

ISUZU TECHNICAL JOURNAL ISSN 0287-5446

いすゞ技報

【特集】
新型エルガEV

136
Nov.2024

いすゞ技報　第136号（2024）
目　　次

◇ 巻頭言

- 新型エルガ EV　— One Team 開発 — …… 上田　謙 …… 1

◇ 特集　新型エルガEV

- 新型エルガ EV の開発について …… 熊田　哲也 …… 4
- 新型エルガ EV の製品概要について …… 伊東　孝人 ほか …… 8
- 新型エルガ EV のデザインについて …… 堀澤　信之 ほか …… 13
- 新型エルガ EV のボディについて …… 小野口　芳男 ほか …… 18
- 新型エルガ EV のシャシについて …… 安住　陽一郎 ほか …… 23
- 新型エルガ EV の電子・電装・空調について …… 小山内　裕 ほか …… 29
- 新型エルガ EV の開発における車両走行シミュレーション Tool の活用 …… 山西　博 …… 34
- 新型エルガ EV の車両審査実験について …… 熊倉　航 ほか …… 38
- 新型エルガ EV の電動化技術 …… 押田　直也 ほか …… 45
- 新型エルガ EV の先進安全技術 …… 中西　哲 ほか …… 51

◇ 新製品紹介

- 新型エルフミオの開発について …… 増子　智一 ほか …… 54

◇ 論文・報告

- 将来に向けた車室内空気質デザイン …… 達　晃一 ほか …… 60
- リーン NOx トラップのモデルベース開発に関する研究（第 1 報） …… 大堀　鉄平 ほか …… 65
- リーン NOx トラップのモデルベース開発に関する研究（第 2 報） …… 大堀　鉄平 ほか …… 73
- DPF 強制再生時の PM 燃え残り予測モデルの構築 …… 中村　圭介 ほか …… 81
- AI を用いた画像検査システムの内製化 …… 山出　直弘 ほか …… 88
- 樹脂射出発泡成形の技術開発の取組み …… 江頭　崚 …… 94
- Light Duty Battery Electric Vehicle – Battery Degradation Modeling … Sparsh Saxena ほか … 100
- Commercial Vehicle – Development and Validation of Vehicle Dynamics Model to Aid in Handling Evaluation …… Nitin Edla ほか …… 107
- An Accelerated Method to Generate Concrete Level Scenarios for AD/ADAS Scenarios Library-Based Testing …… Yifan Wei ほか …… 113
- Experimental Validation of Event-Triggered Model Predictive Control for Autonomous Vehicle Path Tracking …… Meng Xu ほか …… 120

◇ 解説・講義

- 人とくるまのテクノロジー展 2024 への出展 …… 中村　直人 …… 128

◇ 特許・実用新案 …… 131

◇ 社外発表（2023年1月～2023年12月） …… 133

◇ いすゞ歴史の一こま（No.34） …… 12, 28, 59, 80

ISUZU Technical Journal No.136 (2024)
– CONTENTS –

◇ Foreword

- New ERGA EV - One Team Development - ..... Ken Ueda 1

◇ Special Edition for New ERGA EV

- Development of New ERGA EV ..... Tetsuya Kumada 4
- Outline of New ERGA EV ..... Takato Itou et al. 8
- Design of New ERGA EV ..... Nobuyuki Horisawa et al. 13
- Body of New ERGA EV ..... Yoshio Onoguchi et al. 18
- Chassis Design of New ERGA EV ..... Youichirou Azumi et al. 23
- Electronics, Electrical Equipment and Air Conditioning of New ELGA EV ..... Yutaka Osanai et al. 29
- Use of Vehicle Driving Simulation Tool in New ERGA EV Development ..... Hiroshi Yamanishi 34
- Vehicle Performance Test of New ERGA EV ..... Wataru Kumakura et al. 38
- Electrification Technology of New ELGA EV ..... Naoya Oshida et al. 45
- Advanced Safety Technology for New ELGA EV ..... Akira Nakanishi et al. 51

◇ Introduction of New Products

- Development of New ELFmio ..... Tomokazu Masuko et al. 54

◇ Technical Papers and Reports

- Future Design of Cabin Air Quality ..... Koichi Tatsu et al. 60
- Study on Model-Based Development for Lean NOx Trap (First Report) ..... Teppei Oohori et al. 65
- Study on Model-Based Development for Lean NOx Trap (Second Report) ..... Teppei Oohori et al. 73
- The Investigation of DPF Model Optimization on Temperature and PM Distribution Inside of DPF during Active Regeneration ..... Keisuke Nakamura et al. 81
- Internalization of Image Inspection System Using AI ..... Tadahiro Yamaide et al. 88
- Efforts in the Development of Resin Injection Foam Molding Technology ..... Ryo Egashira 94
- Light Duty Battery Electric Vehicle – Battery Degradation Modeling ..... Sparsh Saxena et al. 100
- Commercial Vehicle – Development and Validation of Vehicle Dynamics Model to Aid in Handling Evaluation ..... Nitin Edla et al. 107
- An Accelerated Method to Generate Concrete Level Scenarios for AD/ADAS Scenarios Library-Based Testing ..... Yifan Wei et al. 113
- Experimental Validation of Event-Triggered Model Predictive Control for Autonomous Vehicle Path Tracking ..... Meng Xu et al. 120

◇ Explanation and Lecture

- Automotive Engineering Exposition 2024 Hosted by JSAE ..... Naoto Nakamura 128

◇ Intoroduction of ISUZU Patents 131

◇ Publications and Speeches by ISUZU Engineers(2023) 133

◇ A Frame in ISUZU History(No.34) 12, 28, 59, 80

巻　頭　言

新型エルガ EV　― One Team 開発 ―

開発部門　執行役員　上田　謙
Ken Ueda



いすゞのバスの歴史は古く、路線バスのそれは 1948 年、当時岐阜にあった川崎重工業（株）のバス製造事業まで遡ります。一方､現在の宇都宮工場は 1968 年に汽車製造(株)の鉄道貨車製造から 1972 年に川崎重工となり、1986 年アイ･ケイ･コーチ（株）を経て､2002 年にジェイ･バス（株）が誕生しました。現在では小松工場で観光バスを、宇都宮工場では路線バスを生産しており、今回の新型エルガ EV（Electric Vehicle）も宇都宮工場で生産されています。なお、工場に隣接する引込み線はかつての鉄道貨車製造の名残です。

路線バスは地域住民の生活を支える重要な交通手段の一つで、なくてはならない存在です。また、そのほかにもバスを活用することで、交通渋滞の緩和や CO2 削減など環境に配慮した交通手段の一つであるとも考えられています。特に路線バスは日中の運航が主体となり、定められた走行ルートを計画的に運用されることから､カーボンニュートラル化に適しており､求められるのは必然的な動きだと思います。

そのような背景の中、我々は「新型エルガ EV」を開発していくにあたり、特別な思いがありました。それは 2025 年日本国際博覧会（大阪・関西万博）に純国産初の EV バスを導入したい、という一つの大きな狙いがあったことです。しかし、その時は既に 2022 年半ば、2025 年の運用に間に合わせるには、2024 年 8 月には量産を開始しなければならず、約 2 年余りでこのプロジェクトを成功に導く必要がありました。まさにそれは「バス xEV 開発×短納期＝未知の領域」で、本当にできるのだろうか？というのが当時の率直な思いでした。なぜなら、先に開発が進んでいたエルフ EV で、非常に多くの困難と産みの苦しみがあったことを経験しているからです。しかし、後にこのエルフ EV の経験が大いに活かされることになりました。

更に新型エルガ EV は単に EV 化しただけではありません。先に市場導入している中国車に対し、単なる純国産化だけではなく、いすゞならではの優位性、商品力を確保する必要がありました。それは冒頭の歴史の中で築き上げてきた、いすゞのディーゼルバス、すなわち日本の道路事情に精通した､「安心・安全」そして「信頼・実績」を備えた EV バスの開発が求められたのです。もちろん競合車にはない、お客様にとって斬新であり、まさに『地球の「運ぶ」を創造する』バスです。

いすゞならでは、という点で新型エルガ EV は多くの特筆すべき商品性を有することができました。

【安全性】

- **全座席に段差なくアクセスできる**、国内初のフルフラットフロアを実現
- ドライバーの異常状態を DSM（Driver Status Monitor）で検知、EDSS（Emergency Driving Stop System）を装備したことにより**自動で安全に停車**
- 国内バス初となる、停車後に EPB（Electric Parking Brake）も自動で作動、**エンジンを切ったあとでも制動力を保持**
- 法規制を先取りし他社に先駆けて MOIS（Moving Off Information System）を採用、**自車前方の歩行者や自転車などを死角から守る**

【信頼性】

- **国内道路事情に配慮した小回り性能**、従来比 400 mm 縮小した最小回転半径 7,900 mm を確保
- バス専用 ZF 製モータ付きドロップアクスルの採用により、**スムーズかつ必要十分な動力性能**
- 現ディーゼル車から**違和感なく、安全に乗り換え運航**ができるよう運転席周りの配置を継承
- 路線バスで国内初となる**排気口を備えた外気導入方式をエアロゾルフィルターと同時に採用**

詳細の説明は本編の「特集:新型エルガ EV」に譲りますが､EV 化はもちろんのこと､さまざまないすゞの技術を取り入れ、乗車されるお客様のみならず、運行業者やドライバーの皆様への配慮も織り込んで開発をしました。これは社会へ、人へ少しでも貢献したいという開発者の気持ちの現れと思います。

我々がモノづくりの開発で一番苦労したのが、先に述べました日程・時間軸です。これまでのバスのプロジェクトでは、ここまで大きな変更規模や短時間での開発は経験がありませんでした。従来の企画構想、設計試作、評価、そして量産部品調達から生産ステージの造り込み、などといった開発工程では、到底間に合いませんでした。そこで従来のウォーターフォール型からコンカレント型の開発を強力に推進する必要がありました。

これを可能とするべく講じた施策が、「5 部門による ONE TEAM 開発体制」です。CN 戦略部門、開発部門、生産部門、購買部門、そして品質保証部門の 5 部門で当時の平尾統括 CE を首座とし、毎週各部門からの進捗や課題を報告、困りごとは他部門の課題であっても、全員でどうにかならないか、という思いで部門の壁を乗り越え、課題解決をしてきました。そこには、「誰の担当だから」や「それはそっちの問題」などという概念や思いは存在せず、一人ひとりが自分事ととらえ、さまざまなアイデアを出し合って、リスクを明確にして前に進み、困難を乗り越えてきたのです。

また、今回 iQUAVIS（アイクアビス）というデジタル管理ツールを活用し、全体日程から各部門の工程表への落とし込み､そしてそれぞれの工程変更が､どのように影響があるのかをタイムリーに見える化､いわゆる DX 化も実施、大きなチャレンジでありましたが有効性を確認することができました。今後のプロジェクトにも活用をしていく予定です。

一方で大事なのは猪突猛進だけではなく、冷静な立場、目線での判断です。そこで、品質を担保するためにも品質保証部門に参画を依頼し、場合によってはダメなものはダメ、というある意味品質の番人を担っていただきました。

そして生産を担うジェイ・バス(株)の皆様にも、ボーダーレスでいすゞグループの一員としてチーム

活動に参画いただきました。生産ステージでは現場の安全を担保すべく、いすゞの開発、生産部門も一緒に、改めて安全総点検の活動を実施し、何より優先されることを再認識しました。

100 年に一度の変革期といわれる自動車産業、我々いすゞ自動車グループもその渦中におります。しかし、その答えはいまだ誰にも分かっていない状況だと思います。今回の新型エルガ EV のプロジェクトでは、その答えが分からない中、与えられた環境の中でこなしていくのではなく、なぜこれが必要なのか、そしてそれを達成するために自分は何ができるのか、是が非でもやり抜く、ハードルが高ければ高いほど、一人一人の思いが確実に強くなっていくのを目の当たりにし、たとえどんな方向に向かおうとも、これがある意味、いすゞの答えの一つなのかもしれないと感じました。

最後に、このプロジェクトに携われたことを誇りに思うのと同時に、社内外に関わらずこのプロジェクトにご協力いただきました、すべての皆様に心から感謝を申しあげます。



新型エルガ EV 構内循環バス（藤沢工場）

新型エルガ EV の開発について

Development of New ERGA EV

熊田　哲也*
Tetsuya Kumada

要　旨

新型エルガ EV は BEV 化により温室効果ガスの排出を削減する環境対応のみならず、量産車として国内初となる車内フロアのフルフラット化を実現し、乗客の安全性を大幅に向上した。本稿では新型エルガ EV の開発の狙いについて、概要を紹介する。

Abstract

The new model ERGA EV not only responds to the environment by reducing greenhouse gas emissions due to its BEV conversion, but also introduces the first fully flat interior floor in a mass-produced vehicle in Japan, significantly enhancing passenger safety. This article provides an overview of the goals of developing the new ERGA EV.

1　はじめに

日本政府は「2050 年カーボンニュートラル（以下、「CN」と称す）に伴うグリーン成長戦略」を掲げており、脱炭素への取組みはバス事業者にも求められ、国産の BEV（Battery Electric Vehicle）路線バスへの期待が高まっている。いすゞとしても CN 社会実現に貢献するため、2030 年までに全車種に電動化商品を展開することを表明している。路線バスは決められたルートを走行することから、各種商用車のなかでも BEV の特性と親和性が高いと考える。

一方で、日本は 65 歳以上の割合が 28 % を超えた。高齢者が増えることで路線バス車内の段差での転倒事故のリスクが増加する。つまり、これからの路線バスにはよりバリアフリーに対応することが求められる。国土交通省事業「地域のニーズに応じたバス・タクシーに関わるバリアフリー車両の開発検討会」2011 年 7 月最終報告書でも 10 年後の長期目標として車内フロアのフルフラット化が掲げられているが、フルフラットフロアの路線バスはいまだ普及していないのが現状である。

こうした市場環境の中では、BEV による CN 対応のみならず、使用者の安全を第一に考えたバリアフリー車両の開発が必要である。更に、物流業界で問題視されている 2024 年問題はバス業界でも同様であり、運転者への負担軽減も考慮したドライバーフレンドリーな車両へのニーズもあると考える。

いすゞは、長年の開発で培った実績を活かし、乗客・ドライバー・道路事情に配慮したフルフラット BEV 路線バス「新型エルガ EV（Electric Vehicle）」の開発を行った（**図 1**）。

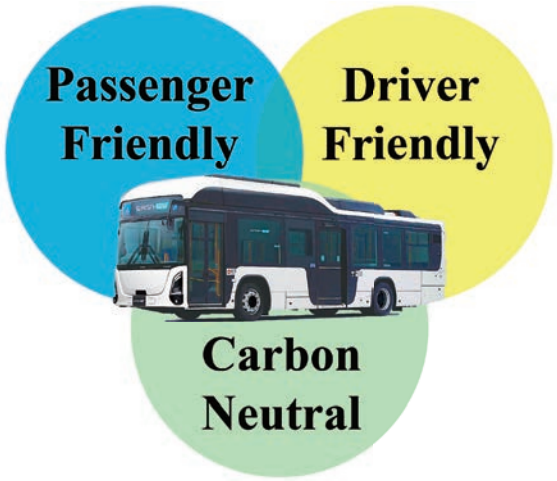


図 1　新型エルガ EV の狙い

2　開発コンセプト

公共交通機関として、CN への要求と安全性に対する社会要求に対応するため、本車両開発にあたりコンセプトを二つ掲げた。

① 安全・安心：『No.1 の安全』をスローガンに「車内事故ゼロ」「対人死亡事故ゼロ」を目指す。
② 信頼・実績：ディーゼルバスで培った経験から「日本の道路事情」「事業者」「利用者」に配慮した開発を目指す。

* CN 商品企画・設計部

2.1 安全･安心

近年のバス車内の安全性については、ドライバーの安全確認と車内アナウンスの徹底などで件数は減り始めているが、下げ止まりの状態である（**図 2**）。ドライバーによる乗客への注意喚起などのソフト面の対策に加え、車内事故防止に資するハード面での対策が必要と考える。

また、車外事故についてはバス事業者の社会的イメージの悪化となるが、先進安全技術の採用により発生件数を低減できると考える。

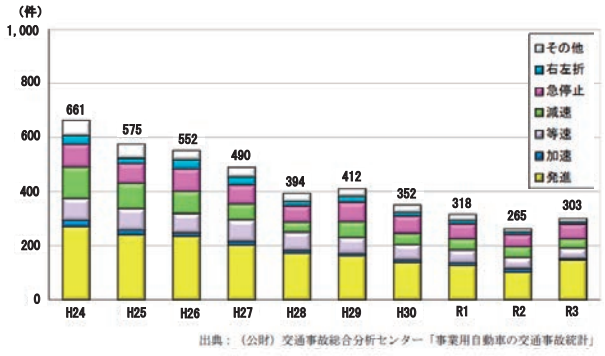


図 2　バス車内事故件数の走行モード別年次変化

2.1.1　フルフラットフロア

車内での転倒事故ゼロを目指し、全ての座席が段差無くアクセス可能な配置とすることを目標とした。従来のディーゼルエンジンバスでは後部にパワートレインがあることで室内後部に段差を設ける必要があったが、BEV 化することでこの課題を解決する。

リヤアクスルの左右にそれぞれ駆動用モータが内蔵された「インアクスルモータ」を採用することで、フロアレイアウトの自由度が高まり、車内前部の乗降口から最後部座席まで段差のないバリアフリー化を実現（**図 3**、**図 4**）し、乗客の利便性及び安全性が飛躍的に向上した。更に、BEV がもたらすスムーズな加速感と低騒音・低振動が相まって、快適性も大幅に向上している。

昨今、路線バスの CN 化だけが先行しているように思われるが、いすゞはバリアフリー車両開発の手段の一つとして BEV 化を提案する。

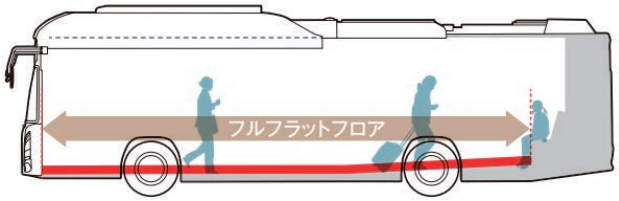


図 3　フルフラットフロアエリア

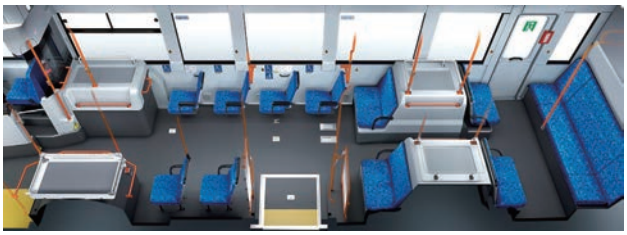


図 4　段差のない室内

2.1.2　先進安全装備

先進安全装備の拡充については、従来のディーゼルエンジンバスでも採用されているドライバーステータスモニター（DSM：Driver Status Monitor）とドライバー異常時対応システム（EDSS：Emergency Driving Stop System）に対し、作動後に停車した際に自動でパーキングブレーキがかかるような制御を追加した。これにより、坂路などでのシステム作動後に車両が動かないため、安全性を向上した（**図 5**）。また、対人死亡事故ゼロを目指し、他社に先駆け路線バスとして初めて前方衝突警報装置であるフロントブラインドスポットモニター（**図 6**）を採用した。

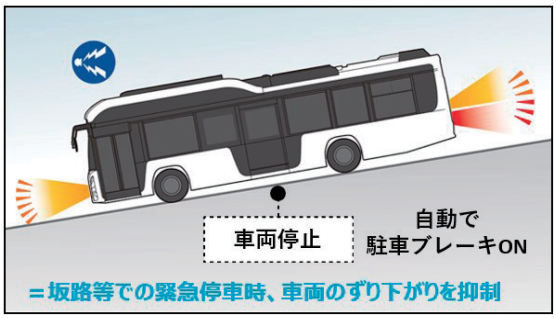


図 5　EDSS 作動時



図 6　フロントブラインドスポットモニター

2.1.3　快適な室内空間

ドライバーや乗客が安心して快適に過ごせる空間となるように換気システムを一新した（**図 7**）。路線バスでは初めての外気導入機能付き電動エアコンと排出口を設定することで換気性能を向上させるとともに、エアロゾルフィルタの採用により、ウィルスなどの細かい粒子を捕集する。

また、室内の手すりの高さも従前車より改善した。前側乗降口から優先席につながる伝い歩き用の手すりについては、高齢者の使いやすさから床面からの高さを800mm とした。最後部座席につながる通路（**図 8**）はベビーカーが通れる寸法を目標とした。

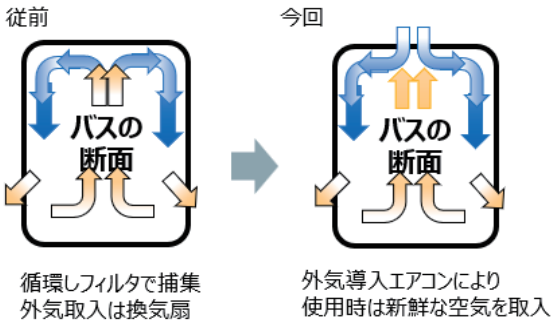


図 7　換気システム



図 8　最後部への通路

2.2 信頼･実績

いすゞは、従来の開発で培った路線バス開発のノウハウがあるため、その考え方を本開発にも取り入れた。特に、国内の道路事情に配慮した仕様設定が挙げられる。本製品は BEV 路線バスの導入期の市場投入となるため、ディーゼル車との運転操作の違いがないようにドライバー視点の作り込みにも注力した。

2.2.1 バッテリー容量と航続距離

高電圧バッテリーは先に量産開始されているエルフ EV のものを活用することで信頼性と市場サービス性も確保した。従来のバッテリーのデータを分析し国内路線の 1 日の走行距離を算出、適切な高電圧バッテリーの搭載数を決定した。

電費改善のために回生協調ブレーキ制御（**図 9**）もいすゞとして初めて採用した。回生協調ブレーキ制御とは、ブレーキペダルを踏み込む際に摩擦ブレーキと回生ブレーキを組合せることにより、フットブレーキ操作による減速時も電力を回収する。停止が多くフットブレーキ操作が多い路線バスの使われ方であれば電費は約 30 % 良化した。

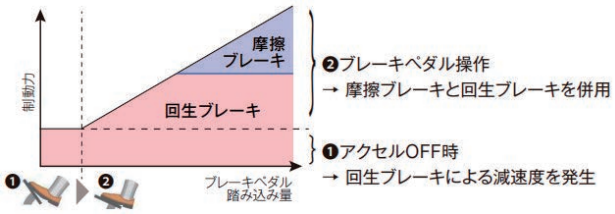


図 9　回生協調ブレーキ制御

2.2.2 ディーゼル車との乗り換えを考慮

一日にさまざまなバスを乗り換えて運転するドライバーの安全性と負担軽減に配慮し、運転操作系についてはディーゼルバス同等となるように作り込みを実施した。

運転席周り（**図 10**）については、敢えてディーゼルバスと共通化し、EV 固有の操作を極力減らすように配慮することで重大事故につながる操作ミスを無くす。メータはディーゼルバスのものをベースとし、BEV 固有の項目を追加。スタート操作もシリンダキー方式とした。

ブレーキペダル操作による制動力や補助ブレーキとしての回生による制動力についてはディーゼルバスと同等となるようにチューニングを行った。クリープ車速についても同様とし、運転操作に関する BEV の違和感を払拭する。



図 10　新型エルガ EV の運転席

2.2.3 動力性能

従来の路線バスの走行ルートを全て網羅できるような動力性能（**図 11**）を目指した。山間・山岳などの高負荷な使われ方でも連続走行可能な動力性能になるよう、EV システム、モータ冷却システムなどを工夫した。発進加速性はモータ特性により向上しているが、路線バスは立席があるため、高加速度が発生しない調整も実施した。

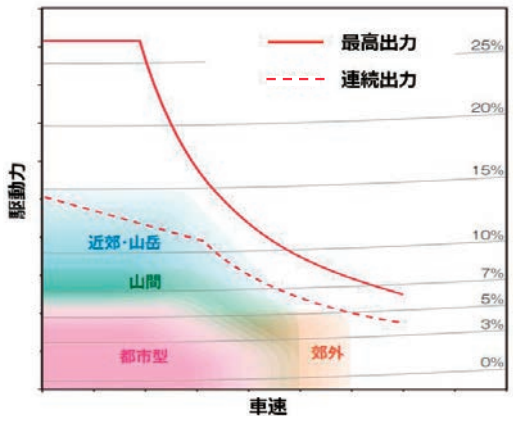


図 11　走行性能曲線

3　おわりに

東京都が掲げる ZEV（ゼロエミッションビークル）普及プログラムや 2025 年 4 月に開幕される「2025 年日本国際博覧会」というワールドショーケースの場において、国産の BEV 路線バスへの期待が高まるなか、量産車として国内初となるフルフラット BEV 路線バス「新型エルガ EV」を早期に市場投入することができた。

法規対応や新技術など、いすゞとして、路線バスとして初めての課題が多々あったが、部門を超えたさまざまな方々にご協力いただくことで、開発を推進できた。この場を借りて本プロジェクトに関わった、すべての関係者の皆様に感謝を申し上げ結びとしたい。

本文献は、事業用自動車の交通事故統計（令和 3 年版）より一部転載を行った。

参考文献

(1) 国土交通省自動車局　事業用自動車の交通事故統計（令和 3 年版）　令和 5 年 3 月

著　　者



熊田　哲也

新型エルガ EV の製品概要について

Outline of New ERGA EV

伊東　孝人*
Takato Itou

宗　泰助*
Taisuke Sou

要　旨

公共交通機関としてのカーボンニュートラルへの要求と、車内事故ゼロといった安全性に対する社会要求に対応した、フルフラットフロア BEV 路線バスである新型エルガ EV の開発を行った。製品概要を本稿に示す。

Abstract

We developed the new ERGA EV, a full flat floor BEV route bus, in response to societal demands for carbon neutral public transportation and zero in-vehicle accidents. This article introduces the outline of new ERGA EV.

1　はじめに

昨今の路線バスを取り巻く大きな社会問題は二つあり、その一つとして車内事故が挙げられる。車内事故の発生原因のうち、乗客の不安定姿勢や急ブレーキによる事故が半数を占めている状況である。車内事故の総数としては、ドライバーの安全確認と車内アナウンスなどで減り始めているが下げ止まりの状況であり、今以上の事故防止には車両側での対策が必要と考える。

不安定姿勢による車内事故の一因として、車内の段差による高齢者の転倒事故がある。ディーゼル車では車両後方に ENG（エンジン）が搭載されており、駆動軸に動力を伝えるためプロペラシャフトが車両中央を通っているため、中扉より後方は車内に段差が発生している（**図 1**）。

また、発進・停車時の急な加減速によって、車両の揺れ戻りやトランスミッション（T/M）の強い変速ショックが発生することも事故の増加につながる。

もう一つの社会問題としては、物流業界の 2024 年問題によるドライバー不足やバスの減便もバス業界の大きな課題であり、これまで以上にドライバー・乗客に寄り添った視点で車両を開発していく必要がある。

以上の路線バスを取り巻く大きな社会問題を解決するためには、路線バスの BEV (Battery Electric Vehicle) 化が最適である。

新型エルガ EV (Electric Vehicle) の開発では「車内・車外安全性」と「ドライバーフレンドリー」に配慮した車両設計に取り組んだ。

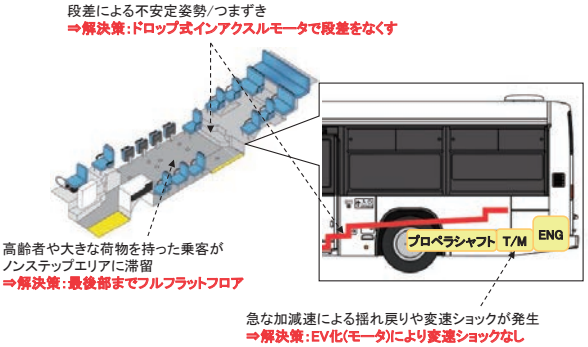


図 1　車内安全に関するレイアウト課題と解決策

2　開発の狙い

車内事故ゼロを目指し、車内の段差を無くして、フラット部から全ての座席に着座できることを目標とした。車外安全では対人死亡事故ゼロを目指し、前方衝突警報装置を他社に先駆け採用した。

また、2024 年問題に対応するべく、運転操作性はディーゼル車の扱いに慣れたドライバーが運転した際に違和感なく使え、運転負荷が軽減する技術を採用した。更に、日本の道路事情に配慮し、小回り性を向上させた車両スペックを狙った。

3　商品概要

3.1　主要諸元

大型のディーゼル車と同様に全長 10.5 m、11.5 m の 2 車型のバリエーション展開。主力車型である 10.5 m の主要諸元を**表 1** に示す。バッテリーは商用

* CN 商品企画・設計部

EV に適したエルフ EV と同じ三元系リチウムイオンバッテリーを採用。エルフ EV と共通化することで信頼性の担保と、補給部品の流通性が利点となる。充電はバッテリー容量に対する充電時間とバスの運用方法を考慮し急速充電のみとした。ブレーキは、ディスクブレーキが一体となったインアクスルモータの採用に伴い、フロントもディスクブレーキを採用し、総ディスクブレーキ化とした。制動安定性を向上させることで車内事故抑制を狙った。また、整備性も向上しブレーキ摩擦材の整備交換時間は従来のドラムブレーキ式と比べ約半数以下の工数となる。

表 1　10.5 m 主要諸元

車両型式		ZAC-LV828L1
床仕様		フルノンステップ
車内仕様		都市型
乗降方式		前乗りまたは中乗り
乗車定員(人)		70（座席19+立席50+乗務員1）
全長(mm)		10,545
全幅(mm)		2,485
全高(mm)		3,330
ホイールベース(mm)		4,990
車両重量(kg)		12,360
車両総重量(kg)		16,210
充電規格		急速充電：CHAdeMO
駆動用バッテリー	種類	リチウムイオンバッテリー
	パック数	11(ルーフ7・リヤ4)
	総電圧(V)	354
	容量(kWh)	245.3
一充電航続距離(km) (30km/h一定速)		360
駆動用モータ	型式	HR11
	種類	交流誘導電動機
	定格出力(kW)	174(87×2)
	最高出力(kW/rpm)	250(125×2)/3,430rpm(ECE)
	最大トルク(N·m/rpm)	960(480×2)/100rpm(ECE)
タイヤサイズ(前後共)		275/70R22.5 148/145J
サスペンション(前後共)		車軸式エアサスペンション
主ブレーキ		空気式　前後：ディスク
補助ブレーキ		モータ充電式回生ブレーキ

3.2 レイアウト

フルフラット化を実現させるべくドロップ式インアクスルモータユニットを採用し、EV 機器はリヤオーバーハング部に集約させた。バッテリーは屋根上フロント部と床下に分散配置させることで最適な重量配分を狙い、ノンステップエリアを確保しつつフルフラット化を実現した（**図 2**）。

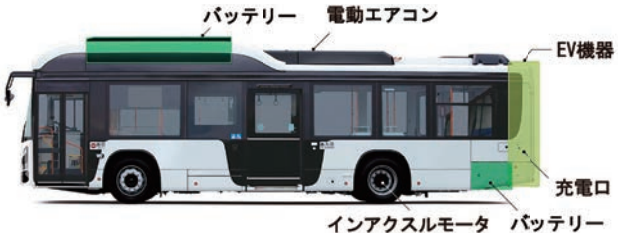
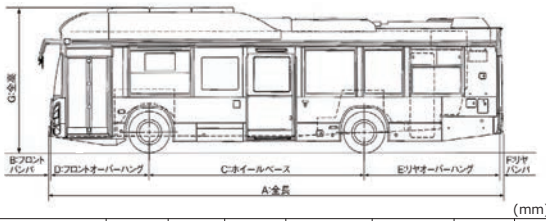


図 2　装置レイアウト

EV 機器をリヤオーバーハングに集約したことで客室エリアとの関係が困難だったが、EV の特徴である装置レイアウトの自由度を活かして、EV 機器室を最小限のスペースに抑え、各種車両寸法をディーゼル車から見直し、最適化することでノンステップエリアを最大限に確保させた。車両寸法を**表 2** に示す。

また、ディーゼル車で培った日本の道路事情への配慮を活かし、特に主力となる 10.5 m 車については狭いロータリや狭あい路の走行を考慮し、最小回転半径をディーゼル車以下となるよう開発した。ホイールベースを短縮し小回り性の改善を図りつつアプローチ・デパーチャアングルなどの車両運用に関わるスペックは現行同等を確保した（**図 3**）。

表 2　車両寸法



(mm)

車型		A 全長	B フロントバンパ	C ホイールベース	D フロントオーバーハング	E リヤオーバーハング	F リヤバンパ	G 全高
10.5m	新型エルガEV	10,545	40	4,990	2,285	3,210	20	3,330
	23型エルガ	10,430	45	5,300	2,255	2,740	90	3,045
11.5m	新型エルガEV	11,545	40	5,990	2,285	3,210	20	3,330
	23型エルガ	11,130	45	6,000	2,255	2,740	90	3,045



最小回転半径	7.9m	❶ 最低地上高	145mm
直角カーブ所要道路幅	6,000mm	❷ アプローチアングル	9.6°
タイヤ切角(内側/外側)	53°/39°	❸ デパーチャアングル	8.4°
		❹ ランプアングル	11.6°

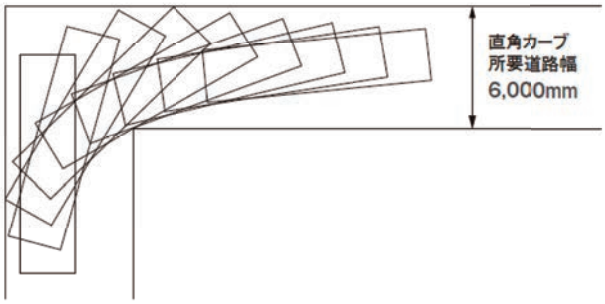


図 3　小回り性

3.3 座席レイアウト

安全性を優先しフルフラット部に全ての座席を設けたことで、フラット部から直接アクセス可能な座席数がディーゼル車の 7 席から 19 席に増加した（図 4）。

：フルフラット部分

車型	全長	フラット部から乗降できる座席	室内レイアウト
23型 エルガ	10.5m	7	
新型 エルガ EV	10.5m	19	
	11.5m	21	

図 4　座席数

フルフラット化により中扉より後ろも段差がなく優先席とすることができるため、ディーゼル車では優先席数が 3 席だったところを 10.5 m で 4 席、11.5 m で 5 席と増加させることができ、高齢者利用に配慮した座席レイアウトを狙った（図 5）。最後部までフルフラットになったことにより、従来は中扉付近で止まっていた高齢者やスーツケースを持った乗客などが、最後部座席までスムーズかつ安全に移動・着座でき、車内の人流改善につながる。

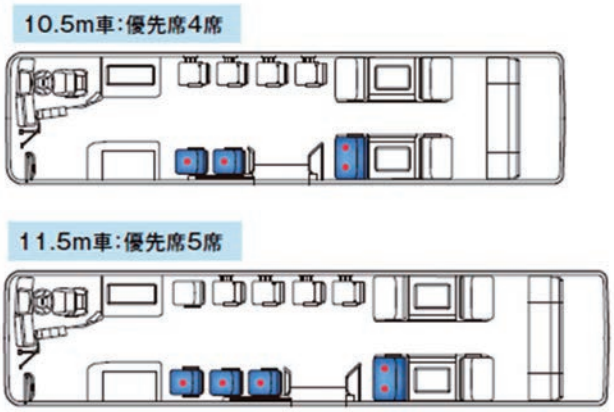


図 5　優先席数

3.4 デザイン

EV としてアピールできるよう先進的なデザインでディーゼル車との差別化を狙った。フロント・ヘッドランプ周辺にはトラックとの共通化を持たせ、フロント・リヤにデザイン自由度のある樹脂パネルを採用することで、各バス会社のカラーリングを入れやすいユーザーカラーアピールゾーンを確保させたエクステリアとした（図 6）。

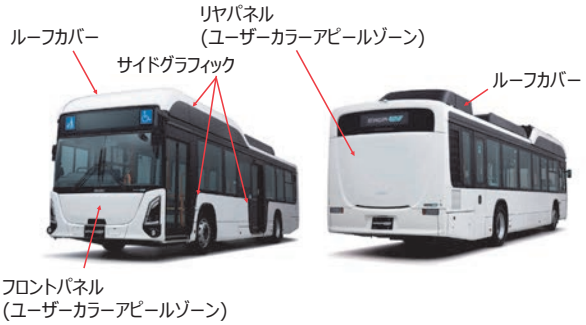


図 6　新型エルガ EV デザイン

3.5 運転操作性

2024 年問題に対応するべく、ディーゼル車との乗り換えを考慮し運転席周りは可能な限りディーゼル車と共通とした。EV 固有としてはメータ・シフトスイッチ・パーキングブレーキスイッチが変更となる。

メータはディーゼル車のメータパネルをベースとしており、ディーゼル車の不要な項目を削除し、EV 固有の表示を追加させた。車速表示も併せて見直し、最も使う車速域をドライバーの正面に表示させることで視線移動量の低減を狙った（図 7）。

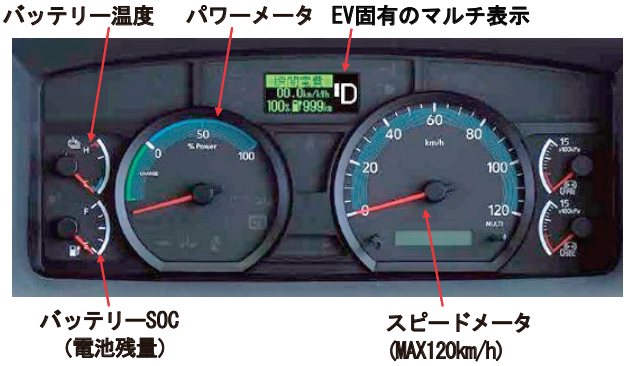


図 7　新規メータ

シフトスイッチは直感的に操作しやすいようドライブ・ニュートラル・リバースの 3 操作とし単一スイッチ化した。パーキングブレーキには電動パーキングブレーキを採用（図 8）。軽いスイッチ操作で作動及び解除が可能となる。なお、パーキングブレーキ解除時はアクセル操作のみで可能となる。また、パーキング未操作でキー OFF した場合でも自動でパーキング作動するため、運転負荷軽減と安全性を両立させた。



図 8　シフト・電動パーキングブレーキスイッチ

3.6 バッテリーサーマルマネジメント

バッテリーの劣化抑制のため、BEV ではバッテリー温度を細かく制御することが必要であり、水冷式のバッテリー温度管理システムを採用した。夏季は外気温より低い温度へ制御させる必要があるため、ラジエータと冷媒を使用したチラーを併用した回路とした。冬季はその逆で外気温より加温する必要があり、高電圧ヒータを採用し加温機能も搭載した。バッテリーをルーフとリヤ部で分散配置したことで温度環境が違うため、温度制御しやすいようシステムも独立させ 2 系統とした（図 9）。

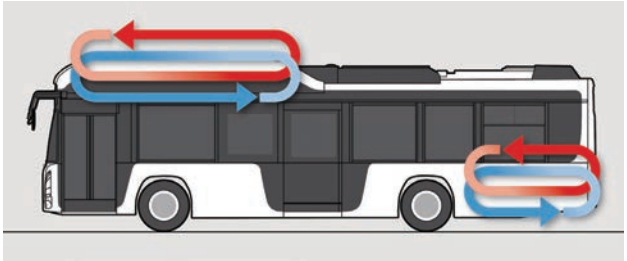


図 9　バッテリー温度管理システムイメージ

3.7 灯火器類

灯火器類はオール LED 化とし、夜間の視認性向上及び長寿命化を図った。フロント・ヘッドランプはトラック同様のシグネチャーランプを採用。リヤは新たにハイマウントストップランプを採用し後続車からの視認性を向上させた。ライセンスプレートランプも LED 化とし、ランプ補修や交換作業の頻度が低減され点検整備性も向上させた。概要を図 10、図 11 に示す。

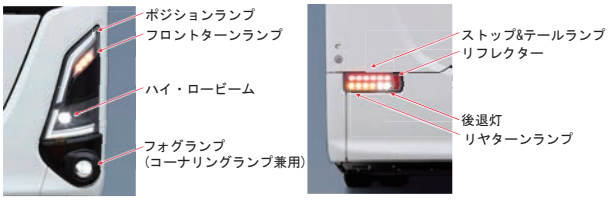


図 10　フロント・リヤランプ

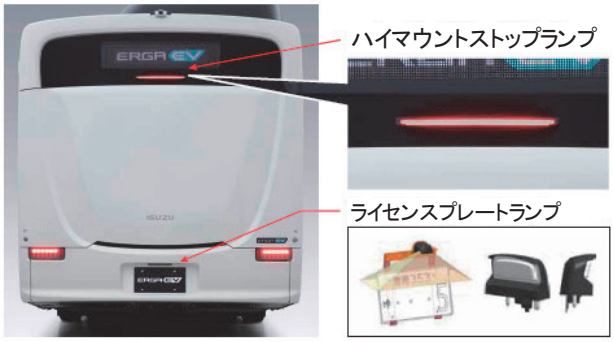


図 11　新規ハイマウントストップランプ

3.8 給電システム

災害時の救援車として運用できるよう V2L (Vehicle to Load) 機能を搭載（図 12）。日本国内主流の EVPS-004:2014 規格に対応させた。外部電気装置を用いることで災害時の避難者約 50 人以上の 1 日分の電力を供給可能となる。新型エルガ EV は BEV としてトップクラスのバッテリー容量を誇るため、災害救援は乗用車にはない本車両ならではの強みとなる。



図 12　外部給電概要

3.9 ボディ構造

屋根上に高電圧バッテリーを搭載させるため、ルーフと側面、フロアの骨格をつないで一体化した環状骨

格を採用しボディ構造を強化した（**図 13**）。ボディ剛性アップさせたことにより車内の静音化にも貢献している。

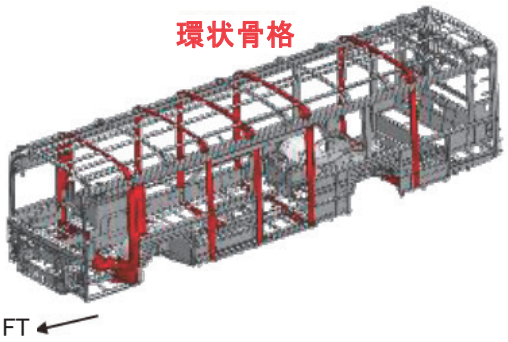


図 13　ボディ構造概要

4　おわりに

新型エルガ EV の製品概要について、その特徴を紹介した。個々の装置･仕様などの詳細については別稿にて述べているので参照願いたい。いすゞの路線バスとして初の量産 BEV を開発するにあたり、技術的課題やレイアウト課題、車両の組立、部品調達、アフターセールス等の大きな課題を解決する必要があったが、部門を超え一丸となって取り組むことでタイムリーに課題解決させることができた。最後に、本プロジェクトに関わった、全ての関係者の皆様に感謝を申し上げ結びとしたい。

著　　者

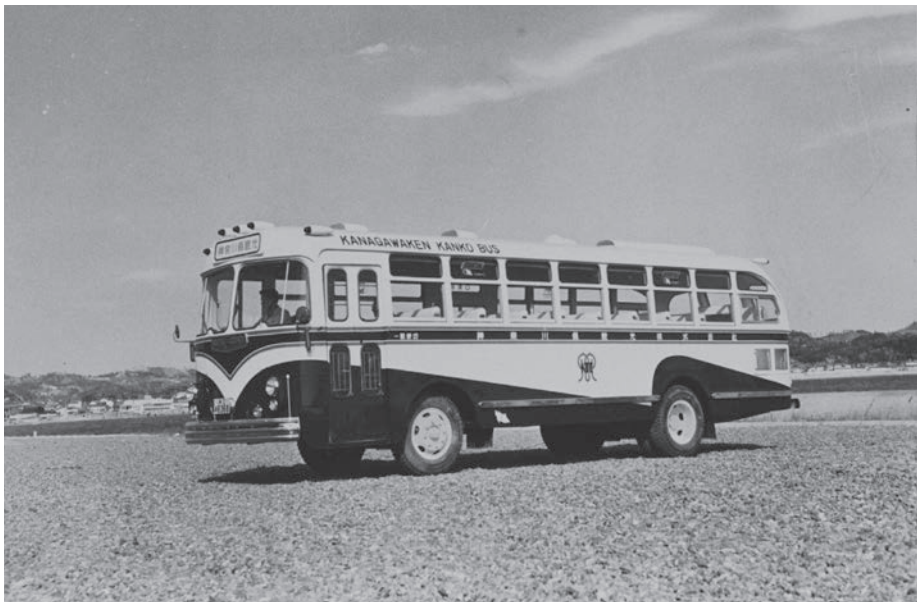


伊東　孝人



宗　泰助

◇いすゞ歴史の一こま



BA341 型バス　（1957 年ごろ）

新型エルガ EV のデザインについて

Design of New ERGA EV

堀澤　信之*
Nobuyuki Horisawa

古屋　隆彦*
Takahiko Furuya

要　旨

国産路線バスにおいて初となるフルフラットフロア仕様の BEV 路線バス「新型エルガ EV」は、市場ニーズが高まるカーボンニュートラルへの対応と、バス事業が直面する多様な課題への対応を主眼として開発を進めてきた。

デザイン面では、EV 固有の特性を活かした新たな路線バスのイメージの創出や、バスに関わる多種多様な人々の期待に応えることを目指しながらスタイリングを行ってきた。本稿では、次世代へ向けて進化させた新型エルガ EV のデザイン開発について紹介する。

Abstract

The ERGA EV, the first fully flat-floor battery EV route bus produced in Japan, has been developed with a primary focus on responding to the growing market need for carbon neutrality and addressing the various challenges the bus business faces.

In terms of design, the styling was designed with the aim of creating a new image for route buses that makes use of the unique characteristics of EVs and meeting the expectations of the diverse stakeholders involved in buses. This article introduces the design development of the ERGA EV, which has evolved for the next generation.

1　はじめに

現在、バス事業は重要な課題に直面している。特にドライバー不足は、利用者の少ない路線の運行数削減など、問題を引き起こしている。また高齢利用者の増加に伴う車内転倒事故の多発や、更なる利便性向上対応など課題は多岐にわたる。

一方で政府が推進するグリーン成長戦略のもと、社会全体の環境意識の高まりから、カーボンニュートラルに対応した EV（Electric Vehicle）車両への代替加速、ドライバー不足に対する解決策として多様性を活かした人員確保といった業界変化の兆しも見受けられる。また、MaaS（Mobility as a Service）の概念から生じた交通機関全般の利便性の向上が期待される中、マイカー利用を控え公共交通利用へ転換するなど、利用者側の意識として今後バスを取り巻く変化に対する期待感も存在する。

このような背景の中、事業者及び利用者からの EV バスに対する期待は非常に高く、街中の人々や利用者が乗ってみたい、またドライバーが運転したいと思えるような魅力的なスタイリングを市場にアウトプットすることで、人と街とバスの関係をよりよいものにできるとの想いでチーム一丸となり車両のデザイン開発に取り組んだ。

2　デザインコンセプト

路線バスの運用は、一般的にサービスや車両仕様において効率が重視される傾向にある。このような中で人と街とバスのよりよい関係を創出するという目標を達成するには、単に移動効率だけを追い求めず、生活の中でバスを利用する理由や運転する意義、バスのある暮らしを今一度見つめ直そうという意識も必要だと考えた。

その結果、EV ならではの静粛性やクリーンなイメージに合せ、親しみやすさや安心感を表現することで、今まで以上にバスとの関わりを楽しく密なものに進化できるとの想いに至り、デザインテーマを『スローバス コンセプト』とし、CLEAN、EASY、SAFETY をキーワードに据えデザインをまとめた。(**図 1**)

*デザインセンター



図1　デザインコンセプト

3　エクステリアデザイン検討

3.1 フロント周り

前述のコンセプトにもとづき、まずはクルマの顔ともいうべきフロント周りのデザインに焦点を当て、デザイン検討を進めた。ヘッドランプは商用車で使用実績のあるフルLED仕様のランプを採用することが決まっており、この特徴的なヘッドランプの形状を活かした顔造りが前提となった。

また、フロントパネル類は全て樹脂化されることとなったため、部品同士をまたいだ立体的かつ緻密な面構成が可能となった。

そこで、ヘッドランプ上端の傾斜を活かしサイドまでつながるデザインや、内側の斜めラインを活かした下すぼまりになるデザインなど、フロント全体としてさまざまなデザイン案を検討した。(**図2**)



図2　フロントフェイス検討スケッチ

スケッチによる検討を重ねた結果、最終的にヘッドランプ内側の斜めラインに沿ったU字型のキャラクターを持つデザインを採用することに決めた。これによりシンプルだが張りのある面とシャープなキャラクターラインで構成されたフロントフェイスとなり、「クリーンで親しみやすい」というコンセプトを表現することが可能になった。(**図3**)



図3　クリーンで親しみやすい外観表現

一方で、この特徴的な形状のヘッドランプがもたらす課題もあった。それは顔周りの印象が人を運ぶバスと荷物を運ぶトラックと全く同じものになってしまうというものである。そこでヘッドランプと下側のフォグランプベゼルを一体化し、ランプ下側のエッジを無くしたうえで丸みを帯びた矩形を採用した。これにより、トラックの鋭い印象から一転して親しみを感じられるスタイルとなった。(**図4**)

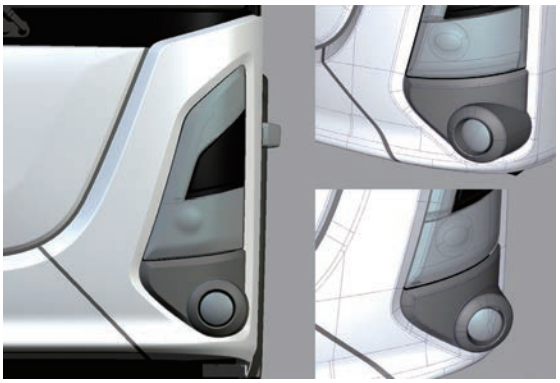


図4　フォグランプ周辺形状

3.2 リヤ及びサイド周り

リヤ周りもEV機器の搭載及び整備性確保のため、アッパーパネル、リッド、バンパともに新作となり、これを機に樹脂化することになった。

そこで、フロントと同様にこれら3点のアイテムを一体的に捉え、リヤ全体でデザイン案を検討した。そして最終的にはフロントと同じU字型を採用し、車両全体としてコンセプトを強調することにした。

また、ボディサイドのグラフィックも前述のフロント、リヤと同じU字型とした。グラフィックラインは親しみやすさを表現するためにゆったりとしたものにし、更に扉の位置と連動させることで乗降時の分かりやすさにも配慮した。(**図5**)

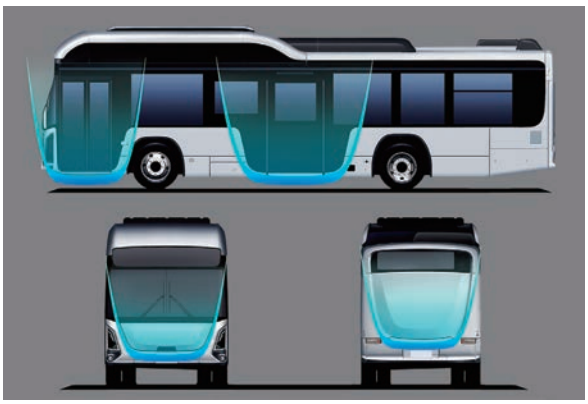


図 5　U 字型グラフィック

3.3 VR を活用したスタイル検討とスケールモデル

これまでのバスのデザイン開発では、その車両の大きさから 1/1 サイズでさまざまなデザイン案を検討するのは現実的に困難だった。しかしこの難題は近年導入された VR（Virtual Reality）可視化技術によって克服され、時間短縮とリアルなスケール感での評価が可能となった。

そこで今回のプロセスでは、この VR を徹底的に活用し、新しいデザイン案をデータにて作成し、VR で検証するというサイクルを繰り返した。

これにより、従来では不可能であった 1/1 サイズにおけるフロントフェイスのバリエーションの横並び検討、ボディサイドのグラフィックパターンの検討、ルーフカバーが付くことによる現行車とのたたずまいの比較、更に目線からルーフ上の機器類がどれくらい見えるかなどあらゆる角度から VR での検証を行ってデザイン品質を向上させていった。(**図 6**)



図 6　VR でのエクステリア検討

そして、事前にスタイリングを十分検証できたことにより 1/5 スケールモデルは手作業によるコントロールを一切することなく、VR で最終確認したデータをそのまま切削し、塗装仕上げを行うだけでプレゼンテーションモデルとして供することが可能になった。(**図 7**)



図 7　1/5 スケールモデル

3.4 スタイル決定モデル

デザインの最終段階として、VR で検討したデータでクレイ切削してフルサイズモデルを制作した。このモデルにシルバーのフィルムを貼り付け、実際に屋外の環境であらゆる角度から検証することで、サーフェイスの微妙な表情、ハイライトの流れ、キャラクターラインの傾向、各部品同士の合せ、そして各部の角 R サイズなど VR と実物でその印象が異なる部分を確認した。更にこれらの箇所をデータ上で修正し、部分的に切削して再び屋外で確認する。このステップを集中的に繰り返すことで、最終的なエクステリアデザインとして玉成した。(**図 8**)



図 8　フルサイズモデル検討

4　インテリアデザイン検討

4.1 インテリアデザイン

路線バスにおける最大の課題は「車内安全」であり、これには伝い歩き用グリップが重要な役割を果たす。一般的にグリップの高さは床から 800 ㎜が最適とされており、これまではフェンダカバーの上部に取り付けられていた。しかし今回はフロアのフルフラット化に伴い相対的にホイールハウスが高くなっている。その結果、グリップの最適な高さと干渉するだけでなく、室内におけるフェンダカバーの圧迫感が非常に増してしまった。

そこでカバーの一部をえぐり、グリップをカバーにインテグレートするという発想でデザインを検討した。またカバー本体の通路側の部分はこれまでにない大きなRを採用することで造形的な圧迫感を低減し、安全性へ配慮した形状とした。(**図9**)



図9　リヤフェンダカバースケッチ

4.2 運転席周辺のデザイン

これまでドライバー後方のパーテーションは、パイプ鋼材と透明樹脂パネルや塗装鋼板などで構成されており、各部品の間には隙間があった。しかし、開発期間中に流行した新型コロナウィルス感染症を機に、今後想定される新たな感染症対策のため成形パネルで隙間を無くし、右前フェンダカバー、パーテーションそして上部の仕切りを一体化するデザインを採用した。またこのパーテーションは、EDSS（ドライバー異常時対応システム）を客室エリアにいる乗客が作動させるために、ドライバーの挙動を確認できる視認性と運転操作エリアのプライバシーを確保する遮蔽性が必要とされた。そこでリヤドア周辺の仕切り板と合せてクリーンなストライプ状のグラフィックを採用し、その幅を場所によって変えることで視認性と遮蔽性の両立を図った。(**図10**)



図10　パーテーショングラフィック

ドライバーの手元に配置されるギヤセレクタレバーは、車両の電動化に伴い廃止され、R･N･Dのボタン式となった。そこで、電動パーキングブレーキと一体化することでシンプルさと操作性の向上を狙った。ボタン化に伴う操作感や可読性への配慮ためにボタン表面形状や表示フォントの吟味を繰返し、実際のレイアウトを再現しながら関係者で確認し、形状やフォントを詰めていった。(**図11**)

また、メータ意匠に関してはEV化を機に見直し、可読性向上とブランドの統一性を考慮したいすゞ独自のフォントを採用した。(**図12**)



図11　ギヤセレクタレバー検討



図12　メータデザイン

4.3 インテリアデザインにおけるVR活用

バスのインテリア部品の多くは単品でスタイル検証を進めているため、室内全体における視覚的な影響を把握しにくく、また、実物大のモックアップや実車での検討を伴うため評価に至るまでには時間を要していた。そこでこれらの課題を解決するため、エクステリア同様にインテリアでもVRを積極的に活用してスタイル検討を行った。

VRによる検証や評価は、仮想空間ではあるが室内を移動しながら同時に数名が情報共有し、実車に近い形で全てのデザインアイテムを確認ができるため、通路幅、グリップとの位置確認、各カバー類の形状や大きさ、そして角に掛かるRの大きさなどの印象を一度で確認することができた。

また立体形状の評価のみならず室内全体のカラーバランスの検討も、実物での検証を行う以前にインテリア全体として評価が可能となり、室内空間としての完成度を高めることができた。

今回のインテリアデザインで試みた手法や試行錯誤した課程は、今後のバスのインテリアデザインプロセスのひな形になるものと考える。(**図 13**)



図 13　VR でのインテリア検討

5　おわりに

2023 年 11 月に開催されたジャパンモビリティショーにおいて、量産に先駆け新型エルガ EV を発表した。

来場いただいた一般の方や事業者関連、メディアの方々からさまざまなご意見をいただいたが、改めて国産 EV バスへの期待の高さを実感するとともに、デザインコンセプトに対する理解を確認することができた。

カーボンニュートラルに向けた車両の BEV (Battery Electric Vehicle) 化、車内転倒事故に対してのフルフラットフロア対策、そして先進デバイスによるドライバー支援を盛り込むなど従来のバスから大きく進化したのが今回の新型エルガ EV である。そうしたハード面の進化と合せて、バスがより人々の身近な存在となるように「スローバス コンセプト」をテーマとしてデザイン作業を進めてきた。

これまでのバス開発は、運用時のライフサイクルコストを低く抑えることや、さまざまな使用状況への対処を容易にする設計といった、効率を優先した製品作りを重視してきたもので、周囲や利用者に向けた心地よさや雰囲気の醸成に対しての取組みは少なかった。その反省から、確かにバスは生産財でありコストや効率を重視することに変わりはないが、新型エルガ EV の開発は、効率を追求する考え方から周囲や利用者、ドライバーへ配慮するモノづくりへと焦点をシフトさせ、製品を通じてバスを取り巻く環境全体を好循環にしていこうという目標のもと、関係部署間で製品仕様や見栄えについて繰返し構想のすり合せを行った。

その結果、機能を維持しながらも親しみやすく安心感をおぼえる斬新なスタイルを達成することができたと考えている。(**図 14**)

そして今から数年後には、きっと国内各地でこの新型エルガ EV が人と街とバスとのよりよい関係をもたらしてくれるものと強く期待している。最後に、デザイン開発において多大なる御協力をいただいた関係者の方々に紙面を借りて感謝の意を表し、本稿の結びとしたい。



図 14　新型エルガ EV 最終レンダリング

著　　者



堀澤　信之



古屋　隆彦

新型エルガ EV のボディについて

Body of New ERGA EV

小野口　芳男*
Yoshio Onoguchi
小林　慎平*
Shinpei Kobayashi
山倉　浩介*
Kousuke Yamakura
髙橋　祐貴*
Yuuki Takahashi
本城　一希*
Kazuki Honjyou
西田　生*
Susumu Nishida

要　旨

エルガは 2015 年のフルモデルチェンジを経て、この度、公共交通機関としての CN への要求に対応すべく、BEV 化対応と、国土交通省が推奨する「次世代ノンステップバス」の最終目標である「床面のフルフラット化」に対応したボディを追加した。

本稿では新型エルガ EV のボディの特徴と、開発手法について紹介する。

Abstract

For the purpose of dealing with the request of CN as public transport, we developed new body which addressed BEV as “Full flat floor” which is the end goal of “The next-generation non-step bus” which Ministry of Land, Infrastructure and Transport recommended after a full model change of ERGA in 2015.

This article introduces the strong points of the body and development techniques of the new-model ERGA EV.

1　はじめに

今回、CN（Carbon Neutral）と安全性に対する社会要求に対応した、床面をフルフラット化した BEV（Battery Electric Vehicle）路線バスの早期市場投入を図るため、従前ボディ構造を最大限に活かしながらバリエーション追加に取り組んだ。なお、床面のフルフラット化については、国交省によるバリアフリー車両の開発提言の「長期改造」にあたり、他の項目は従前車で対応済みである（**表 1**）。

2　ボディの主な変更点

2.1　従前ボディの活用と BEV 関連装置の搭載対応

主力商品であるディーゼル車との並行生産を両立させるべく、ベースとなる従前ボディの設計構造を最大限活かし BEV 化対応を行った。

(1) ルーフ上高電圧バッテリー、補機搭載対応

ベース車に対しルーフ上架装物重量が約 10 倍と大幅に増加するため、下記 3 点の対応を行った。

- 側部柱の断面増加（幅広化）
- 天井肋材の断面拡大（ダブル化）
- 環状骨格化（**図 1**）

表 1　路線バスのフルフラット化動向 [(1)]

	〔短期改造〕	〔中期改造〕	〔長期改造〕
定義	構造変更を伴わない改造	構造変更を必要とする改造	基本設計の変更が必要な改造
対応期間	１～２年 （次期モデルチェンジ･ポスト新長期対応車）	３～５年程度 （次次期モデルチェンジ･P. P. 新長期対応車）	５～１０年程度
改造例	・２人がけ座席→１人がけ座席 ・スタンションの追加、変更 ・色彩変更	・各部サイズ変更 ・座席レイアウト変更 ・タイヤ小径化	・フルフラット化 ・連接化

出典：「地域のニーズに応じたバス・タクシーに係るバリアフリー車両の開発」に関する報告書より抜粋
（国土交通省自動車交通局：短・中・長期の定義）

*ジェイ・バス株式会社

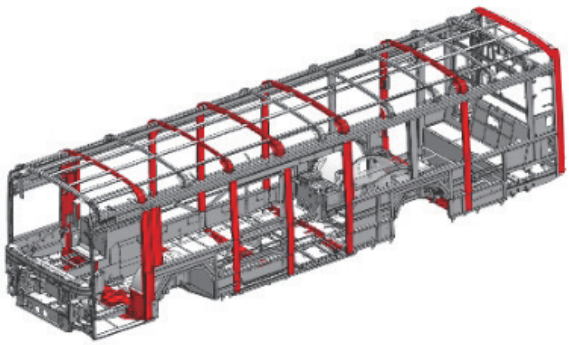


図 1　環状骨格

(2) 後方 EV 補機ルームの装置搭載性、整備性確保

EV（Electric Vehicle）補機は多くの装置から構成されるため、EV 補機をサブアセンブリ、モジュール搭載可能とした。そのため、車両尾部に大開口を確保するべく、下記 2 点の対応を行った。

- 従前連節バスの前車後端部の大開口構造の採用（**図 2**）
- 大型 1 枚リッドの採用（**図 3**、**図 4**）

(3) EV アクスルの搭載対応

車内床面のフルフラット化に対応した EV アクスル（ワイドサス）を搭載するため、次の対応を行った。

- 従前連節バスの第 2 軸目アクスル搭載構造の採用（**図 5**）



図 3　大型一枚リッド

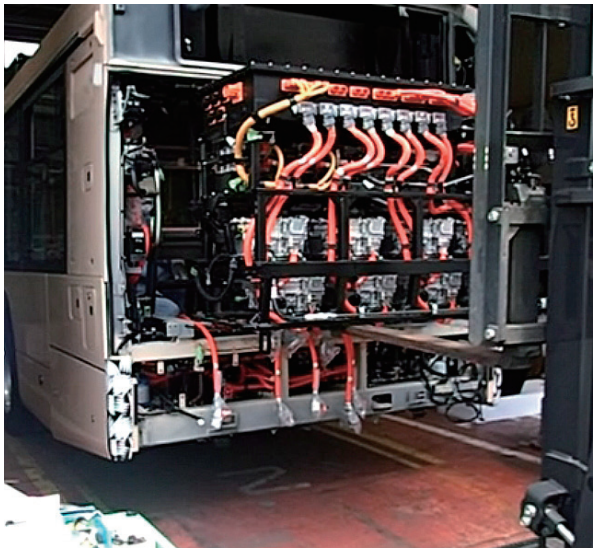
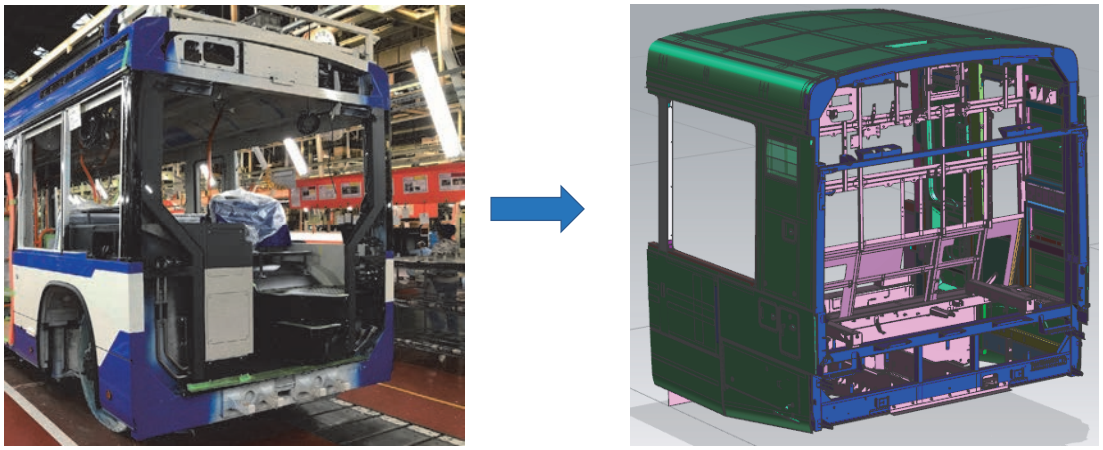


図 4　EV 補機搭載時の様子



連節バス　　新型エルガEV

図 2　大開口構造

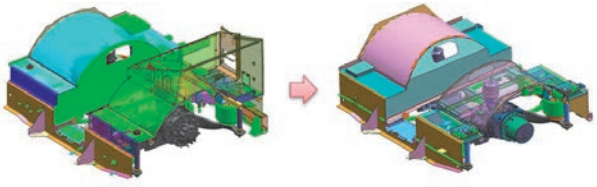


図5　第2軸目アクスル搭載構造

(4) 天井側を有効活用した配管配線レイアウト

車内床面のフルフラット化に伴い拡大した頭上の空間を有効活用し、天井部後方にエアタンクと電装品を格納した。また冷房ダクトの断面を見直し、お客様追加仕様増設も考慮した配線、配管スペースを確保した（図6）。

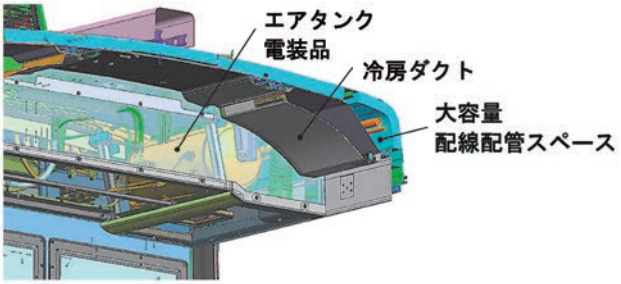


図6　後方天井部レイアウト

以上(1)～(4)により、ルーフ上重量物とEV補機の搭載上の強度確保と、リヤの大開口化を両立し、更にボディ強度を確保した上で、ボディのねじり剛性は従前車比30％増加している。

検討にあたっては、今回の負荷増加分を既存ボディを用いて評価路面を模した走行評価を解析上で行い、入力の把握と課題の抽出を行った。解析にあたっては、骨格幅拡大、環状骨格化の効果を解析モデルにフィードバックし、実車反映後応力測定を実施し、作り込みを行った（図7）。

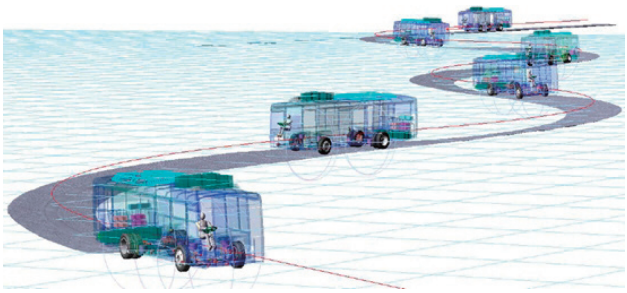


図7　走行解析の様子

2.2　車室内安全性向上

従前型エルガで好評であった低床レイアウトを更に改良し、下記(1)～(3)により完全フルフラット床を達成させ、更なる安全性と使い勝手の向上を図った。

(1) シートピッチの拡大と座面下の有効活用

シートピッチは従前車に対し拡大を図り、またフルフラット化したR.O.H（リヤオーバーハング）部には対面席を設け、乗客の居住性の向上と流動性を確保した（図8）。

フルフラット化に伴い背反となる各フェンダ凸部及びシート座面下部に機器を有効配置（シートフレーム一体カバーの採用など）により、乗客のシート座面高さの確保と、足元に凸となるものを完全に無くし、全ての座席にノンステップエリアからの離着席を可能とした（図9、図10、図11）。

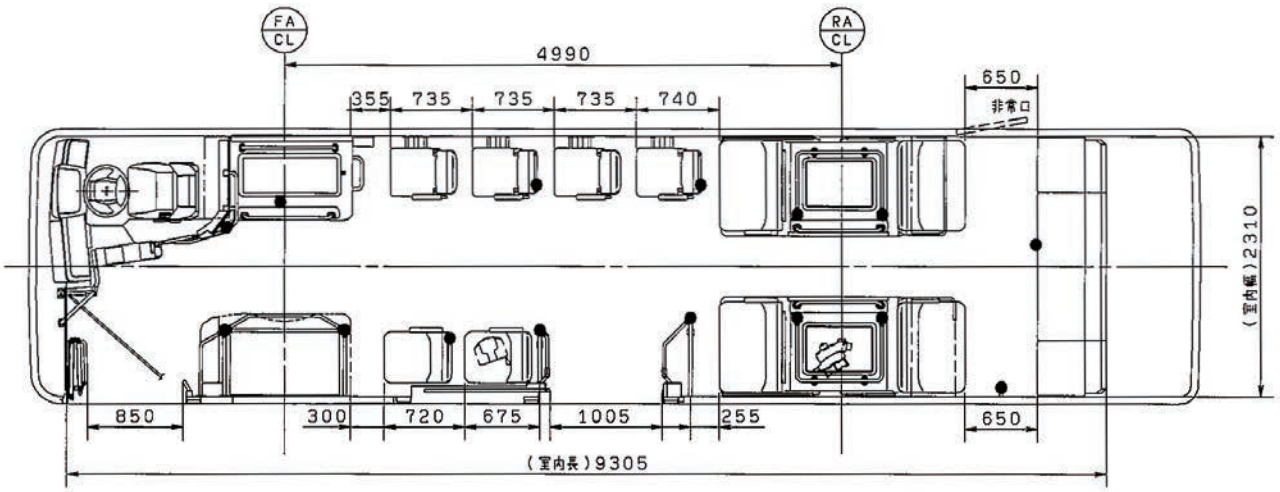


図8　室内レイアウト

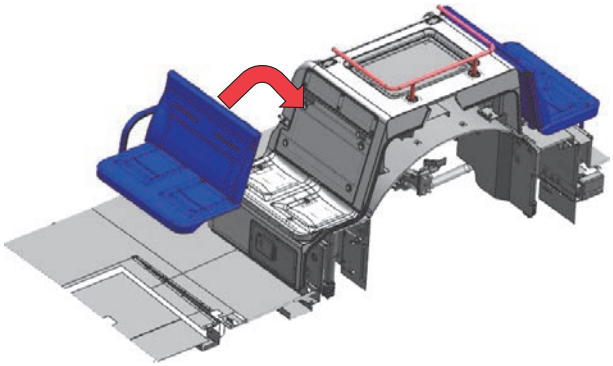


図 9　フェンダ部席シートフレーム一体カバーとシートクッション

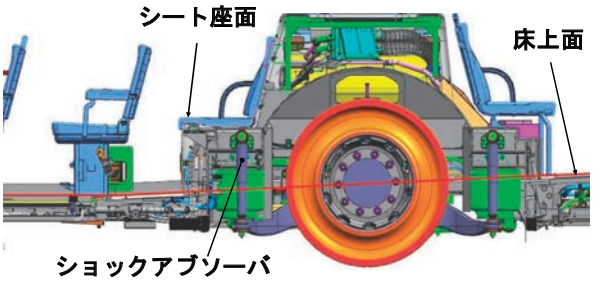


図 10　床下配置

また、非常口足元も低床部となり非常時の車外への脱出安全性も向上している。

(2) 車いす固定装置の利便性確保

従前車ではオプション対応であるが都市部で採用率の高い「車両設置型車いす固定装置」を標準採用とし、固定ベルトを従前車の中扉後方段縦面から床面に内蔵することにより、フルフラット床と車いす使用時の使い勝手向上を両立させた（図 12、図 13、図 14）。



図 12　車いす固定装置使用状態

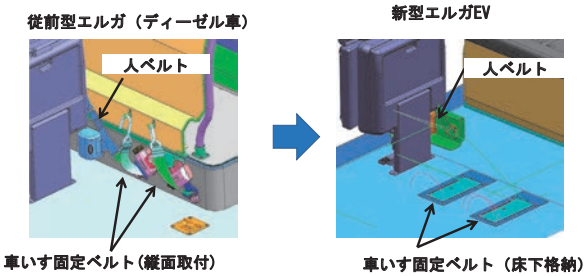


図 13　車いす固定装置（車いす後方側）

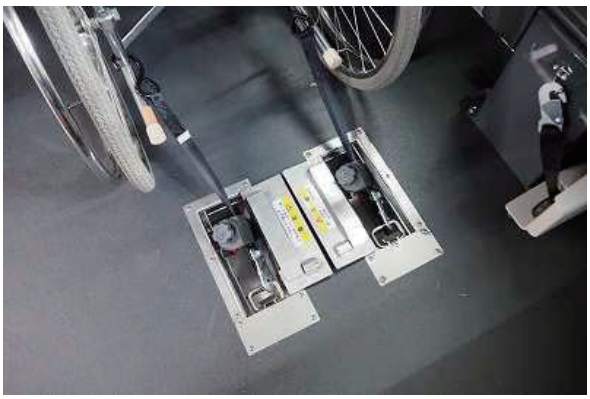


図 14　床面埋込式車いす固定装置

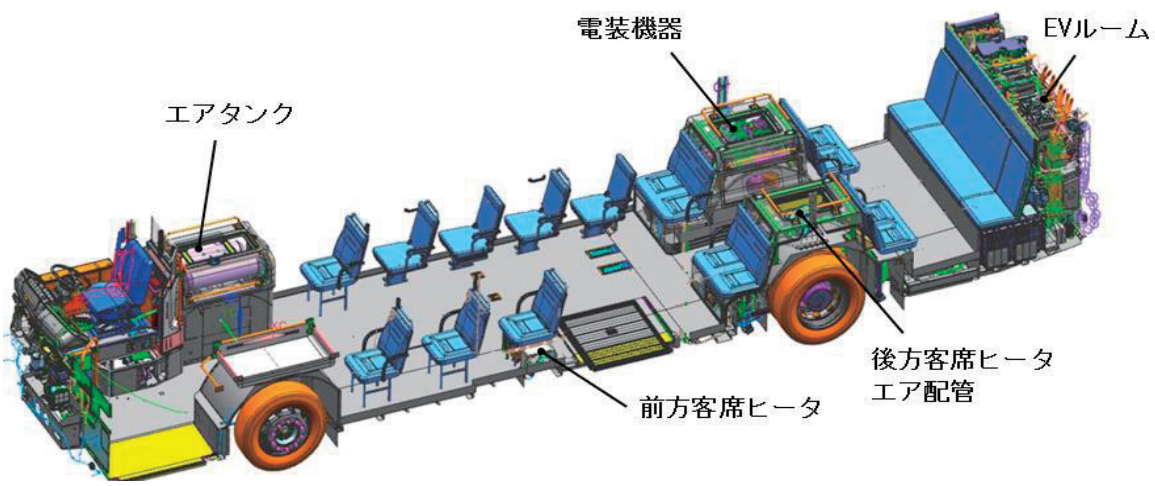


図 11　室内機器配置

(3) 伝い歩き握り棒の高さ最適化

最適な高さである床面800～900 mmの伝い歩き握り棒を全ての通路部で達成した（**図15**）。



図15　伝い歩き握り棒

2.3 バリエーション対応性向上

2.1節で述べたように環状骨格化により、更なるモジュール化を図り、全長バリエーション対応性と、使い勝手の共通性の向上が図られている（**図16**）。

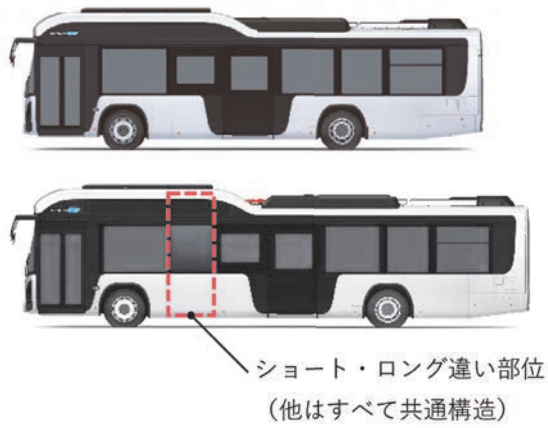


図16　全長バリエーション対応性

3　おわりに

今回、2つの社会要求である、CN化と、安全性向上長期目標の車内床面フルフラット化を両立させ、車両の発表発売を迎えることができた。

初めてのBEV化にあたっては、搭載機器の仕様変更やレイアウト課題なども数多く発生したが、その第一歩に携わることができ、非常に感慨深い思いである。今後も更に改善改良を図り、EVも含めた路線バスシェアNo.1確立を目指し努力してゆく所存である。

最後に、今回多大なるご指導･ご支援をいただいた関係各位に対し、本紙面をお借りし深く感謝いたします。

本文献は、「地域のニーズに応じたバス・タクシーに係るバリアフリー車両の開発」に関する報告書より一部転載を行った。

参考文献

(1)　国土交通省自動車交通局:短･中･長期の定義、「地域のニーズに応じたバス・タクシーに係るバリアフリー車両の開発」に関する報告書、国土交通省自動車交通局、(2009)、p.30

著　者


小野口　芳男


小林　慎平


山倉　浩介


髙橋　祐貴


本城　一希


西田　生

新型エルガ EV のシャシについて

Chassis Design of New ERGA EV

安住　陽一郎*　Youichirou Azumi
藤田　芳大*　Yoshihiro Fujita
渋谷　大博*　Motohiro Shibuya
福井　憲司*　Kenji Fukui
中村　博明*　Hiroaki Nakamura
板東　恒平**　Kouhei Bandou
渋谷　陽平**　Youhei Shibuya

要　旨

新型エルガ EV 開発では電動化・車内フロアのフルフラット化・ドライバーの負担軽減に対応するため、多くのシャシ装置の開発を行った。本稿では対象のシャシ装置（アクスル、ブレーキ、サスペンション、ステアリング、サーマルマネジメントシステム）の開発概要について紹介する。

Abstract

In the development of the New ERGA EV, many chassis devices were developed to cope with electrification, full flatness of the interior floor, and reduction of the driver's burden. This paper introduces the outline of the development of the chassis devices (Axles, brakes, suspension, steering, thermal management systems).

1　はじめに

国産初の BEV (Battery Electric Vehicle) 路線バスの開発にあたり、乗客の安全性を大幅に向上した室内フロアのフルフラット化を実現するため、低床のアクスルを採用し、それに合せたサスペンションを開発した。

また、回生協調ブレーキを採用することで航続距離の確保に貢献している。ステアリングは電動化に対応し、ドライバーの負担軽減と合せて EV (Electric Vehicle) 化のメリットである静粛性を確保しつつ信頼性の高いシステムを実現した。サーマルマネジメントシステムは先行するエルフ EV と部品の共通化を図りつつ路線バスに適した回路構成や制御へ見直しを行った。

2　アクスル

2.1　フロントアクスル

本プロジェクトでは航続距離向上のためのバッテリー搭載による軸重アップを想定し、現ディーゼルバスよりも許容軸重の高いアクスルを設定すべく新規とした。また、ブレーキフィーリング向上を狙いディスクブレーキが採用され、それに関連しハブ周辺の構造を変更した。

許容軸重は現ディーゼル：6,300 kg、EV バス：7,500 kg とし約 20 % アップさせた。それに対し重量は、I-BEAM（I 型鋼）の断面形状の最適化を行い、現ディーゼルと同様の重量に抑え軽量化に貢献した。

ハブベアリングは整備時間の短縮を目的としてユニットベアリング化を実施した。第二世代（第一世代にフランジを付与）を用いることによりハブベアリングを車両から降ろさず、ハブを締結しているボルトを外しロータ交換可とした。(**図 1**)

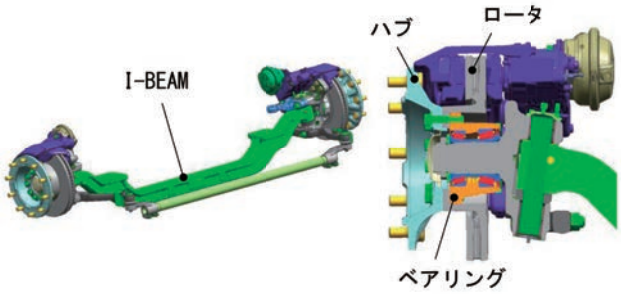


図 1　フロントアクスル外観とハブ周辺断面図

*バス商品企画・設計部　　**車両設計第二部

2.2 リヤアクスル

本プロジェクトの狙いとして、カーボンニュートラルに向けた環境対応EVバスとするためモータ付きリヤアクスルへの変更を行った（**図2**）。

モータは各輪を駆動するドロップ式アクスルインモータを選定した。ディーゼル車にあるファイナルが不要であり、低床化を可能とした。

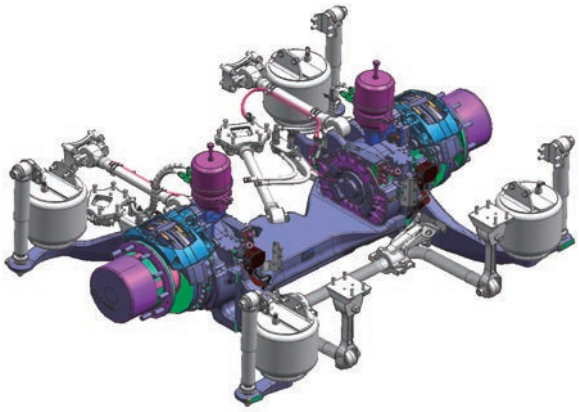


図2　リヤアクスル外観

3　ブレーキ

3.1 回生協調ブレーキ

BEVの路線バスにおいて、航続距離の確保は必須事項である。制動エネルギーの回収（＝回生ブレーキの使用）による電費向上を最大限発揮するため回生協調ブレーキ制御を採用した。

既存のブレーキシステムを有効活用し、大規模なシステムの変更することなく実現している。

ブレーキペダルの踏み込みにて回生ブレーキを作動、回生可能制動力までは回生ブレーキのみで、それ以上制動力が必要な場合は摩擦ブレーキを上乗せする。

車速の低下時はブレーキフィーリングを考慮して徐々に回生ブレーキを摩擦ブレーキに移行して摩擦ブレーキのみで完全停止する。高電圧バッテリー（以下、「バッテリー」と称す）の出力制限などにより回生ブレーキ力が低下した場合、要求減速度に対し実減速度は下回ることを避けるために摩擦ブレーキのみでの制動へ完全移行させる（**図3**）。

回生ブレーキを最大限に使用することで摩擦ブレーキの使用頻度を減らし、摩擦材の寿命向上にも貢献している。

ENG（エンジン）車とEV車の相互乗り換えや同一車両でのドライバーが変わるバスにおいて操作感の差異を生まないよう、ENG車と比べ違和感を覚えないブレーキフィーリングを実現した。

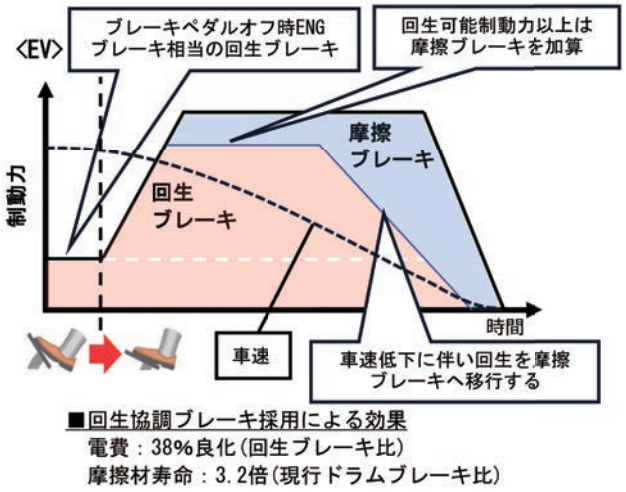


図3　回生協調制御の概要

4　サーマルマネジメントシステム

4.1 開発の狙い

新型エルガEVではEV化に伴いバッテリーや駆動用モータ、その他補器類などさまざまな装置が水冷による冷却対象となっている。各装置の目標水温はそれぞれ異なり、特にバッテリーはより細かい温度管理が要求されるため、以下2回路に分け温度管理を行った（**図4**）。

- EVシステム冷却回路（駆動用モータなどを冷却）
- バッテリー温調回路（バッテリーを冷却･加温）

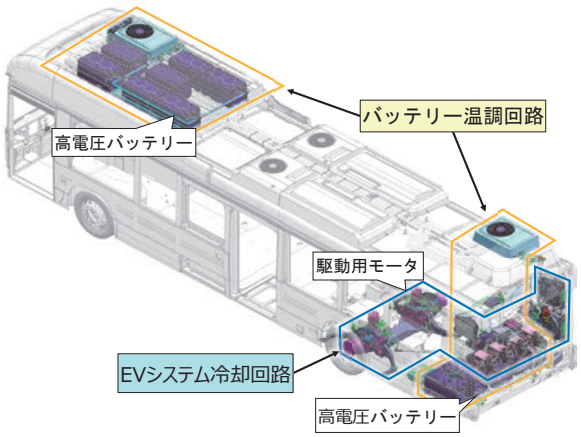


図4　サーマルマネジメントシステム外観

また、可能な限りエルフEVなどの既存部品を活用することで、信頼性を確保し、開発費を抑えコスト削減を図った（**表1**）。

表 1　主な冷却装置

		EVシステム冷却	バッテリー温調
水回路	ラジエータ	○	○
	電動ファン		○
	ウォーターポンプ	○	○
	高電圧ヒータ		○
冷媒回路	チラー		○
	電動コンプレッサ		○
	コンデンサ+電動ファン		

○：エルフEVなどから活用

各水回路に対しては実車組立前に CAE 解析により流量、注水性、排水性、冷却性能、風流れなどについて設計の妥当性を確認している。

新型エルガ EV では冷却対象部品の増加により水回路が複雑化したが、特に排水性については解析とフィードバックの繰り返しにより回路構造の見直しを行い、ディーゼル車以上の排水率を達成した。

4.2 EV システム冷却回路

冷却対象である駆動用モータ及びその他補器類はそれぞれ流量要件が異なるため、W/P（ウォーターポンプ）を複数個使用し並列回路とすることで各要件に対応した。**図 5** に回路図のイメージを示す。

各流量要件達成のため W/P の出力をそれぞれ制御する必要があり、流量解析及び実車確認結果のフィードバックにより調整し対応した。

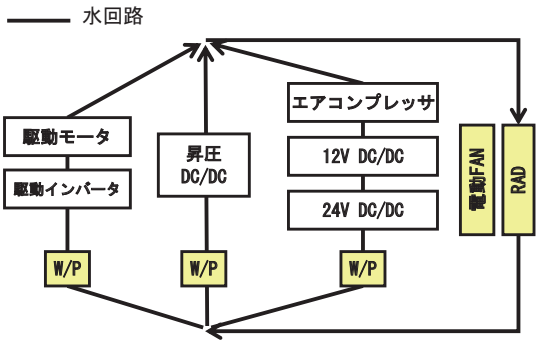


図 5　EV システム冷却 回路図イメージ

4.3 バッテリー温調回路

バッテリーは、ほかの装置より厳しい温度管理が求められるため、低温時には高電圧ヒータによる加温、高温時にはラジエータ及び冷媒を使用したチラーによる冷却を行う回路とした。ラジエータは電費向上を主な目的として搭載し、気温・水温情報をもとに自動でチラーとの使用切替えを行う。**図 6** に回路図のイメージを示す。なお、バッテリーは屋根上と車両後部に分散配置されており環境が異なるため、温調回路もそれぞれに配置することでより細かい制御を可能とした。

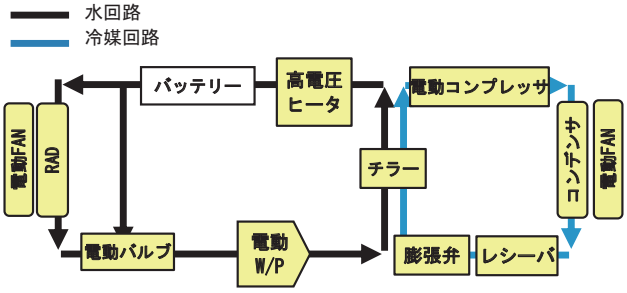


図 6　バッテリー温調 回路図イメージ

エルフ EV は空調システムと冷媒を共用しているが、バスの場合は客室が広く高い冷却性能が必要なため空調性能を優先し、バッテリー冷却用には単独で冷媒回路を搭載した。水配管とつなぐことで冷却水と冷媒熱交換を行う（**図 7**）。

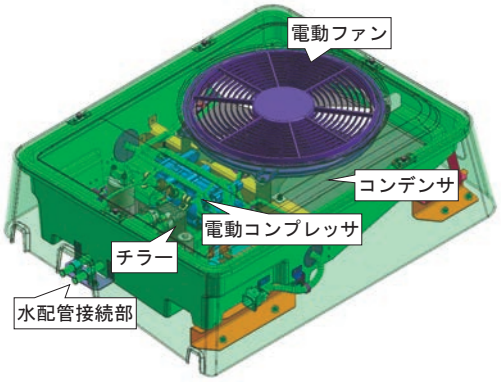


図 7　バッテリー冷却ユニット 外観

また、冷媒回路内の電動部品も含め全て VCU (Vehicle Control Unit) からの制御とすることで、エルフ EV に対し専用の ECU (Electronic Control Unit) を減らしコスト削減を図った。

5　ステアリング、サスペンション

5.1 開発の狙い

新型エルガ EV は、ディーゼルエンジンのエルガ（以下、「従前エルガ」と称す）と同様に日本全国をターゲットセグメントにしており、市場では従前エルガと混在して運用される。そのため、従前エルガ同等の使い勝手のよさが求められる。また、ドライバーの高齢化や 2024 年問題などによるドライバー不足が深刻になっており、多様なドライバーが乗務できるようドライバーの負荷を低減した車両の開発が必要となる。

しかし、新型エルガ EV はフロント屋根上に重量のある高電圧バッテリーを搭載するため、従前エルガに比べてフロント重量が約 3 割重く、重心が約 1 割高くなり操舵力が重く操縦安定性が悪化する方向である。

したがって、新型エルガ EV では高重量・高重心であっても、操舵性や操縦安定性といった車両性能は従前エルガ同等以上となるステアリング・サスペンションを狙いとして開発を行った。

5.2 ステアリング

5.2.1 操舵力

新型エルガ EV は、フロント重量増加とスクラブ半径の拡大（ディスクブレーキ化）によりステアリング操舵力（タイヤ摩擦抵抗力）が増加し、操舵性が従前エルガ比で悪化する。

その対応として、パワーステアリング（以下、「パワステ」と略す）ユニットの高出力化や、ステアリングのレイアウト見直しでリンク効率をよくすることで、従前エルガ同等の操舵性を確保した。

5.2.2 制動時偏向性

フロント重量増加により操舵力だけではなく制動時偏向性が従前比で悪化する。対応として、ドラッグリンク目玉の高さ位置をホイール中心にレイアウトすることでポテンシャルアップを図った（**図 8**）。

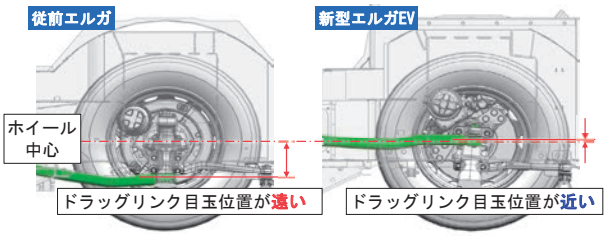


図 8 ドラッグリンク目玉位置の比較

5.3 電動パワステポンプ

5.3.1 レイアウト最適化

従前エルガはパワステポンプ（以下、「ポンプ」と称す）がエンジン駆動のため車両後方に位置し、前方のドライバー席下のパワステユニットにまでオイル配管が行き渡っていた。新型エルガ EV ではポンプを電動化することにより、ポンプ配置の自由度を上げ、オイル配管短縮を狙いとしてパワステユニット近くに配置した（**図 9**）。これにより、パワステオイルの必要油量が従前エルガの半分以下となり、整備性や経済性が向上した。

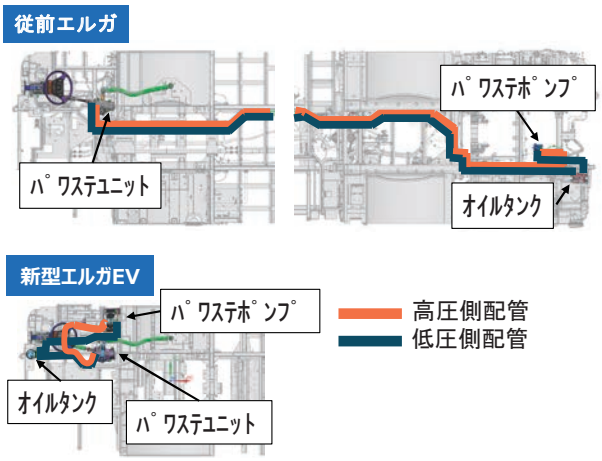


図 9 パワステポンプレイアウト比較

5.3.2 操舵フィーリングと静粛性

従前ポンプはエンジン回転数で吐出量が左右される。新型エルガ EV はポンプを電動化したことで車速と操舵角速度から吐出量をきめ細かく設定でき、車速が低い時には吐出量を上げ操舵力を軽く、車速が高い時には軽すぎないよう吐出量を抑えた。これにより、車両状態に見合った操舵フィーリングを実現させ、ドライバー負荷低減を図った。

また、EV 化でエンジンが無くなり車内静粛性が高まったことで、ドライバー席下に配置したポンプからの小さな音でも目立つようになる。この対応として、ポンプやオイル配管はフローティングマウントにし（**図 10**、**図 11**）、EV の特徴である静粛性を損なわずドライバーが快適に運転できるよう配慮した。

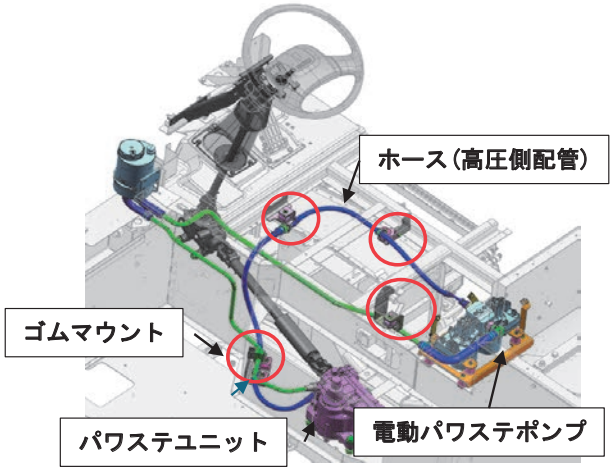


図 10 パワステレイアウト

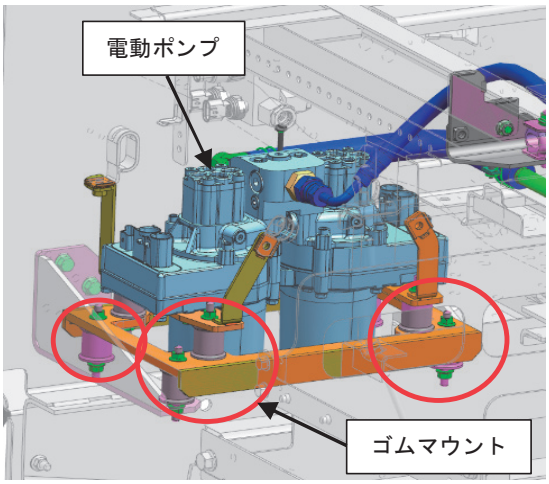


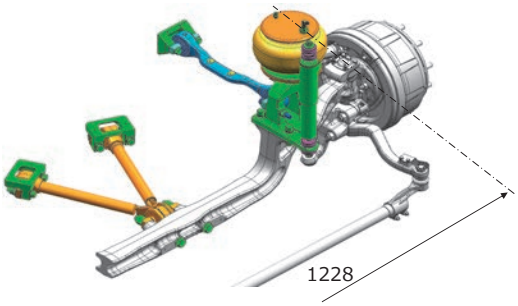
図 11　ポンプのゴムマウント

5.4　サスペンション

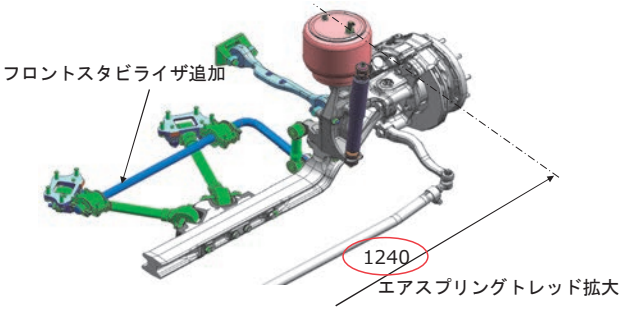
先述のとおり、新型エルガ EV では屋根上に高電圧バッテリーが搭載されるため、従前エルガに比べて車両重量が増えるばかりではなく、重心が高くなりロールモーメントが増加する。これは操縦安定性が悪くドライバー負荷増加につながるため、サスペンションのロール剛性を向上させる必要がある。また、車内安全要求の高まりに応える目的で床のフルフラット化に加え、ロール剛性の高いサスペンションにすることで車内転倒事故防止に配慮した車両とした。ロール剛性を向上させるため下記を実施した（**図 12、図 13**）。

- エアスプリングのトレッド拡大
- フロントスタビライザ追加
- リヤスタビライザばね定数増加

これにより、車両ロール剛性を従前比向上させたことで、新型エルガ EV は高重量･高重心であるがロール角を従前以下に抑えられた（**図 14**）。

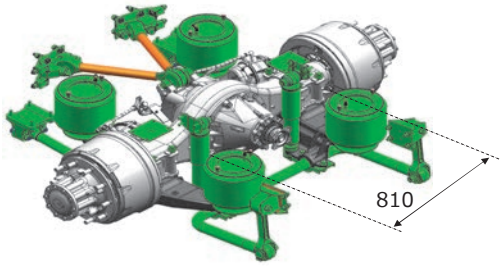


(a) 従前エルガ フロントサスペンション

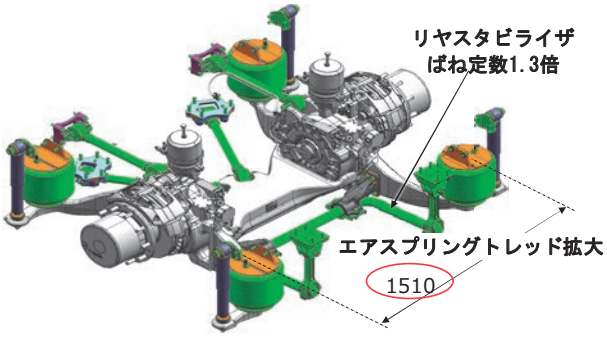


(b) 新型エルガEV フロントサスペンション

図 12　フロントサスペンション比較



(c) 従前エルガ リヤサスペンション



(d) 新型エルガEV リヤサスペンション

図 13　リヤサスペンション比較

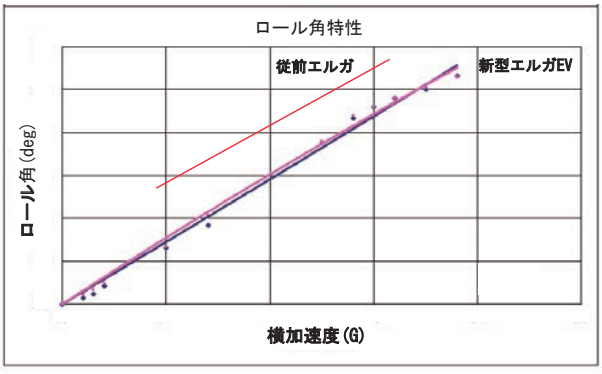


図 14　ロール角特性比較

6　おわりに

国産初のEV路線バスを実現することができ、その中で安全性を大幅に向上した室内フロアのフルフラット化やドライバーの負荷低減、静粛性の確保を実現したシャシを開発することができた。今後も国内路線バスのトップメーカーとして更なる進化・改善に取り組んで行く。最後に、このシャシ開発に多大なるご協力をいただいた協力企業の皆様、関係者の方々に心より感謝申し上げます。

著　者


安住　陽一郎


藤田　芳大


渋谷　大博

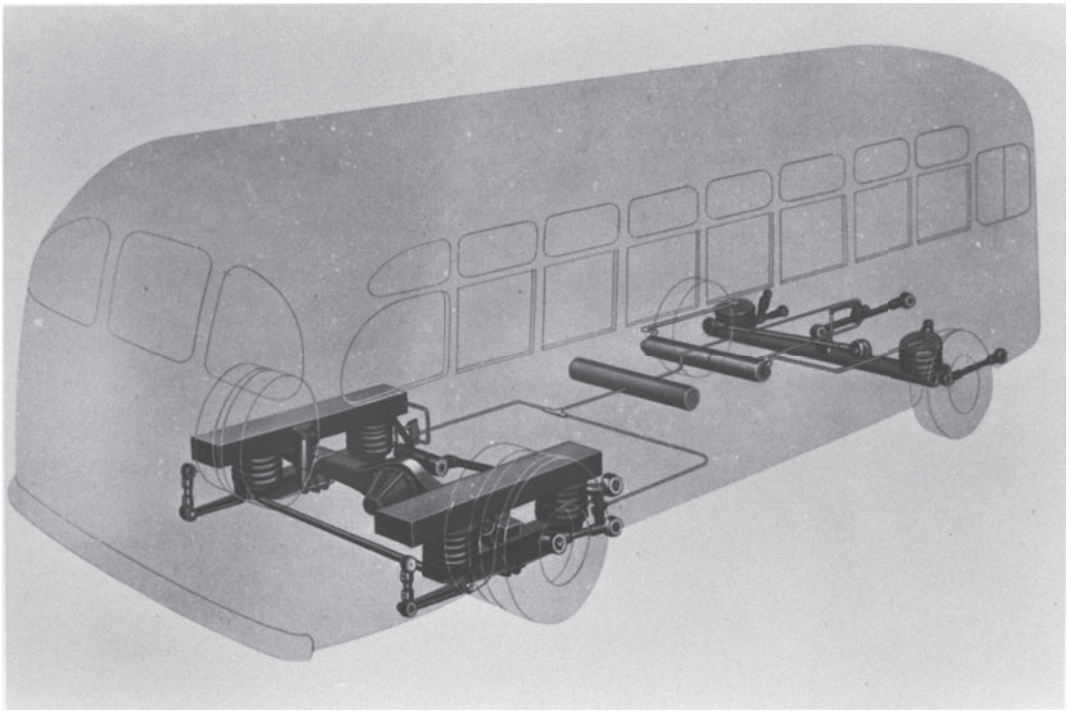

福井　憲司


中村　博明


板東　恒平


渋谷　陽平

◇いすゞ歴史の一こま



BA型　エアサス構造透視図　（1957年ごろ）

新型エルガ EV の電子・電装・空調について

Electronics, Electrical Equipment and Air Conditioning of New ELGA EV

小山内　裕*　金川　雄志**　村岡　政哉**　安住　陽一郎***　吉住　祥一***
Yutaka Osanai　Yuuji Kanegawa　Masaya Muraoka　Youichirou Azumi　Shouichi Yoshizumi

要　旨

本稿では、路線バスの EV 化実現のための電子・電装･空調の開発内容について説明する。

Abstract

This article describes the development of electronics, electrical equipment, and air conditioning systems.

1　はじめに

今回のフルモデルチェンジは、路線バスの EV（Electric Vehicle）化に加え、次世代に通用するバスのあるべき姿を見据えて開発し、実現させた。

2　EEA（Electric Electronic Architecture）

EEA とは車両に搭載されているシステム構成のことである。

昨今、商用車としても社会的課題であるカーボンニュートラル及び CASE（Connected、Autonomous、Shared & Services、Electric）への対応が求められており、新型エルガ EV ではこれらの課題に対応した EEA の構築を行った。サイバーセキュリティ法規への対応及び、EV 路線バスを早期市場投入するため、現行エルガの EEA（旧世代 EEA）と新型エルフ EV の EEA（新世代 EEA）を組み合せた。

2.1　新型エルガ EV の EEA 構築

現行エルガの旧世代 EEA は、モデルチェンジの度にリーズナブルに対応できるシステムに機能を追加･変更することを繰り返してきたため、機能が複雑に絡み合っている。

新型エルフ EV の新世代 EEA は、複雑に絡み合った機能を整理し最適化するためパワートレイン・シャシ･ボディ･コネクテッドといった機能ごとにシステムを分類した機能ドメインネットワークを構築するとともに、頭脳（判断部分）と手足（入出力部分）の分離・集約として、「走る･曲がる･止まる」における主な判断部分をセントラル ECU（Electronic Control Unit）に、入出力部分を I/O（Input / Output）コントローラに集約している。また、機能別ドメインネットワーク構築と合せて CGW（Central Gate Way）を採用し、OBD（On-Board Diagnostics）コネクタ及び車外通信からのサイバーセキュリティ攻撃に対して、CGW のセキュリティ機能で車内と車外を分離して侵入を防止している。

新型エルガ EV では、新型エルフ EV の最新システムの利用･機能共通化と、現行エルガのシステム活用を両立させるため、新世代 EEA のドメインネットワーク構成に現行エルガ用ドメインを追加した（**図 1**）。

また、現行エルガと新型エルフ EV のシステムでは機能配置及び CAN（Controller Area Network）通信仕様が異なるため、新世代 EEA の基幹システムである CGW・セントラル ECU・I/O コントローラで、機能配置及び CAN 通信仕様差分を吸収した。具体的には **2.2 節**～**2.4 節**の対応を行った。

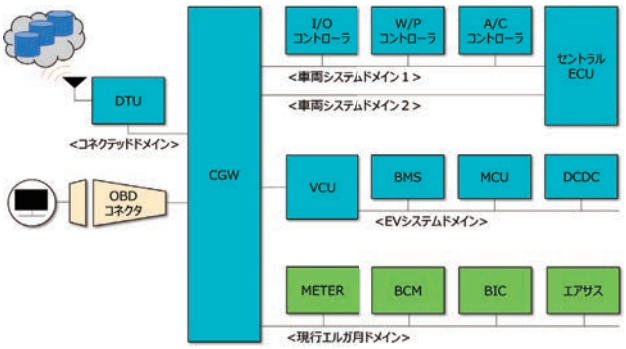


図 1　新型エルガ EV の EEA

2.2　CGW

CGW により現行エルガのシステムを専用ドメイン化することで、現行エルガのシステム間では従来どおりの通信を行うことができるようにするとともに、OBD コネ

*電子制御開発統括部　**電装・車両制御開発部　***バス商品企画・設計部

クタとシステムの間に CGW を配置することで現行エルガのシステムのサイバーセキュリティ対応を最小化した。

また、現行エルガと新型エルフ EV のシステム間の通信仕様差分を吸収するため、CAN ID 変更だけではなく、CAN フレーム内のデータ配置変更などの信号変換に対応した。

2.3 セントラル ECU

判断部分を担うセントラル ECU については、現行エルガのシステムでは対応することができない調停・判断の対応を行った。

また、CGW では実施していないデータサイズ変更や物理値変換のような演算処理を伴う信号変換機能を実装した。

2.4 I/O コントローラ

新型エルガ EV は新型エルフ EV と比べると車両全体の入出力回路が多く、主なところでは客席操作スイッチ入出力回路、及び冷却系ウォーターポンプ駆動のための入出力回路が必要となった。

I/O コントローラでは客席操作スイッチ入出力追加に対応し、冷却系ウォーターポンプ駆動のための専用入出力は I/O コントローラの汎用入出力回路では対応できないため専用入出力回路を搭載した W/P (Water / Pump) コントローラを新設した。

3 電装

3.1 車両接近通報装置

EV 車両に対して保安基準にて装着が義務付けられている車両接近通報装置として、低速走行時に歩行者などへ接近を知らせるスピーカ及び制御ユニットを新規設定した。開発で先行していた新型エルフ EV 用を共通で使用し、必要な音圧レベルが得られる前後バンパ内部 (車両左側) にスピーカを設置している。

3.2 リヤ;LED ランプの設定

商品性向上のため LED リヤコンビネーションランプ (リヤターンシグナル、テール・ストップ、バック) を採用した (**図 2**)。これによりランプ単体の寿命向上や消費電力低減を図っている。また、ストップランプの視認性向上を目的として、LED ハイマウントストップランプもリヤガラス面に設定した。加えて、ナンバープレートランプも LED 化し、オール LED 化を実現した。



図 2 各種ランプ位置

3.3 スイッチ類の設定 (図 3)

(1) 電動パーキングブレーキスイッチ

パーキングブレーキの電動化に伴い、従来のレバー式からスイッチ式へと変更し、操作性向上 (運転負荷軽減) を図った。この変更はブレーキ掛け忘れ防止・EDSS (Emergency Driving Stopping System) 作動といった安全性向上にも貢献している。

(2) シフトボタン

EV 専用に、R・N・D の 3 ポジションのシフト選択をプッシュ操作するシフトボタン (スイッチ) を新規設定した。



図 3 運転席左側スイッチ

4 メータ

現行エルガのメータをベースに開発を行った。**図 4** にメータ外観を示す。指針式ゲージは下記のとおり、EV 車用の機能にそれぞれ置き換えた。

■指針式ゲージ

- タコメータ → パワーメータ
- 冷却水温計 → 高電圧バッテリー温度計
- 燃料残量計 → 高電圧バッテリー充電残量計



図 4　メータ外観

マルチディスプレイ表示は EV 車用として、パワーメータ表示、平均・瞬間電費表示、バッテリー最大容量表示、高電圧バッテリー残量表示、航続可能距離表示を設定した。**図 5** にマルチディスプレイ表示の一例を示す。

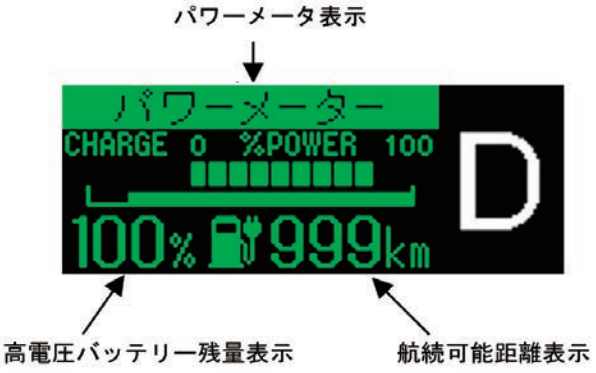


図 5　マルチディスプレイ表示の一例

パワーメータ表示、平均･瞬間電費表示、バッテリー最大容量表示は、メータの操作スイッチで選択することにより表示され、高電圧バッテリー残量表示、航続可能距離表示は、マルチディスプレイ下部に常時表示とした。

5　空調システム

5.1 電動エアコンユニット

5.1.1 概要

新型エルガ EV では電動化と航続距離の確保・ドライバーの負担軽減に貢献するため、国内路線バスでは初となるヒートポンプ暖房機能を追加したパッケージ電動エアコンユニットを開発した。ヒートポンプ暖房機能追加により暖房時の消費電力を抑え、外気温に応じてヒートポンプ暖房と温水式暖房を連動制御し、航続距離確保に貢献した。また、バス車室内の換気効率向上の要求にも応えるため、窓を開けなくても換気性能が確保できる外気導入機能を追加しドライバーの負担軽減に貢献した（**図 6**、**表 1**）。

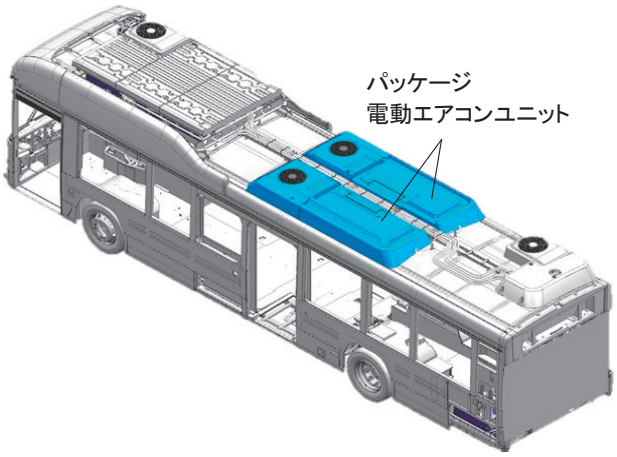


図 6　電動エアコンユニット

表 1　電動エアコンユニットの仕様比較

		新型エルガ EV	現行エルガ ディーゼル
冷房能力(kW) (@外気温35℃)		17.8	25.2 (16.0(*1))
ヒートポンプ暖房能力 (kW) (@外気温0℃)		9.8	無し
送風量(m^3/h)		4,100	4,100
外気導入量(m^3/h)		540	無し
コンプレッサ	型式	ES80	7SBU33(可変容量)
	駆動方式	電動(350V)	ベルト駆動
	搭載位置	ユニット内	エンジンルーム
冷媒量(g/台)		2,100	4,200

*1：アイドル時の冷房能力

また、新型エルガ EV は電動コンプレッサ搭載によりエンジン回転数へ依存せず回転数を制御できるため、消費電力を抑えながらディーゼル車と同等の冷房性能を確保した（**図 7**）。

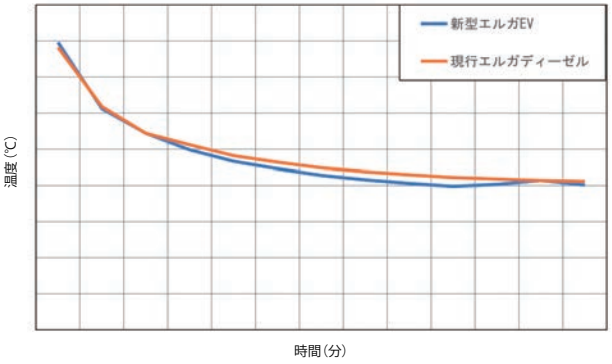


図 7　冷房性能比較

更に、新機能の追加と風量の多段化に対応するため、電動エアコンコントロールパネルを液晶表示式に一新した（**図 8**）。

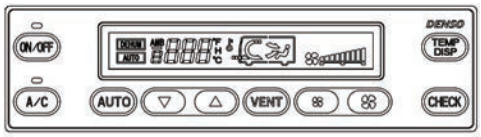


図 8　電動エアコン コントロールパネル

5.1.2　技術的特徴

(1)　電動エアコンの作動

電動エアコンは、外気温 20 ℃以上は冷房運転、外気温 10～20 ℃は消費電力が少ないヒートポンプ暖房運転、外気温 0～10 ℃は設定温度によりヒートポンプ暖房と高電圧ヒータを熱源とした温水式暖房を適切に切り換えて運転、外気温 0 ℃以下はヒートポンプ暖房の効率が低下するため、温水暖房のみで運転する（図 9）。

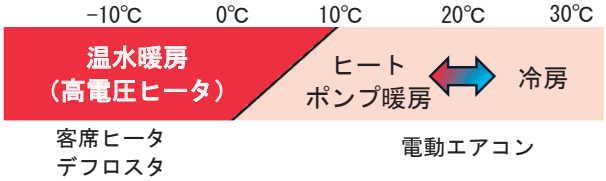


図 9　電動エアコンの作動イメージ

図 10 に冷房時とヒートポンプ暖房時の冷媒回路のイメージを示す。

外気温 0～10 ℃の範囲はヒートポンプ暖房の効率が高く、高電圧ヒータを利用した温水式暖房のみに対して消費電力を約半分に抑えられる。

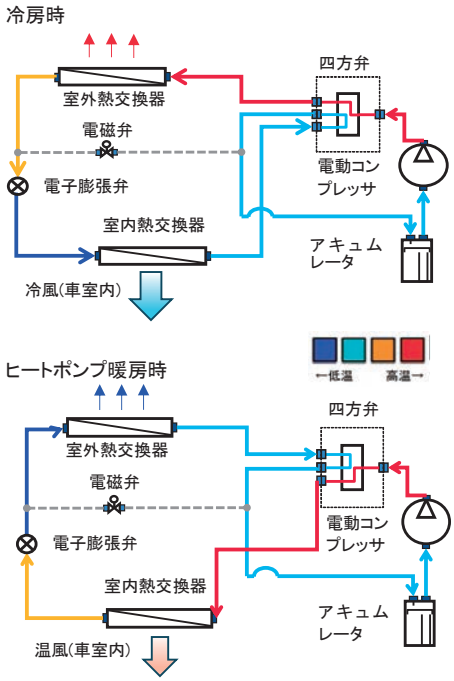


図 10　冷媒回路比較

(2)　エアコン延長運転

ドライバーの負担軽減を目的に、車両待機時（キーを外した状態）や運行前充電時にもエアコンを作動できるエアコン延長運転モードを追加した。エアコン作動中に延長スイッチを押したあとで 30 秒以内にキーオフすることで、最大 30 分エアコンを延長運転させることができる。

(3)　換気効率向上

車室内の換気への要求の高まりに応えるため、電動エアコンユニットに外気導入機能を追加し、ウイルスなどの細かい粒子を捕集するエアロゾルフィルタの設定を行った。外気導入機能を追加することにより換気性能が向上し、併せて換気扇を 1 基削減した。

5.2　温水式暖房

5.2.1　概要

ヒートポンプ暖房の効率が下がる低外気温時やデフロスタ使用時は温水式暖房を使用する。温水の熱源として高電圧ヒータを採用した（図 11、図 12）。

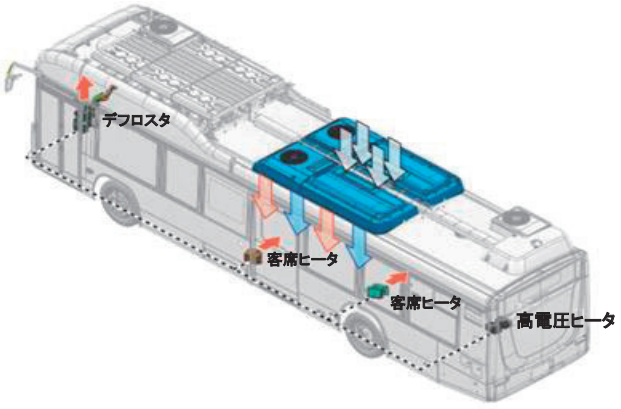


図 11　デフロスタ･客席ヒータ･高電圧ヒータ



図 12　高電圧ヒータ

5.2.2　技術的特徴

温水式暖房ではディーゼル車と同等以上の暖房性能を確保するため、高電圧ヒータを最大 4 基稼働させる。消費電力を抑えるため、状況に合せて高電圧ヒータ①②の 2 基のみ稼働させる制御を行っている（図 13）。

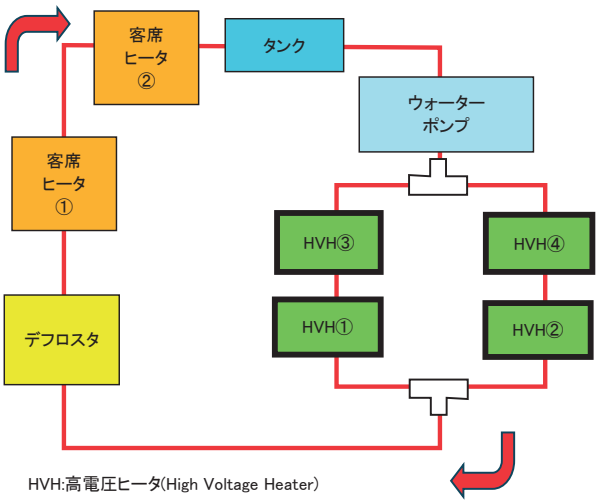


図 13　暖房用温水回路

新型エルガ EV では高電圧ヒータによりディーゼル車に対して水量が少なく温水の温度が早く上昇するため、ディーゼル車と同等以上の暖房性能を確保した（**図 14**）。

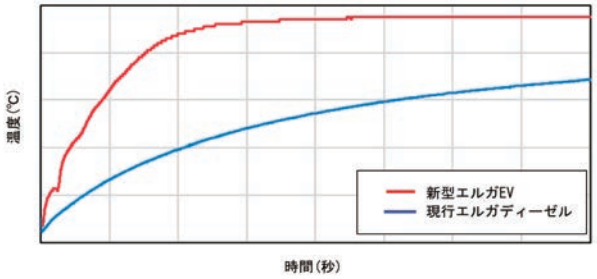


図 14　ヒータ水温比較

6　おわりに

以上、新型エルガ EV の電子･電装･空調について説明した。関係者に感謝の意を示し、本稿の結びとする。

本文献は、いすゞ技報 135 号「新型エルフ・フォワードの電子･電装･空調について」より一部を引用している。

参考文献

(1)　池谷光也 他 9 名：新型エルフ･フォワードの電子･電装・空調について , いすゞ技報 135 号（2023）P56-61

著　　者


小山内　裕


金川　雄志


村岡　政哉


安住　陽一郎


吉住　祥一

新型エルガ EV の開発における 車両走行シミュレーション Tool の活用

Use of Vehicle Driving Simulation Tool in New ERGA EV Development

山西　博*
Hiroshi Yamanishi

要　旨

いすゞでは企画・設計段階で車両性能を予測する手法として、「車両走行シミュレーション Tool」を構築し、開発標準ツールとして社内展開・運用している。新型エルガ EV の開発では本シミュレーションを用いた仕様検討、及び実機評価試験の代替として活用したことで、開発期間の短縮に貢献した。本稿ではツールの概要及び性能検討の事例を紹介する。

Abstract

Isuzu has developed a vehicle simulation tool to predict vehicle performance at the planning and design stages. In the development of the new ERGA EV, this simulation contributed to shortening the development period. This article introduces the outline of the tool and examples of performance examination.

1　はじめに

近年の車両システムの複雑化・多機能化により車両開発にかかる工数は年々増加しており、開発の効率化が一層求められている。特に EV（Electric Vehicle）の商品性に大きな影響を与える航続距離・動力性能は、開発後半で目標未達が発覚すれば大きな手戻りが発生する。いすゞでは、これらの車両性能の成立性を企画・設計段階で予測する手法として、「車両走行シミュレーション Tool」の構築を進めている。本ツールは、任意の車両諸元及び走行パターンを設定することで、**図 1** に示す走行中の SOC（電池残量）やモータの運転状態など、車両状態や性能を表すさまざまな数値を計算し、グラフとして表示する。この結果を活用することで目標性能や装置の仕様検討を行うことができる。

本ツールは開発標準として社内展開しており、CAE（Computer Aided Engineering）専任部署以外の担当者でも容易に扱える。共通モデルを使用することでユーザーのモデリングスキルに依存しない計算結果が得られ、これによってシミュレーションの精度を担保している。また、同じフォーマットのパラメータ及び計算結果の比較が可能になるため、開発中におけるユーザー間の技術的なコミュニケーションを円滑にする効果も得られる。

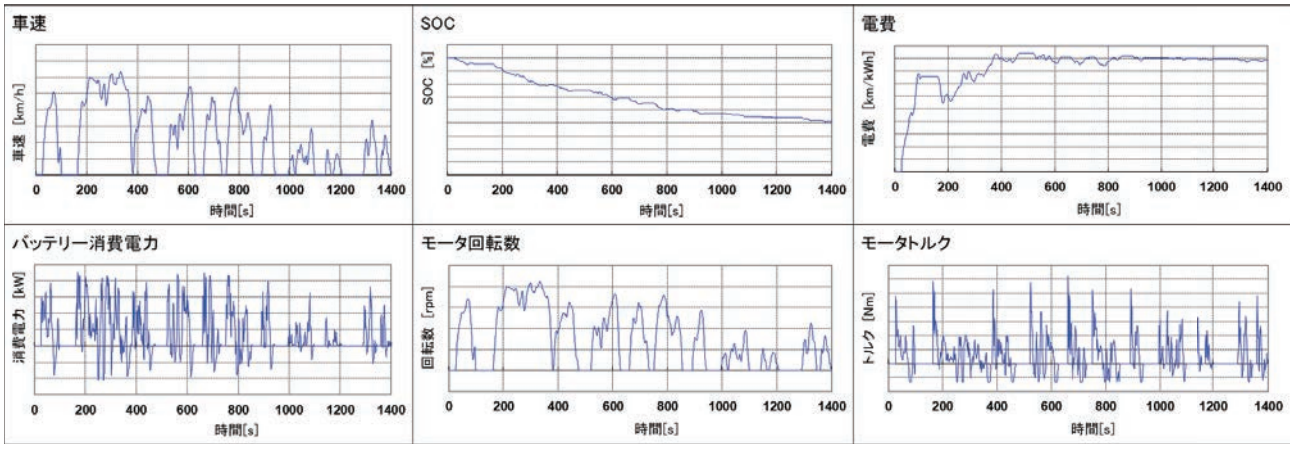


図 1　計算結果の一例

* CAE デジタル開発推進部

2　車両走行シミュレーション Tool

2.1 シミュレーションモデル

本シミュレーションは、車両諸元と目標走行パターンを設定することで車両の必要駆動力を算出し、モータ効率マップを用いてバッテリーの消費電力や SOC の推移を時々刻々と計算している。また、バッテリーの充放電による発熱も合せて計算され、バッテリーの温度推移も計算結果として出力される。走行条件だけではなく充電条件も対応可能で、充電設備のスペック（供給可能な最大電力量）及びバッテリー側の受入れ限界から充電電力量を決定し、充電時間の予測を行うことができる。計算モデルはコンポーネントの粒度違いで 2 種類のモデルが準備されており、マップベースで高速に計算できるものを「簡易モデル」、冷却回路や制御を組み込んだものを「詳細モデル」と定義し、開発フェーズや特性データの入手状況によって使用するモデルを使い分けている。

計算モデルは**図 2** に示す GammaTechnologies 社の GT - SUITE を用いてモデル化されており、後述する専用 GUI（Graphical User Interface）システムと組合せることで、バックグラウンドで計算が実行される仕組みになっている。計算結果も Excel ファイルで自動的に出力されるため、ユーザーは GT - SUITE を意識することなく、シミュレーション実行が可能になる。

2.2 専用 GUI システム

本シミュレーションは特に開発の初期段階で活用されることが多く、CAE 専任部署ではないユーザーが多く利用する。従来の計算環境は GT-SUITE の操作方法を習得する必要があるのに加えて、EV 装置の特性に対する理解に時間を要するためシミュレーション活用が普及しなかった。そこで新型エルガ EV の開発では、専用の GUI システムを新たに構築し、誰でも簡単に使用できる環境を提供することで、多くの検討にシミュレーションが活用された。

構築したシステムの概要を**図 3** に示す。本システムのプラットフォームとしては、PLM（Product Lifecycle Management）ソフトである Aras 社の Aras Innovator を採用した。Aras Innovator を用いることで、専用 GUI での操作の簡易化や、PLM 機能による特性データ（EV コンポーネントの特性や評価パターンなど計算に必要なデータ）とトレーサビリティ情報（装置の仕様やデータ参照元）の一元的な管理が可能となった。その結果、特性データの信頼性向上と計算結果の妥当性確認が容易になった。また本システムを運用することで、信頼度の高いシミュレーション結果が自動的にデータベースに蓄積されるため、計算設定の再利用や大量の計算結果を用いた統計的分析も可能になる。現在は簡易モデルのみを対象に運用を開始しているが、今後は詳細モデルへの展開も検討している。

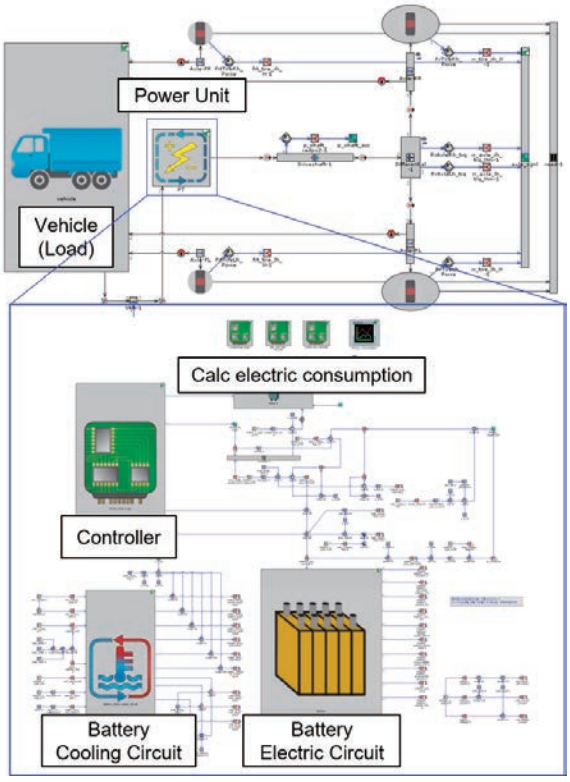


図 2　シミュレーションモデル（GT-SUITE）



図 3　GUI システム概要

3　新型エルガ EV 開発における活用事例

新型エルガ EV において、本ツールを用いて性能検討を行った事例を以降に示す。

3.1 電費性能の改善検討

EV において航続距離は商品性に関わる最も重要な性能の一つであるため、車両走行時のエネルギー消費を減らし、電費性能を改善させることが開発において強く求められる。エネルギー消費の内訳は、慣性抵抗・転がり抵抗・空気抵抗といった走行に必要なエネルギー（走行抵抗）及び、モータが電気エネルギーを動力に変換する際の変換ロスや、ギヤボックスの動力伝達系の損失に加え、空調やエアブレーキ用のコンプレッサなどの動力以外に必要な電動補器の消費電力が挙げられる。更に EV ではモータ発電を利用し、減速を行う回生ブレーキの機能もあるため、回生によるバッテリーへの充電電力も電費性能を評価する上で重要な要素となる。

本シミュレーションではこれらのエネルギー収支を一つひとつの要素に分けて計算することにより、計算結果を**図 4** に示すようにグラフとして可視化することができる。エネルギー収支の内訳は走行パターンや運航条件によって変化するため、各評価条件において本結果を分析することで影響度の高い要因が明確になる。各要因の影響度を把握することで、ユーザーは改善効果の高い要素にフォーカスした設計検討を簡単にできるようになった。

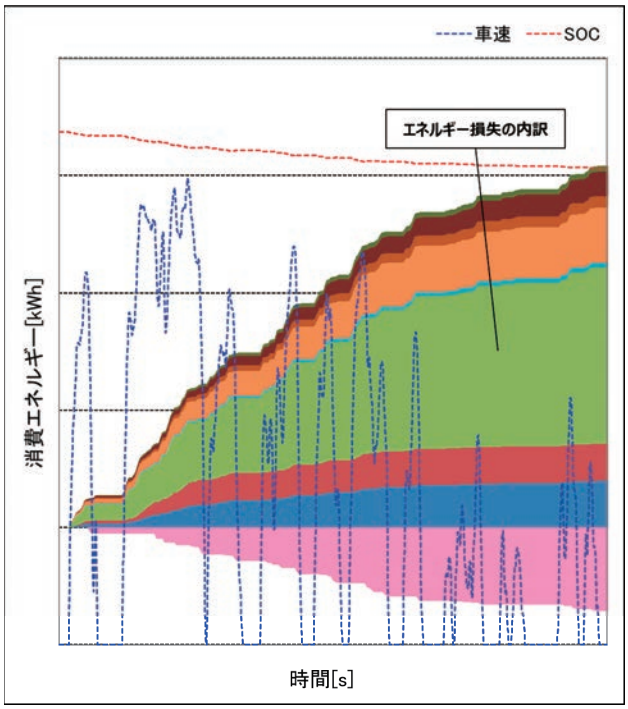


図 4　エネルギー損失の内訳グラフ

3.2 バッテリー冷却性能評価

バッテリーは安全性及び劣化抑制の観点から、低温側・高温側ともに規定の温度帯を外れた場合に出力に制限をかけることで温度の制御を行っている。出力制限は動力性能や充電時間に大きな影響を与えるため、EV において温度管理は非常に重要な設計因子であり、バッテリーの冷却性能を正確に見積もる必要がある。

バッテリーの冷却性能を評価した事例を**図 5** に示す。ここでは、ある特定の評価パターンにおいて走行中のバッテリー放電により温度が徐々に上昇した際に、制御しきい値を超えたタイミングで温調装置が作動し、バッテリー温度上昇を抑制できていることを確認している。このシミュレーションでは温調装置の消費電力も考慮されているため、必要十分な冷却性能を担保しつつ、航続距離への影響を最小化する最適な冷却制御の検討に活用することができた。

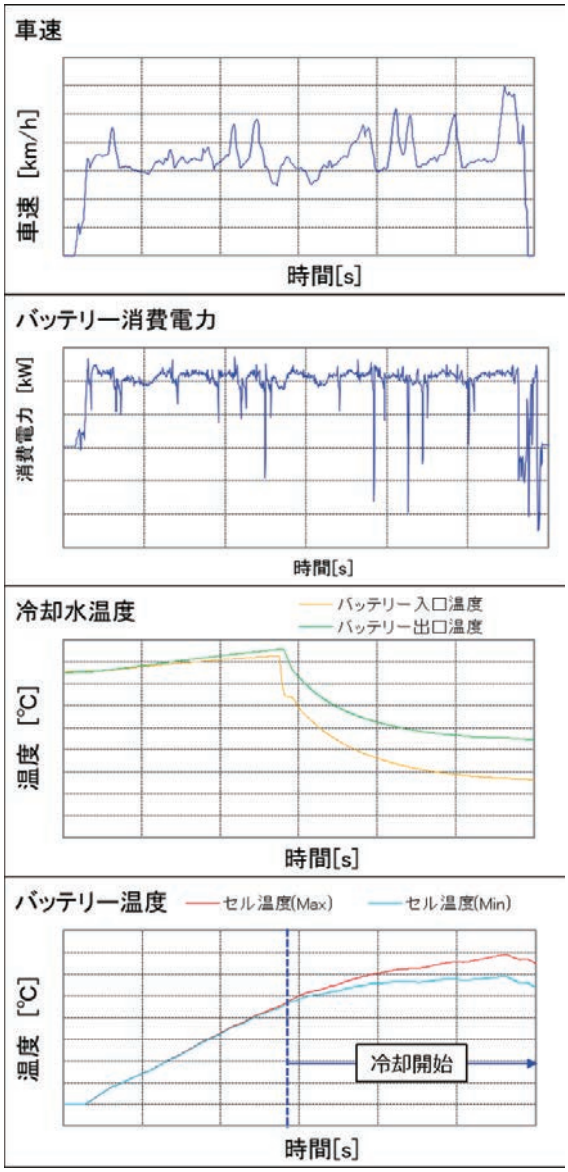


図 5　バッテリー冷却性能の検討

3.3 極低温時の充電時間の評価

極低温時の充電時間を算出した結果の一例を**図 6** に示す。ここでは充電前の高電圧ヒータによる暖機運転及び CCCV（Constant Current,Constant Voltage）充電制御を含んだトータルの充電時間を評価することができている。今回開発した新型エルガ EV では、これまで開発したエルフ EV と比べ、大容量のバッテリーが搭載され、充電時間が延びることがわかっていた。このことから、評価条件についても実運用を見据えて外気温の変化や充電設備の能力違いなど、多くの充電時間評価が必要となり、試験工数の増大が開発時の大きな課題となっていた。そのため今回の開発では、実車を用いた試験の一部をシミュレーションで代替することによって、評価期間を大幅に短縮することができた。

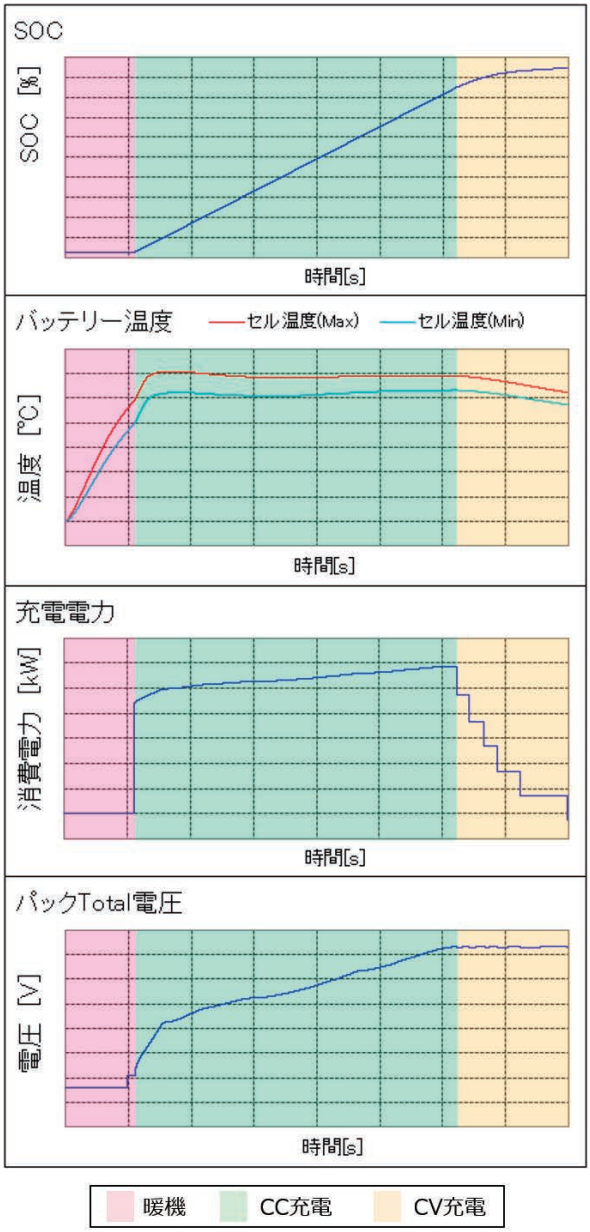


図 6　暖機運転を含んだ充電時間の算出

4　おわりに

本稿では、いすゞで運用している車両走行シミュレーション Tool の概要と、新型エルガ EV 開発における活用事例を紹介した。本ツールを各装置の仕様検討、及び実機評価試験の代替手法として活用することで、開発期間の短縮に貢献した。また、本ツールは設計者自身が簡単にパラメータの影響度を確認できるため、EV 性能に対する理解を深める教育ツールとしての機能も担ったと考えている。今後は、ユーザーがより使いやすくなるようにシステムの機能拡張を行い、シミュレーション活用を普及することで製品開発を加速させたい。

著　者



山西　博

新型エルガ EV の車両審査実験について

Vehicle Performance Test of New ERGA EV

熊倉　航*
Wataru Kumakura
飯塚　彰*
Akira Iizuka
内野　啓哲*
Keitetsu Uchino
宮崎　信之*
Nobuyuki Miyazaki
渋谷　健太郎*
Kentarou Shibuya
堀　崇*
Takashi Hori
石澤　譲一郎*
Jouichirou Ishizawa
渡部　紘**
Kou Watanabe
高谷　知之*
Tomoyuki Takatani
須田　淳一*
Junichi Suda
佐藤　航**
Wataru Satou
大井　隆一朗*
Ryuuichirou Ooi
西谷　公光***
Takamitsu Nishiya
新井　匠***
Takumi Arai
髙山　正巳**
Masami Takayama

要　旨

いすゞは中長期経営戦略である「カーボンニュートラル（CN）対応を含めた次世代の商品開発」の一環として、EV 路線バス「新型エルガ EV」を開発した。①電動化による CN 対応に加え、②安全性に対する社会的要求に応えるフルフラットフロアにより、次世代の公共交通機関に求められる性能を具現化することができた。本稿では新型エルガ EV 開発評価の内容を紹介する。

Abstract

Isuzu has developed the EV bus “ERGA EV” as part of its medium- to long-term management strategy of “developing next-generation products that are carbon neutral (CN) compatible.” In addition to (1) compatibility with CN through electrification, (2) a full-flat floor design to meet social demands for safety, we were able to embody the performance required for next-generation public transportation. This paper introduces the details of the new ERGA EV development evaluation.

1　はじめに

新型エルガ EV（Electric Vehicle）は、いすゞ初の量産 EV バスであり、かつ 2025 年開催の大阪万博での導入が最重要課題とされたため、短期間で効率的な開発評価が求められた。

本稿では、重点的に開発評価を行った次の 6 項目について述べる。

① 走行性能
② 安全性
③ 快適性
④ EV システム性能
⑤ ボディ性能
⑥ 総合性能

2　走行性能

2.1 電費･航続距離

EV として重要な電費･航続距離については、国内路線バスの使用実態を満足させるため、バッテリー搭載数を 11 パックとした。

「TRIAS 99-012-01 一充電走行距離及び交流電力量消費率試験（定速走行）」の結果は 360 km の走行距離を実現した。

航続距離を確保するためには回生制御が重要となるが、新型エルガ EV では、ブレーキの踏み込み量に連動して回生する制御を採用し、ブレーキフィーリングと回生との両立を図り、よりよい電費となるよう回生制御を設定している。

また、EV は暖房使用時の電費悪化が大きいため、後述の空調性能において、ヒートポンプ暖房採用により電力消費を低減し、冬季の電費性能影響が少なくなるようにした（**図 1**）。



図 1　電費性能評価

2.2 動力性能

新型エルガ EV は高出力アクスルモータ採用により、

*車両審査実験第一部　　**㈱いすゞ北海道試験場　　***車両審査実験第二部

ディーゼルエンジン車に比べ高い動力性能を達成している（**図 2**）。

バッテリーの冷却回路にチラー冷却回路、モータ・補機類にはラジエータによる冷却回路を設けており、サーマルシステムを適正にマネジメントすることで、夏場の高負荷運転においても高出力の維持を可能としている。

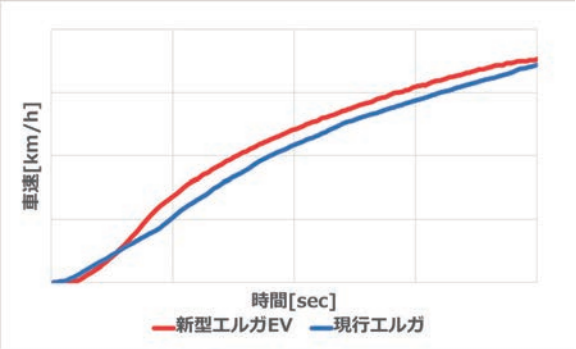


図 2　良好な動力性能（現行エルガとの比較）

2.3 操縦安定性･乗り心地

新型エルガ EV はルーフ上に搭載する高電圧バッテリーにより、重心高アップによるロール安定性悪化が懸念されたため、前後サスペンションのチューニングによる対策を行った。サスペンション基礎特性試験・ロードシミュレータでのさまざまな路面環境下での評価を実施し、最終的には実車走行試験により、良好な操縦安定性･乗り心地性能を得ることができた（**図 3**）。



図 3　サスペンション基礎特性試験風景

2.4 制動性能

新型エルガ EV では駆動用モータから得られる回生力を車両減速のためのブレーキとして積極的に活用している。回生により車両の運動エネルギーを効率的に回収することで電費の向上に寄与するとともに、サービスブレーキ（摩擦ブレーキ）への負荷を低減し、ブレーキパッドの摩耗を抑制することでメンテナンスコスト削減にも貢献する。

回生による制動はあらゆる場面で活用できるよう、多段階の補助ブレーキとしてレバースイッチによる減速力のコントロールを可能としている。更に回生によるメリットの最大化を狙い、いすゞ車として初めて回生ブレーキとサービスブレーキの協調制御を採用した。回生協調はブレーキペダル操作に対する回生と摩擦ブレーキの制動力バランスを制御している。回生による電力回収の効率向上と従来どおりの操作性の両立を狙い、違和感なく使えるよう制御の作り込みに注力した。

図 4 に回生協調制御の概念図を示す。ドライバーがブレーキペダルを操作する際、従来は摩擦ブレーキが作動していたが、新型エルガ EV では回生ブレーキのみで制動を行う。ペダル操作量に応じてリニアに回生力を変化させることによりドライバーの意図どおりの減速を行う。急ブレーキなど回生による制動力だけでは賄えない減速に対しては、摩擦ブレーキを上乗せすることでドライバー要求に応える。

本協調制御の要点は次の 4 点である。①摩擦ブレーキ立ち上げ時のつながりの良さ、②車速（モータ回転）とともに出力低下する回生ブレーキから摩擦ブレーキへの遷移のなめらかさ、③回生ブレーキ終了時のショックの低減、④回生ブレーキとクリープの切替わりでのブレーキコントロール性。これらのポイントに着目しながらフィーリングの作り込みを行った。

制動の操作フィーリングについては現行エルガ同等を狙った。実運行において、新型エルガ EV は現行エルガとの混用となることが想定されるため、ドライバーが運行車両を乗り換える際の違和感を低減することに重点を置いた。これは運転負荷の低減、ひいては運行中の車内安全に資すると考える。

ブレーキフィーリングの作り込みに際しては机上でパラメータ検討を進め、最終的には実車両でコースと実路を走行し、ドライバーフィーリングに合うように設定を煮詰めた。

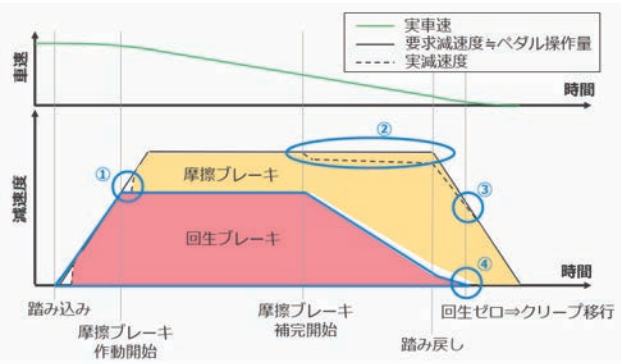


図 4　回生協調制御 概念図

3　安全性

3.1 人間工学性能評価

新型エルガ EV では、EV 化のメリットを生かしたフルフラットフロアによる車内事故防止を狙いとした。

そのため評価部署として開発のコンセプト段階から参加し、プロト車にて実機評価を行いながら、使い勝手と安全性を両立した室内空間を実現した。

3.1.1　座席配置の人間工学

全ての座席にフロア段差のないアクセスを可能とするため、最後部座席は対面シートを採用した。先に販売された連節バスも参考にプロト車で試乗会などを行い、窓側に座った乗客のアクセスも考え、向い合う座席の間隔を広げて対面シートの課題を解決した。また、この席とフルフラットの恩恵で非常口は緊急時の安全性を大幅に向上させた（**図 5**）。

3.1.2　通路の人間工学

フルフラット化により、後方の左右フェンダー間は、人のすれ違いやベビーカーの通過が可能なスペースを確保できた。内装品は角にできる限り丸みを持たせ、手すりはフェンダー意匠にインテグレートさせてあるが、つかむ位置や高さなどは動線を意識した配置とした（**図 6**）。

3.1.3　車椅子固定装置の人間工学

既に市場で好評な自動巻取り式の車椅子固定ベルトは強固な設置が必要なため、さまざまな検討をした結果、床下固定を採用した。課題は床がフルフラットの通路であることで、固定用のフックをあらかじめ床下に自動巻取り式固定ベルトと一緒に格納しておく構造（脱着は可能）にすることで、作業時間や拘束性能を現行エルガ同等とすることができた（**図 7**）。



図 5　〔後方〕対面シート



図 6　〔後方〕フェンダー間 - ベビーカー通過



図 7　床下格納式車椅子固定ベルト

3.2　先進安全性能

新型エルガ EV では国内路線バス初となる 77 GHz 帯ミリ波レーダを用いたフロントブラインドスポットモニターを採用した（**図 8**）。これにより車両前方至近の死角エリアに移動している歩行者や自転車が存在する場合、ドライバーに通知･警告をすることが可能となった。



図 8　フロントブラインドスポットモニター

評価を進める中で、停車している先行車やバス停などの構造物に対してシステムが不要作動する課題を検出した。レーダのみのシステムでは物体の種類を正確に識別することが難しいためである。対策として、制御対象から静止物体を除外し、移動物体のみとすることで、不要作動の頻度を低減させることができた。

4　快適性

4.1 車内騒音

4.1.1　モータ採用による室内騒音の低減

内燃機関を持たない電動車は、振動騒音性能が優れていることは一般的に知られているところであるが、新型エルガ EV は ZF 社製インアクスルモータ採用及び車両後部フロアのフルフラット化により、従来の内燃機関搭載車とは騒音源の車室内進入経路が大きく異なる。フロアパネル制振合板化と吸音材設定最適化により、内燃機関が起因となる音や振動、こもり音がない、電動車らしい静粛性を得ることができた（図 9）。

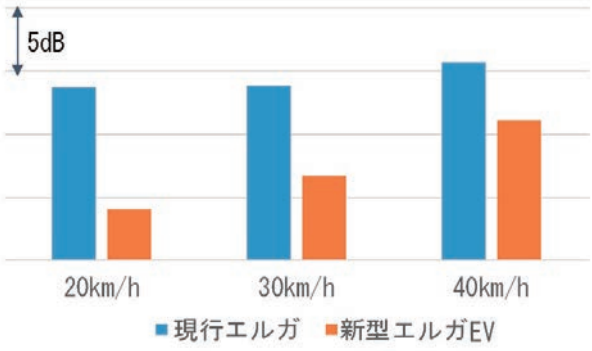


図 9　一定速走行時車内音

4.1.2　補器類の音

従来エアコンプレッサやパワーステアリングポンプなど補器類は従来内燃機関で駆動していたが、EV 化に伴い電動駆動となった。これらの音は、その周波数特性及び車室内空間の静粛化により車室内で聞こえやすく、異音と感じることがある。特にパワーステアリングについては、車両前部に電動ポンプを配置したため、入念な騒音対策を行った。

操舵性能・消費電力・モータ騒音をバランスさせるマップチューニング及び支持構造・配管・マウント適正化により、突出したピークが低下し異音感のないレベルを達成することができた（図 10・図 11）。

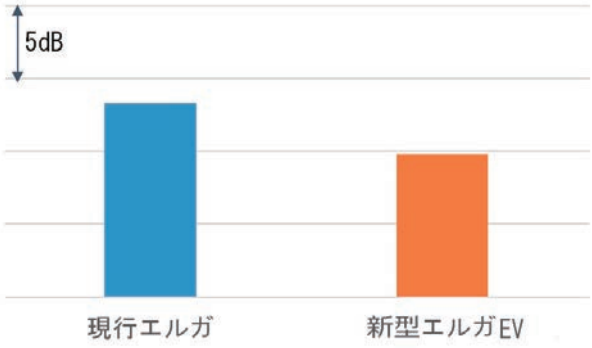


図 10　エアコンプレッサ作動音

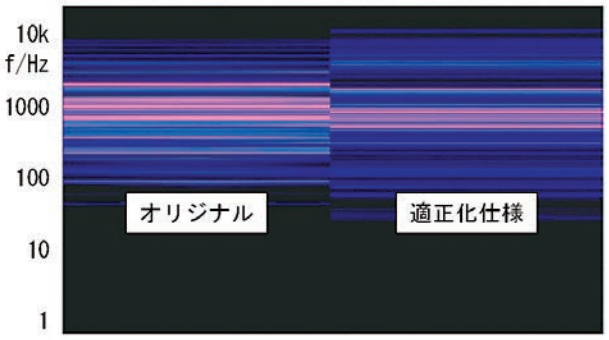


図 11　パワーステアリングポンプ作動音

4.2 空調性能

新型エルガ EV の空調システムは、パッケージクーラに消費電力の少ないヒートポンプ暖房を追加したパッケージ電動エアコンを採用している。極低温環境では高電圧ヒータを用い、ディーゼルエンジン比での暖機速度向上と高い暖房性能を確保した（図 12）。

ヒートポンプ暖房を使用することで、高電圧ヒータ使用時と比べ、省電力化しており電費性能向上に貢献している（図 13）。

現行エルガでは冷暖房は独立した制御であったが、新型エルガ EV では外気導入式オートエアコン採用によりクーラ、ヒートポンプ暖房、高電圧ヒータを制御できるようにした。

また、外気導入機能により、二つあった換気扇を一つとし、現行エルガ同等の窓開けに頼らなくても十分な換気性能を実現した。

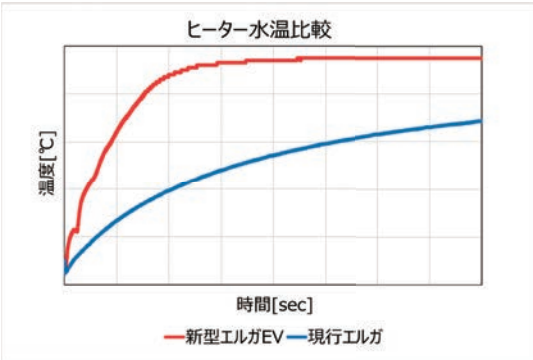


図 12　新型エルガ EV と現行エルガの暖房時水温上昇波形

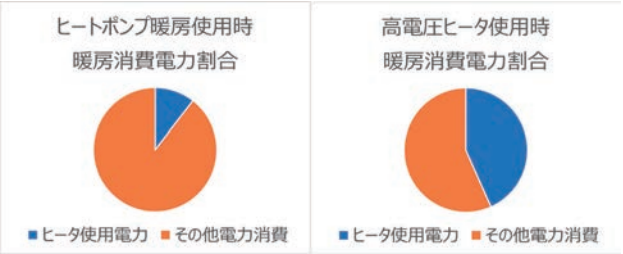


図 13　ヒータ使用時の消費電力割合

5　EV システム性能

5.1.1　充電試験

新型エルガ EV では、航続距離の課題を克服するためにバッテリーパックを 11 個搭載しており、必要とする充電時間と路線バスの運用面から、国内で幅広く普及している CHAdeMO 規格の急速充電方式を採用している。

現在、市場に普及しているさまざまな充電器メーカーの仕様差により、充電ができないというトラブルを未然に防ぐため、新型エルガ EV では、国内に普及されている充電器メーカー（13 社）での充電が確実にできるかの確認をするため三重県伊勢市に開設された CHAdeMO マッチングセンターにて、充電マッチングテストを実施し、車両との相性確認や長時間連続充電することによる充電器の温度上昇をモニタリングし、不用意な充電停止に至らないことの確認を実施した（**図 14**）。



図 14　充電口

5.1.2　低温環境での評価

新型エルガ EV では、低温環境下において高電圧バッテリーの性能が低下してしまわないように、高電圧バッテリーを加温するシステムを搭載している。ディーゼルバス同様の使われ方を想定した国内寒冷地相当の温度環境下（-25 ℃）においても、EV システムが起動可能であることを確認している。

低温時の充電では、高電圧バッテリーが加温されるまで充電待機が行われるが、加温時の消費電力量によって使用する SOC（State Of Charge：電池残量）は僅か数 % 程度であり、著しく消費しないことを確認した。また、充電開始後に急速充電器から高電圧バッテリーへ供給される充電量が減ることはないため、充電時間が更に長時間化することもなく、真冬でも安定した充電が可能であることを確認した。

5.1.3　SLD（スピードリミッター）の評価

新型エルガ EV では、屋根上に搭載するバッテリーによる重量増加があるため、最高車速を制限する SLD を設定することでタイヤの許容荷重内に収める工夫をした。

新型エルガ EV の SLD 制御として次の 3 点を成立させることを目標とした。

1. 乗客に不快感を与えないように、ゆるやかに速度を抑える。
2. EV の特徴の一つである力強い加速感を損なわないように、SLD 制御は制限車速付近だけで介入させ、常用車速域では SLD 制御を介入させない。
3. タイヤの許容荷重の観点から、設定車速に対して車速はオーバーシュートさせない。

これら 3 つの要件を成立させた制御にするために、まずは車両の基礎特性データを取得し、シミュレーションでキャリブレーション作業を行い、効率的に適合値を求めた。

実車での適合作業工数を削減したことで、実車評価では、フィーリング性能の評価に時間を掛けることができた。ドライバー視点での評価はもちろんのこと、座席利用の乗客と立席利用の乗客それぞれの視点でもフィーリング性能を評価することで、バス利用者が快適に乗車することができる SLD 性能を確保した。

6　ボディ性能

6.1　新規ボディ骨格の強度評価

新型エルガ EV は、天井前部に 1 トン超の高電圧バッテリー、尾部にも高電圧バッテリーを含む複数の EV 機器を搭載するレイアウトを採用した。そのため新規ボディ骨格は、従前のボディ骨格と比べて高い強度耐久性能が必要である。

6.1.1　新規ボディ骨格のストレス把握

新規ボディ骨格は、設計初期検討段階から CAE 解析を用いて強度作り込みを行った。ボディ骨格は、動的強度解析（ADAMS）により悪路走行時のストレスを把握し、得られたストレスに耐えうるよう構造変更を行った（**図 15**）。

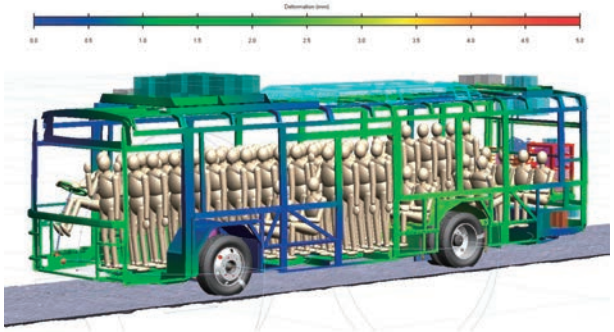


図 15　バス ボディ全体構造解析

6.1.2　新規ボディ骨格のストレングス把握

新規ボディ骨格のストレングスは、CAE 構造解析（Nastran）及び実機台上振動耐久試験にて評価を行った。新型エルガ EV の尾部 「EV 機器室」（旧 エンジンルーム）は、EV 化により骨格が複雑化したが、CAE 解析により効率的に作り込みを行った。作り込み後に出図されたボディ骨格から天井・尾部を切り出した供試体を製作。実機台上振動耐久試験を実施し、ストレングスを把握した（**図 16**）。 その後、CAE 解析結果の精度向上のため実機台上振動耐久試験で測定した強度懸念箇所の発生応力と CAE 強度解析結果の同部位の発生応力との比較を行った。これらの評価を実施したことにより、新型エルガ EV の新規ボディは、高い強度耐久信頼性を有することを確認した。

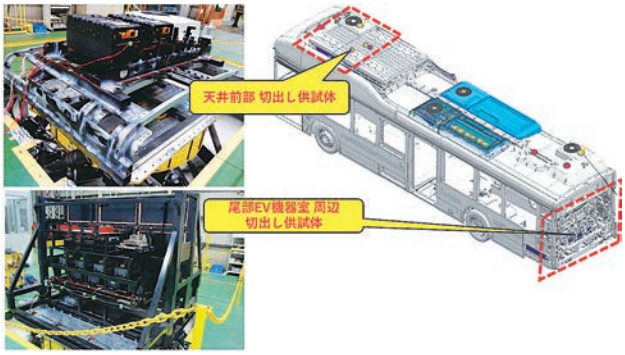


図 16　実機台上振動耐久試験に用いた各供試体

6.2　整備性・レイアウト

新型エルガ EV では、主要な装置として EV 用バッテリーパックを車両の二つのエリアに分けて搭載している。屋根上側に搭載するバッテリーについては、既存の路線バスにおいて通常の整備では作業者があまり乗り入れる場所ではないことから、3D データによる事前の入念なレイアウト確認とともに、実車での実際の作業トライを実施して、作業者が屋根上に登った後に安全に移動できるか、バッテリーをホイスト使用により載せ下ろし可能かどうかを確認し、その問題点・改善を要する点を洗い出した（**図 17・図 18**）。



図 17　3D データによる確認



図 18　実車での確認作業

新型エルガ EV でのもう一つの主要装置として、車両最後端部エリアの EV 関連機器がある。当該部は EV 機能を担う主要な諸装置を一つにまとめた「やぐら」形式を採用しており、車両からの一括脱着を行う設計思想となっている。実車ではフォークリフトによる取り外し及び搭載が可能となっており、整備作業の集約・効率化を狙ったものとなっている。

6.3　防錆・寒冷地性能

6.3.1　防錆性能

新型エルガ EV は実験プロセス刷新に伴い、机上での作り込みを重点的に行った。

従来は試験車両での作り込みが主体的だったことに対し、CAE 解析によるストレス確認を先行した。

そのほか、路線バスの車両使用期間が著しく長期化していることに対し、長期使用を考慮する上ではシャシ周りの防錆性確保が重要である。シャシフレーム水抜き性確保のための経路検討、初期段階での付加防錆剤の塗布範囲検討を重点的に行った。検討結果を反映した実車現認にて、狙いどおりの仕様であることを確認した（**図 19**）。



図 19　実車付加防錆剤塗布確認状況

6.3.2　寒冷地性能

寒冷地性能は CAE 解析によるストレス確認を行い、耐えうる仕様になるよう評価・改良を進めてきた。CAE

解析及び机上で作り込んだ仕様を反映した実車を用いて最終確認の位置づけで着雪試験を行い、狙いどおりの仕様であることを確認した（**図 20**）。

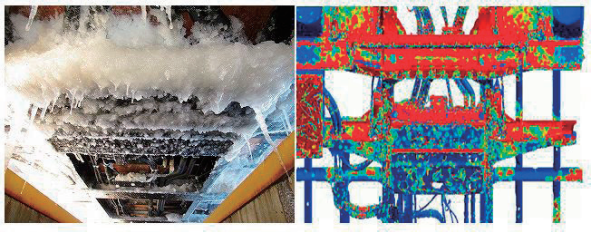


図 20　実車着雪試験結果と CAE 解析結果比較

7　総合性能

新型エルガ EV は、現行エルガ同様の使い勝手の良さに加え、EV ならではの「走りの良さ」、「静粛性」、「快適性」を追求した。そのため路線バスが運行されるあらゆる環境を想定し、公道・テストコースにて乗務員・乗客目線で実走行を繰り返すことで、市場適合性を確認した。

7.1　実路走行評価

路線バスが運行される環境として、①市街地②山岳路③郊外路を代表コースとし、乗務員の立場からは基本性能（動力性能・操縦安定性・制動性）を、乗客の立場からは快適性（振動騒音・乗心地・空調、使い勝手など）を主な評価項目とし、走行評価を重ねた。

その結果、電動化による低速から力強くスムースな走りとフルフラット化による安全性を高次元にまとめ上げた。

気持ちよく運転、並びに快適な乗車が可能となり、誰にでも優しい路線バスとしてコンセプトどおりに仕上げることができた。

7.2　テストコース走行評価

路線バス固有の停留所での乗降を模擬した運行評価、坂路でのアビューズ評価、バッテリー SOC 0 % 時の車両挙動など想定される使われ方を確認し、信頼性を確保した（**図 21**）。



図 21　テストコースでの走行風景

8　おわりに

新型エルガ EV の車両開発評価にあたり、特に注力した点について述べた。いすゞ初の EV バスであり、試行錯誤を繰り返したが新世代のバスとして事業者と乗客の皆様に十分ご満足いただける商品に仕上げることができた。

今後も市場動向を注視し、公共交通機関として社会貢献できるよう更なる商品改良を継続して進めていく次第である。

著　者


熊倉　航


飯塚　彰


内野　啓哲


宮崎　信之


渋谷　健太郎


堀　崇


石澤　譲一郎


渡部　紘


佐藤　航


大井　隆一朗


西谷　公光


新井　匠


髙山　正巳

新型エルガ EV の電動化技術

Electrification Technology of New ELGA EV

押田　直也*
Naoya Oshida

堤　修*
Osamu Tsutsumi

要　旨

2023 年 10～11 月開催の「JAPAN MOBILITY SHOW 2023」で世界初公開した BEV 路線バス新型エルガ EV は社会ニーズを捉えた未来の公共交通を具現化した国産初の EV 路線バスである。本稿では新型エルガ EV の代表的な特徴や主要部品であるバッテリーやモータなどに関する概要を紹介する。

Abstract

The BEV bus new ERGA EV (Electric Vehicle), which made its world debut at the JAPAN MOBILITY SHOW 2023 held in October-November 2023, is Japan's first domestically produced EV bus that embodies the future of public transportation that meets social needs. This chapter provides an overview of the new ERGA EV's representative features and its main components, such as the battery and motor.

1　はじめに

近年、持続可能な社会を目指す取組みが各国で活発化している。2015 年に採択されたパリ協定は、国際的な気候変動問題に関する枠組みで、温暖化を 2 度未満に抑えることを目指している。これに加えて、日本政府は「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を掲げている。カーボンニュートラルの概念は、温室効果ガスの排出を実質的にゼロにすることを指し、これらの目標の達成には、EV（Electric Vehicle）の普及が重要な手段となっている。脱炭素化への取組みはバス事業者にも求められており、EV 路線バスは決められたルートを走行することが多いため、BEV（Battery Electric Vehicle）は路線バスのカーボンニュートラル対応の動力源として有力な選択肢の一つである。EV 化に向けて国をはじめとして社会的な動きが加速している。環境省だけでなく、国土交通省や経済産業省でも脱炭素化やエネルギー削減の推進政策が発表されており、EV 購入時の充電設備費用を含めた補助金制度という形で表れてきている。更に、東京都や大阪府のような地方自治体でも、補助金を使った EV バス導入の取組みが始まっている。特に、2025 年に大阪で開催が予定されている「国際博覧会（大阪・関西万博）」では、EV バスによる来場者輸送の要望が出ている。

また、車内安全に対する要求の高まりもある。車内事故の多くは 65 歳以上の高齢者で、着席していない高齢者が車両発進・停止時にバランスを崩し、転倒・負傷する事故である。これを受け国土交通省はバス事業者に対して、車内事故ゼロへの取組みを求めている。一方で OEM（Original Equipment Manufacturer）に対しては、車内事故ゼロを実現するために、段差がなく乗降しやすいフルノンステップバスの開発要求が出されている。

このような背景から EV バスの開発は急務課題であり、EV 化によるレイアウト自由度の高さを生かした車内フルフラットバスの実現が社会的ニーズに応える最適な手段である。本稿では、国産初の BEV 路線バス「新型エルガ EV」について、走行中の温室効果排出ガスをゼロにする EV ならではのシステム構成やバッテリー、モータ、昇圧 DCDC システムなどの特徴について焦点を当てて寄稿する。

2　EV システム

本章では新型エルガ EV のシステムについて記述する。**2.1 節**はシステム全体の構成概要を記載し、その後、**2.2 節**～**2.5 節**にそれぞれ EV の特徴的なバッテリー、モータ、昇降圧 DCDC システム、制御、充電に関する内容を記述する。

2.1　システム構成概要

図 1 に新型エルガ EV の外観図、**図 2** に EV システムの構成図を示す。屋根上とリヤオーバーハングに

* xEV システム開発第一部

バッテリーを搭載し、リヤ軸にインアクスルモータを採用している。最後部座席後方にEVルームを設け、J/B（Junction Box）、DCDC12、DCDC24、昇降圧DCDCなどの高電圧機器を配置している。また、EVコンポーネントはエルフEVのコンポーネントを可能な限り活用して、コストダウンを図っており、ミニマムリソースでの開発を実現している。

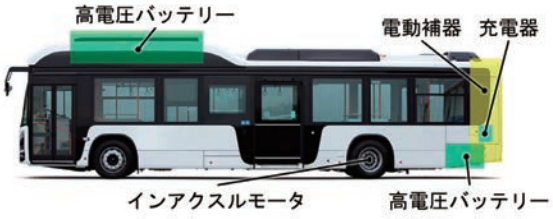


図1　新型エルガEVの外観図

高電圧回路はバッテリーからJ/Bに集約され、J/Bから駆動システムや電動補器などの高電圧機器に分配される構成となっている。J/Bは新型エルガEV専用設計になっており、バス特有の大出力、多並列システムに対応できる設計を施している。システム電圧は、エルフEVと同じ350 Vを採用する。駆動システム電圧はモータ仕様により650 Vを採用する。

バッテリー電圧とモータ駆動電圧の差異は、電圧を昇降圧させる昇降圧DCDCコンバータを採用し、電圧差異を解消させている。低電圧システム電源は従前のICE（Internal Combustion Engine）車と同じ24 Vに加え、高電圧機器の制御電源、W/P（Water Pump）の駆動電源などに使用されている12 Vを追加している。従前のICE車でベルト駆動されていたパワーステアリングオイルポンプ及びラジエータファンは、電動化されたことに伴い24 V系の消費電力が増加するため、エルフEVのDCDCコンバータを5基並列している。追加された12 V電源はエルフEVのDCDCコンバータを使用し、電力供給をしている。空調・温調機器は、電動A/C（Air Compressor）、HVH（High Voltage Heater）を搭載している。なお、HVHは6基存在するが、4つは車内暖房用で、もう2つは、バッテリー加温用となっている。なお車内暖房は電費向上を目的にHVHとヒートポンプ方式を併用している。充電は急速充電のみ対応しており、国内に最も普及しているCHAdeMO規格に準拠している。充電口は車両右後方に搭載し、従前ICE車の給油口と同じ位置に設置することで、ICE車と同じ使い勝手になるようにレイアウトしている。

新型エルガEVの冷却水回路は主にモータなどの高電圧機器冷却回路・車内暖房用回路・ルーフ部バッテリー温調用回路・リヤ部バッテリー温調用回路の計4系統である。特にバッテリー温調用回路はバッテリーの特性（高温環境下では劣化しやすく、低温環境下では出力が制限される）からバッテリー温度が高温時には冷却、低温時には加温として使用する。回路内に冷却と加温が混在することから、回路の途中には切替え用のバルブが設置されており、バッテリーの温度状態によって制御される。通常、バッテリーは冷却水により冷却され、高負荷走行などでバッテリーの温度が高温になる場合は、冷媒を併用し冷却能力を高める回路となっている。

2.2　バッテリーシステム

表1にバッテリーパックの仕様を示す。バッテリーパックはエルフEVと共通化して開発コストの低減をしている。新型エルガEVは合計11パック搭載で、車両全体のバッテリー容量は245.3 kWhになる。これは国内路線バスユーザーの90パーセンタイルの航続距離を満足する容量になっている。

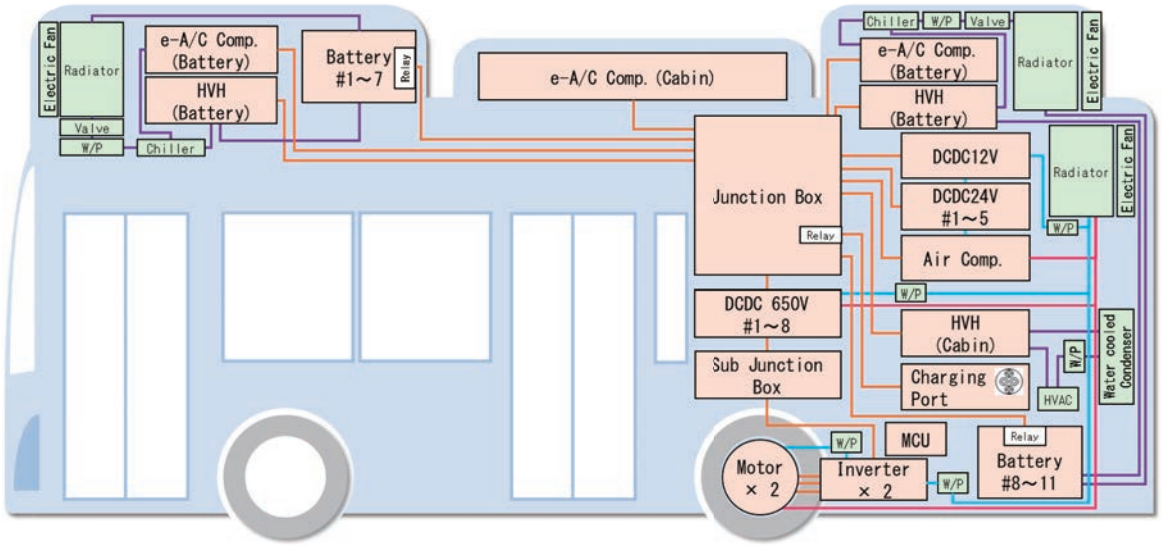


図2　EVシステムの構成図

表 1　バッテリーパック仕様

項目	値
 バッテリーパック（LGES製）	
型式	RCC22
方式	リチウムイオンバッテリー
セル種別	円筒型/三元系NMC
セル電圧	3.69V
セル容量	4.93Ah
パック定格電圧	354V
パック重量	173kg
筐体寸法	700(L)×401(W)×425.5(H)mm
冷却方式	水冷

BMS（Battery Management System）の構成は、パック内部のパック内 BMS（以降、P_BMS と略す）と、それらの状態を管理･制御するマスタ BMS（以降、M_BMS と略す）がある。P_BMS は搭載パックと同じ数があるが、M_BMS は車両につき 1 ユニット搭載され J/B 内に設置されている。この M_BMS と P_BMS の構成により、いずれかのバッテリーパックで異常が発生した場合でも、そのバッテリーパックのみ切り離すことにより、残りの正常バッテリーパックで走行を維持することが可能となっている。これは、商用車の稼働保証を担保するために考えられた車両システムの一つである。また、前述したマルチパックシステムは、複数のバッテリーパックを並列に接続しているため、充電時にパック間バランス制御を有しているのも特徴である。

2.3 駆動システム

新型エルガ EV の駆動システムは、ZF 製ハブモータ付きドロップアクスルを採用している。誘導モータは左右に配置され、減速ギヤはモータに直結している。インバータはモータと別体で、左右のモータに対してそれぞれ接続させ、モータを駆動している。ドロップアクスルはリヤ軸とアクスル軸をずらしていることが特徴である。そのため ICE 車にはできない EV ならではの自由なレイアウトで新型エルガ EV の目玉であるフルフラットバスを実現することができている。**図 3** にハブモータ付きドロップアクスルの構成図を示す。

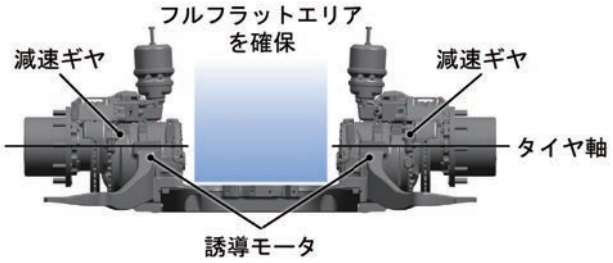
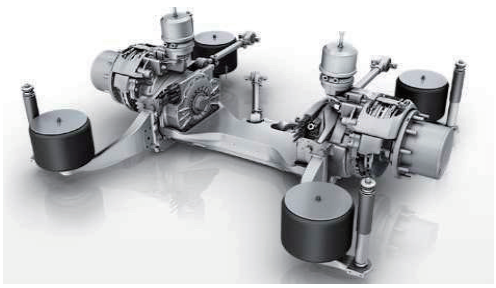


図 3　ハブモータ付きドロップアクスルの構成図

次にモータの電気的特性について解説する。**表 2** にモータの仕様を示す。モータの定格電圧は AC400 V で、インバータ入力電圧は DC650 V である。バッテリー定格電圧が 354 V に対し、インバータ入力電圧が 650 V であるため、昇降圧 DCDC コンバータを使いインバータに 650 V を供給している。昇降圧 DCDC コンバータについては **2.4 節**で説明する。モータの最大出力は 2 基合計で 250 kW、定格出力は 2 基合計で 174 kW であり、これらのスペックは日本国内における主要な路線バス運行ルートに要求される動力性能を十分に確保している。**図 4** にモータ最大出力特性を示す。左右のモータ、インバータの制御は MCU（Micro Controller Unit）でしている。

表 2　モータ仕様

項目		値
 ハブモータ付きドロップアクスル（ZF製）		
型式		HR11
方式		誘導モータ
出力	最大	250(125×2)kW
	定格	174(87×2)kW
トルク	最大	970(485×2)Nm
最高回転数		11,000rpm
ギヤ比		22.66
定格電圧		AC400V
冷却方式		水冷

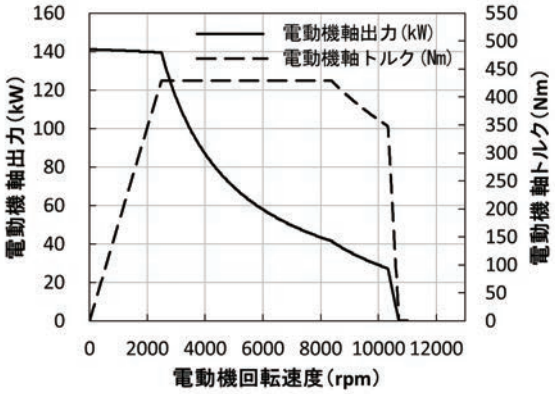
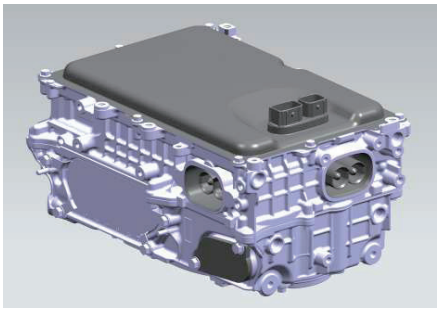


図4　新型エルガ EV モータ最大出力特性

2.4 昇降圧 DCDC コンバータ並列システム

8基の昇降圧 DCDC コンバータで構成された並列システムは新型エルガ EV の特徴的なシステムの一つである。**表3**に昇降圧 DCDC コンバータの仕様を示す。1基あたりの最大出力は 43 kW、定格出力は 29 kW である。8基並列をする理由は、大型路線バスに要求される動力性能を確保するためである。昇降圧 DCDC コンバータは J/B と SUB J/B の間に設置されており、8基で昇圧した電力を SUB J/B で一つにまとめ、左右のインバータに電力供給をしている。回路方式は非絶縁型になっており、内部にチョッパ回路を有する。各昇降圧 DCDC コンバータは独立して昇降圧制御をしており、2次側電圧が要求電圧（=650 V）になるように定電圧制御を行っている。ドライバーのアクセル操作に違和感なく車両が応答するには、スムーズな力行（推進）・回生（制動）の切替えが必要である。コンバータは定電圧制御をすることで力行時の昇圧、回生時の降圧を自身で行っている。

表3　昇降圧 DCDC コンバータ仕様

項目		値
		
昇降圧DCDCコンバータ（DENSO製）		
方式		非絶縁型
出力	最大	43kW
	定格	29kW(30min)
出力電圧		650V
冷却方式		水冷

これにより力行・回生の切替え時に上位からの指示を待つことなく、瞬時に電流の向きを変えることができる。

一方で各昇降圧 DCDC コンバータが自身で定電圧制御をすることで新たな課題も生じる。各機体は他の機体の電圧情報を受け取らないため、各機体で2次側の電圧にバラツキが発生する。各機体の電圧バラツキは、インバータ DC 電圧値を共通の電圧とし、各機体内部にある2次側の電圧センサの値を使って電圧バラツキの補正を行っている。

2.5 制御システム

図5に新型エルガ EV の通信アーキテクチャを示す。通信アーキテクチャは EV 側と車両側に大別され、EV 制御は VCU（Vehicle Control Unit）がメイン ECU（Electronic Control Unit）として働き、その下位に各ユニットが配置されている構成となっている。VCU の主な役割は下位ユニットの状態監視と CGW（Central Gateway）からの車両指示に基づいて、下位ユニットへの制御指示である。制御指示を行う上で VCU における重要な制御は主に電力マネージメント・駆動トルク制御・充給電制御となっている。電力マネージメントは、バッテリーの充放電可能電力を超過しないように下位ユニットへの電力使用量を調整している機能である。これは充放電可能電力を超過するとバッテリーが著しく劣化するだけでなく、過電圧や過放電などの重大な不具合につながる恐れを招くため、VCU によって電力の使用状態把握及び出力指示を制御している。

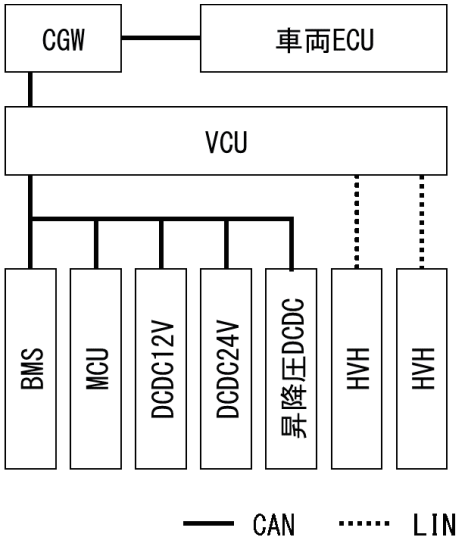


図5　通信アーキテクチャ

駆動トルク制御は、主にアクセル開度を検知し、電力マネージメント、及びモータの状態から VCU にてトルク指示値を算出し、モータへトルク指示を行う。モー

タのトルクは力行と回生に分けられ、力行はモータに電気を通電しトルクを発生させ車両を推進させる。一方、回生はモータが持つ発電機能を使うことで、バッテリーの充電と併せて制動力が発生するため、車両は減速する。この回生はバッテリーの充電が行われるため、電費改善で有効な手段の一つであり、各 OEM で回生力の強さや操作方法に違いがある。新型エルガ EV の回生方法は主に二つあり、一つは補助レバー操作による回生ブレーキである。ICE 車との使い勝手を共通とするため、補助ブレーキレバー操作での段階的な回生ブレーキを設定している。**表 4** 及び**図 6**、**図 7** に補助レバー操作による回生ブレーキの概要を示す。

表 4　補助レバー操作による回生ブレーキの概要

段数	制動力
3 段目	排気ブレーキ＋流体リターダ(強)相当
2 段目	排気ブレーキ＋流体リターダ(弱)相当
1 段目	排気ブレーキ相当
OFF	エンジンブレーキ相当

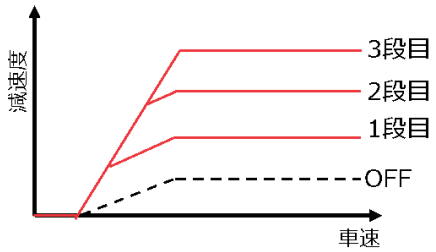


図 6　補助レバー操作による回生ブレーキの概要図

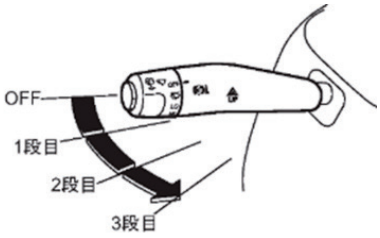


図 7　補助レバー回生ブレーキ

二つ目は回生協調ブレーキシステムである。**図 8** に回生協調ブレーキの概要を示す。回生協調システムは、いすゞ自動車の EV としては初めて採用するシステムであり、新型エルガ EV 電費改善に大きく寄与している。回生ブレーキの協調制御は EBS（Electronic Brake System）で行う。EBS はブレーキの踏み込み量に応じた回生要求トルクを VCU に送信し、VCU は EBS から要求を受けた回生トルクを MCU に対して要求する。踏み込み量に応じて摩擦ブレーキと回生ブレーキを併用する。極低速域では回生ブレーキは作動せず摩擦ブレーキのみで制動力を発生させる。駆動システム異常時など、回生トルクを発生させることができない場合は、VCU は EBS に対し異常値を送信する。EBS は異常値を受け取ると摩擦ブレーキのみで制動力を発生させる。

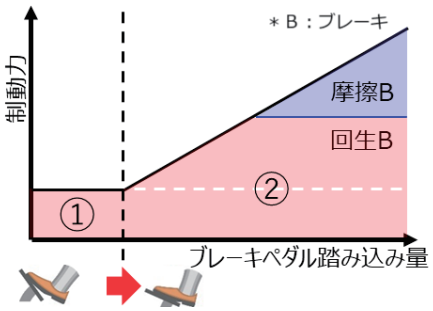


図 8　回生協調ブレーキ概要

2.6　充電システム

EV の充電は自動車だけで完結できず、電源網などのインフラを含めた充電設備が関連する。充電はこれらの影響を強く受けるため、IEC（国際電気標準会議）が中心となって世界的に規格標準化の活動を推進している。現在、EV の充電方式はコンダクティブ、ワイヤレス、交換式の 3 つに大別されていて、新型エルガ EV は最も市場で普及している充電方法であるコンダクティブ方式を採用した。コンダクティブ充電は IEC61851-1 の標準に従い MODE4 のみに対応している。MODE4 は DC 充電であり、新型エルガ EV のように大容量バッテリーを搭載した車両は AC 充電のような低充電電力による充電は運用上適していないため、AC 充電は対応していない。**表 6** に新型エルガ EV の充電方式並びに充電スペックを示す。

表 5　新型エルガ EV 充電方式及び充電電力

DC 充電	充電方式	IEC61851-23
		CHAdeMO
	充電電力	50kW

新型エルガ EV の仕向け地は国内のみであるため、DC 充電は IEC61851-23 System A（互換：CHAdeMO）に準拠している。なお、新型エルガ EV は EVPOSSA（電動車両用電源供給システム協議会）により発行された充放電システムガイドライン V2L

(Vehicle to Load) に従うことで外部給電にも対応した。大容量のバッテリーを搭載している新型エルガEVは災害時などの非常用電源としての使用に適している。昨今日本各地で発生している異常気象による災害や地震によって被害に遭った地域の避難所などで、家電への電力供給やスマートフォンの充電など、走る非常用電源としての活躍も大いに期待できる。

3　おわりに

国産初の量産BEV路線バスとなる新型エルガEVを開発するにあたり、昇降圧DCDCコンバータ並列制御や回生協調ブレーキなど、いすゞ自動車として初めて直面する課題が多々あったが、いすゞ自動車の長年にわたる路線バス市場の知見、運行ルート情報やユーザーからのニーズの把握により、EV普及期である昨今の時代にICE車と同様の使い勝手ができる「安心」と、これまでの公共交通の概念を飛び越え、新しい時代のモビリティのスタンダードを切り開く「斬新」な路線バスが高い信頼性のもと、新型エルガEVとして一つの形になり発表することができた。この場を借りて、新型エルガEVの開発に携わっていただいたすべての方々へ感謝の意を表します。

本文献は、いすゞ技報135号に掲載された「新型エルフEVの電動システム概要について」より一部を引用している。

参考文献

池田 勇太, 宮川 仁:新型エルフEVの電動システム概要について, いすゞ技報, 135号 (2023), P120-124

著　者



押田　直也



堤　修

新型エルガ EV の先進安全技術

Advanced Safety Technology for New ELGA EV

中西　哲*　Akira Nakanishi
田中　優介*　Yuusuke Tanaka
岩木　壮史*　Masashi Iwaki
宮本　拓海*　Takumi Miyamoto
Bantoen Run*

要　旨

交通死亡事故ゼロを目指す、いすゞグループの取組みとして、新型エルガ EV では従前型エルガに対し先進安全技術の拡張を行った。

本稿では、新型エルガ EV に新規搭載されるフロントブラインドスポットモニター、及び性能向上を果たしたドライバー異常時対応システムの 2 点について取り上げる。

Abstract

As part of Isuzu Group's efforts to achieve zero traffic fatalities, the new ERGA EV has been equipped with expanded advanced safety technologies compared to the previous ERGA model.

In this context, we will highlight two key features newly installed in the ERGA EV: the Front Blind Spot Monitor and the enhanced Driver Abnormality Response System.

1　はじめに

先進安全技術は交通事故低減に大きく寄与し、今や標準装備が当然のものとなっている。将来の自動運転に至るまでに、今後も多くの新機能や性能向上といった技術の進化が加速するであろう。

これらの技術は、乗用車・トラックでの採用が先行しているが、路線バスは使われ方や車速域が異なるため、バス固有の視点で開発する必要がある。今回新型エルガ EV（Electric Vehicle）を発表するにあたり、フロントブラインドスポットモニター及び EDSS（ドライバー異常時対応システム）についても路線バス固有の技術的な課題と向き合い開発を行ってきたので、その内容について紹介する。

2　フロントブラインドスポットモニター

本機能は自車直前を検知し、ドライバーに危険を通知する機能である。新型エルガ EV では路線バス固有の危険が多い環境、特に停留所における車両直前を横断する歩行者検知において効果を発揮する。

フロントブラインドスポットモニター機能を実現するため、いすゞの路線バスシリーズにおいて初めてショートレンジレーダを搭載した。ショートレンジレーダのハードウェアは新型フォワードで採用しているものと共通化を図っている。ソフトウェアは新型フォワードの「車両直前警報」をベースに路線バス固有のチューニングを加えている。

ショートレンジレーダはフロントバンパ中央に搭載し（**図 1**）、車両直前を移動する歩行者・自転車などのいわゆる「交通弱者」の検知を狙っており、特に小さい子供を検知できるように検知エリアの設計を行った（**図 2**）。

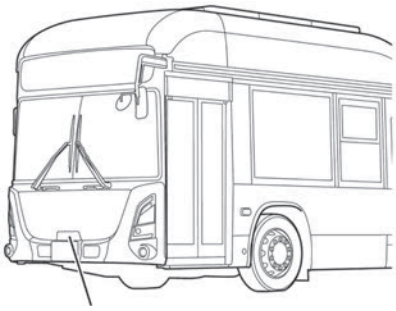


図 1　ショートレンジレーダ搭載位置



図 2　検知エリアと作動イメージ

* AS システム開発部

2.1 機能概要

車両発進時に自車の直前を移動する歩行者及び自転車などを検知し、メータディスプレイに「前方注意！」と表示することでドライバーに対して視覚情報による報知を行う。衝突の可能性があると判断した場合はドライバーシートに設置されたシートバイブレータを作動させることで触覚情報による警報を行い、衝突回避手段をとるように促す。報知・警報ともに自車速10 km/h以下及び警報対象速度3～10 km/hで作動する。

基本機能は新型フォワードで開発したフロントブラインドスポットモニターを踏襲している。路線バス固有の課題として、停留所到着時に路肩に寄せて停車しようとすると、レーダ正面の検知エリアが歩道と重なり、歩道上の歩行者や構造物に対して警報してしまう課題がある。そのため、停留所への発着頻度の高い路線バスにおいては警報の煩わしさにつながる懸念があった。

この課題に対して、検知対象及び警報条件に路線バス専用のチューニングを施すことで、警報に対する煩わしさを低減しながらも警報機能との両立を図っている。

ドライバーへの注意喚起方法については、ドライバーに限定して伝達可能な手段にこだわった。危険度の低い「報知」の段階はメータディスプレイの表示を行い、危険度の高い「警報」はシートバイブレータを振動させることで、乗客に影響を与えず、ドライバーのみが認知できる仕様とした。なお、シートバイブレータは後述のEDSSと共用している。

3 ドライバー異常時対応システム（EDSS）

本機能は、ドライバーの異常時に車両を安全に停車する機能である。基本機能は従前型エルガで採用済みだが、新型エルガEVでは電動パーキングブレーキを新規採用したことに伴い、EDSS緊急停車後の自動停車保持機能を追加した。

3.1 機能概要

EDSSを作動させる手段として手動操作と自動検知の2つの方法が存在する。1つ目は手動操作によりドライバー席若しくは運転席後方のEDSS作動スイッチを押すことで作動させる。2つ目はドライバーステータスモニターによりドライバーの姿勢及び体調異常を自動検知し、一定時間注意喚起を行ったあとに作動させる。作動時の状態として軽微制動、停止制動及び停車保持の3つの制御状態が存在する（**表1**）。

表1 EDSS作動方法及び制御

異常検知方法	作動時制御
手動操作方式 ●運転者によるスイッチ操作 ●乗客によるスイッチ操作	**①軽微制動** 3秒間の緩いブレーキで警告する **②停車制動** 2.0[m/s²]で減速する **③停車保持** 安全に停車し車内外に報知する
自動検知方式 ●ドライバーステータスモニターによる 異常検知時	

EDSSが作動するとアクセル誤踏み対策としてトルクカットがなされ、約3秒間の軽微制動と車内アナウンスによりドライバー及び乗客にEDSSが作動したことを伝える。その後停止制動に移行し約2.0[m/s^2]で減速する。そして停車後に車両動き出し防止として電動パーキングブレーキを自動的に作動させる。

作動の解除方法はシーンにより異なる。ドライバーステータスモニターによる作動時は、異常検知中及び軽微制動中は警告に対してドライバーが姿勢を正すことで解除できる。またEDSSキャンセルスイッチを押すことで停車時以外であれば解除可能とした（**表2**）。

表2 EDSS解除方法

	姿勢正常化	EDSS解除スイッチ操作	Keyオフ操作
異常検知中	有効	有効	有効（非推奨）
軽微制動中	有効	有効	有効（非推奨）
停止制動中	無効	有効	有効（非推奨）
停車保持中	無効	無効	有効

制動中及び停車後にはシステムが作動したことを伝えるために車内及び車外に報知を行う。車内は音声アナウンス及び警告灯点滅で報知を行い、車外はホーン吹鳴及びストップランプ・ハザードランプの点滅を行う（**図3**）。

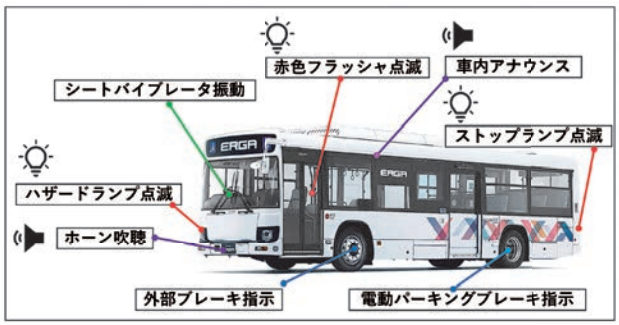


図3 EDSS作動概要

EDSSは新型エルフ・フォワードと共通のシステムだが、バス固有の仕様も幾つか存在する（**表3**）。

表 3　バス固有の EDSS 仕様

	新型エルガEV・従前型エルガ	新型エルフ・新型フォワード
ドライバーステータスモニター	25km/h以上	60km/h以上
異常検知中	シートバイブレータ（触覚）	メータ（視覚）車内アナウンス（聴覚）
客席スイッチ	ある	なし
運転席・客席スイッチ操作後制御	軽微制動	停止制動
赤色フラッシャ	あり	なし
EDSS解除方法（走行中）	解除ノブ回し	解除スイッチ押し

例えば、ドライバーステータスモニターの作動車速は路線バスの車速域に合せて 25 km/h 以上で作動開始するように設定している。

ドライバーへの注意喚起方法について、トラックは音と光による報知を行っているが、バスにおいては乗客の不安を招く可能性があることから、ドライバーのみに伝達可能なシートバイブレータを採用している。

EDSS 作動時の制御について、トラックは停止制動に即時移行するが、路線バスは立ち客の転倒事故を防止するため、軽微制動の後に停止制動へと移行する。

作動スイッチについて、ドライバーの体調異常に気が付いた乗客が直ちに作動させられるよう、ドライバー席スイッチに加え、客席スイッチが設置されている。

3.2　セントラル ECU

いすゞの路線バスシリーズへのセントラル ECU（Electric Control Unit）採用は新型エルガ EV が初となる。本装置の特長として、先進安全機能の制御部分を集約することで、各機能との協調を実現可能としている。従前型エルガと新型エルガ EV は動力源や電動パーキングブレーキの有無など仕様が異なるが、セントラル ECU の特長を活かして開発期間の短縮を果たしている。従前型エルガではドライバー異常時対応システム専用 ECU を用いて制御していたが、新型エルガ EV ではセントラル ECU に集約したうえで機能追加を果たした。これによりアクチュエータや他のコントローラへの指示系統を一本化することができ、次期路線バスなどの新規開発に伴うハードウェア設計コストの低減と将来的な先進安全機能の拡張も対応可能となった。

4　おわりに

新型エルガ EV に採用した先進安全機能は、装置サプライヤー及び車両審査実験第一部先進安全システム実験課、いすゞ北海道試験場をはじめとする社内外の関係者の多大なご支援・ご協力により実現することができた。この場を借りてお礼を申しあげる。これらの機能が交通事故低減及びドライバー運転支援の一助となることを願っている。

先進安全技術は、「安心・安全」に直結する機能である。今後もお客様の安全を守り、交通死亡事故ゼロを目指し、機能開発と性能向上に努める。

著　者


中西　哲


田中　優介


岩木　壮史


宮本　拓海


Bantoen Run

新製品紹介

新型エルフミオの開発について

Development of New ELFmio

増子　智一*
Tomokazu Masuko

小林　舜*
Shun Kobayashi

要　旨

昨今、国内の物流業界ではトラックドライバーの高齢化や人手不足が進んでおり、解決が急務となっている。このような課題背景に対し、いすゞは主力商品である小型トラックのエルフシリーズとして、新たに普通免許で運転できる新型エルフミオを市場に投入した。

本稿では新型エルフミオの開発概要や車両性能の解説とともに、商品展開について紹介を行う。

Abstract

Recently in the domestic logistics industry, the aging and shortage of drivers has been progressing, making resolution a pressing issue. Against this backdrop, ISUZU has launched the new “ELFmio” from ELF-series, which can be driven with a regular license. In this article, we will introduce the development overview and vehicle performance of the new “ELFmio”, along with product expansion.

1　はじめに

日本の物流業界ではトラックドライバーの人手不足や高齢化が深刻化している中、2024 年問題で知られるように時間外労働の上限が課されたことで、トラックドライバーの労働力不足が進んでいる。その一方で e コマースの普及などによって宅配貨物をはじめとした小口配送の取扱い量は年々増加しており、これらは「ラストワンマイル」の課題として対応が急務となっている。

このような物流課題解決の一翼を担うため、いすゞは小型トラックのエルフシリーズとして、新たに普通免許で運転できる車格をラインナップした。愛称となるペットネームは、従来のエルフよりも軽快かつコンパクトさをイメージして「エルフミオ」（**図 1**）と名付けられた。

ここからは、新型エルフミオの開発や商品展開について述べる。

ELFmio

図 1　新型エルフミオ　ペットネーム

2　開発の狙い

「ラストワンマイル」に携わるドライバーを増やしていくうえではプロのトラックドライバー以外にも、アルバイトやパートタイムといったさまざまな形態で、普段トラックには馴染みのない方々にもドライバーを務めていただく必要がある。

一方で免許制度に目を向けると、2017 年の免許制度改定以降、普通免許で運転できる車両区分は GVW（Gross Vehicle Weight）3.5 t 未満の車両（**図 2**）となっている。更に AT（Automatic Transmission）限定免許取得者の割合は増えており、その割合は実に 3 割を超えてきている（**図 3**）。

このような背景から、AT 限定普通免許で運転できることはもちろんのこと、老若男女問わず扱いやすく、誰もが安心して運転できるトラックを、新型エルフミオの開発目標とした。

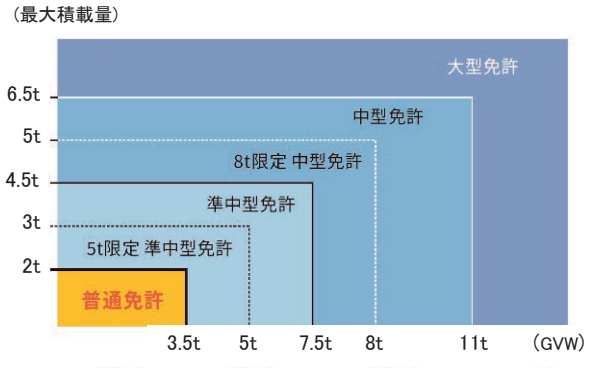


図 2　2017 年改正以降の免許区分

*小型・中型商品企画・設計部

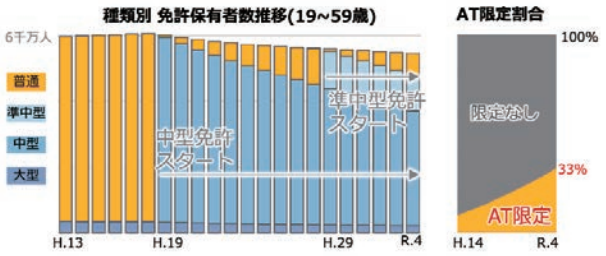


図３　免許保有者数推移及び AT 限定割合

3　開発概要

新型エルフミオは、2023 年に発売した 23.0 型エルフの派生車として同時に開発を進められた。GVW3.5 t 未満に抑えるためには、車両の軽量化が必須であるため、エルフをベースに、海外向けの LCV（Light Commercial Vehicle）で実績のあるパワートレインをモディファイして搭載した。LCV で採用されているコンポーネントを使うことによって、車両の軽量化だけでなく、本格トラックとしての強みを生かしつつも乗用車感覚で運転できる車両に仕上がった。

3.1　パワートレイン

エンジンは海外向けに展開している LCV の D-MAX や MU-X で信頼を積み重ねている 1.9 L ディーゼルの RZ4E エンジン（**図 4**）を採用し、新型エルフミオ専用に制御開発を行った。トランスミッションは 6 速 AT を採用。イージードライブのニーズが高まっている背景から、2 ペダルで操作可能な AT のみの設定とし、こちらも専用に制御開発をした。なお、MT（Manual Transmission）車のような操作性を求めるユーザーに向けて、手動シフトモードも設定した。

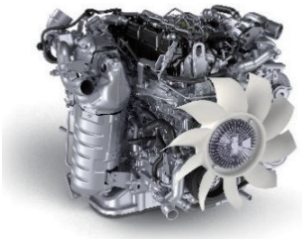


図４　RZ4E エンジン

3.2　シャシ

シャシはエルフの軽量フレームショートホイールベース（2,500 mm）の車型をベースに足回りなどを最適化し、**図 5** に示すようなレイアウトパッケージにした。

GVW3.5 t 未満のため、全車型とも小径タイヤを採用した。なかでもフラットローダブルタイヤの車型はリヤタイヤに 13 インチタイヤを採用し、荷台の床面地上高を低くして荷役性を向上させた。

平ボディ付き完成車以外にも、市場での架装を前提としたキャブ付きシャシも開発しており、バン架装用のリヤサスペンションや、キャンピングカー架装用のリヤスタビライザなど、用途に合せた装備を用意。

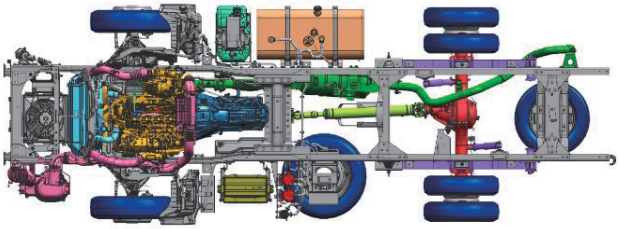


図５　主要装置レイアウト（NHR87AF ― EC4LAAP）

3.3　キャブ

キャブは新型エルフミオの使われ方も視野に入れて開発しており、23.0 型エルフでフルモデルチェンジをした。デザインや内外装はもちろん、キャブの骨格から見直しを行い、居住性や利便性の向上だけでなく安全性能や空力性能などあらゆる面でのアップグレードを行った。

また、居住性を求めるユーザーに向けた選択肢となる、スペースキャブ（**図 6**）も開発した。こちらはシングルキャブの後方を 300 mm 延長し、車内空間にゆとりを持たせ、シートバックスペースに手荷物や工具などを搭載できるようにするだけでなく、シートのリクライニングを可能にして、よりくつろぎやすく便利な空間を提供できる。

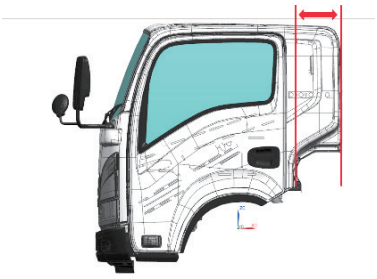


図６　スペースキャブ

3.4　リヤボディ

荷台は平ボディと電動ダンプを開発。平ボディは 2 t トラック同等の内法長とし、2 t トラック同様の使い勝手とした。また、スペースキャブ専用の平ボディ（**図 7**）も開発しており、こちらはキャブ下のデッドスペースにボディを潜り込ませる形状とすることで、荷台の内法長を最大限確保した。

ダンプは架装メーカーと共同で開発し、PTO（Power Take Off）操作が不要な電動式を採用。スイッチ一つで誰にでも扱いやすい仕様とした。

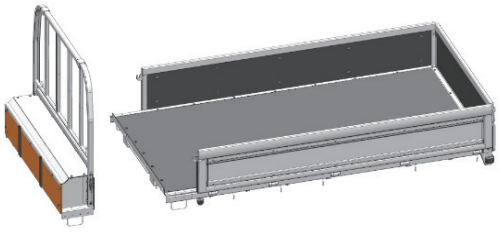


図7　スペースキャブ用平ボディ

3.5 電装品

コックピット周りについても23.0型エルフと共通で、誰でもわかりやすい、使いやすい仕様とし、7インチの大型液晶画面を備えたメータや、ステアリングスイッチ、タッチパネルで操作が可能なディスプレイオーディオなどを開発した。

4　各種性能

4.1 走行性能

RZ4Eエンジンと6速ATとの組合せによって、坂路発進性や加速発進性に優れたディーゼル車らしい走破性を発揮し、小排気量ながらパフォーマンスの高い走行性能とした。**図8**に代表的な車型（NHR87AF－EC4LAAP）の走行性能線図を示す。

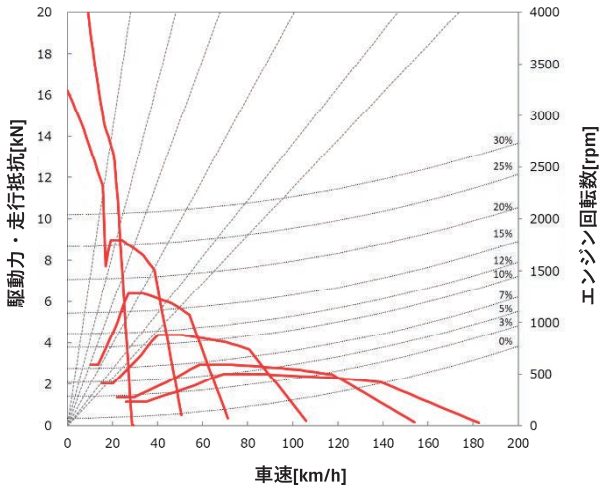


図8　走行性能線図

また、**図9**にRZ4Eエンジンの性能曲線を示す。新型エルフミオの車格に合せて、最高出力を88 kW（3,000－3,200 rpm）、最大トルクを320 N·m（1,600－2,000 rpm）とした。低い回転数から最大トルクが出せるうえ、ATのトルク増幅効果によって、積車状態でも力強い発進を可能とした。また、6段変速によりシームレスな走行性能を発揮させた。

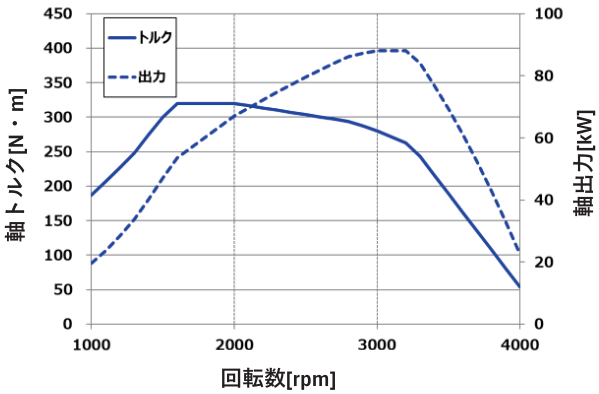


図9　エンジン性能曲線図

4.2 環境性能

全車型を平成30年排出ガス規制に適合したうえで、2022年度中量車燃費基準をJC08モードにて達成（**表1**）し、クラス唯一のディーゼル中量貨物車の展開を可能とした。

RZ4Eエンジンは電子制御式燃料噴射装置（コモンレールシステム）のほか、電子制御式EGR（Exhaust Gas Recirculation）、電子制御式ターボシステムを採用。後処理装置には近接DPD（Diesel Particulate Defuser）と尿素SCR（Selective Catalytic Reduction）の組合せを採用した。国内向け専用に制御開発を行い、高いレベルで燃費性能と排出ガス性能を両立させた。

車両としてはキャブ形状やフロントバンパの形状を刷新して空力性能を大幅に改善させたほか、軽量化や転がり抵抗の小さいタイヤの採用などによって車両全体の走行抵抗をよくさせた。併せてファイナルギア比やシフト制御の最適化を行い、燃費向上を図った。

表1　燃費値（NHR87AF－EC4LAAP）

燃費基準値		13.5　(km/L)
JC08モード		13.6　(km/L)
WLTCモード	総合	10.8　(km/L)
	市街地	9.1　(km/L)
	郊外	11.3　(km/L)
	高速道路	11.5　(km/L)

4.3 安全性能

予防安全、衝突安全ともに、新型エルフミオはクラストップレベルの高い安全性能とした。

予防安全としては、オートライトや電子インナーミラーを標準装備とし、視認性を大幅に向上したうえで、先進安全機能を拡充した。具体的には交差点右左折時のプリクラッシュブレーキ、及びブラインドスポットモニター（交差点警報・出会い頭警報）を開発した。（**図10**）

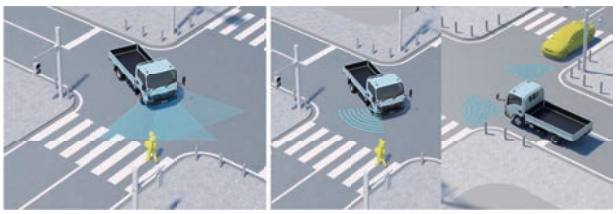


図 10　先進安全機能拡充

衝突安全としては、乗員保護及び対歩行者事故時の歩行者頭部保護の安全性を高めた。乗員保護としては、衝突時のエネルギーを吸収するクラッシュボックス（**図 11**）をフレーム前端設定したほか、乗員拘束装置を最適化し、衝突時の胸変位量を低減した。併せて膝前のレイアウトも見直しており、衝突時の膝荷重を低減させた。歩行者頭部保護としては、キャブ前面をEA（Energy Absorption）構造とするため、パネルの形状やワイパの構造を工夫してクラッシュストロークを確保し、衝突時に歩行者頭部に与えるダメージを低減させた（**図 12**）。

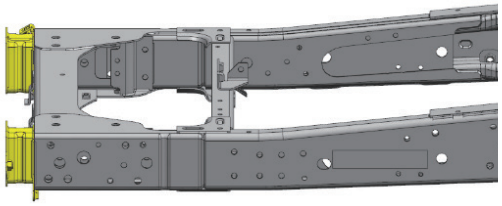


図 11　クラッシュボックス（黄色部）

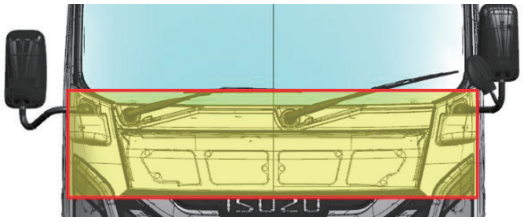


図 12　キャブ前面の EA 構造化

4.4　運転操作性

ドライビングポジションは従前モデルのエルフに対して大幅に改善した。ドライバーシートはヒップポイントを 10 mm 下げたほか、シートスライドピッチを 12 mm から 10 mm に細分化したことで、小柄な方から大柄な方まで、ペダル操作をしやすくした。併せてステアリングのチルト＆テレスコピックの調整範囲を拡大したことで、より幅広いドライバーの体格に合せたドライビングポジションに調整できるようにした。ステアリング径やペダルレイアウトも見直しており、より乗用車に近い感覚での運転を可能にした。ステアリング径は従前エルフの 410 mm から 382 mm に小径化し、操舵性を向上したほか、乗降性改善も図った。アクセルペダルはオルガン式から吊り下げ式にすることで、ペダル操作時の最適な足首角度を取れるようにし、ブレーキペダルはアクセルペダルとのペダル間段差が小さくなるよう配置した。**図 13** に、新型エルフミオ（だいだい色）と従前車（緑色）との比較を示す（①ドライバーシート、②ステアリング、③ペダルレイアウト）。最適なドライビングポジションを取りやすくすることで、運転操作性の向上だけでなく、ドライバーの疲労軽減を狙った。

なお、最小回転半径は 4.4 m と一般的な乗用車よりも小さくし、キャブオーバの強みでもある取り回しのよさを発揮させた。

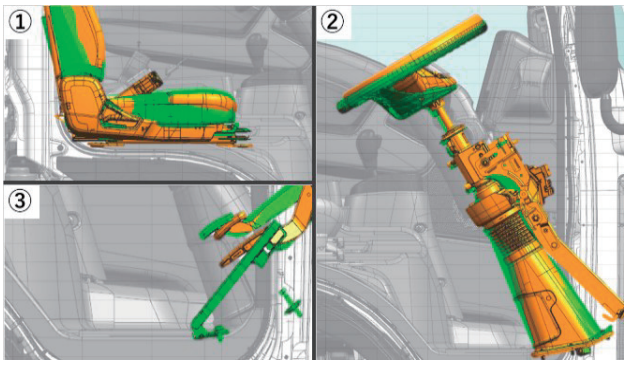


図 13　従前との比較

4.5　居住性・快適性

キャブは居住性・快適性ともに従前車比で向上した。室内空間をクラストップレベルの広さにしたうえで、収納容量を増やしたことで、居住性は従前のキャブに比べて大幅に良化した。室内空間の拡大については、**図 14** に示すように、キャブを骨格レベルで見直し各クリアランスを広げた。ヘッドクリアランスは前述したシートのヒップポイントを下げたうえで、天井高さを上げることで、従前キャブより 22 mm 広がった。前方クリアランスは、ピラー角を従前車よりも 8 °立たせることで、従前比 190 mm 広がった。タンブルフォーム角度も従前より 3.4 °立たせており、乗員頭部からルーフサイドまでの側方クリアランスを 61 mm 広げた。

快適性としては、小排気量エンジンの採用により、エンジン振動や室内の静粛性を向上させた。また、フロントガラスは UV（紫外線）／IR（赤外線）カットガラスを、ドアガラス及びバックライトガラスには UV カットガラスを採用しており、UV による肌への影響や、IR によるふく射熱を抑制し、ドライバーの負荷軽減を図った。

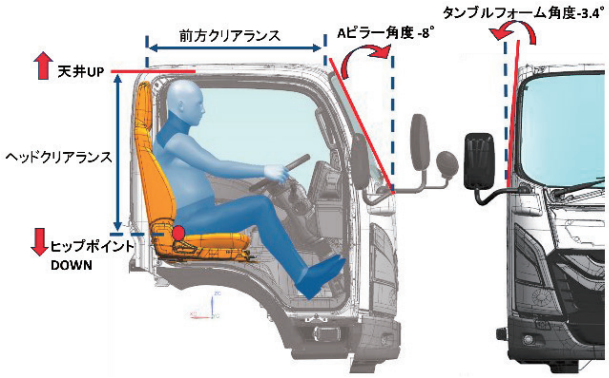


図 14　室内空間拡大

4.6 積載量・荷役性

積載量は 3 人乗りの車両で最大 1.30 t 確保した。床面地上高は 785 mm と低くめに抑えることで、荷役性を向上させた。(車型:NHR87AF － EC4LAAP)

電動ダンプ車型（**図 15**）も PTO を必要としない分車両重量を抑え、積載量は 1.00 t 確保した。



図 15　新型エルフミオ　電動ダンプ

5　商品展開

5.1 パワートレイン

エンジン:RZ4E（88 kW／320 N·m）
トランスミッション:6 速 AT
駆動方式:4X2

5.2 シャシ展開

ホイールベース:ショートホイールベース
タイヤ展開:以下 3 仕様を展開。(**図 16**)

① フルフラットローシングルタイヤ
② フルフラットローダブルタイヤ
③ フラットローダブルタイヤ（後輪小径タイヤ）

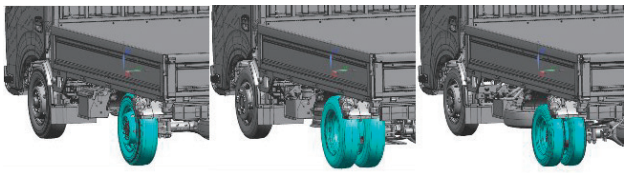


図 16　タイヤ展開（左から①、②、③）

5.3 キャブ展開

- シングルキャブ（2～3 人乗り）
- スペースキャブ（3 人乗り）
- ダブルキャブ（6 人乗り）

カラーバリエーションとしては新型エルフミオの専用色として幅広い層に親しんでいただけるよう「ペールブルー」(**図 17**) をオプション設定した。



図 17　ペールブルー

5.4 先進安全パッケージ

- BASIC Package（標準仕様）
- STANDARD Package（オプション仕様）

表 2　先進安全パッケージ

機能	BASIC	STANDARD
車線逸脱警報	●	●
ふらつき警報	●	●
先行車発進お知らせ機能	●	●
誤発進抑制機能	●	●
車間距離警報	●	●
プリクラッシュブレーキ（直進時）	●	●
ブラインドスポットモニター	-	●
プリクラッシュブレーキ（右左折時）	-	●

6　おわりに

新型エルフミオの開発は、国内向けとしては初めての中量貨物車（GVW1.7 t 超 3.5 t 以下）の開発でもあった。排出ガスや燃費をはじめとした各法規制についても固有の項目が多く、経験が少ない中での取組みとなったが、社内外含め多くの関係者に協力いただい

たことで、無事に完遂することができた。この場を借りて、本開発に関わっていただいた全ての方々へ感謝したい。

普通免許で運転できるという点に加え、環境性能や安全性能にも優れる車両に仕上がったことから、新型エルフミオは日本の物流課題に大きく貢献し、更には社会的に影響力のある存在となることを期待して、本稿の結びとしたい。

著　者



増子　智一



小林　舜

◇いすゞ歴史の一こま



初代エルフ（TLD/TL151A）（1960 年ごろ）

論文・報告

将来に向けた車室内空気質デザイン

Future Design of Cabin Air Quality

達　晃一*　Koichi Tatsu
林　則光**　Norimitsu Hayashi
津田　研一郎***　Kenichiro Tsuda

要　旨

これまで車室内空気質の改善は、内装部品から発生するVOCの低減として取り組まれてきた。これらは規制成分に対する対応であり、安全性の確保の意味合いが強い、一方で車室内環境は自動運転の技術進歩が加速する中、その使い勝手も変化しており、乗員に合せた快適と付加価値を持った空間の提供が必要であると考えている。将来を見据えて、新たな価値創造の可能性がある空気質の果たす役割について、空気質の指針と見える化の評価試験結果より、今後の将来展望の検討を行った。

Abstract

Until now, improvement of cabin air quality has been addressed by reducing VOCs emitted from interior components. These measures are intended to reduce the adverse effects on human health by addressing the regulated components. The usability of the vehicle interior environment is changing with the acceleration of technological advances such as automated driving, and it is necessary to provide a space with comfort and added value that is tailored to the needs of the passengers. In this report, we report on our investigation of the role of air quality that can contribute to the creation of new value, based on the basic investigation of visualization from the infection control measures we have taken so far, and with an eye to the future.

1　はじめに

これまで車室内空気質の改善は、内装部品から発生するVOC（揮発性有機化合物）の低減として取り組まれてきた。これらは規制成分への対応であり、健康への悪影響を低減する目的である。一方で自動車は、CASE（Connected Autonomous Shearing Electric）と呼ばれる4つの技術革新が100年に一度の大変革期と言われているように、車室内環境は自動運転などの技術進歩が加速する中、その使い勝手も変化しており、乗る人に合せた快適性と付加価値を持った空間の提供が必要であると考えている。特に公共交通においては、人口減少や就業者の減少による経済成長率の低下、老年人口の増加などにより赤字運行となっている路線が多くなっている。国土交通省は「2040年、道路の景色が変わる」[(1)]を公表し、将来像として通勤帰宅ラッシュが消滅、人・モノの移動が自由化・無人化として5つの姿を提示している。また東京都は新しい価値を創造し続ける場所として公共交通を選択し、高質な移動環境を確保するとしている[(2)]。本報ではCASEに対応した公共交通をパブリックスマートモビリティと呼ぶことにする。国土交通省の事業用自動車総合安全プラン2025[(3)]の中にも、COVID-19への感染対応が含まれた「新たな日常における安全・安心な輸送サービスの実現」として車室内環境の見える化を掲げており、自動車工業会大型車部会では、これに対応する活動を実施している。**図1**にCASEを見据えたパブリックスマートモビリティの将来像を示した。この中では、単なる移動手段ではなく人に密接に関わる医療や飲食など必要となる情報が共有される。車室内環境も個々のフィジカル及びメンタル状況に合せて最適化されると考えている。本報告では、これまで取り組んできた感染対策から見える化の基礎検討を行った内容をベースに将来を見据えて、新たな価値創造に寄与できる車室内空気質の果たす役割の検討内容を報告する。

*車両審査実験第二部　**法規・認証部　***㈱いすゞ中央研究所



図 1　CASE を見据えた将来像

2　検討内容

2.1　将来像の創出と課題抽出

CASE が普及した社会像を国土交通省が提案している 5 項目に沿って具体的なイメージの創出を行った。その項目について、下記①～⑤に示す。課題抽出は、これら 5 項目の将来イメージを創出したあとに検討を行った。

① 通勤･帰宅ラッシュが消滅
② 公園のような道路に人が溢れる
③ 人･モノの移動が自動化･無人化
④ 店舗（サービス）の移動でまちが時々刻々と変化
⑤「被災する道路」から「救援する道路」に

2.2　空調システムの電力消費量の試算

持続可能な自動車産業として重要な項目は **2.1 節**で述べた①～⑤のほかに、エネルギー効率の向上である。

動力の効率化はもちろんであるが、空調エネルギーの観点から外気を取り入れての換気は最小限に抑えることで有限なエネルギー効率を向上させることを意味している。特に EV（Electric Vehicle）にとってエアコンに消費するエネルギーのマネジメントは非常に重要となっている。そこで、空調システムの冷媒やコンデンサ、エバポレータ、膨張弁などをモデル化し、温熱環境のシミュレーションが可能である GT-SUITE のテンプレートを活用してバスのモデルを構築し、換気の有無による電力消費量の試算を行った。

試算の手順を以下に示す。

① バス車室内の空気の温度と湿度がエバポレータ内を通過し、冷やされた（加熱された）空気の温度、湿度を計算
② ①で計算した温度、湿度の空気を車室に流入させることでバス車室内の空気の温度、湿度を計算

なお、今回は電気ヒータを簡易的にモデル化し、4 台を単一のモデルとして計算した。

デフロスタのモデル化はしない。

また、試算時の条件は次のとおりとした。

- バス車室は一つの空間と定義し、特に分割や温度分布は無視
- 冷房時：大気温度 35 ℃、湿度 70 %、路面温度 50 ℃、アイドルと走行 40 km/h
- 暖房時:大気温度 0 ℃、アイドルと走行 50 km/h
- 車室には、①日射負荷、②外気負荷、③輻射、④外気導入換気の 4 つの熱負荷を考慮

熱負荷のうち、①日射負荷に関しては、ガラスを透過して車室内に到達する透過日射熱負荷（① -1）と、車の屋根等のパネルやガラス自体に吸収される吸収日射熱負荷（① -2）の 2 つに分類される。それぞれの負荷計算のためには車両の詳細パラメータが必要であるが、一部を文献値や暫定値で代用した。

2.3　空気質の快適性向上とその見える化

事業用自動車総合安全プラン 2025[(3)] に沿ってこれまで、公共交通における感染対策を実施してきた[(4)]。この内容はエアロゾルフィルタをクーラ吸い込み口に設置することで、既存車でも効果的に排出ガス成分や黄砂、花粉、飛沫核などのエアロゾル濃度を下げることができる[(4)]。空気浄化の効果を定量的に表示することは、効果を実感し安心を提供することになるため、非常に重要な技術である。エアロゾルフィルタは粒子を捕集するので、運行しているバスの中の粒子径と粒子数の計測（日本カノマックス製ハンドヘルドパーティクルカウンター Model 3889）を行った。路線バスはセンサを用いて、粒子、CO_2、温度、湿度の計測も行った。これらの計測には市販されているクラウド式の空気質センサ（POD2）と試作機（環境情報モニタリングシステムと呼ぶ）を用いた。条件は、**表 1** に示す。センサによる計測は路線バスと観光バスの 2 車種で実施した。観光バスは乗員が無人の状態で評価を実施した。観光バスに装着しているエアロゾルフィルタを**図 2** に、空気質センサを**図 3** に示す。

表 1　粒子測定条件

試験番号	1	2	3	4
種類	路線バス	路線バス	観光バス	観光バス
時間	5：00-9：00	16：00-20：00	−	−
冷房	○	○	○	○
換気扇	○	○	×	×
窓開け	×	○	×	×
エアロゾルフィルタ	×	×	×	○
乗員	○	○	×	×



図 2　エアロゾルフィルタ



図 3　空気質センサ

3　考察と結果

3.1　将来像と課題抽出

2.1 節で述べた①～⑤の項目についての将来像と課題抽出の検出を行った。以下に検討内容を示す。

① 通勤帰宅ラッシュが消滅

2019 年から蔓延した新型コロナウイルスにより、対面での活動が規制され、オンライン活用による遠隔での活動が可能となった。また大都市圏内から郊外への移住が促進されたことにより多様な地域間の移動にシフトすることにより大都市圏内の移動数が減ることを推定している。

② 公園のような道路に人が溢れる

働き方改革による通勤時間のシフトにより、通勤時間を余暇の時間に充てることができ外出の機会も増える。また遠隔で勤務が可能となるため、リフレッシュできる公園などを利用したオープンスペースの活用が増える。

③ 人・モノの移動が自動化・無人化

自動運転の普及によりマイカー所有のスタイルからシェアカーや公共交通が主要な交通手段となる。またショッピングは通販が主流となるため、無人物流が普及する。

④ 店舗（サービス）の移動でまちが時々刻々と変化

これまでの「行く」から「来る」サービスへのシフトが増大し、地方地域と大都市との差が縮小する方向となる。また、移動しながらのショッピングも新たな楽しみ方になる。病院設備も車両に搭載され、巡回診察を遠隔で可能とするため通院は限定的となり、通院の際も、スマートモビリティでは乗車とともに患者を特定し、病院との情報連携を円滑に行う。更に移動中は乗員の生体反応に関わるシグナルを非接触で計測し、快適に移動できるように車室内環境を個々に制御する。また住民票などの公的証書もモビリティ内での取扱いが可能となる。

⑤「被災する道路」から「救援する道路」に

災害発生時には、道路に敷設されたライフラインを活用することで速やかな復旧に貢献する。また自動運転を活用した救助活動が多くの人命を救う。ここには遠隔診療できる車両も投入され、遠隔での診療及び治療を可能とする。

上記①～⑤のように将来像を検討したが、流動的な技術要素が多く確定した未来像を提示することが難しいのが実情である。どのような形になっても、エネルギーロスを少なくし、快適な車室内を提供することで、安全安心を確保した環境を提供することは不変であると考え、課題を 5 項目に絞り込んだ。

① エネルギーマネジメントも考える：空調エネルギーの無駄を省く技術（省電費）
② 快適性・使い勝手の両立：嗜好環境、物流配達、小売りとの融合
③ 安全安心とその見える化：空気清浄と安心を見せる技術（指針策定）
④ 空気質のバリアフリー：有害物質低減、乗り物酔い低減、生体状況を把握する技術
⑤ 乗員・ほかへの情報発信：情報提供（公共交通選択理由）

3.2　空調システムの電力消費量の試算

空調システムの換気有無による電力消費量の試算を行うためのモデルを構築した。モデル概要を**図 4** に示す。空調システムの電力消費量の試算を行った結果を**表 2** に示す。

空調試験法ではエアコンをフル出力と定めているため、換気の有無で最終的な車室温度が異なる。そこで換気の有無で最終的な車室温度が同じになるように換気無しの場合の目標車室温度を調整した。結果に示すように冷房・暖房の結果、同じような車室温度になる場合での、換気有による消費電力を 100 %とした場合の換気無の消費電力は、冷房時は 56 %、暖房時（Heat Pump）は 54 %であった。

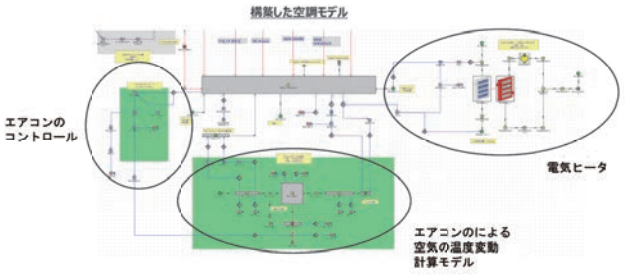


図 4　GT-SUITE による HVAC モデル

表 2　HVAC のエネルギー消費結果

	Cooling		Heating Heat Pump		Heating Heat pump ＋High Voltage Heater	
Ventilation（m^3/h）	800	0	800	0	800	0
Power（kWh） Consumption（%）	36 (100)	20 (56)	11 (100)	6.1 (54)	12 (100)	6.5 (53)
Cabin temperature（℃）	25	25	20	20	13	13
Out door temperature（℃）	35	←	0	←	-10	←
Humidity（%）	70	←	0	←	0	←
Operation	Max	25	Max	20	Max	13
Operation time（min）	180	←	150	←	←	←

3.3　空気質の快適性向上とその見える化

路線バスの運行における車室内の粒子測定結果を**図 5** に示す。この時の運行条件は**表 1** の試験番号 1 と 2 とした。試験番号 1 は 8 回の運行で乗車平均人数 34.1 人、試験番号 2 は 6 回の運行条件で乗車平均人数 28.8 人であった。粒径 3.0 μm までの粒子は車外の数値が高い傾向であるが、5.0 μm 以上は車内の粒子が高くなっている。乗客の持ち込み物である衣服や、乗車時の塵埃拡散などが原因と考えられる。粒径が大きくなると粒子数も少なることがわかる。今回の計測では、10^3～10^7 個 /m^3 のオーダーであった。

次に CO_2 濃度の推移を**図 6**（試験番号 1）に示す。窓閉めの条件のため、CO_2 は最も高い濃度で 1,838 ppm であった。また乗車とともに濃度が上昇しており、乗車人数も反映された結果となっている。粒子については CO_2 濃度よりも応答が早い傾向となっている。これは乗車に伴うじんあい（塵埃）の拡散が原因と推測する。

観光バスにエアロゾルフィルタを設置して、車室内の粒子濃度の評価結果を**図 7** に示す。初期の車室内外の 0.3 μm の粒子数は約 3 × 10^7 個 /m^3 であったので路線バスの評価時と比較して若干数値は低い状況であった。粒子の数値は、その日の天候や工場の操業状態によって大きく変化するため、その時の周辺外気の状況を併せて把握することが重要である。エアコンを作動させると（**図 7** の 0.60 Hr）車室内の粒子が捕集されるため、車室内の粒子数が顕著に減少することがわかる。これより算出した相当換気回数は、目標値 [5] である相当換気回数を満足していることを確認することができた。これらの結果より、車室内環境の見える化に使用するインデックスとして粒子数は有効と考えられる。また、CO_2 も乗車数の把握に有効であることがわかった。

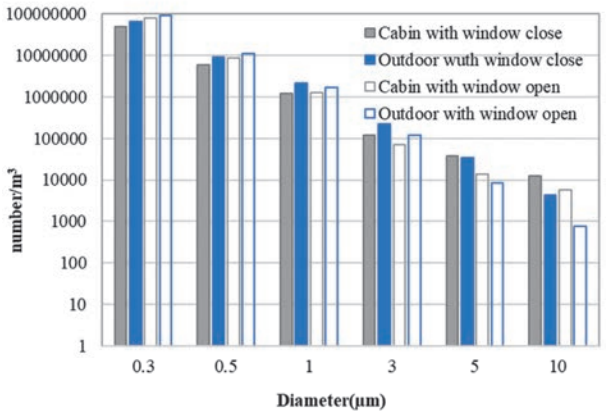


図 5　車室内の粒子測定結果

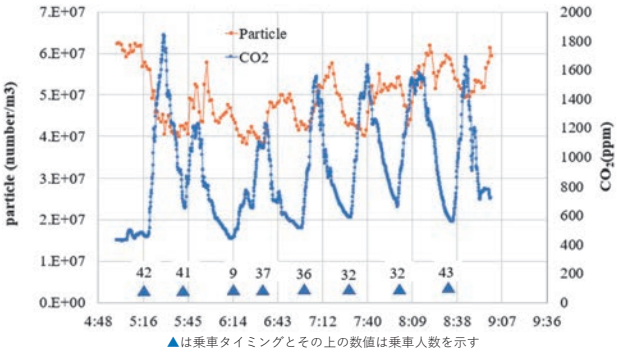


図 6　車室内の CO2 と粒子測定結果

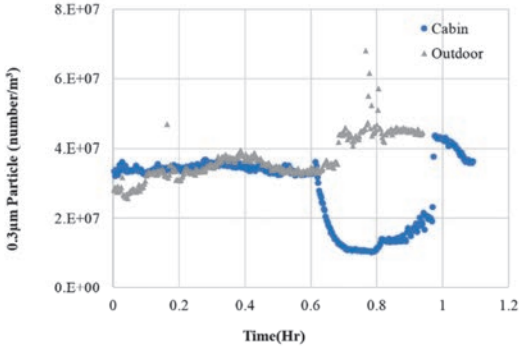


図 7　エアロゾルフィルタの効果

4　まとめ

① 「2040年､道路の景色が変わる」[1]のシナリオを参考に、公共交通における将来像洞察より以下5項目の課題を抽出した。今後は全国アンケート調査や事業者と情報共有することにより、多角的な検討を進め、より社会に求められている課題に絞り込みを行う計画である。
- エネルギーマネジメントも考える：空調エネルギーの無駄を省く技術（省電費）
- 快適性・使い勝手の両立：嗜好環境、物流配達、小売りとの融合
- 安全安心とその見える化：空気清浄と安心を見せる技術（指針策定）
- 空気質のバリアフリー：有害物質低減、乗り物酔い低減、生体状況を把握する技術
- 乗員・ほかへの情報発信：情報提供（公共交通選択理由）

② 空調システムの電力消費量の試算モデルを構築し、条件により換気無では44 %から47 %の消費電力を低減させることができることがわかった。

③ 空気質の快適性向上とその見える化の検討より、実運用しているバスの中の粒子、二酸化炭素濃度の実測を行った。この結果、粒径5 μm以上の粒子は車室内の数値が高い傾向であった。二酸化炭素濃度は、乗員の乗降に合せて濃度が上昇下降するため混雑状況などの把握に活用できることがわかった。乗客乗り込みと同時に粒数が上昇するため、二酸化炭素濃度より応答が早いことがわかった。

④ 観光バスにエアロゾルフィルタを設置し、粒子濃度の推移を確認した結果、粒子濃度は顕著に低減することができた。これにより屋外の粒子濃度を同時に表示することで、車室内空気質が清浄されている様を表現することができると考えている。

5　おわりに

本研究の結果より、CASEが普及した社会像を検討し、課題抽出を行ったが、不確定要素が多いため、今後は、メーカー、事業者、利用者との三位一体開発が重要と考える。この中で車室内環境の果たす役割は普遍的であると考え、感染対策やその他空気質について検討を行った。空気は目に見えないため、不特定多数が利用する公共交通における安心は重要である。本研究ではエアロゾルフィルタを実例として粒子量の実態把握を行うことで、浮遊粒子の清浄度は表現の一手法として有効であることを示した。車室内だけでなく、屋外の空気質計測を実施することで沿道の環境把握にも貢献することが可能となる。これら情報をクラウドに格納し、リアルタイムかつ遠隔でモニタすることも可能である。今後は、においや温熱環境も視野に最適な環境を提供できるように検討を進める計画である。

本文献は、2023年自動車技術会秋季大会要旨集に掲載された論文を加筆修正のうえ報告するものである。

参考文献

(1) 国土交通省:2040年、道路の景色が変わる
(2) 東京都都市整備局：東京の地域公共交通 toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/bunyabetsu/kotsu_butsuryu/
(3) 国土交通省：事業用自動車総合安全プラン2025 https://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/news/anzenplan2025.html
(4) 達 晃一, 篠原 直秀, 金 勲, 鍵 直樹, 坂口 淳, 飯田 明由, 山内 康, 安原 幸生, 坪倉 誠, 内藤 航：公共交通機関におけるエアロゾル挙動とウイルスの対策手法検討，自動車技術会論文集，52巻，5号(2021)，P.1013-1020
(5) 達 晃一，篠原 直秀，鍵 直樹，KIM Hoon，坂口 淳，高見 健人，内藤 航：公共交通機関のエアロゾル感染リスクとエアロゾルフィルタによる対策効果，室内環境学会学術大会講演要旨集，(2021)，p.262-263

著　者


達　晃一


林　則光


津田　研一郎

篠原　直秀　産業技術総合研究所
坂口　淳　新潟県立大学
金　勲　国立保健医療科学院
徳村　雅弘　静岡県立大学
長尾　祥大　エスペック㈱
臼井　信介　㈱カネカテクノリサーチ
栗原　昇　産業技術総合研究所
岩井　彩　産業技術総合研究所
後藤　禎仁　東洋紡エムシー㈱
鍵　直樹　東京工業大学
久野　稔　ジーエルサイエンス㈱
内藤　航　産業技術総合研究所

論文・報告

リーン NOx トラップの モデルベース開発に関する研究（第 1 報）

Study on Model-Based Development for Lean NOx Trap (First Report)

大堀　鉄平*　猪股　浩典**　石川　直也*　小澤　恒*　板垣　裕*
Teppei Oohori　Hironori Inomata　Naoya Ishikawa　Hisashi Ozawa　Yutaka Itagaki

要　旨

ディーゼル排出ガスの NOx 浄化装置の 1 つである LNT のモデルベース開発を目的として、LNT 触媒の物理モデルを構築した。本報では、LNT 触媒モデルのうち、LNT 再生時に進行する酸化還元反応の系統的なモデリング手法に関する検討を紹介する。

Abstract

For Model-Based Development of Lean NOx Trap (LNT), which is one of the NOx purification devices for diesel exhaust gas, we developed the LNT catalyst model. In this report, we introduce a systematic modeling method for the redox reactions during LNT regeneration.

1　はじめに

温室効果ガスの排出削減や大気環境の改善を目的としたディーゼル排出ガスの規制強化が世界的に進められており、商用車分野ではその対応に向けて、これまで以上に高い環境性能のディーゼルエンジンと排出ガス後処理装置の研究開発が進められている。

排出ガス後処理装置においては、規制対象の一つである NOx の浄化技術として尿素 SCR (Selective Catalytic Reduction) や LNT（リーン NOx トラップ）といった高度な NOx 浄化性能を発揮するシステムが実用化されてきた。このうち、LNT は 1990 年代にトヨタ自動車から発表されて以来、乗用車や小型商用車のディーゼル向けを中心に精力的な研究が行われ、実用化されている [(1)(2)]。

一般的に、LNT は**図 1** に示すようにディーゼル後処理装置内で CSF（PM 捕集フィルタ）の上流に設置され、ディーゼル排出ガス中の NOx、CO、及び炭化水素類の浄化機能を担っている。LNT 触媒は貴金属、NOx 吸蔵材、及び OSM（酸素吸蔵材）などから構成され、リーン雰囲気（空気過剰率 λ >1.0）の排出ガスに含まれる CO や炭化水素類を酸化により浄化しつつ、吸着若しくは硝酸塩として触媒に吸蔵することで排出ガスの NOx を除去する。この際、LNT に吸蔵できる NOx 量には限界があるため一定期間ごとに未燃燃料を排気に供給する、いわゆるリッチスパイク（λ <1.0）により吸蔵した NOx を無害な N_2 に還元しつつ、LNT の NOx 吸蔵能力を回復させている [(3)(4)]。本報ではこの操作を LNT 再生と記載する。

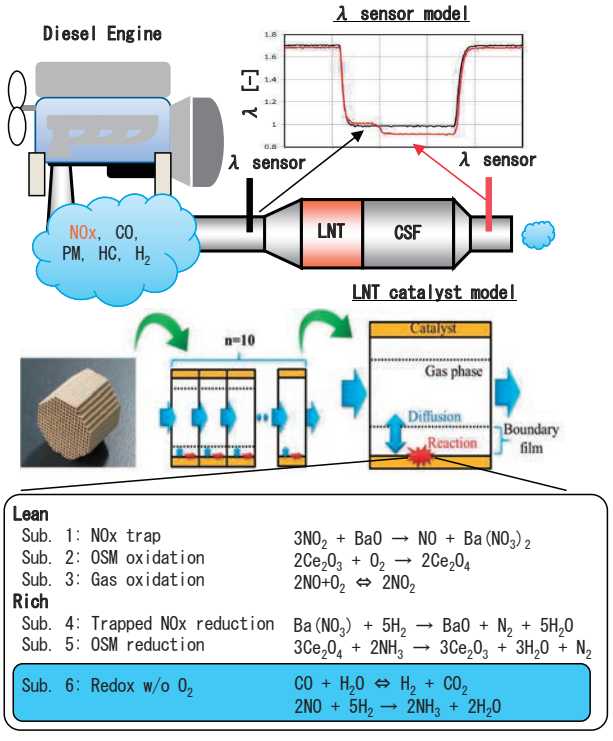


図 1　LNT のモデルベース開発環境の構成要素

LNT の問題点として、高温での NOx 浄化性能や LNT 再生での燃料消費を挙げることができるが、近年では LNT と尿素 SCR を組合せることで性能補完した後処理装置や LNT 再生での燃料消費量を最適化する制御が提案されている。またそれと同時に、その開

*㈱いすゞ中央研究所　　**エンジン装置設計部

発には高精度なLNTの物理モデル（以下、「LNTモデル」と称す）を使用したMBD（モデルベース開発）が活用されている[(5)(6)]。

LNTモデルについては、これまでに多くの研究がなされてきた[(5)(7)-(12)]。LNTモデルは、主に熱伝達・ガス拡散・触媒反応に関わるエネルギー収支及び物質収支を解く1次元モデルであることや30以上の反応を含む極めて複雑なモデルであることを特徴としている。このうち、LNTモデルの複雑化の主な原因として、LNT触媒が機能の異なる複数の材料から構成されること、関与するガス種の多いこと、及びリーンとリッチの両雰囲気の反応を考慮する必要のあることが挙げられる。更に、今後はNOxの吸蔵や浄化予測のみならず、世界的な規制強化が想定されるN_2OやNH_3の副生成量の予測機能もLNTモデルに求められつつある。

そこで我々はLNTシステムのMBD環境の構築を目的として、多成分の排出ガスを予測可能なLNTモデルやλセンサモデルを開発した。また、この過程で複雑に絡み合った反応を系統的にモデル化する手法についても検討を重ねた。本報では、LNTのMBD環境の構築に関する検討の第一報として、LNTモデルの反応のおよそ半数を占めるLNT再生時の酸化還元反応についての系統的なモデル構築手法を紹介する。

2　実験及びシミュレーション方法

LNT再生時に進行する酸化還元反応を触媒評価システムで評価し、その結果からLNTモデルの構築を実施した。

2.1 供試触媒と試験条件

供試触媒として、貴金属、NOx吸蔵材、及びOSMを組成とするLNT触媒を400 cpsiのコージェライトハニカムに担持し、ハニカムを径21.6 mm、長さ20 mmに成形したのちに500 ℃の電気炉で10時間の熱処理を施した試験片を用いた。

触媒の反応性評価には触媒評価システム(CATA5000 ; ベスト測器社製) を使用し、CO、NH_3、N_2O、NO、NO_2、及びH_2OをFT-IR (Bex-1000FT)で、THC、O_2、及びCO_2を排出ガス分析計 (Bex530M)で、そしてH_2を質量分析計 (Bex-1001H-MI) にてそれぞれの濃度を計測した。試験は500 ℃で触媒を十分にH_2還元したのちに、流通ガス (SV = 97.5 kh^{-1}、10 % CO_2、10 % H_2O、N_2 balance) に対して、**表1**に示す16通りのガスを加え、500 ℃から100 ℃までのステップ降温を行い、各ステップの定常状態におけるデータを評価値とした。この際の各ガスの濃度は、エンジン実機での試験においてLNT再生時に観察されるガス濃度を参考に設定した。SVは次の式で定義した。

$$SV\,[h^{-1}] = V_{sg} \,/\, V_{cat}$$

ここで、V_{sg}は模擬排出ガス流量 [L/h]、V_{cat}は触媒容量 [L] である。また、含窒素ガスの収支計算から、反応で生成したと推定されるN_2濃度を算出した。

表1　触媒評価システムにおける触媒の評価条件

No.	Test name	H_2 (ppm)	NH_3 (ppm)	CO (ppm)	C_3H_6 (ppmC)	N_2O (ppm)	NO (ppm)	NO_2 (ppm)
1	H_2	5000	0	0	0	0	0	0
2	NH_3	0	1500					
3	CO		0	5000				
4	C_3H_6			0	1000			
5	N_2O+H_2	5000	0	0	0	200	0	0
6	N_2O+NH_3	0	1500					
7	N_2O+CO		0	5000				
8	$N_2O+C_3H_6$			0	1000			
9	$NO+H_2$	5000	0	0	0	0	1000	0
10	$NO+NH_3$	0	1500					
11	NO+CO		0	5000				
12	$NO+C_3H_6$			0	1000			
13	NO_2+H_2	5000	0	0	0	0	0	500
14	NO_2+NH_3	0	1500					
15	NO_2+CO		0	5000				
16	NO_2+C3H_6			0	1000			

2.2 モデリング手法

Matlab･Simulink（MathWorks社製）で記述された1DのLNTモデルを作成した。過去に検討した1Dの触媒モデル[(13)]をひな形として、その反応モデルをLNT触媒に対応するよう変更した。LNTモデルに含まれる反応の速度定数は、最適化ツール（modeFRONTIER ;ESTECO社製）による遺伝的アルゴリズム（MOGA Ⅱ）により同定した。実験結果に対するLNTモデルでのシミュレーション結果の差分を目的関数とし、目的関数が最小になるように試行計算を行うことで反応の速度定数を同定した。

3　実験結果と反応モデルの構築

3.1 LNT触媒上の反応分類

LNT触媒では多くの反応が同時に進行するため、実験条件を工夫するなどして、それら一つ一つの反応を切分けて観察し、反応の速度定数を同定する必要がある。そこでまず、反応が進行する雰囲気（リーン･リッチ）、及び関与する触媒成分により**図1**に示す6つに分類した。リーン雰囲気ではNOx吸蔵(Sub.1)、OSM酸化(Sub.2)、そのほかの酸化反応(Sub.3)、また、リッチ雰囲気では吸蔵したNOxの還元(Sub.4)、OSM還元(Sub.5)、及びそのほかの酸化還元反応(Sub.6)である。

次に、これらの 6 つの反応群を切分けて観察する方法を検討した。まず、無酸素雰囲気では反応に O_2 の必要な Sub.1～3 は進行せず、また、LNT を事前に高温で H_2 還元することで、Sub.4、Sub.5 の反応は終結するため、**図 1** の水色の枠内に示した Sub.6（以下、「リッチ雰囲気の酸化還元反応」と称す）のみを切分けて観察できると考えた。

3.2 リッチ雰囲気の酸化還元反応の反応性試験

実際の LNT 再生ではさまざまな化学種が生成・分解する複雑な反応過程であるが、本報ではリッチ雰囲気の酸化還元反応に関与するガス種として N_2、CO_2、H_2O、H_2、CO、C_3H_6、NH_3、NO、NO_2、及び N_2O の 10 種を対象とした試験を実施した。

まず、LNT 再生において還元ガスとして作用する H_2、NH_3、CO、及び C_3H_6 を LNT 触媒に流通する、**表 1** の No.1～4 の試験を実施した。その結果を**図 2** に示す。**図 2a** の H_2 流通試験では、逆シフト反応 (R1r) による CO 生成、**図 2b** の NH_3 流通試験では NH_3 分解 (R3) と逆シフト反応 (R1r) の同時進行による H_2 と CO の生成、**図 2c** の CO 流通試験では水性ガスシフト (R1) による H_2 生成、及び**図 2d** の C_3H_6 流通試験では水蒸気改質 (R2) と水性ガスシフト (R1) の同時進行による CO と H_2 の生成が起きていると推定した。

$$CO + H_2O \Leftrightarrow H_2 + CO_2 \qquad (R1、R1r)$$

$$C_3H_6 + 3H_2O \rightarrow 3CO + 6H_2 \qquad (R2)$$

$$2NH_3 \rightarrow 3H_2 + N_2 \qquad (R3)$$

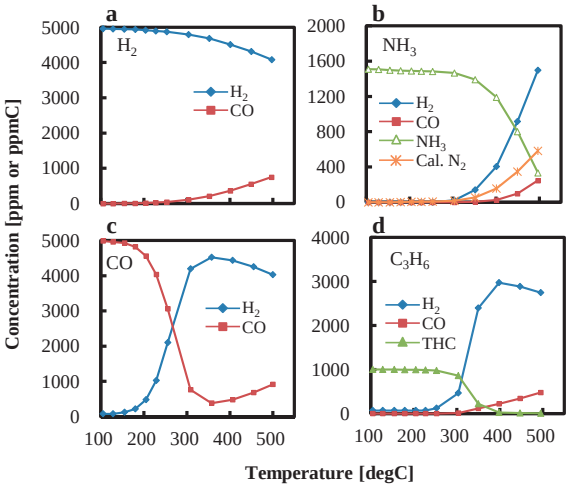


図 2　試験 No.1～4 の結果

次に、NO、NO_2、及び N_2O を酸化ガスとみなし、H_2、CO、C_3H_6、及び NH_3 の 4 種の還元ガスとの反応性試験である、**表 1** の No.5～16 の結果を**図 3** に示す。**図 3a～d** に示す N_2O 還元試験では、50 % 転化温度 (T_{50}) が、H_2 で 230 ℃、NH_3 で 170 ℃、CO で 280 ℃、及び C_3H_6 で 250 ℃といずれも高い N_2O 還元活性を示した。**図 3e～h** に示す NO 還元試験では、NO から N_2O、NH_3、及び N_2 を生成した。H_2 の場合（**図 3e**）では、100 ℃で全量の NO が還元されており、特に高活性であった。**図 3i～l** に示す NO_2 還元試験では、NO_2 から NO、N_2O、NH_3、及び N_2 をそれぞれ生成した。H_2 や CO の場合（**図 3i**、**図 3j**）では、100 ℃で全量の NO_2 が還元されており、特に高活性であった。

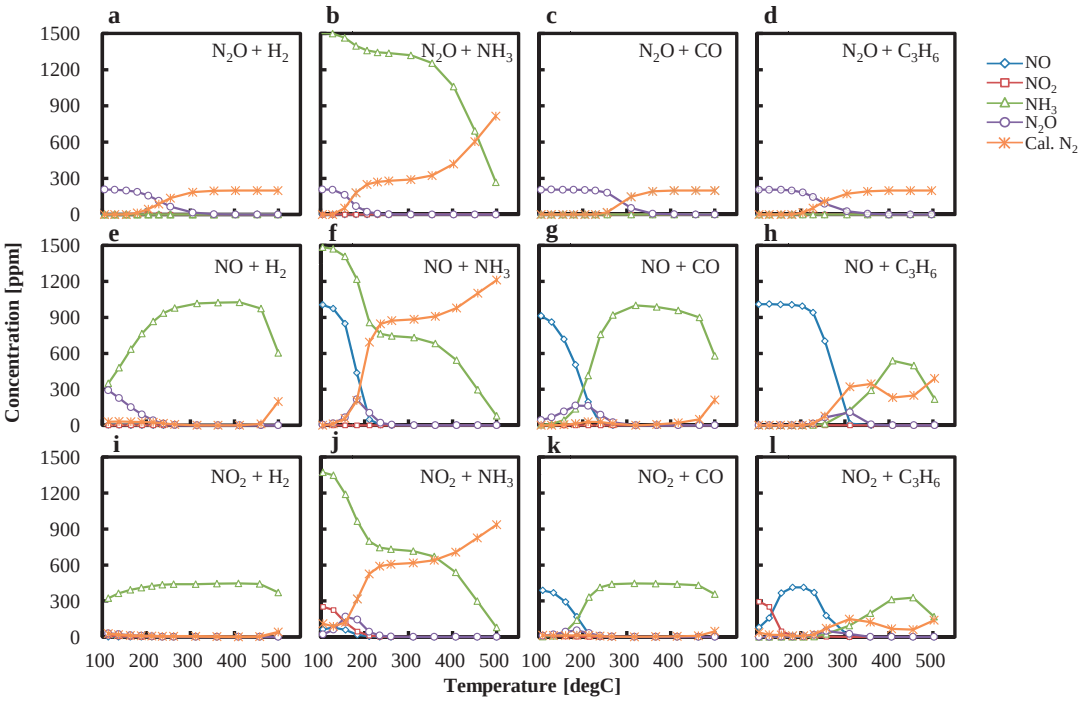


図 3　試験 No.5～16 の結果

以上の結果から、水性ガスシフト (R1) や水蒸気改質 (R2) によって還元ガス種が相互変換すること、NOx 還元反応では複数の生成物を生じる反応が同時進行することがわかった。更に、複数の反応が連続して進行する逐次反応なども想定された。**3.1 節**で LNT での反応を 6 つに分類し、その一つであるリッチ雰囲気の酸化還元反応を切分けたにも関わらず、複雑な反応が観察されており、これ以上に反応を実験的に切分けることは困難であると考えた。そこで次に、ここまでに得られた実験結果からの反応モデルの構築を試みた。

3.3 積み上げ法による LNT モデルの構築

複雑に絡み合った反応群をモデル化するにあたり、まずはリッチ雰囲気の酸化還元反応を整理し、全体像を把握することを目的として、Redox matrix を作成した（**表 2**）。Redox matrix は、酸化ガス種、還元ガス種、及び生成する含窒素ガス種の組合せとして考えられるすべてのパターンの 33 反応を含み、それぞれの反応を R1-49 とした。例えば、R11 は反応ガスが H_2 と N_2O、生成ガスが N_2 である以下の反応に対応する。

$$N_2O + H_2 \rightarrow N_2 + H_2O \qquad (R11)$$

表 2　Redox matrix による LNT 再生過程の反応経路の整理

Oxidants	Reductants				Products
	H_2	NH_3	CO	C_3H_6	
N_2O	R11	R21	R31	R41	N_2
	R12		R32	R42	NH_3
NO	R13	R23	R33	R43	N_2O
	R14	R24	R34	R44	N_2
	R15		R35	R45	NH_3
NO_2	R16	R26	R36	R46	NO
	R17	R27	R37	R47	N_2O
	R18	R28	R38	R48	N_2
	R19		R39	R49	NH_3

次に、Redox matrix の 33 反応について、実際に観察される反応を選択し、その反応の速度定数を同定するために、**表 3** に示す手順に従った反応モデルの構築を試みた。この手順では、単純な反応のみが進行する実験結果からその反応の速度定数を同定し、次第に複雑で解釈の難しい実験結果に対しても実験とシミュレーションの結果が一致するように、遺伝的アルゴリズムを用いてステップごとに反応を組み込む方法である。以下本報では“積み上げ法”と記載する。

表 3　積み上げ法による反応経路と速度定数の決定手順

Step	Test Name	Possible reaction pathways	Identified reaction	Objective function
1	CO	R1	R1	H_2, CO
2	C_3H_6	R1,2	R2	H_2, CO, THC
3	NH_3	R1,3	R3	H_2, NH_3
4	NH_3+N_2O	R1,3,21	R21	N_2O, NH_3
5	H_2+N_2O	R1,3,11,12,21	R11	N_2O
6	CO+N_2O	R1,2,11,31,32	non	-
7	C_3H_6+N_2O	R1,2,11,41,42	R41	N_2O
8	NH_3+NO	R1,3,21,23,24	R23	NO, N_2O, NH_3
9	H_2+NO	R1,3,11,13,14,15,21,23	R13,15	NO, N_2O, NH_3
10	CO+NO	R1,3,11,13,15,21,23,33,34,35	non	-
11	C_3H_6+NO	R1,2,3,11,13,15,21,23,41,43,44,45	non	-
12	NH_3+NO_2	R1,3,21,23,26,27,28	R26,27	NO_2, NO,N_2O, NH_3
13	H_2+NO_2	R1,3,11,13,14,15,16,17,18,19,21,23,26,27	R16,19	NO_2, NO, N_2O, NH_3
14	CO+NO_2	R1,3,11,13,15,16,19,21,23,26,27,36,37,38,39	R36	NO_2, NO, N_2O, NH_3
15	C_3H_6+NO_2	R1,2,3,11,13,15,16,19,21,23,26,27,36,41,46,47,48,49	R46	NO_2, NO, N_2O, NH_3

3.3.1 還元ガスの変換反応の同定

まず、**図 2** の実験データから水性ガスシフト (R1)、水蒸気改質 (R2)、及び NH_3 分解 (R3) の速度定数を同定した。**表 3** の Step1 に示すように**図 2c** の CO 流通試験の結果から、水性ガスシフト (R1) の速度定数を同定した。速度定数の同定では、CO と H_2 濃度の実験結果とシミュレーションの差分を目的関数とし、遺伝的アルゴリズムにより目的関数の最小化する頻度因子と活性化エネルギーを求めた。次に、**表 3** の Step2 では**図 2d** の C_3H_6 流通試験の結果から水蒸気改質 (R2)、Step3 では**図 2b** の NH_3 流通試験の結果から NH_3 分解 (R3) をそれぞれ同定した。

3.3.2 N_2O 還元反応の同定

表 3 の Step4～7 で N_2O 還元反応を同定した。Step4 では**図 3b** の N_2O ＋ NH_3 試験により NH_3 による N_2O 還元反応 (R21) の速度定数を同定した。Step5 の H_2 による N_2O 還元反応 (R11、R12) に関しては、**図 3a** の N_2O ＋ H_2 試験において NH_3 生成 (R12) は観察されなかったことから、R11 の速度定数のみを同定した。Step6 では CO による N_2O 還元反応 (R31、R32) を考慮せずとも、**図 3c** の N_2O ＋ CO 試験結果にシミュレーション結果がよく一致した。シミュレーションでは水性ガスシフト (R1) によって生成した H_2 によって N_2O 還元 (R11) が進行しており、CO による N_2O 還元反応 (R31、R32) は R11 に対して無視できるほど活性が低いと考えた。Step7 では**図 3d** の N_2O ＋ C_3H_6 流通試験において、NH_3 生成 (R42) は観察されなかったことから、N_2O 還元による N_2 生成 (R41) のみを同定した。

3.3.3 NO 還元反応の同定

表 3 の Step8～11 で NO 還元反応を同定した。Step8 では、**図 3f** の NO ＋ NH_3 試験において N_2O が生成していることから、まず、N_2O 生成反応 (R23) を同定したところ、実験とシミュレーションの結果がよく一致した。シミュレーションの結果では、200 ℃前後では NO と NH_3 の反応による N_2O 生成 (R23) が、それ以上の温度では R23 で生成した N_2O が更に NH_3 と反応して N_2 生成 (R21) していた。以上の結果から NO と NH_3 の反応による N_2 生成反応 (R24) の寄与は無視できると考えた。Step9 では、**図 3e** の NO ＋ H_2 試験の生成物として N_2O と NH_3 が生成した一方で、500 ℃付近の NH_3 分解 (R3) に由来する N_2 以外は観察されなかったことから N_2 生成 (R14) は無視し、N_2O 生成 (R13) と NH_3 生成 (R15) を同定した。Step10 及び Step11 ではそれぞれ R33～35 及び R43～45 を考慮せずとも実験とシミュレーションの結果がよく一致した。この際のシミュレーション結果では、CO や C_3H_6 が NO を直接的に還元するのではなく、水性ガスシフト (R1) や水蒸気改質 (R2) によって生じた H_2 が NO を還元していた。

3.3.4 NO_2 還元反応の同定

表 3 の Step12～15 で NO_2 還元反応を同定した。**図 3** の結果から、いずれの還元ガスの場合でも NO_2 と NO 還元試験結果（**図 3** の **e** と **i**、**f** と **j**、**g** と **k**、及び **h** との傾向が一致していることから、NO_2 還元の主な生成物は NO(R16、R26、R36、及び R46）であると推測し、速度定数を同定した。更に、Step12 では NH_3 による NO_2 還元での N_2O 生成 (R27) を、Step13 では H_2 による NO_2 還元での NH_3 生成 (R19) をモデルに組み込み、速度定数を同定した。

表 4　LNT 再生過程（サブモデル 6）の反応経路と速度式

No.	Reaction	Reaction formula	Rate expression
R1	Water gas shift	$CO + H_2O \Leftrightarrow H_2 + CO_2$	$r_1 = k_1 (C_{CO}^{\beta 1a} C_{H2O}^{\beta 1b} - C_{CO2} C_{H2} / k_{eq1}) / (1+K_1 C_{CO})$
R2	Steam reforming	$C_3H_6 + 3H_2O \rightarrow 3CO + 6H_2$	$r_2 = k_2 C_{C3H6}^{\beta 2a} C_{H2O}^{\beta 2b} / (1+K_2 C_{C3H6})$
R3	NH_3 decomposition	$2NH_3 \rightarrow 3H_2 + N_2$	$r_3 = k_3 C_{NH3} / (1+K_3 C_{H2})$
R11	N_2O red. to N_2 by H_2	$N_2O + H_2 \rightarrow N_2 + H_2O$	$r_{11} = k_{11} C_{N2O} C_{H2}$
R13	NO red. to N_2O by H_2	$2NO + H_2 \rightarrow N_2O + H_2O$	$r_{13} = k_{13} C_{NO} C_{H2}$
R15	NO red. to NH_3 by H_2	$2NO + 5H_2 \rightarrow 2NH_3 + 2H_2O$	$r_{15} = k_{15} C_{NO} C_{H2}$
R16	NO_2 red. to NO by H_2	$NO_2 + H_2 \rightarrow NO + H_2O$	$r_{16} = k_{16} C_{NO2} C_{H2}$
R19	NO_2 red. to NH_3 by H_2	$2NO_2 + 7H_2 \rightarrow 2NH_3 + 4H_2O$	$r_{19} = k_{19} C_{NO2} C_{H2}$
R21	N_2O red. to N_2 by NH_3	$3N_2O + 2NH_3 \rightarrow 4N_2 + 3H_2O$	$r_{21} = k_{21} C_{N2O} C_{NH3}$
R23	NO red. to N_2O by NH_3	$6NO + 2NH_3 \rightarrow 3N_2O + N_2 + 3H_2O$	$r_{23} = k_{23} C_{NO} C_{NH3} / (1+K_{23} C_{H2})$
R26	NO_2 red. to NO by NH_3	$5NO_2 + 2NH_3 \rightarrow 7NO + 3H_2O$	$r_{26} = k_{26} C_{NO2} C_{NH3}$
R27	NO_2 red. to N_2O by NH_3	$2NO_2 + 2NH_3 \rightarrow N_2O + N_2 + 3H_2O$	$r_{27} = k_{27} C_{NO2} C_{NH3} / (1+K_{27} C_{H2})$
R36	NO_2 red. to NO by CO	$NO_2 + CO \rightarrow NO + CO_2$	$r_{36} = k_{36} C_{NO2} C_{CO}$
R41	N_2O red. to N_2 by C_3H_6	$9N_2O + C_3H_6 \rightarrow 9N_2 + 3CO_2 + 3H_2O$	$r_{41} = k_{41} C_{N2O} C_{C3H6}$
R46	NO_2 red. to NO by C_3H_6	$9NO_2 + C_3H_6 \rightarrow 9NO + 3CO_2 + 3H_2O$	$r_{46} = k_{46} C_{NO2} C_{C3H6}$

$k_i = A_i \mathrm{EXP}(-E_i/RT)$　　C_i : gas i concentration　　E_i : activation energy　　K_{eq}: equilibrium constant
$K_{eq} = \mathrm{EXP}(-\Delta G/RT)$　　k_i : reaction rate constant　　T : temperature　　ΔG : Gibbs free energy
$= \mathrm{EXP}(-(\Delta H - T\Delta S)/RT)$　　A_i : frequency factor　　R : gas constant　　ΔH : Enthalpy of reaction
r_i : reaction rate　　β_i : reaction order　　K_i : inhibition constant　　ΔS : Entropy of reaction

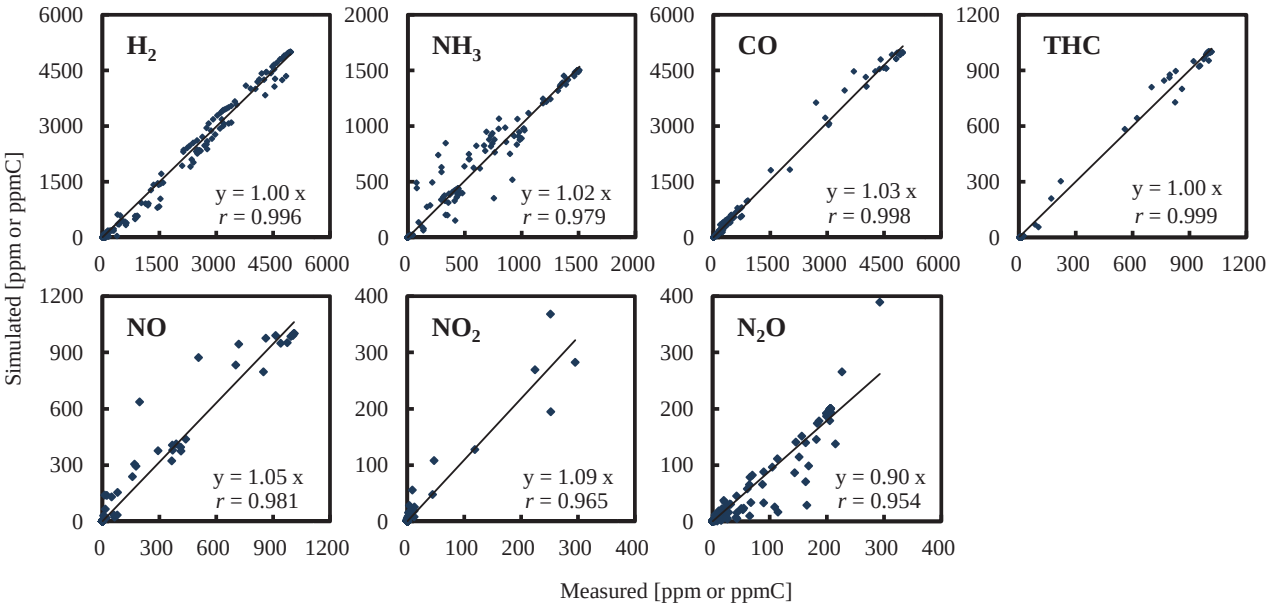


図4　排出ガス成分に対する実験値とシミュレーション結果の相関分析

3.3.5　実験に対するシミュレーションの精度確認

以上のような**表3**の15Stepに及ぶ積み上げ法により、15反応を含む反応モデルを構築した（**表4**）。この反応モデルのシミュレーション精度を確認するため、**表1**の16実験条件に対する実験とシミュレーションの相関解析をした。その結果を**図4**に示す。7種のガスのいずれにおいても高い相関係数を示し、かつ、近似直線の傾きが1.0 ± 10 %の範囲であったことから、高精度の反応モデルを構築できたと言える。一方、NOxやN_2Oについては、一部に予測精度の低いプロットが散見され、更なる改良の余地が残されていると考えた。

4　考察

4.1　積み上げ法の長所と課題

システム開発の高品質化・短納期化・低コスト化を目的としたMBDに使用する物理モデルには、精度ばかりでなく運用コストや汎用性も重要な要素となる。積み上げ法は、複雑な反応系においても模擬ガス試験データと最適化ツールのみで高精度なLNTモデルの構築ができるばかりでなく、緻密な分光学法や同位体ガスを用いた詳細解析などと比較しても低コストかつ短期間で実施できる。また、組成や特性が大きく異なるLNT[14]や三元触媒の反応モデル構築にも本報の積み上げ法の手順を応用でき、高い汎用性があると考えた。更に、模擬ガス試験や最適化過程の自由度が高く、今後より一層の改良も期待できる。このように、積み上げ法は、実用的で優れたMBD向けの触媒モデル構築手法だと言える。

一方で、積み上げ法の課題として、各ステップの誤差が次のステップに伝播し、終盤にかけて蓄積する点が挙げられる。この対策は今後の課題であるが、本検討で示したように、Redox matrixを活用して各ステップで適切な反応経路を選択しつつ、各反応の速度定数を遺伝的アルゴリズムにより正確に同定することで実用精度を確保できると考える。

4.2　LNTモデルについての考察

本検討で構築したLNTモデルの反応スキームを**図5**に示す。LNT再生においてエンジンから供給される未燃燃料の大部分はCOと炭化水素類である。本検討の解析から、COやC_3H_6は、直接的というよりは、水性ガスシフト(R1)や水蒸気改質(R2)を介して生成したH_2によりNOxやN_2Oの還元に寄与する傾向があった。H_2は、LNT再生において高活性で最も重要な還元ガスであるとみなされており[15]、本検討においてもNOxやN_2Oの還元に対してH_2は高い活性を示した。NH_3は、エンジンから直接的に排出されることはないが、H_2によるNO還元反応(R15)により広い温度域で生成し、H_2と同様に、NOxやN_2Oの還元(R21、R23)に対して高い活性を示した。これは、NH_3がLNT再生時のNOx浄化に重要な役割を担うとする先行研究と一致する[16][17]。ここまでの解析を踏まえ、LNT再生においてNOxは、水性ガスシフトや水蒸気改質によって生成したH_2によって主に還元され、N_2OやNH_3の生成と分解を介してN_2へと浄化されると考えた。これまでにN_2Oの生成と分解をNOx浄化の主要経路の一部とする総括反応モデルは提案されておらず、本検討のユニークな点と言える。

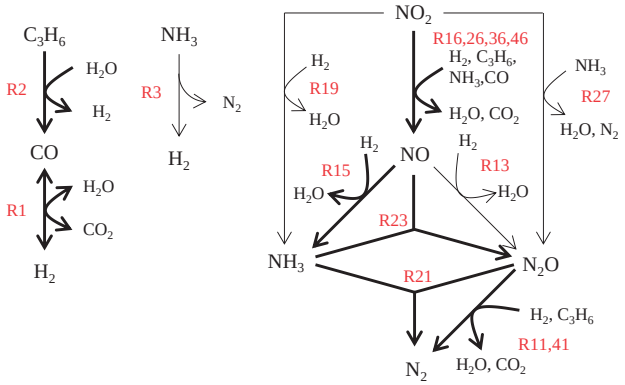


図 5　LNT 再生過程の反応スキーム

最後に、N_2O は温室効果ガスやオゾン層破壊物質として知られており、その浄化に関して多くの研究がなされてきたが [18]、本検討のように 200 ℃未満の低温での N_2O 分解を示した研究例は多くない。今後、LNT 触媒での N_2O の選択還元メカニズムの研究や応用についても更なる発展が期待される。

5　まとめ

LNT モデルの構築を目的として、LNT 触媒上での反応を 6 つに分類したうち、リッチ雰囲気の酸化還元反応のモデルを構築した。本検討により以下のような 3 つの知見を得た。

(1) Redox matrix や積み上げ法による、LNT 再生に関わる複雑な酸化還元反応群の系統的なモデリング法を確立した。
(2) 構築した反応モデルは、H_2、CO、THC、NH_3、NO、NO_2、及び N_2O について、MBD 開発に適用可能な高い精度でシミュレーションすることができた。
(3) LNT 再生において NOx は、水性ガスシフトや水蒸気改質によって生成した H_2 によって主に還元され、N_2O や NH_3 の生成と分解を介して N_2 へと浄化されると考えた。

6　おわりに

本研究を実施するにあたり、触媒の試作において、ユミコア日本触媒株式会社殿に多大なご協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

本文献は自動車技術会論文集 Vol.53 No.1 に掲載された論文を加筆修正の上報告するものである。

参考文献

(1) Miyoshi, N. et al.: Development of new concept three-way catalyst for automotive lean-burn engines, No. 950809, SAE Technical Paper, (1995)
(2) Takahashi, N. et al.: The new concept 3-way catalyst for automotive lean-burn engine: NOx storage and reduction catalyst, Catalysis Today, Vol.27, No.1-2, (1996), p.63-69
(3) Epling, WS. et al.: Overview of the fundamental reactions and degradation mechanisms of NOx storage/reduction catalysts, Catalysis Reviews, Vol.46, No.2, (2004), p.163-245
(4) Roy, S. & Baiker, A.: NO x storage- reduction catalysis: from mechanism and materials properties to storage- reduction performance, Chemical Reviews, Vol.109, No.9, (2009), p.4054-4091
(5) Chatterjee, D. et al.: Modelling of a combined NOx storage and NH3-SCR catalytic system for Diesel exhaust gas aftertreatment, Catalysis Today, Vol.151, No.3-4, (2010), p.395-409
(6) Landsberg, D. et al.: Efficient Catalyst Technologies for Diesel Vehicles, MTZ worldwide, Vol.80, (2019), No.6, p.34-41
(7) Olsson, L. et al.: A kinetic study of NO oxidation and NO x storage on Pt/Al2O3 and Pt/BaO/Al2O3, The Journal of Physical Chemistry B, Vol.105, No.29, (2019), p.6895-6906
(8) Depcik, C. et al.: A one-dimensional lean NO x trap model with a global kinetic mechanism that includes NH3 and N2O, International Journal of Engine Research, Vol.9, No.1, (2008), p.57-77
(9) Larson, RS. et al.: Microkinetic modeling of lean NOx trap chemistry under reducing conditions, Catalysis Today, Vol.136, No.1-2, (2008), p.104-120
(10) Lindholm, A. et al.: Detailed kinetic modeling of NOx storage and reduction with hydrogen as the reducing agent and in the presence of CO2 and H2O over a Pt/Ba/Al catalyst, Journal of catalysis, Vol.258, No.1, (2008), p.273-288
(11) Shwan, S. et al.: Kinetic modeling of NOx storage and reduction using spatially resolved MS measurements, Applied Catalysis B: Environmental, Vol.147, (2014), p.1028-1041
(12) Rafigh, M. et al.: Development of a global kinetic

model for a commercial lean no x trap automotive catalyst based on laboratory measurements, Emission Control Science and Technology, Vol.3, No.1, (2017), p.73-92
(13) 大堀鉄平ほか：アンモニアスリップ触媒のプラントモデル構築検討 - 貴金属合金触媒でのアンモニア酸化過程のモデル化 -, 自動車技術会論文集 , Vol.49, No.3, (2018), p.587-592
(14) Schönebaum, S. et al.: Composition/ Performance Evaluation of Lean NOx Trap Catalysts for Coupling with SCR Technology, ChemCatChem, Vol.13, No.7, (2021), p.1787-1805
(15) Abdulhamid, H. et al.: Influence of the type of reducing agent (H 2, CO, C 3 H 6 and C 3 H 8) on the reduction of stored NO x in a Pt/BaO/Al 2 O 3 model catalyst, Topics in catalysis, Vol.30, No.1, (2004), p.161-168
(16) Nova, I. et al.: Mechanistic aspects of the reduction of stored NOx over Pt-Ba/Al2O3 lean NOx trap systems, Catalysis Today, Vol.136, No.1-2, (2008), p.128-135
(17) Kumar, A. et al.: Isotopic studies of NOX storage and reduction on Pt/BaO/Al2O3 catalyst using temporal analysis of products, Journal of Catalysis, Vol.270, No.2, (2010), p.214-223
(18) Konsolakis, M.: Recent advances on nitrous oxide (N2O) decomposition over non-noble-metal oxide catalysts: catalytic performance, mechanistic considerations, and surface chemistry aspects, ACS Catalysis, Vol.5, No.11, (2015), p.6397-6421

著　者


大堀　鉄平


猪股　浩典


石川　直也


小澤　恒


板垣　裕

論文・報告

リーン NOx トラップの モデルベース開発に関する研究（第２報）

Study on Model-Based Development for Lean NOx Trap (Second Report)

大堀　鉄平*　猪股　浩典**　石川　直也*　小澤　恒*　板垣　裕*
Teppei Oohori　Hironori Inomata　Naoya Ishikawa　Hisashi Ozawa　Yutaka Itagaki

要　旨

ディーゼル排出ガスの NOx 浄化装置の１つである LNT のモデルベース開発を目的として、LNT 触媒のモデルを構築した。第１報に引き続き本報でも LNT 触媒での酸素及び NOx の吸蔵･脱離特性のモデリングに関する検討を紹介する。

Abstract

For Model-Based Development of Lean NOx Trap (LNT), which is one of the NOx purification devices for diesel exhaust gas, we developed the LNT catalyst model. Following from on the first report, this report, we introduce our research regarding modeling Oxygen Storage and NOx trap property of LNT catalyst.

1　はじめに

ディーゼルエンジンの排出ガス後処理装置の LNT（リーン NOx トラップ）のモデリングについて、これまでに多くの研究がなされてきた。これらの先行研究では、LNT 触媒の構成成分である OSM（酸素吸蔵材）や NOx 吸蔵材の特性を精度よくシミュレーションするために、素反応過程や複雑な総括反応から構成される触媒モデルが提案されてきた [(1)-(4)]。一方で、実際の MBD（モデルベース開発）での利用を想定すると、シミュレーションの精度 (Quality) のほかに、モデル作成に必要な作業工数などのコスト (Cost)、及び納期 (Delivery) も重要となる。そこで、MBD 向けの実用的な LNT モデルの開発を目標として、シミュレーションの精度だけではなく、作業工数と期間の最小化にも取組んできた。

第１報 [(5)] では、貴金属、OSM、及び NOx 吸蔵材から構成される LNT 触媒上での反応を、リーン雰囲気の NOx 吸蔵 (Sub.1)、OSM 酸化 (Sub.2)、その他の酸化反応 (Sub.3)、また、リッチ雰囲気の吸蔵 NOx 還元 (Sub.4)、OSM 還元 (Sub.5)、及びその他の酸化還元反応 (Sub.6) の６つに分類し、そのうちの Sub.6 を対象として N_2O や NH_3 を含む多成分シミュレーションが可能なモデルの系統的な構築手法を報告した。本報はその続報として、Sub.1～5 に対応する OSM の酸化還元、及び NOx 吸蔵・脱離・還元のモデリングについて述べる。また、LNT モデルの反応速度定数の同定手順とそれに対応する作業工数を示し、実際の MBD に利用する場合の効果と課題を整理した。

2　実験及び触媒モデル

LNT 触媒の酸素吸蔵能や NOx 吸蔵・還元特性を触媒評価システムで計測し、その結果を用いて LNT モデルを構築し、反応速度定数を同定した。

2.1 供試触媒と試験条件

供試触媒は第１報 [(5)] と同様に、貴金属、OSM、及び NOx 吸蔵材を組成とする LNT 触媒を 400 cpsi のコージェライトハニカムに担持し、500 ℃の電気炉で 10 時間の熱処理を施した試験片を用いた。

触媒の反応試験には触媒評価システム (CATA5000; ベスト測器社製) を使用し、CO、NH_3、N_2O、NO、NO_2、及び H_2O を FT-IR (Bex-1000FT) で、THC、O_2、及び CO_2 を排出ガス分析計 (Bex530M) で、そして H_2 を質量分析計 (Bex-1001H-MI) にてそれぞれの濃度を計測した。試験は LNT 触媒上の吸蔵 NOx を除去するため、500 ℃で触媒を H_2 還元したのちに、**表１**に示す流通ガスを 100 ℃から 500 ℃までの各温度にてリーンガスとリッチガスを切替える操作を繰り返すことで OSM の酸化還元や NOx の吸蔵・脱離･還元を評価した。

*㈱いすゞ中央研究所　　**エンジン装置設計部

表1　触媒評価システムにおける触媒の評価条件

No.	Test name	Rich				Lean		Common		
		H_2 (ppm)	CO (ppm)	C_3H_6 (ppmC)	NH_3 (ppm)	NO (ppm)	O_2 (%)	CO_2 (%)	H_2O (%)	SV (kh^{-1})
17	OSC_H_2	5,000	0	0	0	0	8	10	10	97.5
18	OSC_CO	0	5,000							
19	OSC_C_3H_6		0	1,667						
20	OSC_NH_3			0	1,500					
21	NOx trap_H_2	5,000	0	0	0	500	8	10	10	97.5
22	NOx trap_CO	0	5,000							
23	NOx trap_NH_3				1,500					

2.2 モデリング手法

第1報[5]で作成した1DのLNTモデルに対して**表2**に示すOSMの酸化還元、及びNOx吸蔵･脱離･還元に関する16の反応速度式を新たに組み込んだ。LNTモデルに含まれる反応の速度定数は、最適化ツール（modeFRONTIER; ESTECO社製）の遺伝的アルゴリズム（MOGA Ⅱ）により同定した。実験値とシミュレーション結果の差分を目的関数とし、目的関数が最小になるように試行計算を行うことで反応の速度定数を同定した。

表2　LNT（サブモデル1-5）の反応経路と速度式

	No.	Reaction formula	Rate expression
Sub.2	R51	$2Ce_2O_3 + O_2 \Rightarrow 2Ce_2O_4$	$r_{51} = k_{51}\, C_{O2}\, (1-\theta_{OSM})\, \Omega_{OSM}$
Sub.5	R61	$Ce_2O_4 + H_2 \Rightarrow Ce_2O_3 + H_2O$	$r_{61} = k_{61}\, C_{H2}\, \theta_{OSM}\, \Omega_{OSM}$
	R62	$Ce_2O_4 + CO \Rightarrow Ce_2O_3 + CO_2$	$r_{62} = A_{62}e^{(-E_{62}(1-\alpha_{62}\,\theta_{OSM})/RT)}\, C_{CO}\, \theta_{OSM}\, \Omega_{OSM}$
	R63	$6Ce_2O_4 + C_3H_6 \Rightarrow 6Ce_2O_3 + 3H_2O + 3CO$	$r_{63} = A_{63}e^{(-E_{63}(1-\alpha_{63}\,\theta_{OSM})/RT)}\, C_{C3H6}\, \theta_{OSM}\, \Omega_{OSM}$
	R64	$3Ce_2O_4 + 2NH_3 \Rightarrow 3Ce_2O_3 + 3H_2O + N_2$	$r_{64} = A_{64}e^{(-E_{64}(1-\alpha_{64}\,\theta_{OSM})/RT)}\, C_{NH3}\, \theta_{OSM}\, \Omega_{OSM}$
Sub.3	R71	$2NO+O_2 <-> 2NO_2$	$r_{71} = k_{71}\, (C_{NO}\, C_{O2}^{\beta 71} - C_{NO2}/K_{eq71})$
Sub.1	R81	$NO + S <-> NO\text{-}S$	$r_{81} = k_{81}\, C_{O2}^{\beta 81} C_{NO} (1-\theta_S)\Omega_S - A_{81r}e^{(-E_{81r}(1-\gamma_{81r}\theta_S)/RT)} C_{O2}^{\beta 81r} \theta_S \Omega_S$
	R82	$2NO + PtBaO + 1.5O_2 <-> Pt\text{-}Ba(NO_3)_2$	$r_{82} = k_{82} C_{O2}^{\beta 82} C_{NO} (1-\theta_{PtBaO})\Omega_{PtBaO} - A_{82r}e^{(-E_{82r}(1-\gamma_{82r}\theta_{PtBaO})/RT)} \theta_{PtBaO} \Omega_{PtBaO}$
	R83	$3NO_2 + BaO \Rightarrow NO + Ba(NO_3)_2$	$r_{83} = k_{83}\, C_{NO2}\, (1-\theta_{BaO})\, \Omega_{BaO}$
	R84	$Ba(NO_3)_2 \Rightarrow 2NO_2 + BaO + 0.5O_2$	$r_{84} = A_{84}\, e^{(-E_{84}(1-\gamma_{84}\theta_{BaO})\, /\, RT)}\, \theta_{BaO}\, \Omega_{BaO}$
Sub.4	R91	$Pt\text{-}Ba(NO_3)_2 + 5H_2 \Rightarrow Pt\text{-}BaO + N_2 + 5H_2O$	$r_{91} = k_{91}\, C_{H2}\, \theta_{PtBaO}\, \Omega_{PtBaO}$
	R92	$Ba(NO_3)_2 + 5H_2 \Rightarrow BaO + N_2 + 5H_2O$	$r_{92} = k_{92}\, C_{H2}\, \theta_{BaO}\, \Omega_{BaO}$
	R93	$3Pt\text{-}Ba(NO_3)_2 + 10NH_3 \Rightarrow 3Pt\text{-}BaO + 8N_2 + 15H_2O$	$r_{93} = k_{93}\, C_{NH3}\, \theta_{PtBaO}\, \Omega_{PtBaO}$
	R94	$3Ba(NO_3)_2 + 10NH_3 \Rightarrow 3BaO + 8N_2 + 15H_2O$	$r_{94} = k_{94}\, C_{NH3}\, \theta_{BaO}\, \Omega_{BaO}$
	R95	$Pt\text{-}Ba(NO_3)_2 + 8H_2 \Rightarrow Pt\text{-}BaO + 2NH_3 + 5H_2O$	$r_{95} = k_{95}\, C_{H2}\, \theta_{PtBaO}\, \Omega_{PtBaO}$
	R96	$Pt\text{-}Ba(NO_3)_2 + 2NH_3 \Rightarrow Pt\text{-}BaO + 2N_2O + 3H_2O$	$r_{96} = k_{96}\, C_{NH3}\, \theta_{PtBaO}\, \Omega_{PtBaO}$

ri : reaction rate
Ci: gas i concentration
ki : reaction rate constant
A_i : frequency factor
E_i : activation energy
T : temperature
R :gas constant

β : reaction order
α, γ : coverage dependence of *E*
$k_i = A_i\, \mathrm{EXP}(-Ei/RT)$
$K_{eq} = \mathrm{EXP}(-\Delta G/RT)$
$= \mathrm{EXP}(-(\Delta H - T\Delta S)/RT)$
ΔG : Gibbs free energy
ΔH : Enthalpy

θ_{OSM} : Oxygen coverage of OSM
Ω_{OSM} : Oxygen storage capacity (mol O / L)
θ_S : NO coverage of S site
Ω_S: NO trap capacity of S site (mol NOx / L)
θ_{PtBaO} : NO coverage of Pt-BaO site
Ω_{PtBaO} : NO trap capacity of Pt-BaO site (mol NOx / L)
θ_{BaO} : NO_2 coverage of BaO site

3　LNT モデルの構築

3.1　OSM の酸化還元モデル

まず、OSM 酸化 (Sub.2)、及び OSM 還元 (Sub.5) のモデルを構築し、速度定数を同定した。

OSM の還元で生成する酸素欠陥は結晶表面で生成しやすく、結晶内部では生成しにくい。また、生成しやすさに対応して反応性も異なる。そのため、酸素飽和度の高い OSM の還元では、表面近傍の高活性サイトが優先的に反応し、酸素飽和度の低下に従い活性は低下する。近年の OSM モデリング研究では、OSM 表面近傍の高活性サイトとそれ以外の低活性サイト、若しくは、結晶内部への拡散に由来する応答の遅いサイトから構成されるマルチサイトモデルが提案されている [(6)(7)]。このようなマルチサイトモデルは、単一の反応サイトのみを考慮したシングルサイトモデルに対して、シミュレーション精度は高いが、サイトごとに反応式を定義する必要があるために反応式の数は倍増し、それらの速度定数を同定する作業工数は増大する。そこでシングルサイトモデルの一部改変による OSM 酸化還元モデルの精度向上を検討した。

最初に、酸素飽和した OSM が 500 ℃で H_2 還元される際の H_2 消費量を酸素吸蔵容量 Ω_{OSM} と定義した。次に、酸素で飽和した OSM は比較的反応性が高く、OSM の酸素欠陥が増えるに従い反応性が低下する特性を表現するために、**図 1** に示すように、OSM の還元反応の活性化エネルギーが酸素飽和度 θ_{OSM} の一次関数であると仮定し、その傾き、すなわち、活性化エネルギーの酸素飽和度依存性を α と定義した。これを**表 2** に示す OSM 還元反応 (R61～64) のうち、還元ガスが CO、C_3H_6、及び NH_3 である R62～64 の反応速度式に適用し、それぞれの頻度因子 A、活性化エネルギー E、及び活性化エネルギーの酸素飽和度依存性 α を最適化ツールで同時最適化した。

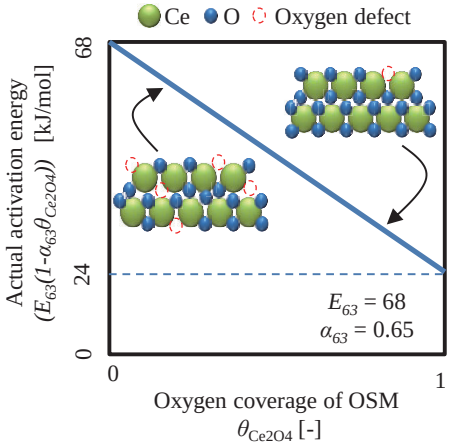
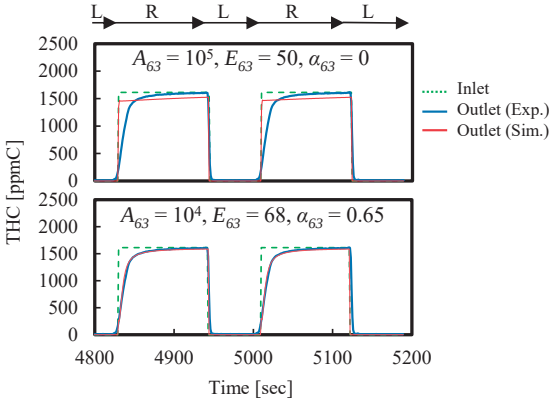


図 1　OSM の活性化エネルギーの酸素飽和度依存性を考慮したシングルサイトモデル

その結果の一例として、C_3H_6 での OSM の還元 (R63) に対する速度定数の最適化結果を**図 2** に示す。**図 2** の上段は活性化エネルギーの酸素飽和度依存性を考慮しない一般的なアレニウスの式で記述されたシングルサイトモデルでの最適化結果で、リーン (L) からリッチ (R) に切替えた瞬間の THC 濃度変化が実験値に対して大きくかい（乖）離したが、**図 2** 下段の活性化エネルギーの酸素飽和度依存性を考慮したシングルサイトモデルでは実験結果とよく一致した。活性化エネルギーの酸素飽和度依存性を考慮したシングルサイトモデルでは E_{63} と α_{63} はそれぞれ、68 kJ/mol と 0.65 で、リーンからリッチに切替わった時点での OSM は酸素飽和（θ_{Ce2O4} = 1.0）とみなすと OSM 還元に対する見かけ上の活性化エネルギー ($E_{63}(1-\alpha_{63})$) は 24 kJ/mol と低い値をとる。そのため、リーンからリッチに切替わった直後の OSM の還元は速やかに進行し、その後、還元反応の進行に従い OSM の酸素飽和度が低下すると、見かけ上の活性化エネルギーは 68 kJ/mol まで徐々に上昇し、OSM 還元の反応速度は低化する。このように活性化エネルギーの酸素飽和度依存性を考慮したシングルサイトモデルでは酸素飽和度による反応性の変化を考慮したことにより実験結果とよく一致したと考えた。以上のような結果は C_3H_6 を還元ガスとした検討例に限らずに、各還元ガスの広い温度域でも同様であった。また、**図 3** に示すように、H_2、CO、C_3H_6、若しくは、NH_3 を還元ガスとした反応試験における OSM との反応量についても、シミュレーションは実験値とよく一致した。



上段：従来のシングルサイトモデル
下段：OSMの酸素飽和度依存性を考慮したシングルサイトモデル

図 2　OSC_C_3H_6 試験 (200 ℃) における実験値とシミュレーション結果の比較結果

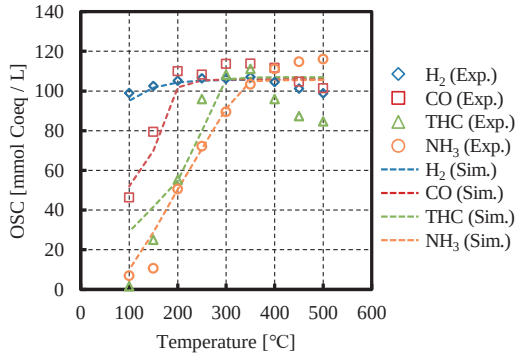


図 3　各温度での還元ガスによる OSC の消費量 (Test No.17～20) の実験値とシミュレーション結果

3.2 NOx 吸蔵･脱離モデル

次に、NOx の吸蔵・脱離に関わる反応 (Sub.1、Sub.3) のモデルを構築し、速度定数を同定した。

LNT への NOx の吸蔵過程は多くの研究がなされており、さまざまなモデルが提案されている [8)-11)]。本検討で構築した 3 つの NOx 吸蔵サイトとそれらの関与する NOx 吸蔵･脱離反応のモデルの概要を**図 4** に示す。先行研究 [12] を参考に、貴金属微粒子に近接し、比較的低温から活性を示す NO 吸蔵サイト（以下、「Pt-BaO サイト」と称す）と NO 酸化により生じた NO_2 が硝酸塩として吸蔵される NO_2 吸蔵サイト（以下、「BaO サイト」と称す）をモデルに組み込んだ。更に、主に 200 ℃以下での NO の吸着サイト（以下、「S サイト」と称す）を組み込み、それぞれに NOx 吸蔵容量を定義した。また、これらのサイトの関与する反応を以下のように定義した。NO 吸着は気相 NO と S サイト間での可逆的な吸着・脱離 (R81) とした。NO 吸蔵反応は気相 NO と Pt-BaO サイト間での可逆的な吸蔵・脱離 (R82) とした。先行研究 [2)12)] では吸蔵 NOx として亜硝酸塩や硝酸塩が混在すると報告しているが、ここではすべて硝酸塩として吸蔵されるとした。BaO サイトの関与する NO 吸蔵過程は、NO 酸化による NO_2 生成 (R71)、BaO サイトへの NO_2 吸蔵による硝酸塩と NO の生成反応 (R83)、及び BaO サイトからの NO_2 脱離 (R84) とした。

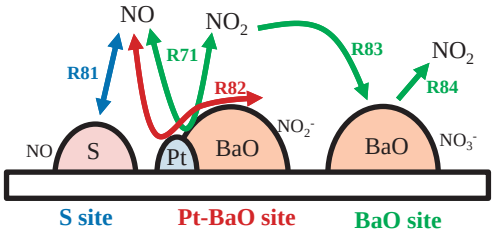


図 4　NOx 吸蔵モデルの活性サイトと反応経路

反応速度式の記述に関しては、NOx 吸蔵反応の活性が NOx 飽和度に強く依存する特性のモデル化を試みた。OSM のモデル化の知見を使用して、吸蔵 NOx の脱離反応の活性化エネルギーが NOx 飽和度の一次関数であると仮定し、その傾き、すなわち、活性化エネルギーの NOx 飽和度依存性を γ として R81、R82、及び R84 に組み込んだ。

上記のように定義した 3 つの NOx 吸蔵サイトの関与する 5 つの反応 (R71、R81～84) について速度定数の同定方法を述べる。これらの反応の一つ一つを実験的に明確に分離できないため、それぞれの反応の速度定数を独立に同定することは困難である。一方で、5 つの反応の頻度因子、活性化エネルギー、及び活性化エネルギーの NOx 飽和度依存性定数の合計で 17 の定数を同時に最適化することを試みたものの、探索範囲が広すぎることが原因で十分に収束した最適解を得ることはできなかった。そこで、各サイトの活性化する温度域が異なることに着目し、特定の温度域のデータのみを用いて、それぞれの反応の速度定数を仮に同定し、その後に、各速度定数の探索範囲を絞り込んだ条件で 17 の定数を同時に最適化した。具体的には、まず、**表 1** の NOx trap_H_2 の試験結果のうち、100～200 ℃の試験データを用いて S サイトの NO 吸着･脱離 (R82) の速度定数を最適化ツールにより仮に同定した。次に、同試験結果の 100～350 ℃の試験結果を用いて Pt-BaO サイトの NO 吸蔵・脱離 (R82) の速度定数を仮に同定し、更に、100～500 ℃の試験結果を用いて NO 酸化 (R71)、BaO サイトの NO_2 吸蔵 (R83)、及び BaO サイトの NO_2 脱離 (R84) の速度定数を仮に同定した。そして最後に、5 反応に含まれる 17 定数を仮に同定した値を中心値とし、探索範囲を絞り込んだ条件で同時に最適化した。

得られた NOx の吸蔵・脱離反応モデルによる NOx 吸蔵量のシミュレーション結果を**図 5** に示す。200～300 ℃に極大を示す NOx 吸蔵特性は実験値に対してシミュレーションの結果がよく一致した。また、この際に吸蔵された NOx 量に対する各 NOx 吸蔵サイトの寄与率を**図 6** に示す。100 ℃では S サイトによる NO 吸着、200～300 ℃では Pt-BaO サイトの NO 吸蔵、及び 400 ℃以上では BaO サイトの NO_2 吸蔵が寄与率として高くなっており、3 つの NOx 吸蔵サイトが意図したように機能していることを確認した。

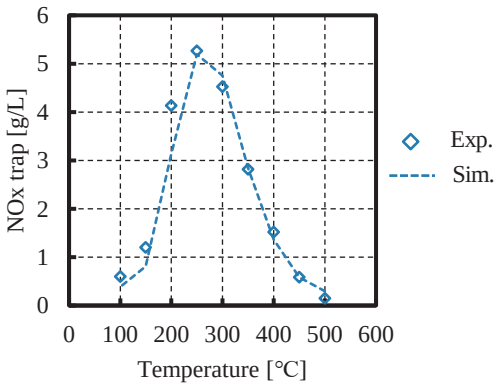


図５　NOx 吸蔵量のシミュレーション結果

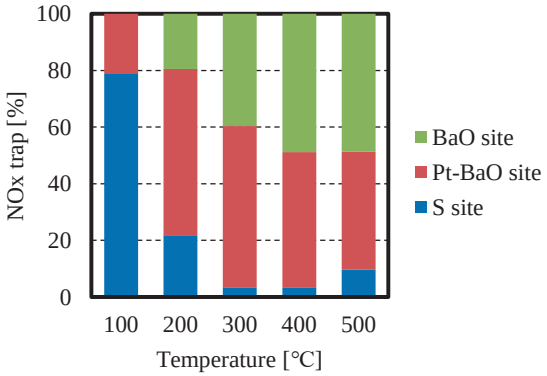


図６　各活性サイトにおける NOx 吸蔵量の寄与率

3.3　吸蔵 NOx の還元モデル

最後に、NOx 吸蔵材に吸蔵された NOx 還元 (Sub.4) のモデルを構築し、速度定数を同定した。

吸蔵 NOx の還元では還元ガスのうち H_2 が最も活性が高いために、主な吸蔵 NOx 還元経路は H_2 還元 (R91、R92) とみなし、CO や C_3H_6 は、水性ガスシフトや水蒸気改質により H_2 を生成して吸蔵 NOx を還元すると仮定した。また、先行研究 [13)-(15)] での報告と同様に、吸蔵 NOx の H_2 還元により NH_3 や N_2O の副生成が観察されたことから、吸蔵 NOx 還元による NH_3 生成 (R95) と NH_3 による吸蔵 NOx 還元 (R93、R94、R96) の反応をモデルに組み込んだ。吸蔵 NOx の還元に関わる反応 (R91～96) を**表 1** の H_2 若しくは NH_3 による NOx 還元試験結果を用いて同定し、得られた LNT モデルのシミュレーション結果を**図 7** に示す。リーンでの NOx 吸蔵、リーンからリッチに切替わる際の瞬間的な NOx 脱離、及びリッチで副生成する NH_3 や N_2O 排出挙動などの NOx の吸蔵･脱離･還元に関する特性をおおむねよくシミュレーションできていた。また、リッチでの H_2 生成タイミングが実験結果に対してシミュレーションではよく一致した。リッチでの H_2 生成は、LNT 内部の OSM と吸蔵された NOx の還元反応が完了したことを示しており、LNT 再生中に生じる複雑な酸化還元過程の反応収支を精確にシミュレーションできたことを示唆している。また、リッチでの H_2 生成は、空燃比センサによる LNT 再生の終了判定に重要な信号となることが知られており [16]、LNT モデルが空燃比制御開発にも活用できることを示している。

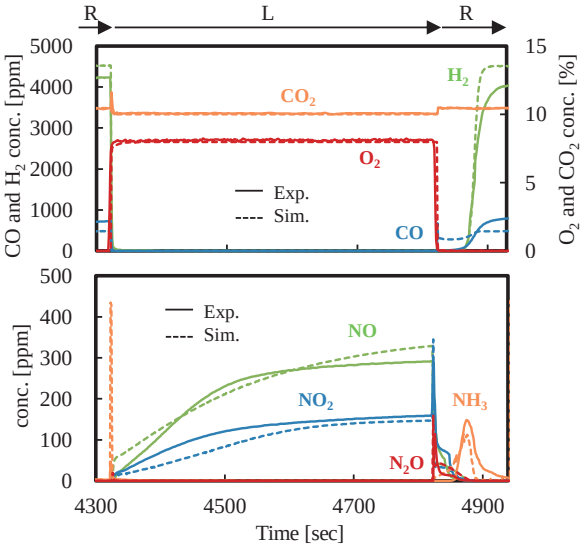


図７　NOx trap_CO 試験（300 ℃）における NOx、NH_3、及び N_2O のシミュレーション結果

4　LNT モデルの同定手順と作業工数

第 1 報 [5] 及び本報における LNT 触媒の反応試験と LNT モデルの速度定数の同定手順について整理するとともに、その作業工数と期間を算出した。

OSM の酸化還元及び NOx 吸蔵･脱離･還元反応に関する速度定数の同定手順を**表 3** に示す。第 1 報 [5] の Step1～15 の手順に続き、Step16～19 で OSM の酸化還元、Step20～23 で NOx 吸蔵・脱離、Step24～25 で吸蔵 NOx 還元、最後に、Step26 はシミュレーションの精度確認とした。

この手順に従い LNT モデルの作成に要した作業工数と期間の実績を**表 4** に示す。反応試験の全体での作業工数は 70 時間で、週 40 時間の装置稼働に対して作業期間はおよそ 2 週間であった。次に、最適化ツールによる合計で 26 Step の同定作業と報告書作成を合せて 120 時間の作業工数を要し、最適化ツールによる自動計算時間も含めた作業期間は 6 週間であった。計測と最適化を合せた全体の作業工数は 190 時間、作業期間は 8 週間であった。なお、以上の作業工数と期間は、構築済みの LNT モデルに対して特性の異なる LNT 触媒の速度定数を同定する場合であって、作業者が熟練していること、及び最適化ツールを使用することを前提とした。

表3　LNT（サブモデル1-5）の反応速度定数の決定手順

Step	Test Name	Identified parameter		Objective function
16	OSC_H_2	sub. 2 sub. 5	$\Omega_{OSM}, A_{51}, E_{51}, A_{61}, E_{61}$	H_2, CO
17	OSC_CO		$A_{62}, E_{62}, \gamma_{62}$	CO, H_2
18	OSC_C_3H_6		$A_{63}, E_{63}, \gamma_{63}$	THC, CO, H_2
19	OSC_NH_3		$A_{64}, E_{64}, \gamma_{64}$	NH_3, H_2, CO
20	NOx trap_H_2	sub. 1 sub. 3	$\Omega_S, \Omega_{PtBaO}, \Omega_{BaO}$	NO, NO_2, H_2, CO
21	NOx trap_H_2		$A_{81}, E_{81}, A_{81r}, E_{81r}, \gamma_{81r}$	NO, NO_2
22	NOx trap_H_2		$A_{82}, E_{82}, A_{82r}, E_{82r}, \gamma_{82r}$	NO, NO_2
23	NOx trap_H_2		$A_{71}, E_{71}, A_{83}, E_{83}, A_{84}, E_{84}, \gamma_{84}$	NO, NO_2
24	NOx trap_NH_3	Sub. 4	$A_{93}, E_{93}, A_{94}, E_{94}, A_{96}, E_{96}$	NO, NO_2, NH_3, N_2O, H_2
25	NOx trap_H_2		$A_{91}, E_{91}, A_{92}, E_{92}, A_{95}, E_{95}$	NO, NO_2, H_2, NH_3, N_2O
26	NOx trap_CO	Accuracy checking		

表4　LNTモデル作成に要する作業工数と期間

Working procedure		Man-hours (h)	Working period (week)
Synthetic Gas Bench testing	Test 1-16*	40	2
	Test 17-20	16	
	Test 21-23	14	
Parameter optimization & Checking	Step1-15*	40	6
	Step16-19	20	
	Step20-26	40	
Reporting		20	
total		190	8

* は第1報[5]の結果に基づく

5　考察

ディーゼル後処理装置の高品質で合理的なMBD開発を実現するためのツールとしてLNTモデルを適用する場合、シミュレーションの精度だけではなく、ツールを作成するのに必要な設備や人的コストが少なく、かつ、短納期であることも求められる。そのため、LNTモデルは一定のシミュレーション精度を保ちつつも簡素な数理式で記述されることが望ましい。

本報におけるLNTモデルの一つの特徴は、OSM還元反応の活性化エネルギーに酸素飽和度依存性αと吸蔵NOxの脱離の活性化エネルギーにNOx飽和度依存性γとをそれぞれ考慮した点である。類似の先行事例として、SCR(Selective Catalytic Reduction)触媒に対するNH_3の脱離速度の活性化エネルギーに対してNH_3飽和度（若しくは被覆率）依存性を導入することで精度の高いシミュレーションができると提案されており、熱分析による実験からも妥当性が示されている[17)-19)]。このような吸着特性はTemkin isothermと呼ばれ、不均一な表面への吸着や吸着物間に相互作用が生じる場合に有効なモデルであると言われている[20)21)]。OSMやNOx吸蔵材のモデリングにTemkin isothermに対応する数理モデルを適用することは、不均一性や吸蔵物間の相互作用による効果を反映する手法として合理性があり、またシミュレーション精度を保ちながらモデルの活性サイトや反応経路の数を減らす方法として実用的な利用価値があると考えた。

LNTモデルを実用的なMBDツールとして運用する場合、モデルの作成に関わる手順を整備し、作業工数や納期を明確にする必要がある。これまでに多くのLNTモデルが提案されているにも関わらず、LNTモデルの作成手順や作業工数を取上げた例はほとんどない。そのため、本報の同定手順やその作業工数に対する先行例との比較は困難であるが、本研究で反応モデルを簡素化した点や作業手順に従った最適化ツールによる自動での定数同定により、先行研究に対して同等以下の作業工数、及び期間でLNTモデルの同定作業ができると推定した。このLNTモデルは後処理装置の企画設計段階での概要設計やLNT内部での現象を可視化する実務者教育に活用しうるため、現状でも十分に開発プロセスの合理化に寄与できる。しかしその一方で、同じディーゼル後処理装置のうち、既にMBD活用が進んでいる尿素SCRシステムと比較した場合、LNTモデルの同定作業にはいすゞの実績ベースで数倍の作業工数を要しており、更なる省工程

化が望まれる。

LNT に限らず、これまでの触媒モデリング研究の多くはモデルの物理的な忠実性や高精度化に注力される一方で、実際の開発プロセスで運用するためのコストや納期は十分に考慮されてこなかった。今後の MBD 向け触媒モデルの開発においては、シミュレーション精度の向上だけではなく、モデル作成に対するコストや納期といった実用的な運用面での改良が重要となると考えられる。

6　まとめ

実用的な MBD 向けの LNT モデルの開発を目標とした検討において、OSM や NOx 吸蔵材の活性サイトに酸素や NOx 飽和度依存性をそれぞれ考慮することや 3 つの NOx 吸蔵サイトを持つ独自のモデルを構築し、以下の知見を得た。

(1) NOx の吸蔵・脱離や NH_3、N_2O の排出挙動など多成分の排出ガスを高い精度でシミュレーション可能な LNT モデルを構築した。
(2) 空燃比センサによる LNT 再生の完了判定に重要な H_2 生成のタイミングを高精度にシミュレーションできており、LNT の空燃比制御の開発に活用できることを示した。
(3) LNT モデルの速度定数の同定には 190 時間の作業工数と 8 週間の期間を要した。MBD での活用に向けて、それらの更なる短縮が重要である。

7　おわりに

本研究を実施するにあたり、触媒の試作において、ユミコア日本触媒株式会社殿に多大なご協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

本文献は自動車技術会論文集 Vol.53 No.2 に掲載された論文を加筆修正の上報告するものである。

参考文献

(1) Epling, WS. et al.: Overview of the fundamental reactions and degradation mechanisms of NOx storage/reduction catalysts, Catalysis Reviews, Vol.46, No.2, (2004), p.163-245
(2) Liu, G., & Gao, PX.: A review of NO x storage/reduction catalysts: Mechanism, materials and degradation studies, Catalysis Science & Technology, Vol.1, No.4, (2011), p.552-568
(3) Shwan, S. et al.: Kinetic modeling of NOx storage and reduction using spatially resolved MS measurements, Applied Catalysis B: Environmental, Vol.147, (2014), p.1028-1041
(4) Rafigh, M. et al.: Development of a global kinetic model for a commercial lean no x trap automotive catalyst based on laboratory measurements, Emission Control Science and Technology, Vol.3, No.1, (2017), p.73-92
(5) 大堀鉄平ほか：リーン NOx トラップのモデルベース開発に関する研究 -LNT の再生における酸化還元反応の系統的なモデルリング法の開発 , 自動車技術会論文集, Vol.53, No.1, (2022), p.32-37
(6) Gong, J. et al.: Dynamic oxygen storage modeling in a three-way catalyst for natural gas engines: A dual - site and shrinking -core diffusion approach, Applied Catalysis B: Environmental Vol. 203, (2017), p.936-945
(7) Mc Grane, L. et al.: OSC Modelling of 3-Way Automotive Catalysts to Understand the Effect of Latent OSC on Dynamic OSC Performance, SAE Technical Paper, No. 2022-01-0574, (2022)
(8) Mahzoul, H. et al.: Experimental and mechanistic study of NOx adsorption over NOx trap catalysts, Applied Catalysis B: Environmental, Vol.20, No.1, (1999), p.47-55
(9) Hodjati, S. et al.: Absorption/desorption of NOx process on perovskites: Nature and stability of the species formed on BaSnO3, Applied Catalysis B: Environmental, Vol.27, No.2, (2000), p.117-126
(10) Prinetto, F. et al.: FT-IR and TPD Investigation of the NO x Storage Properties of BaO/Al2O3 and Pt- BaO/Al2O3 Catalysts, The Journal of Physical Chemistry B, Vol.105, No.51, (2001), p.12732-12745
(11) Schmitz, PJ., & Baird, RJ.: NO and NO2 adsorption on barium oxide: model study of the trapping stage of NO x conversion via lean NO x traps, The Journal of Physical Chemistry B, Vol.106, No.16, (2002), p.4172-4180
(12) Forzatti, P. et al.: NOx removal catalysis under lean conditions, Catalysis today, Vol.117, No.1-3, (2006), p.316-320
(13) Clayton, RD. et al.: NOx storage and reduction with H2 on Pt/ BaO/ Al2O3 monolith: Spatio-temporal resolution of product distribution, Applied Catalysis B: Environmental, Vol.84, No.3-4, (2008), p.616-630

(14) Nova, I. et al.: Mechanistic aspects of the reduction of stored NOx over Pt-Ba/Al2O3 lean NOx trap systems, Catalysis Today, Vol.136, No.1-2, (2008), p.128-135
(15) Kumar, A. et al.: Isotopic studies of NOx storage and reduction on Pt/BaO/Al2O3 catalyst using temporal analysis of products, Journal of Catalysis, Vol.270, No.2, (2010), p.214-223
(16) Breitegger, B. et al.: Regeneration control of a LNT via a dynamic NOx-Sensor, 14. Internationales Stuttgarter Symposium, (2014), p.581-595
(17) Nova, I. et al.: Transient response method applied to the kinetic analysis of the DeNOx-SCR reaction, Chemical Engineering Science, Vol.56, No.4, (2001), p.1229-1237
(18) Wilken, N. et al.: Heat of adsorption for NH3, NO2 and NO on Cu-Beta zeolite using microcalorimeter for NH3 SCR applications, Catalysis Today, Vol.151, No.3-4, (2010), p.237-243
(19) Olsson, L. et al.: A multi-site kinetic model for NH3-SCR over Cu/SSZ-13, Applied Catalysis B: Environmental, Vol.174, (2015), p.212-224
(20) 慶伊富長：反応速度論 第3版, 東京化学同人, (2001)
(21) 村松淳司ほか：固体触媒表面へのガス吸着式と吸着を伴う総括反応速度式, Bulletin of the Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University, Vol.47, No.1-2, (1991), p.130-140

著　者


大堀　鉄平


猪股　浩典


石川　直也


小澤　恒


板垣　裕

◇いすゞ歴史の一こま



初代エルフ　マイクロバス　（1960年ごろ　箱根）

論文・報告

DPF 強制再生時の PM 燃え残り予測モデルの構築

The Investigation of DPF Model Optimization on Temperature and PM Distribution Inside of DPF during Active Regeneration

中村　圭介*　Keisuke Nakamura
酒井　順司**　Junji Sakai
小澤　恒*　Hisashi Ozawa
石川　直也*　Naoya Ishikawa

要　旨

DPF の最適設計支援を目的とし、PM 堆積量を計算可能な 3D-DPF モデルを構築した。同モデルでは実験結果の DPF 入口断面温度分布、及び CFD 計算より求めた DPF 入口断面流速分布を入力し、実験結果を目的関数として PM 酸化反応パラメータを最適化することにより強制再生中における DPF 内部温度及び PM 燃え残り分布の傾向をモデルで予測することが可能となった。

Abstract

Optimizing of 3D DPF model about active regeneration for helping DPF design process was investigated. DPF inlet temperature and flow velocity distribution of experimental results were entered into 3D DPF model.

Optimized 3D DPF model can simulate trend of temperature distribution during active regeneration and amount of remained PM after active regeneration.

1　はじめに

多くのディーゼルエンジン排気後処理装置に用いられている DPF（ディーゼル微粒子フィルター：Diesel Particulate Filter）は、排出ガス中に含まれる PM（粒子状物質：Particulate Matter）を大気中に放出しないために捕捉し、堆積した PM を定期的に酸化除去することが基本的な役割である。酸化除去の過程は DPF 再生と呼ばれ、大きく連続再生と、強制再生の二通りの方法[(1)]がある。前者はエンジンから排出される窒素酸化物 NO が DOC（ディーゼル酸化触媒：Diesel Oxidation Catalyst）の活性温度領域で NO_2 に酸化され、NO_2 の酸化力により、おおむね 250～350 ℃で酸化除去が進行する。後者は Post 噴射や排気管噴射により供給された燃料が DOC での酸化反応熱によりおおむね 550 ℃以上に昇温され、PM は主に酸素との反応により酸化除去される。この際、高温で短時間に PM 酸化反応を強制的に進行させるため、PM の堆積量（燃え残り量）や排出ガス温度によって局部的に高温となる場合があり[(2)]、DPF の破損（溶融、破断）を招く場合がある。設計段階においては燃料消費量や再生頻度を抑えつつ破損を生じないように DPF の容量や形状等を設定するが、実験結果からこれらを設定するには非常に多くの工数を要する。DPF 内部の PM 堆積量分布についてはこれまで非破壊で測定する手法が複数報告[(3)(4)]されているが、DPF 基材の材質によって精度が低下するなどの課題がある。

本検討では、実用的な計算負荷で PM 酸化反応の速度に影響する温度分布と再生後の DPF 内部 PM 量分布を 3D 出力するモデルを構築し、設計段階の工数削減に寄与することを最終目的としている。本報では実験的に求めた DPF 入口の温度分布を入力し、強制再生前後の PM 堆積量の実測結果を目的関数として DPF モデルの PM 酸化反応パラメータを最適化した。それらの方法と適合後のモデル精度について報告する。

2　DPF のモデリング方法

2.1 供試 DPF 仕様

本研究では小型商用車用の DPF を対象としてモデリングを行った。当該 DPF の仕様を**表 1** に示す。

表 1　供試 DPF 諸元

Cross sectional shape	Oval
Major Diameter×Minor Diameter ×Length (mm)	165.1×122.0 ×190.5
Volume (L)	3.0
DPF wall thickness (mil)	11
Cell number (cpsi)	350
Porosity (%)	42
Material	Silicon Carbide

*㈱いすゞ中央研究所　　**エンジン装置設計部

2.2 DPF 再生試験データの測定

実験データ測定に供したエンジン仕様を**表2**に示し、仕様のエンジンに適用した排気後処理装置を**図1**に示す。DPF 上流に DOC を設けた排気後処理装置を用い、NO_2 による PM 酸化影響を受けない温度領域で、所定の PM 堆積量に相当する圧力損失に達するまで定常運転（1,200 rpm、低負荷領域、排気温度 100 ℃程度）にて PM 堆積を行った。

表2　供試エンジン諸元

Engine Type	DI Diesel
Cylinder number (-)	4
Displacement (L)	2.499
Max power (kW @rpm)	120@3,600
Max torque (N・m@rpm)	400@1,400～2,000
Fuel injection system	Common rail
Air charging system	Inter cooled 2stage turbocharger
Regulation level	Euro V

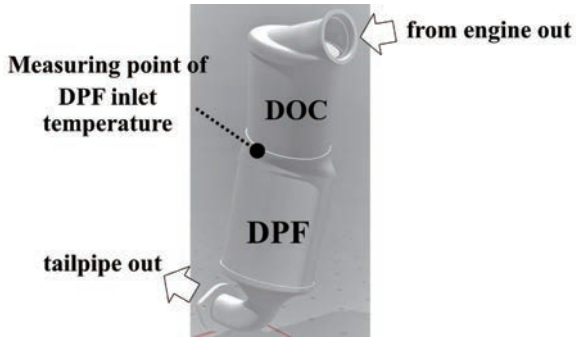


図1　後処理装置

総 PM 堆積量は、PM 堆積試験前後の重量差分より導出した。供試エンジンでは Post 噴射により**図1**に示した DOC-DPF 間で測定される排出ガス温度（以下、「再生目標温度」と称す）を任意の温度（550～600 ℃）に昇温して強制再生を行い試験後の DPF 重量から燃え残った PM 量を求めることで式 (1) に示される DPF 再生率を導出した。

DPF 再生率 (%) =PM 燃焼量 (g) /PM 堆積量 (g) × 100　(1)

PM 堆積 -DPF 再生の温度プロファイルを**図2**に示す。

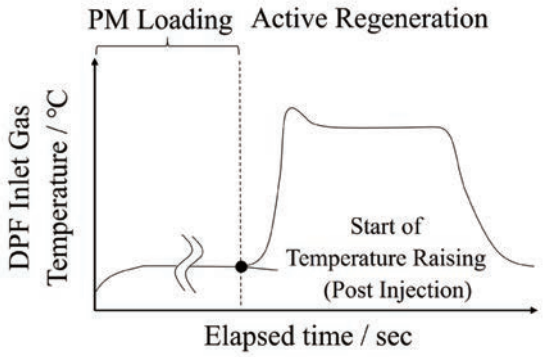


図2　DPF 入口ガス温度推移概略図
（PM 堆積過程 -DPF 再生過程）

2.3 DPF 内部の PM 堆積量分布測定

再生前の DPF 内部 PM 堆積分布については、前述の運転条件で PM 堆積操作を行った後、**図3**に示すように DPF を分割し、各セグメントに堆積した PM 堆積量を導出した。各セグメントの PM 堆積量から DPF 内部における PM 堆積量分布を導出した。再生後の DPF 内部 PM 堆積分布については、**図2**の PM 堆積、DPF 強制再生を連続して行い、各セグメントの PM 堆積量から、DPF 内部の PM 堆積量分布を導出した。

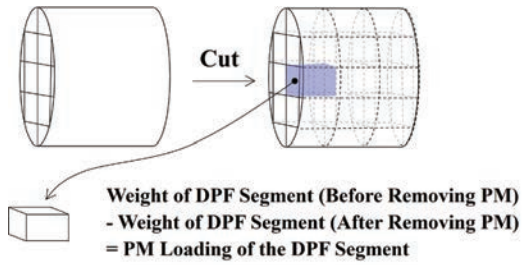


図3　DPF 内における PM 堆積量分布の測定方法

2.4 DPF モデルと適合手順

本報告では市販の排気後処理シミュレーションソフトである Exothermia S.A 社の exothermia suite を用いた。同ソフトの DPF モデルを用いた適合手順概要を**2.4.1 項～2.4.5 項**に示す。

2.4.1　DPF 形状と材質の入力

表1に示した諸元各値をモデルに入力した。

2.4.2　熱的特性値の入力

DPF 基材（SiC）、セグメント間の接着層（Cement 層）、緩衝材（無機繊維）、ケーシング（ステンレス）の熱伝導係数は材質に応じた適切な値を選択し入力した。

2.4.3　DPF 入口部の流速分布

再生中の代表ポイントにおける作動ガス温度、及び流量における DPF 入口断面の流速分布を 3D CFD（数値流体力学：Computed Flow Dynamics）計算により求めた。代表ポイント（Ⅰ～Ⅳ）を**図 4** に示す。**図 1** に示した後処理装置全体の配管形状に従い、DOC 及び DPF 部には実験結果をもとにした抵抗値を与えて計算を行った。計算結果の一例を**図 5** に示す。

外周の壁表面における流速は 0 であり長径の両端部が低い流速を示しているが、全体的に均一な流速分布を示していることがわかる。前述のとおり、DPF 部には抵抗値を与えて計算しており、DPF 入口部において流速が均一化されているためと考えられる。このようにして導出した流速分布を DPF モデルに入力した。

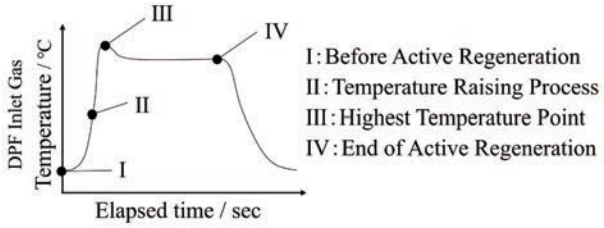


図 4　3D モデル計算に用いた温度及び排出ガス流速分布測定タイミング

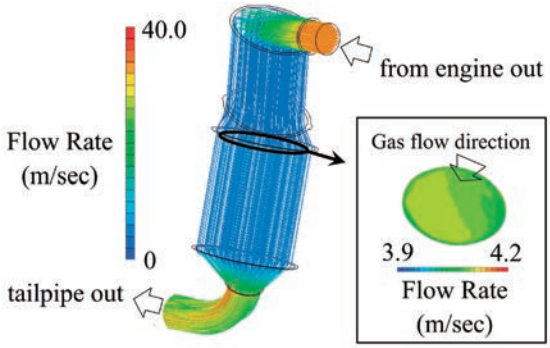


図 5　流速分布計算結果（図 4 のⅢ時点）

2.4.4　DPF モデル入口の温度分布入力

DPF モデルに入力する作動ガスの温度分布は DPF 入口の再生中温度を実測し、それに基づく温度分布を与えた。**図 6** には、温度測定ポイントの位置（黒丸：●）を示した。温度測定に用いた熱電対数増加による排出ガス流れへの影響を考慮して、本検討では**図 6** に示す測定位置に集約した、未測定部分の温度は X 軸より下側は Y 軸対称、Y 軸より右側は Y 軸対称として DPF モデルへの入力値とした。また、測定ポイント間の温度については線形補間を行った。

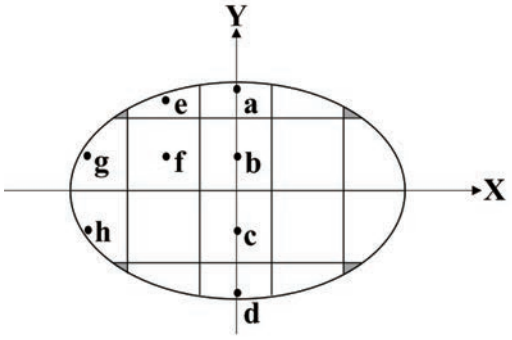


図 6　DPF 入口断面における温度測定点

2.4.5　PM 酸化反応パラメータの最適化

1 章において述べたように DPF の再生方法は低温領域（250～350 ℃）において NO_2 により酸化される連続再生と、高温（550 ℃～）領域で酸素により酸化される強制再生がある。今回、モデリングの対象とした強制再生の温度領域では、NO_2 の存在比率が低く PM と酸素の反応が支配的であると考えられる。同時に計算負荷の低減を目的として式 (2) で示される単一の反応式を仮定した。式 (2) の反応速度は式 (3) で示され、反応速度定数 k は Arrhenius 式 (4) で示される。前指数因子：A と活性化エネルギー：Ea を変数とした。式 (4) において R：気体定数、T：絶対温度である。

$$C\ (PM) + O_2 \Rightarrow CO_2 \qquad (2)$$

$$-d[PM] / dt = k[PM]^{\alpha}[O2]^{\beta} \qquad (3)$$

$$k = A\exp\ (-Ea / RT) \qquad (4)$$

強制再生中における DPF 径方向の温度勾配は外周付近が大きく、外周部ではセグメント内における温度分布も急しゅんであり、単一の温度ではセグメント内の平均的な PM 酸化反応速度を表現できない可能性がある。そのため、式 (4) の 2 変数を最適化する際は、**図 7** の塗り潰し部で示したセグメント内の温度勾配が小さい中心付近のセグメントについて **2.3 節**に記述した方法で実験的に導出した。再生前後の PM 堆積量差（=PM 燃焼量）を目的関数とし、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化計算を行った。各セグメントの最適化計算は、計算負荷を軽減するため 0D モデルで行った。

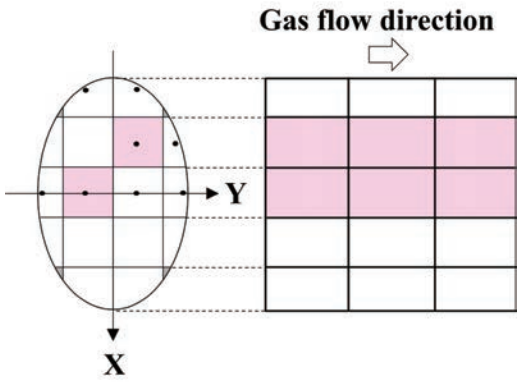


図 7　PM 酸化速度式パラメータ最適化に用いた PM 堆積セグメント

3　DPF 再生試験結果

3.1　再生前の DPF 内 PM 堆積量分布

総堆積量 4.9 g/L の PM を DPF に堆積させ、**2.3 節**にて記述した方法で DPF 内部の PM 堆積量分布を求めた。**図 8** に示した 4 断面における分布をコンター図で表したものを**図 9** とし、図中では、各セグメント間の PM 堆積量は線形補間を行っている。

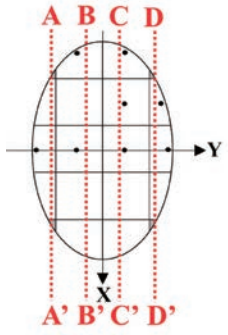


図 8　DPF 入口側断面における PM 堆積量分布確認断面

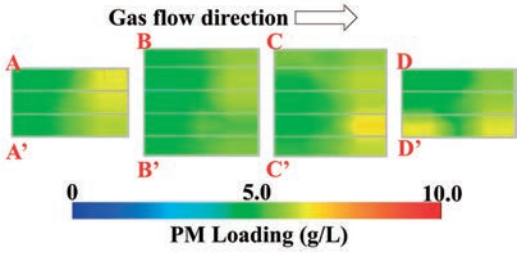


図 9　PM 堆積操作後の PM 堆積量分布
（総 PM 堆積量：4.9 g/L）

図 9 より下流側の PM 堆積量がやや多く、先行研究 [5][6] と同一の傾向であることがわかる。本検討では DPF の総 PM 堆積量を変更した場合においても DPF 内部の PM 堆積量分布は同等であると仮定し、以後の検討を行った。

3.2　DPF 強制再生中の温度分布

本検討では目標再生温度（=DPF 入口ガス制御温度）550～600 ℃、再生前の PM 堆積量は 3.1～8.1 g/L の範囲で試験を行った。**図 10** には再生目標温度 575 ℃再生前 PM 堆積量 4.9 g/L 条件で強制再生を行った際の DPF 入口ガスの制御温度及び**図 6** に示した点 c と点 h の温度推移を示す。

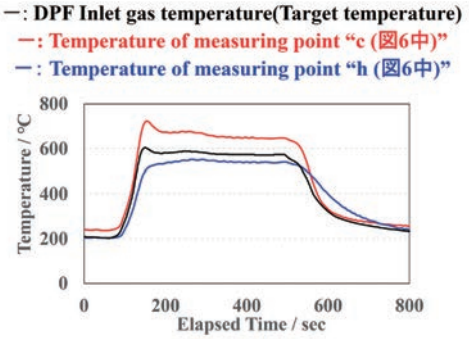


図 10　DPF 強制再生中における各測温点の温度推移

最も高い温度を示す中心部の点 c の温度は DPF 入口ガス制御温度より 100 ℃程度高い。一方、最も低い温度である長径端部の点“ h ”では DPF 入口ガス制御温度と比較して 50 ℃程度低い値を示しており、中心－外周の温度差は 150 ℃程度の差異があることが確認できる。

3.3　DPF の再生率と再生後の PM 燃え残り分布

本検討では、**2.2 節**の方法で目標再生温度 575 ℃、再生時間 6 min 条件、再生前 PM 堆積量を 4.9 及び 8.1 g/L の 2 水準の再生後 PM 堆積量分布を求めた。再生後の PM 堆積量分布について**図 8** で示した垂直方向 4 断面におけるコンター図で表したものを**図 11** 及び**図 12** に示す。

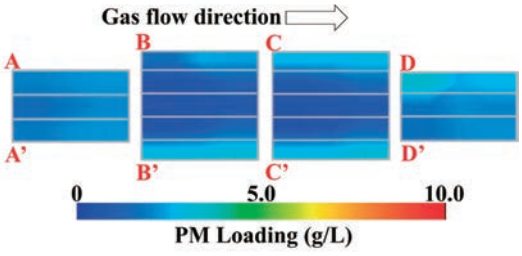


図 11　DPF 再生後の PM 堆積量分布
（再生前 PM 堆積量：4.9 g/L、575 ℃ - 6 分再生後）

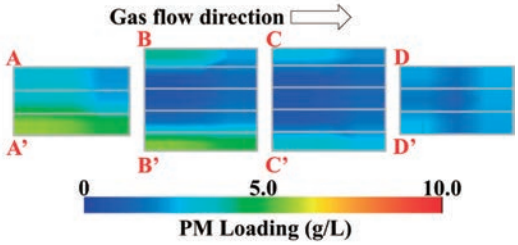


図 12　DPF 再生後の PM 堆積量分布
（再生前 PM 堆積量:8.1 g/L、575 ℃ - 6 分再生後）

図 11、**図 12** いずれの場合においても、中心部の PM 残存量が少なく、外周付近の PM 残存量が多い傾向であることがわかる。これは**図 10** で示したように、強制再生中の DPF 内部温度は外周部よりも中心部の方が高いために中心部と外周部の燃焼速度に差異が生じたことに起因すると考えられる。**表 3** には**図 11**、**図 12** に示した再生条件での再生率を示す。

その他の再生条件については再生率のみを再生前後の重量から測定した。**表 3** の結果を含めて再生率の一覧を**表 4** に示す。

表 3　再生条件違いにおける DPF 再生率

PM loading before regeneration (g/L)	PM loading after regeneration (g/L)	Regeneration rate (%)
4.9	1.5	68.9
8.1	2.4	70.7

表 4　PM 堆積量、再生条件が異なる DPF 再生率

DPF inlet gas Temp. (℃)	PM loading before regeneration (g/L)	Regeneration rate (%)
550	7.8	47.2
575	3.1	58.1
575	4.9	68.9
575	8.1	70.7
600	3.1	81.5
600	5.2	80.9

表 4 より、再生前 PM 堆積量と目標再生温度が再生率に寄与していることがわかる。これは式 (3) における PM 量：[PM] の増加、式 (4) における温度：T の上昇の結果として反応速度が増大することから説明できる。

4　シミュレーション結果

4.1　再生前の PM 堆積量分布

実験結果に基づいた DPF 入口の温度分布を入力し、一定の作動ガス流量、温度条件にて実際の PM 堆積量と同等である 4.9 g/L の PM を堆積させた場合について、**図 9** と同様に垂直方向の 4 断面における PM 堆積量分布の実験値とシミュレーションの比較を**図 13** に示した。

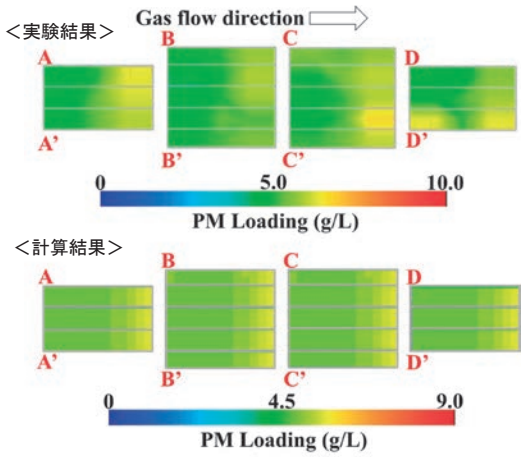


図 13　PM 堆積操作後の PM 堆積量分布比較

シミュレーション結果は実験値と同様に下流側の PM 堆積量が上流側よりも多い傾向[(5)(6)]を示している。前述のとおり、実験値のセグメント間 PM 堆積量の値は線形補間しているため、特に外周部のセグメント内における PM 堆積量の分布が再現できていないことが両者間の誤差要因として考えられる。**図 13** から、総 PM 堆積量 4.9 g/L 条件において実験と同様の堆積量分布を再現している。

以後のシミュレーションでは、総 PM 堆積量を変化させた場合も DPF 内部の PM 堆積量分布は実験値と同等の傾向を示すものと仮定して検討を行った。

4.2　再生率と再生後 PM 残存量分布

4.1 項の手順に従い、DPF 再生前の PM 堆積量 4.9 及び 8.1 g/L それぞれの場合における DPF 強制再生シミュレーションを行った。各条件の再生率を**表 5** に示す。

表 5　実験値と計算値の DPF 再生率比較

PM Loading before Regeneration (g/L)	PM Loading after Regeneration (g/L)	Regeneration Rate (%)
4.9	2.1	56.5
8.1	2.3	71.8

次に、同様に各条件での再生後 DPF 内部の PM 堆積量分布について実験値とシミュレーション値を比較したものを**図 14** と**図 15** に示す。**図 14** は再生前 PM 堆積量 4.9 g/L とし、**図 15** では再生前 PM 堆積量 8.1 g/L 条件とした。**図 14**、**図 15** は**図 11** 及び**図 12** に示した PM 堆積量分布の実験結果と同様の 4 断面における分布の比較である。**図 14**、**図 15** の比較から、いずれも中心部より外周部の PM 堆積量が多い傾向を再現できている。

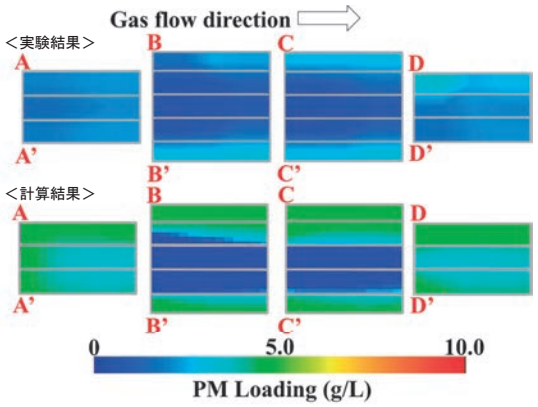


図 14　PM 堆積操作 - 再生後の PM 堆積量分布比較
（再生前 PM 堆積量:4.9 g/L）

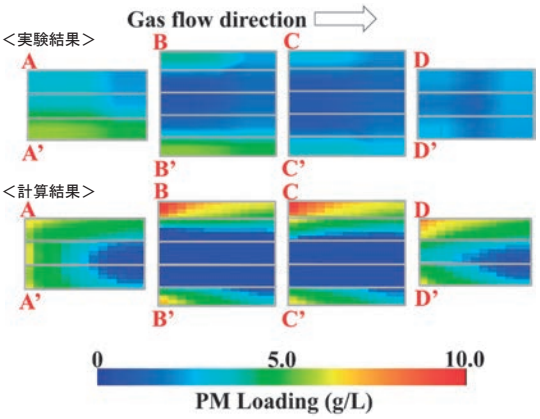


図 15　PM 堆積操作 - 再生後の PM 堆積量分布比較
（再生前 PM 堆積量:8.1 g/L）

これまで本報で記述した方法で各種パラメータを最適化、入力条件を設定したモデルを用いて目標再生温度、再生前の総 PM 堆積量を変化させた条件における実験値とシミュレーションの再生率をプロットしたものを**図 16** に示す。おおむね右肩上がりの直線であり、再生率の実験値の傾向と一致している。

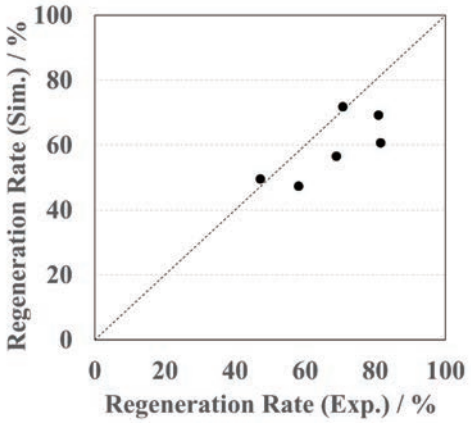


図 16　実験結果と計算結果の再生率比較

5　考察

今回の検討で PM 堆積量分布傾向を再現できる DPF モデルを構築した。一方、温度の低い外周部の PM 堆積量は実験値よりも多い傾向であった。また、再生率についても実験値より低い値を示す場合もあった。以下、それらの要因について考察する。

2.4.5 項で記述したように、PM 酸化反応の最適化に用いたのは温度勾配が比較的小さい中心部のセグメントの PM 燃焼量と温度であった。**図 17** に目標温度 575 ℃、再生前 PM 堆積量 4.9 g/L 条件で強制再生を行った際の中心付近温度（**図 6** の点 c、点 f）、及び長径端外周部（**図 6** の点 g、点 h）の温度推移を示す。

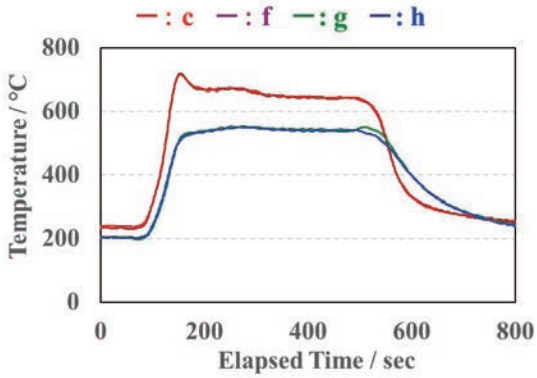


図 17　再生中における各測温点の温度推移
（図 6 の e、f、g、h）

目標再生温度 575 ℃の場合、昇温後の中心部セグメント温度は 640～720 ℃程度を推移しており、セグメント間の温度差は± 10 ℃程度と小さい。そのため、PM 酸化反応のパラメータが高温かつ狭い温度域の実験結果から導出された結果となっている。したがって、550～640 ℃の低い温度域で、セグメント内の温度勾

配が小さい条件の実験結果も含めた目的関数を設定して PM 酸化反応パラメータを最適化する必要があると考える。

また、今回用いた後処理システムは DOC-DPF 間が近接しており、DPF 入口の温度分布は DOC 出口で既に生じていると考えられる。DOC 入口の温度分布の実測結果を入力条件として、強制再生時の DOC 内部温度分布を精度良く再現できる DOC 一体のモデルを構築することで、DPF 強制再生後の再生率、PM 堆積量分布の計算精度をより向上できると考える。

6　まとめ

本検討では、再生前 PM 堆積量が異なり、目標再生温度が同一の実験データを用いてモデルの最適化を行い、以下二点の知見を得た。

- DPF 強制再生時における実験値相当の温度分布をモデルの入力値として与えることで、再生後の DPF 内部 PM 堆積分布傾向を予測することが可能
- DPF 中心付近の高い温度領域における PM 酸化反応データを目的関数として PM 酸化反応パラメータ最適化を行った場合、低い温度域である外周部の再生率が実験値より低く見積もられる

7　今後の予定

DPF 強制再生中の温度分布、再生前後の PM 堆積量分布を予測するモデル構築のための、今後の取組み二点を以下に示す。

- 低温域における再生実験データを用いた PM 酸化反応パラメータ最適化、PM 酸化反応速度再現精度の向上と再生後の PM 堆積量分布予測精度検証
- DPF 上流において生じていると考えられる温度分布要因の特定と 3D CFD による DPF 入口の流速分布及び温度分布予測手法の開発（DOC 入口温度分布測定と DOC を含めた一体化モデルの構築）

8　おわりに

本文献は自動車技術会論文集 54 巻 2 号に掲載された論文を加筆修正のうえ、報告するものである。

参考文献

(1) 掛川俊明，クリーンディーゼルの可能性新長期規制の概要と大型ディーゼルの排出ガス低減技術，自動車工業，42 巻，3 号，(2008)，p.14-20
(2) Radhakrishnan Shankar, et. Al.: Investigation of Temperature Distribution inside the Diesel Particulate Filter (DPF) during the Drop to Idle Test (DTIT) Performed at Steady-State and Worst-Case Driving Cycles,SAE technical paper 2021-01-0201 (2021)
(3) Shigeki Nishina, et. al.; Novel Nondestructive Imaging Analysis for Catalyst Washcoat Loading and DPF Soot Distribution Using Terahertz Wave Computed Tomography, SAE technical paper 2011-01-2064 (2011)
(4) 今田忠紘ほか，狭帯域マイクロ波を用いたディーゼルパティキュレートフィルター（DPF）中粒子状物質（PM）堆積量検知技術，自動車技術会論文集，49 巻，2 号,(2018)，p.259-264
(5) Zhenhua Guo and Zhaoyan Zhang: A One-Dimensional Numerical Model for Diesel Particulate Trap Performance Study during Loading and Regeneration, SAE technical paper 2005-01-0961 (2005)
(6) 植西徹，Diesel Particulate Filter の内部輸送現象の研究，早稲田大学博士学位論文（2016）

著　者


中村　圭介


酒井　順司


小澤　恒


石川　直也

論文・報告

AI を用いた画像検査システムの内製化

Internalization of Image Inspection System Using AI

山出　直弘*　　泉　直人**
Tadahiro Yamaide　　Naoto Izumi

要　旨

プレス工程は素形材の成形工程から部品の組付けを行う組立工程を有し、インラインで検査を行い製品の品質を確認している。

例えば、板金プレス成形部品の外観検査において、検査員はプレス成型品の割れや、ゴミ凹、ひずみなどの多種多様な不具合を全数目視にて確認している。しかし、目視検査は、まれに検査員が後工程で修正できない重要欠陥不具合（プレスの割れや仕様間違い）を見逃し、最終製品自体の廃棄となり、多大な費用損失につながる課題を抱えている。この見逃しを防止するために検査員の増員やチェックポイントを追加するとコスト増につながってしまう。そこで、検査工程で AI を用いて自動で画像から検査を行うシステムを内製し、導入したのでその報告をする。

Abstract

In the pressing process, we perform an inline inspection to confirm the quality of the products after molding. For example, during the visual inspection, inspectors check for various defects such as cracks, dents, and distortions of the items by visually inspecting each piece. One of the challenges with visual inspection is that inspectors sometimes overlook critical defects that cannot be corrected in subsequent processes, leading to the disposal of the final product, which in turn lead to significant financial loss. Increasing the number of inspectors or adding more checkpoints might be considered to prevent that, but it would result in higher costs. Therefore, we have developed and introduced an in-house system that uses AI to automatically inspect images in the inspection process, and this report outlines our findings.

1　はじめに

プレス部品の製造においては、作業者が複数の金型でピアスパンチの切替えレバーを操作し、穴の打ち分けや組合せを変更して任意の仕様の穴があいたパネルを生産している。そのため作業者の切替えレバーの設定ミスや金型、設備不具合によるピアスパンチの切替え動作不良が発生すると指定の位置に穴があいていないパネルや、意図しないところに穴があいたパネルが生産されてしまう場合がある。

そこで、仕様と違うパネルが生産されていないかを確認するために、検査員は生産ロットの初、中、終品の上にガバリと呼ばれる良品パネルを重ね確認している（**図 1**）。この工程では 10 kg 以上のガバリを検査する生産パネルの上に重ねる重筋作業が発生することで、作業員が 2 人必要になったり、女性が働きにくい工程となる原因につながっている。そのため、ガバリ作業の削減、若しくは軽減をする必要がある。また、多品種生産なため、多数のパターンがあるパネルの穴数を数える必要があり、人による数え間違いが発生することがある。更に、検査作業中は、良品パネルでの確認がとれるまでは生産を止めてしまうため、検査作業をより短時間にしないと効率よく生産できない課題がある。

今回、AI を用いた画像検査装置を内製し、これらの問題を解決したため報告する。

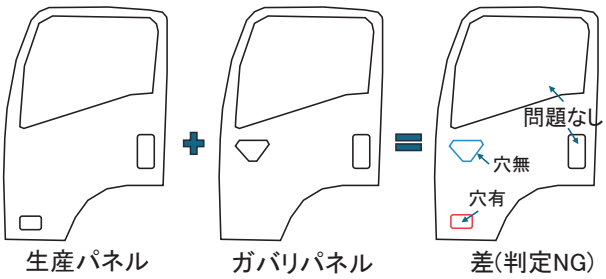


図 1　ガバリパネルでの検査概要

2　判定手法

2.1　判定手法の検討と概要

画像検査を実現するにあたり、検査員の作業フロー（**図 2**）を整理し、各作業をどのように自動化するかを

* IM 推進部　　** 車体技術部

検討した。前提条件として、検査員の目視作業はカメラ画像とする。まず初めに、ガバリパネルの重ね合せ作業の削減、若しくは軽減について検討した。ガバリ作業での目的は、生産したパネルと同じ仕様の良品パネルを重ね合せることで正規の位置に穴があいているかの確認することである。これを生産したパネル画像で実施する場合、同じ仕様の良品画像を用いて判断することが考えられるが、良品画像と同じ位置に穴があるかをどのように判断するかが問題になる。これを解決するには、良品画像と撮影画像内のパネル画像の位置合せを実施したあとに穴を検出する手法が有効であると考えた（**図 3(2)、図 3(3)**）。位置合せをしたあとに検出した穴の位置情報から、良品パネル画像と同じ位置に穴が有るか無いかを照合し、確認することで目的を達成できると考えた（**図 3(4)～(6)**）。次に多品種なため、多様な形状の穴を自動で検出する手法について検討する。各形状の穴を人間と同様に認識して検出するために AI を用いた物体検知と呼ばれる手法を用いることで対応可能と考えた。本手法は AI に穴の特徴を学習させることで、学習したデータに基づき種々の穴を検出する。これにより、人間による検出から AI による自動判定に切替えることができ、人による数え間違いや見落としを防止できる。最後に、検査時間の短縮については、ガバリパネルの運搬作業廃止などの作業削減で実現させる。次項以降で装置の構成と各フローの検証について述べる。

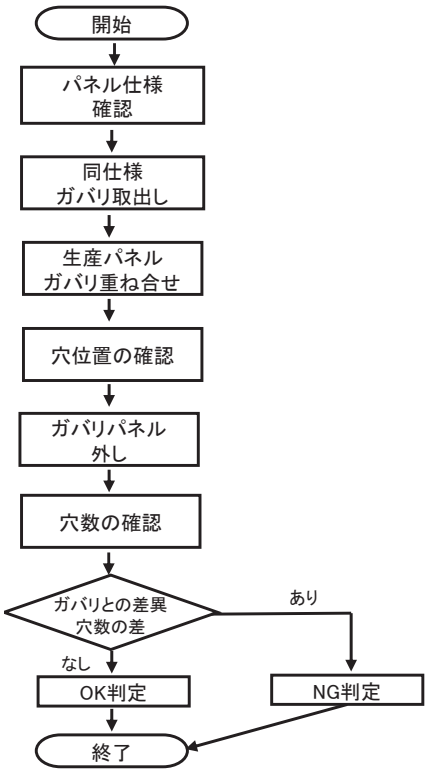


図 2　検査員の作業フロー

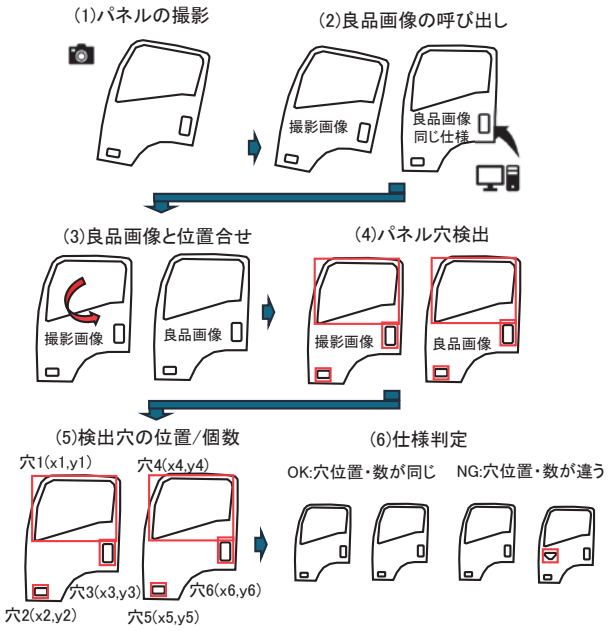


図 3　判定手法のフロー概要

2.2　装置構成

装置はパネル画像を取得するためのカメラとパネルの穴、位置を検出して判定するためのパソコンの構成になる。カメラの設置位置は作業者の邪魔にならず、人の写り込みを最小限にするために検査台の真上 1,800 mm の位置に配置した。パネルを撮影するカメラの選定の条件は、保全性に優れること、パネル（1,623 mm × 1,111 mm）の全体が撮影できること、最小穴（ϕ 7 mm）を撮影できることの 3 つになる。1 つ目の保全性に優れる条件から、使用するカメラはウェブカメラを選定した。ウェブカメラであれば、市販品で在庫が多数あり、レンズの絞りやピント調整も不要で故障した場合に直ぐに誰でも交換が可能になる。2 つ目のパネル全体が撮影できるかは、カメラ撮影の画角を設定可能な 65 °、78 °、90 ° の 3 種類で検証を実施し、全ての画角でパネル全体が撮影可能であった。そこで今回は、中間の画角 78 ° を使用することとした。3 つ目の穴の撮影は、最小穴を画像から視認するには最低 3 pix 以上必要なことが検証を実施し判明した。実際に撮影した穴画像 **図 4** からも、1 pix ではシミのように見えてしまい、3 pix 以上で穴と視認可能であることが分かる。これにより最低解像度は 7 mm/3 pix=2.3（mm/pix）以上となる。画角 78 ° の場合、2,500 mm の範囲を撮影しており、ここからカメラ画像の必要な画素数を 2,500 mm/2.3（mm/pix）=1,086 pix と算出された。この結果から、1,920 × 1,080 pix でパネル画像を取得することとした（**図 4**）。

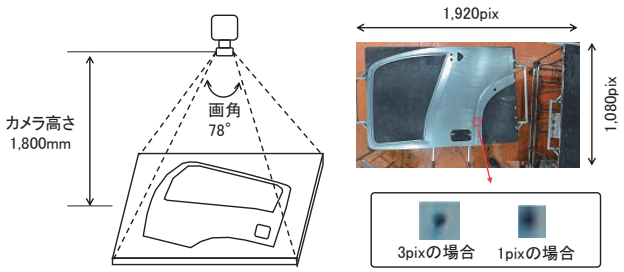


図4　カメラ設定の概要

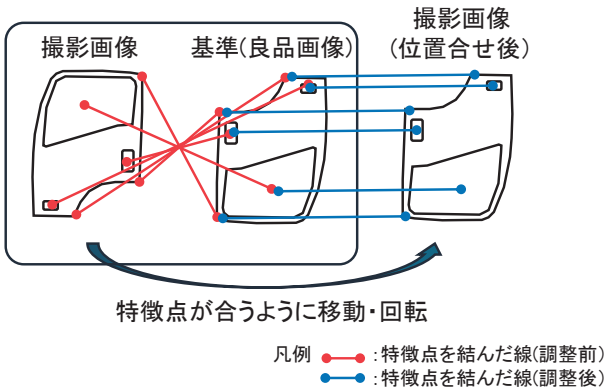


図6　自動特徴点抽出による位置合せ

3　生産パネルと良品パネル画像の位置合せ

3.1　位置合せ方法

パネルの位置合せの条件は2つあり、1つは基準パネルに対し、正確にパネルの位置合せを行えること。もう1つはパネルの向きに関わらず位置合せを行えることになる。位置合せするパネルの種類は6種類で、窓枠と取手以外の穴形状や位置が変わっている（**図5**）。このようなパネルを位置合せするために、パネルの共通する箇所を検出し、位置合せパネルの傾きと位置補正を行う方法を検討したが、プレスパネルの場合、設備や人のミスにより、必ずしも共通箇所が成形されているとは限らない。そこで、共通する箇所をあらかじめ設定しておくのではなく、AIに生産パネルと良品パネル画像から複数の共通する特徴点を抽出させ、その特徴点同士が同じ位置にくるように自動で画像位置合せする方法を検証することにした（**図6**）。



図5　パネル種類

3.2　位置合せ方法の検証

AIを用いて両画像の特徴点を抽出する場合、背景画像にも多くの共通する特徴点が存在する。その場合、両画像中のパネルの共通する特徴点より、背景の共通する特徴点を多く抽出し位置合せできない場合もあると推測される。そこで、良品パネルの撮影画像以外に、良品の画像データから背景を除去した画像データ、背景とパネルと共通する部分以外も除去した画像3種類を用意し、位置合せの検証を実施した（**図7**）。

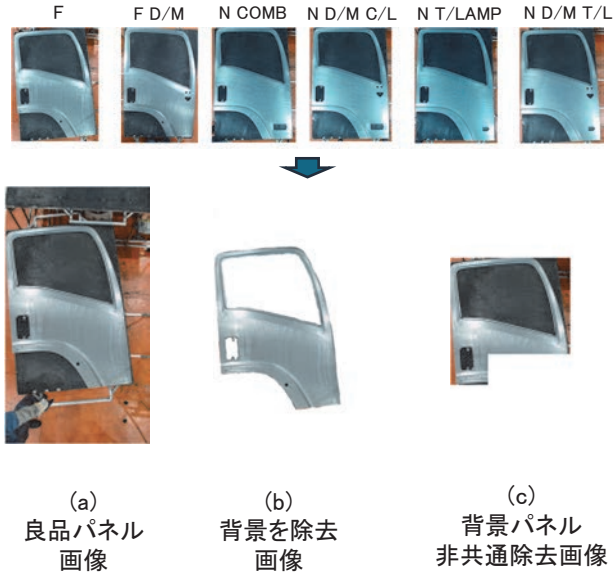


図7　基準画像

3.3　位置合せ方法の検証結果

位置合せの検証は6種類のパネル画像の中から3種類（**図5**①～③）を抽出した。位置合せを行った撮影パネル（**図5**①～③）と基準パネル（**図7(a)～(c)**）の任意の位置（1～6）6点（**図8左上図**）のズレ量（z）を水平方向（x）と垂直方向（y）のピクセルで計測し算出した（**図9**）。その結果、当初の想定どおり、良品

画像データから背景を除去していないありのままの撮影画像（図 8(a)）では、位置合せのズレ量が大きく、全く位置決めできていないことが分かった。次に、背景を除去した画像（図 8(b)）の結果は、ズレ量も小さくなっており、図 8(a) のように周辺画像の類似する特徴点が抽出されず、両画像のパネル同士間で類似する特徴点が抽出され、その特徴点で位置決めできたと考えた。同様に 6 種類のパネルと共通する部分を抜き出した画像（図 8(c)）でもズレ量が小さくなっており同様のことが伺える（図 8）。ただし、撮影パネルの向きが基準画像に対し 180 ° 回転している場合は、画像（図 8(b)、図 8(c)）ともに、両画像中のパネルが同じ向きよりもズレ量が大きくなっていた。これは、パネルの向きが大きく変化してしまうと検出される類似特徴点の数が減少し、上手く位置合せができなくなると考えられる。

単位(pix)

		撮影パネル ①	撮影パネル ②	撮影パネル ③
基準パネル	(a)	同じ向き **288** 180° 向き **位置合せ不可**	同じ向き **754** 180° 向き **位置合せ不可**	同じ向き **952** 180° 向き **位置合せ不可**
	(b)	同じ向き **10** 180° 向き **267**	同じ向き **17** 180° 向き **86**	同じ向き **24** 180° 向き **1027**
	(c)	同じ向き **17** 180° 向き **104**	同じ向き **25** 180° 向き **48**	同じ向き **29** 180° 向き **520**

図 8　位置合せ後のズレ量

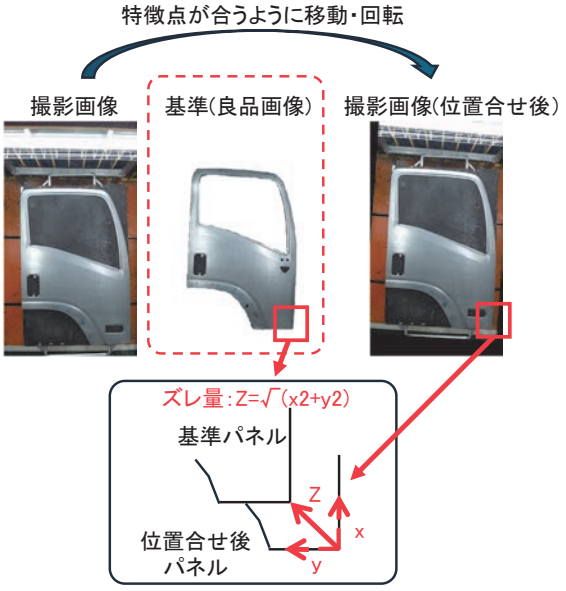


図 9　位置合せズレ量の算出方法

3.4 位置合せ結果の検証

位置合せ用の基準画像の違いにより、結果が変化したことから、AI がどの類似する特徴点に着目し位置合せを実施したか確認を行った。図 10 に線の始点と終点が位置決めに使用された類似する特徴点を示す。確認の結果、良品画像そのままの場合図 10(a) は、想定していたとおり、背景の特徴点の方がパネルより多く抽出されており、この結果、ほとんど位置合せできなかったことが分かった。背景を除去した良品画像（図 10(b)）では背景の特徴点の結びつきがなくなり、パネル同士の特徴点のみで結びあっていることが分かる。また、6 種類のパネルに共通する部分のみの画像（図 10(c)）よりも、類似する穴などで特徴点が抽出されている。これにより背景除去した画像の方が、ズレ量が小さくなったことが分かった。ただし、パネルの向きが 180 ° に変化してしまうと特徴点の抽出数が減少していることでズレ量が同じ向きよりも大きくなったことも分かった（図 11）。このことから、基準画像はパネルのみの画像でかつ撮影画像と同じ向きの方が精度よく位置合せできる。本結果より、精度よく位置合せを実施するために、位置合せ精度が良好だった図 11(b) の基準画像データを 0 ° 、180 ° の各パネルの仕様ごとに 2 種類用意し対応することにした。また、位置決めを行う際に撮影画像と基準画像の類似度をテンプレートマッチングと呼ばれる手法を用いて算出し、類似する向きに応じて、基準画像を呼び出すことにした。

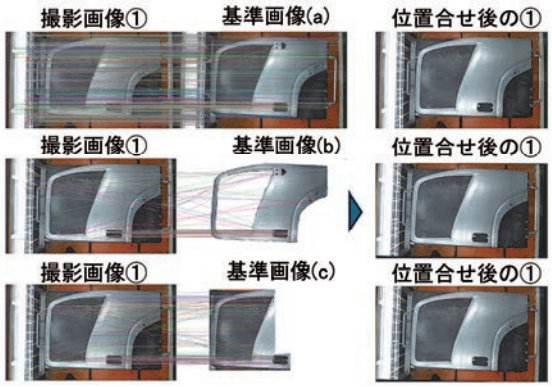


図 10　特徴点の検出

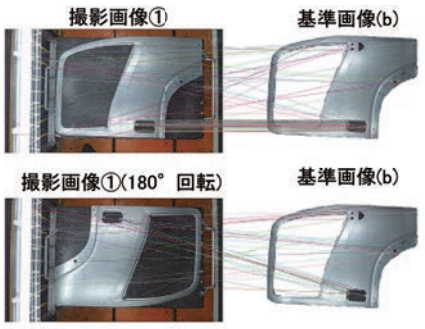


図 11　180 ° 回転画像との位置合せ比較

4　穴の検出

4.1　検出方法の検討

穴の検出は、穴が有るか無いかを画像の明暗の階調データから一定のしきい値で検出する方法もあるが、穴の形状やサイズに大きな違いがあることや、数十個以上穴があるパネルもあるため、この方法で全ての穴にしきい値のルール付けを行うのは難しく、手間がかかると判断した。そこで、**2.1 節**で述べた AI に穴の特徴を覚えさせて、人間と同様に穴を検出する物体検知手法を採用した（**図 12**）。

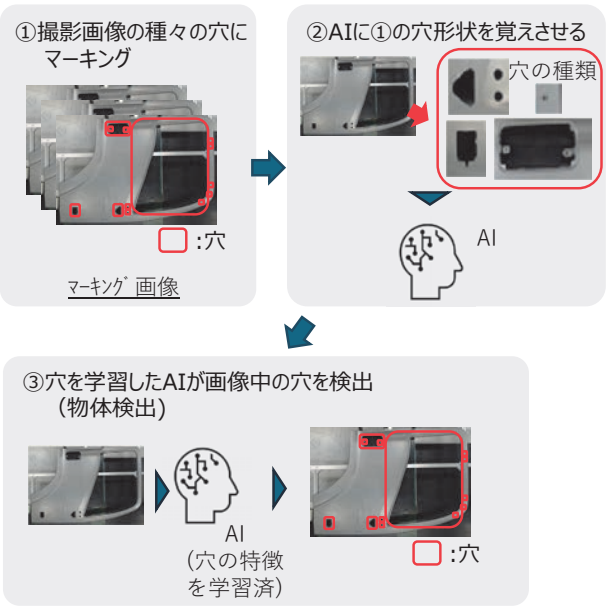


図 12　AI による穴の検出方法

4.2　検出方法の検証方法

穴の検出にあたり、AI にどのようなカテゴリで学習させた方がよいのか検証を実施した。AI は穴の形状やピクセルの変化から穴を穴と判断すると推測し、人間と同様に、全てを穴と教える方法と、穴の形状ごとに AI の学習に違いがあることも考慮し、形状ごとに分けて覚えさせる方法の 2 種類で検証を行った（**図 13**）。

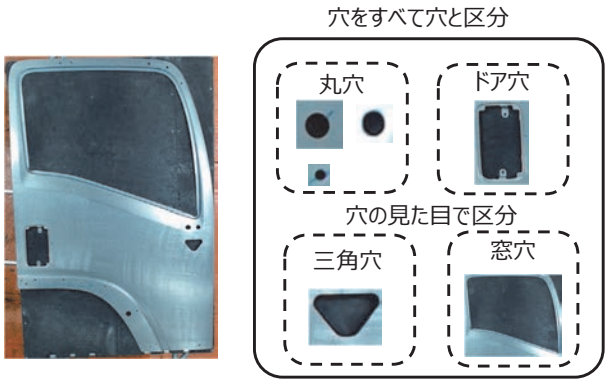


図 13　穴を形状ごとに分けて学習

4.3　検証結果

穴を 2 種類の方法で学習し、パネルの穴を AI に検出させた結果を示す（**図 14**）。穴形状ごとに学習させた場合は、三角の穴を三角形状と認識して検出していることから、AI が覚えさせた穴形状の分け方に応じて学習し、検出していることが分かる。これは、AI が学習する際にフィルタと呼ばれる処理を実施し、形状などしきい値では設定が難しい条件を学習しているためである。そのため、穴を全て穴と学習させても、形状ごとに学習させても問題なく、人と同じようにパネルの穴位置に関係なく穴を検出できる。2 種類の方法でともに穴を検出できたが、本稿の目的は穴の有無検出のため、今回は全て穴と学習し検出する手法を採用した。

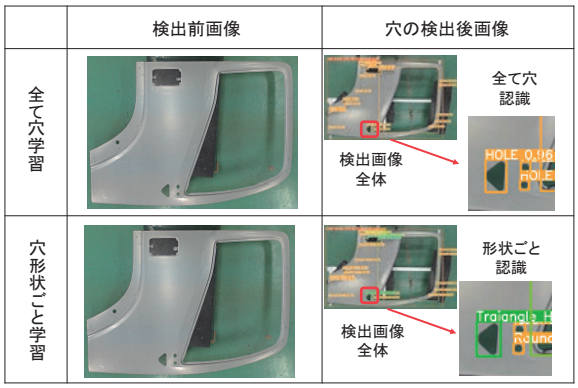


図 14　AI による穴の検出結果

5　量産検証

パネル位置合せと穴の検出の検証結果から判定までのフロー（**図 15**）を考案した。生産パネルを検査台に運搬後、判定したい仕様パネルデータを品番情報の入力から呼び出す。次に、生産パネルを撮影し、呼び出しておいた良品パネルデータ 0°、180° の向きの画像とテンプレートマッチングを行い、類似度を算出させる。算出結果より類似度が高い方が同じ向きの良品画像になるため、そのデータを使用し、生産パネルと良品パネル画像の自動位置合せを行う。その後、生産パネルの穴の検出を実施し、検出した穴が良品の穴数、位置データと差異がなければ判定 OK、差異があれば判定 NG を出す。NG 判定の場合は、差異が発生した箇所を生産パネル画像上に赤枠で示し、工程の作業者へ直ぐにフィードバックを行えるようにした（**図 16**）。

次に、本システムの精度検証を行った。生産が行われる昼と夜でそれぞれ 20 回ずつ良品パネル 6 種類を判定した。また、不良も判定可能か検証するために、不良パネルを製作し各 5 回ずつ判定した。穴を検出するための AI のデータはあらかじめ、昼夜で撮影した画像から学習させた。判定結果より、良品、不良品ともに昼夜に関わらず 100 % の精度で判定可能であった（**図 17**）。

最後に、本システムにより検査時間がどのくらい短縮できるか検証を実施した。従来作業のガバリパネルの準備や搬送時間の削減、穴位置や穴数の確認作業の短縮により全体で 103 sec/ 回の検査時間の短縮になった。

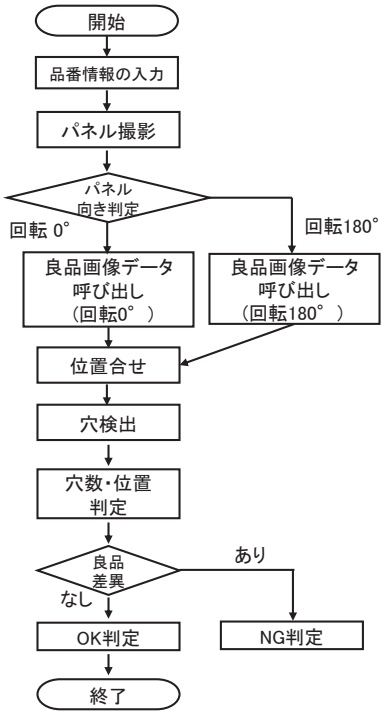


図 15　判定フロー



図 16　NG 判定画面



正解数/判定数

		パネルの種類					
		①	②	③	④	⑤	⑥
良品判定	昼	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20
	夜	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20
不良判定	昼	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5
	夜	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5

図 17　判定結果

目視検査時間

項目	作業時間(sec)
検査台へのパネル移動	15
ガバリパネル準備	50
ガバリパネル重ね合せ	10
穴数・位置検査	25
ガバリパネルの片付け	20
合計:	120

自動画像検査時間

項目	作業時間(sec)
検査台へのパネル移動	15
穴数・位置検査	2
合計:	17

図 18　作業時間の削減結果

6　おわりに

(1) 位置決めせずに撮影したパネル画像を良品パネルデータと位置合せするために、AI の特徴点検出を用いて検証した結果、次のことが明らかになった。
　① 位置合せには背景の特徴点も含まれる。また、パネルの向き 180 ° 変化すると特徴点が減少し、位置合せ精度が低下する。
　② 位置合せに不要となる背景除去やパネルの向きに応じた位置合せ画像を準備することで位置合せ精度が向上した。

(2) AI による穴形状の検出を検証した結果、AI は穴を形状ごとに区別して認識できることが明らかになった。

(3) AI を用いた画像検査システムを量産に適用した結果、次のことが明らかになった。
　① 昼夜問わず 100 % の精度で穴の検出ができた。
　② ガバリ作業の削減と測定時間の短縮により 103 sec/ 回の検査時間の削減ができた。

著　者



山出　直弘



泉　直人

論文・報告

樹脂射出発泡成形の技術開発の取組み

Efforts in the Development of Resin Injection Foam Molding Technology

江頭　崚*
Ryo Egashira

要　　旨

車両軽量化への貢献として樹脂成形部品である内装ドアトリムの軽量化に取組んだ論文である。樹脂成形の分野では軽量化を目的とした発泡成形技術の採用が拡大しており、いすゞの内製工場では 2011 年から試作研究を開始した。新型エルフへの初採用を目指し、工法確立に至るまでの取組みについて示す。

Abstract

This paper is about efforts to lightweight interior door trims, which are resin-molded components, contributing to vehicle lightweighting. Foam molding technology aimed at weight reduction has been increasingly adopted in the field of resin molding. Isuzu's in-house manufacturing facility began prototype research in 2011. The paper outlines the efforts made towards establishing the methodology for the initial adoption in the new Elf model.

1　はじめに

地球の「運ぶ」を創造するイノベーションリーダーとして、いすゞ自動車は地球にやさしい車づくりを目指し CO_2 排出量削減に直結する燃費向上、すなわち「軽量化」へ取組む必要がある。新型エルフでは意匠性向上や軽量化を目的として内外装が刷新され、内装ドアトリムには、いすゞ自動車初の技術となる発泡成形を採用した。発泡成形は射出成形において微細な気泡構造を持った成形である。各乗用車メーカーでは 2005 年頃から本技術の採用が拡大されている。

図 1 に示すように、いすゞ自動車では 2011 年から試作研究を開始し新型車への採用を目指した。2017 年には発泡成形の内製化を見越して電動サーボ制御を有する成形機を新設し、試作型検証を実施しデータの蓄積を行った。2021 年から量産型の玉成を経て無事に量産を開始することができた。本報では、工法確立に至るまでの取組みについて報告する。開発目標としては従前車比 20 %の軽量化である。

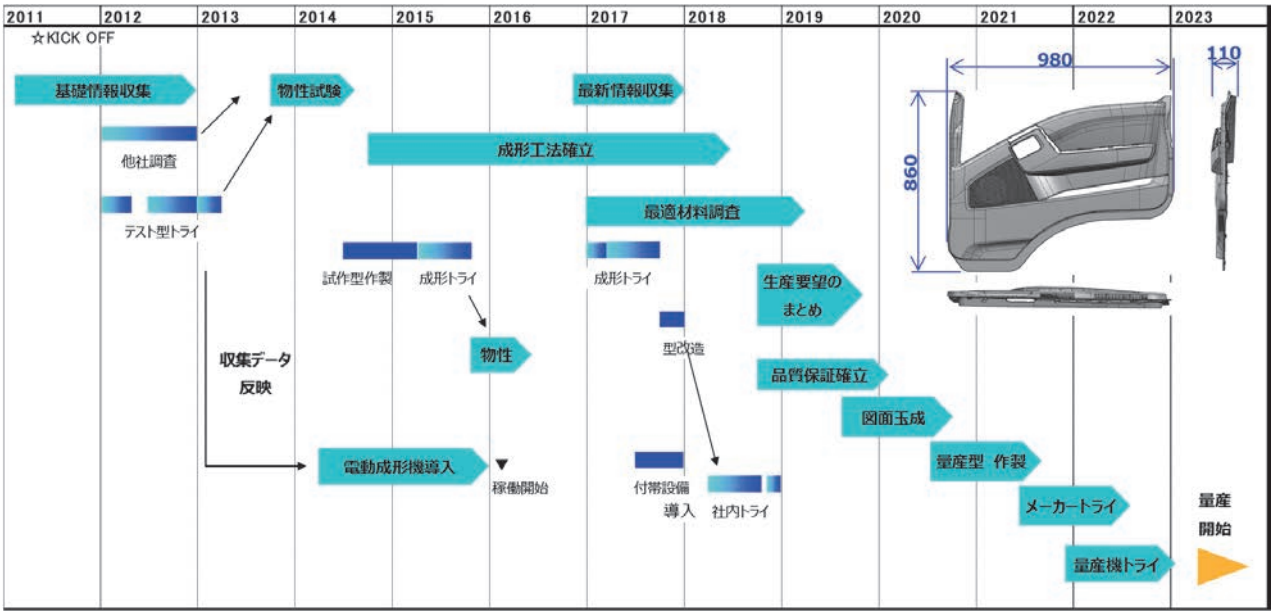


図 1　いすゞ内製 発泡成形技術開発年表

*車体技術部

1.1 発泡成形における軽量化の原理

通常の成形品（ソリッド品）と発泡成形品の断面図を**図 2** に示す。発泡成形品は発泡材の添加により、ソリッド品と比較して微細な気泡構造を形成する。

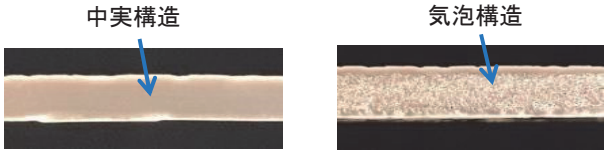


図 2　ソリッド品（左）と発泡成形品（右）の断面

一般的に樹脂製品における軽量化の取組みとして、製品の薄肉化が行われている。しかし、薄肉化することにより製品の剛性が損なわれるため、剛性を必要とする部品では薄肉化に限界がある。そこで**図 3** に示すように、薄肉化した製品を発泡させることで、板厚を増やし通常製品と同等の剛性を確保する。投入する材料は、薄肉製品と同重量のため、剛性を確保しつつ軽量化が可能となる。

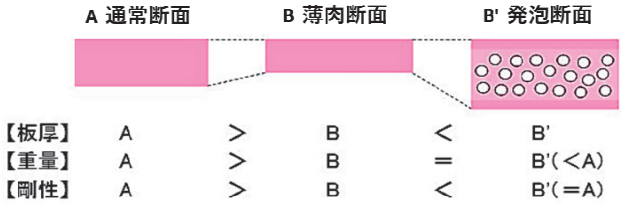


図 3　軽量化のしくみイメージ

図 4 に示すように、発泡成形技術は二つの工法に大別される。溶融樹脂に溶かし込んだ炭酸ガスまたは窒素ガスから気泡を発生させる「物理発泡」と、主材と発泡材を混合し熱分解若しくは化学反応させ気泡を発生させる「化学発泡」に大別される。物理発泡では、ガス注入の専用設備が必要となり初期投資が増える。また、自動車内装部品の肉厚と比較して、より板厚を厚くする必要がある部品に採用されることが多い。内装ドアトリムへの採用は化学発泡成形が適当と判断し、開発に取組んだ。

		発泡剤	成形機	発泡倍率(＊)	初期投資
発泡成形	化学発泡	化学発泡剤MBを混ぜる	成形機のみ（精密＆高速作動がベスト）	～2倍程度	低
	物理発泡	CO_2 やN_2 ガスを直接注入	成形機に専用の設備が必要	2倍以上可能	高

（＊）発泡後厚さ／初期厚さ

図 4　物理発泡と化学発泡の違い

1.2 射出発泡成形の工法

初めに、通常の射出成形の工程を**図 5** に示す。通常成形では、成形機に投入した樹脂ペレット（主材）を加熱、溶融し金型へ射出する。その後、充填、保圧、冷却工程を経て金型から製品を取り出す。このとき得られる製品は、気泡構造を有さない中身の詰まった構造となる。本開発では主材にポリプロピレンを使用した。

次に、化学発泡成形の工程を**図 6** に示す。化学発泡成形では、主材に発泡材を混合し成形機に投入し、シリンダで加熱溶融され金型に充填される。充填後にCB（コアバック）と呼ばれる金型を 1.0～2.0 mm 程度、瞬時に開く動作を行うことで発泡材から発生したガスが膨張し、気泡構造を有した製品が形成される。CB 動作の量で製品板厚をコントロールするため、通常の成形とは大きく異なり高速・高精度に制御するための成形機が必要となる。

また、主材と発泡材の混合比率は試作型を用いて検証した。発泡材が少ないと**図 2** に示す気泡構造が不十分となり、多いと外観不具合（スワルマーク）を引き起こす。スワルマークの詳細については後述する。

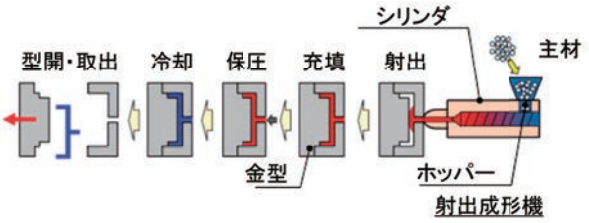


図 5　通常の射出成形工法概略図

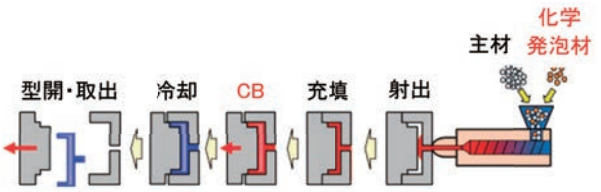


図 6　射出発泡成形工法概略図（化学発泡工法）

CB 動作に関して詳細を**図 7** に示す。

(1)　充填

約 200 ℃に溶融された樹脂材は、約 30～40 ℃に冷却された金型へ約 3 秒間かけて流入される。金型に触れている樹脂の表面（スキン層）は、熱交換により固化しているが、内側（溶融層）は固化していない状態となり、圧力が高く発泡していない。

(2)　CB

金型を少し（1.2 mm）開き圧力を急激に減少させる。圧力の減少に伴い、溶融樹脂内で発泡材から発生したガスが膨張することで、気泡構造を有した製品が形成される。

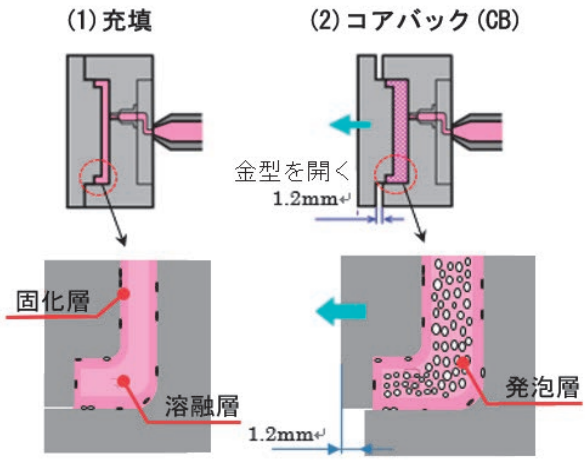


図 7　CB と発泡層形成の関係

適切な製品形状を得るためには、CB 動作とシボの関係性が深いということがわかった。シボとは金型に模様をつける金属微細加工のひとつで、薬品によって金属を溶解するため「化学腐食」とも呼ばれ専門メーカーにて施工しており、主に金型のキャビ面（製品の意匠となる面）に加工をすることが多い。表面に凹凸がないシボ施工前の状態（**図 8**）から、新型車ドアトリムはレザー模様（**図 9**）、従前車ドアトリムでは幾何学模様（**図 10**）とさまざまな加工が可能である。



図 8　ドアトリムのシボ 施工前



図 9　新型車ドアトリムのシボ 施工後



図 10　従前車ドアトリムのシボ 施工後

発泡成形では、金型の意匠面にシボの凹凸があることによりスキン層の食いつきが発生しアンカの役割を担う。シボが良好な発泡状態を助長するため、施工前後では発泡挙動が大きく変化する。**図 11** に示すように、シボ施工前の凹凸がない状態では意匠面への食いつきがなく CB 時にスキン層が滑り離れるため、狙いの形状が得られず苦労したが、**図 12** に示すようにシボ施工後は狙いの形状が得られた。従前車ドアトリムのような浅いシボはアンカの役割が弱いため、発泡成形には不向きである。

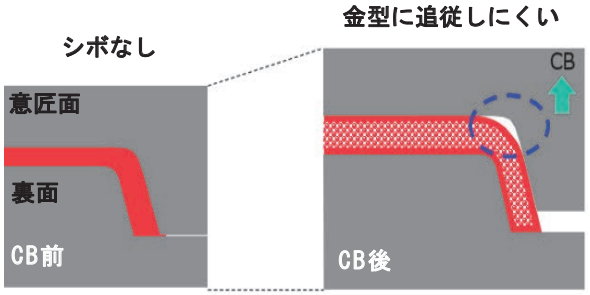


図 11　シボ施工前

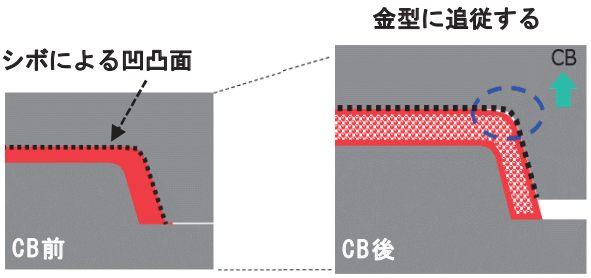


図 12　シボ施工後のアンカ効果

2　発泡成形の課題

新型車へ発泡成形採用をする上で、多くの課題が存在する。最重要課題としては、軽量化を達成した上で、従前車ドアトリムと同等の剛性保証をしなくてはならないことである。発泡成形では発泡後の板厚と気泡形成の制御が重要となり、制御が不十分な場合は製品の強度及び剛性に影響を及ぼす可能性がある。板厚の設定には、発泡倍率という数値を検討することが一般的であり、

発泡倍率＝発泡後板厚（B'）／発泡前板厚（B）

と定められる。以下 **2.1 節～2.3 節**に課題を整理する。

2.1　発泡前の初期板厚設定

前提として、新設した電動サーボ機の型締め圧力の能力を満足しなくてはならない。前述のとおり、軽量化のためには樹脂の投入量を削減する。投入量を削減するには、板厚を薄くする必要がある。板厚が薄いと樹脂の冷却固化が促進され製品の端末まで充填させる際に、射出圧力が高圧となり成形機能力を超える懸念がある。

2.2 発泡倍率の設定

発泡倍率＝発泡後板厚（B’）／発泡前板厚（B）

B’ = 充填時の初期板厚＋ CB 動作量となる。発泡後の板厚が厚いほど剛性が強くなると予測されるため、CB 動作量を変化させ成形品にどのような影響を及ぼすか確認する。

2.3 製品剛性評価

従前車ドアトリムの板厚は 2.3 mm である。軽量化のためには、2.3 mm より板厚を薄くした上で、同等の剛性を保証する必要がある。**2.1 節**、**2.2 節**の検討結果から成形可能な板厚を導き、生産側から開発へ提示をする。

3 事前検討

新型車に発泡成形を採用する上で、**図 13** に示すように成形コンセプトの見直しを行った。発泡成形では溶融層が固化する前に CB し、発泡層を得るため高速充填が不可欠である。従来はドアトリムの外周にゲートを設定し樹脂を流していたが、新型では製品の内側にゲートを設定し、点数も増加させた。ゲート 1 点当たりの樹脂の流動長を増やし高速充填を実現した。

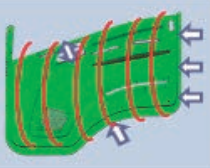
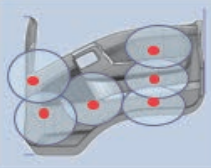
	従前(通常成形)	新型(発泡成形)
レイアウト		
ゲート点数	5 point	6point
充填時間	5s	3s

図 13 成形レイアウト比較

4 検証方法

課題解決のために、以下の手順で検証を実施した。

(1) 発泡前の初期板厚設定
流動解析ソフトを使用
設定値:樹脂温度 200 ℃、型温度 30 ℃、射出時間 3s
(2) 発泡倍率の設定（試作型で成形確認）
(3) 製品剛性評価（発泡成形品と通常成形品の曲げ弾性比較）

5 結果

5.1 発泡前の初期板厚設定

板厚を薄くした場合の解析結果を**図 14** に示す。量産機型締め圧力に対していずれ標準である安全率を考慮すると、成形可能な型締め力は**図 14** のように定められる。条件を満たし成形するには 1.8 mm 以上の板厚が必要であることが分かった。

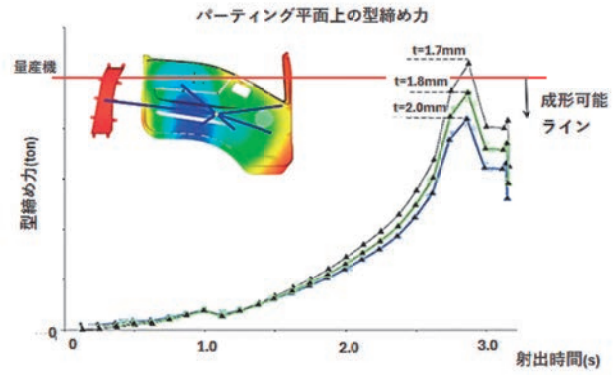


図 14 初期板厚別で解析した際の型締め力

5.2 発泡倍率の設定

5.1 節で定めた初期板厚 1.8 mm CB 動作量を 0.8 ～ 2.0 mm の範囲で変化させた結果を**表 1** に示す。CB 1.7 mm を超える場合は発泡層の気泡構造が均一に保てず空洞（中割れ）が発生した。成形品の割れの起点となる可能性があるため、品質として満足できない。中割れが発生しない条件を考慮し発泡倍率は 1.8 以下と定めることができた。

並行して CB 速度が発泡層に与える影響を検証した。CB 量 1.2 mm、発泡倍率 1.67 を固定値とし CB 速度を 3 段階変化させ、比較した結果を**表 2** に示す。CB 速度が遅いと発泡層が形成されないことが確認された。CB 動作を高速･高精度に制御するための成形機仕様の必要性を再認識した。

5.3 製品剛性評価

5.1 節及び **5.2 節**の検証結果をもとに曲げ弾性率を比較したグラフを**図 15** に示す。縦軸 F/ δ は試験片が 10 mm たわむのに必要な荷重である。従前車ドアトリムの曲げ弾性率は 2.5 であるため、それ以上の数値が剛性評価として必要となる。要求を満たす発泡倍率は約 1.35 以上と定められる。また、**5.2 節**の検証結果より発泡倍率 1.89 以上は中割れが発生するため、商品性が担保されない。以上の結果より、現行同等の剛性条件を満たし中割れが発生しない条件を考慮すると発泡倍率は 1.4 ～ 1.8 の範囲となる。

表 1　CB 量を変化させた際の発泡成形断面

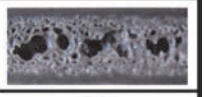
CB量(mm)	0.8	1.2	1.4	1.7	2.0
理想板厚(mm)	2.6	3.0	3.2	3.5	3.8
製品板厚(mm)	2.6	3.0	3.1	3.4	3.5
倍率	1.44	1.67	1.72	1.89	1.94
断面写真					
中割れ	○	○	○	×	×

表 2　CB 速度を変化させた際の発泡成形断面

	ソリッド品	発泡品		
CB量(mm)	0.0	1.2	1.2	1.2
CB速度(mm/s)	—	10	100	300
理想板厚(mm)	—	3.0	3.0	3.0
製品板厚(mm)	1.8	2.0	3.0	3.0
倍率	—	1.67	1.67	1.67
断面写真				

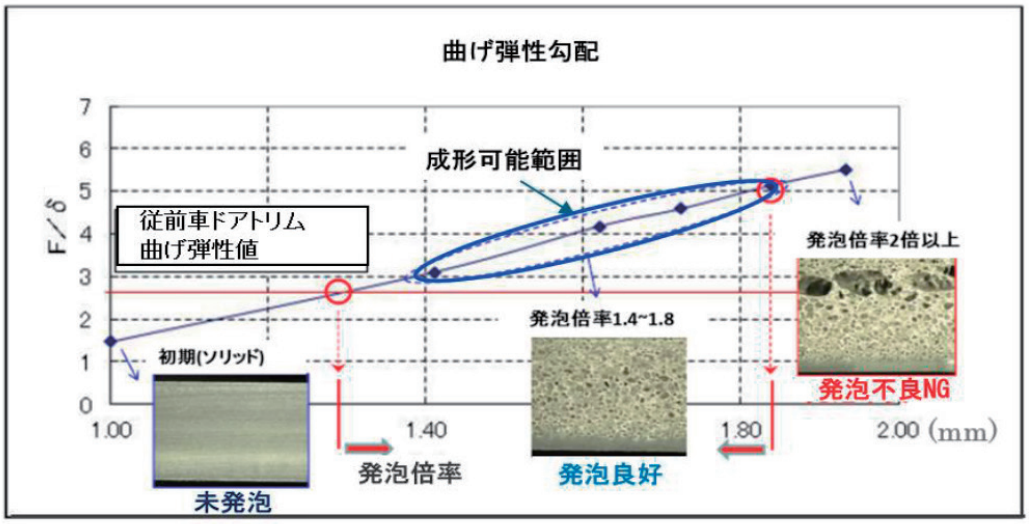


図 15　発泡倍率と曲げ弾性の関係 並びに発泡断面比較

6　考察

軽量化達成へ向けた薄肉化、良品確保へ向けた溶融状態での CB を実現するために、高速充填が不可欠であった。樹脂の固化を抑制する目的としたゲートレイアウト変更はおおむね予測どおりの効果が得られ、解析により初期板厚を設定することができた。

また、事前予測では発泡後の板厚を厚くするほど、剛性を確保できると考えていたが実際には中割れが発生し重大な製品欠陥となることがわかった。成形トライを通じて発泡倍率には上限があることを認識し、今回は成形時のばらつきを考慮した上で発泡倍率を 1.67 と定めた。

結果として、初期板厚は 1.8 mm 発泡後板厚 3.0 mm CB 動作量は 1.2 mm とし、従前車ドアトリムと同等の剛性保証を確保した上で良品を取得可能な条件を設定することができた。

7　外観不良対策

工法確立後に外観不良対策を実施した。発泡成形では発泡材が化学反応した際にスワルマーク（白い流れ状のスジ）が発生する。スワルマーク対策として代表的であるカウンタプレッシャー工法を採用した。スワルマークの発生した製品状態を、図 16 に示す。



図 16　スワルマーク（白い流れスジ）

7.1 メカニズム

スワルマークが発生するメカニズムを説明する。図 17 に示すように、金型内を流れる樹脂の先端部にて発泡材から発生した気泡が破裂することで、製品表面に破裂跡が残り白い流れスジが発生する。対策として採用したカウンタプレッシャー工法は、図 18 に示すように金型に樹脂を射出する前に金型内部を高圧エアで満たす工法である。金型内部の圧力を発泡ガスの膨張力以上に高めておくことで、流動先端の気泡の発生を抑制する。

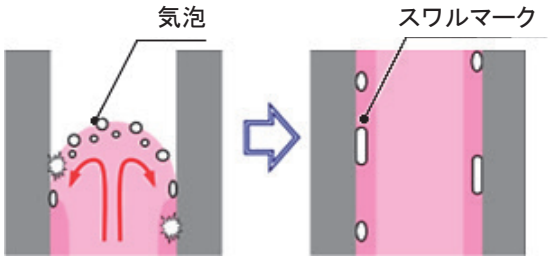


図 17　スワルマーク発生イメージ

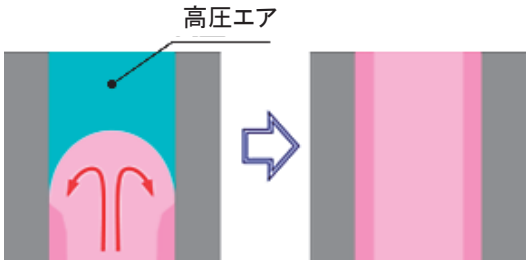


図 18　高圧エアによるスワルマーク対策

7.2 結果

カウンタプレッシャー工法の設備仕様として、外付け増圧タンクにて必要圧力まで増圧されたカウンタプレッシャーエアが、電磁バルブを介して金型内に供給される。併せて真空引き装置を接続し、CB 動作開始と同時に型内に供給されたエアの強制排気を行う。これは型内に残留エアが存在すると製品表面の凹みにつながるからである。このように給排気可能な設備仕様としたことにより、結果としてスワルマーク及び製品表面の凹みのない良好な外観品質の製品が得られた（図 19）。



図 19　カウンタプレッシャー法 採用後

8　おわりに

今回の取組みにより、軽量化と剛性保証をともに満足する工法確立ができた。量産開始時の軽量化の効果としては 14 ％の重量低減が実現された。設計変更等の対応により目標 20 ％低減に対して 6 ％の未達となったが、次期車種では部分的な偏肉などの工夫を反映し、更なる軽量化実現に挑戦したい。発泡成形の技術が本車種で途絶えることなく、ドアトリム以外の部品にも展開することを目指して技術力の進化に取組みたい。研究から立上げまで、携わっていただいた関係者の皆さまありがとうございました。

著　者



江頭　崚

論文・報告

Light Duty Battery Electric Vehicle – Battery Degradation Modeling

Sparsh Saxena* Bharat Kudachi*

Santhosh Pasupathi * Gerald Bergsieker *

Abstract

This paper presents a case study conducted by Isuzu Technical Center of America on calculating Lithium-ion battery degradation patterns. For hybrid electric cars, plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs), and all-electric vehicles, energy storage technologies, and batteries are often necessary (HEVs). As soon as these batteries are used for the first time, they begin to deteriorate. This is due to the battery's inherent chemistry which results in inevitable chemical reactions that happen inside the battery while it is running. ISUZU engineers are using the GT-AutoLion tool to predictively model the electrochemical processes within Lithium-ion cells using a fast and reliable, electrochemical, physics-based approach and real-world battery information. To feed this tool, we gathered valuable battery information from a light-duty BEV Prototype. The information was recorded at 3 different milestones: BOT (beginning of the test), 7,500 miles, and 15,000 miles. After analyzing this data at each milestone, the battery degradation pattern was studied and further this data was used to validate the developed battery model. This approach ensured that the simulation results was consistent with the actual data collected.

Note: All the scaled results showcased in this paper are representative values and not the actual production vehicle performance.

1 Introduction

A class of rechargeable battery types known as lithium-ion batteries transfer lithium ions from the negative electrode to the positive electrode during discharge and back again during charging. The many varieties of lithium-ion batteries have different chemistry, performance, cost, and safety properties.

Li-ion batteries provide several benefits over other high-quality rechargeable battery technologies (lead acid, nickel-cadmium, or nickel-metal hydride). The energy density of these batteries is among the highest available (100-265 Wh/kg or 250-670 Wh/L). Additionally, several companies are actively pursuing the creation of revolutionary electrode materials based on both insertion reactions and predominantly conversion reactions, solid electrolytes, and lithium metal anodes to increase energy density or improve the performance of batteries.

2 The surge in Lithium-ion usage

Since its development, lithium-ion technology has been employed in a broad range of products, from large ones like electric cars, ships, and airplanes to little ones like hand tools and cell phones, etc.[2]. In the current automobile industry, all the main OEMs are aiming to develop electric vehicles (EV) with zero carbon footprint, to achieve that goal lithium-ion batteries with higher energy densities are being used to meet the high-power and energy demand in the EVs, additionally, these power sources are also anticipated to join the utility business for grid-energy storage[3]. One of the biggest problems with lithium-ion batteries is battery deterioration, which is difficult to pinpoint because it can be caused by a broad range of factors. However, the main factors that impact battery health and cause battery deterioration include operating and storing circumstances such as overcharging, deep draining, charging at a high C rate, storing at full SOC, and operating and storing in hot temperatures [2].

* Isuzu Technical Center of America, Inc.

Battery deterioration is also brought on by internal chemical processes such as corrosion, SEI layer development, and damage to the anode's crystalline structure.

The degradation is divided into three stages: acceleration, stabilization, and saturation. It's very critical to decide on the length of the battery warranty, which will influence the sales of the product. If the warranty is short, customers might not buy the product, but if the warranty is too long then the company might pay too many warranty claims.

The EV's automotive engineers are not particularly knowledgeable when it comes to battery development; instead, they commonly purchase battery cells from various suppliers and incorporate them into the final product [4]. However, battery life and durability can be accurately predicted using software battery models. Battery modeling is a useful technique for replicating the fundamental characteristics of batteries that depict their physical boundaries and their behavior under various situations [2]. The most precise and complicated model in the current study is the electrochemical model. We have developed a predictive electrochemical model for lithium-ion batteries using the GT-AutoLion software developed by Gamma Technologies. The projected repair costs and battery life of the battery packs used in ISUZU electric cars can then be predicted more accurately using these predictive models.

3 Database for model calibration and validation

To validate the battery model performance, we have created a database by installing data loggers in an Isuzu prototype BEV to continuously collect data from the EV truck, and the truck was subjected to run in real-world following a preset delivery usage profile making it more realistic scenario for the LD truck usage. During the run, multiple sensor data were recorded, the power drawn from the battery pack being one among them. This data will later be used to run the software model.

Three milestones were set to perform the static capacity test on the battery for degradation, The Static Capacity Test measures the charge and energy capacities of the battery between maximum and minimum cell voltages (4.05 V and 3 V respectively) when discharged at a three-hour (C/3) constant current rate. The first milestone was at the beginning of the test (BOT), the battery was tested to mark the actual staring capacity and open circuit voltage (OCV). The second milestone was after running the EV truck for 7,500 miles from BOT and the third milestone was at 15,000 miles from BOT as shown in Figure 1. At each milestone static capacity test was performed on the battery, and the real-world degradation factors were analyzed based on rated capacity.

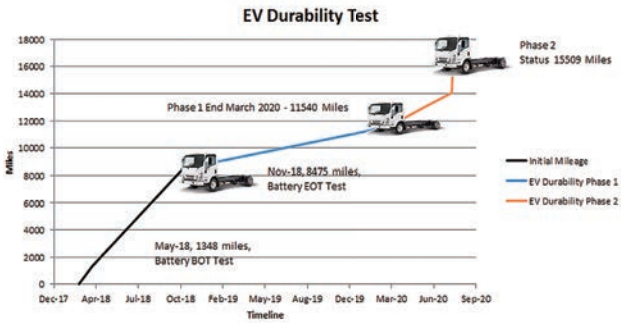


Figure 1 EV prototype test program milestones

Figure 2 shows the battery OCV vs capacity curve at BOT; after this, the battery was again tested after running the vehicle for 7,500 miles.

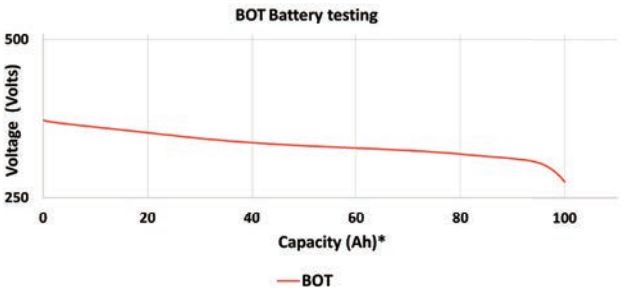


Figure 2 OCV vs capacity curve at BOT

Figure 3 shows the OCV vs capacity curve at 7,500 miles. The usable battery capacity decreased rapidly from 100 Ah to 91.90 Ah. This is a noticeable 8.09 % decrease in the capacity of the battery pack.

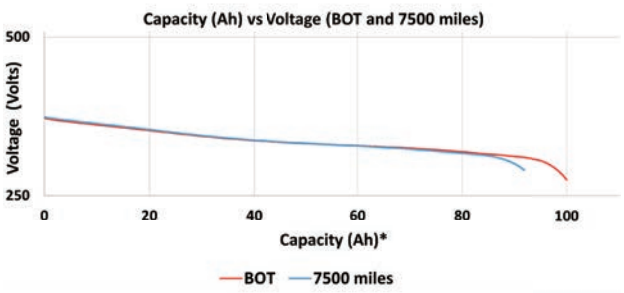


Figure 3 OCV vs capacity curve at 7,500 Milestone

As the prototype reached the third milestone, the battery degrades further by 2.33 %. The Figure 4 shows the OCV vs capacity curve at 15,000 miles compared with the BOT and 7,500 milestone value.

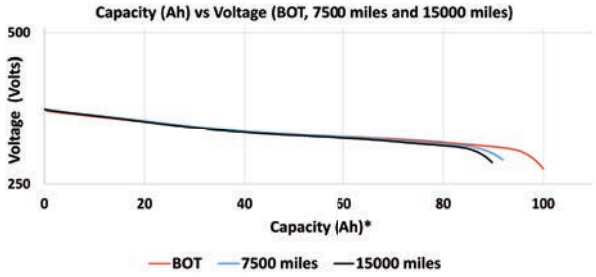


Figure 4 OCV vs capacity curve at 15,000 Milestone

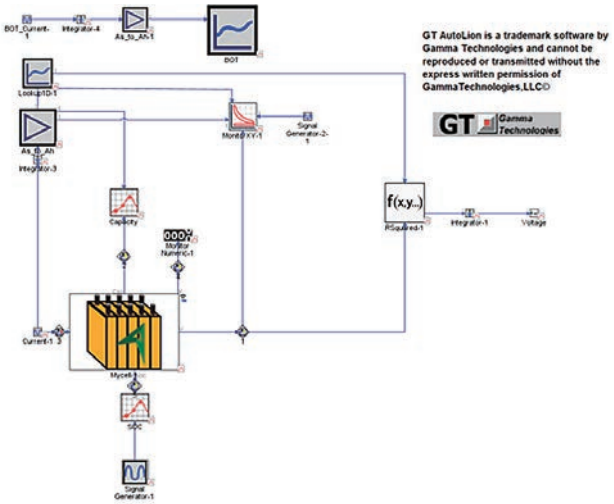


Figure 5 Battery module in GT-AutoLion and internal parameters list

The static capacity tests performed at BOT and 7,500 miles were done at Intertek testing laboratories company and EOT (End of the test) was performed at SWRI based on test procedures from the United States Advanced Battery Consortium Electric Vehicle Battery Test Procedure Manual [7], and pre-released USABC recommended testing practices at the time of testing.

In the entire demo program as the battery charge/discharge cycles increase, degradation takes place. Collecting this data will help us to calibrate and validate the predictive model performance.

4 Development of the battery model

We developed a battery model which is accurately calibrated to map the OCV and capacity of the battery pack during the BOT. The BOT-calibrated model can generate the OCV maps and battery capacity curve which are very similar to the BOT test results in the database. After BOT calibration this battery model was integrated with the EV model as shown in Figure 5. To simulate the degradation pattern, the milestones here are the same as those set in real-world testing. This battery model was set to account for SEI layer growth and anode isolation which are the major deterioration factors in a battery at the initial stages.

The battery model parameters were finely tuned using the design optimizer, wherein we need the battery pack voltage curve output of the model to match with the test data at the same discharge rate, and the capacity of the battery pack must also match the test capacity. Among multiple methods of optimization, we chose the RMS optimization method to match the OCV output of the model to the capacity of the battery pack. Since decrease in capacity and fading voltage is the result of battery degradation, the main objective of the RMS optimization method is to minimize the RMS error between the simulation OCV and test OCV. This method will yield more case-independent correlations with the test data.

Using the RMS optimizer, the capacity loading, cathode thickness, and anode thickness were optimized based on the battery limitations. At each milestone, the battery was tested by a constant discharge rate of C/3. This test was also used to validate the battery models developed, where the capacity of the battery is obtained by integrating the current flowing through the battery over time.

Table 1 shows the battery model parameters that were optimized using the DOE optimizer tool using the RMS optimizer technique.

Table 1 Battery parameters initialized

DOE Optimized Parameters	unit
Capacity Loading	mAh/cm^2
Outer Thicness	mm
Cathode thickness	microns
anode thickness	microns
N/P ratio	fraction
Jelly Roll Thickness	mm
Amount of Li lost due to SEI grouth isolation	A-h
Amount of Li lost due to Anode isolation	A-h

A virtual model of the ISUZU EV prototype as shown in Figure 6 was developed using GT-SUITE which accurately simulates the system-level performance of the prototype. This model was then fed with the data collected in real-world prototype testing. The power request from the battery model and the charging cycles is calculated from the CAN data recorded in the database [1][5].

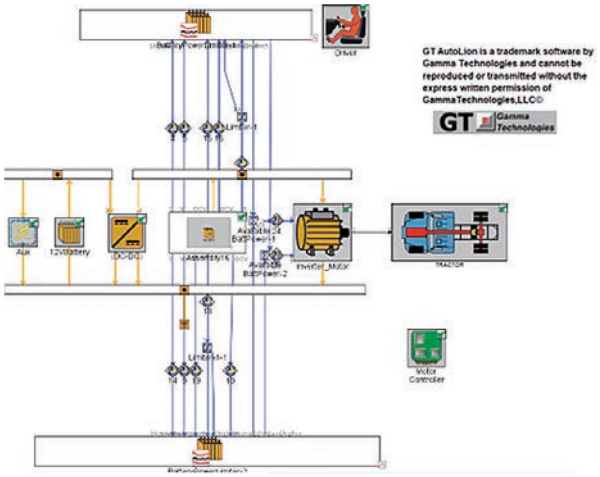


Figure 6 Battery module integrated with Vehicle model

5 Key Parameter Selection for Drive Cycle Generation

5.1 BOT

5.1.1 BOT calibration

The next step in the battery studies is to simulate and validate the predictive battery model using the performance and efficiency data obtained from the data collected from the prototype. Further, the cycling and calendar aging studies on the battery pack will be validated using the test data obtained through BOT and EOT testing at Intertek and SWRI. These test data were recorded at each milestone.

The objective of BOT calibration is to match the OCV output of the battery pack model to the capacity of the battery pack since battery degradation results in reduced cell voltage and capacity fade with respect to the cycle number. Figure 7 shows that the simulated capacity of the battery pack model is 100 Ah at the BOT, which correlates to test data.

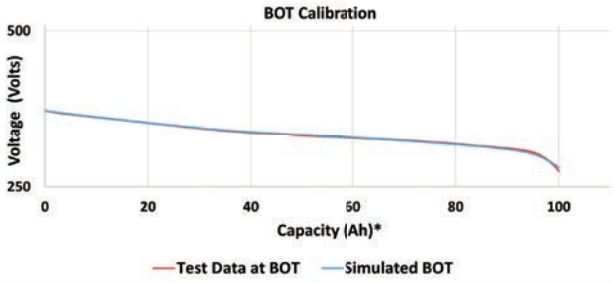


Figure 7 Simulated OCV vs Capacity curve at BOT

5.1.2 BOT Validation

The calibrated battery models were simulated to run for the same cycle as the test data and performance was simulated to compare with the raw data available from EV prototype test data (Figure 8)[5].

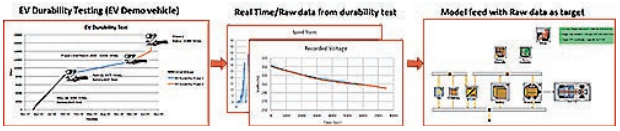


Figure 8 validating the vehicle model by running the model on raw data recorded during the real-world test

The efficiency of the battery pack recorded during the BOT test was 100 Wh/mile and the simulated efficiency was 100.65 Wh/mile, it is observed that the difference is less than 1 %.

All the efficiency values shown in this paper are scaled using equation (1) to protect the true values from being published, However, the scaled values are different from the actual numbers, but the ratio shown in this paper is the same as the data got in this case study.

$$sacled\ values = \frac{actual\ simulated\ value}{actual\ real\ world\ test\ data} \times 100 \qquad (1)$$

5.2 7,500 miles

5.2.1 7,500 miles calibration

The battery model is set to account for parameters like lithium-ion loss due to SEI growth and anode isolation. The vehicle model integrated with the BOT calibrated battery model is run for 7,500 miles to observe the performance of the battery pack at the end of the 7,500 miles [1][6].

After simulating the model to run for 7,500 miles, the degradation patterns were observed. The battery capacity was found to be degraded from 100 Ah to 92.20 Ah as shown in **Figure 9**, also the SEI-growth layer and anode isolation increased due to the charge/discharge cycles.

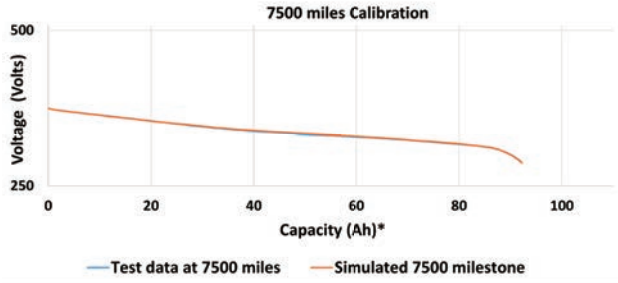


Figure 9 Simulated OCV vs Capacity curve at 7,500 milestone

5.2.2 7,500 miles Validation

Figure 10 shows voltage, SOC, and current curves simulated when the calibrated battery pack is evaluated by running the model on a drive cycle that the prototype vehicle drove initially after 7,500 miles test in real-time. This test was conducted at curb conditions, and the auxiliary system's power consumption was calculated using the actual CAN data recorded during the testing.

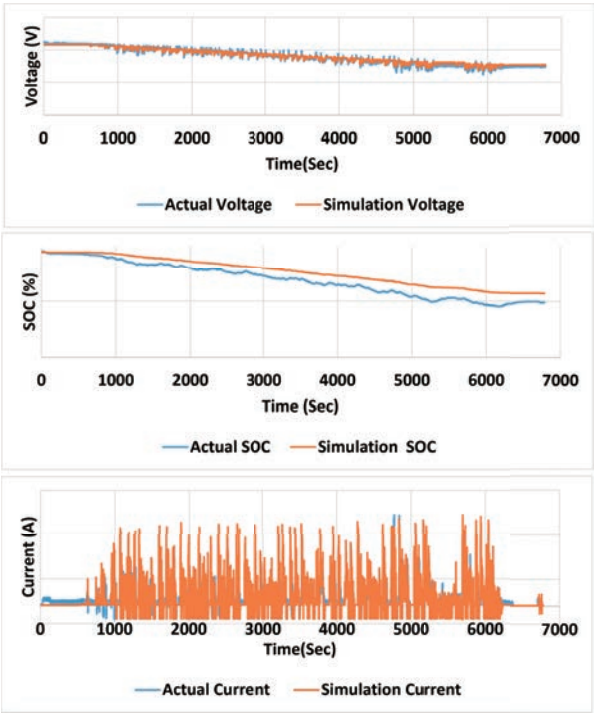


Figure 10 Comparison of Voltage, SOC, and Current from the simulated and test results

The scaled efficiency of the battery pack recorded during the end of this test was 100 Wh/mile and the scaled simulated efficiency was 99.82 Wh/mile, it is observed that the difference is less than 0.5 %.

5.3 15,000 miles

5.3.1 15,000 miles calibration

The next milestone after running the model for 7,500 miles, is 15,000 miles. The same Battery model is further subjected to aging calibration for 15,000 miles using the experimental test data from the battery pack used in the EV durability test. As seen in **Figure 11** the capacity of the battery again faded from 92.20 Ah to 89.75 Ah, caused by battery degradation [6].

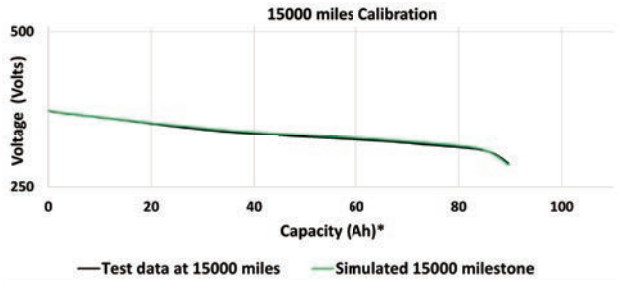


Figure 11 Simulated OCV vs Capacity curve at 15,000 milestone

5.3.2 15,000 miles Validation

Figure 12 shows voltage, SOC, and current curves simulated when the calibrated battery pack is evaluated by running the model on a drive cycle that the vehicle drove lastly after 15,000 miles test in real-time, this test was conducted at curb conditions + 1,100 pounds and the auxiliary system's power consumption was calculated using the actual CAN data recorded during the testing [5][6].

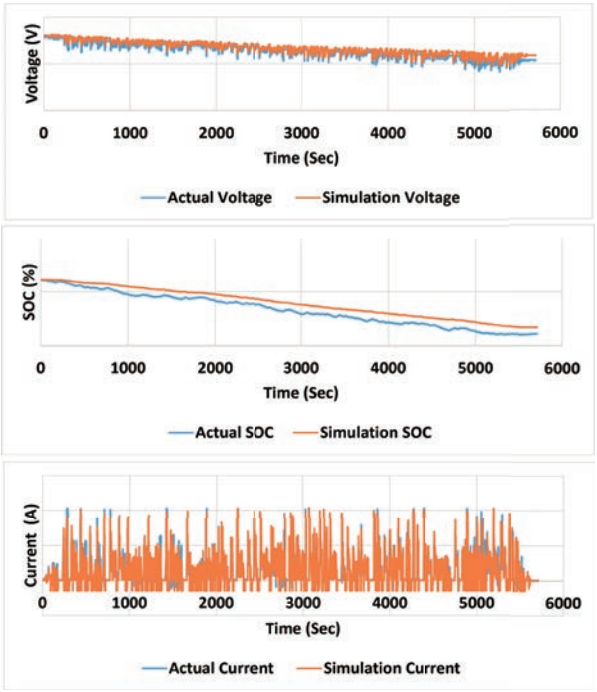


Figure 12 Comparison of Voltage, SOC, and Current from the simulated and test results

The scaled efficiency of the battery pack recorded during the end of this test was 100 Wh/mile and the simulated efficiency was 100.94 Wh/mile; it is observed that the difference is less than 1 %.

6 Results

We have successfully developed a predictive high-fidelity battery model that can be used to understand the battery limitations and provide insight into battery degradation patterns. The battery model, when integrated with the already verified EV models and with the actual customer data in hand can help predict the battery life cycle and the degradation based on continuous usage.

Table 2 portrays the difference between the real-world test data collected from the prototype and simulated data from the developed battery model. The scaled energy efficiency values are calculated using equation (1). The predictive model was able to accurately follow the battery degradation pattern as per the database rubrics. By analyzing the accurately estimated battery degradation patterns, ISUZU will be more confident in selecting components, estimating warranty for the battery packs, and helping perform the system-level performance analysis.

Table 2 Compares battery capacity and energy efficiency values for test and simulation model at each milestone

	Battery capacity (unit = Ah)		Scaled enegry efficiency values (unit = Wh/mile)	
Milestones	Realworld Test Data	Simulated Model Data	Real world testing	Simulated model efficiency
BOT	100	100	100	99.82
7500 Miles	91.908	92.208	100	100.65
15000 miles	89.759	89.75	100	100.94

Note:All the scaled results showcased in this paper are representative values and not the actual production vehicle performance.

7 Future Scope

By using the already verified models we plan to develop a control strategy/algorithm as shown in Figure 13 that can simulate the battery power and discharge cycles to act as a cyclic counter for battery degradation. We will be able to observe the battery performance for extended periods of operation (50,000 - 100,000 miles) and estimate SOH. Thermal functions to induce different ambient conditions can be simulated. ISUZU has data for different seasons of operations (Winter and Summer). Battery performance can be observed for any specific region of operation.

Figure 13 is an example of a current control algorithm replicating cyclic charging and discharging. The battery power request has been obtained from the raw data of the EV durability test at 'X' miles. The battery power and the charging data are fed into the model and the model is controlled by the specific control event managers to replicate a day of real-world usage. A look-up table oversees the overall miles traveled/cycles completed by the model. These cycles and miles are then correlated with the EV Durability sheets to change the parameters and observe the performance.

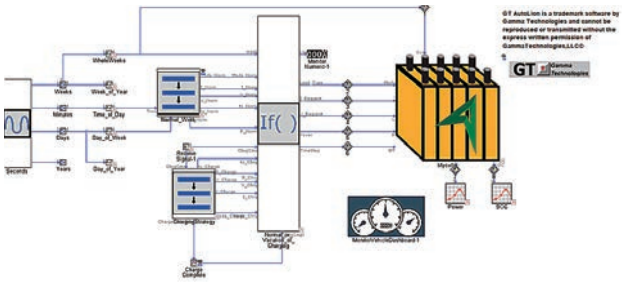


Figure 13 Example of a control algorithm to replicate cyclic charging and discharging

8 Summary and conclusion

By predictive verification process, we plan to simulate the battery model integrated with EV models to run for high mileage and determine the warranty of the battery pack using advanced model-based design techniques discussed in this paper. The conversion and successful replication of the physical degradation pattern of a battery to a chemical-based model, allows us to expand the model-based capabilities to the point where battery studies such as battery management systems (BMS), thermal control systems, etc. are not limited to environmental constraints and physical testing. Isuzu is currently working on integrating these models into its development and research for the EV domain.

Note: All the scaled results showcased in this paper are representative values and not the actual production vehicle performance.

References

(1) Xiao-Guang Yang, Yongjun Leng, Guangsheng Zhang, Shanhai Ge, Chao-Yang Wang: “Modeling of lithium plating induced aging of lithium-ion batteries: Transition from linear to nonlinear aging”, Journal of Power Sources, Volume 360, (2017), Pages 28-40, ISSN 0378-7753. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.05.110.

(2) Xing Jin et al.: “Comparison of Li-ion battery degradation models for system design and control algorithm development,” 2017 American Control Conference (ACC), (2017) pp. 74-79, DOI: 10.23919/ACC.(2017), 7962933.

(3) Shripad, Shashank, and Venkata Subramanian Viswanathan: “Evaluation of Current, Future, and Beyond Li-Ion Batteries for the Electrification of Light Commercial Vehicles: Challenges and Opportunities.” Journal of The Electrochemical Society 164 (2017): n.

(4) Gamma Technologies: “GT- SUITE AutoLion Application Manual and Calibration Procedure”

(5) Gamma Technologies: “GT- SUITE AutoLion Modeling Training”

(6) Gamma Technologies: “GT- SUITE Vehicle Driveline and HEV Tutorials: Battery Electric Vehicle”

(7) ELECTRIC VEHICLE BATTERY TEST PROCEDURES MANUAL
United States Advanced Battery Consortium LLC (USABC)

あとがき

EV 開発においてお客様ごとに使い方が違うバッテリー劣化の予測は必要不可欠な技術である。GT 社の Auto-Lion はバッテリー劣化予測モデルですが、その初期完成度は我々の期待するものではありませんでした。ITCA チームはその劣化モデルの改善と検証を行い EV 開発に必要充分な完成度にまとめ、ITCA における EV 開発に用いています。

最後に例年と同じ言葉になりますが「いすゞの中で役に立ついすゞテクニカルセンターオブアメリカ Inc. でありたい」と社員一同が一丸となって取り組んでいる様子が本報告で少しでも伝われば幸いです。

(ITCA チーフエンジニア 深井　泰雄)

著　者


Sparsh Saxena


Bharat Kudachi


Santhosh Pasupathi


Gerald Bergsieker

論文・報告

Commercial Vehicle – Development and Validation of Vehicle Dynamics Model to Aid in Handling Evaluation

Nitin Edla * Lukas Obel *

Santhosh Pasupathi * Gerald Bergsieker *

Abstract

When commercial vehicles have less than ideal lateral dynamics traveling at high speeds, those dynamics can sometimes be a significant factor in serious and fatal accidents that occur. The primary goal of this study was to create a validated vehicle dynamics model to aid in handling evaluations and a validated model that can play an important role in accurately predicting the movement of the vehicle in limit conditions. The model is used to simulate the effect on roll gradient by altering spring stiffnesses and adding a rear stabilizer for a class 6 and class 7 commercial vehicle (CV). Outputs from 4-post Kinematics & Compliance (K&C) tests of a prototype vehicle were used to model the suspension system. The tire model was developed in collaboration with Calspan [1] using physical tire testing. The vehicle masses, inertias and stiffnesses were modelled using IPG TruckMaker for Simulink (TM4SL) [2]. A constant radius turn maneuver was simulated using TM4SL, and MATLAB [3] was used for batch processing of simulation results. Simulation results were then compared to field test results to correlate the model. Once a successful correlation was achieved spring and stabilizer bar stiffness could be altered within IPG and their effects on vehicle handling could be analyzed.

1 Introduction

Model based development (MBD) is a cost effective, time saving approach to study performance and evaluate suspension and chassis changes in early stages of vehicle development. This study focuses on using MBD to help evaluate changes to the suspension system in class 6 and class7 commercial vehicles. An SAE paper by Mark Sherman and George Myers [4] shows the benefits of MBD. This paper provided a baseline to the vehicle dynamics modelling of class 6 and class 7 commercial vehicles: it showed that modelling medium-heavy duty vehicles and simulating their handling responses can significantly cut down on testing and development time and cost. This model will help in determining the most cost and mass-effective solution to improving lateral handling dynamics. Using MBD for this study will reduce the time, cost and resources that would traditionally be used to in evaluating suspension changes.

2 Modelling Approach

In IPG TruckMaker for Simulink was selected as it has several vehicle dynamics-specific modelling capabilities such as: different CV platforms, detailed tire model integration, suspension and axle modelling of varying complexity and user-friendly test and maneuver setup capabilities. TM4SL uses Simulink as the master simulation platform and IPG simply provides a GUI for model parameterization (an example vehicle model shown in **Figure 1**). The benefit of this is that it allows for custom Simulink models to be included when the IPG platform does not provide a template that is appropriate for that specific system level model. It also provides the possibility of overriding many of the quantities calculated internally by TM4SL. An example of this is the braking system, which will be covered in a later section. The following sections describe in more detail the modelling approach for the tires, suspension, brakes, and other miscellaneous items.

* Isuzu Technical Center of America, Inc.

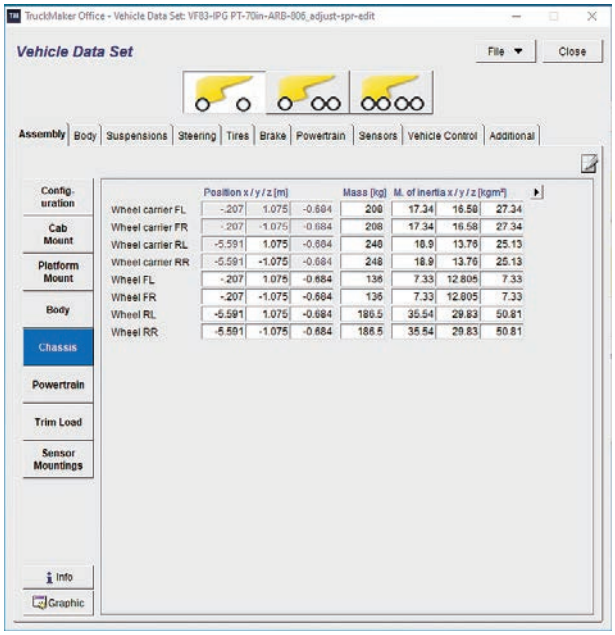


Figure 1　GUI of IPG TruckMaker

2.1　Tire Modelling

National An MF6.2 tire model [5] used in the model was developed with the help of Calspan [1], although a few alterations to the tire model were required. Neither rolling resistance nor damping was not tested for, so the initial tire model had approximations for both values.

To obtain more accurate values for the rolling resistance coefficients for use in MF6.2, [5] they needed to be re-calculated based on rolling resistance coefficients provided from the tire manufacturer. Initial constant speed simulations were performed using the original tire model provided by Calspan [1]. The rolling resistance torques were then extracted from the simulation results and then compared to a theoretical rolling resistance torque, which was calculated as shown in equation (1). Where: R_0 is the unloaded tire radius, F_z is the vertical load and C_rr is the rolling resistance coefficient provided by the tire manufacturer.

$$M_y = R_0 * F_z * C_{rr} \qquad (1)$$

The simulation rolling resistance torques are calculated from equation (2), which was obtained from Pacejka's Tire and Vehicle Dynamics Book [5]. Various parameters within this equation could then be altered to match the rolling resistance torques as calculated in (1). The main changes that were made were to q_sy3 and q_sy4, as they are the speed dependent terms. The updated tire model was able to come within 0.2 % of the rolling resistance torques calculated from the tire manufacturer's coefficients.

$$M_y = F_z R_o \left\{ q_{sy1} + q_{sy2}\frac{F_x}{F_{zo}} + q_{sy3}\left|\frac{V_x}{V_o}\right| + q_{sy4}\left(\frac{V_x}{V_o}\right)^4 + \left(q_{sy5} + q_{sy6}\frac{F_z}{F_{zo}}\right)\gamma^2 \right\} \left\{ \left(\frac{F_z}{F_{zo}}\right)^{q_{sy7}} * \left(\frac{p_i}{p_{io}}\right)^{q_{sy8}} \right\} \lambda_{My} \qquad (2)$$

Vertical damping tests were not performed during the tire model development and thus the vertical damping coefficient in the tire model is not accurate, which resulted in excessive tire oscillations during initial simulations. To counteract this the vertical tire damping was altered to match example datasets that were provided by IPG and based on a similar class 6 and class 7 commercial vehicles.

2.2　Suspension Modelling

There are many different methods to modelling the suspension system but the recommended method for use with TM4SL is a map-based approach. It uses K&C data obtained from physical testing on a prototype Isuzu vehicle. This data includes the translation of the wheel centers in xyz coordinates, the rotation of the wheel around the xyz axes and the lengths of the spring, damper, buffer and the stabilizer bar as a result of either contact patch or steering rack movement or a combination of the two. This data can then be parameterized into several tables that are accepted in a skc file format by TM4SL and is used to calculate the wheel and suspension positions and loads. A benefit of this method is that since skc files are based on vehicle test data, to a certain extent, they will also include frame stiffness in the model. The frame stiffness however might not be linear so more work is needed to be done to include frame stiffness into the suspension model, as at high lateral loads the frame could experience exponential levels of displacement compared to at lower lateral loads.

The springs, stabilizer bar and buffers were then parameterized in the TM4SL GUI with either a singular stiffness value or a force deflection curve. The dampers are parametrized in the same way by defining either a single damping coefficient or a force velocity curve.

2.3 Brake Modelling

The chosen method of brake modelling was to use a lookup table data-based model. Testing was performed on an ISUZU prototype vehicle to obtain a relationship between pedal travel, brake pressure and brake torque. The brake subsystem is turned off within the TM4SL GUI and the appropriate brake signals are then overridden within Simulink. The brake model in Simulink works by reading the brake pedal input as demanded by the driver in TM4SL and converting this to the primary brake pressure. The velocity of the vehicle and the brake pressure is then correlated with an appropriate brake torque. This calculated brake torque overrides the brake torque signal normally calculated by TM4SL. An example of the Simulink model is shown in **Figure 2**.

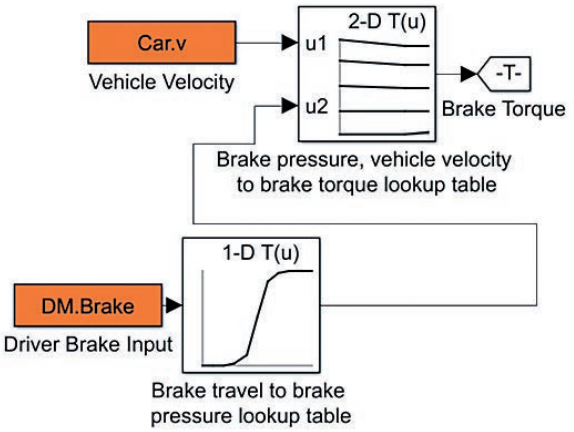


Figure 2 Brake model in Simulink

2.4 Chassis, Cab, Aerodynamics and Powertrain Modelling

TM4SL offers the ability to parametrize every system within a commercial vehicle. For the chassis and cab the masses and CG positions were obtained from CAD data and input into the GUI. The unsprung masses are split into two components, rotating and non-rotating components. An example of the TM4SL GUI showing values for the unsprung mass inputs for an example vehicle is shown in **Figure 3**.

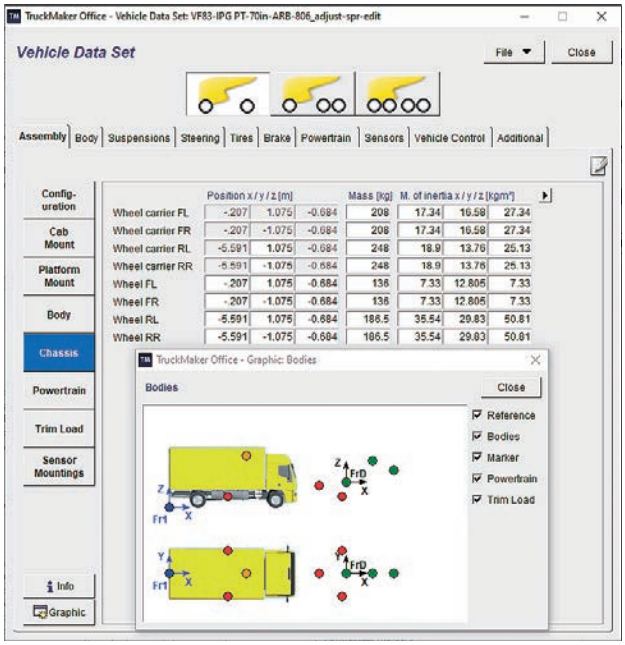


Figure 3 Unsprung mass inputs for IPG

To model the aerodynamics currently there is only a single value for each of the various aerodynamic coefficients. However further work is being done to create a lookup table for the various coefficients of drag based on vehicle heading angle.

To model the powertrain and transmission a previously validated engine model developed in GT-suite [6] is connected to a validated Simulink transmission black box model, which was provided by the transmission supplier. The TM4SL vehicle model is then connected with the transmission model to create a full vehicle model. A similar modelling method to a previous paper [7] was used, but modifications were made to include the TM4SL vehicle model. An example of the full vehicle model is shown in **Figure 4**.

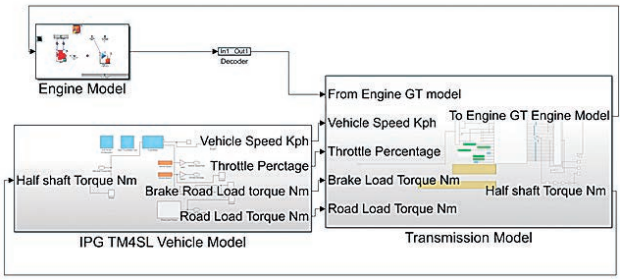


Figure 4 Full vehicle co-simulation schematic

3 Model Validation

Once the vehicle model had been parameterized the next step was to validate the model. This was done by correlating simulation data to objective test data of the ISUZU prototype vehicle. The test setups which were created are summarized in Table 1.

Table 1 Test setup summary for model validation

Test	Road/Maneuver	Purpose
Constant radius	Constant radius turn at slowly increasing speeds	To measure the roll gradient and steady state performance of the vehicle
Step steer	Step steer test at a specific start speed and a constant turn angle and rate input	Measuring transient dynamics of the vehicle

The virtual test setups were created in a way to match the physical testing procedures as closely as possible. An example of the constant radius turn road in TM4SL is shown in Figure 5.

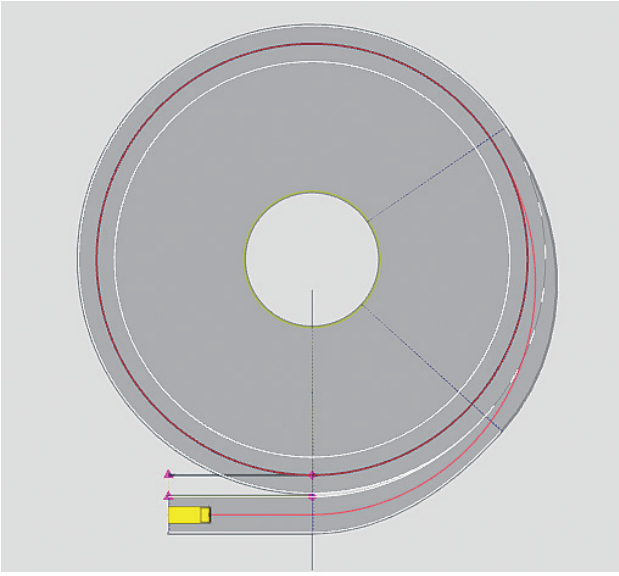


Figure 5 Constant Radius Road definition in IPG

The results of these test setups in comparison to physical field testing are shown in Table 2. All field test results have been normalized to 100 for confidentiality purposes.

Table 2 Result comparison of simulation and field testing

Test	Value	Unit	Field Result	Simulation Result
Constant radius	Roll gradient	Deg/g	100	99.21
	Steering sensitivity	Deg/g	100	102.17
Step Steer	Lateral acceleration response time	s	100	113.41
	Yaw rate response time	s	100	102.17
	Steady state lateral acceleration	g	100	110
	Steady state yaw rate	Deg/s	100	109.25

The results in Table 2 showed that the simulation model was within 3 % accuracy for steady state dynamics and mostly within 10 % accuracy for transient dynamics. This would suggest that future work is needed to more accurately model systems that are responsible for the transient dynamics such as the dampers and tires. At the beginning of the project, it was decided that our simulation results should be within 10 % of field test results. This was decided as the data available to input into the model was not accurate/detailed enough to expect a higher level of correlation. Judging by the results shown in Table 2, it would suggest that the model and field test results display an acceptable level of correlation.

4 Results and Analysis

Once model validation had been completed a study for the effectiveness of altering rear spring and stabilizer bar stiffnesses could be completed. To do this both class 6 and class 7 vehicles were analyzed at different CG heights and rear spring and stabilizer bar stiffnesses. Note that spring and stabilizer bar stiffnesses have been normalized for confidentiality. These different vehicle setups were then simulated with the same constant radius turn as used for model validation. The result of this study is shown in Table 3. A MATLAB script was created to import, analyze, process, and plot the simulation result files created by TM4SL.

Table 3 Spring and stabilizer bar stiffness study

Vehicle class/GVW	CG Height	Rear spring stiffness	Rear stabilizer bar stiffness	Roll gradient (deg/g)
Class 6 (25,950 lb)	High	1,000	N/A	100
			100	75.5
		1,614	N/A	83.99
			100	68.41
	Low	1,000	N/A	73.75
			100	57.67
		1,614	N/A	63.77
			100	50.9
Class 7 (33,000 lb)	High	1,000	N/A	120.05
			100	92.89
		1,614	N/A	102.17
			100	84.22
	Low	1,000	N/A	92.16
			100	71.65
		1,614	N/A	76.52
			100	64.34

The overall trend of these results suggests that increasing the spring or stabilizer bar stiffness will reduce the roll gradient, thus reducing the risk of rollover. It is also shown that the increasing the stiffness of stabilizer bar is much more beneficial at reducing roll than is increasing the spring stiffness. This is dependent on the stiffnesses of the individual components, but it becomes impractical to make a spring stiff enough to provide the same anti-roll characteristics as a stabilizer bar. Furthermore, a very stiff spring will cause ride quality to suffer immensely in comparison to a stabilizer bar. These results allow the vehicle planning group to better decide which combination of springs and/or stabilizer bars need to be used on the vehicle.

5 Conclusion

The handling model developed for Isuzu F-series vehicles using TM4SL for class 6 and class 7 weight categories shows good correlation to the on-road tests performed. This model may very well be used for lateral and longitudinal development of future ISUZU class 6 and class 7 vehicles. Overall, using MBD as a factor to judge the effect on vehicle handling performance by changing certain vehicle parameters allows for time and money to be saved during the development process by reducing the amount of physical testing needed.

Next Steps

As shown in the model validation section, the transient dynamics simulation results do not have the same level of accuracy when compared to the steady state dynamics simulation results. An improved tire model to include accurate vertical damping coefficients and better model-specific suspension characteristics could increase the accuracy. This could include but not be limited to a multibody suspension model for better kinematic predictions and more detailed bushing/compliance modelling. Currently the ISUZU F-series rear suspension setup consists only of a leaf spring, which is parameterized in the model. In the real-world other components such as suspension bushings and brackets contribute to the damping of the suspension system; however, this is not currently parametrized within the model. So, more work is needed to figure out how to measure and include these damping effects into the suspension model.

A full vehicle dynamics model presents an opportunity for better ADAS modelling and development of features such as ESC, AEBS, and LKAS. This model may be used in the future to better evaluate what changing the wheelbase does to handling. Isuzu trucks have a large configuration of different wheelbases. Building a model which has been validated for the largest and smallest wheelbases will allow the model to be used to help determine the handling characteristics of the wheelbases in-between. This is important as it can help avoid potentially problematic design characteristics before the vehicles go into production and are released to the market. Furthermore, since large customers sometimes request changes such as a different tire, a pre-validated model could make it possible to judge the effect of this change very quickly.

Literature

1. “Tire Testing and Research.” Calspan. Accessed October 31, 2022. https://calspan.com/automotive/tire-performance-testing.
2. “User’s Guide Version 8.1.1 CarMaker.” IPG Automotive Group, n.d.
3. “Matlab and Simulink.” Computer software. MathWorks, 2017.

4. Sherman, M. and Myers, G., “Vehicle Dynamics Simulation for Handling Optimization of Heavy Trucks,” SAE Technical Paper 2000-01-3437, 2000, https://doi.org/10.4271/2000-01-3437.
5. Pacejka, Hans. Tire and Vehicle Dynamics. Elsevier Science, 2012.
6. GT-Suite Vehicle Driveline and HEV Application Manual by Gamma Technologies (Version 2018)
7. Shetty, A., Pasupathi, S., Vernham, B., and Bergsieker, G., “Harness Model Development by co-simulation of the Transmission Black Box model and Vehicle model for a Medium Heavy Duty Internal Combustion based Powertrain,” SAE Technical Paper 2019-01-2268, 2019, https://doi.org/10.4271/2019-01-2268.

あとがき

本報告はIPG社の車両ダイナミクスモデルをGT社の1次元エンジンモデルやSimulinkでの変速機モデルと連結させたC0-Simulationの取り組み結果の報告です。サブシステムのモデルを単純なMapベースではなく、GT-SuitesやSimulinkモデルを用いることでシミュレーションによる車両の動的挙動もより実際に近いものとなります。

最後に例年と同じ言葉になりますが「いすゞの中で役に立ついすゞテクニカルセンターオブアメリカメリカInc.でありたい」と社員一同が一丸となって取り組んでいる様子が本報告で少しでも伝われば幸いです。

（ITCA チーフエンジニア 深井　泰雄）

著　者


Nitin Edla


Lukas Obel


Santhosh Pasupathi


Gerald Bergsieker

論文・報告

An Accelerated Method to Generate Concrete Level Scenarios for AD/ADAS Scenarios Library-Based Testing

Yifan Wei* Xuejiao Li* Wei Zheng* Gerald Bergsieker*

Abstract

Virtual testing using a scenario-based approach is essential for autonomous driving (AD) and Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) verification and validation. Such approaches were widely adapted by industrial standards and research institutes. Many scenarios library-based testing approaches were given parameterized scenario library catalogs for intended AD/ADAS operating design domains (ODDs) and then traditional exploring algorithms, such as Monte Carlo simulations, were used to explore parameterized test space. Due to the problem's complex nature, such algorithms lack efficiency in finding system pass/fail boundaries. Given such background, this paper introduces a Gaussian Process coupled Support Vector Machine (GP-SVM) algorithm to accelerate the system safety boundary exploration. The algorithm facilitates adaptive modifications of concrete scenario cases and accelerates sampling and exploration in logical scenario parameterization domain, resulting in an efficient generation of concrete and diverse scenarios. The exploration results can approximate the pass and failure boundaries in defined and parameterized operating design domains.

1 Operating design domain (ODD) and scenarios-based testing approach

Simulations are key components in AD and ADAS development and play key roles in system level design verifications and validations. It is important to measure the behaviors and safety of an automated driving system under its intended operating design domain in simulations first. Scenario cases and scenario catalogs/libraries are foundations for such simulations, and scenarios describe both the static environmental elements and the dynamic participants which could be encountered by the automated driving system in the deployed operating domain.

According to SAE J3061, ODD is defined as operation conditions under which a particular automated driving system or function is intended to operate [1]. According to ISO 21448, scenario is a description of the development over time between several scenes in a sequential way [2]. The 6-level model shown in Table 1 is adapted by PEGASUS family consortiums to describe the traffic elements involved in a scenario [3]~[5]. For scenario description and abstraction levels, Menzel et al originally divided the scenarios into 3 abstraction levels, including functional scenarios, logical scenarios and concrete scenarios [4]. Neurohr et al further extended it to a 4-layer scenarios model: functional, abstract, logical, and concrete scenarios [5]. On top level, functional scenarios were non-formal and human readable behavior descriptions of a traffic scenario. For implementation purposes, abstract scenarios were formalized, machine readable and declarative descriptions and it could involve efficient description of relations such as causes and effects. Logical scenarios were parameterized representation of a set of scenarios, where scenarios' influencing factors were described by parameter variations, ranges and distributions. Concrete scenarios were individual cases within a given upper-level logical description, and they described specific sceneries and chain of events with fixed parameters. This 4-level scenario abstraction model could align with the ASAM's OpenDRIVE® and OpenSCENARIO® standards for simulation implementations [6][7].

* Isuzu Technical Center of America, Inc.

Table 1 The 6-layer scenario model used by PEGASUS method

Layer 6	Digital information, such as V2X
Layer 5	Environmental conditions, such as light and weather
Layer 4	Moving Objects, such as traffic participants (vehicles, pedestrians)
Layer 3	Temporal modifications and events, such as road constructions
Layer 2	Road furniture and rules, such as traffic signs and markings
Layer 1	Road layer, such as geometries

In this paper, we would propose an accelerated exploration algorithm, to approximate the interested pass/fail boundary of an automated driving system. Based on iterative and adaptive simulations, the algorithm could generate concrete simulation cases within logical scenario parameters' exploration domain. It can generate next iteration scenarios to explore based on previous simulation iteration's results such as pass/fail status. These pass/fail status could be determined using related safety measurement metrics and criteria for the specific logical scenarios. By implementing this algorithm, we could demonstrate an efficient procedure to find the pass/fail boundary for parameterized logical scenarios. Moving traffic objects and participants can be manipulated on individual concrete cases level.

2 Scenarios generation algorithm and optimization problem formulation

For autonomous driving systems, it is important to identify the edge cases, or the pass/fail boundaries, given certain safety measurement metrics or key performance indexes (KPIs). To identify the pass/fail boundaries or edge cases within a defined ODD and ODD's correlated logical scenarios' parameterization domain, huge number of simulations needs to be executed due to problem's complex and non-linear nature. This is one of the bottlenecks at development and validation stages. Therefore, an efficient exploration algorithm can accelerate the identification process and reduce computational resources.

Traditional space filling methods can be implemented, such as Monte Carlo simulation or Latin Hypercube sampling. However, these methods are sample-inefficient for edge case identifications, because they do not have prior information of the problem to guide them throughout the process. The resulted sampling space could be heavily selected from non-interested and non-representative areas.

Therefore, in this paper, we proposed to formulate the exploration and exploit of the autonomous driving function's pass/fail boundary as a classification and optimization problem, where we continuously seek and approximate the decision boundaries of a binary classifier based on iterative simulation updates.

The simulated cases will be categorized into two classes depending on whether the simulations succeeded or failed based on safety criteria judgement. There are many related publications which provide formulations of safety determination metrics and factors [8]. In our formulation, the algorithm treats failure of any safety KPI in a specific concrete scenario simulation as a failure simulation case, thus, we can provide simulation results back to the algorithm, and based on these completed simulation results, the algorithm will spawn the next iterations' simulation inputs, which are next iteration scenarios' parameterization values. The algorithm determines the spawned scenarios parameterized designs based on maximize or minimize an acquisition function, which is specifically designed to find points near the pass/fail boundary. Our method formulates the acquisition function using Gaussian Process Model (GP) and Support Vector Machine (SVM). This procedure, thus, allows for active and continuous sampling for edge cases and pass/fail boundary.

SVM is a kernel-based machine learning model which can be used for classification and regression problems. There are various types of kernel functions including Radial-Basis-Function (RBF), linear, polynomial and sigmoid function. In this work, we used RBF kernel, where $k(x_i, x_j)$ denotes the kernel function to measure the similarity between the two points x_i and x_j in equation (1). The hyperplane of the SVM model, $g(x)$, can be represented in equation (2), in which $g(x)$=0 is the decision boundary itself.

If $g(x)>0$, then $\boldsymbol{x}$ which physically represents the array of concrete scenarios design inputs will lead to simulation pass. If $g(x)<0$, then $\boldsymbol{x}$ which physically represents the array of concrete scenarios design inputs will lead to simulation failure.

$$k(x_i, x_j) = exp\left(-\gamma \|x_i - x_j\|^2\right) \quad (1)$$

$$g(x) = w^T x + w_0 \quad (2)$$

The Gaussian Process Model (GP) is also a popular supervised machine learning model because it can provide predictive distributions for any given point. This distribution gives a way to quantify the uncertainty of unexplored points on a trained surrogate surface, which can guide the active sampling algorithm to search unexplored space. The GP model assumes, for $x \in R^n \rightarrow R$, every finite set of functions values $[f(x_1), f(x_2), \ldots, f(x_N)]$ are sampled from the multi-variate gaussian distribution with mean function $m(x)$ and covariance function $K_{ij} = k(x_i, x_j): R^n \times R^n \rightarrow R$ as shown in equation (3)

$$K_{ij} = k(x_i, x_j) = Aexp(-\frac{1}{2\ell^2}\|x_i - x_j\|^2) \quad (3)$$

In equation group (4), with N sample points $x_i, x_j, \ldots, x_N$, it can determine mean value $\mu(x^*)$ and covariance $\sigma^2(x^*)$ at unexplored point x^*, where

$$f = [f(x_1), f(x_2), \ldots, f(x_N)]^T$$

$$K_{xx} = k(x_i, x_j)$$

$$K_{x*} = k(x_i, x^*)$$

$$K_{*x} = k(x^*, x_j) \quad (4)$$

$$K_{**} = k(x^*, x^*)$$

$$\mu(x^*) = K_{*x}{K_{**}}^{-1} f$$

$$\sigma^2(x^*) = K_{**} - K_{*x}{K_{**}}^{-1} K_{x*}$$

Our algorithm proposed to formulate a new optimization problem and acquisition function as shown in (5), which combines the training process of the SVM hyperplane $g(x)$ and leverages the GP quantified uncertainty, where β is a weighting factor to balance the trade-off between exploration and exploitation.

$$min\, h(x) = |g(x)| - \beta\sigma^2(x) \quad (5)$$

Given an initial sets of parameterized logical design variable $\boldsymbol{X_{initial}} = [x_1, x_2, \ldots x_N]$, where x_i represents individual scenario's representation parameterization, SVM will be trained, and we can identify initial decision boundary $g_{initial}(x)$ trained from this initial sets $\boldsymbol{X_{initial}}$. Next we will train GP model using $\boldsymbol{X_{initial}}$ and $g_{initial}(x)$. This enables the calculation of uncertainty metrics $\sigma^2(x_i)$. By doing so, $h(x)$ as acquisition function can be optimized. By leveraging the uncertainties' quantifications, the approach reduces the chance of being trapped in a local optimal and β serves as a trade-off parameter between exploration and exploitation. The actual pass/fail and edge cases boundary itself is determined by SVM boundary, while adaptive sampling strategy is depending on the new acquisition function $h(x)$. To solve the optimization problem in (5), we used limited-memory BFGS solver [9]. The paper addresses the proposed algorithm name as GP-SVM.

3 Simulation implementation

In a virtual environment, this paper tested an autonomous driving system, coupled with IPG TruckMaker simulator. Static map, environmental elements, vehicle dynamics and traffic participants were simulated in IPG TruckMaker. Path planning and control modules were included, while perception modules were excluded, and surrounding traffic objects list was fed into the autonomous driving stack to mimic the perception results. Therefore, this paper utilized timing parameterization to mimic perception's detection results.

This paper demonstrates the concrete scenarios generation workflow with following logical scenario definition. The logical scenario itself, as shown in **Figure 1**, describes where a roadside parked autonomous driving ego vehicle is intended to plan a path and merge into an adjacent lane with target velocity v_{ego}. The ego vehicle is initialized with parked status at $time_{start}$. During the merge action, at $time_N$, the perception detected a traffic vehicle traveling at speed $v_{traffic}$ and at given parameterized detected location horizontal $x_{traffic}$ and vertical $y_{traffic}$.

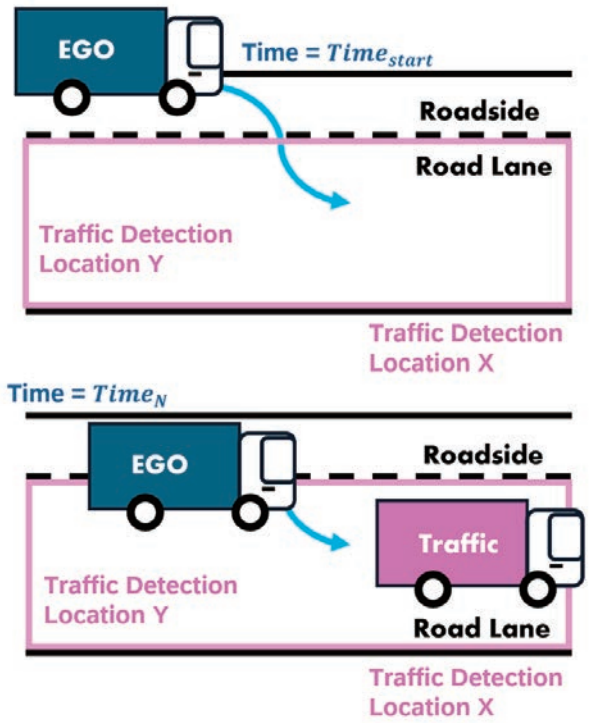


Figure 1　Illustration of the scenario case

For simple illustration, we set ego vehicle target cruising speed $v_{ego} = 10\,[\frac{km}{h}]$. $v_{traffic} = 0\,[\frac{km}{h}]$ represents a static hazard traffic vehicle stopped on the lane. In this case, the ego vehicle is required to either stop within safety distance or bypass the stopped traffic objects with sufficient safety boundary. A set of safety judgement KPIs, such as variables related to speed, distance, acceleration and time-to-collision, is used to determine simulation pass/fail. Therefore, we could focus on the parameterizations of 3 variables, "detected time of a traffic vehicle" $time_N$, "traffic detection location" $x_{traffic}$ and $y_{traffic}$.

4　Simulation results

This paper shows the simulation results for (1). Reference pass/fail boundary generated with grid method in 2-dimensional (2D) problem formulation. Simulations run for 2 levels of $time_N = [2.5s, 5.0s]$ separately. Only 2 variables $x_{traffic}$ and $y_{traffic}$ are examined, leading to a 2D problem. (2). Pass/fail boundary identified by GP-SVM algorithm in 2D problem formulation ($x_{traffic}$ and $y_{traffic}$). Simulations run for 2 precepted $time_N = [2.5s, 5.0s]$ separately. (3). One unified 3-dimensional (3D) problem formulation includes $time_N$ as a variable explored by GP-SVM algorithm ($time_N, x_{traffic}$ and $y_{traffic}$). Then the 3D problem formulation result would be correlated to 2D results by looking into fixed and specific $time_N$ values at [2.5s, 5.0s].

In 2D reference results' representations, we fixed "detected time of a traffic vehicle" $time_N$ at 2 levels, 2.5[s] and 5.0[s]. Therefore, 2.5[s] and 5.0[s] each generates a set of simulations. While detected time $time_N$ of the hazardous traffic vehicle are investigated at 2 levels, the 2D parked traffic vehicle's detected location, "traffic detection location", defined by $x_{traffic}$ and $y_{traffic}$, are parameterized and can control the concrete level scenarios. The "traffic detection location" correlates to the purple bounding area in **Figure 1**. Using the grid method, the reference pass/fail boundaries of the autonomous driving functions can be represented in **Figure 2** and **Figure 5**. These reference results in **Figure 2** and **Figure 5** include grids of 41 $x_{traffic}$ levels and 17 $y_{traffic}$ levels, leading to a total of 697 concrete level scenarios and simulations for both $time_N = [2.5s, 5.0s]$. It worth noting that due to delayed detected time of the traffic vehicle, when $time_N = 5.0s$, there are more regions of unsafe "failed" simulation scenario (shown by red dots) in **Figure 5** compared to those in **Figure 2**.

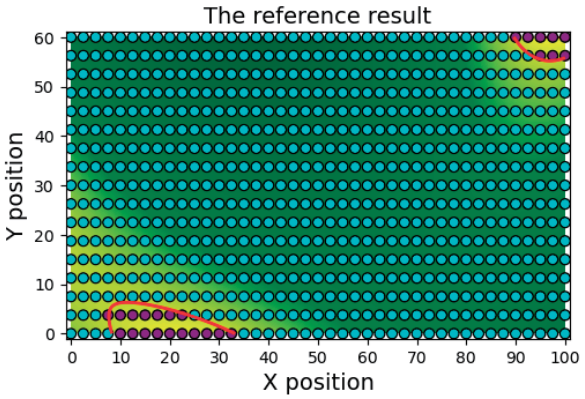


Figure 2　2D representation of simulation of pass/fail boundary results reference. "Detected time of a traffic vehicle" $time_N$ fixed as 2.5[s] in simulation.

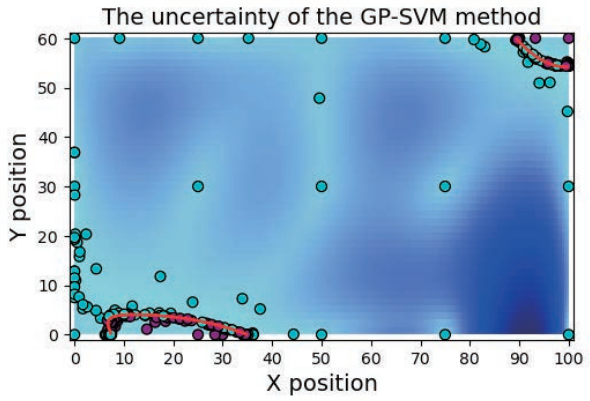


Figure 3 2D representation of pass/fail boundary results generated by GP-SVM algorithm. "Detected time of a traffic vehicle" $time_N$ fixed as 2.5[s] in simulation. Blue background demonstrates uncertainty σ^2.

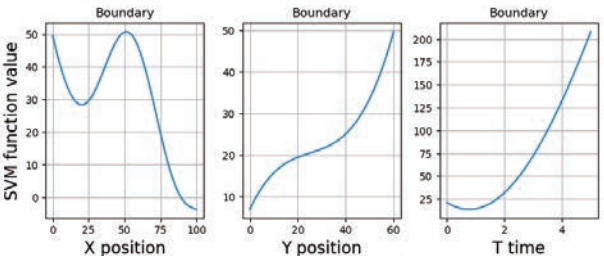


Figure 4 3D representation of pass/fail boundary results generated by GP-SVM algorithm. "Detected time of a traffic vehicle" was looked at $time_N$=2.5[s] .

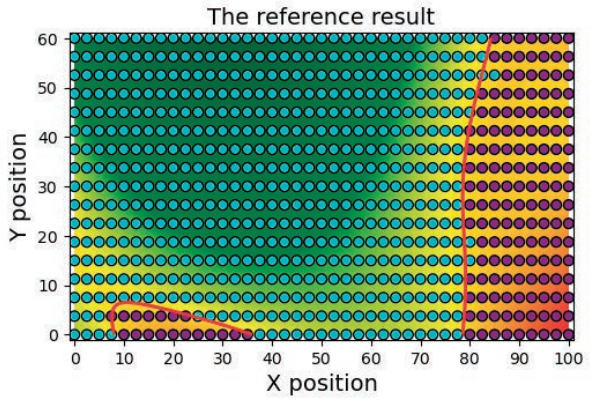


Figure 5 2D representation of simulation of pass/fail boundary results reference. "Detected time of a traffic vehicle" $time_N$ fixed as 5.0[s] in simulation.

In 2D GP-SVM results, shown in **Figure 3** and **Figure 6**, instead of fixed grid, the GP-SVM algorithm is run for both 2.5[s] and 5.0[s] levels adaptively. As shown by both figures, the algorithm focuses its exploration and puts the concrete simulations and scenarios near the boundaries of pass/fail. The blue backgrounds represent the σ^2 at various location, higher the uncertainty, deeper the blue color. As discussed in **Chapter 2** equation (5), β serves as a trade-off parameter between exploration and exploitation using uncertainty quantification. Comparing **Figure 2** and **Figure 3**, **Figure 5** and **Figure 6**, the reference pass/fail boundary and edge cases generated by grid methods are well captured by GP-SVM algorithm. For 2.5[s] scenarios, 215 simulation runs were executed by GP-SVM algorithms. For 5.0[s] scenarios, 305 simulation runs were executed. Both cases show significant reduction in simulation runs compared to grid method's 697 simulation runs.

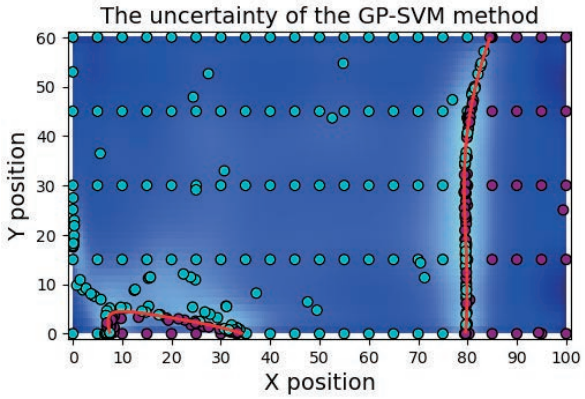


Figure 6 2D representation of pass/fail boundary results generated by GP-SVM algorithm. "Detected time of a traffic vehicle" $time_N$ fixed as 5.0[s] in simulation.

The authors also ran a single unified simulation group using GP-SVM. In this scenario group, $time_N$, $x_{traffic}$ and $y_{traffic}$ were treated as 3 parameterized variables (3D formulation), instead of assuming $time_N$ on 2 separate levels. This formulates the problem in 3D instead of 2D. After all cases in this simulation group finished, this paper compared the results of 3D and 2D formulations by looking at $time_N = [2.5s, 5.0s]$ values comparatively. In the 3D case, every variable range's SVM decision

function $g(x)$ values are shown in a subplot, given specified values of the other 2 variables. A positive SVM function value $g(x)$ means passed scenarios and negative SVM function value $g(x)$ means failed scenarios. When the analysis was performed for a chosen variable and its range, the other 2 variables would have their own specific value instead of a range. By doing so, we can visualize the 3D results using representative $g(x)$ lines for the chosen variable's range. For example, In **Figure 7**, the SVM decision function with respect to the variable $x_{traffic}$ normalized range are shown in the first left-most subplot, given $y_{traffic} = 0[-](normalized)$ and $time_N = 5.0[s]$. The curve represents SVM function value $g(x)$ for the entire the $x_{traffic}$ range. Those with respect to the variable $y_{traffic}$ normalized range are shown in the second column, given $x_{traffic} = 0[-](normalized)$ and $time_N = 5.0[s]$. The SVM decision boundary value $g(x)$ across variable $x_{traffic}$ range in **Figure 7**'s most left subplot showed failed safety simulation cases (negative SVM $g(x)$ value) are between 8.0[-] to 35.0[-] and it can correlate to **Figure 5** and **Figure 6**'s fail cases in the $x_{traffic}$ range between 8.0[-] to 35.0[-] when $y_{traffic} = 0\ [-]\ and\ time_N = 5.0[s]$. Similarly, for $y_{traffic}$ range analysis. A comparable comparison can be made between **Figure 2**, **Figure 3**, and **Figure 4** well. In conclusion, the results are consistent between grid methods and GP-SVM adaptive sampling methods, while GP-SVM brings accelerated workflow and reduced number of simulations. Additionally, 2D problem formulations also align with 3D problem formulations.

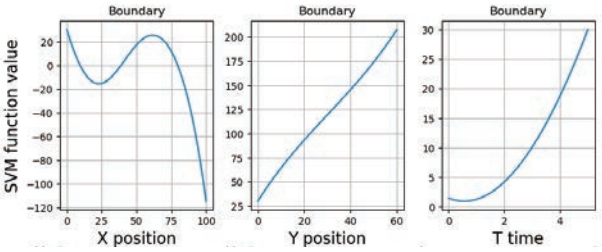


Figure 7 3D representation of pass/fail boundary results generated by GP-SVM algorithm. "Detected time of a traffic vehicle" was looked at $time_N$=5.0[s].

5 Conclusion

The authors proposed an accelerated scenarios generation framework, by using a developed concrete scenarios generation algorithm called GP-SVM. It combines the gaussian process model (GP) and support vector machine (SVM). A simulation environment was constructed using the IPG TruckMaker and an autonomous driving system under the test (path-planning and control in the loop). The proposed algorithm was coupled with this simulation environment and generated baseline reference results, 2D and 3D GP-SVM problem formulation results. Comparing the 2D and 3D GP-SVM results to baseline grid method reference results, the proposed scenarios generation algorithm can significantly reduce the number of simulation runs while maintaining accurate capture of the pass/fail safety boundaries and edge cases.

The future work will focus on further improving the algorithm and enhancing efficiency. The authors will also extend the algorithm's capabilities for more verification and validation applications. The authors would also like to accommodate the scenarios generation solver into a more mature automated simulation control workflow such as continuous integration and continuous development (CI/CD).

あとがき

自動運転開発においてシミュレーションが不可欠なことは周知ですが、シミュレーションを実施するにも、同じ結果（本報告ではPass/Fail率）を得る際の工数（Computational Time）の低減が求められます。今回AIを用いることにより本報告のケースにおいては50％の工数低減が図れており、この技術を今後いすゞ自動運転開発のシミュレーションパイプラインに反映し有効に活用していただく予定です。

最後に例年と同じ言葉になりますが「いすゞの中で役に立ついすゞテクニカルセンターオブアメリカInc.でありたい」と社員一同が一丸となって取り組んでいる様子が本報告で少しでも伝われば幸いです。

（ITCA チーフエンジニア 深井　泰雄）

6 References

(1) SAE International: J3016: Taxonomy and Defnitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles (2021), Warrendale, USA. Standard.

(2) International Organization for Standardization ISO 21448:2022: Safety of the intended functionality (2022).

(3) Menzel,T., Bagschik, G., and Maurer, M.,: "Scenarios for Development, Test and Validation of Automated Vehicles" (2018).

(4) Bagschik, G., Menzel, T., and Maurer, M.: "Ontology based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles," IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV), Changshu (2018) pp. 1813-1820.

(5) Neurohr, C., Westhofen, L., Butz, M., Bollmann, M., Eberle, U., and Galbas, R.: "Criticality analysis for the verification and validation of automated vehicles," IEEE Access (2021), doi:10.1109/ACCESS.2021.3053159

(6) ASAM OpenDRIVE, https://www.asam.net/standards/detail/opendrive/

(7) ASAM OpenSCENARIO, https://www.asam.net/standards/detail/openscenario/

(8) Westhofen, L. et al: "Criticality Metrics for Automated Driving: A Review and Suitability Analysis of the State of the Art" (2022), arXiv:2108.02403

(9) Liu, D.C. and Nocedal, J.: "On the Limited Memory BFGS Method for Large Scale Optimization," Math. Program. 45, no. 1 (1989): 503-528.

著　者


Yifan Wei


Xuejiao Li


Wei Zheng


Gerald Bergsieker

論文・報告

Experimental Validation of Event-Triggered Model Predictive Control for Autonomous Vehicle Path Tracking

Meng Xu* Peng Zhang* Mingyuan Tao*
Zhaodong Zhou** Jun Chen**

Abstract

This paper presents an experimental validation of an event-triggered model predictive control (MPC) for autonomous vehicle (AV) path-tracking control using real-world testing. Path tracking is a critical aspect of AV control, and MPC is a popular control method for this task. However, traditional MPC requires extensive computational resources to solve real-time optimization problems, which can be challenging to implement in the real world. To address this issue, event-triggered MPC, which only solves the optimization problem when a triggering event occurs, has been proposed in the literature to reduce computational requirements. This paper then conducts experimental validation, where event-triggered MPC is compared to traditional time-triggered MPC through real-world testing, and the results demonstrate that the event-triggered MPC method not only offers a significant reduction in computation compared to time-triggered MPC but also improves the control performance.

1 Introduction

As electric vehicles have gained popularity in recent years, there is increasing interest in autonomous driving as a promising technology to enhance traffic efficiency while reducing accidents and congestion [(1)]. Autonomous vehicles (AVs) rely on a complex network of sensors, algorithms, and control systems to navigate the road safely and efficiently. Model predictive control (MPC) is a class of algorithms that is well suited for AVs, as it can handle complex optimization problems and constraints [(2)-(4)]. Through the study of stability, robustness, and feasibility in MPC, as demonstrated by various research papers [(5)-(7)], the stability of MPC applications in AVs has been further ensured.

Despite its advantages, MPC has some limitations. One of the main challenges is the computational burden it imposes, which can be particularly problematic for AVs due to their limited computing power. To address this issue, event-triggered control has been proposed with the goal of reducing computation [(8)-(13)]. Unlike time-triggered MPC, where MPC activates periodically, event-triggered MPC is an approach in which the optimization problem is solved when a triggering event occurs. To demonstrate the benefits of event-triggered MPC in the field of AV, particularly in terms of its effectiveness in reducing computational requirements, many researchers have used simulation software to simulate the performance of event-triggered MPC on AVs [(14)-(20)]. In [(14)], event-triggered MPC is implemented for multi-vehicle control, achieving simultaneous tracking with collision and obstacle avoidance. Another study [(15)] applies event-triggered MPC to vehicle-following control with unreliable vehicle-to-vehicle communications. The problem of multiple vehicle cooperative path following is explored in [(17)], [(18)], while [(16)], [(19)] investigate vehicle platooning and employ MPC for longitudinal control to track inter-vehicle distance. Nonlinear MPC is used in [(20)] for lateral trajectory tracking of AVs, which enhances real-time performance while maintaining accuracy. Previous works by the authors [(21)-(23)] also propose event-triggered MPC and LPV-MPC for AV path tracking problems, all utilizing event-triggered MPC to reduce the computational burden. These studies demonstrate the accuracy and computational efficiency of event-triggered MPC in various application scenarios.

* Isuzu Technical Center of America, Inc. ** Oakland University

While the benefits of event-triggered MPC have been demonstrated in simulation environments, the validation of this approach in realistic settings is still limited. In particular, there is a need to demonstrate the effectiveness of event- triggered MPC for AV path tracking, as this is a critical component of AV control systems. To address this need, we present an experimental validation of event-triggered MPC for AV path tracking, by using a real-world testing platform to show the advantages of event-triggered MPC over time- triggered MPC. Specifically, the testing vehicle is a full-size sedan equipped with both drive-by-wire and a Polynav 2000P OME GNSS-Inertial system, a Calmcar front view camera with lane detection capabilities, and a Dspace Autera computing unit. The GNSS unit provides real-time vehicle location information that is consumed by control systems. Moreover, a predefined path is recorded using GNSS and serves as a reference trajectory for subsequent testing. Both time-triggered and event-triggered MPC are tested, and it is found that event-triggered MPC offers a significant reduction in computation compared to time-triggered MPC, which at the same time improves the control performance. The improvement in control performance is likely due to the fact that when optimization is not triggered, event-triggered MPC can provide real-time control action without any delay.

The remainder of this paper is organized as follows. **Chapter 2** discusses the vehicle model in the MPC and the algorithm of time-triggered MPC and event-triggered MPC. The vehicle platform setup and the test result are shown in **Chapter 3**. **Chapter 4** concludes the paper.

2 MPC-based path tracking

2.1 Vehicle model

In normal on-road driving, which is the focus of this paper, the vehicle dynamics can be conveniently approximated by the bicycle model [24] shown in **Figure 1**. Define $x = [p_x \ p_y \ \varphi]^T$ as the state vector for the vehicle model at the center of gravity (CG), where p_x and p_y are the vehicle longitudinal and lateral positions, respectively, and ψ is the vehicle heading angle, all the states are in the vehicle frame. Then $\dot{x} = [\dot{p}_x \ \dot{p}_y \ \dot{\varphi}]^T$, the set of differential equations of the vehicle is modeled by the following:

$$\dot{p}_x = V\,cos(\varphi + \beta) \tag{1a}$$

$$\dot{p}_y = V\,sin(\varphi + \beta) \tag{1b}$$

$$\dot{\varphi} = \frac{V\,cos(\beta)}{L_{xf} + L_{xr}}\left(tan(u_f) - tan(u_r)\right) \tag{1c}$$

where V is the velocity of the vehicle's CG; L_{xf} and L_{xr} are the distances from the center of gravity to the front and rear axles; u_f and u_r are the front and rear steering angles. Since the vehicle used in this paper is the front-wheel steering vehicle, the u_r is equal to zero. Furthermore, β is the vehicle slip angle, which is defined by the following equation.

$$\beta = arctan\left(\frac{L_{xr}\,tan(u_f)}{L_{xf} + L_{xr}}\right) \tag{2}$$

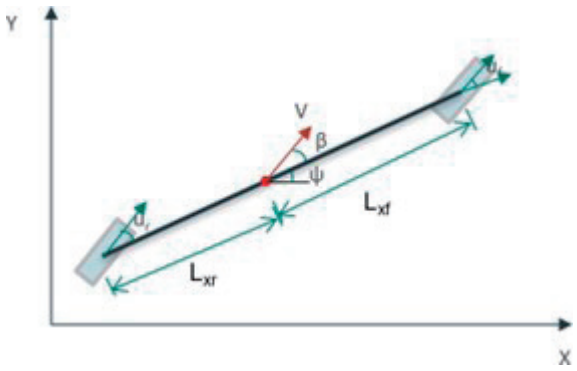


Figure 1 Schematic of the bicycle model

2.2 Time-triggered MPC for path tracking

The MPC controller designed here has to track a desired path, and the vehicle model described in **Section 2.1** is employed to make predictions in the MPC algorithm. To make use of the bicycle model by MPC, the forward Euler method [25] is used to discretize the bicycle model:

$$x_{t+1} = x_t + \dot{x}_t T_s \tag{3}$$

where T_s is the sampling time and x_t is the system state at discrete time t. For MPC-based path tracking control, at time instance t, the general MPC algorithm performs the following operations. Initially, it measures the current state of the system. Subsequently, it solves an optimal control problem formulated on the system model, constraints, and current state to find the optimal state sequence $X_t = \{x_{t+1}, x_{t+2}, \cdots, x_{t+p}\}$ and the optimal control

sequence $U_t = \{u_t, u_{t+1}, \cdots, x_{t+p-1}\}$, where p is the prediction horizon. Lastly, it sends the first element of the optimal control sequence to the actuators. The optimal control problem (OCP) is formulated as follows:

$$\begin{aligned} min\, J = & \sum_{k=1}^{p} \left\| x_{t+k}(1) - p_{x,t+k}^{ref} \right\|_{Q_p}^2 \\ & + \sum_{k=1}^{p} \left\| x_{t+k}(2) - p_{y,t+k}^{ref} \right\|_{Q_p}^2 + \sum_{k=0}^{p-1} \| u_{t+k} \|_{Q_u}^2 \\ & + \sum_{k=0}^{p-1} \| u_{t+k} - u_{t+k-1} \|_{Q_d}^2 \end{aligned} \tag{4a}$$

$$s.t. \quad x_t = \hat{x}_t \tag{4b}$$

$$System\ dynamics\ (3),\ 1 \le k \le p \tag{4c}$$

$$u_{min} \le u_{t+k} \le u_{max},\ 0 \le k \le p-1 \tag{4d}$$

$$\Delta_{min} \le u_{t+k} - u_{t+k-1} \le \Delta_{max},\ 0 \le k \le p-1 \tag{4e}$$

Note that the first two terms in equation (4a) denote the deviation from the reference path, while the third term penalizes a high steering angle, and the final term decreases the amount of actuator busyness (i.e., limits the rate of actuator change). The weights for path following error, steering efforts, and control activity are represented by Q_p, Q_u, and Q_d respectively.

Remark 1: To derive a reference path suitable for MPC, the default path needs to rearrange due to varying intervals between consecutive waypoints. As a result, the waypoints on the default path should be re-sampled based on the current vehicle speed v and sampling time T_s. As MPC depends on short-term prediction, it is sensible to presume that V will remain constant over the prediction horizon. Therefore, the waypoints throughout the prediction horizon are re-sampled so that they are equally distanced from each other, where the distance d is equal to current vehicle speed v multiplied by sampling time T_s.

2.3 Event-triggered MPC for path tracking4

Time-triggered MPC can be computationally heavy since the OCP(4a)-(4e)needs to be solved at every time step. Unlike time-triggered MPC, event-triggered MPC solves the OCP(4a)-(4e)only when an event is triggered. This paper considers the threshold-based event-trigger mechanism adopted by [21], [26]. Since MPC does not control the longitudinal speed, the lateral offset Y is primarily considered when determining an event, which is the closest distance from the current position to the target path. Denote the closest points on the path before and after the current position as (x_1, y_1) and (x_2, y_2). Then the lateral offset Y is calculated by equation (5):

$$Y=x2-x1y1-py-x1-pxy2-y1x2-x12+y2-y12 \tag{5}$$

Finally, the event-trigger mechanism used in this paper is shown below.

$$e = \begin{cases} 1, & if\ Y > \sigma\ or\ k > k_{max} \\ 0, & Otherwise \end{cases} \tag{6}$$

In other words, the condition at which the event-triggered MPC is triggered depends on two calibration parameters: σ and k_{max}, where k represents the number of consecutive times that the MPC has not been triggered. It is important to note that k_{max} should not exceed the prediction horizon p. The event-triggered MPC solves the OCP(4a)-(4e) only when either the vehicle's lateral offset exceeds a predefined threshold σ $(i.e., Y > \sigma)$, or the previously optimized control sequence U_{t1} has been depleted $(i.e.,\ k > k_{max})$, resulting $in\ e = 1$. Otherwise, $e = 0$, and the control action can be obtained by shifting the optimal sequence obtained during the last event.

3 Experimental setup and result analysis

The controller discussed in **Chapter 2** is evaluated in the experimental test. To verify the efficiency of the event-triggered MPC, both time-triggered MPC and event-triggered MPC are implemented in the vehicle platform separately, and are used to track the vehicle to follow a same reference trajectory.

3.1 Experimental setup

In this paper, a relatively empty site is used as the experimental testing track, as shown in **Figure 2**, and the AV platform is shown in **Figure 3**. Specifically, the testing vehicle is a full-size sedan, the distances from the CG to the front and rear axles are 1.2 m and 1.65 m, respectively. This vehicle is equipped with both drive-by-wire systems, a Polynav 2000P GNSS-inertial system, a Calmcar front view camera with lane detection capabilities, and a Dspace Autera computing unit.

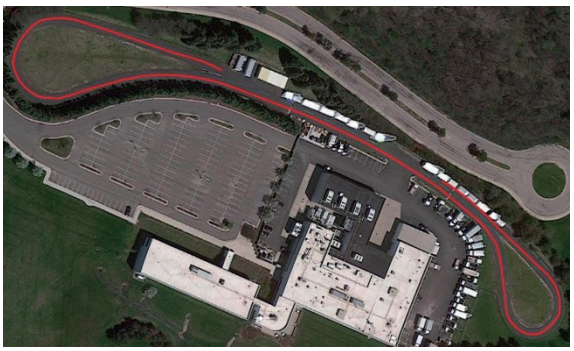


Figure 2 Bird view of the testing track located in Plymouth MI



Figure 3 The AV testing platform, which is a full-size sedan equipped with both drive-by-wire, a Polynav 2000P GNSS-inertial system, a Calmcar front view camera with lane detection capabilities, and a Dspace Autera computing unit

Meanwhile, to compare the performance of time-triggered MPC and event-triggered MPC, the MPC parameters, including cost function calibrations, actuator bound constraints, and rate constraints are maintained the same. **Table 1** lists all the parameters for both time-triggered and event-triggered MPC.

Table 1 MPC Parameters

p	*10*	Q_u	*35*	$u_{min}\ (rad)$	*-0.97*
$T_s\ (ms)$	*200*	Q_d	*30*	$\Delta u_{max}\ (rad)$	*0.15*
Q_p	*2*	$u_{max}\ (rad)$	*0.97*	$\Delta u_{min}\ (rad)$	*-0.15*

3.2 Numerical result

In the sequel, we denote time-triggered MPC as tMPC and event-triggered MPC as eMPC(σ) where σ represents the event-triggered threshold in (6). Additionally, the performances of event-triggered MPC with various σ values are examined to investigate the impact of the event-triggered threshold on eMPC control performance.

The reference trajectory and tracking results with different MPC are shown in **Figure 4** and **Figure 5**. In general, all the controllers can control the vehicle to complete the entire path safely, and the tracking performances of each MPC are satisfactory. To compare the performance of all controllers, tracking errors for all controllers are plotted in **Figure 6**, together with the maximum error and root mean square error, both on the lateral tracking error, being shown in **Table 2**. Based on **Table 2**, tMPC has the worst tracking performance, with both Max Error and RMSE being larger than eMPC. For eMPC, the Maximum Error and RMSE are similar with different thresholds. Comparing the peaks in **Figure 6**, it is clear that the large error occurs at the starting and ending area. Meanwhile, combined with **Figure 4**, it can be seen that the area with a large error is the turning region at the beginning and end. This is further supported by zoom-in pictures of the starting and ending turns in **Figure 5**.

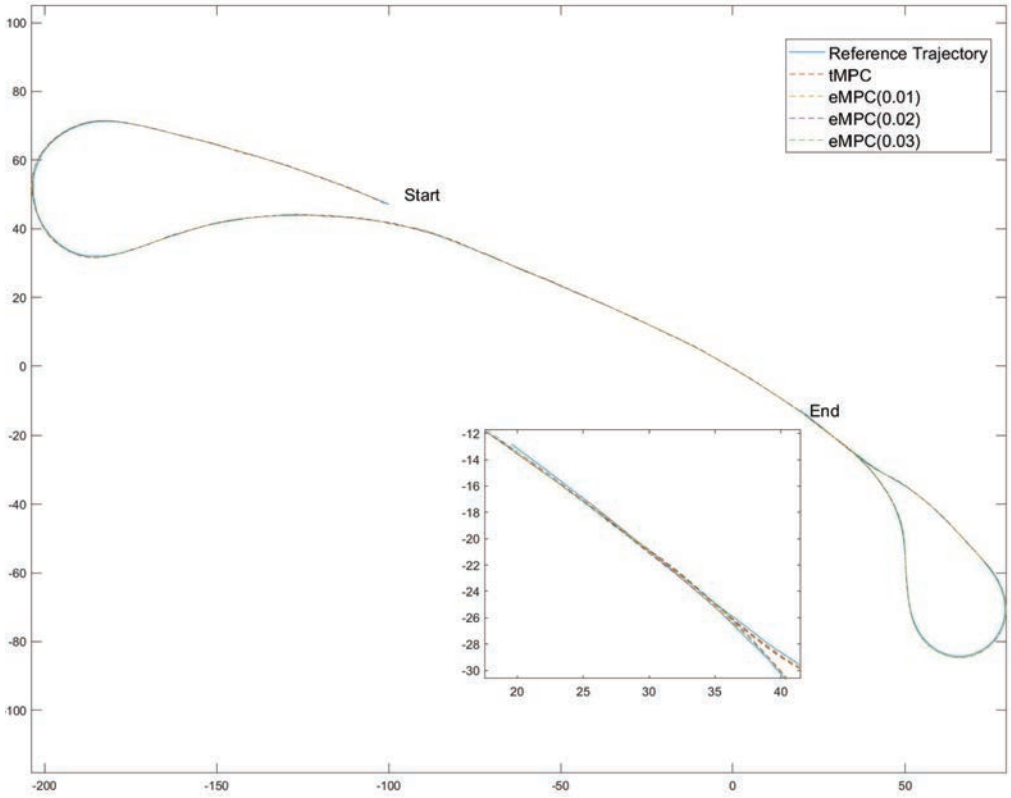


Figure 4　Tracking trajectories with different controllers

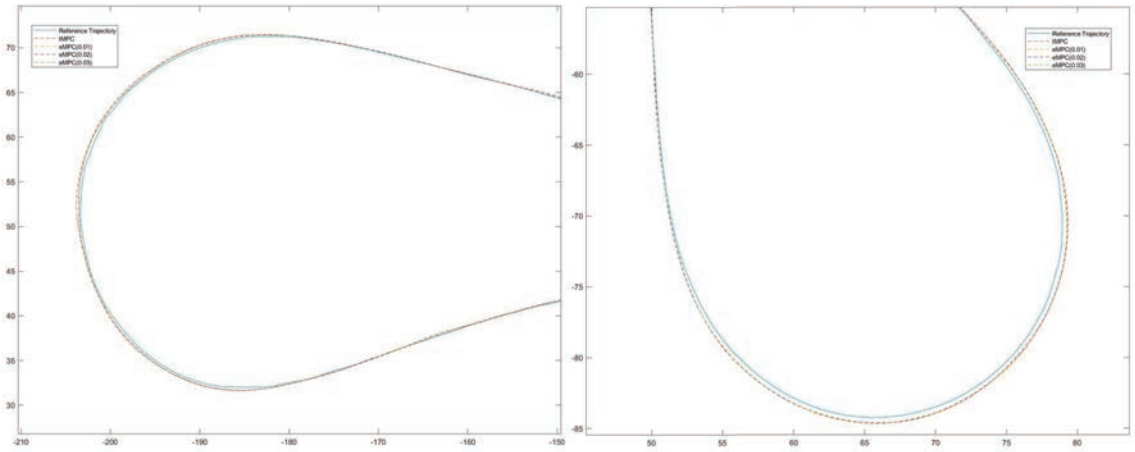


Figure 5　Tracking trajectories with different controllers during the turn maneuvers (i.e., zoom-in version of Figure 4).

Table 2 Tracking performance with different controllers

	tMPC	eMPC(0.01)	eMPC(0.02)	eMPC(0.03)
Max Error (*m*)	0.5833	0.4108	0.4736	0.4559
RMSE (*m*)	0.1386	0.1056	0.1030	0.1058

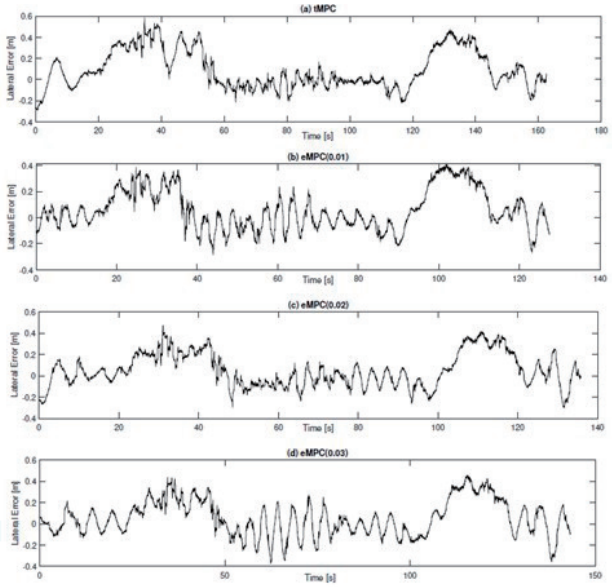


Figure 6 Tracking errors with different controllers

In Table 3, the number of MPC triggers and the trigger frequency of eMPC are used to compare the extent to which eMPC reduces the amount of computation compared to tMPC. Comparing the tracking performance within the three event-triggered MPC settings, as summarized in Tables 2 and Tables 3, it is apparent that as the event-trigger threshold increases, both the maximum error and RMSE almost equal, while the MPC trigger frequency decreases. However, based on the simulation result from the authors' previous work [21], the tracking accuracy of the time-triggered MPC is better than the event-triggered MPC. In addition, the tracking performance of event-triggered MPC decreases with the threshold increase. The result in this paper is different from the simulation result because of the delay caused by MPC computation. According to the driving time and control times in time-triggered MPC, it can be estimated that the average MPC calculation takes 75 ms. Specifically, there is a 75 ms gap from starting the MPC computation to sending the control signal to the vehicle. However, in the time-triggered MPC, the optimal steering control sent to the vehicle is based on the initial state, which can change significantly after 75 ms. Therefore, the optimal steering control that the time-triggered MPC sent is late. The MPC trigger frequencies of three event-triggered MPC settings are around 50 %, indicating that on average the event is not triggered once every two control steps at which MPC needs to calculate the optimal control sequence. Note that when an event is not triggered, event-triggered MPC simply shifts the previous optimal control sequence to determine control action for the current step, which requires very minimum or negligible delay. Therefore, it is our conjecture this provides a timely compensation to the delay caused by MPC computation when an event is triggered and explains why event-triggered MPC outperforms time-triggered MPC in our experimental results.

Table 3 Computation needed with different controllers

	tMPC	eMPC(0.01)	eMPC(0.02)	eMPC(0.03)
Control Counts	2,146	2,581	3,160	3,894
Event Counts	2,146	1,789	1,847	1,870
Trigger Frequency (%)	100	69.31	58.45	48.02
Driving Time (s)	162.38	128.35	135.64	143.15
Average Speed (m/s)	3.35	4.59	4.35	3.94

4 Conclusion

This paper implements the time-triggered model predictive control (MPC) and event-triggered MPC to solve a vehicle path tracking problem in a real-world scenario. The main contribution of this paper is to demonstrate the advantage of event-triggered MPC. The study begins by developing a bicycle kinematic model, which is then utilized to apply MPC for controlling the lateral motion of the vehicle. In event- triggered MPC, the lateral offset of the vehicle's current position from the reference path is used to determine whether a new optimization problem is necessary. The testing platform is a full-size sedan equipped with a drive-by-wire system, a Polynav 2000P GNSS-inertial system, a Calmcar front view camera with lane detection capabilities,

and a Dspace Autera computing unit. We conducted two experiments using time-triggered MPC and event-triggered MPC to validate the benefit of the event-triggered MPC over the time-triggered MPC. Experimental results show that the event-triggered MPC can reduce the computation in a vehicle path tracking problem by 50 % while providing better control performance. For future work, more experiments should be run with different event-triggered MPC settings in more challenging driving maneuvers to validate the robustness of the proposed approaches.

あとがき

自動運転の要素技術は大きく分けて「認知」・「判断」・「制御」です。認知判断によって得られる「目標」どおりに車を動かす「制御」は、ADASと比較した際に自動運転に求められる操舵曲率の違いにより自動運転のための制御技術は、ADASよりも進んだものが求められます。

本報告はITCAの近隣のOakland大学との産学協同で実施した先進自動運転制御技術の報告です。

最後に例年と同じ言葉になりますが「いすゞの中で役に立ついすゞテクニカルセンターオブアメリカInc.でありたい」と社員一同が一丸となって取り組んでいる様子が本報告で少しでも伝われば幸いです。

（ITCA チーフエンジニア 深井　泰雄）

References

(1) H. Abraham, C. Lee, S. Brady, C. Fitzgerald, B. Mehler, B. Reimer, and J. F. Coughlin: “Autonomous vehicles and alternatives to driving: trust, preferences, and effects of age,” in Proceedings of the transportation research board 96th annual meeting. Transportation Research Board Washington, DC, (2017), pp. 8-12.

(2) J. B. Rawlings: “Tutorial overview of model predictive control,” IEEE Control Systems Magazine, vol. 20, no. 3, (2000), pp. 38-52

(3) A. Irshayyid and J. Chen: “Comparative study of cooperative platoon merging control based on reinforcement learning,” Sensors, vol. 23, no. 2, (2023), pp. 1-23.

(4) J. Chen, M. Liang, and X. Ma: “Probabilistic analysis of electric vehicle energy consumption using MPC speed control and nonlinear battery model,” in 2021 IEEE Green Technologies Conference, Denver, CO, April 7-9, (2021).

(5) A. Bemporad, F. Borrelli, M. Morari et al.: “Model predictive control based on linear programming˜ the explicit solution,” IEEE transactions on automatic control, vol. 47, no. 12, (2002), pp. 1974-1985,.

(6) H. Chen and F. Allgöwer: “A quasi-infinite horizon nonlinear model predictive control scheme with guaranteed stability,” Automatica, vol. 34, no. 10, (1998), pp. 1205-1217.

(7) D. Bernardini and A. Bemporad: “Energy-aware robust model predictive control based on noisy wireless sensors,” Automatica, vol. 48, no. 1, 2012, pp. 36-44.

(8) R. Badawi and J. Chen: “Enhancing enumeration-based model predictive control for dc-dc boost converter with event-triggered control,” in 2022 European Control Conference, London, UK, July 12-15, (2022).

(9) —: “Performance evaluation of event-triggered model predictive control for boost converter,” in 2022 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Merced, CA, November 1–4, (2022).

(10) N. He and D. Shi: “Event-based robust sampled-data model predictive control: A non-monotonic lyapunov function approach,” IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 62, no. 10, (2015), pp. 2555-2564

(11) J. Yoo and K. H. Johansson: “Event-triggered model predictive control with a statistical learning,” IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 51, no. 4, (2021) pp. 2571-2581,.

(12) D. Lehmann, E. Henriksson, and K. H. Johansson: “Event-triggered model predictive control of discrete-time linear systems subject to disturbances,” in 2013 European Control Conference (ECC). IEEE, (2013), pp. 1156-1161.

(13) F. Dang, D. Chen, J. Chen, and Z. Li: “Event-triggered model predictive control with deep reinforcement learning.” [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/2208.10302.pdf

(14) H. Yang, Q. Li, Z. Zuo, and H. Zhao: “Event-triggered model predictive control for multi-vehicle systems with collision avoidance and

obstacle avoidance," International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 31, no. 11, (2021), pp. 5476-5494.
(15) J. Liu, Z. Wang, and L. Zhang: "Event-triggered vehicle-following control for connected and automated vehicles under nonideal vehicle- to-vehicle communications," (2021).
(16) T. Wakasa, K. Sawada, and S. Shin: "Event-triggered switched pinning control for merging or splitting vehicle platoons," IFAC-PapersOnLine, vol. 53, no. 2, (2020), pp. 15 134-15 139,.
(17) N. T. Hung, A. M. Pascoal, and T. A. Johansen: "Cooperative path following of constrained autonomous vehicles with model predictive control and event-triggered communications," International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 30, no. 7, (2020), pp. 2644-2670,.
(18) N. T. Hung and A. M. Pascoal: "Cooperative path following of autonomous vehicles with model predictive control and event triggered communications," IFAC-PapersOnLine, vol. 51, no. 20, (2018), pp. 562-567,.
(19) Q. Han, G. Cheng, H. Yang, and Z. Zuo: "Bandwidth-aware transmission scheduling and event- triggered distributed mpc for vehicle platoons," in 2022 41st Chinese Control Conference (CCC), (2022), pp. 5532-5538.
(20) K. Zou, Y. Cai, L. Chen, and X. Sun: "Event-triggered nonlinear model predictive control for trajectory tracking of unmanned vehicles," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, (2021), p. 0954407021992165.
(21) J. Chen and Z. Yi: "Comparison of event-triggered model predictive control for autonomous vehicle path tracking," in 2021 IEEE Conference on Control Technology and Applications. IEEE, 2021, pp. 808-813.
(22) S. Huang and J. Chen, "Event-triggered model predictive control for autonomous vehicle with rear steering," SAE Technical Paper, no. 2022-01-0877, 2022.
(23) J. Chen, X. Meng, and Z. Li, "Reinforcement learning-based event- triggered model predictive control for autonomous vehicle path following," in American Control Conference, Atlanta, GA, June 8-10, 2022.
(24) R. Rajamani, Vehicle dynamics and control. Springer Science & Business Media, 2011.
(25) J. B. Rawlings, D. Q. Mayne, and M. Diehl, Model predictive control: theory, computation, and design. Nob Hill Publishing Madison, WI, 2017.
(26) Z. Zhou, C. Rother, and J. Chen, "Event-triggered model predictive control for autonomous vehicle path tracking: Validation using Carla simulator," IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, accepted for publication April 2022.

Zhaodong Zhou and Jun Chen have reviewed the manuscript and agreed with its publication.

著　者


Meng Xu


Peng Zhang


Mingyuan Tao


Zhaodong Zhou


Jun Chen

解説・講義

人とくるまのテクノロジー展 2024 への出展

Automotive Engineering Exposition 2024 Hosted by JSAE

中村　直人*
Naoto Nakamura

要　旨

公益社団法人自動車技術会が主催する自動車技術展「人とくるまのテクノロジー展 2024」を横浜会場と名古屋会場で開催、更に 2021 年より導入したオンライン展示との同時開催となった。

本稿では、主にいすゞの展示内容について紹介する。

Abstract

"Automotive Engineering Exposition 2024" hosted by the Society of Automotive Engineers of Japan, Inc. was held in Yokohama and Nagoya, Furthermore, the exhibition was held at the same time as the online exhibition which was introduced in 2021.

This article introduces the situation of the exhibition.

1　はじめに

人とくるまのテクノロジー展（以下、「人テク展」と略す）2024 は、日本をはじめ多くの国・地域がカーボンニュートラルへの取り組みを加速させ、更に持続可能な社会を実現するために、「共創」と「循環」をキーワードとし、「英知を集結しよう！カーボンニュートラル、その先の循環型社会へ」をスローガンに掲げて開催された[(1)]。

いすゞは、このスローガンをもとに最新の車両や技術開発について紹介した。

2　人テク展 2024 開催概要

人テク展は、エンジニアをメインターゲットとした日本最大規模の自動車技術展であり、いすゞは製品技術のアピールと、他社の技術動向調査並びに技術者と意見を深め合う場として活用している。

《2024 年度の開催について》
パシフィコ横浜：5 月 22 日（水）～24 日（金）
Aichi Sky Expo：7 月 17 日（水）～19 日（金）
オンライン：5 月 15 日（水）～6 月 5 日（水）
　　7 月 10 日（水）～7 月 31 日（水）

人テク展 2024 には、自動車メーカーのほか、自動車関連企業、メディア関係並びに学生など、多くのお客様が来場され、大いに賑わいをみせた。

なお、来場者数は次の①、②のとおりで、前年を大きく上回った[(1)]。

① 人テク展 2024 横浜
　会場来場登録者数：75,972 名（前年比 +12,162 名）
② 人テク展 2024 名古屋
　会場来場登録者数：29,852 名（前年比 +4,355 名）

3　いすゞ出展について

3.1 いすゞ出展概要

いすゞブースでは、環境への取り組みや車両提供にとどまらない新しい価値創造をテーマに、最新車両、カーボンニュートラル技術、自動運転技術について①～③の展示を行った。

① 最新車両

カーボンニュートラル社会の実現と、ドライバー不足解決への提案として開発した、AT（Automatic Transmission）限定普通運転免許で運転できる EV（Electric Vehicle）トラック“エルフミオ EV”を実車展示。

② カーボンニュートラル技術

いすゞが目指す商品の脱炭素化に向けた取り組みの全体像と、BEV（バッテリー式電気自動車：Battery Electric Vehicle）・FCV（燃料電池自動車：Fuel Cell Vehicle）・ICEV（内燃機関車両：Internal Combustion Engine Vehicle）に関する技術開発の状況について展示。各展示の内容は以下のとおり。

- 全体像：2050 年カーボンニュートラルを目指し作成した商用車シフティングシナリオや次世代車両開発の概況を紹介。

*開発技術企画部

- BEV：カーボンニュートラル社会における新たな価値創造の一環としていすゞが提案する EVision Cycle Concept（商用車バッテリー交換式 EV コンセプト）、路線バスを BEV 化した新型エルガ EV を紹介。
- FCV：大型 FCV 並びに小型 FCV の実証試験の進捗を紹介。
- ICEV： ICEV とカーボンニュートラル燃料の組み合せによる輸送効率とカーボンニュートラルの両立を目指し、いすゞが参画して進めるカーボンニュートラル燃料の実証事業を紹介。

③　自動運転技術

自動運転の実現に向けた取り組みの概要、大型トラック自動運転プロト車について紹介。

なお、会場（**図 1**）での展示方法は**表 1** のとおり。



図 1　いすゞブース

表 1　会場展示方法

No.	展示内容	展示方法
①	エルフミオEV	実車、パネル
②	脱炭素化に向けた取り組みの全体像	パネル
	BEV	パネル、動画
	FCV	パネル
	ICEV	パネル
③	自動運転技術	パネル、動画

いすゞブース以外には、横浜会場の自動車技術会賞コーナーにて技術開発賞を受賞した「ISIM（アイシム：Isuzu Smooth Intelligent TransMission）」をパネルで紹介した。

また、名古屋会場では、新技術搭載車両展示コーナーにて 2023 年 9 月に新たにラインナップに加わった最新ギガ（低床 3 軸 25 t 車）を実車展示。また、車両に搭載している先進安全技術をパネル及び動画で紹介した（**図 2**）。

更に、オンライン展示には、会場で展示したパネル・動画と同様の情報を展開。パネルは日本語版のみであったため、オンラインでは英訳版を用意し、会場に来場された外国籍の方への説明にも活用した。



図 2　新技術搭載車両ブース

3.2 いすゞブースの状況

いすゞ出展ブースには、多くのお客様が来場され、活況を呈した（**図 3**）。



図 3　いすゞブースの様子

特に実車初展示となったエルフミオ EV は注目を集めた（**図 4**）。架装を外しキャブチルトした状態で展示したことで、普段は見られない装置を見ることができ、お客様より好評を得た。また、「I-MACS（アイマックス：Isuzu Modular Architecture and Component Standard）」に基づき、車両の操作系やレイアウトをディーゼル車と可能な限り共通化している点に多くの方が興味を示した。

更に、AT 限定普通運転免許で運転できるようにし、トラックドライバーの裾野を広げるいすゞの試みに対しては、多くの方よりポジティブな意見をいただいた。



図 4　エルフミオ EV 展示

環境対応への関心は非常に高く、カーボンニュートラル技術の展示では、多くの方が足を止めて熱心に説明を聞いていた（**図 5**）。

また、BEV、FCV、ICEV に関して、幅広くさまざまな意見が寄せられた。中でも、車両とバッテリーの分離運用により効率的な稼働や再生可能エネルギーの有効活用に貢献する EVision Cycle Concept に対して強い関心が示され、実用化して社会課題の解決につながることを望む声が多く聞かれた。



図 5　カーボンニュートラル技術展示の様子

自動運転技術の展示では、実用化の時期、適用範囲、遠隔監視と運行管理の取り組み方針などについて多くの質問があり、自動運転の実現への期待の高さがうかがえた。また、いすゞは自動運転の実用化を目指し、さまざまなパートナーシップを模索していることを認識されており、いすゞ担当者とサプライヤーとの間で積極的な意見交換が行われた。

3.3　新技術搭載車両展示コーナーの状況

新技術搭載車両コーナーではギガの運転席横に階段を設置し、実際にお客様が運転席に座る乗車体験を行った（**図 6**）。

初めて大型トラックに乗車する方が多く、キャビン内の広さ・シートの乗り心地のよさ・収納量の多さ・乗用車とは異なる高い視点など、大型車ならではの体験に喜びのコメントを数多くいただいた。



図 6　ギガ乗車の様子

4　おわりに

「人テク展 2024」は、いすゞにとって最新技術を披露し、多くのお客様と意見交換を行う貴重な機会となった。また、カーボンニュートラル技術や自動運転技術に対する高い関心と期待が寄せられ、今後の技術開発に向けて大きな励みとなるフィードバックを得ることができた。

今後もお客様の興味・関心を集められる商品と技術の紹介に努める。

最後に人テク展 2024 の出展にご協力いただいた皆様にこの場を借りて、感謝の意を表す。

参考文献

(1) 自動車技術展 - 人とくるまのテクノロジー展 2024, 公益社団法人自動車技術会 ,2024 年 7 月 24 日更新 , https//aee.expo-info.jsae.or.jp/ja/

著　　者



中村　直人

特　許　紹　介

Introduction of ISUZU Patents

車室床面のノンステップ構造

特許番号：第 7212867 号（2023/01/18 登録）
出願番号：特願 2021-051863（2021/03/25 出願）

＜課題＞

ホイールベースの変更を要することなく、車室床面の後側全域の低床化及びノンステップ化が可能な車室床面のノンステップ構造の提供を目的とする。

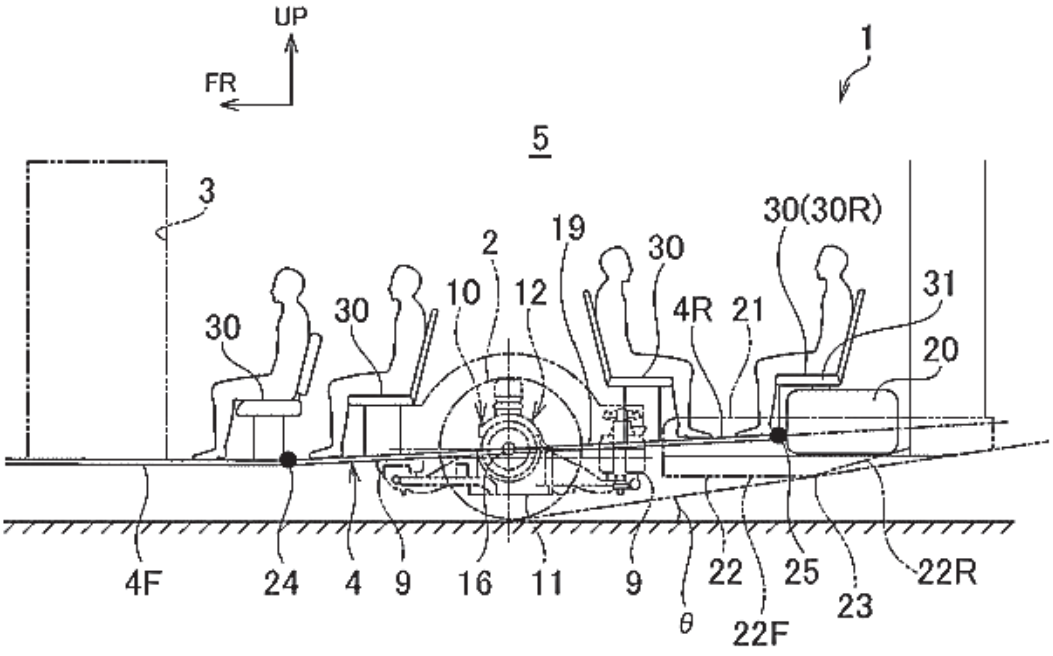
＜発明＞

本発明にかかる車両の車室内の後部を模式的に示す側面図を**図 1** に示す。

本発明にかかる車室床面のノンステップ構造は、車幅方向に延びる板状のモータマウント 11 と、モータマウント 11 の車幅方向の両端部に載置され固定される左右のインホイールモータユニット 12 とによって構成され、左右のインホイールモータユニット 12 の間のモータマウント 11 の中間部の上面がアクスル回転軸の軸心 16 よりも下方に位置し、モータマウント 11 の中間部にアクスル関連部品が取付けられるリヤアクスル 10 と、リヤアクスル 10 にサスペンション 9 を介して弾性支持される車体側で車室床面を形成するフロアパネル 4 と、車室 5 の最後部に配置される後部座席 30R とを備え、アクスル回転軸よりも車両前側から後部座席 30R のシートクッション 31 の前端下方に至るフロアパネル 4 の後側領域 4R は、左右のインホイールモータユニット 12 の間で車両後方に向かって上方に傾斜する傾斜面部 19 を有し、傾斜面部 19 は、モータマウント 11 の中間部及びアクスル関連部品のうち最も上方に位置するアクスル上端の上方を通り、フロアパネルの後側領域 4R は、傾斜面部 19 を含む車両前後方向の全域において、段差が存在せずに連続することを特徴とする。

＜効果＞

本発明によれば、フロアパネル 4 の後側領域 4R に、左右のインホイールモータユニット 12 の間で車両後方に向かって上方に傾斜してアクスル上端の上方を通る傾斜面部 19 を設けているので、フロアパネル 4 の後側領域 4R の全域を、低位置でかつ段差が存在しない連続面とすることができる。すなわち、ホイールベースの変更を要することなく、車室床面の後側全域の低床化及びノンステップ化を実現することができる。



【図 1】

バスのエアサスペンション構造

特許番号:第 7296061 号（2023/06/14 登録）
出願番号:特願 2022-005944（2022/01/18 出願）

＜課題＞

インアクスルモータ型のリヤアクスルを備えるバスにおいて、エアスプリングを安定して支持することができ、かつ車室床面の低床領域を拡大することが可能なエアサスペンション構造の提供を目的とする。

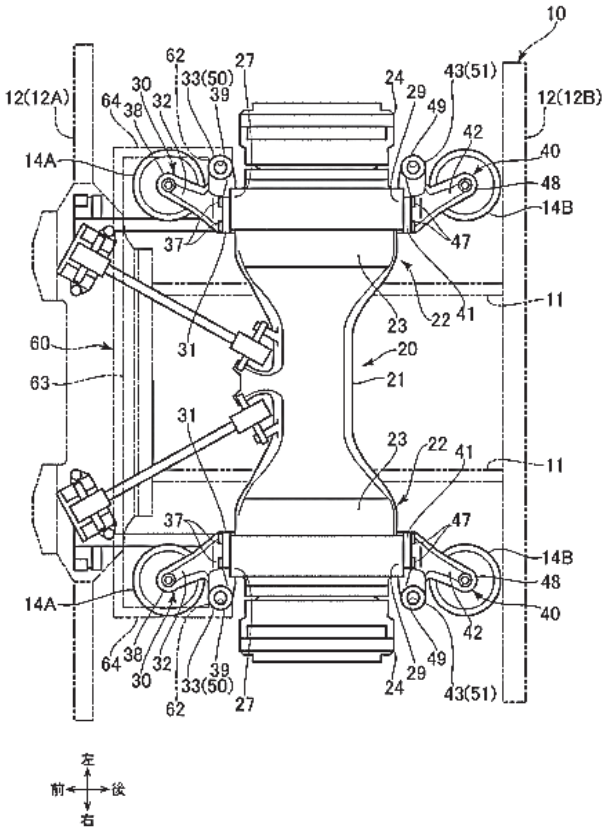
＜発明＞

本発明にかかるリヤサスペンション構造を下方から視た平面図を**図 2** に、また左前のリヤサスペンション構造を車幅方向外側前上方から視た斜視図を**図 3** に示す。

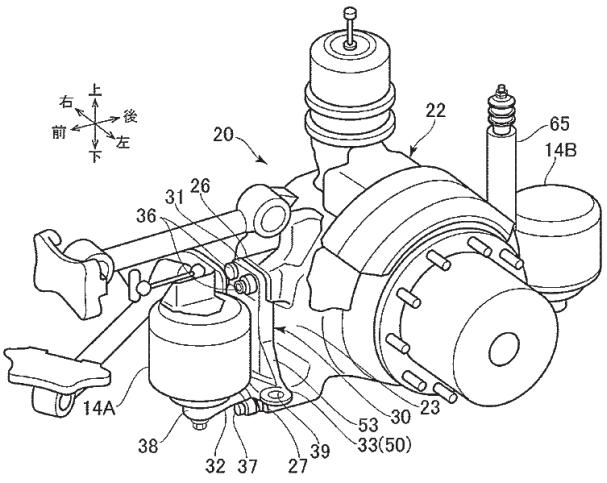
本発明にかかるエアサスペンション構造は、インアクスルモータ型のリヤアクスル 20 を備えるバスに設けられ、左右のインアクスルモータユニット 22 の前後にそれぞれ配置されるエアスプリング 14 が車体フレーム 10 とリヤアクスル 20 との間に介在するエアサスペンション構造であって、インアクスルモータユニット 22 の前面に設けられる前ビーム下固定部 27 と、インアクスルモータユニット 22 の後面に設けられる後ビーム下固定部 29 と、前ビーム下固定部 27 に車両前方から重なって固定される前ビームフランジ部 31 と、前ビームフランジ部 31 から車両前方へ延び、前側のエアスプリング 14A を下方から支持する前エアスプリング支持部 38 を前端に有する前ビーム本体部 32 と、を一体的に有する前側のビーム 30 と、後ビーム下固定部 29 に車両後方から重なって固定される後ビームフランジ部 41 と、後ビームフランジ部 41 から車両後方へ延び、後側のエアスプリング 14B を下方から支持する後エアスプリング支持部 48 を後端に有する後ビーム本体部 42 とを一体的に有する後側のビーム 40 とを備え、前エアスプリング支持部 38 と前側のエアスプリング 14A とは、リヤアクスル前方直近のクロスメンバ 12A よりも車両後方に配置されることを特徴とする。

＜効果＞

本発明によれば、前エアスプリング支持部 38 と前側のエアスプリング 14A とがリヤアクスル前クロスメンバ 12A よりも後方に配置されるので、車室床面の低床領域の後側をリヤアクスル前クロスメンバ 12A まで拡大することができる。



【図 2】



【図 3】

社外発表（2023年1月 ～ 2023年12月）

◇講　演

発表者所属は、発表年月時点である

発表日	発表先	表題	発表者	所属
1/20	（一社）品質工学会 品質工学会特別企画シンポジウム	ロバスト開発推進におけるDFSSの適用事例 ー摩擦減衰ボルトの開発ー	衛藤　洋仁 高倉　裕太朗	車両審査実験第二部 ＰＴ実験第二部
1/24	（公社）自動車技術会 No.07-22 シンポジウム 「ディーゼル機関の熱効率追求と燃焼改善のための多様なアプローチ」	燃料噴霧と燃焼室形状の考え方	石井　義範	㈱いすゞ中央研究所
2/9～ 2/10	東京大学モビリティ・イノベーション連携研究機構 第15回自動車技術に関するCAEフォーラム2023オンライン	自動運転トラック実現に向けた階層型非線形モデル予測制御	鈴木　元哉 蛯名　浩志 牧野　統真 薮井　将太 野中　謙一郎 深沢　慎一郎	㈱いすゞ中央研究所 東京都市大学 〃 〃 〃 ㈱いすゞ中央研究所
		CAEにおけるかじり判定基準の作成	石黒　尚志	車体技術部
3/2	薄鋼板成形技術研究会 2022年度 第4回薄鋼板成形技術研究会 研究討論会	AIを用いたプレスワレ自動画像検査	山出　直弘	車体技術部
3/9	（公社）自動車技術会 関東支部 2022年度学術研究講演会	自動運転を考慮した覚醒度推定の精度向上についての検討	草刈　由歌 杉浦　康司	㈱いすゞ中央研究所 〃
3/15～ 3/17	（一社）電気学会 令和5年電気学会全国大会	EV用バッテリのオンボード電気化学測定に向けた取り組み	加藤　晃太 小川　誠 井深　重夫 横島　時彦 戸ヶ崎　徳大 逢坂　哲彌	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 物質・材料研究機構 早稲田大学 〃
3/20	（一社）室内環境学会 新型コロナウイルスの感染対策に有用な室内環境研究の最新情報	バスにおける換気と空調フィルターによる感染対策	達　晃一	車両審査実験第二部
4/13	大豊工業トライボロジー研究財団, 大豊工業株式会社 TTRF-TAIHO International Symposium on Automotive Tribology 2023	Development of Future Powertrains for Commercial Vehicles	石川　直也	㈱いすゞ中央研究所
5/24～ 5/26	（公社）自動車技術会 2023春季大会	実働時のシリンダボア形状改善によるディーゼル機関の性能向上（第2報） ー円筒ボア形状が機関性能におよぼす影響ー	三田　拓朗 日比　大雅 山下　健一	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃
		ピストン設計パラメータが油膜形成におよぼす影響	石川　泰裕 伊東　明美 川村　晃生 山下　健一	㈱いすゞ中央研究所 東京都市大学 〃 ㈱いすゞ中央研究所
		大型トラック用廃熱回収ランキンサイクルに関する研究	相園　斉 福永　晋 松浮　朋冬 浅野　雅樹 阿部　誠 加藤　晃太 吉永　寛史	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃 〃 〃

発表日	発表先	表題	発表者	所属
5/24～ 5/26	（公社）自動車技術会 2023春季大会	実働時のシリンダボア形状改善によるディーゼル機関の性能向上（第1報） ー熱膨張を考慮した円筒ボア形状のCAEによる効果予測ー	日比　大雅 三田　拓朗 山下　健一	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃
		筒内空気噴射による燃焼改善手法の検討	宮下　和也 古川　伸哉 橋本　宗昌 石井　義範 山下　健一	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃
5/25～ 5/26	（一社）燃料電池開発情報センター 第30回燃料電池シンポジウム	商用車の電動化技術と課題	福永　晋	㈱いすゞ中央研究所
5/30～ 6/2	（一社）日本環境化学会 第2回 環境化学物質3学会合同大会	ガスクロマトグラフィー質量分析法の代替キャリアガス検討	達　晃一 中村　貞夫	車両審査実験第二部 アジレント・テクノロジー㈱
6/20	日本不織布協会 フィルター部会分科会	公共交通機関におけるウイルス感染対策	達　晃一 篠原　直秀	車両審査実験第二部 産業技術総合研究所
6/29	薄鋼板成形技術研究会 2023年度 第1回薄鋼板成形技術研究会 研究討論会	プレス金型への動解析適用の取組み 第二報	木村　淳	要素技術部
7/12～ 7/14	（公社）自動車技術会 フォーラム2023 車体の最新技術2023 （構造形成技術部門委員会）	新型エルフの車体技術	福澤　克朗 馬場　晧平 三根　康平 後藤　遼 半田　正樹 中山　陽平 中森　友将 折井　拓	車両設計第三部 〃 〃 〃 〃 〃 〃 〃
7/13	ニュートンワークス㈱ CAE World 2023	EVトラックの運用/充電シミュレーションへのSimulationX Green City活用事例の紹介	浅野　雅樹	㈱いすゞ中央研究所
8/22～ 8/24	（一社）電気学会 2023年電気学会産業応用部門大会	商用車の電動化技術	西村　怜馬 小川　誠	㈱いすゞ中央研究所 〃
8/29～ 9/1	（公社）自動車技術会/SAE International 2023 Powertrains, Energy and Lubricants Meeting （パワートレーン、エネルギー潤滑油 国際会議）	In-cylinder Air Injection for Diesel Combustion Improvement	宮下　和也 古川　伸哉 橋本　宗昌 石井　義範 山下　健一	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃
9/8	（公社）自動車技術会 燃料潤滑油部門委員会 No.01-23講習会「燃料･潤滑油入門」	潤滑油の規格 乗用車･大型車用エンジン油の規格	星野　崇	車両審査実験第二部
10/7～ 10/8	（公社）計測自動制御学会 第66回自動制御連合講演会	スパースデータ駆動モデリングを用いた非線形モデル予測制御：ディーゼルエンジンの吸排気システムへの適用	矢作　修一 瀬戸　洋紀 米沢　安成 梶原　逸朗	㈱いすゞ中央研究所 〃 北海道大学 〃
10/11～ 10/13	（公社）自動車技術会 2023秋季大会	小型商用車用9速トランスミッションの開発	秋山　雄介 明石　浩平 岡本　壮史 金子　直弘 大西　俊介 江浪　健宏	駆動商品企画・設計部 〃 〃 〃 〃 〃

発表日	発表先	表題	発表者	所属
10/11～ 10/13	（公社）自動車技術会 2023秋季大会	将来に向けた車室内空気質デザイン	達　晃一 篠原　直秀 坂口　淳 金　勲 徳村　雅弘 長尾　祥大 臼井　信介 栗原　昇 岩井　彩 後藤　貞仁 林　則光 鍵　直樹 津田　研一郎 久野　稔 内藤　航	車両審査実験第二部 産業技術総合研究所 新潟県立大学 国立保健医療科学院 静岡県立大学 エスペック㈱ ㈱カネカテクノリサーチ 産業技術総合研究所 〃 東洋紡エムシー㈱ 法規・認証部 東京工業大学 ㈱いすゞ中央研究所 ジーエルサイエンス㈱ 産業技術総合研究所
		ディーゼルエンジンのライトサイジングによる部分負荷の熱効率向上コンセプト（第1報） ーシミュレーションによるコンセプト構築と実機検証結果ー	大橋　伸匡 伊東　光 古川　貴幸 榎　和広 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃
		ディーゼルエンジンのライトサイジングによる部分負荷の熱効率向上コンセプト（第2報） ー図示熱効率と低フリクション技術による燃費改善の検証ー	石川　直也 大橋　伸匡 伊東　光 古川　貴幸 榎　和広	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃
		ディーゼル排出ガス後処理システムにおける各触媒の水熱劣化がNOx浄化率に与える影響の解析	岡　耕平 清水　昭義 鎌倉　聖 本谷　綾子 小澤　恒 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃 〃
10/17～ 10/20	The 23rd International Conference on Control, Automation and Systems （国際会議ICCAS 2023）	Data-Driven Design for Model-Referenced Model-Free Controller	矢作　修一 梶原　逸朗	㈱いすゞ中央研究所 北海道大学
10/25	（一社）日本陸用内燃機関協会 陸内協第23回技術フォーラム	軽油へのOME混合が燃料性状とディーゼル機関性能に及ぼす影響	森田　真一	㈱いすゞ中央研究所
11/17	（公社）自動車技術会 No.07-23シンポジウム 「動力伝達系の最新技術2023」	小型商用車用9速トランスミッションの開発	金子　直弘 明石　浩平 岡本　壮史 秋山　雄介 大西　俊介 江浪　健宏	駆動商品企画・設計部 〃 〃 〃 〃 〃
11/18	早稲田大学 早大モビリティ研究会 第43回早大モビリティシンポジウム	ディーゼルエンジンのライトサイジングによる部分負荷の熱効率向上コンセプト	大橋　伸匡	㈱いすゞ中央研究所
11/30～ 12/1	（一社）室内環境学会 室内環境学会学術大会	ガスクロマトグラフィー質量分析法の代替キャリアガス検討	達　晃一 中村　貞夫 芹野　武 星野　邦広	車両審査実験第二部 アジレント・テクノロジー㈱ 〃 ㈱ENVサイエンストレーディング
12/22	（公社）自動車技術会 No.15-23シンポジウム 「ゼロエミッションに向けたOEM視点でのEV・水素社会の実現と将来展望（第二弾）」	商用車の電動車・電動化技術	浅野　雅樹	㈱いすゞ中央研究所

（公社）：公益社団法人
（一社）：一般社団法人
（株）：株式会社

◇投 稿

発表者所属は、発表年月時点である

発表月	発表先（掲載誌）	表題	発表者	所属
2023/01	（公社）自動車技術会 自動車技術会論文集 2023年，54巻，2号	リーンNOxトラップのモデルベース開発に関する研究（第2報） －LNTの酸素及びNOxの吸蔵・脱離特性のモデリング－	大堀　鉄平 猪股　浩典 板垣　裕 小澤　恒 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所 エンジン装置設計部 ㈱いすゞ中央研究所 〃 〃
2023/02	SICE Journal of Control Measurement, and System Integration Vol.16	Intelligent PI control based on ultra-local model and Kalman filter for vehicle yaw-rate control	矢作　修一 鈴木　元哉	㈱いすゞ中央研究所 〃
2023/02	（一社）電気学会 電気学会論文誌C（電子・情報・システム部門誌） 2023年，143巻，2号	横滑り外乱フィードフォワード制御器とPI 制御器を備えた自動運転向けヨーレート制御系に対するデータ駆動制御	鈴木　元哉 矢作　修一	㈱いすゞ中央研究所 〃
2023/02	富士技術出版 Journal of robotics and mechatronics 2023年，35巻，2号	Yaw-rate controller parameter tuning for autonomous driving: Virtual internal model tuning approach	鈴木　元哉 矢作　修一	㈱いすゞ中央研究所 〃
2023/03	The Institution of Engineering and Technology; IET Electronics Letters Vol.59，Issue6	Controller parameter tuning for gain‐scheduled vehicle yaw‐rate control: Virtual reference feedback tuning approach	矢作　修一 鈴木　元哉	㈱いすゞ中央研究所 〃
2023/03	（公社）石油学会 ペトロテック 2023年3月号（Vol.46，No.3）	カーボンニュートラルに向けた燃焼技術の動向 「OME混合軽油の燃焼特性」	森田　真一	㈱いすゞ中央研究所
2023/03	（公社）自動車技術会 自動車技術会論文集 2023年，54巻，2号	リーンNOxトラップのモデルベース開発に関する研究（第3報） －リッチ雰囲気下におけるラムダセンサのモデリング－	藤井　謙治 大堀　鉄平 猪股　浩典 長岡　大治 板垣　裕 小澤　恒 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所 〃 エンジン装置設計部 ＰＴ実験第一部 ㈱いすゞ中央研究所 〃 〃
2023/03	（公社）日本鋳造工学会 鋳造工学 2023年，95巻，3号	カーボンニュートラルと鋳造業界の進むべき道	茂泉　健 木村　寿利 吉田　誠 林　憲司 古川　雄一 清水　一道 西山　知克	IM推進部 ㈱木村鋳造所 早稲田大学 日産自動車㈱ トヨタ自動車㈱ 室蘭工業大学 ㈱小松製作所
2023/04	（一社）品質工学会 品質工学 4月号	技術開発におけるデザイン・フォー・シックスシグマ適用の検討 －応力ロバストアイテムの開発－	高倉　裕太朗 箱本　健次郎 城　一樹 衛藤　洋仁	ＰＴ実験第二部 ＣＡＥデジタル開発推進部 ＰＴ実験第二部 車両審査実験第二部
2023/05	Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE IEEE Access Vol.11	Noniterative Data-Driven Gain-Scheduled Controller Design Based on Fictitious Reference Signal	矢作　修一 梶原　逸朗	㈱いすゞ中央研究所 北海道大学
2023/07	（一社）日本機械学会 機械工学年鑑2023	9.エンジンシステム 9.2.2トラック・バス用機関	山下　健一	㈱いすゞ中央研究所
2023/08	（公社）自動車技術会 自動車技術 2023年，8月号	年鑑 代替燃料エンジン（DMEエンジン）	徳丸　武志	㈱いすゞ中央研究所
2023/08	（公社）自動車技術会 自動車技術会論文集 2023年，54巻，5号	ピストン設計パラメータが油膜形成におよぼす影響 －ピストンピンオフセットの影響－	石川　泰裕 川村　晃生 伊東　明美 山下　健一	㈱いすゞ中央研究所 東京都市大学 〃 ㈱いすゞ中央研究所

発表月	発表先（掲載誌）	表題	発表者	所属
2023/09	（公社）自動車技術会 自動車技術会論文集 2023年，54巻，5号	筒内空気噴射による燃焼改善手法の検討	宮下　和也 古川　伸哉 橋本　宗昌 石井　義範 山下　健一	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃
2023/10	（公社）自動車技術会 自動車技術会論文集 2023年，54巻，6号	実働時のシリンダボア形状改善によるディーゼル機関の性能向上（第1報） －熱膨張を考慮した円筒ボア形状のCAEによる効果予測－	日比　大雅 三田　拓朗 山下　健一	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃
		実働時のシリンダボア形状改善によるディーゼル機関の性能向上（第2報） －円筒ボア形状が機関性能におよぼす影響－	三田　拓朗 日比　大雅 山下　健一	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃

（公社）：公益社団法人
（一社）：一般社団法人
（株）：株式会社

編　集　委　員

（2024 年 9 月 30 日現在）

〈編集委員長〉

小嶋　充　（開発技術企画部）

〈編集委員〉

星野　直宏　（産業エンジン開発部）
大西　高広　（PT 商品企画・設計第一部）
木村　桂三　（PT 商品企画・設計第二部）
和田　潤一　（PT 商品企画・設計第三部）
江部　淳　（エンジン装置設計部）
渡橋　弘敏　（PT 実験第一部）
辻　誠　（PT 実験第二部）
児玉　裕　（xGV 企画・設計部）
赤尾　拓郎　（CN 商品企画・設計部）
山之内　大介　（CAE デジタル開発推進部）
平田　順　（デザインセンター）
高山　直人　（LCV 商品企画・設計部）
早坂　淳　（大型商品企画・設計部）
国守　亮太　（バス商品企画・設計部）
宮田　湧希　（小型・中型商品企画・設計部）
中村　研太　（グローバル CV 商品企画･設計部）
星野　理香　（シャシ設計第一部）
芹澤　尚宜　（シャシ設計第二部）
湯本　淳　（車両設計第二部）
馬場　皓平　（車両設計第三部）
山川　九司　（電装・車両制御開発部）
椎貝　竜二　（AS システム開発部）
小山　雄一　（PT 電子制御開発部）
松浦　文生　（駆動商品企画・設計部）
高野　二郎　（車両審査実験第一部）
松本　一隆　（車両審査実験第二部）
南　健司　（車両技術部）
瀬戸　雄史　（（株）いすゞ中央研究所）
鈴木　章一郎　（いすゞエンジニアリング（株））

〈事務局〉

境野　直也　（開発技術企画部）
森　瑞樹　（開発技術企画部）
北村　佳子　（開発技術企画部）
吉川　好美　（開発技術企画部）

編　集　後　記

いすゞ技報136号を最後までお読みいただきありがとうございます。本号では、2023年に開催されたジャパンモビリティショーで先行公開され、この度発売を迎えた大型路線EVバス「新型エルガEV」を特集として取り上げました。カーボンニュートラル化に向けた環境対応だけではなく、車内外の事故防止にも配慮しており、ほかにもさまざまな最新技術を盛り込んだ1台です。開発者たちの強い思いや拘り、一方で困難や苦労もあり、知恵を絞ったり工夫を凝らしたり、本特集を通して「新型エルガEV」の魅力とその開発の舞台裏を感じ取っていただけたら幸いです。

そのほか、『だれでもトラック』をコンセプトとして発表した「エルフミオ」の紹介、いすゞが取り組んでいる研究や最新技術の紹介をしました。改めて我々が抱える課題は多岐にわたり、解決に向けて日々取り組む必要があることを感じました。これからも、最新の技術情報を皆様にお伝えしていければと思います。

最後に、本号の製作にご協力いただいた皆様に心より感謝申し上げます。

（森　瑞樹：いすゞ技報編集事務局）

表紙について

今号から表紙の構成をリニューアルしました。新しい表紙はグラフィックに方向性を持たせることで、技術を進歩させて地球の「運ぶ」を創造するために未来を拓いていく前進感を込めました。

また、写真の車両は今号の特集でもある「新型エルガEV」です。BEV化による環境対応のみならず、国内初となる車内フロアのフルフラット化を実現し、地球にも人にも優しいバスになっています。

（花原　晴光：デザインセンター）

いすゞ技報　第136号

2024年11月1日　発行

編集兼
発行人　小　嶋　　充

発　行　いすゞ自動車株式会社
〒220-8720
神奈川県横浜市西区高島一丁目2番5号　横濱ゲートタワー

発行所　いすゞ自動車株式会社 開発技術企画部
〒252-0881
神奈川県藤沢市土棚8番地
電話0466(45)2601

印刷所　株式会社　ホクシン
〒211-0021
神奈川県川崎市中原区木月住吉町22-3
電話044(433)3251(代表)

©2024　いすゞ自動車株式会社（禁無断転載）

ISUZU

TOYO INK
non VOC
FSC
www.fsc.org
ミックス
紙 | 責任ある森林管理を支えています
FSC® C013161

いすゞ自動車株式会社