NOMURA

抄　録

現在ではCAEは車両開発には無くてはならないものであるが、1980年以前はコンピュータを用いた設計や解析の黎明期であった。市販の3DのCADや3Dデータを用いたCAEも無かった時代であり、各自動車メーカは自社にてCADやCAEのソフトウエアを内製するしかなかった。本報では市販の機構解析ソフトウエアが無かった時代において、コンピュータを用いたサスペンションのキネマティックス解析をどのように行っていたかを紹介する。机上計算による機構解析の例は少ないので、参考となれば幸いである。

Abstract

Vehicle development must have CAE, but before 1980, it was the dawn of the design and analysis using computers. This paper presents a kinematic analysis method using the closed loop equation of mechanical systems and how SUBARU performed analysis for suspensions using computers in the era when there was no commercial software. I feel grateful if this paper becomes useful because there are few examples of kinematic analysis by desk calculation.

1. まえがき

1966年に発売されたスバル1000のサスペンションは前輪はウイッシュボーン式、後輪はトレーリング式であった。これはリジッド式のサスペンションが主流を占める中において画期的であった。この後を引き継いだレオーネは前輪はストラット式、後輪はセミトレーリング式となった。当時、高速時の安定性において、後輪のキャパシティが非常に重要であることが分かりつつあり、セミトレーリング式にてアームの上反角や後退角を付けることでロールアンダーステアを付けたり、ブッシュを工夫することで後輪のキャパシティを上げることができた。

しかし、車両の高速化やタイヤの進化により、セミトレーリング式の限界も見えてきた。特に高速旋回時のジャッキアップやいわゆる対角ロールと言われる現象などにより後輪のグリップが失われて安定性が低下する問題が発生するようになった。さらにスバルでは標準車高のFWDと悪路走破性を向上させるために車高を上げたAWDにおいても同様のサスペンションを用いるため、AWDにて前述の問題がより顕著となる傾向にあった。

一方、研究実験部ではサスペンション基礎特性（Kinematics and Compliance）の計測装置を自作して、自車のみならず多くの他車サスペンション特性を計測することで相場把握やベンチマーキングが行われていた。これにより車両運動性能とサスペンション基礎特性が結びつくようになり、コーナリングコンプライアンスの概念を用いて、ロールステアやコンプライアンスステアなどのサスペンション特性の目標設定をしていた。車両目標から要素特性目標への落とし込みができるようになり、セミトレーリング式の限界も明らかになってきていた。

この様な状況から新しい後輪サスペンションの開発が大きな技術課題となった。そこで要求特性目標を満足させるために、色々な形式のサスペンションを検討できる詳細な機構解析ソフトが必要となった。しかし、世の中には3Dの機構解析をできる市販ソフトがなく、社内でプログラム開発をすることになった。これらのプログラムは市販の機構解析ソフトが導入され

＊ 車両研究実験第1部

るまで、ジャスティ、アルシオーネSVX、初代レガシィなどのサスペンション検討に使われた。ここでは代表的なデュアルリンクストラット式の例を示す。当時は大型コンピュータを用いて処理を行っていたが、今ではPCでも可能であろう。

2. 機構解析プログラム

このプログラムは、サスペンションの各点を3Dのベクトルで表し、リンク機構の閉ループ方程式とリンク長が不変、剛体の条件、リンク接合点の自由度などを表す拘束条件の式で構成されている。リンク機構の閉ループ方程式とは、リンクと車体が接合点で連結された幾つかの閉ループであり、車体から幾つかのリンクを経由して、再び元の位置に戻る独立のループの事を言う。これら全てをベクトルで表現している。

2.1 機構の自由度

リンク機構は剛体としての節とそれを繋ぐ接合部である対偶で構成されている。サスペンションではリンクやハウジングは節で、ブッシュやストラットなどは対偶に当る。対偶はそれぞれ個別に自由度を持っており、ブッシュ類は球（ピン）では自由度＝3、ストラットなどの円筒対偶は自由度＝2を持っている。

2.2 空間機構の自由度の式

複数の節と対偶を持つ空間機構（リンク系）の自由度Fは、節の数をN、対偶の数をJ、i番目の対偶の自由度をfi（i＝1～J）とすると、次式で表される。

$$F = 6(N-1) - \sum_{i=1}^{J}(6-fi)$$

ストラット式、ウイッシュボーン式、マルチリンク式などのサスペンションは、基本的にはF＝1の自由度である。これは、ホイールストローク方向の自由度（位置）を決めれば、全ての節（リンク）や対偶（ピンなど）の位置が決まることを示している。

2.3 デュアルリンクストラット式の機構

図1及び図2参照

ハウジング内でストラット軸上の位置ベクトルを点***P8***と置き、ハウジング内で各リンク接点の位置ベクトルを点***P2***、点***P4***、点***P6***、点***P7***とする。点***P8***から各点へ向かう単位ベクトルを***e***、***f***、***g***としてハウジングを表すベクトルとする。

ここで、太字斜体はベクトル量、細文字はスカラー量、・はベクトルの内積を表す。

ここで、リンク機構の閉ループ方程式を考える。図2より、閉ループは、リンクAの車体取付点からリンクA、ハウジング、ストラットを経由して車体へ戻る経路、リンクBの車体取付点からリンクB、ハウジング、ストラットを経由して車体に戻る経路、最後にラジアスロッドの車体取付点からラジアスロッド、ハウジング、ストラットを経由して車体に戻る経路の3つに帰着する。これを式で記述すると

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{L} + \mathrm{E}\,\boldsymbol{e} - \mathrm{D}\,\boldsymbol{d} \quad -(\mathrm{i})$$
$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{M} + \mathrm{F}\,\boldsymbol{f} - \mathrm{D}\,\boldsymbol{d} \quad -(\mathrm{ii})$$
$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{N} + \mathrm{G}\,\boldsymbol{g} - \mathrm{D}\,\boldsymbol{d} \quad -(\mathrm{iii})$$

リンクは***A***、***B***、***C***、車体は***N***、***L***、***M***
ハウジングは***e***、***f***、***g***、***h***

但し、***d***も単位ベクトルで、D ***d***は$\overrightarrow{P8P7}$、

E ***e***は$\overrightarrow{P8P2}$、F ***f***は$\overrightarrow{P8P4}$、G ***g***は$\overrightarrow{P8P9}$である。Dはストラットのストローク量を表す。

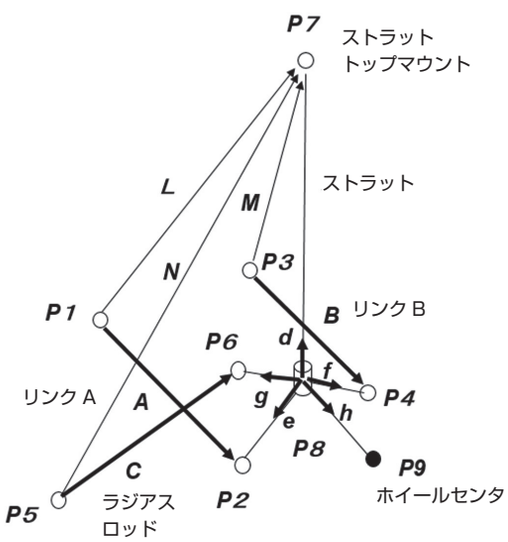


図2　デュアルリンクストラットの閉ループ機構

次に拘束条件の関係を記述する。
各リンクのアーム長さは変化しないので

$$\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{A} = \mathrm{A}^2$$
$$\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{B} = \mathrm{B}^2$$
$$\boldsymbol{C}\cdot\boldsymbol{C} = \mathrm{C}^2$$

ここで、スカラーA、B、Cはリンク長を表す。

この拘束条件に前述の閉ループの式（i）、（ii）、（iii）を代入すれば

$$(\boldsymbol{L} + \mathrm{E}\,\boldsymbol{e} - \mathrm{D}\,\boldsymbol{d})\cdot(\boldsymbol{L} + \mathrm{E}\,\boldsymbol{e} - \mathrm{D}\,\boldsymbol{d}) = \mathrm{A}^2 \quad -(1)$$
$$(\boldsymbol{M} + \mathrm{F}\,\boldsymbol{f} - \mathrm{D}\,\boldsymbol{d})\cdot(\boldsymbol{M} + \mathrm{F}\,\boldsymbol{f} - \mathrm{D}\,\boldsymbol{d}) = \mathrm{B}^2 \quad -(2)$$
$$(\boldsymbol{N} + \mathrm{G}\,\boldsymbol{g} - \mathrm{D}\,\boldsymbol{d})\cdot(\boldsymbol{N} + \mathrm{G}\,\boldsymbol{g} - \mathrm{D}\,\boldsymbol{d}) = \mathrm{C}^2 \quad -(3)$$

となる。

また、$\boldsymbol{e}$、$\boldsymbol{f}$、$\boldsymbol{g}$は単位ベクトルだから

$$\boldsymbol{e}\cdot\boldsymbol{e}=1 \quad -(4)$$

$$\boldsymbol{f}\cdot\boldsymbol{f}=1 \quad -(5)$$

$$\boldsymbol{g}\cdot\boldsymbol{g}=1 \quad -(6)$$

ハウジング内は剛体で位置関係は変化しないので

$$\boldsymbol{e}\cdot\boldsymbol{f}=C_1 \quad -(7)$$

$$\boldsymbol{f}\cdot\boldsymbol{g}=C_2 \quad -(8)$$

$$\boldsymbol{g}\cdot\boldsymbol{e}=C_3 \quad -(9)$$

何故なら、$(\boldsymbol{P2}-\boldsymbol{P6})^2=C_1$

$$(-G\,\boldsymbol{g}+E\,\boldsymbol{e})^2=C_1$$

$$\therefore\ \boldsymbol{g}\cdot\boldsymbol{e}=C_1$$

同様に、$\boldsymbol{e}\cdot\boldsymbol{f}=C_2$、$\boldsymbol{g}\cdot\boldsymbol{e}=C_3$、$C_i$は定数

ハウジングはストラットの円筒対偶により移動方向に拘束されるので

$$\boldsymbol{d}\cdot\boldsymbol{e}=C_4 \quad -(10)$$

$$\boldsymbol{d}\cdot\boldsymbol{f}=C_5 \quad -(11)$$

$$\boldsymbol{d}\cdot\boldsymbol{g}=C_6 \quad -(12)$$

$\boldsymbol{d}$は$\boldsymbol{e}$、$\boldsymbol{f}$、$\boldsymbol{g}$により表されるので従属条件となる。

ここで入力を規定するホイールセンタZを表すためにホイールセンタを点$\boldsymbol{P9}$を作る。ハウジング内のベクトルで記述する補助式を作れば

$$\boldsymbol{h}\cdot\boldsymbol{e}=C_7 \quad -(\mathrm{iv})$$

$$\boldsymbol{h}\cdot\boldsymbol{f}=C_8 \quad -(\mathrm{v})$$

$$\boldsymbol{h}\cdot\boldsymbol{g}=C_9 \quad -(\mathrm{vi})$$

但し、$\boldsymbol{h}$も単位ベクトル

よって、$\boldsymbol{P9}=\boldsymbol{P7}-D\,\boldsymbol{d}+H\,\boldsymbol{h}$　とすれば、

$$\boldsymbol{h}=(\boldsymbol{P9}-\boldsymbol{P7}+D\,\boldsymbol{d})/H \quad -(\mathrm{vii})$$

これを、補助式に代入すれば

$$(\boldsymbol{P9}-\boldsymbol{P7}+D\,\boldsymbol{d})\cdot\boldsymbol{e}=C_7H \quad -(13)$$

$$(\boldsymbol{P9}-\boldsymbol{P7}+D\,\boldsymbol{d})\cdot\boldsymbol{f}=C_8H \quad -(14)$$

$$(\boldsymbol{P9}-\boldsymbol{P7}+D\,\boldsymbol{d})\cdot\boldsymbol{g}=C_9H \quad -(15)$$

以上が、リンク系の閉ループ方程式と拘束条件を記述した式であり、$\boldsymbol{d}$(Xd, Yd, Zd)、$\boldsymbol{e}$(Xe, Ye, Ze)、$\boldsymbol{f}$(Xf, Yf, Zf)、$\boldsymbol{g}$(Xg, Yg, Zg)、D、$\boldsymbol{P9}$(X9, Y9, Z9)を未知数とする連立15元2次方程式となる。

ここで、Z9はリンク系を規定する入力となる。

(Xi, Yi, Zi)は位置ベクトルの座標

これらは非線形となり解けないので、ニュートン法を用いて逐次的に解いてゆく。式(1)～(15)から次の関数を作る。

$$F1=(\boldsymbol{L}+E\,\boldsymbol{e}-D\,\boldsymbol{d})\cdot(\boldsymbol{L}+E\,\boldsymbol{e}-D\,\boldsymbol{d})-A^2$$

$$F2=(\boldsymbol{M}+F\,\boldsymbol{f}-D\,\boldsymbol{d})\cdot(\boldsymbol{M}+F\,\boldsymbol{f}-D\,\boldsymbol{d})-B^2$$

$$\cdot$$

$$\cdot$$

$$F15=(\boldsymbol{P9}-\boldsymbol{P7}+D\,\boldsymbol{d})\cdot\boldsymbol{g}-C_9H$$

これらの関数をゼロと置いて、根の近傍でマクローリン展開する。3次元座標に戻して書くと

F1(Xd, Yd, , , Y9) =

$$F1(Xd0, Yd0, Zd0)+\boldsymbol{\partial F}1/\boldsymbol{\partial Xd}\cdot\Delta Xd\cdots\text{高次}$$

$$\cdot$$

$$\cdot$$

ここで、2次以上の高次成分を無視して各辺をゼロと置けば、ΔXd, ΔYd, , , ΔY9を未知数とする連立1次方程式となり、これを解けば良い。

$$Xd=Xd0+\Delta Xd$$

$$\cdot$$

$$\cdot$$

として、ΔXd, ΔYd, , , ΔY9の全てが、ある誤差より小さくなった時に計算を止める。結局

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{\partial F}1/\boldsymbol{\partial Xd} & \boldsymbol{\partial F}1/\boldsymbol{\partial Td} & \cdots & \boldsymbol{\partial F}1/\boldsymbol{\partial Y}9 \\ \boldsymbol{\partial F}2/\boldsymbol{\partial Yd} & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & & \cdot & \cdot \\ \boldsymbol{\partial F}15/\boldsymbol{\partial Yd} & & \cdots & \boldsymbol{\partial F}15/\boldsymbol{\partial Y}9 \end{pmatrix} *$$

$$\begin{pmatrix} \Delta Xd \\ \Delta Yd \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta Y9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -F^0 1 \\ -F^0 2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ -F^0 15 \end{pmatrix}$$

を解くことになる。

当時の解析結果のグラフやサスペンションの軌跡を図3、図4に示す。

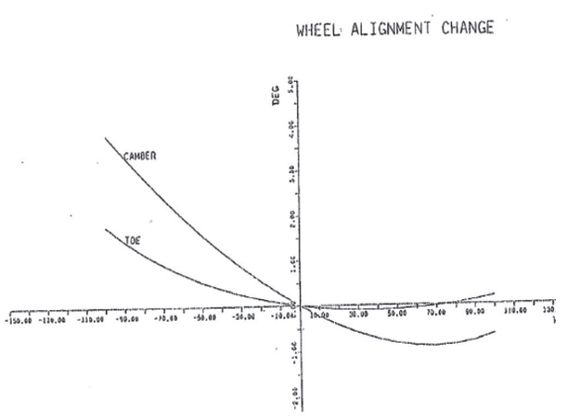


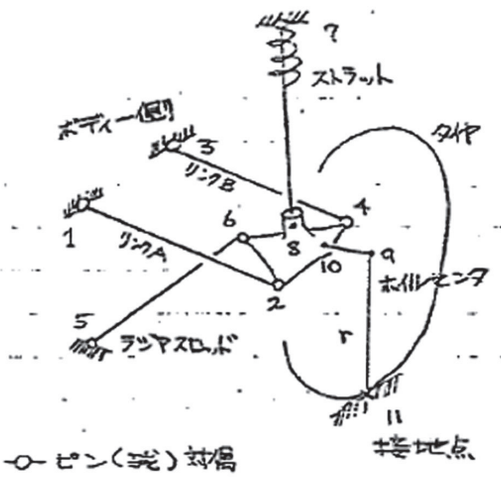
図３　トー、キャンバ変化

No. P82-529

作る プログラムNo.	X34641	部長	点検	作成
名称	デュアル・リンク・ストラット式 サスペンション ジオメトリー	昭和 57・6・21	報告者	

1. 内容　デュアル・リンク（横置き行アーム）ストラット式 サスペンション のジオメトリー変化を求めるプログラムを作成したので報告する。

横置は下図に示す通り。



○ ピン（球）対偶
□ 円筒　〃

図1

入力：各点の座標値（1〜10）
① … リンクAのボディー取付座標点、
② …　〃　ハウジング　〃
③ … リンクBのボディー取付座標点、
④ …　〃　ハウジング　〃
⑤ … ラジアスロッドのボディー側取付座標点、
⑥ …　〃　ハウジング　〃
⑦ … ストラット・トップマウント座標点、
⑧ … ストラット軸上の任意点、
⑨ … ホイル・センター点、
⑩ … スピンドル軸上の任意点、
r … タイヤ有効半径

入力パラメータ：⑨ホイルセンターのZ軸方向増分値と最大（最小）値

出力：（入力パラメータに対する）
各点の座標値（1〜11）、ストラット長、キャンバー角

図1　デュアルリンクサスペンション

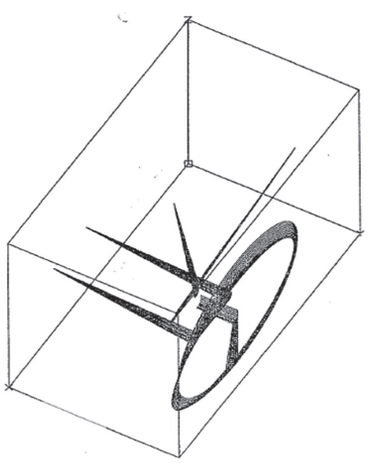


図4　軌跡図

3. まとめ

当社の技術部門に大型コンピュータと本格的な設計用CAD（2Dソフト）が導入されるのは1980年になる。3DのCADも社内で開発していたが、市販のCADに置き換わっていく。市販の機構解析ソフト（ADAMSなど）は1980年代後半から世の中に広く普及するようになり、開発に不可欠なものになっていく。現在、当社でも多くの市販CAEソフトが使われているが、計算結果だけを鵜呑みにすることは危うく、CAEソフトの中で何が行われているかを知ることは、解析結果を精査する上で重要と思われる。

解析ソフトや実験装置を社内にて内製することで、初めて分かる知見も数多くある。世の中に無いものを

作って知見を蓄えることが、次に新しいものを生み出す力になると思われる。

筆者は80年代半ばに技術計算から研究実験へ移り、アルシオーネや初代レガシィの開発に従事していたが、そこからCAEでは分からない多くの事を学ぶことができた。初期検討から実車までを経験出来ることは、小規模メーカの当社ならではの伝統でもある。支えて頂いた関係各位に改めて感謝を申し上げたい。

参考文献

(1) I.D.Faux,M.J.Pratt：Computational Geomery for Design and Manufacture (1980)
(2) 野村：スバル技術本部報告書,デュアルリンクストラット式サスペンション, P82－529 (1982)
(3) スバルレガシィの紹介, スバル技報, No.17, p67－69 (1990)

【著　者】

野村　　章

成長期（平成初期）のスバル紹介

アウトバック 3.6R SI－Cruise (2009年～2014年)

全長×全幅×全高：4775 mm×1820 mm×1605 mm
ホイールベース：2745 mm
エンジン：水平対向6気筒 DOHC 3629 cc
最高出力：191 kw (260 ps)/6000 rpm
最大トルク：335 N－m (34.2 kg－m)/4400 rpm

ツーリングワゴン・B4と共にフルモデルチェンジ。室内長・室内幅・室内高を拡大したことで、全幅は国内向けのスバル車として最大となる1820 mmとなった。新設定の3.6L車は従来のEZ30型から外寸をほ据え置いたままで排気量を600 ccアップしたことで、低速域からの力強いスムースなトルク特性と環境性能を両立し、レギュラーガソリン仕様として経済性にも配慮された。2010年のマイナーチェンジでは、「EyeSight」を進化させ、「EyeSight（Ver.2)」として、衝突回避性能を高めた「プリクラッシュブレーキ」、渋滞走行などの追従走行を高め、先行車が停車した場合には自車も停車し、停止保持状態を維持する「全車速追従機能付きクルーズコントロール」、前方に障害物を検知している状態でのペダル踏み間違いによる誤発進を抑制する「AT誤発進抑制制御」等の先進機能を備えた。

米国自動車排出ガス規制と燃費規制の変遷

Transition of Automobile Emission Regulations and Fuel Economy Requirements in the United States of America

江　川　　洋[*1]　　西　山　三　屋[*2]
Hiroshi EGAWA　　Mitsuya NISHIYAMA

抄　録

米国では、1940年代後半に光化学スモッグが発生し、原因を1950年代後半に確定した。1960年代から自動車排出ガス規制が始まり、その後、継続的な自動車排出ガス規制の強化が繰り返された。その規制強化の歴史をまとめた。

また、1970年代から始まった自動車燃費規制についても、その強化の歴史を綴った。

これら規制強化の歴史は、同時に、技術開発の歴史に繋がる。どのような技術が開発されてきたか、専門家がまとめるとき、この資料を活用されたい。

Abstract

In late 1940s, photochemical smog occurred in the United States of America. The cause of it was discovered in late 1950s. Automobile emission regulations started to be introduced from 1960s. After that, the regulations were frequently tightened for better atmosphere quality.

On the other hand, automobile fuel economy requirements were established in 1970s. This report describes the history of automobile fuel economy requirements too.

Those histories of automobile requirements are related to automobile technology developments. When engineers review these technologies, this report would be helpful.

1. まえがき

米国カリフォルニア州において、光化学スモッグの発生は1940年代後半であったようだ。人類最初の経験であったので、明確な記録はない。それまでに発生していた工場煤煙の延長線のように考えられたようだが、大気汚染の研究が進むにつれて、工場煤煙と異なる被害が明確になり、新たな大気汚染の研究が進んだ。その結果、1952年、Haagen-Smit博士らのチームは、自動車排出ガス中成分が日射を受けて、人に被害を与える成分が生成されることを実験室で突き止めた。しかし、この実験結果が世に認められまでには紆余曲折があった。1955年後半から1956年初めに光化学スモッグ発生メカニズムを証明する論文が複数発表されるに至り、光化学スモッグ論争に終止符が打たれた。

光化学スモッグの発生はカリフォルニア州だけでなく、東部州でも観測された。東部州における被害は、人的被害よりも農作物被害が早くから発生した。葉物野菜の葉っぱが黄褐色の斑点を作って、枯れた。このような現象はカリフォルニア州においても発生していたので、東部州においても光化学スモッグが発生したと言われた。後年、大気質観測が始まり、オゾン濃度によって裏付けられた。

自動車排ガス規制は1960年代に開始し、1970年に大気浄化法改正法（マスキー法）が成立し、大きな転換点であった。しかし、マスキー法を達成する技術がなく、急激な規制強化が見送られ、合衆国排ガス規制はTier 0、Tier 1、Tier 2、Tier 3規制と強化されてきた。一方、カリフォルニア州では、LEV I、LEV II、LEV III規制が順次施行されている。自動車燃費規制は、第3次中東戦争を契機として、CAFE規制及び燃費公表制度、ガソリン浪費税が施行された。特に、CAFE規制は、近年、GHG規制と連動する形で強化されている。

これら自動車関連規制の変遷は自動車技術の発展に

＊1 認証技術部
＊2 富士テクノサービス株式会社

大きな影響を与えてきたことを考え、凡そ80年間の動向をまとめ、報告する。

図1は米国の諸指標の変化を示している。大気汚染主要6種合計とは、一酸化炭素及び鉛、二酸化窒素、オゾン、微粒子、二酸化硫黄である。1970年を基準として、大気汚染物質主要6種の排出量は低減の一途である。自動車排出ガス規制強化や各種産業における有害物質削減の効果である。エネルギー消費量とCO2排出量は相関関係があるように推移している。また、自動車総走行距離がエネルギー消費量やCO2排出量に大きな影響を持っていることは明白である。GDPと人口は増加の一途であるが、自動車の燃費改善によりエネルギー消費やCO2排出量は削減の傾向が明確になりつつある。

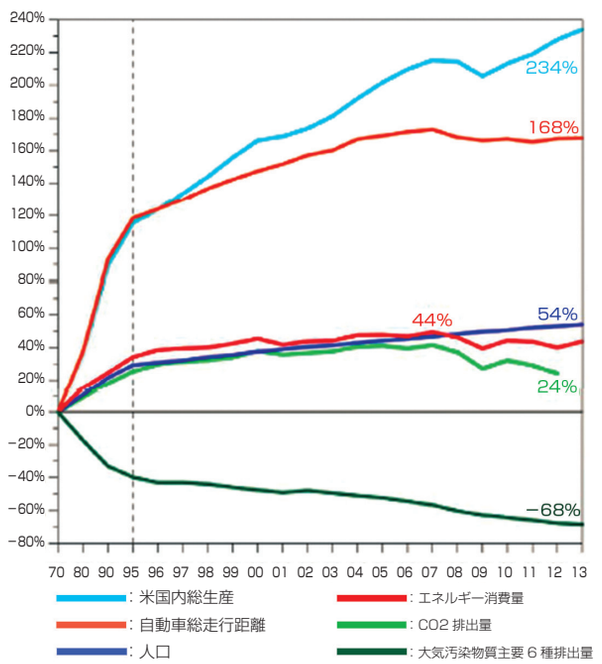


図 1　米国における社会パラメータの変化[1]

2.　1940 ～ 1950年代

1970年4月29日に開催された“Symposium on Aids and Threats to Society from Technology”における講演[2]の中でA. J. Haagen Smit博士は、1940年代後半の光化学スモッグ発生に至った経緯、その対応にあたった行政体制の変遷を述べ、また、博士らの研究成果である光化学スモッグ生成メカニズム解明、そして、1955年9月にそのメカニズムが米国化学協会の会議において発表されたことを述べた。

行政組織として、1946年に大気汚染管理法（カリフォルニア州法）が成立し、ロサンゼルス郡を皮切りに、順次、郡大気汚染管理管区（APCD：Air Pollution Control District）が指定された。ロサンゼルス郡APCDの初代監督官のDr. McCabeは研究を進める中で、ロサンゼルス郡の大気汚染が東部の諸都市で発生している煤煙と異なっていることに気付いた。この頃、Haagen-Smit博士は、「目の炎症等は、石油業界と自動車がもたらす有機物質の光化学的酸化によって生成されるもの。」と考えた。

カリフォルニア州南部には油田があり、小さな製油所にある油水分離槽であっても、1日に1万2千ガロンの石油が蒸発したと言われた。業界全体では、その量は12万ガロン／日になった。また、ロサンゼルス郡とスタンフォード研究所が1951年と1952年に行った研究では、自動車が排気ガスとして排出するHC量が850トン／日、CO量が5000トン／日であると報告している。

このような事実とHaagen-Smit博士の実験結果の積み重ねの結論として、光化学スモッグ生成メカニズムが解明された。

3.　1960年代

表1は、1970年3月、US Department of Health, Education, and Welfare（HEW：米国健康教育厚生省）が発行した資料[3]から抜粋したものである。

表 1　米国の初期自動車排ガス規制値[3]

合衆国				
MY	HC	CO	NOx	エバポ
1966				
1968	275ppm	1.5%		
1970	2.2g/mile	23g/mile		
1971				6g/test
1972				

カリフォルニア州				
MY	HC	CO	NOx	エバポ
1966	275ppm	1.5%		
1968				
1970	2.2g/mile	23g/mile		6g/test
1971			4g/mile	
1972	1.5g/mile		3g/mile	

1963年からクランクケースガス（ブローバイガス）規制がカリフォルニア州で始まり、1966年に自動車排ガス規制が施行され、排ガスHCとCO濃度規制が開始され、合衆国規制は1968年にカリフォルニア州のそれと同じ規制が施行された。1970年には、合衆国とカリフォルニア州同時に排ガス規制が、現在と同様に重量規制に変更、強化された。そして、1970年にエバポ規制が開始され、1971年に排気NOx規制が施行された。

当時排ガス試験に使用されていた走行モードは7モード（**図2**）であった。

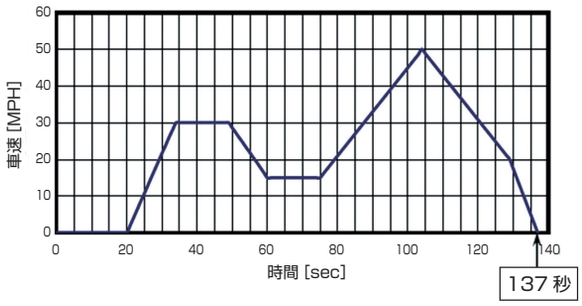


図２　７モード

排ガス試験走行モードは1972MYからLA-4Cモードに変更されるが、LA-4Cモードを開発した経過が1966年8月に開催された会議で発表され、SAE Paper [4] となっている。同文献に書かれている走行ルートを現在の地図に書き写したのが**図３**である。

図３　LA-4C モード開発時走行ルート[4]

出発点はCountry Air Pollution Laboratoryであり、ロサンゼルス市中心部から高速道路110号線を南に走り、そしてExposition Blvd. を東方向へ向かい、S. Western Ave.を北へ、W. Olympic Blvd.を西に走って、ロサンゼルス市中心部に戻る。文献では、この走行ルートをLA-4と書いている。そして、1973年に発行されたSAE Paper 730553にて、「EPAは、LA-4を短縮、小改修してFederal Urban Driving Scheduleを開発した。」と報告している。

1960年代では、自動車燃費はどのような研究がされていたか。**図４**は、EPAが1973年10月に公表した“A Report on Automotive Fuel Economy”と題する報告書[5]から抜粋した。このような試験結果は、前記のFederal Urban Driving Scheduleを開発して、排ガス試験を試行している中で、「排ガス中のCO2も分析することによって、自動車の燃費を計算できることを発見した。」と想像する。

この報告書に記載されている一部の試験は1960年代には始まっていたであろう。EPAの前身であるHEWの時代に、1970年代に起きる燃費改善の下地が作られていったと思われる。

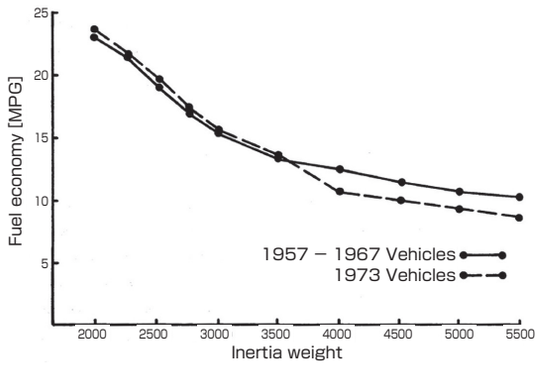


図４　HEW が実施した燃費試験結果[5]

4.　1970年代

自動車排出ガス規制と燃費規制がすごいスピードで強化された。

ブローバイガスは、既に、1968年から排出禁止（排出量ゼロ）になった。

1970MYには、排気ガス規制において、合衆国、カリフォルニア州共に、HC規制値＝2.2 g/mile、CO規制値＝23 g/mileであった。

NOx規制は、カリフォルニア州の施行が1971MYで、規制値＝4.0 g/mileであった。合衆国NOx規制は1973MYから始まり、規制値は3.0 g/mileであった。排ガス試験走行モードは1971MYまでが“7モード”であった。1972MYからLA-4モードに変更された。

そして、エバポ規制値は、合衆国、カリフォルニア州共に6.0 g/testであるが、合衆国とカリフォルニア州で施行時期が異なり、合衆国は1971MYであるが、カリフォルニア州は1970MYからエバポ規制を施行した。

以上までの合衆国行政はHEWの業務であった。

1970年12月、米国の環境行政に二大出来事が起きた。環境保護庁（Environmental Protection Agency：EPA）が12月2日に設立され、大気浄化法1970年改正法（通称：マスキー法）が12月25日に成立した。

環境保護庁は、主に大気質管理、水質管理、土壌管理、廃棄物管理、放射線管理を担当している。

1970年大気浄化法は、大気環境基準の強化とそれを達成するための諸規制を要求した。特に、自動車については、マスキー法規制値（**表２**）と呼ばれる乗用車規制値を制定した。

表２　マスキー法排出ガス規制値

MY	HC	CO	NOx
1975	0.41	3.4	2.0
1976	0.41	3.4	0.4
（参考）NLEV-TLEV			
	0.125 (NMOG)	3.4	0.4

（単位：g/mile）

EPAにとって、最初から大仕事に取り組むことになった。自動車メーカーは自動車排出ガス低減装置の開発進度を報告書(Status Reportと言った。)にまとめ、EPAに提出しなければならない。EPAは自動車メーカーのStatus Reportを分析し、マスキー法規制値の実行可否を判断しなければならない。

1969年から米国輸出を開始した当社も同様であり、自動車技術会の故山岸氏インタビュー記事に詳しく書かれている。その記事には、『問題のマスキー対策に関しては、具体的な技術として、サーマルリアクタ、酸化触媒、還元触媒、三元触媒、EGR、二次空気噴射導入等のハードウエア、それからエンジンから出るベースエミッションを低減するためのエンジンモディフィケーションについて研究した。』と書かれている。ここに挙げられた一つひとつの開発状況をStatus Reportにまとめて、毎年、EPAに提出した。

当時の触媒には、耐久性の問題があったが、もう一つ、エンジンの空燃比を緻密に制御する技術がなかった。

1974年、「マスキー法規制値を達成できる技術がない。」と結論され、1975MYから暫定規制値が決められた。そして、1977年に大気浄化法修正法が成立して、その後の排出ガス規制が決定した。

このように比較すると、マスキー法の先見眼に驚く。

自動車総走行距離が1970年レベルと同じであれば、マスキー法規制値レベルで大気汚染は防止できた可能性があるように感じる。

図5は1972年の大気オゾン環境基準の達成状況を示している[(6)]。計測されていない地域が広いように見えるが、米国である。人口密集地域の面積は国土面積にすれば、数%であろう。しかし、下記の地域において、当時のオキシダント環境基準を超える日があった。

- カリフォルニア州のほぼ全域
- オレゴン州北部からワシントン州南部
- アリゾナ州南部
- コロラド州デンバー市と周辺
- オクラホマ州中央部
- テキサス州・ルイジアナ州・ミシシッピ州・フロリダ州の 沿岸部
- イリノイ州シカゴ市と周辺
- バージニア・メリーランド・デラウエア・ニュージャージ・ニューヨーク・コネチカット・マサチューセッツ諸州　等

マスキー法の挫折によって、自動車排ガス規制が棚上げになった訳ではない。1974 ～ 1979MYの排出ガス規制値を**表3**に記す。

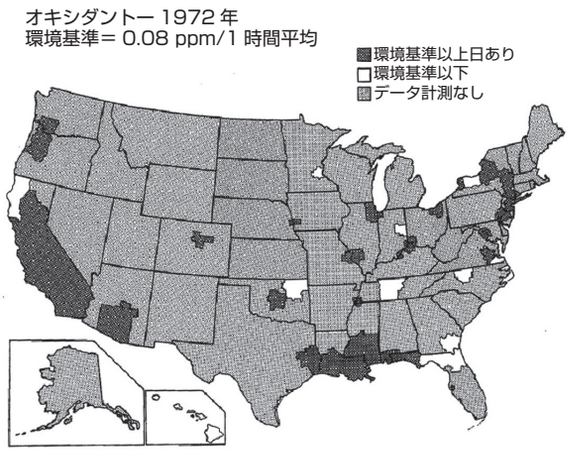


図5　1972年大気汚染分布[(6)]

表3　1974 ～ 1979MYの排出ガス規制値

	合衆国			カリフォルニア州		
MY	HC	CO	NOx	HC	CO	NOx
1974	3.4	39	2	3.2	39	2
1975	1.5	15	3.1	0.9	9	↑
1976	↑	↑	↑	↑	↑	↑
1977	↑	↑	2	0.41	3.4	↑
1978	↑	↑	↑	↑	9	1.5
1979	↑	↑	↑	↑	↑	↑

(単位：g/mile)

なお、排ガス試験方法は、1974MYまでがLA-4 1サイクル(1372秒)で、1975MYから【LA-4　1サイクル＋10分間ソーク＋LA-4　5山】に変更された。

長らく規制に変化がなかったエバポ規制では、1978MYから試験設備がSHEDに変更された。

1977MYまでの試験方法はトラップという活性炭が入った容器をガソリン蒸気が出てきそうなところに接続して、エバポを回収し、試験前後の重量差をエバポ排出量とし、規制値と比較して、合否判定した。その後、試験装置はSHEDという密閉室に変更された。

SHEDの中に自動車を入れて、SHED室内のHC濃度を計測し、試験開始時と終了時の濃度差からエバポ排出量を算出する。Diurnal Breathing Loss試験は1時間(現在は24時間／サイクル)であった。しかしながら、自動車本体からHCが蒸散すると、試験結果がバラツイてしまうので、試験車の枯らし作業が重要になった。

米国メーカーが早くから触媒を使用する自動車を発売したことから、1975年から無鉛ガソリンが販売された。

1973年10月に第四次中東戦争が起こった。21日間の戦争はそれまでの中東戦争に比べ長期にわたり、影響は世界に広がった。アラブ諸国からの原油輸出が止まり、石油ショックが起き、世界が省エネルギーの必要性を認識した。自動車燃費規制は先進各国における

省エネルギー対策の一つになった。その先鞭が米国自動車燃費諸規制である。

米国の自動車燃費規制は、1975年にEnergy Policy and Conservation Actが成立して、企業平均燃費・燃費ガイド・燃費ラベルの3制度の施行が決定された。自動車関連では、全米自動車交通制限速度が1974～1986年の間、55 miles/hourに規定された。また、米国は、国産原油保持を目的に、原油輸入量が図6[7]のように、増加していった。

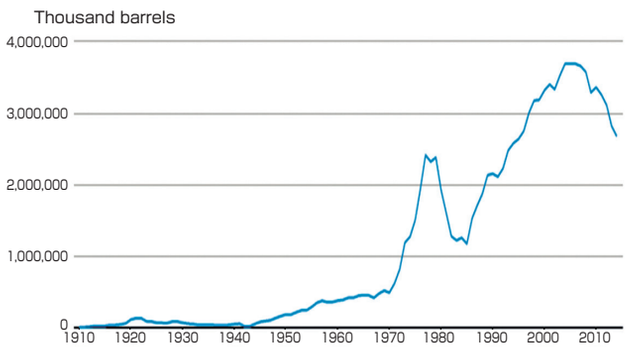


図6　米国の原油輸入量推移[7]

企業平均燃費（Corporate Average Fuel Economy：CAFE）規制は1978MYから始まった。燃費ガイドは、公式には1976MYから発行されたが、EPAは1973年9月にEPA自動車燃費試験結果一覧表を公表した。これは燃費ガイドと同様以上のインパクトを自動車メーカーに与えた。燃費ラベルは1976MYからの施行であった。法律が成立した時期との関連を考えると、EPAの勇み足があったと言える。

しかし、Energy Policy and Conservation Actが成立したことによって、自動車燃費競争が始まったことは事実である。その原因は小型である日本車が注目されたことである。1974MY EPA自動車燃費試験結果一覧表[8]から燃費トップ10を並べる（表4）。

11車種中、日本車が7車種、米国産車が2車種、欧州車が2車種である。燃費公表は、「日本車＝低燃費＝エコノミー」が定着するきっかけになったであろう。

燃費ラベル（図7）[9]は、1976MY車から貼付が始まり、1970年代では、1976MY初版、1977MY第2版、1979MY第3版の改訂があった。

企業平均燃費（Corporate Average Fuel Economy：CAFE）規制は乗用車（Passenger Cars：PC）に対しては1978MYから施行され、軽量トラック（Light Trucks：LT）のCAFE規制は1979MYから始まった。1970年代のCAFE規制値は表5の通りである。

表4　1974MY EPA発表

第1位	HONDA CIVIC	29.1
第2位	TOYOTA COROLLA1	27.1
第3位	DATSUN B210	24.9
第4位	TOYOTA COROLLA1	24.8
第5位	CHEVROLET VEGA	24.6
第6位	TRIUMPH SPITFIRE	23.1
第7位	FORD PINTO	22.8
	MITSUBISHI COLT	22.8
第9位	SUBARU SW	22.7
第10位	VW CONVERTIBLE	22.6
	TOYOTA COROLLA2	22.6

（単位：Miles/Gallon）

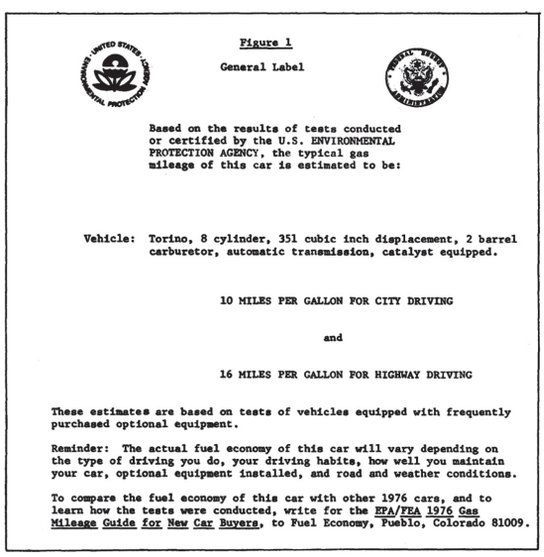


Figure 1

General Label

Based on the results of tests conducted or certified by the U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, the typical gas mileage of this car is estimated to be:

Vehicle: Torino, 8 cylinder, 351 cubic inch displacement, 2 barrel carburetor, automatic transmission, catalyst equipped.

10 MILES PER GALLON FOR CITY DRIVING

and

16 MILES PER GALLON FOR HIGHWAY DRIVING

These estimates are based on tests of vehicles equipped with frequently purchased optional equipment.

Reminder: The actual fuel economy of this car will vary depending on the type of driving you do, your driving habits, how well you maintain your car, optional equipment installed, and road and weather conditions.

To compare the fuel economy of this car with other 1976 cars, and to learn how the tests were conducted, write for the EPA/FEA 1976 Gas Mileage Guide for New Car Buyers, to Fuel Economy, Pueblo, Colorado 81009.

図7　1976MYの燃費ラベル[9]

表5　1978と1979MYの軽量トラックCAFE規制値

MY	乗用車	軽量トラック		
		2WD車	4WD車	Combined
1978	18.0	――――適用なし――――		
1979	19.0	17.2	15.8	17.2

（単位：Miles/Gallon）

CAFE規制値の動きは、時代の様相で紆余曲折することになるが、詳しくは各年代で書いていく。図8は現在までの全体像を示している。

1970年代、もう一つのトピックスはBRAT[10]の発売であろう。BRATの企画はSubaru of America, Inc.（SOA）から提案されたと認識している。

「排ガスはLight Duty Truck（LDT）かなあ～。」という意見がSOAから出ていた。Federal Registerを勉強した。排ガスがLDTならば、燃費上の区分はどうなる。結論として、排ガス：LDT、燃費はMulti-Purpose Vehicles（MPV）となった。図8は乗用車

(Passenger Automobiles)のものであるが、CAFE規制上、MPVはLight Trucksグループに含まれる。

この判断が、Outback、Forester、XVに継承され、現在に至っている。

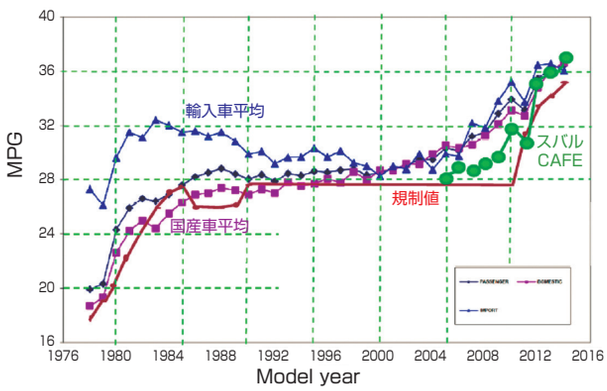


図８　米国乗用車 CAFE の推移

図９　スバル BRAT[10]

5.　1980年代

1980MYで、スバルは、BRATを除き、フルモデルチェンジした。ハッチバックとワゴンに4WDモデルも展開した。他に2ドアセダンと4ドアセダンが展開された。排出ガス低減装置では、SEEC-Tシステムと触媒システムの両方が使われた。触媒は酸化触媒である。1981MYでは、49州販売のLDTを除き、排ガス制御システムは三元触媒＋空燃比フィードバック制御を搭載した。このような排ガス低減装置の変化は排ガス規制値に関連している。

合衆国規制値は、大気浄化法1977年改正法に従って、**表6**の規制値が施行された。大転換はCOとNOxの規制値が半減されたことである。このCOとNOx規制値は、カリフォルニア州規制値もほぼ同値であった。この排ガス規制強化によって、スバルは三元触媒＋空燃比フィードバック制御システムを採用した。当時の燃料供給装置は気化器であり、日立製気化器では、気化器内でガソリンと空気を一次混合する際に空気量をフィードバック制御して、最終空燃比制御を行った。一方、1983MYから採用したCarter-Weber気化器は一次混合時に燃料量をフィードバック制御した。その上、Carter-Weber気化器はバレルが一つであるため、「排ガス試験時のアクセル操作に苦労した。」と当時の実験者が言っていた。

その後、カリフォルニア州では、1980年代末に、大気資源局悲願の0.4 g/mileのNOx排出ガス規制値(**表7**)を施行した。

表６　1980 年代の乗用車排ガス規制値

合衆国

MY	THC	CO	NOx	Evap
1980	0.41	7.0	2.0	6.0
1981	0.41	3.4	1.0	2.0
1982	同上			
1983	同上			

カリフォルニア州

MY		NMHC	CO	NOx	Evap
1980		0.39	9.0	1.0*	2.0＋1.0
1981	A	0.41-0.39	3.4	1.0-1.5	2.0
	B	0.39-0.46	7.0	0.7-1.5	2.0
1982	A	0.39	7.0	0.4-1.0	2.0
	B	0.39-0.46	7.0	0.7-1.5	2.0
1983		0.39-0.46	7.0	0.4-1.0	2.0
規制値距離		50K-100K	100K	50K-100K	50K

(単位：g/mile, K＝1,000 miles)

表７　1988～1989MY カリフォルニア州乗用車排ガス規制値

カリフォルニア州規制値

		NMHC	CO	NOx	Evap
1988	Option1	0.39-0.39	7.0-7.0	0.4-1.0	2.0
	Option2	0.39-0.46	7.0-8.3	0.7-1.0	2.0
1989		0.39-0.39	7.0-7.0	0.4-0.7	2.0
規制値距離		50K-100K	100K	50K-100K	50K

(単位：g/mile, K＝1000 miles)

この排ガス規制強化は、合衆国、カリフォルニア州共に1993MYから始まるTier 1規制、LEV 1規制の布石であったように感じる。

一方、燃費規制は、1970年代が幕開けの時期であったのに対し、1980年代前半は規制強化の時代になった。

CAFE規制は、Energy Policy and Cost Saving Actに従って、乗用車最終規制値である1985MY=27.5MPGに向かって強化された(**表8**)が、その後、停滞してしまう。

一部の高級車ブランドを除く米国輸入車にとって、**表8**の基準値はそれ程厳しいものではなかったが、米国産車にとってはかなり辛い規制値であった。

表８　1980年代CAFE規制値

MY	乗用車	4WD Import
1980	20	14
1981	22	15
1982	24	16
1983	26	17.5
1984	27	18.5
1985	27.5	18.9
1986	26	19.5

1989	26.5	19
1990	27.5	19

（単位：Miles/Gallon）

スバルはBRATを発売して、トラックCAFE基準値対応も必要になった。トラックCAFE基準値は細分化されているが、スバルが対象になる4WD Importの基準値は**表８**の通りである。

4WD Importの基準値は乗用車の基準値に比較し、緩い。軽量トラック4WDの米国産車は非常に大きく、販売台数も多い。米国自動車メーカーにとって、ドル箱車種であるが、規制対応においては厳しい。

燃費関係では、表示燃費（燃費ラベルと燃費ガイド）に大きな変化があった。1970年代は暗中模索であった表示燃費は、1979MYからCity燃費のみになったが、1985MYにCityとHighway燃費表示に変更された。同時に、表示燃費補正係数が決められた。City燃費補正係数は0.90、Highway燃費補正係数は0.78である。これらの補正係数は2007MYまで適用された。

1980年に認証手続きの大転換があった。1979年までは完全EPA & CARB管掌方式であり、Engine Family分類、Emission Data Vehicles（EDV）選定、EDV資格判定、排ガス試験設備・試験手順の適格性など、排ガス申請書に記載されている事項全てについて、EPA & CARBの事前承認が必要であった。これが一転、法規遵守はメーカーの責任、EPA & CARBはメーカーの認証業務進捗を把握し、官庁の仕事がメーカーの業務進捗を妨げないように、且つ、メーカーが法規を逸脱しないように監視する方向に転換した。一方、富士重工の米国排ガス認証業務をチェックする目的で、1983年と1988年にEPA査察を受けた。結果、「指摘事項なし」で無事終了した。

6.　1990年代

EPA排ガス規制は、前述のように、1981MYから始まったTier 0規制が1993MYまで継続した。カリフォルニア規制も1989MYから継続の規制値が適用されて1990年代が始まった。

しかし、連邦議会がClean Air Act 1990年改正法を可決したことにより、大気質の更なる改善の道筋が示された。

1994MYに、合衆国Tier 0規制のフェーズインが開始され、また、カリフォルニア州ではLEV I規制が導入された。

EPA Tier 1規制は**表９**のフェーズイン方式が採用された。

表９　Tier 1 規制フェーズイン基準

1994MY	1995MY	1996MY以降
40%以上	80%以上	全車対応

また、乗用車規制値は、THC=0.41 g/mile、NMHC=0.25 g/mile、CO = 3.4 g/mile、NOx = 0.4 g/mileであり、いよいよマスキー法規制値が施行され、定期的な規制強化が再スタートした。

加えて、EPAにとって厳しい課題が突き付けられていた。北東部州の大気質が一向に改善されなかった。北東部州の特徴は、（米国の中では）各州の面積が小さく、人口が多く、自動車も多い。一つの州が頑張っても、隣の州から汚染物質が流れてくると、大気質は改善されないという特質があった。その対策の一矢がNational Low Emission Vehicle（NLEV）プログラムである。1999MYから北東部13州にカリフォルニア規制対応車を販売する。NMOGフリート平均規制値は**表10**の通りである。

表10　NLEVプログラムNMOGフリート平均規制値

1999MY	2000MY	2001MY以降
0.148 g/mile	0.095 g/mile	0.075 g/mile
(0.113	0.073	0.070)

注：括弧内はカリフォルニア乗用車平均規制値

さらに、1994MYからCold CO規制が導入された。従来は、FTP規制とHighway NOx規制しか無かった訳で、新排ガス試験法＆規制値の追加である。とは言え、走行モードはLA-4である。試験室温度が15°F～25°F（－9℃～－4℃）であり、常温FTPと異なり、UDDS（Urban Dynamometer Driving Schedule：7.5マイル1バッグ試験）である。規制値は10 g/mileである。この規制値は、現在でも、変わっていない。

また、施行は、**表９**に示すフェーズイン方式を採用している。

カリフォルニア排ガス規制もまた、1990年代初頭は、1980年代末期の規制値を踏襲した。しかしながら、1994MYにLow Emission Vehicles（LEV）規制を施行した。従来、新規制導入の緩和手段はフェーズイン方式であったが、LEV規制は、フリート平均NMOG規制値と個車規制値で構成されている（**表11**）。フリート平均NMOG規制値は毎モデルイヤ厳しくなる。個車規

制値は3階層準備された。即ち、TLEV：Transitional Low-Emission Vehicles、LEV：Low-Emission Vehicles、ULEV：Ultra-Low-Emission Vehiclesである。毎モデルイヤ厳しくなるフリート平均NMOG規制値に対応するために、毎モデルイヤ、より厳しい個車規制値の自動車の構成比を増やさなければならない。実に巧みな技の規制である。

表 11　LEV Ⅰプログラム排出ガス規制値

LEV Ⅰ規制フリート平均 NMOG 規制値（5万マイル）		
PC and LDT	1994MY	0.250 g/mile
	1995	0.231
	1996	0.225
	1997	0.202
	1998	0.157
	1999	0.113
	2000	0.073

LEV プログラム個車規制値			
	NMOG	CO	NOx
5万マイル			
TLEV	0.125	3.4	0.4
LEV	0.075	3.4	0.2
ULEV	0.040	1.7	0.2
10万マイル			
TLEV	0.156	4.2	0.6
LEV	0.090	4.3	0.3
ULEV	0.055	2.1	0.3

（単位：g/mile）

LEVプログラムのもう一つの特徴はBanking規定を持っていることである。一つのモデルイヤで平均NMOG値が決定すると、NMOG平均規制値と比較し、過達（平均値が規制値よりも小さい。）であれば、貯金して、後々の借金の埋め合わせに使える。逆に、未達（平均値が規制値よりも大きい。）であれば、借金にして、その後のモデルイヤで過達し、その借金を返済する。LEV規制初モデルイヤの1994MYは、NMOG平均規制値が0.250 g/mileであったので、前モデルイヤのキャリーオーバでも、LEV平均規制値を満たすことができた。スバルのLEV Ⅰプログラムにおける個車規制値対応状況を**表12**に記す。

カリフォルニア州LEV規制対応は、パワーユニット関係初の開発進度検討テーマであった。検討会の結論は、以下であった。

①LEV規制対応開発は、従来にない開発の難しさを感じるので、十分な開発期間を取ること。

②フリート平均規制値に対応するため、TLEVは販売中心車種で出来るだけ早く対応し、クレジットを稼ぐこと。

表 12　スバルの LEV Ⅰプログラム規制対応車種

	1994MY	1995MY	1996MY	1997MY	1998MY	1999MY	2000MY
Tier 0	Justy 1.2L Loyal 1.8L SVX						
Tier 1	Imp. 1.8L Leg. 2.2L	Imp. 1.8L Leg. 2.2L SVX 3.3L	Imp. 1.8/2.2L Leg. 2.5L SVX 3.3L	←			
TLEV			Leg. 2.2L	←	Imp. 2.2L Leg. 2.2/2.5L For. 2.5L	Leg. 2.5L For. 2.5L	
LEV						Imp. 2.2L Leg. 2.2L	全車
ULEV							

Imp.：Impreza, Leg.：Legacy, For.：Forester

認証制度改革に関する1990年代トピックスは排ガスシステムの劣化係数決定方法の変更であろう。そもそも、「劣化係数を適用する。」という法規要件が始まった時期が分からない。1973MYでは、劣化係数要件は施行されていたので、LA-4モード規制が開始された1972MYあたりが有力であるように思う。関連する言葉はUseful Lifeで、5年/5万マイルまで規制値適合が求められた。劣化係数の決定方法として、Approved Mileage Accumulation Procedures（通称AMAサイクル）が制定された。当初、富士重工では、実車・実走行した。5万マイル走行し、その間、5千マイル毎の排ガス試験とメンテナンスポイント（12,500 mileと37,500 mile）でメンテナンス前後試験が行われ、4ケ月を超える月日を要した。その後、CDMを用いた走行が認められ、人的負担が軽減され、安全性が向上した。

一方、排ガス規制が強化され、全ての自動車がエンジンフィードバック制御と触媒を搭載するようになり、排ガスシステム劣化の主体が空燃比フィードバック用センサと触媒になった。このような時代の変化を受けて、劣化係数決定方法を合理的に見直す機運が高まった。その結果、開発された手法がRevised Durability Program（RDP）である。1995MYまでの限定として、個別メーカーの申請をEPAが承認する形でRevised Durability Program Ⅰ（RDP-Ⅰ）制度が開始された。その後、自動車メーカー9社が空燃比フィードバック用センサと触媒の劣化を評価するAlternative Mileage Accumulation Durability Programを提案し、1994 ～ 1998MYの間、採用された。このような経過を踏まえ、EPAはCompliance Assurance Program 2000（CAP2000）の一項目としての耐久試験法を経過して、2004MYから現在の規定に至っている。

一方、燃費関係では、乗用車CAFE基準値が1990MYで27.5MPGに戻されて、2010MYまで据え置かれた。軽量トラックCAFE基準値は、**表13**のように、1990年代の前半に僅かづつ強化されていった。

表 13　1990 年代 4WD Import CAFE 規制値

4WD Import CAFE 基準値	
MY	CAFE 基準値
1990	19.0
1991	19.1
1992	20.2
1993	20.4
1994	20.5
1995	20.6
1996	20.7
- - - - 2000	↑

（単位：Miles/Gallon）

7. 2000年代

現在から見れば、EPA Tier 1規制は中途半端なものであった。カリフォルニア州を除く49州において、大気汚染の程度は大きな差異があった。広大な地域の中で大気汚染が問題である地域は大都市だけであったが、北東部13州は人口密集地域であり、近隣州からの汚染物質流入が単独州では解決できない課題であった。北東部13州が集まって、NorthEast States Coordinated Air Usage Management（NESCAUM：大気流動統合管理北東部州）を設立した。EPAはこのNESCAUMにカリフォルニア州規制を施行することを承認し、北東部州LEV規制が施行された。北東部州LEV規制がさらに、発展し、1999MYから、カリフォルニア州を除く49州に適用するNational Low Emission Vehicles（NLEV：49州LEV規制）が施行された。

Tier 2規制はNOxフリート平均規制値のフェーズインと個車規制値で構成され、2004MYからのフェーズインであるが、複雑であった。**表14**を参照されたい。

表 14　NLEV プログラム規制

NOx 規制値	フェーズイン比率			
（平均 / 最大）	2004	2005	2006	2007
0.3/--	75%	50%	25%	0%
0.07/--	25%	50%	75%	0%
0.07/0.2	--	--	--	100%

個車規制値（抜粋）			
	12 万マイル規制値		
	NMOG	CO	NOx
Bin3	0.055	2.1	0.03
Bin4	0.07	2.1	0.04
Bin5	0.09	4.2	0.07
Bin8	0.125	4.2	0.2
Bin9	0.090	4.2	0.3

（単位：g/mile）

Tier 2規制は2004MYから施行されたが、12万マイルNOx平均規制値が0.3 g/mileに対応する自動車を75%許容している。個車規制値表を参照されたい。NOx 0.3 g/mile規制値はカリフォルニア州LEV規制におけるLEV車規制値である。「Tier 2規制の2004MYでは、75%までカリフォルニア州のLEV規制対応車が販売できます。」という意味である。そして、25%以上はBin 3＝カリフォルニア州ULEV車を販売しなければならない。

Tier 2規制はカリフォルニア州LEV Iプログラムとほぼ同一規制レベルであるが、個車規制値を細分化して平均規制値対応に自由度を与えたと言える。しかし、50州販売を前提にするメーカーの立場からすると、既に2001MYからスタートしているカリフォルニア州LEV IIプログラムとの整合性を重要視した。

カリフォルニア州LEV IIプログラムのフリート平均規制値と個車規制値は**表15**の通りである。

表 15　カリフォルニア州 LEV II 規制
フリート平均 NMOG 規制値

カリフォルニア州 LEV II 規制（乗用車＋軽量 LDT）			
MY	規制値	MY	規制値
2001	0.070	2006	0.046
2002	0.068	2007	0.043
2003	0.062	2008	0.040
2004	0.053	2009	0.038
2005	0.049	2010＋	0.035

（単位：g/mile）

フリート平均規制値の対象成分はNMOGである。EPA Tier 1フリート平均規制値の対象成分はNOxである。規制成分が異なっているが、規制の本質に大きな差はない。大局的にはフリート平均規制値であるが、自動車開発の目標は個車規制値である。排ガス規制の強化はカリフォルニア州が先行していたので、カリフォルニア州の個車規制値が重要である。LEV IIプログラムの個車規制値は**表16**の通りである。

表 16　LEV II 個車規制値

	5 万マイル			12 万マイル		
	NMOG	CO	NOx	NMOG	CO	NOx
LEV	0.075	3.4	0.05	0.090	4.2	0.07
ULEV	0.040	1.7	0.05	0.055	2.1	0.07
SULEV	---	---	---	0.010	1.0	0.02

（単位：g/mile）

LEV IIプログラムフリート平均規制値は最終的に0.035 g/mileになる。この値は従来のULEVのNMOG規制値0.040 g/mileよりも低い。そこで、ULEVより

も小さな規制値となるSULEV規制値が設定された。さらに、新たな排出ガス規制として、2000MYからSupplemental Federal Test Procedures（SFTP：付加的米国試験法）が追加された。SFTPは、EPA自ら新しい規制を施行した代表的な試験法である。従来の市街地走行を代表するFTPやHFETにない新しい走行モードをEPAが開発した。SFTPは二つの試験モード、US06とSC03、から構成されている。US06は、市街地における信号Go & Stop時の大きな加速度と郊外高速走行を組み合せた過激な加速度を再現する走行モードである。一方、SC03は市街地の静かな走行を模倣しているが、エアコンを作動して排ガス試験を実施する。試験温度は35℃で、日射相当の熱射を自動車にあてて、排ガス試験を実施する。加えて、EPAは、2001MYからのフェーズイン規制で、Cold CO FTP（低温（−7 ℃）CO排ガス規制）を施行し、現在の排出ガス規制を構成している試験方法が全て確立された。

燃費規制の変化点は4WD Import CAFE基準値が**表17**のように強化されたことである。

表 17　2000 年代 4WD Import CAFE 規制値

4WD Import CAFE 基準値	
MY	CAFE 基準値
2000	20.7
---	↑
2005	21.0
2006	21.6
2007	22.2
2008	22.5
2009	23.1
2010	23.5

（単位：Miles/Gallon）

新たな認証制度として、EPAは1999年4月22日付VPCD-99-17にて、前3月15日付官報によって発行したCAP 2000法規の具体的運用を公表した。その中で、EPAは5月28日にワークショップを開催する旨通知している。VPCD-99-17の主な内容は、認証手続きを電子申請に切り替えることが主体になっている。しかし、実体は認証業務の運用をメーカーに委ね、EPAは認証業務におけるメーカー判断の適否を監視することであった。この判断を誤ると排ガス認証を危うくしてしまう。EPAは、CAP 2000制度の内容を再確認する目的で、2013年5月に再確認のワークショップを開催した。

米国排ガス・燃費認証に関わる方々はこのワークショップの内容を是非、読んでいただきたい。

8. 2010年代

LEV II/Tier2へ規制強化されてきたが、自動車による健康への影響を更に下げるために15MYからカリフォルニア規制のLEV IIIが、17MYからEPA Tier3規制が適用された。LEV III規制とTier3規制は、基本的な考え方が同じである。主な変更点を以下に記載する。

①規制成分の変更：規制強化してきた事により、NMOGとNOxの個車規制値が小さくなった事に伴い、従来の3成分（NMOG、CO、NOx）規制値を2構成成分（NMOG + NOx、CO）に変更された。
②2025MY までのフリート平均規制値を決定する。2025MYではSULEV相当の規制値となる。
③Useful Life を15万マイルに延長する。
④PM 規制値を強化する。
⑤SFTP 規制値を強化する
⑥エバポ規制について、フリート平均規制値を導入し、個車規制値を制定する。
⑦試験ガソリンをE10 に変更し、性状も変更する。市場ガソリン中の硫黄濃度も規制強化する。

その他、LBT（Lean Best Torque）の規定が改定された。法規での定義でLBTとは、トルクが一番出る最もリーン側のA/F（空燃比）の事である。Tier2/LEV II時代からLBTを超える燃料増量は、保護目的のみでかつ必要最低限のためのみに認められていた。これは、排ガス計測モード運転時も含め、必要以上の燃料増量による大気汚染の防止が目的である。ストイキを外れて燃料増量を行うと大気汚染に繋がるが、エンジンが持っている出力性能を出すためにLBTまでの増量を認めているところが、米国的な合理的考えである。

Tier3規制では「点火時期を固定して」LBTを求めると定義が明確化された。併せて、これまでメーカーの自主対応に留められていたが、Tier3規制からは保護目的の増量の詳細に関して官庁への報告が義務付けられた。これは、LBTを求める際にノック限界向上を目的にA/Fをリッチ側に設定しつつトルクが一番出るポイントをLBTと設定しているメーカーの存在をEPAが認識したためである。

＜ディフィートデバイス禁止＞

試験モード外で、排ガスを著しく悪化させる制御をディフィートデバイスと定義され、法規で禁止されている。試験はCDMで行われるが、計測技術の発達によりPEMS（Portable Emission Measurement System）による車載排ガス計測が可能となってきた。

VWのDiesel車でCDMでの排ガス試験中か否かを判定し、試験中のみ排ガスを低減する制御を使っていた事がEPAとCARBより発表された。これは、現在

の認証試験がCDM上のみで行われる事を逆手に取った悪質なディフィートデバイスである。これによりこれまで、官庁と業界で築かれてきた信頼関係が崩れてしまう。今後、EPA、CARB共に実走状態でも排ガス低減制御が正常に働く事を確認する必要が出てきた。

＜企業平均燃費規制＞

2010MYまで据え置かれたCAFE規制値27.5mpgは2011MY以降フットプリント（トレッド×ホイルベース）基準の年々厳しくなる規制値となり、再び規制強化され、2012MYに比較して、2025MYでは67%の燃費改善が要求されている（**図10**）。

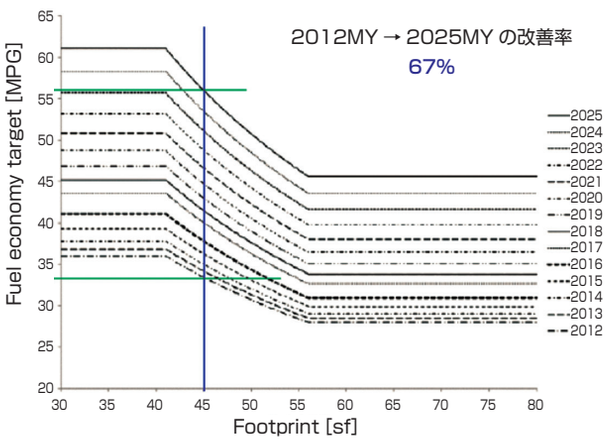


図 10　今後の乗用車 CAFE 規制値[11]

9.　結び

決して、自動車業界だけが努力した訳ではないが、光化学スモッグの発生は、日米において、ほぼ無くなってきた。自動車の排ガス規制強化の歴史を述べてきたが、EPAはTier 3法規の前文の中で、「自動車に関連する大気汚染は交通渋滞道路周辺のみに残存している。」と述べている。

大気汚染解消の努力のまとめとして、一つのデータを**表18**に示す。米国において、1996年と2013年の環境基準未達成地域に居住する人口を比較したものである。オゾン環境基準未達成地域人口は半減、PM10環境基準未達成地域人口は凡そ30%減少している。CO環境基準未達成地域はなくなった。自動車対策だけの効果ではないが、自動車メーカーの努力なくしてこの結果は得られなかったことは確かである。

表 18　環境基準未達成地域人口

	1996 年統計データ	2013 年統計データ
オゾン基準未達地域	11,160 万人	5,310 万人
PM10 基準未達地域	2,530 万人	1,780 万人
CO 基準未達地域	2,200 万人	基準未達成地域なし

一方、自動車に対する燃費改善は、今後も継続する。地球温暖化ストップのために自動車の役割は大きい。カリフォルニア州は電動自動車に舵を向けている。同じように舵を向ける国、地域がどれだけ増加していくだろうか。自動車も変化が求められていく。

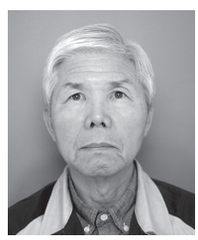
このような規制の経過の中で多くの技術が開発されてきた。これらの技術開発の歴史を辿るために、この資料を活用されたい。

参考文献

(1) https://www3.epa.gov/otaq/toxics.htm
(2) A. J. Haagen-Smit：A Lesson from the Smog Capital of the World,Proceeding of the National Academy of Science,Vol.67,No.2,p.887-897(1970)
(3) HEW：Control Techniques for Carbon Monoxide, Nitrogen Oxide, and Hydrocarbon Emissions From Mobile Sources
(4) G. C. Hass,M. P. Sweeney,J. N. Pattison：Laboratory Simulation Driving Conditions in the Los Angeles, SAE Paper 660546
(5) EPA：A Report on Automotive Fuel Economy, October, 1973
(6) EPA：Monitoring and Air Quality Trends Report, October, 1973
(7) http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/Leafhandler.
(8) EPA：Automobile Gasoline Mileage Test Results, 1974 Cars and Light Duty Trucks, September 18, 1973
(9) EPA, OMSAPC Advisory Circular No. 49A
(10) www.autotrader.com
(11) U.S. Federal Register, Vol.76, No. 231

【著　者】

江川　　洋



西山　三屋

空気の見える職人の養成について

How to Train Craftsmen who can See Air Flow

坂 崎 明 彦*1　Akihiko SAKAZAKI
高 橋 修*2　Osamu TAKAHASHI
高 橋 伸 弥*2　Shinya TAKAHASHI

抄 録

第2次世界大戦頃の航空機開発における空力開発では空気の見える職人が、手で木型を作り性能の向上を図っていたのではと思われる節がある。

量産車の空力開発や、高速走行可能な空力台車を製作する際に、そのルネサンスを試みた。

上手く行った部分も、行かなかった部分もある。

しかし、プロジェクトに参加した多くの若手が、其々空力の本質を少しずつ理解し、その開発に必要なスキルを大幅に向上した事は間違い無い。

Abstract

At the time in the Second World War, craftsmen who could see air flow in aircraft aerodynamics development seem to improve the performance by making wooden molds by hand. In the aerodynamics development of vehicle production and in making an experimental aerodynamic test vehicle which can run at high speed, we tried this Renaissance.

Some worked out well and others not. However, many of the young craftsmen participated in this project to understand the essence of aerodynamics. It is no doubt that they improved their skills necessary for aerodynamics development.

1. まえがき

図1は中島飛行機の試作職場における隼の実大模型（木型、モックアップ）である。

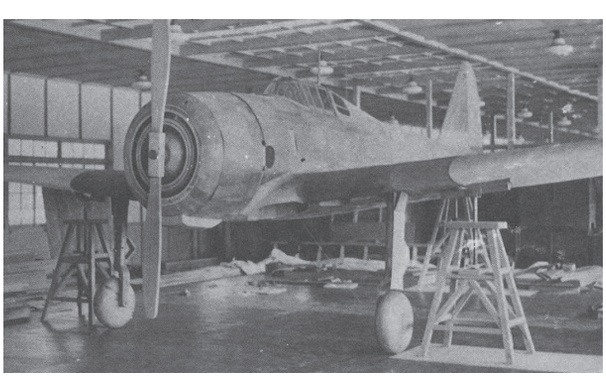


図1　隼の実大模型 (1)

第2次世界大戦頃の航空機における空力開発では空気の見える職人が、手で木型を作り性能の向上を図っていたのではと思われる節がある。

執筆者の一人は2009～2011年に、試作部モデル課の仲間と、量産空力試験台車の製作、それから一般先行開発としての走行可能な空力試験台車の製作を大きく3サイクル回す機会に恵まれ、前述の航空機の開発状況を文献等で興味を持って勉強していたので、当時の部下を指導してそのルネサンスを実践する事にした。

2. 2010年頃の職人集団モデル課

当時の試作部モデル課は、1課長の下にモデラー、車一台のクレイや車のサイドパネルアウター等大物プレス型の機械加工、ラピッドプロトモデル製作（RP）、量産用CADデータ作製、デジタルモックアップ（DMU）、リバースエンジニアリング、一部外注手配まで、要するにプレス、板金と艤装を除く試作開発全機能が集結する、業界でも極めて珍しい形態を取っていた。

もともとスバル360の時代、クレイマスタモデル→

＊1 技術管理部長付
＊2 試作部

石膏雌型→石膏マスタ2個製作し、その1個は開発部門用、1個は工場側型製作用としていて、マスタ製作を工場側の工機部門の組織として始めたのがモデル課の発祥である。

ある時、デザインや設計の遅れ→マスタ製作の遅れとなり、その責任を取らされてはたまらないと考えた工場側の意向で、マスタ製作の責任を開発部門に取らすべく、モデル課は開発部門に移籍する。

当時はこのモデル課の中に、原図と言われる樹脂フィルムの上に100 mmピッチでの断面線を引く職人が多数存在していて、1 mmの幅に鉛筆で3本の線が正確に引けなければ1人前で無い等と言われていた。

主としてこのゾーンの職人の多くが、CAD化の中で最初は2次元、続いて3次元のデータ作製の中核に業務転換されて行った。

石膏のマスタモデルが、CADのマスタモデルに変わったとの概念で、そのデジタル品質は極めて高く、複数のカーメーカと取引のある部品メーカ殿からも、変換トラブル等の無い事についてお褒めを頂くレベルであった。

余談になるが、PDQ（Product Data Quality：モデルデータ品質）に関わる活動をJAMAが2000年頃主導したが、モデル課はそれを先取りしており、さらに太田市のスバル城下町とも例えられる地場産業協力工場皆様もモデル課のCAD検定試験には積極的に参加して下さっていたので、地域としてのCAD品質を高める事にも貢献していた。

その後、NCやリバースエンジニアリング技術の進歩にも遅れる事なく付いて行ったため、モデル課はガラパゴスの様に、特殊な形態への進化を遂げた。

3.　空力試験結果フィードバックプロセスの改革

3.1　ある開発車の最初の1：1風洞試験

2009年11月20日付の、モデル課のモデル製作係のT班長が風洞でのある開発車のクレイモデル作業応援に出て、作業の手際が良い事を褒められた時の結果報告Eメールが残っていたので以下抜粋する。

結果・予定試験全てクリア
　・目標CD値達成
情報
　①大きく造形変更した箇所
　　・Ftバンパサイド部
　　・リヤクオータガラス、リヤクォータパネル付近
　　・Rバンパーサイド部
　②今後改修の可能性がある箇所
　　・Rガラス、トランク部をZ方向オフセット
　　・デザイナはR廻りの形状をY的にもっと絞り込みたいが当社空力としてはCD値が大幅に落ちるためやりたくない。

当社空力部隊が実験結果をフィードバック後、先方でデータを作成するそうなので、もしモデルに改修が入ってくるとすれば、その後になると思う。
参考
　・スバルの1：1クレイ空力モデルは運転席が取れて自走できることに驚かれた。

今回は応援に行かせていただき感謝。空力実験について、大変勉強になった。今後の作業に生かしたい。

3.2　量産車空力開発PDCA高速回転

当時の当社の風洞試験結果のフィードバックプロセスは、放っておけば空力担当者が要所をベクトロン等で測定、ポンチ絵を追加してデザイナに伝えると言う図2の上半分の様な流れの時代であった。

そこで、モデル課の各機能を有機的に結合すれば、図2の下半分の様な、データリリース毎のフィードバックが出来るのではと言う考えが閃いた。

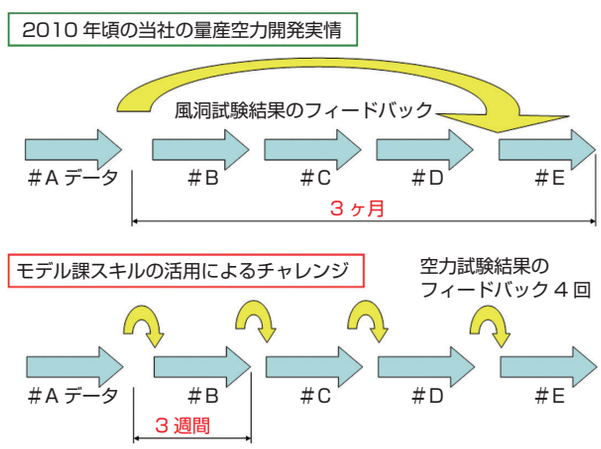


図2　空力試験結果フィードバックプロセスの改革

これまた、2009年11月21日付のモデル課員に対する指示Eメールが残っていたので以下抜粋する。

Kさん（デジタルデータ総括）、Nさん（全体総括）、Hさん（リバース）、Sさん（モデル製作）、今後の動きとしては『当社空力部隊が先方に実験結果をフィードバック後、データを作製するそうなので』では効率が悪過ぎ、他の業務を止めてでも1：1空力モデルの現状をT-SCANし、翌日中にラフ面貼して先方に渡し、
①現状試作部の実力の依頼主へのアピール、
②依頼車両の開発促進すべき。
今直ぐ動けば12/10の#Bデータ、先方に前倒しして頂けるのでは？（目標11/30リリース）
11/23 空力屋さん含め急ぎ検討願います。

そもそもどうやって変更形状を先方にフィードバックしようとしていたのか?

Nさん、課内の総括だけで無く、実験設計先方含む開発全体の最大効率化総括を意識して下さい。

Oさん、T-SCANした内容をDMU緊急会議召集し、設計に成立性確認させて下さい。

3.3　空気の見える職人は最初から変更点判ってた

3.1項の1：1風洞試験に供したクレーモデルの機械切削と仕上げはモデル課で請け負った訳だが、空気の見える職人を養成する目的で、第2次世界大戦頃のモデル職人がやっていたであろう「しない定規(バテンとも言う。ダックスと言う文鎮で製図版の上に滑らかな曲線をセットする道具である。)」を当てさせた状態の写真を人材育成 兼 物流Kさんに撮らせていたので、紙面の都合で1枚だけ紹介する(図3)。

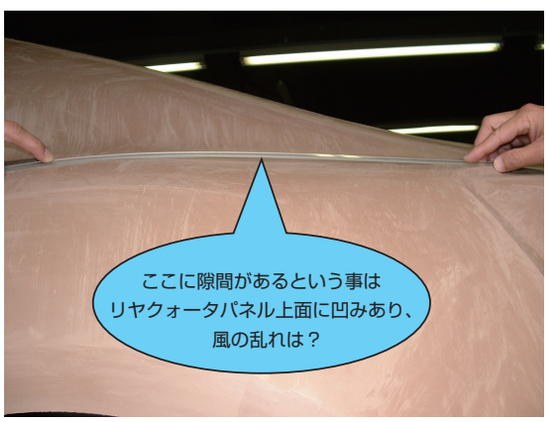


図３　リヤクォータガラス、リヤクォータパネル付近

4.　空力CAEモデル検討プロセスの改革

4.1　先行開発、走る空力台車#1

2011年、空力実験部隊から、先行開発CAEでBセグのベスト形状が出来たので、その1：1の走行試験台車を作ってCAE通りの空力値になっているか検証したいと言う依頼があった。

これは当社がBセグ開発をしているか否かには関係無く、膨大なフィージビリティ検討の一環である。

CADデータを眺めると、空気の見える職人的感覚では、とても空気がスムースに流れる様に見えない。

当時の当社のCAEレベルとして、格子も荒かったし、形状もあちこちをモーフィングして形状を決定したものとの事。

CADデータ見ていても埒が開かないので、依頼形状そのものを1：5で削り出し、何をしたいのか、依頼者に直接触って貰ったり聞き出したりして、パテ盛り、削りを繰り返した結果が図4である。

これをスキャンして実車にしたのが、図5である。

図４　走る空力台車#1の1；5モデルでの面通し

図５　走る空力台車#1の外観

当初コースティング試験のため、140 km/h迄出せる様にとの依頼だったのでその様にしたが、重役にいきなり180 km/h以上で走られてしまい焦った。

この手の試作車は安全制限を忘れてはならない。

4.2　先行開発、走る空力台車#2

走る空力台車＃1の業務フローを模式化すると、図6の上半分になる。

SUV系の空力フィージビリティ検討のため、＃1同様の走行空力台車＃2を製作する依頼が舞い込んだが、駄目なものを作って修正するプロセスは面白く無い。

そこで、面の修正で無く面の創生の出来る、宇都宮の航空機の流れの薫陶も間接的に受けたCADデータ職人に主導権を握らせ、CFDとモデル課の活動を有機的に結合すれば、図6の下半分の様な新たな空力開発が出来るのではと言う考えが閃いた。

図6下側に示したプロセスで、このSUVについてはCAEモーフィングデータをベースに『モデル課：空力実験の指示でCAD内形状修整、面通し』⇔『空力実験：解析』のサイクルを数回まわしてデータを完成させ、図7に示す車体外観を作った。

ものを作って直す工数が省けたため、当然の事ながら、開発工数は空力台車＃1時点より大幅に削減出来た。

また結果として、CAEで自信作として試作を要請

された車体が、空気を見ようとするデジタル職人、製作職人の努力により、CAEの予測以上の低空気抵抗を実現する事が出来る事を経験した。

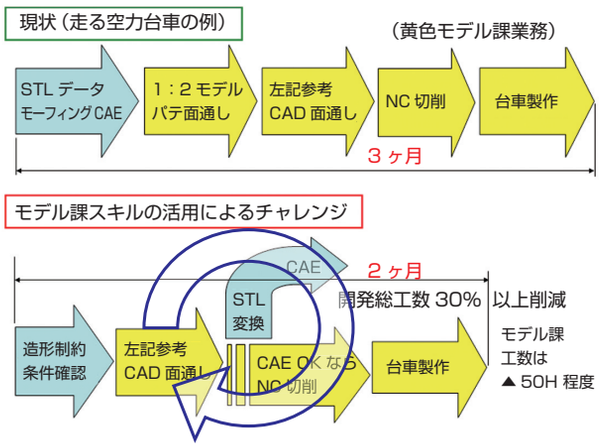


図６　空力 CAE モデル検討プロセスの改革

図７　走る空力台車 #2 の外観

4.3　先行開発、走る空力台車#3

前述の #1、#2の評判宜しく、これに続きワゴン系の走る空力台車 #3の製作の依頼が舞い込んだ。

当時モデル課では、試作部長の号令の下、外部委託しなくても課内でモータショーに出品出来るレベルの車が作れる事を目標にしていたので、とにかくかっこ良くしようと言う事で、図8に示す様に一部の盛り削りである程度形を整え、その後きちんとCADで面通しした設計を織込むことにした。

見る人が見れば、図4と図8のパテ盛りを比較すると現場の腕も随分上がった事が判ろう。

面の創生作業において、心がけて欲しい事を2つ提示させて貰ったが、何れも出典は横山晃氏の名著「ヨットの設計」[(2)(4)]である。

心掛け その1　曲率の変化を滑らかに

一見滑らかに見える図9の橋は実際に走ると、橋の入り口で下向きに押付けられ、直線部では急に1Gに脱力、橋の上端では今度は上向きに投げ出される。

空気の流れも同じであって、流れる空気に不快な思いをさせぬ様な形状を作るのが職人の腕である。

心掛け その2　差の差節（差の差を拾う事から）

サスペンションの設計においても、乗り心地改善には加速度より加々速度を抑える事が有効[(3)]だが、オフセットもその2回微分を滑らかに通す事が、流れをスムーズにするコツである（図10）。

図８　走る空力台車 #3 の１：５モデルでの面通し

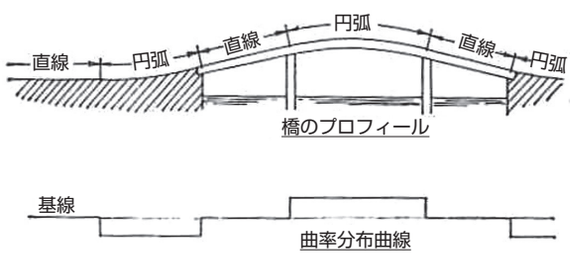


図９　曲率変化のとんでもない橋 [(2)]

ST	Z	Z'	Z''
-2	172		
-1	86	86	0
0	0	86	3
1	-83	83	12
2	-154	71	18
3	-207	53	21
4	-239	32	21
5	-250	11	18
6	-243	-7	17
7	-219	-24	18
8	-177	-42	21
9	-114	-63	47
10	-4	-110	223
11	329	-333	

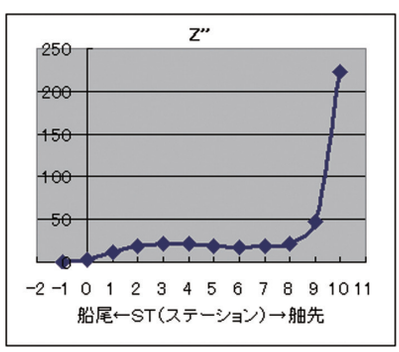


図 10　差の差節 [(4)]

CATIAのスプラインや、面創生の機能のエキスパートにとっては、要は空気が滑らかに流れる様にすれば良いんでしょ、と言うノリで歩行者保護要件等入れながら図11に示す様な車体外観を作ってしまった。

製作費削減のため、図11の 黄色い部分：別の参照車両 緑の部分：走る空力台車 #3 青い部分：旧型インプレッサ を共用する足枷も、空力確定部分とそれ以外をスムージングさせるスキルの向上に逆に役立った。

職人の養成には、遊び心の許容、自主性の成長促進も非常に重要なポイントになり、図12は、1：5モデル上のテープドローイングで、依頼主から提示された窓の見切りを塗装で変更して、自発的にかっこ良くしようと検討した時のものである。

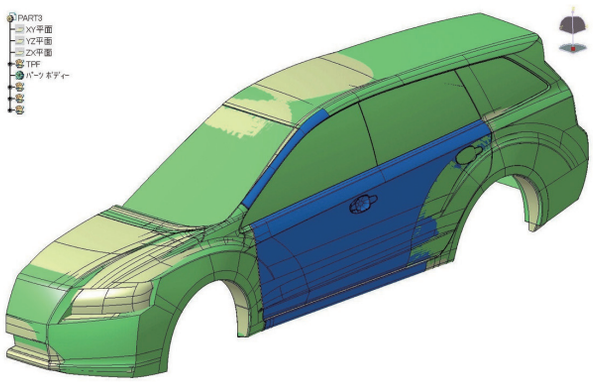


図 11　走る空力台車 #3 の 3D データ重ね合せ

図 12　走る空力台車 #3 の窓見切りと開口分割検討

フードやリヤゲートはインナの骨格迄含め、カーボンで製作し､房内流れも忠実に再現出来る様配慮した。

樹脂のボディで転倒したら何が起こるか自信が持てず、#1と #2では万一のためにロールバーを室内に入れていたが、#3ではインナトリムとエクステリアの間に不完全ながらロールバーも収めてしまい、室内の空調の空気流れも再現出来る様にした(図13)。

これらも、空気の見える職人の道草的スキルアップで、空力開発で突発的にやらねばならぬ様々な事象に対する応用力を養うのに役立った。

完成した車両は後のレヴォーグを彷彿とさせるが、直接の関係は無い。

本題からは外れるが、完成間近となった2011年3月11日(金)に地震が発生し、皆が動揺している中、ヘルメットを片手に当日残業、翌日休出して開発日程を死守した職人魂にも敬服した。

図 13　走る空力台車 #3 の外観

5.　まとめ

航空機における空力開発では空気の見える職人が、手で木型を作り性能の向上を図っていたのではと思い、そのルネサンスを実践しようとしたが、これは実現したかと問われれば上手く行った所もあり、行かなかった所もありが正直な処だ。

但し、プロジェクトに参加した多くの若手が、其々空力の本質を少しずつ理解し、その開発に必要なスキルを大幅に向上した事は間違い無い。

一方、ベテランからの若手への技能伝承の場としてもこの機会を有効に利用しなくてはとは思いつつ、それが十分配慮出来なかったのは当時の課長坂崎の不徳の致す処である。

参考文献

(1) 中島飛行機の想い出(磐石の名声の確立)
http：//www.ne.jp/asahi/airplane/museum/nakajima/nakajima-saito/naka34-36.html（2016-3-26）
(2) 横山晃：ヨットの設計 上 p.97, 舵社(1980)
(3) 坂崎明彦：スバル技報 No.42 p.190(2015)
(4) 横山晃：ヨットの設計 上 p.101, 舵社(1980)

【著　者】

坂崎　明彦

高橋　　修

高橋　伸弥

成長期（平成初期）のスバル紹介

インプレッサ XV 2.0i（2010年～2011年）

全長×全幅×全高：4430 mm×1770 mm×1520 mm
ホイールベース：2620 mm
エンジン：水平対向4気筒 SOHC 1994 cc
最高出力：103 kw（140 ps）/5600 rpm
最大トルク：186 N-m（19.0 kg-m）/4400 rpm

欧州で既存車ベースのクロスオーバーSUVが注目されつつあった。そこで、インプレッサの5ドアハッチバックをベースに、一体感のある専用フロントグリル&バンパー、サイドクラッディング、ルーフレール、ルーフスポイラーを装備したクロスオーバーモデルとして誕生した。リアスタビライザーの追加とダンパーの減衰力を上げることで、高いロール剛性によるスポーティな走りを実現している。 車高は地域によって異なっており、欧州や日本では標準車高だが、中国・ロシア・豪州・一般地域向けにはタイヤサイズの変更とサスペンションの変更で50 mm車高を上げている。

特許紹介

SUBARU Patent Review

技術開発部

最近登録になった特許の中から代表的なものを紹介する。

車外環境認識装置

【出願】特許第5666538号
【発明者】木戸 辰之輔

【発明の背景】

図1に示す様に、車載カメラにより自車両外の環境を認識する車外環境認識装置(100)において、認識画像内の色情報を用いて光源を検出する撮像装置(110)を動作させた場合に、撮像装置内にあるレンズなどの光学系部品や、撮像方向に位置するフロントガラス(2)などの透過体に、汚れや曇りが存在してした上で、太陽光(逆光)等の強い環境光(C)が撮像方向から照射されると、撮像された画像全体に環境光の色成分が加算され、画像中の対象物(A)・(B)が本来の色と異なってしまう。その結果、色情報を用いた光源の認識精度が低下、もしくは認識不可能となってしまう。

【発明の概要】

上述の撮像装置の光学系部品や、フロントガラスに汚れや曇りが存在する場合でも、色情報を用いた画像認識を適切に行うことができる車外環境認識装置を提供することを目的とする。

まず、信号機や道路標識などを特定物として、輝度範囲や、道路表面からの高さの範囲を示す高さ範囲、特定物の大きさの範囲を示す幅範囲を設定しておく。

更に、車外環境を認識する装置にて、前述した特定物の特徴を利用し特定物を認識した上で、特定物本来の輝度と、特定物の車載カメラによるカラー画像の輝度とを比較する。その結果、(フロントガラスなどの)透過体の透過度の低下を判定した場合は、特定物に対応付けられた本来の輝度との差分に基づき、カラー画像の対象部位の輝度を補正する事を特徴とする。

ここで、特定物は信号機(赤)、信号機(青)、道路標識(青)、道路標識(緑)などを利用可能であるが、それ以外にも道路上に存在し、RGBの値が大凡不変的な特定物、例えば、ウィンカーやテールランプ等も対象とする事も可能とする。

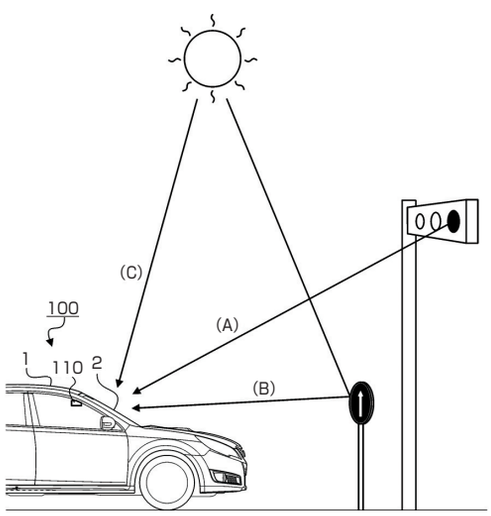


図1　環境認識システムにおける環境光の影響

車両検出装置

【出願】特許第5666726号
【発明者】齋藤　徹

【発明の背景】

撮像された前方の画像データと、位置検出手段により得られた位置データに基づいて、先行車両等の物体を検出する検出装置においては、撮像されたある動く物体（例えば先行車両）と、停止した物体（例えば生垣）が、お互いに近傍にあると、同じ物体として認識してしまうという課題があった。

また、先行車両がトラックの場合は、トラックの後方にある平面の大きい「あおり」部分が、位置検出手段によっては位置データを正確に捉えられない場合があった。この場合、「あおり」部分の位置データが欠損してしまい、トラック1台を2つ以上の物体として認識してしまう危険性があった。

上記の様な誤検出を起こしてしまうと、誤った物体の情報に基づいて制御を行うことになり、この様な検出装置を使用する（安全走行等に資するべき）車両の自動制御において、逆に、事故の危険性が増大してしまう等の問題があった。

【発明の概要】

検出した物体の位置データを的確にグループ化して、先行車両等の物体を的確に検出することが可能な車両検出装置を提供することを目的とする。

本発明は、以下の1）～4）の特徴を有する事を特徴とする。1）前方の画像上で、ウインカランプやブレーキランプと認識されるものをテールランプ候補として抽出し、一対となるテールランプ候補が見つかった場合には、（テールランプ以外の領域が含まれる）テールランプ候補から、テールランプ領域とそれ以外の領域で、領域を分離する。2）前記の分離を行った上で、一対となるテールランプ候補を見つけそれをランプペア候補として再度グルーピングする。3）ある高さ範囲より上、または下にある、テールランプ候補は、街路灯や路面の反射光であると判断して除外する。4）ランプペア候補の間にあって、そのランプペア候補より高い位置にあるテールランプ候補を、ハイマウントストップランプとして前記ランプペア候補に含める。

この事によって、前述した車両と生垣を一体で認識する等の誤った認識が、テールランプ候補によって生垣と分割され、正しい認識とする事が可能になる。

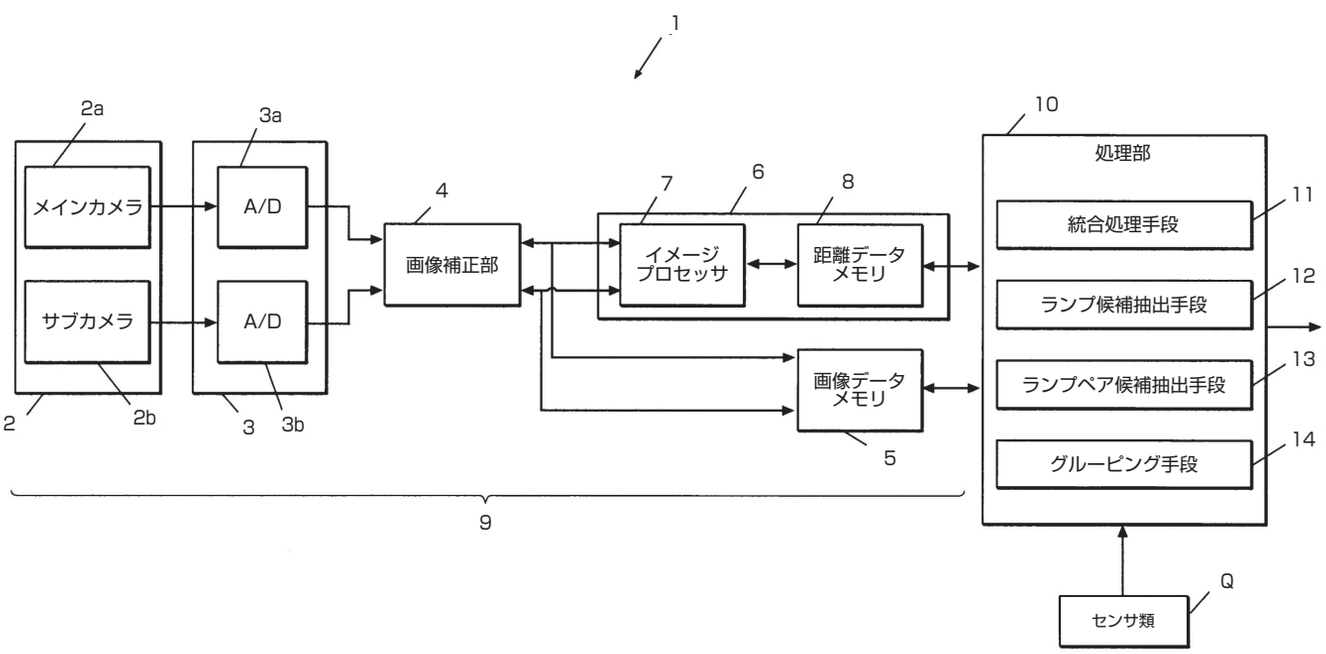


図1　本実施形態に係る車両検出装置の構成を示すブロック図

エンジン制御装置

【出願】特許第5680026号
【発明者】高田　知洋

【発明の背景】

エンジンの運転状況に応じて性能特性を切り換えるため、動弁系に可変動弁機構を備えたエンジンが開発されている。可変動弁機構を用いてバルブタイミングを変えることができるため、吸気バルブと排気バルブとが共に開放されるオーバーラップ量を制御することが可能となる。これにより、エンジンの様々な運転状況において、吸入新気の体積効率を向上させることができ、エンジントルクを向上させることが可能である。

しかし、バルブタイミングを制御するのに、（公知である）吸入空気量とエンジン回転数とに基づいた制御を行った場合は、吸入空気量が大きく変化する急加速時等において、吸入空気量の増加を待ってバルブタイミングが変化することから、バルブタイミング制御の応答性を低下させる要因となっていた。

【発明の概要】

本発明は、エンジンの運転状況に応じて適切にバルブタイミングを制御することを目的とする。

本発明のエンジン制御装置では、エンジンに設けられる吸気バルブと排気バルブとの少なくともいずれか一方の開閉時期を調整する可変動弁機構を備えるエンジン制御装置であって、吸入空気量が大きく変化しない、即ち　加速状態が所定状態を下回る弱い加速状態である場合には、（従来と同様）エンジンの吸入空気量と出力軸回転速度とに基づいて開閉時期を設定する。

その上で、吸入空気量が大きく変化する、即ち　加速状態が所定状態を上回る強い加速状態である場合には、出力軸回転速度と、大気圧と、エンジン温度に基づいて、開閉時期を設定する事を特徴とする。

この事により、強い加速状態においては、変動する吸入空気量を使用せずに適切なバルブタイミングを設定する事が可能となり、制御の応答性が向上する。

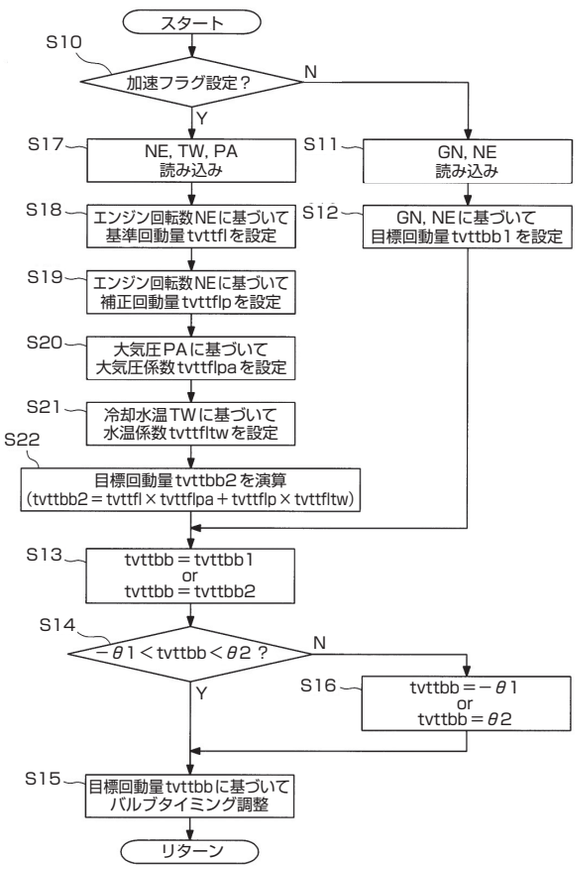


図１　本発明の制御フロー

ハイブリッド車両の発電制御装置

【出願】特許第5756822号
【発明者】岸田　太一

【発明の背景】

動力源としてエンジンと、発電機能を有するモータとを備えたハイブリッド車両において、モータにて発電しながら走行する発電走行モードでは、発電量を一定としてエンジンの動力を駆動輪に伝達するとともに、エンジンにより発電を行うようにすると、瞬間燃費は悪化することが避けられない。

【発明の概要】

本発明は、発電走行モードを有するハイブリッド車両の、燃費を向上させることにある。

本発明の車両では、先行車と自車との車間距離を検出する車間距離検出部を持ち、検出センサ信号に基づいて先行車と自車との間の車間距離および車間距離変化量を検出する。さらに、車間距離等に基づいて発電走行モードときにおける発電量を制限する事を特徴とする。

車間距離等に基づいて発電走行モードときにおける発電量をモータトルクゲインＫにより制限すると、回生ブレーキモードに切り換えられる前に、発電量が制限されるので、ハイブリッド車両の燃費を向上させることができる。**図１**に示す様にモータトルクゲインＫを設定する。横軸は車間距離Ｌ(m)を示し、縦軸は単位時間(秒)当たりの車間距離変化量(m)つまり車間距離変化率η(m/s)を示している。車間距離が短くなるほど、また車間距離変化率(m/s)がマイナス側に大きくなるほど､ゲインＫが小さくなるように設定する。

この条件の上で、モータでの発電量を決定する目標モータトルク(Nm)に、上記モータトルクゲインＫを乗算することで、モータジェネレータの負の目標モータトルクの制限処理が行われる。これにより、発電走行モードにおいて、**図２**に示す様に先行車との車間距離および車間距離変化量が小さくなると、それに伴い負のモータトルク(＝発電量)が制限され、結果、燃費を向上させることができる。

なお、発電走行モードが実行されていても、バッテリーの残存容量(SOC)が所定値以下となっているときには、目標モータトルクの制限処理は行われない。

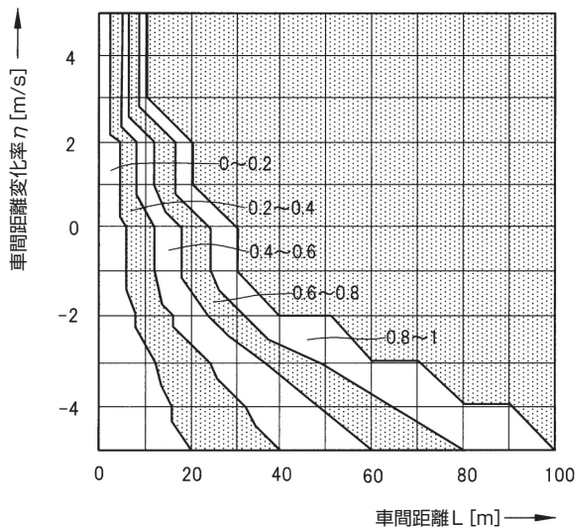
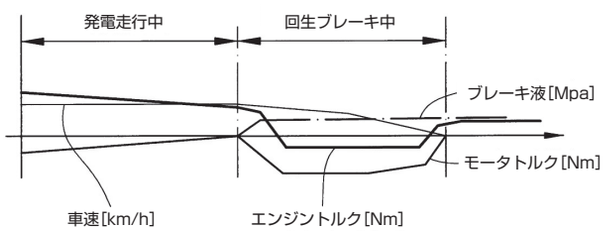


図１　モータトルクゲインＫの設定例

(A)本発明



(B)比較例

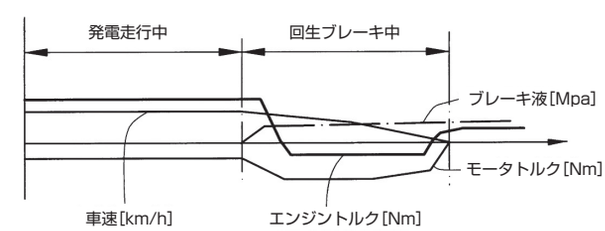


図２　本制御でのモータトルク制御例

車両の運転支援制御装置

【出願】特許第5802241号
【発明者】松野　浩二

【発明の背景】

近年、交通事故の低減やドライバの負担を軽減することを目的として、設定した目標コースに沿って走行するように運転を支援する様々な運転支援制御装置の技術が開発されている。このような車両を目標コースに沿って走行させるための目標操舵角を演算する手法として、ドライバの運転操作を模擬した前方注視点モデルが広く知られている。ここで「前方注視点」とは、運転支援装置が推定する自車両の車両軌跡上の、現在よりある時間経過後の自車両位置である。また以下記述では、自車両が前方注視点に到達するまでの時間を、「予見時間」とする。

従来技術として、前方注視点での目標コースとの横偏差に応じ目標操舵角を設定する方法があるが、現在の車両位置から前方注視点までの距離、或いは予見時間を短くとれば目標コースへの追従性は良くなるが、横偏差のみを重視した過敏で不安定な目標操舵角や車両挙動になるという課題があった。

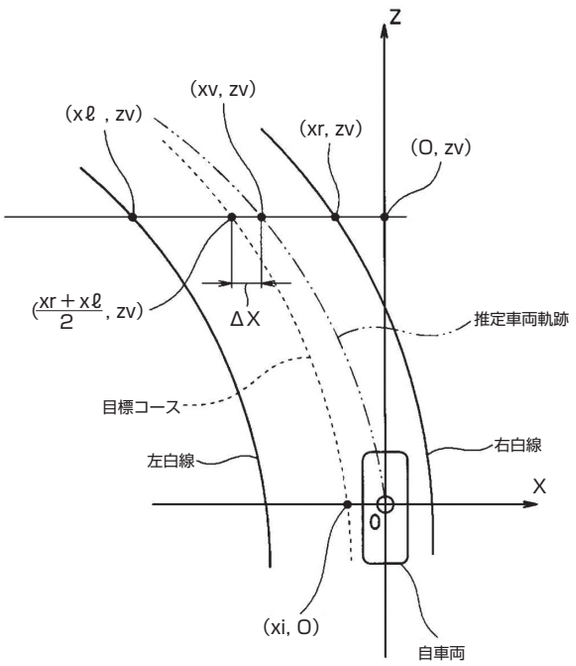


図１　自車両と目標コースとのずれＸの説明

【発明の概要】

目標コースへの迅速な追従性と目標コースを走行する上での車両挙動の安定性を良好にバランスさせることができる車両の運転支援制御装置を提供することを目的とする。

本発明は、**図１**における前方注視点における目標コースと推定された自車両の車両軌跡との、現時点でのずれXiに応じ、目標コースに沿って走行するように自車両を制御する制御手段を持つ。その上で、**図２**に示す様に、前方注視点の算出を、1) 走行レーンのカーブ半径（ρ）が小さいほど予見時間(T) を短く設定する事を特徴とする。

また、2) 走行レーンの車線幅が狭いほど、3) 走行レーンに対向車が存在する場合、にも予見時間(T) を短く設定する事を特徴とする。

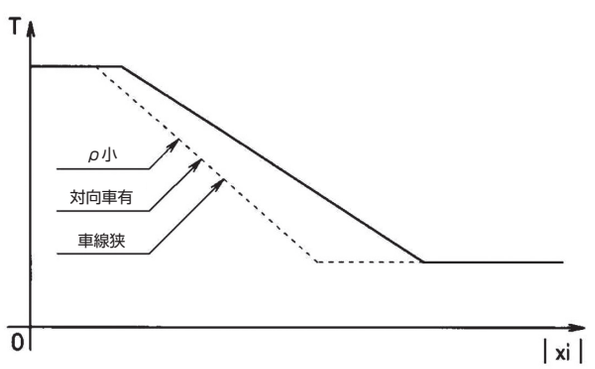


図２　現在の目標コースと自車位置のずれに応じて設定する、見時間の特性の一例

無人航空機の飛行制御システム

【出願】特許第5808781号
【発明者】高橋　伸英、宮田　研史、阪口　晃敏

【発明の背景】

無人で飛行する無人航空機は、一般に機体センサーからのセンサー出力信号や地上設備からの制御信号に基づいて、機体に搭載された飛行制御装置が飛行制御を行う。

この飛行制御の信頼性を向上させようとした場合、機体に複数の飛行制御装置を搭載させて、飛行制御機能の冗長化を図ることが考えられる。

しかし、機体に複数の飛行制御装置を搭載させることは、重量や搭載スペースの点で好ましくないのは勿論のこと、各種の制約からこの搭載がそもそも困難な場合もある。

【発明の概要】

本発明は、充分な冗長度を確保するのに必要な数の飛行制御装置を、無人航空機に搭載できない場合であっても、高精度な飛行制御を行いながら、飛行制御機能の冗長化を図ることを目的とする。

本発明の飛行制御システムの構成を示すブロック図を図1に示す。無人航空機の飛行を制御する無人航空機の飛行制御システムにおいて、航空機及び地上設備では、飛行状態を検出する機体センサーからのセンサー出力信号に基づいて、航空機の各部を動作させる機体アクチュエータを、制御可能な少なくとも1つの飛行制御装置を持つ。（図1においては、航空機は2つの制御装置、地上設備は1つの制御装置を持つ。）

また、航空機及び地上設備は、互いに信号を送受信可能な信号送受信手段が設けられており、航空機上の飛行制御装置を主とする飛行制御機能の冗長系を構成する。

この時、無人航空機上の飛行制御装置に異常が発生した場合は、地上設備上の飛行制御装置で制御が実行可能な様に構成する。更に、異常検出装置は、航空機上の飛行制御装置の、各種センサー出力信号に基づいた演算結果データと、地上設備での飛行制御装置の航空機から送信されたセンサー出力信号に基づく演算結果データを比較する事によって、飛行制御装置に異常が発生したか否かが判定されることを特徴とする。

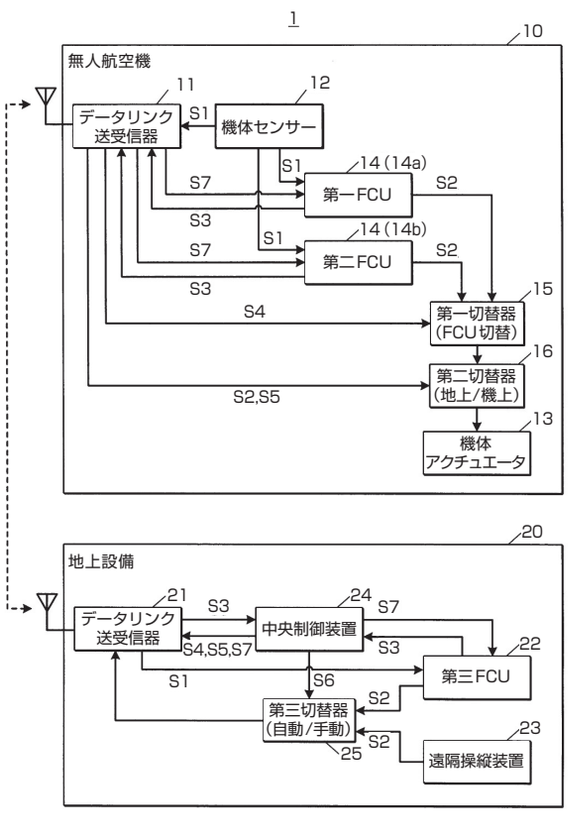


図1　飛行制御システムの構成を示すブロック図

車両用フォグランプ

【出願】特許第5819452号
【発明者】森　清輝、山崎 研太郎、友枝　優、
伊佐治 元達

【発明の背景】

霧、雨または雪等の悪天候時に前方の視認性を向上するため、車両前方にはヘッドランプの他に、フォグランプが配置される場合がある。通常、フォグランプは、左右方向への照射角が視認性を広く確保するため、ヘッドランプよりも広角に設定されている。さらに上方向の照射角は、空気中の水分で反射した光が使用者に反射することを抑制するため、ヘッドランプよりも狭くなっている。

また、従来技術としてはフォグランプに工夫を加える事で、更なる視認性を向上させる案も提案されている。しかし、従来技術では構造が複雑である為、簡易な構成でフォグランプに遠方の視認性を向上させる事が望まれていた。

【発明の概要】

本発明では、フォグランプのリフレクター形状を工夫することで、簡易な構成で遠方の視認性を向上させるものである。

本発明のフォグランプは、図1に示す様に、光が照射されるスクリーン配光パターンは、鉛直線で外側に分割される22：外側パターン部と、前記鉛直線で内側に分割される24:内側パターン部と、に分割される。

前記22：外側パターン部の上端部は、前記24：内側パターン部の上端部よりも上方に配置されると共に、水平線よりも上方に配置される事を特徴とする。

さらに、図2に示す様に、前記光を路面に照射した路面配光パターンの一部は、前記車両に備えられるヘッドランプのロービームが前記路面に照射した路面配光パターンの外縁部よりも、外側かつ前記車両の旋回方向に延伸して配置される突出領域を含むことを特徴とする。

この構造によって、図2に示す様に、フォグランプの配光パターンで形成された照射領域が、ヘッドランプの配光パターンのカットオフラインよりも突出する（図中の36：突出領域）ため、カーブ走行等における、遠方の視認性を向上することが可能となる。

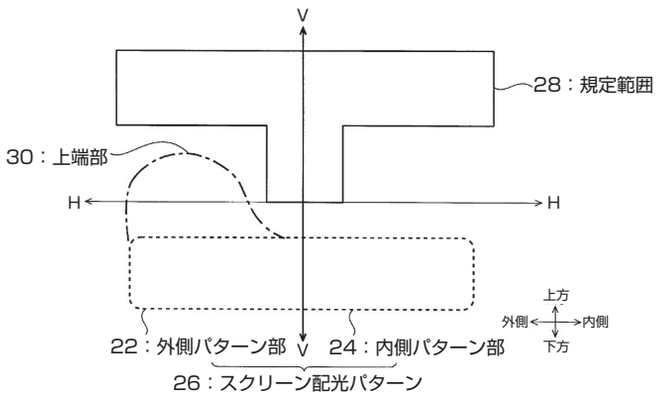


図1　フォグランプ配光パターン

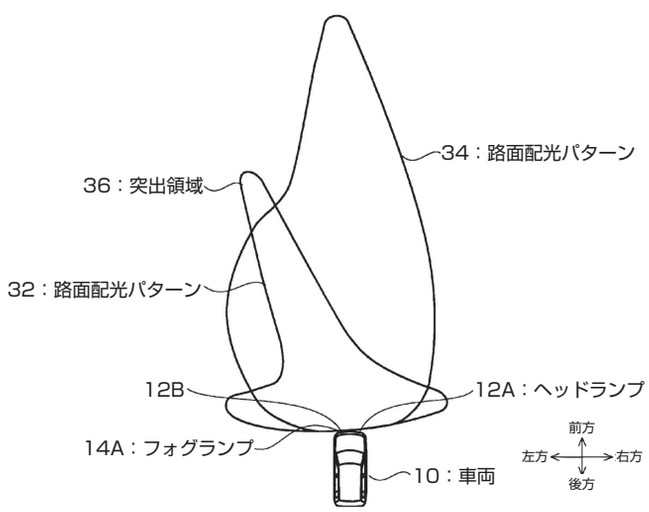


図2　路面配光パターン

社外発表一覧表（2015.1 ～ 2015.12）

1. 社 外 講 演

※所属は発表時点を示す。

発表時期	会 議 名 「発表タイトル」	講 演 者 （○は代表者）	所 属
2015.1	SAE International 2015 Government/Industry Meeting Kinematics Research and Countermeasure Development for a NHTSA Oblique Frontal Crash Test	佐々木 淳	車両研究実験第2部
2015.1	大阪府工業会 次世代自動車テクノロジー研究会 「SUBARUの走りへのこだわり」	永沢 浩	技術開発部
2015.2	群馬県次世代産業振興戦略会議 「次世代車に向けた安全・環境対応への取り組み」	永沢 浩	技術開発部
2015.2	東北ビジネスマッチング in 仙台 「SUBARUの安全と環境対応への取り組み」	永沢 浩	技術開発部
2015.5	Stage Ⅵ OBD Regulations International Seminar（China） “Comparison Topic of EU regulation UN/ECE R83 and USA regulation CARB CCR13 Chapter 01 S1968.2”	○古賀 丈浩 織田 俊宏	パワーユニット 研究実験第1部
2015.5	2015年度自動車技術会春季学術講演会 「直交歯車箱によるハイポイドギヤ振動と放射音の基礎研究」	○渡辺 健 白木 啓一郎 斎木 康平	CAE部
2015.6	3D EXPERIENCE FORUM Japan 2015 「今見直すLO1活用による図面効率化の取り組みと今後の展望」	細堀 敏広	技術管理部
2015.6	3Dバーチャルリアリティ展 「スバルのデザイン戦略とデジタル活用」	石井 守	デザイン部
2015.6	ADVANCED SEAT BELT REMINDER SYSTEM FOR REAR SEAT PASSENGERS（Sweden）	○Thierry Mousel 高橋 正輝 上田 圭介	IEE S.A. IEE Sensing Japan KK 車両研究実験第2部
2015.7	MathworksDay in 浜松 「ボディ系電子装備アクチュエータの物理モデル開発」	古賀 祐一郎	電子プラットフォーム設計部
2015.7	エレクトロニクス実装学会 カーエレクトロニクス研究 「ぶつからないクルマ？スバルが生んだアイサイトの秘密」	樋渡 穣	車両研究実験第4部
2015.9	溶接学会 秋季全国大会 「自動車部材溶接部の耐食性と疲労強度技術の開発（第2報）－アーク溶接部近傍の腐食挙動解明と耐食性向上検討－」	中澤 嗣夫 ○山本 俊佑	材料研究部 JFEスチール株式会社
2015.9	溶接学会 秋季全国大会 「自動車部材溶接部の耐食性と疲労強度技術の開発（第3報）－アーク溶接継手耐食性試験後の疲労特性－」	中澤 嗣夫 ○池田 倫正	材料研究部 JFEスチール株式会社
2015.9	2015年度日本機械学会年次大会 「自動車用トランスミッションのオイル挙動解析」	○斎藤 誠 河野 正敏	CAE部
2015.9	新潟工業短期大学 「ぶつからないクルマ？スバルが生んだアイサイトの秘密」	樋渡 穣	車両研究実験第4部
2015.10	日本規格協会 標準化と品質管理全国大会2015 「ぶつからないクルマ？スバルが生んだアイサイトの秘密」	樋渡 穣	車両研究実験第4部

発表時期	会　議　名 「発表タイトル」	講　演　者 （○は代表者）	所　　属
2015.10	IFToMM World Congress 2015 “Research on High Efficiency Hypoid Gear for Automotive Application”	○斎木 康平 深町　俊介	CAE部
2015.10	MATLAB EXPO 2015 「ボディ系電子装備アクチュエータの物理モデル開発」	古賀 祐一郎	電子プラットフォーム設計部
2015.11	SAE 2015 Active Safety Systems Symposium（USA） “Analysis of Decreasing Traffic Accidents With A Driving Support System”	熊谷　　光	車両研究実験第4部
2015.11	第53回飛行機シンポジウム 「小型超音速旅客機の機体／推進系統合設計評価」	○上野 篤史*1 牧野　好和*1 佐藤　一成*2 磯　　英雄*2 三友　俊輝*2	*1 宇宙航空研究開発機構 *2 航空宇宙カンパニー研究部
2015.11	第53回飛行機シンポジウム企画講演 「中央翼自走式自動穿孔機の開発」	齊藤　俊介	航空宇宙カンパニー 生技部半田生産技術課
2015.11	自動車技術会シンポジウム 「車体構造における接合疲労試験法のレーザー接合への応用」	○石田 公一 江口　達也 横手　芳樹 西村　仁孝 坂井　英明 進　祐一郎 植田　圭治 湯浅　卓也 中丸　敏明	材料研究部 日産自動車(株) 日野自動車(株) プレス工業(株) 日産車体(株) トヨタ自動車(株) JFEスチール(株) 日産自動車(株) 日産自動車(株)
2015.11	自動車技術会シンポジウム 「ロードシミュレータによる実働波の再現技術 ―トランスデューサの選定と実走行データ収集―」	○斉藤 優志 稲垣　成浩 三部　真智 中野　吉伸 小川　能弘 橋爪　俊幸 板倉　明仁 大石　久巳	材料研究部 三菱自動車(株) トヨタ自動車東日本(株) トヨタ車体(株) (株) 共和電業 エムティエスジャパン(株) スズキ(株) 工学院大学
2015.11	非線形解析フォーラム 「産業機器用エンジン設計者におけるCAE活用」	杉浦　規郎	産業機器カンパニー 技術部
2015.11	IDAJ CAE Solution Conference 2015 「SUBARUのエンジン性能開発へのGT－POWER活用事例」	菅沼　邦彦	CAE部
2015.11	LS－DYNA & JSTAMPフォーラム 2015 「複合材料を用いたエネルギー吸収部材の研究Ⅱ」	池田　　聡	CAE部
2015.11	自動車技術会「車両開発を進化させるCAE技術の現状と未来」シンポジウム 「CAEを用いた新型レガシィの車体振動性能開発」	丹羽　仁史	CAE部
2015.11	PLM Solution Seminar in 太田 2015 「今見直すLO1活用による図面効率化の取り組みと今後の展望」	細堀　敏広	技術管理部

発表時期	会　議　名 「発表タイトル」	講　演　者 （○は代表者）	所　　属
2015.11	電子デバイスフォーラム 「ぶつからないクルマ？スバルが生んだアイサイトの秘密」	樋渡　　穣	車両研究実験第4部
2015.11	型技術協会ワークショップ2015in群馬 「ぶつからないクルマ？スバルが生んだアイサイトの秘密」	樋渡　　穣	車両研究実験第4部
2015.11	立命館大学キャリアセンター 「ぶつからないクルマ？スバルが生んだアイサイトの秘密」	樋渡　　穣	車両研究実験第4部
2015.12	ADAS／自動運転の最新動向セミナー 「ぶつからないクルマ？スバルが生んだアイサイトの秘密」	樋渡　　穣	車両研究実験第4部
2015.12	自動車技術会ガソリン部門委員会 No.10－15 シンポジウム 「単気筒エンジンの改良による開発プロセスの課題対応」	山口　　暁	技本PGM（環境対応）
2015.12	第7回伝熱技術部門委員会 「CFDによるラジエータ放熱量の机上予測」	宮本　秀治	車両研究実験3部
2015.12	SAMPE JAPAN 先端材料技術展2015 講演 「CFRP用高能率穿孔ドリル（Rドリル）の開発」	斎藤　　学	航空宇宙カンパニー 製造部
2015.12	福岡モーターショー 2015 自動車産業フォーラム 「開発責任者が語る！クルマづくりのこだわり」	碓井　茂夫	先進安全設計部

2. 寄　稿

発表時期	寄　稿　先 「発表タイトル」	著　　者	所　　属
2015.02	日本機械工学会誌 2015年50巻 第2号 「SUBARU WRX STIのボクサーサウンド開発」	田中　　伸 高嶋　伸吉	車両研究実験第1部 シャシ設計部

（公社）：公益社団法人、（一社）：一般社団法人　（公財）：公益財団法人、（一財）：一般財団法人

編 集 後 記

2015年度は、スバル車の世界販売台数は95.8万台となり過去最高を記録するとともに、スバルが1972年以降生産し続けてきたAWD車の累計生産台数が1,500万台を超えました。さらに、運転支援システム「アイサイト」が、世界に先駆け実用化された独自開発の運転支援システムとして評価され、「グッドデザイン金賞」を受賞したというニュースもありました。スバルが「より安全に、より愉しく」を主眼に、一貫して自動車本来の基本性能を磨き続けてきたことが、お客様に選んで頂いた台数や受賞という成果となって現れたことは技術者として大変嬉しい限りです。

さて、本号43号では、自動車部門からは新型フォレスターと新型SUBARU XVの2つのSUVの進化をご紹介し、安全性能、燃費性能、デザイン、CAE、生産技術など幅広い分野の詳細記事を集めました。また、航空宇宙カンパニーと産業機器カンパニーからも、技術開発の成果を分かりやすくまとめた記事をお送りします。スバルの多岐にわたる技術開発の内容が垣間見られますので、読者の方にスバルをより深く知っていただき、今後ともスバルを選んでいただく一助になれば幸いです。

最後に本号の発刊にあたり、業務多忙な折ご協力いただきました執筆者の皆様と、編集に尽力いただきました関係各位に厚くお礼を申し上げると共に、これからも富士重工業技術陣の日々の奮闘の成果を分かりやすくお伝えできるよう、スバル技報のさらなる充実を祈念し結びといたします。（手塚）

スバル技報編集委員会構成表

委員長：佐瀬　秀幸　技術開発部
委　員：山内　直志　スバル商品企画本部
大関　　透　デザイン部
佐瀬　秀幸　技術開発部（委員長兼務）
坂崎　明彦　技術管理部付
塚田　剛久　車体設計部
山村　英人　外装設計部
小林　秀樹　CAE部
宇津木 芳明　シャシー設計部
五島　　賢　内装設計部
石田　　卓　電子商品設計部
小林　祐司　電子プラットフォーム設計部
碓井　茂夫　先進安全設計部
阿久澤 光弘　材料研究部
塚崎 裕一郎　車両研究実験第1部
調所　弘和　車両研究実験第2部
冨士　　啓　車両研究実験第3部
手塚　俊介　車両研究実験第4部
高橋　　泰　試作部
安藤　儀和　CS生産技術部
早川　　健　エンジン設計部
委　員：高橋　　裕　トランスミッション設計部
金子　　誠　技術本部 PGM
塩崎　竜二　パワーユニット研究実験第2部
山本　光夫　パワーユニット研究実験第3部
飯島　　真　電子技術部（東京）
大抜 由起夫　HEV設計部
荒井　一真　スバル技術研究所
村田　　巌　航空宇宙カンパニー 研究部
矢澤　哲男　産業機器カンパニー 技術部
事務局：福島　儀隆　技術管理部（群馬）
黒田　宏彦　技術管理部（東京）
髙見澤　剛　技術管理部（群馬）
大町　昭司　技術管理部（東京）
藤田 江利子　技術管理部（群馬）
川平　　出　認証技術部
伊能　喜博　第2認証技術課
小杉　富雄　富士テクノサービス株式会社
永澤　精一　富士テクノサービス株式会社
石松 喜代司　富士テクノサービス株式会社
富岡　淑美　富士テクノサービス株式会社

スバル技報第43号（非売品）

発　　行　平成28年6月
発行兼編集人　スバル技報編集委員会
発 行 所　富士重工業株式会社技術管理部
群馬県太田市スバル町1-1
電話　0276-26-2411
印　　刷　富士テクノサービス株式会社
群馬県太田市金山町27-1
電話　0276-26-2626

©2016 Fuji Heavy Industries Ltd.
禁無断転載

SUBARU