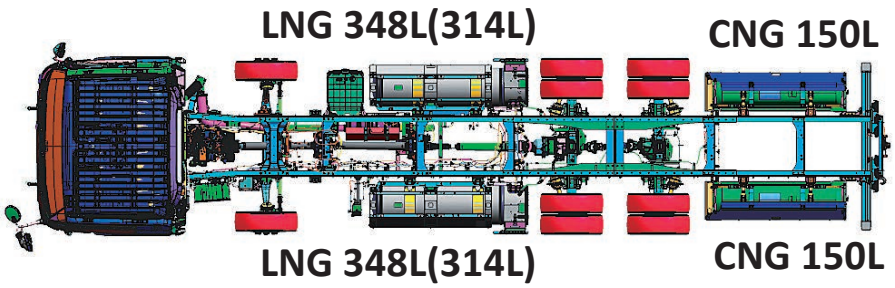
ISSN 0287-5446

いすゞ技報

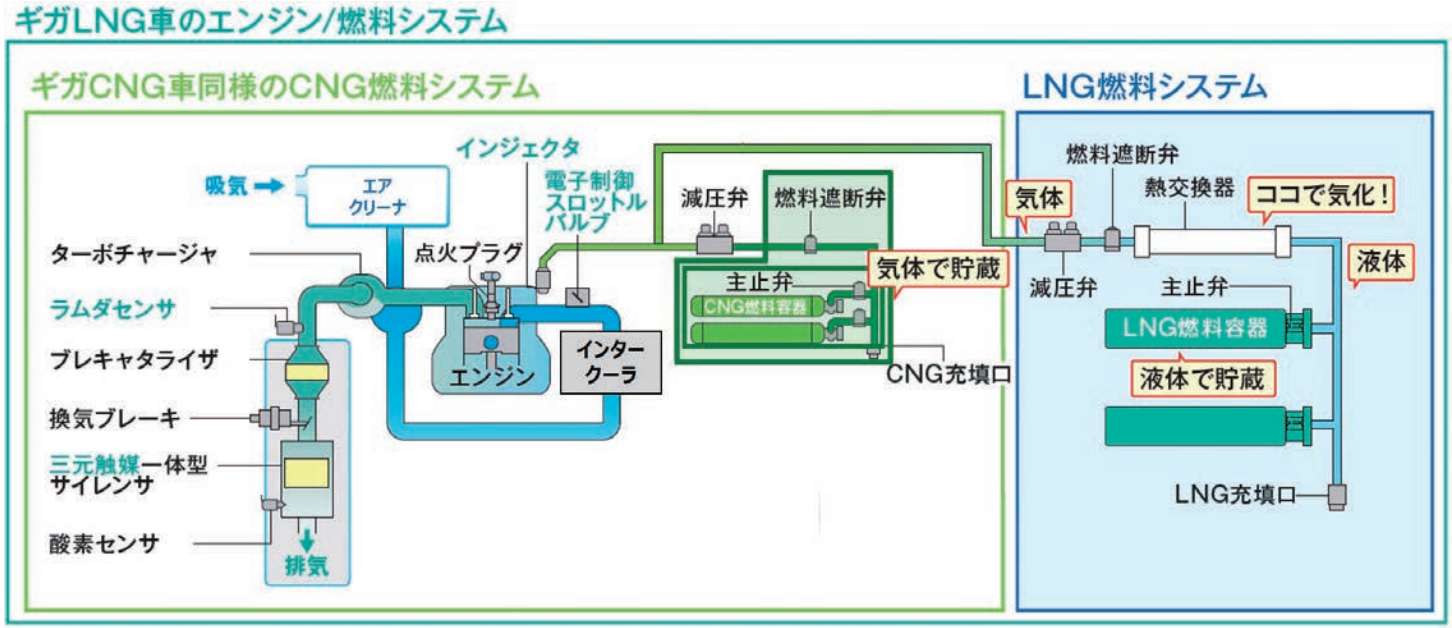
ISUZU TECHNICAL JOURNAL

134
NOV 2022





CYJ（8×4）標準レイアウト

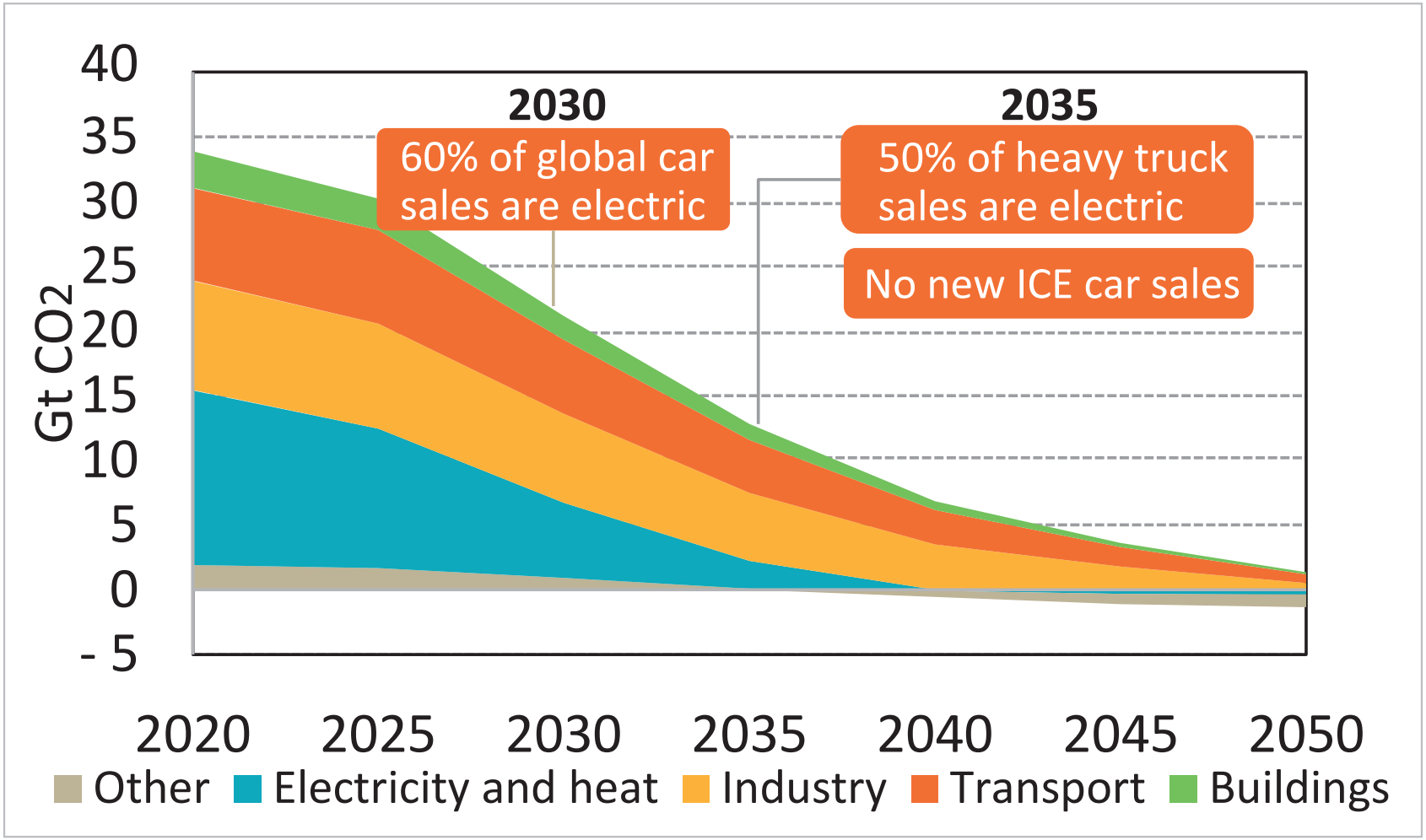


LNG燃料システム概要

（［新商品紹介］いすゞギガLNG車開発について, p.3-8）



搭載センサ取り付け位置
（トラック・バスの自動運転, p.52-58）



2050年に向けた産業ごとのCO_2排出ネットゼロのロードマップ
（IEAのデータを元に作成）
（欧州・日本のカーボンニュートラルに向けた政策動向, p.91-97）



プラネタリウムを備えた
横濱ゲートタワー



12階受付と大型LEDモニター

（横浜新本社の紹介, p.98-103）

いすゞ技報　第134号（2022）
目　　次

◇　巻頭言

カーボンニュートラルに向けたいすゞの取り組み …… 一政　都志夫 …… 1

◇　新商品紹介

いすゞギガ LNG 車開発について …… 赤木　三昌 ほか …… 3

◇　論文・報告

- フルビークル電磁波解析技術の車両開発への適用 …… 上田　威一郎 ほか …… 9
- 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 ほか ……15
- Transient Model-Based Calibration for Engine ECU Maps Using a Big Scale Multi-Objective Optimization Solver Running on the Cloud …… Yifan Wei ほか …… 22
- 米国における軽油の劣化と燃料タンク内部腐食について …… 渡邉　真未 ほか …… 30
- コネクテッド・データを活用した実路走行大型車 SCR の水熱劣化度推定 …… 本谷　綾子　ほか …… 36
- Exploration and Sweeping for Autonomous Sweeper Truck in the Geofence Scenario …… Weifan Zhang ほか …… 42
- トラック・バスの自動運転 …… 對馬　一昭 …… 52
- モデル予測制御を用いた小型トラック向け自動運転システム …… 鈴木　元哉 …… 59
- 機能安全への取り組み …… 阿部　信之 ほか …… 65
- 車両検査設備 インタフェース無線化及びソフト開発 …… 高市　壮太 ほか ……71
- 北米向け小型キャブ梱包物流改善 …… 木村　直人 ……77
- アルミダイカスト ハイサイクル鋳造工法確立 …… 遠藤　威 ほか ……81
- カムシャフト 油路交差孔の抜け際で発生するばりの抑制と除去 …… 平川　啓太 …… 85

◇　解説・講義

- 欧州・日本のカーボンニュートラルに向けた政策動向 …… 玉井　俊光 ほか ……91
- 横浜新本社の紹介 …… 上田　茂樹 ほか …… 98
- 人とくるまのテクノロジー展 2022 への出展 …… 蛭川　正敏 ……104

◇　社外発表（2021年1月～2021年12月） ……108

◇　いすゞ歴史の一こま （No.32） ……21, 35, 51, 64

ISUZU Technical Journal No.134 (2022)
– CONTENTS –

◇ Foreword

- Isuzu's Initiatives to Achieve Carbon Neutrality ..... Toshio Ichimasa 1

◇ Introduction of New Products

- Development of Isuzu LNG GIGA ..... Mitsumasa Akagi et al. 3

◇ Technical Papers and Reports

- Application of Electromagnetic Simulation in Full Vehicle Development ..... Iichirou Ueda et al. 9
- Effect of Blending OME with Diesel Fuel on Fuel Property and Engine Performance ..... Shinichi Morita et al. 15
- Transient Model-Based Calibration for Engine ECU Maps Using a Big Scale Multi-Objective Optimization Solver Running on the Cloud ..... Yifan Wei et al. 22
- Degradation of Diesel Fuel and Fuel Tank Internal Corrosion in the United States ..... Mami Watanabe et al. 30
- Estimation of Hydrothermal Aging of SCR Catalysts for Heavy-Duty Vehicles Using Connected Data ..... Ayako Honya et al. 36
- Exploration and Sweeping for Autonomous Sweeper Truck in the Geofence Scenario ..... Weifan Zhang et al. 42
- Autonomous Driving of Trucks and Buses ..... Kazuaki Tsushima 52
- Model Predictive Control for Autonomous Driving System of Medium Duty Truck ..... Motoya Suzuki 59
- Approach to Functional Safety ..... Nobuyuki Abe et al. 65
- Vehicle Inspection Equipment Wireless Interface and Software Development ..... Sota Takaichi et al. 71
- Improvement of Packing and Logistics for ELF Series CAB ..... Naoto Kimura 77
- High Cycle Casting Method for Aluminum Die Casting ..... Takeshi Endou et al. 81
- Occur at the Outlet of the Camshaft Oil Passage Crossing Hole Burr Suppression and Removal ..... Keita Hirakawa 85

◇ Explanation and Lecture

- The Trend of Policies toward Carbon Neutrality in Europe and Japan ..... Toshimitsu Tamai et al. 91
- Introduction of Yokohama New Head Office ..... Shigeki Ueda et al. 98
- Automotive Engineering Exposition 2022 Hosted by JSAE ..... Masatoshi Hirukawa 104

◇ Publications and Speeches by ISUZU Engineers (2021) 108

◇ A Frame in ISUZU History (No.32) 21, 35, 51, 64

巻　頭　言

カーボンニュートラルに向けたいすゞの取り組み

産業ソリューション・PT 事業部門　常務執行役員　　一政　都志夫
Toshio Ichimasa



地球温暖化防止を目的に「京都議定書」が採択（1997 年）されてから 25 年が経ちますが、新興国の経済発展や、エネルギー大消費国での再生エネルギー普及が十分に進展しないことから、地球温暖化ガスの代表である二酸化炭素（CO_2）の世界排出量は増え続け、最近では温暖化によると思われる異常気象が毎年、各国・各地で起こり、甚大な被害が発生しています。今や地球温暖化防止は人類にとって喫緊の課題であり、世界各国は 2015 年に「パリ協定」で「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2 ℃より十分低く保ち、1.5 ℃に抑える努力をする」目標を掲げました。日本では 2020 年 10 月に当時の菅総理が「2050 年カーボンニュートラル、脱酸素社会の実現を目指す」ことを宣言しています。

いすゞにおいては、2021 年 5 月に中期経営計画 2024 を公表し、カーボンニュートラル戦略を次のように明示しました。

- 2030 年代に主要モデルにおいて電動車の量産販売拡大
- 2040 年までにカーボンニュートラル化に対応できるフルラインナップを確立

本中期経営計画作成段階で、ここまでアグレッシブに表現して良いものか不安を覚えましたが、いすゞが果たすべき役割と責任、及びその覚悟を示したことで関係者から賛同を得ました。私の部門では、カーボンニュートラル（以下“CN”と略す）戦略を実現するための方針を策定しました。次に方針の概要を紹介するとともに、国や自動車会社以外の業界と解決すべき社会課題についても触れたいと思います。

私の部門ではつい数年前までは、まだまだ内燃機関が動力源の主力であり、電動化には時間を要すると思っていました。確かに電気や水素が普及しにくい国・地域では、エネルギー密度の高さ、及び移送・貯蔵のしやすい液体燃料を使う内燃機関は今後も必要です。しかしながら、冒頭のとおり地球温暖化を考慮すると動力源の CN 化は必須であり、遅ればせながら、開発リソースの CN 化へのシフトを加速させています。

まず最初の取り組みとして、商用車の CN 化のためにどの動力源を選択すべきかを検討いたします。商用車は用途・架装により大きく分けて 3 つの使われ方があります。

① 純粋に荷物を運ぶ（汎用性の高い荷台：バン、平ボディ等）
② 特定の荷物を運ぶ（専用・特殊な荷台：ダンプ、ミキサー、塵芥車等）
③ 架装物が仕事をする（専用架装：消防車、高所作業車等）

それぞれの車は生活インフラとしてさまざまな架装が施され人々の生活を支えています。そのために

最小限の環境負荷で仕事を行い、事業者様が稼げることを求められます。これら商用車のCN化で求められることは、使い勝手が従来のディーゼル車と同等であること。例えば積載量、航続距離、稼働時間（充電・充填時間が長くない）です。また経済合理性の観点では、新車購入価格、ランニングコストが挙げられます。よってCN化された商用車であっても「使い勝手」と「経済合理性」の両立が求められます。一方でCN化可能な最適動力源を提案するためには、いろいろなパラメータの検討が必要です。車両セグメンテーション、エネルギー・インフラ動向、CN化エネルギー政策、商品力、TCO（総所有コスト：Total Cost of Ownership）：お客様目線でのコスト、LCA（Life Cycle Assessment）観点でのCO_2総排出量。これらを踏まえて商用車メーカーとしてCN化に対応する商品の投入と、社会全体が要求するコストのミニマム化の対応を考慮したうえで、最適な動力源を提案していきたいと考えています。

次にCNに向けた各動力源といすゞの取り組みや課題について述べます。

BEV（バッテリー式電気自動車：Battery Electric Vehicle）：比較的航続距離の短い車両から導入し、バッテリーの進化とともに適用範囲を広げていきます。充電時間が長いデメリットには、交換式バッテリーや高電圧化への対応が求められます。いすゞではエルフによるモニタ走行を行っていて、2022年度内の量産化を目指しています。またバッテリー本体については、BEV関連のアライアンス企業、サプライヤーと技術情報交換をしながら、将来の内製化を含め検討をしています。

FCV（燃料電池車：Fuel Cell Vehicle）：BEVでカバーできない航続距離の長い車両や、BEVの弱点である充電時間の長さが許容できない車両に対して導入の検討をしていますが、水素インフラの整備が課題の一つです。小型車においてはCJPT（Commercial Japan Partnership Technologies）と協業したモニタ走行を2021年から開始しています。また大型車においては燃料電池開発に取り組むアライアンス企業との共同研究で、2022年中にモニタ車による実証走行を予定しています。

HEV（ハイブリッド車：Hybrid Electric Vehicle）：2005年よりエルフで量産しています。また、BEV/FCVの新車価格が高い時期の対応とCO_2排出量削減のオプションとして展開しています。

NGV（天然ガス自動車：Natural Gas Vehicle）：国内小型CNG（圧縮天然ガス：Compressed Natural Gas）車を1993年より量産開始。大型車ではCNG車を2015年より、LNG（液化天然ガス：Liquefied Natural Gas）車を2021年より量産を開始。カーボンニュートラルLNGの普及が見込まれ、輸送事業者様がこのガスを選択・利用できるようにNGVのラインナップを揃えます。また、合成ガスの実用化にも期待が寄せられています。

DE（ディーゼルエンジン：Diesel Engine）車：CN化ができない緊急特殊車両（消防車、自衛隊の車等）に対しての役割を担い、e-fuel（再生可能エネルギー活用の合成燃料全般）の製造技術確立・実用化を見込み、ディーゼルエンジンの技術開発を継続します。

水素エンジンについては、その可能性を確認するために、NGVエンジンをベースに検証試験を実施しています。

以上はいすゞ車へ搭載する動力源としての候補を挙げておりますが、我々のもう一つの事業である産業用エンジンビジネスのOEM各パートナー様とCN化に向けた情報交換を行い、各機械にとって何が適切な技術か議論を交わしています。

いすゞではCN化の動力源を限定せず、現在を研究開発期として技術の見極めを実施しています。一方で政府の進めるGX（グリーントランスフォーメーション）にも提唱されている多様な技術（次世代電池・モータ、水素、CR（Carbon Recycle）燃料）の普及に関するエネルギー政策を把握し、お客様や社会のニーズへ的確に応える動力源をタイムリーに投入できるよう、CN化実現に向けて今後も多角的にパワートレインの開発に尽力して参ります。

新商品紹介

いすゞギガ LNG 車開発について

Development of Isuzu LNG GIGA

赤木　三昌*　Mitsumasa Akagi
後藤　康二**　Kouji Gotou
城田　和彦***　Kazuhiko Shirota

要　旨

CO_2 削減及びエネルギーセキュリティの観点より、軽油代替燃料車を充実させることを目的に、既存ギガ CNG（圧縮天然ガス：Compressed Natural Gas）車をベースに燃料系統部品を LNG（液化天然ガス：Liquefied Natural Gas）化して量産を開始した。

また、最新のギガディーゼル車に搭載している安全装置及び快適装備を水平展開することにより、商品力アップを図った。

Abstract

From the viewpoint of CO_2 reduction and energy security, we started mass production by converting fuel system parts to LNG based on existing Giga CNG vehicles with the aim of enhancing light oil alternative fuel vehicles.

In addition, the product appeal has been improved by horizontally deploying the safety devices and comfort equipment installed in the latest Giga diesel vehicles.

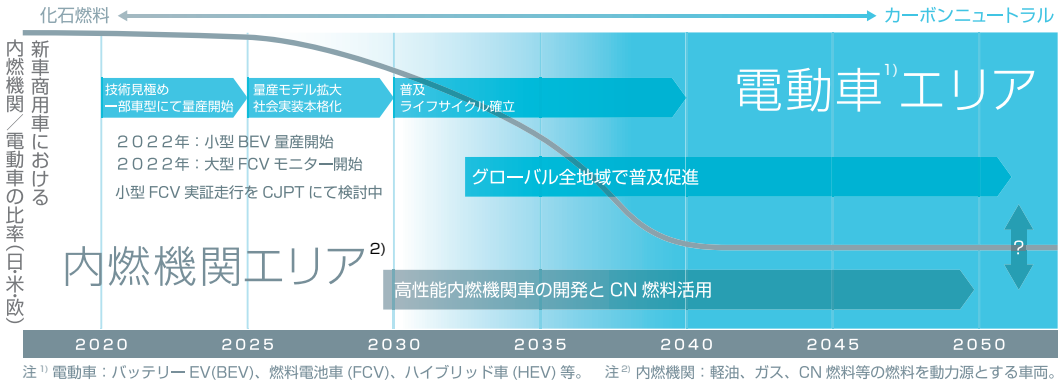
1　はじめに

日本は CO_2 排出量の削減を、全世界規模のパリ協定よりも更に踏み込んだ「2050 カーボンニュートラル宣言」を行い、具体的な数値目標を伴う期限付きの国際公約をした。いすゞとしても脱 CO_2 及び脱炭素社会の実現に向け、積極的に取り組んでいる。2021 年 5 月に公表したカーボンニュートラル戦略（**図 1**）では、2040 年までにカーボンニュートラル化に対応できるフルラインナップを確立するとし、電動化の推進のみならず内燃機関でのカーボンニュートラル燃料活用も見据えている。これは商用車にはさまざまな用途・使用条件があり、電動化が困難な領域も存在すると予測されるためである。カーボンニュートラル燃料の普及期に備え高性能な内燃機関を搭載した車両の開発も継続して進める必要がある。その車両の一つとして天然ガスを燃料とする天然ガス自動車に着目している。

2　いすゞの天然ガス自動車の取り組み

天然ガス自動車は、石油代替燃料自動車として普及が進んでいるものの一つであり、保有台数は世界で 2600 万台以上、今後もアジアを中心に更なる普及が予想されている。日本においては運輸部門で石油依存からの脱却策としても期待され、国土強靭化政策の中にも位置付けられた。

更にメタンを CO_2 と水素から合成するメタネーション技術の実証・実装は、2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略でも取り上げられている。この合成メタンを天然ガスの代替とすることで都市ガス事業のカーボンニュートラル化を目指すことが、次世代熱エネルギーとして位置付けられている。この合成メタンを燃料として活用できることが、天然ガス自動車の新たな価値であると考えている。



注 1) 電動車：バッテリー EV(BEV)、燃料電池車 (FCV)、ハイブリッド車 (HEV) 等。　注 2) 内燃機関：軽油、ガス、CN 燃料等の燃料を動力源とする車両。

図 1　カーボンニュートラル戦略

*大型商品企画・設計部　** NGV 企画・設計部　***いすゞエンジニアリング㈱

いすゞは天然ガスを石油代替及び低炭素化に向けた重要な燃料の一つとして位置付けており、1993 年に小型 CNG 塵芥車による実証走行を実施して以来、約 30 年にわたって技術開発と商品化に取り組んできた。2015 年末には都市間輸送の低炭素化への期待から大型 CNG トラック「ギガ CNG 車」を発表発売し、この商品は東京 - 大阪間に相当する 550 km の航続性能、及び高速走行時において同級ディーゼル車比 10 %程度の低 CO_2 化を実現した。

一方、航続距離の延長及び充填時間短縮を狙い、2010 年代より LNG の利点を最大限に活用する大型 LNG トラックの検討をしてきた。大型 LNG トラックの社会実装に向けては LNG 燃料充填インフラが日本に存在しないことなど、課題は自動車の開発のみならず多岐に渡るものであった。そこで 2016 年度より環境省の「CO_2 排出削減強化誘導型技術開発・実証事業」に参画した。環境省事業の 3 年目である 2018 年には大型 LNG トラックのモニター車を 2 台製作し、実際に建設された LNG 燃料充填スタンドを用いて実証走行試験を開始、2019 年 3 月に事業を完了させた。実証走行試験で得られた知見を LNG 車の開発に活かした。

このような天然ガス自動車の取り組みを経て、国内大型トラックの主力である GVW25 t クラスに前述したギガ CNG 車をベースに、燃料を液化天然ガス転換したギガ LNG 車を開発した（**図 2**）。



図 2　ギガ LNG 車

3　開発の狙い

大型トラックのカーゴ系は、都市間輸送を主とした運行が多いため一運行の航続距離が重要である。現状の大型ディーゼルトラックで車両総重量 25 トンクラスの燃費基準値は 4.04 km/L であり、搭載燃料タンク容量は標準出荷仕様で 300 L である。これより、大型カーゴ系のディーゼル車の航続距離は約 1,200 km となる。これに対し現状の大型 CNG トラックの航続距離は約 500-600 km と短く、東京･大阪間を燃料の途中充填なしで運行するには困難な状況である。また、燃料充填の時間も同クラスのディーゼル車比較で約 2 倍の時間が掛かるため、稼働時間に影響が出る。このようにディーゼル車に対して CNG 車の使い勝手が悪い部分に対し、液化天然ガスを燃料に変えることにより改善させた。

また、ディーゼル車に搭載している装置類（**表 1**）を追加することにより、更に安全でかつ快適なトラックを目指した。

表 1　新規搭載装置

ディーゼル車から転用した装置	
安全装置	歩行者検知機能付きプリクラッシュブレーキ
	ブラインドスポットモニター
	可変配光型LEDヘッドランプ
	ドライバーステータスモニター
	オートワイパー
	オートライト
快適装置	新ハイルーフ
	高機能シート(運転席)
	Hot & Cool Box
	Bluetoothオーディオ/ステアリングスイッチ
その他	イモビライザ

※ 上記装置は、2021年7月に発表発売したGIGA CNG車にも先行展開済み

4　車両開発について

大型 LNG 車両の開発は、前述の環境省事業への参画時に実証走行試験を行ったモニター車（以降モニター車）の仕様を開発のベースとし、大型 CNG トラックへ展開する手法とした。

車両開発目標は、以下の 2 点とした。

① LNG 一充填あたりの航続距離を 1000 km 以上とする

② LNG 充填時間をディーゼル車並みとする

また、モニター車製作時に課題となった点についても改善を図るべく検討と設計作業を行った。

車両レイアウトは、ホイールベース間（前輪と後輪の間）に 348 L の LNG 燃料容器を 2 本搭載している。リヤオーバハング部（後輪の後ろ）には 150 L の CNG 燃料容器を 2 本搭載した。(燃料を液体にすることでより多く搭載できることになり、ギガ CNG 車で約 550 km ほどであった航続距離は 1000 km 以上に向上させることができた。また国内の LNG スタンドが少ない現状においても利便性を確保するために、状況によっては CNG で走行できるようにした。)

LNG タンクレイアウトはモニター車製作時のレイアウトを踏襲しながらタンクブラケットの軽量化等の改善を行った。(液体燃料の LNG を満充填すると燃料重量が約 300 kg を超える。積載量を確保するために軽量化を図った。)

LNG タンクユニットのレイアウト検討は、タンクユニットの搭載スペースが厳しい 4 軸車の CYJ(8 × 4) で成立するレイアウトを決定した後 3 軸車の CYL（6 × 2）へ展開した。

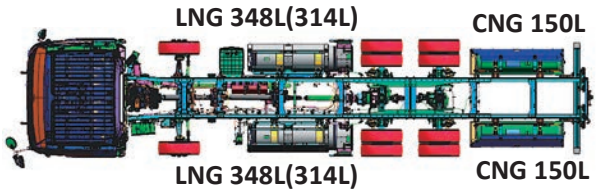


図 3　CYJ（8 × 4）標準レイアウト

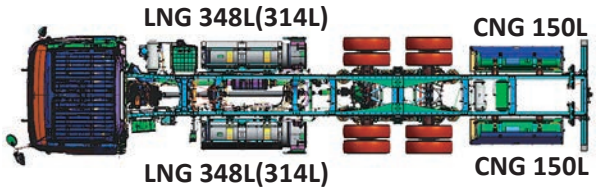


図 4　CYL（6 × 2）標準レイアウト

CNG タンクユニットは、リヤボディ架装時のバリエーションを考慮し、大型 CNG トラックと同一の展開とした。

上記レイアウトとすることで車両航続距離とリヤボディ架装バリエーションの両立を図った（**図 3、4**）。

「ギガ LNG 車」の燃料システムは「ギガ CNG 車」の燃料システムに LNG の装置を追加したものになる。追加した装置は LNG 充填口、LNG 燃料容器、熱交換器、燃料遮断弁、減圧弁などがあり、LNG 燃料容器へ液体燃料を充填すること及びエンジンへ気体燃料を供給する役割がある（**図 5**）。

LNG 燃料容器への充填はスタンド側の充填ノズルを車両側の LNG 充填口に接続し、スタンド側の充填圧力と LNG 燃料容器内の圧力との差圧によって LNG を流し込む仕組みになっている。また LNG 燃料容器内の圧力が高い場合は差圧が小さいため充填できなくなるが、その際は充填前にスタンド側のベントノズルを車両側ベントコネクタに接続し LNG 燃料容器内を減圧することで充填が可能になる（**図 6**）。

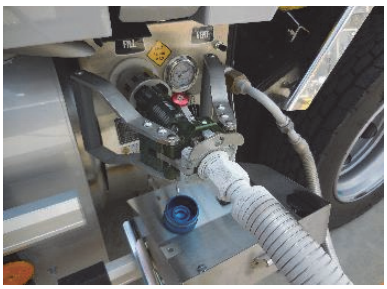


図 6　充填ノズルと脱圧ノズル

充填した LNG は超低温液体であるため、LNG 燃料容器は外部からの入熱を抑制するよう二重殻の真空断熱構造となっている。また、真空断熱層には断熱材及び赤外線反射材を加えることで断熱性能を高めている。

この構造によって常温下でも天然ガスを液体の状態に保ち続けることができるが、冷却機構はなく使用過程において外部からの入熱で内部の燃料が気化する。

LNG 燃料容器内の圧力は LNG を押し出しエンジン側へ供給する役割を持つ一方、長期間燃料消費がない場合は圧力が必要以上に上昇することがある。その際は LNG 燃料容器保護のため安全弁から放出する。LNG はエンジン冷却水の熱により熱交換器で加温して気化させ、その後減圧弁で指定圧力に調整しエンジンに供給する。また LNG 燃料容器内の圧力が調圧弁の設定値以上の場合は、調圧弁が開き LNG 燃料容器内の気体燃料も供給する（**図 7**）。

「ギガ LNG 車」は LNG を気化させた天然ガスをエンジンで燃焼させるため、エンジン自体は「ギガ CNG 車」と共通の 6UV1 型エンジンを搭載している（**図 8**）。そのためエンジン性能曲線（**図 9**）、主要諸元（**表 2**）に示すとおり、出力及びトルクは同一である。天然ガスエンジンはガソリンエンジンと同様に点火プラグによって着火し火炎伝播により燃焼させる火花点火方式のオットーサイクルエンジンである。

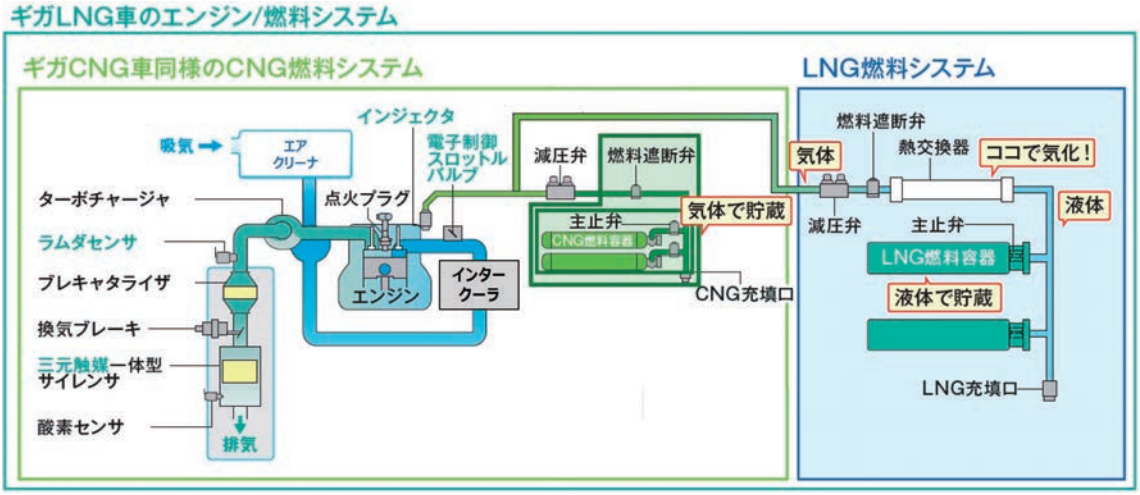


図 5　LNG 燃料システム概要

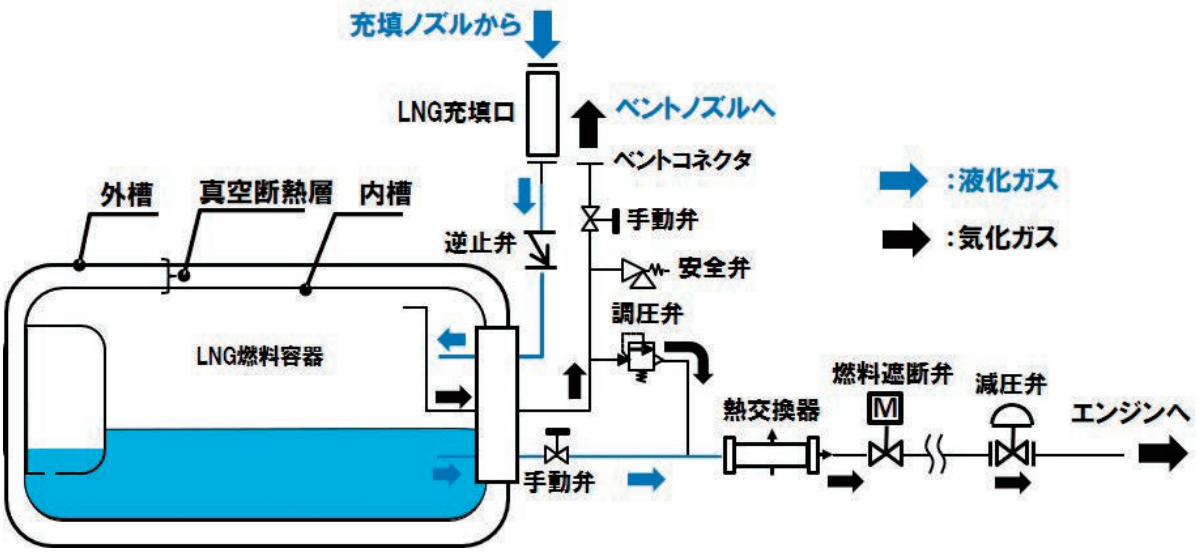


図 7　LNG 燃料システム詳細



図 8　6UV1 型エンジン外観

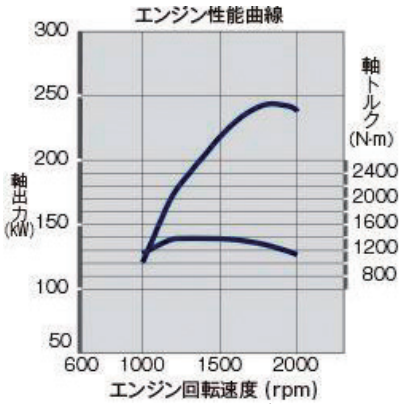


図 9　6UV1 型エンジン性能曲線

表 2　6UV1 型エンジン主要諸元

	6UV1-TCN
総排気量	9839cc
内径×行程	120×145mm
最高出力 / 回転数	243kW【330PS】 / 1800rpm
最大トルク / 回転数	1390Nm / 1200-1400rpm
使用燃料	LNG及びCNG
過給システム	ウェイストゲート式ターボ
排出ガス後処理装置	三元触媒

5　LNG 燃料システムの設計

LNG 燃料システム搭載については次のような専用設計箇所がある。

・LNG タンクユニット搭載
・LNG 燃料配管及び系統
・LNG 燃料気化器用温水配管
・LNG BOG（ボイルオフガス）放出配管
・CNG 充填口
・LNG 燃料計表示系統

5.1 節～5.6 節でそれぞれの特徴とポイントをまとめる。

5.1　LNG タンクユニット搭載

LNG タンク後方には、容器付属品の手動弁及び安全弁類と燃料気化器、燃料充填口、脱圧コネクタ等が集約して配置されており、操作性、視認性に配慮しタンク搭載位置を決定する必要があった。

タンク容量はモニター車の走行結果から 1000 km 以上の航続距離が得られたので、タンク容量の変更は行わなかった。また、タンクの搭載方法と締結方法は、タンクブラケットにタンクを載せ、バンドで締結するオーソドックスな方法とした（図 10）。

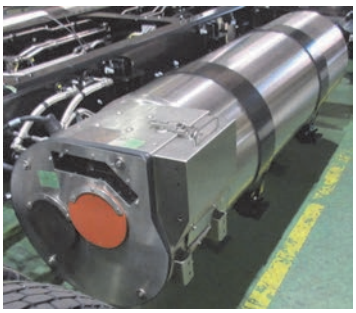


図 10　LNG タンク搭載状態（車両右側）

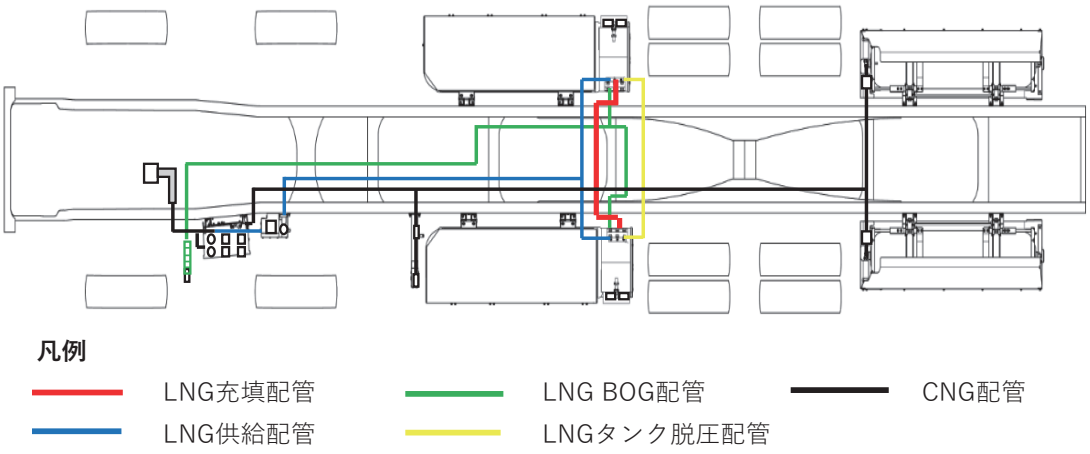


図 11　燃料配管系統図

5.2 LNG 燃料配管及び系統

LNG 車は LNG と CNG 両方の燃料配管を備えており、それぞれ独立して車両へ配置している（図 11）。

燃料の貯蔵圧の違いから、減圧弁（レギュレータ）も LNG/CNG それぞれ別で設定しており、各減圧弁で減圧後に LNG/CNG を合流させエンジンへ燃料を供給している。

LNG 用燃料配管は、左右のタンクユニットから充填配管、供給配管、BOG 放出配管の 3 系統を CNG 燃料配管とは別に追加する必要があり、少ない配管スペースの中で配管系統・レイアウトを成立させた。

特に充填配管は、充填時に LNG が気化する際の圧力上昇を抑え充填性を向上させるため、必要最小限の寸法を検討し設定した。

5.3 LNG 燃料気化器用温水配管

天然ガスを液化した LNG を貯蔵しているが、エンジンで燃焼させるためには気体で供給する必要がある。タンク内から供給した LNG は左右それぞれの LNG タンクに搭載し気化器（ベーパライザ）を通して気化させている。この気化器の熱源は、エンジン冷却水の熱を利用し LNG を加温・気化している。このため左右 LNG タンクまでエンジン冷却水を循環させる温水配管の設置が必要となり、エンジンウォータポンプ系統から分岐・配策している。

5.4 LNG BOG（ボイルオフガス）放出配管

この配管は、LNG 特有の配管である。タンクに貯蔵した LNG は、時間とともにタンク内で気化しタンク内圧が上昇する。タンク保護のため一定圧力（1.6 MPa）に達すると、タンクに備えた第一安全弁（圧力逃がし弁）が開きタンク内圧が閉弁圧となるまでガスを放出する。放出配管の出口は安全にガスを拡散させるためにキャブバック部へ設けた（図 12）。



図 12　BOG 放出配管

5.5 CNG 充填口

ホイールベース間にあった CNG タンクユニットを LNG タンクユニットへの置き換えにより、従来あった CNG 充填口の位置を変更した。充填頻度を考慮し車両左側前方へ CNG 充填口を移設することで CNG を充填できるようにした（図 13）。

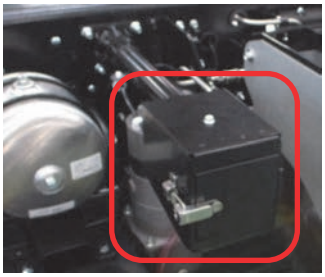
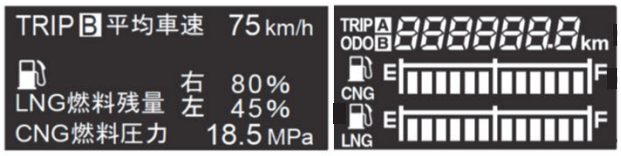


図 13　CNG 充填口

5.6 LNG 燃料計システム

LNG 燃料タンク追加により燃料残量計を新たに設置した。LNG は、極低温（−130℃程度）の状態で貯蔵されているため、従来のフロートタイプの液面計では、フロートが低温に耐えられず使用することができない。LNG タンクでは、静電容量式液面計が採用されている。これは、タンク内に静電容量チューブ（液面センサ）が取付けされており、液面高さの変動による静電容量値（pF）にて出力された値を変換し液量とし

て出力している。この値は、タンク内に設置されたタンクコントローラで変換を行いその出力値を CAN（シリアル通信プロトコル：Controller Area Network）信号として車両コントローラへ送信している。車両コントローラは受信した CAN 情報を基にメータで燃料残量を表示している。また、液量は左右タンクごとの残量と左右合算表示が可能となっている（**図 14**）。開発時には燃料計に表示される残量が変動する現象を確認した。この現象は、LNG タンクが円筒形のタンクであり LNG への入熱を抑えるため、タンク内に軽油タンクで採用しているバッフルプレートの設置がなく、液面変動を液面センサがリニアに反応してしまうため起きる現象である。タンクコントローラからの液面情報送信周期とメータ側での液量表示更新周期を見直すことで解消した。



マルチディスプレイ内に
左右別残量表示

速度計内に
左右合算表示

図 14　燃料残量表示

6　LNG 車量産に対する課題と対策について

大型 LNG トラックの開発当初及び実証走行試験の中でも LNG のガス組成変化は大きな課題であった。LNG 燃料容器内で LNG が気化する際、メタン・エタン等の軽質分から先に気化し、プロパン・ブタン等の重質分の割合が増えるガス組成の変化が起こる。この変化は燃料残量が少なくなるほど影響が大きく、また燃料充填してからの経過日数が長くなると進みやすくなる。更に車両左右の燃料容器で燃料の消費速度が異なる事象が起き、消費されない側はガス組成変化が進むことがわかった。このガス組成変化による問題はノッキング等の異常燃焼が起こることである。

これらの問題を回避・軽減するために、いすゞは独自の制御を新規開発した。まず、異常燃焼を回避するため従来の加速度計を使った検出システムを活用し、ガス組成を推定し点火時期を調整する制御を設けた。更にガス組成変化が進み安定燃焼を維持できない場合は、LNG から CNG へ燃料を自動で切り替えを行う制御も追加した。ガス組成変化自体を軽減する制御としては、車両左右の燃料残量差を検知し均等に消費する制御を設けた。また、燃料残量と充填後の経過日数からガス組成を推定し、ドライバーへ残った LNG の消費と追加分の LNG の充填を促す“LNG ランプ”も追加した。

7　開発を振り返って

今回経験した LNG 車開発では、前述にあるように今まで経験したことのない使用過程中短期間での『燃料性状の変化』が最大の課題であったと考える。

今までは、短期間での性状変化が起きない燃料しか経験してきてこなかった。燃料充填後数日のうちに性状変化が起こり、しかもその変化がエンジン性能へ影響するような燃料を取り扱うのは初めてであった。燃料性状変化の影響をいかに受けないようにするかが開発のほとんどを費やしたと言っても良い。

燃料性状の変化は、環境省の実証事業時に実車からのデータサンプリング及びベンチ試験、解析によるシミュレーションで傾向は把握できており、そのレベルは判っていたが、その変化にどうやって対処していくかが課題であった。主な対策手法はエンジン制御の見直しに依るところが大きく、いかに車両の使い勝手へ影響させずに成立させるかが最大の課題であった。

制御変更は容易ではなく実車確認と制御変更の繰り返しにより造り込みを行った。

その結果、今まで CNG 車の弱点とされていた、燃料充填時間と航続距離は LNG 化することで克服できたと考える。

8　おわりに

止まることのない物流。これを支えるトラック輸送。地球規模での CO_2 削減及びエネルギーセキュリティが叫ばれる中で、その一つの解として商品化した LNG 車。現状では LNG スタンドが限られているため一部の地域を中心とした稼働しかできないが、今後、設備投資額が比較的少ない簡易スタンド設置等により、この車両が増えていくことを期待したい。

最後に、今回の LNG 車開発に携わっていただいた協力企業の方々、販売会社の方々、車両モニターに協力いただいたいすゞグループの皆様に感謝の意を表し、本稿の結びとしたい。

著　者


赤木　三昌


後藤　康二


城田　和彦

論文・報告

フルビークル電磁波解析技術の車両開発への適用

Application of Electromagnetic Simulation in Full Vehicle Development

上田　威一郎*　　村井　信之*
Iichirou Ueda　　Nobuyuki Murai

要　旨

近年の ADAS 及び自動運転の技術開発が高まる中、車載される電気電子部品は今後も増加することが予想され、車両開発においても電気電子部品レベルのみならず、車両レベルで電磁波の影響を評価することが求められている。いすゞでは車両開発にフルビークルモデルを用いた電磁波解析の展開を進めており、その有効性について検証した境界要素法（モーメント法）の電磁波解析ソフトウェアによるフルビークル電磁波解析の車両開発への適用技術を紹介する。

Abstract

With the recent enhancement of ADAS and autonomous driving technology, the number of electrical and electronic components in vehicle is going to increase, so it is required to evaluate the influences of electromagnetic radiation from and to them in terms of not only the component level, but also the full vehicle level. Electromagnetic simulation has been expanding to vehicle developments using full vehicle model. This paper represents some of the techniques of electromagnetic simulation applied to vehicle developments by the validated commercial software based on Moment method.

1　はじめに

ADAS 及び自動運転の技術開発が高まる中、車載電気電子部品数の増加により車両を取り巻く電磁波環境は厳しさを増している。更に、自動車の電磁両立性（以下、「EMC」と略す）に関する国際基準である国連規則第 10 号（UN Regulation No.10）の第 6 改訂版（以下、「R10.06」と略す）が 2019 年に発効され、今後は全ての生産車に R10.06 の認証が必要となることで、試験工数の大幅な増加が予想される。従来の電磁波エミッション試験では、エンジン前後中心の車両左右の計 2 箇所のみの計測であったのに対し、R10.06 では計測アンテナのビーム幅が車両の長さより小さい場合、車両全体をカバーするように車両を複数回測定する試験方法へと変更される。この方法で測定すると全長の長い大型車両の場合、非常に多くの計測点での試験が必要となる。また、電磁波イミュニティ試験においては、評価対象となる電気電子部品が増える方向となり、試験工数の大幅な増大傾向にあり、解析による評価のニーズが高まったことで電磁波解析技術の構築は急務となっている。そこで、EMC をはじめ、電磁波に関わるさまざまな車両性能の予測技術の開発を行い、ピックアップから小型～大型トラックの車両開発に電磁波解析を適用している。

2　電磁波解析技術の適用について

いすゞでは電磁波に関わる法規適合性または車両の通信性等に対し、解析による評価を行っている。その中で代表的なものとして、EMC の電磁波エミッション解析と電磁波イミュニティ解析に加え、タイヤ空気圧モニタリングシステム解析（以下、「TPMS 解析」と略す）、キーレスエントリーシステム解析（以下、「キーレス解析」と略す）、パッシブエントリ & スタートシステム解析（以下、「PESS 解析」と略す）について紹介する。

2.1 電磁波エミッション解析

電磁波エミッションとは、車両からの電磁波の放射のことで、その放射レベルは法規により電界強度の限度値が規定されており、電磁波エミッション試験では、車両から放射される 30（MHz）～1（GHz）の周波数帯の電磁波を計測アンテナで測定し、限度値を超過しないか確認する。

解析で同様の評価を行う場合、車両と計測アンテナのモデル化に加え、電磁波発生源のモデル化も必要となる。車両には多種多様の電磁波発生源となる電気電子部品が存在し、それぞれ電磁波発生パターンも異なる場合が多いため、電磁波発生源に合わせた解析手法を適用し解析を行っている。

* CAE デジタル開発推進部

2.1.1　電磁波発生源のモデル化と解析方法

電磁波エミッションの電磁波発生源として、ワイヤハーネス、電気電子部品内のアンテナ、電気電子部品内の回路の 3 つに大別され、それぞれ異なる解析手法を適用している。

ワイヤハーネスから放射される電磁波の解析は、ワイヤハーネスをそのままモデル化するのではなく、Multiconductor transmission line 法（以下、「MTL 法」と呼ぶ）を適用しモデル化する。MTL 法は、ハーネス 1 本を線要素としてモデル化、それを構成する複数の配線内部の導体、シールド、絶縁体などの断面構造を定義し、ワイヤハーネスの経路はスケマティック上に定義する手法で複雑な断面構成でもモデリングが容易となる（**図 1**）。

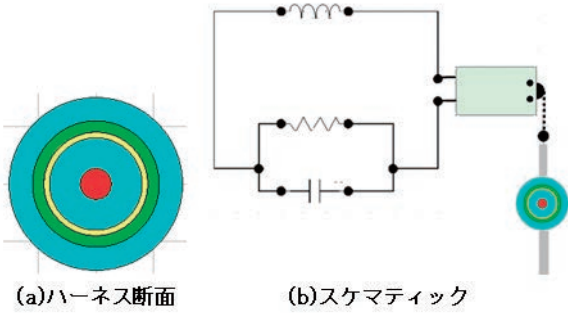


図 1　ワイヤハーネスのモデリング

電気電子部品内のアンテナ及び回路から放射される電磁波の解析については、それぞれアンテナ 3D データと 3D 放射パターンの実測データを用いてモデル化を行う。市販品等のためにアンテナ 3D データ入手が困難な場合、CT スキャンを利用してデータ化を行い（**図 2**）、3D 放射パターンは 2D 放射パターンカタログ値から電磁波解析ソフトの機能を用いて 3D 放射パターン近似解（**図 3**）を算出することで対応している。

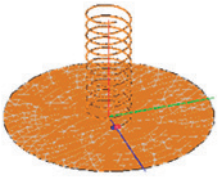


図 2　CT スキャンを使用したモデル化

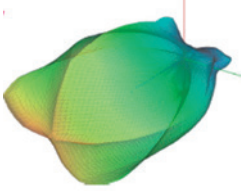


図 3　3D 放射パターン近似解

2.1.2　エミッション用アンテナのモデル化

電磁波を受信するエミッション用アンテナのモデルについては、実験で使用されるアンテナ図面情報をもとに 3D データを作成し、アンテナファクタが実測値とほぼ同等であることを確認している（**図 4**）。

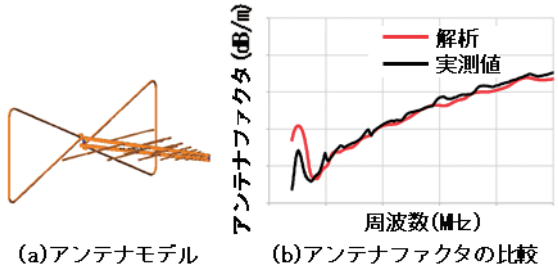


図 4　エミッション計測用アンテナモデル

2.1.3　フルビークルによるエミッション解析

電磁波解析で用いる車両モデルは、車両 CAD データから金属と非金属の部品に選別し、電磁波の性質上、非金属部品の存在は電磁波の伝搬への影響は小さいため、金属部品のみでモデルの作成を行う（**図 5**）。これはエミッション解析に限らず、対象周波数が数 GHz 以下の問題であれば全ての電磁波解析で共通するモデル化方法であるため、1 台の車両モデルを作成すれば他の電磁波解析に流用することができる。

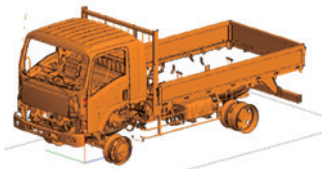


図 5　電磁波解析用車両解析モデル

エミッション解析は、**図 5** の車両モデルに電磁波発生源を追加し、計測用アンテナを設置する。中型トラックの場合は R10.06 に則り、車両外側から左右 3 m、地上高 1.8 m の位置に、車両前後 3 箇所、左右で計 6 箇所設置する。実車によるエミッション試験では、水平偏波と垂直偏波の測定が加わるため、計 6 × 2 ＝ 12 ケースの測定を行うことになるのに対し、解析では 6 箇所の全ての計測位置にアンテナを置き、アンテナ同士の影響を極力避けるために、隣り合い、向かい合うアンテナは水平偏波用と垂直偏波用にスイッチすることで 2 ケースのモデルで R10.06 に対応できるようにしている。また、アンテナの設置は繰り返し作業となるため、マクロプログラムにより自動セッティングし、モデリング工数とモデルミスの削減を行っている（**図 6**）。このようにして得られたエミッション解析結果（**図 7**）

から、R10.06 で規定されている放射レベルのクライテリアに対する判定が可能であり、電磁波解析を導入するまでは、試験車を組み立て実車で評価を行うしかなかったが、解析で評価を行えるようになったことでフロントローディングな車両開発が可能となった。

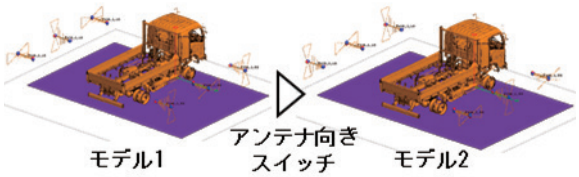


図 6　エミッション解析モデル

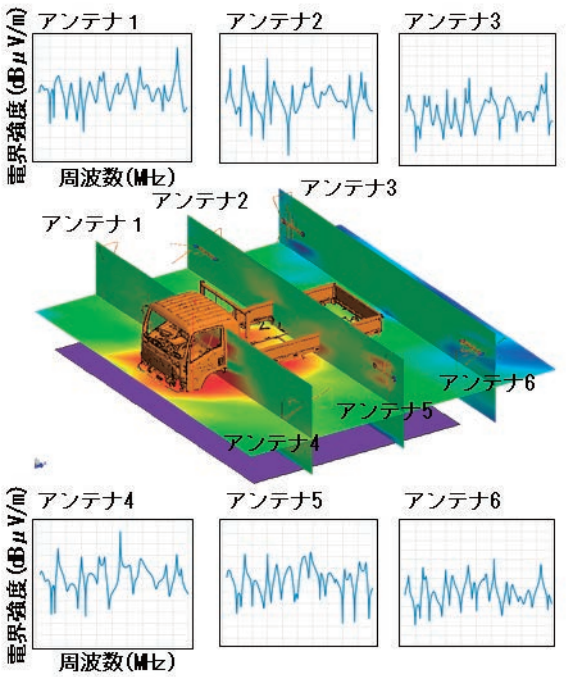


図 7　エミッション解析結果

2.2 電磁波イミュニティ解析

電磁波イミュニティとは、外部から車両へ入射する電磁波に対する車両の電磁耐性のことで、イミュニティ試験では 20（MHz）～2（GHz）の周波数帯の電磁波をアンテナから車両へ照射し、電気電子部品に誤作動が生じないかを確認する。アンテナから照射された電磁波による、ある空間位置での電界強度は法規で規定されており、車両がない状態でその規定値になるようにアンテナのキャリブレーションが行われ、較正後に車両を配置して試験が行われる。

イミュニティ解析においても、試験を再現するため、同様の手順により、まずはアンテナ単体でキャリブレーションの解析を行い、その結果を用いて電磁波を車両へ照射する解析を行っている。

2.2.1　イミュニティ用アンテナのモデル化

社内のイミュニティ試験で用いられるアンテナの 2D 図面情報をもとに 3D データを作成した。なお、イミュニティ用アンテナは対象周波数で異なり、それぞれの周波数帯に対応するアンテナモデルを構築し、VSWR（電圧定在波比）と放射パターンが実機とほぼ同等であることを確認している（図 8）。

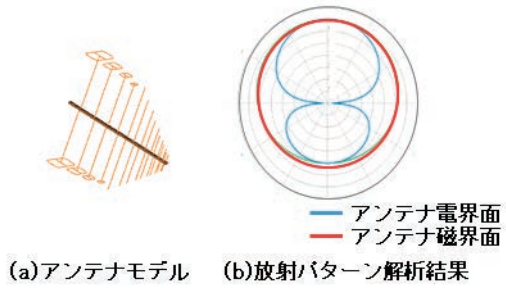


図 8　イミュニティ用アンテナモデル

2.2.2　アンテナのキャリブレーション解析

対象周波数で各アンテナ単体のキャリブレーション解析を行う。車両がない状態でアンテナに単位電力を入力し、規定の位置での電界強度を解析する（図 9）。その解析結果から電界強度を規定値にするために必要な電力値を算出する。

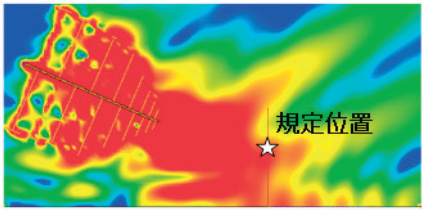


図 9　イミュニティ用アンテナのキャリブレーション

2.2.3　フルビークルによるイミュニティ解析

イミュニティ試験は車両を電磁波に曝した状態で電気電子部品に異常がないことを確認するが、解析で電気電子部品の故障の診断まではできないため、評価対象の電気電子部品付近に測定点を置き、過去の経験に基づき車両として設定した目標値と測定点での電界強度の大きさを従前車等と比較し、改善の必要性を判断している（図 10）。しかし、電気電子部品の電磁耐性は機器によって異なるため、本来なら機器ごとに耐性の目標値を設定するべきであり、今後の課題である。

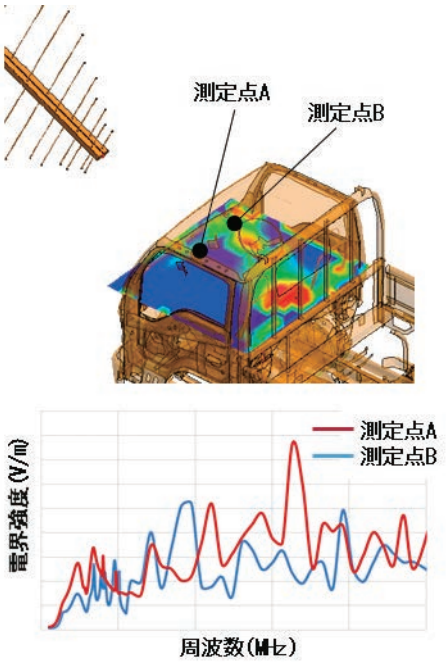


図 10　イミュニティ解析結果

2.3 TPMS 解析

TPMS とは、自動車のタイヤ空気圧を常時モニタリングし、問題が生じると運転者へ知らせるシステムで、タイヤホイールに装着された送信機から仕向地の電波法で規定された周波数の電磁波を発信し、車両フレームに装着された受信機で空気圧の情報を受信する。TPMS 送受信性能試験は、各タイヤが 1 回転するまで、回転角 10 度ごとにタイヤホイール上に装着された送信機から電磁波を発し、それを受信したアンテナの受信電力の大きさで送受信通信性能の良否を判断するものである。そのため、大型トラックのような多軸車、ダブルタイヤでは、タイヤ数（送信機数）× 36（タイヤ回転角数）×受信機数の回数の測定が必要となる。

今回の 3 軸、タイヤ本数 10 本の大型トラックを実験同様に評価すると、10 × 36 × 2 の 720 ケースに及ぶ解析が必要となる。そこで解析では、各タイヤホイール上の送信機から電磁波を同時に発して受信電力を計算する手法を構築し、モデル化、結果処理を自動化することで解析工数の大幅な削減を実現し、TPMS 送受信性能評価を行っている。

2.3.1　TPMS 送受信機のモデル化

送信機と受信機の 3D データからモデル化するが、データの入手が困難な場合は、2D 図面情報をもとにモデル化するか、CT スキャンデータを用いて行うことなどで対応している。いずれの場合も必ず解析モデルと実機でのアンテナ利得と放射パターンを比較し、精度確認を行って車両モデルに組込んでいる。

2.3.2　大型トラックの TPMS 送受信性能評価

各タイヤの送信機 1 基から電磁波を発し受信機 1 基での受信電力を計算する代わりに、全タイヤから電磁波を同時に発し、それぞれの送信機ー受信機間の伝達関数である S パラメータを求め、次の①式 [(1)] を用いて n 番送信機からの m 番受信機の受信電力を算出し、通信性能を満たすか否かを判断する。

$$受信電力(m番) = 送信電力(n番) \times \frac{Smn^2}{(1-Snn^2)} \quad \cdots ①$$

これにより、720 ケースの受信電力をタイヤ回転による送信機位置違いの 36 ケースの計算で取得できる。また、36 ケースの送信機位置違いのモデルは、タイヤを 10 度ごとに回転させるマクロプログラミングで自動化し、受信電力の算出も結果出力ファイルから上式を用いて自動で算出するシステムを構築した。それにより、従来、時間的に解析が難しかった多軸車両の TPMS 通信性評価が可能となり、受信機の設置位置及び設置方法の変更による受信電力の改善について 3 日程度で確認できるようになった（図 11）。

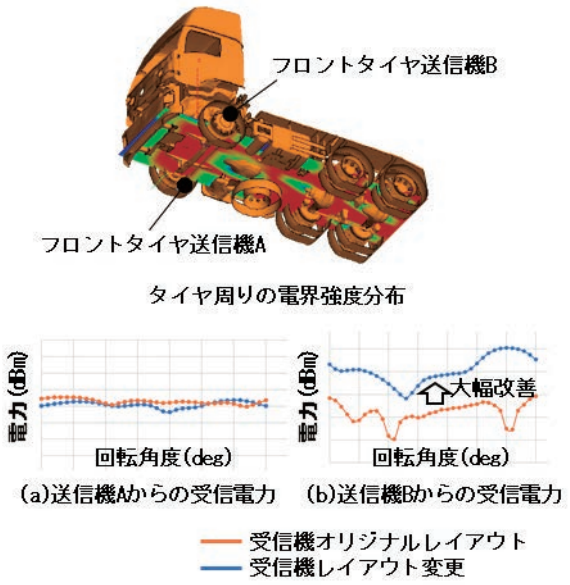


図 11　受信機レイアウト変更による受信電力の改善

2.4 キーレス解析

キーレスとは、キーフォブの操作により車から離れた場所でドアの施錠及び開錠を行うシステムで、キーフォブと車室内にあるアンテナの区間において、仕向地の電波法で規定された周波数による電磁波で送受信が行われる。キーレス試験では、キーレスが作動する車両からの限界距離を評価し、車両中心から十分に離れた区間を直線上、かつ円周上に測定するため、1回の試験での測定回数は非常に多くなる。

キーレス解析の場合、受信機が車両に搭載されキーである送信機位置が不定であること、送受信機間にある車両に比べ自由空間が十分に広く、アンテナの可逆性がある程度成立することから TPMS 解析等とは異なり受信アンテナ側から電磁波を放射する。更に 2 点間における電磁波の伝搬特性をモデル化した 2 波モデルを用いることで、全方向の限界作動距離を 1 回の計算で算出することが可能となる。

2.4.1 キーレス受信アンテナ単体の精度検証

解析で放射側となる受信機を対象にモデル化を行い、受信アンテナ単体で精度検証を実施する（図 12）。精度に問題ないことを確認したあと、車両へ搭載、フルビークルで解析を行う。

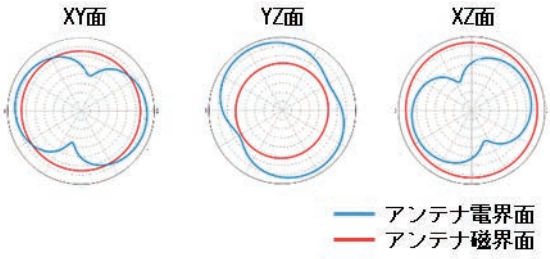


図 12　受信アンテナ放射パターン解析結果

2.4.2 キーレス作動距離の算出

送信機側からの出力電力について、送信機から 3 m 位置の送信側電力は規定されている場合が多く、送受信両サイドを全てモデル化し絶対評価を行わずとも、受信サイドのみモデル化し、相対評価を行う場合も多い。例えば、車型のみ変更の場合または受信機のレイアウトのみ変更の場合などは、電磁波の可逆性に基づき、受信基準でレベルダイヤグラムにおける空間損失と車両損失の電界強度変化だけを計算し相対評価すれば良い。先に記述したように、キーレスは送受信間の自由空間が十分に広く、空間での損失も大きいため、相対的な電界強度の変化分と、2 点間における直接波と地面からの反射波の合成波による電界強度の損失と距離の関係をモデル化（以下②式）した 2 波モデルを使うことで（図 13）、車両全方向のキーレス作動距離を算出することができる（図 14）。

$$\text{伝搬損失}(dB) = 20\log 10\left(4\pi \times \frac{D}{\lambda}\right) + 20\log 10\left(2\sin\left(2\pi \times \frac{h_1 \times h_2}{\lambda \times D}\right)\right) \quad \cdots ②$$

D：送信距離(m)
λ：波長(m)
h_1：送信アンテナ高さ(m)
h_2：受信アンテナ高さ(m)

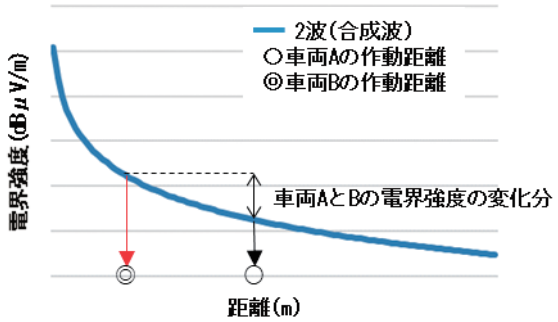


図 13　2 波モデルを用いた作動距離の算出

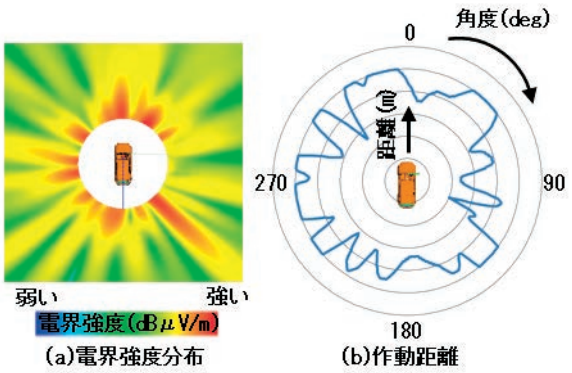


図 14　ピックアップトラックのキーレス解析結果

2.5 PESS 解析

PESS とは、車室内外に設置された複数の Low Frequency アンテナ（以下、「LF アンテナ」と略す）の周囲に数百 kHz の周波数の磁界を発生させ、キーフォブが受信することで、キーを身に付けたドライバの位置を正確に判断し、車室内外でエンジン始動及びドアの施錠、解錠を行うシステムである。そのため、LF アンテナからの磁界の広がり方及びその強度を精度良く予測することが求められる。実車試験では車室内外の磁界分布を測定し、磁界強度に遠方界の特性インピーダンス 376.7（Ω）を乗じた以下の③式で表される等価な電界強度で評価する。

$$\text{等価な電界強度}(dB\mu A/m) = \text{近傍界の磁界強度}(dB\mu A/m) + 20\log 10(376.7) \quad \cdots ③$$

PESS 解析を行うにあたり、まず RLC 回路からなる LF アンテナモデルの構築から行い、等価な電界強度実測値とよく一致することを確認した。そして、その LF アンテナを車両へ搭載し、フルビークルの解析を行うことで、LF アンテナの最適なレイアウトの提案が可能となった。

2.5.1 LF アンテナモデルの構築

LF アンテナは、フェライトにインダクタンス L（H）のコイルを巻き付け、キャパシタンス C（F）のコンデンサの LC 直列回路を共振させることで、小さい電流で大きな磁界強度を発生することができる。解析では、モデルにフェライト形状とコイルの巻き方を再現し、キャパシタンス C を調整パラメータに共振時のリアクタンス X ＝ 0（Ω）に近づくまで繰り返し計算を行う。この計算で得られた等価な電界強度は実測とよく一致することを確認した（図 15）。

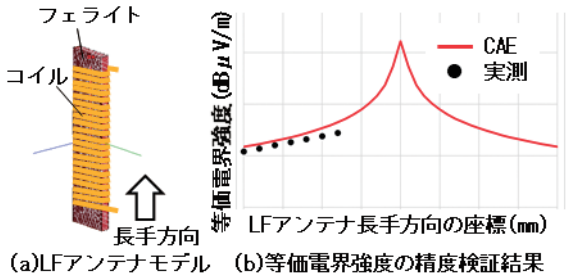


図 15　LF アンテナ単体の解析

2.5.2 LF アンテナのレイアウト検討用の解析

車室外でドアを施錠、開錠するための LF アンテナのレイアウト検討では、複数のレイアウトパターンを解析し、その中からドアハンドル付近の等価な電界強度が目標値を満足するレイアウトを提案する。LF アンテナを搭載する位置によっては、周辺の車体の影響を受け、電流値、磁界強度が低下し、性能が十分に発揮できないこともある。解析では共振点からのずれを見ることで電流値の低下を評価し（図 16）、共振点からのずれが少なく、LF アンテナの性能が十分に発揮でき、等価な電界強度の大きさと分布パターンが目標を満足できる LF アンテナの最適な位置 D を見つけることができた（図 17）。

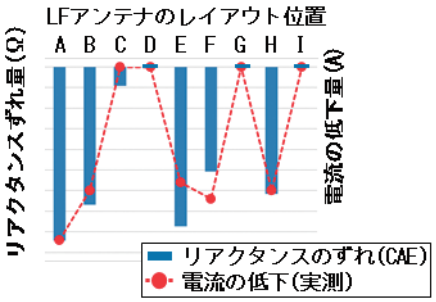


図 16　リアクタンスのずれ（CAE）と電流の低下（実測）

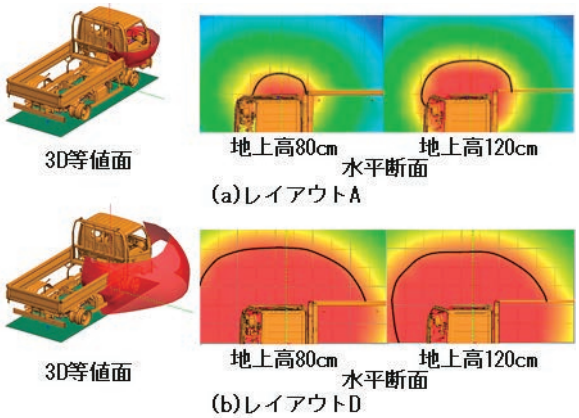


図 17　ドアハンドル付近の等価電界強度解析結果

3　おわりに

本稿では、車両開発へ適用している電磁波解析技術について報告した。適用を開始してからまだ日は浅いが、車両の電磁両立性及び通信性の開発、評価へ適用が可能であり、車両開発のフロントローディングに大きく貢献できる技術であることを確信している。今後も関係各位の協力を得ながら、技術開発と車両開発への展開を図り、車両品質及び開発効率向上に努めていきたい。

参考文献

(1)　Ralph S. Carson: High Frequency Amplifiers, 2nd Edition, Chapter 6, 1982

著　　者


上田　威一郎


村井　信之

論文・報告

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

Effect of Blending OME with Diesel Fuel on Fuel Property and Engine Performance

森田　真一* Shinichi Morita　岡本　毅* Takeshi Okamoto　瀬戸　雄史* Takeshi Seto　小松　明* Akira Komatsu　石川　直也* Naoya Ishikawa

要　旨

カーボンニュートラル燃料の一つとして期待される OME（ポリオキシメチレンジメチルエーテル：Polyoxymethylene Dimethyl Ether）は、常温常圧で液体であり、セタン価が高くディーゼル機関用の燃料として用いることが可能である。再生可能エネルギー由来の合成燃料の普及に向けて、既存のディーゼル機関に対して軽油への OME 混合利用が想定される。本論文では、OME 混合軽油の燃料性状、ゴム材に与える影響及びディーゼル機関性能への影響を調査した。

Abstract

Synthetic fuel derived from renewable energy is expected as a means of reducing CO_2 in internal combustion engines. OME (Polyoxymethylene Dimethyl Ether) can be handled like a diesel fuel because its specification of distillation is almost same with it. Therefore, it is expected to be introduced in the market as alternative or additional fuel. In this report, fuel properties, engine performance, combustion characteristics and exhaust emission of OME and its diesel blended fuels were investigated.

1　序論

地球温暖化抑制のため、内燃機関から排出される二酸化炭素（CO_2）の低減は急務の課題である。現在電動車両の導入が推進されており、Tank to Wheel の観点では、CO_2 低減に大変有効であるが、Well to Wheel の観点では、電力発電時の CO_2 排出量も含まれることから現状の化石燃料を用いた発電では、電動車でも CO_2 が発生する。また、重量物を積載し長距離走行する商用車では、バッテリーのエネルギー密度の低さから積載量への影響は避けられず、また充電のインフラ整備も必要であることから内燃機関の利用が有効と考えられる。

内燃機関の CO_2 低減方法の一つに CN 燃料（カーボンニュートラル燃料）の利用がある。CN 燃料には、植物由来のバイオ燃料及び再生可能エネルギー由来の電気を用いて水を電気分解して精製した水素（H_2）と工場などから排出される CO_2 を用いて生成する合成燃料がある [(1)]。これらは Well to Wheel での CO_2 低減に有効であり、現在さまざまな研究機関で CN 燃料についての研究がおこなわれている [(2)]。CN 燃料の一つである OME は液体燃料であり、セタン価が高いことから着火性に優れディーゼルエンジンに混合燃料として適用が可能である [(3)]。また、含酸素燃料であることから、すす（以下 “SOOT” と表記する）などの排出ガス低減も期待できる。しかし OME を新たな燃料として市場に投入するには、新たなインフラ設置等の課題があり、大量に製造することは難しい。そのため、OME の普及シナリオを考えると、既存車両の燃料システムを利用した軽油への混合が想定される。また、OME は燃料配管に使用されるゴム材を膨潤させる影響の報告 [(4)] があり、実用的な使用は耐久性に課題がある。

OME のエンジン性能に対する影響は、欧州及び中国を中心に研究が行われている。Pellegrini ら [(5)(6)] は排気量 1.9 L の多気筒ディーゼルエンジンに、OME を 12.5 %、軽油 50%に混合させた際の機関性能及び排気性能を調査した。OME 混合により PM 排出量が低下した反面、正味燃費及び熱効率の悪化が報告されている。また、Wang ら [(7)] は軽油に OME を 10 % 及び 20 %を混合させた燃料を大型の多気筒エンジンで調査し、NOx 排出量の増加とともに SOOT、一酸化炭素（CO）及び炭化水素（HC）排出量低下、燃焼期間の短縮により、図示熱効率及び燃焼効率が改善したが、一方でエネルギー密度の低下による図示燃費は悪化していた。しかしながら、OME を軽油に混合した燃料の、ゴム材料へ与える影響及び潤滑性など耐久性に影響する燃料性状なども含め総合的にエンジン性能への影響を系統立てて検討している研究は少ない。本稿では、CN 燃料である OME の普及シナリオを想定し、OME を軽油に少量混合した際の燃料性状を明確にした上で、ゴム製品に与える影響と既存機関へ適用した際の機関特性及び排気特性に及ぼす影響を調

*㈱いすゞ中央研究所

査した結果を述べる。

2　供試燃料

2.1 供試 OME の燃料組成及び理論空燃比

OME は再生可能エネルギーを利用して製造可能であり、再生エネルギーキャリアとして注目されている[8]。OME は CH_3O（CH_2O）$_nCH_3$ で表し、オキシメチレン基（CH_2O）の数（n）により、OME_n と表す。供試した OME の組成及び理論空燃比を**表 1** に示す。供試 OME は、OME_1 から OME_6 まで含んでおり、OME_3 と OME_4 が主な成分である。OME は含酸素燃料ゆえに理論空燃比が低く、燃料と空気の早期混合が期待される[9]。

表 1　OME の組成及び理論空燃比

		Wt%	A/Fst
OME_1	$C_3H_8O_2$	0.3	7.22
OME_2	$C_4H_{10}O_3$	0.7	6.47
OME_3	$C_5H_{12}O_4$	74.3	6.05
OME_4	$C_6H_{14}O_5$	21.1	5.79
OME_5	$C7H_{16}O_6$	2.9	5.60
OME_6	$C_8H_{18}O_7$	0.3	5.47
	OME		5.97
	Diesel (ref)		14.61

2.2　OME 混合燃料の燃料性状

はじめに、OME を市販の JIS2 号軽油に混合した際の燃料性状への影響を調べた。**表 2** に性状調査で用いた JIS 規格の番号及び名称を示す。**図 1** に低位発熱量、**図 2** にセタン価、**図 3** に燃料密度、**図 4** に動粘度の計測結果を示す。調査対象の燃料は軽油への OME の混合割合を質量割合で 5.4 %、10.8 %及び 21.5 %に混合したものとし、それぞれを OME5、OME10 及び OME20 と呼称する。また比較対象として、軽油のみ及び OME のみも計測を実施した。OME のみの条件は OME100 と呼称する。

OME100 は軽油と比較し低位発熱量が低く、OME を混合した軽油は混合割合に応じた低位発熱量となった。OME 混合割合を増やすことでエネルギー密度が低くなることから、同一の噴射条件下では、エンジン出力の低下が予想される。

セタン価はすべて JIS2 号軽油規格 45 以上の値を示した。OME 混合割合を上げるとセタン価は高い値を示すが、OME100 では低い値となっている。その理由は不明であるが、今回の調査では JIS K2280 の計測方法で実測した値であり、複数回計測で同様の傾向を得ている。文献[10][11]ではセタン価は OME_3 で 72 と今回の計測値より高い値である。この文献では ASG 社製の AFIDA を用いており計測の方法に違いによるものと推測される。

燃料密度は OME100 で軽油に比べ高い値であり、OME を混合した軽油は混合割合に応じた密度となった。動粘度は軽油に比べ低い値となった。密度及び動粘度は OME の混合割合が 20 %を超えると JIS2 号軽油の規格範囲外となった。

表 2　燃料性状調査　JIS 規格一覧

計測項目	規格番号/規格名称
低位発熱量	JIS K2279 原油及び石油製品−発熱量試験方法及び計算による推定方法
セタン価	JIS K2280 石油製品−オクタン価，セタン価及びセタン指数の求め方
燃料密度	JIS K2249 原油及び石油製品ー密度の求め方
動粘度	JIS K2283 原油及び石油製品−動粘度試験方法 及び粘度指数算出方法

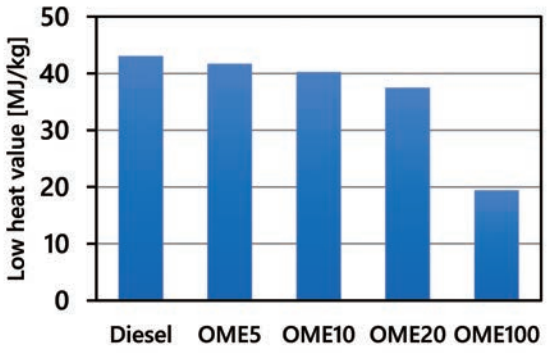


図 1　低位発熱量　計測結果

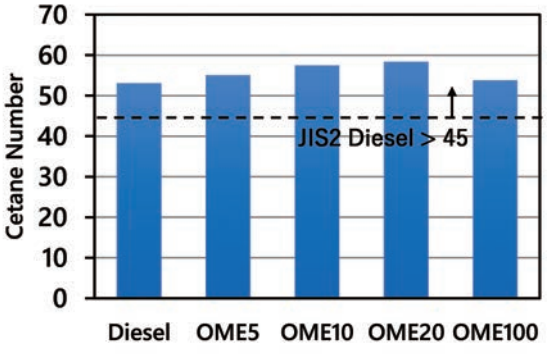


図 2　セタン価　計測結果

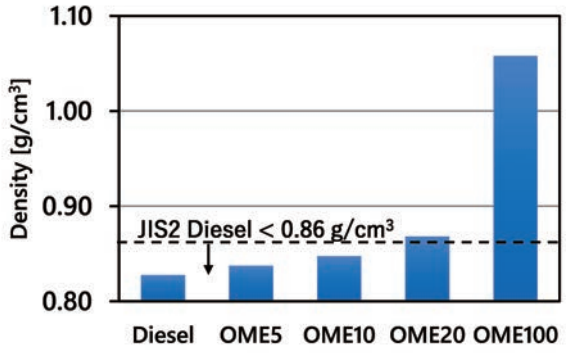


図 3　燃料密度　計測結果

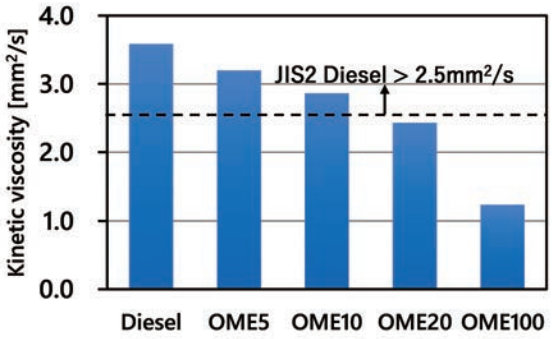


図 4　動粘度　計測結果

3　OME 混合燃料の浸せき試験

3.1 浸せき試験方法

OME は燃料配管に使用するゴム材を膨潤させる影響があることから、OME を混合した軽油を既販車に使用した際のゴム材への影響を調べるため浸せき試験を実施した。試験は JIS K6258（加硫ゴム及び熱可塑性ゴム―耐液性の求め方）に基づき浸せき試験を実施し、各浸せき時間ごとに引張強度及び体積膨張率を測定した。ゴム材（試験片）は主に市販のディーゼル自動車の燃料配管に用いられているフッ素ゴム（以下、“FKM” と称す）と NBR（ニトリルブタジエンゴム：Nitril Butadiene Rubber）の 2 種類を用いた。試験片の形状は体積膨張計測のため厚さ 2 mm の短冊形（20 × 50 mm）及び引張強度計測のため厚さ 2 mm のダンベル状 3 号形とした。試験片はガラス製の浸せき容器に十分に充填した各燃料の中に浸し、ガラス容器ごと温度制御が可能な防爆の恒温槽に設置した。浸せき時間は 144 時間、480 時間及び 720 時間とし、浸せき前の引張強度と体積膨張率について比較した。試験用液体の温度は引張強度と体積膨張への影響を加速させるため、引火点以下の 50 ℃に設定した。

3.2 浸せき試験結果

図 5、図 6 に FKM 及び NBR の浸せき試験後の引張強度及び体積膨張率の結果を示す。浸せき時間 144 時間の引張強度は FKM 及び NBR ともに OME 混合濃度に応じて低下したが、NBR の引張強度の低下度合いは FKM に比べて小さい。いずれも 144 時間以降は引張強度に大きな変化はなかった。また、FKM の体積膨張率は OME 混合濃度に対して高い値となり、144 時間以降に大きな変化はなかった。NBR の体積膨張率は、144 時間で軽油は低下（収縮）し、OME を混合した軽油では増加（膨潤）した。480 時間で体積膨張率が低下したのち一定となる。

図 7 は FKM 及び NBR の体積膨張率と OME 混合割合を比較した。総合資源エネルギー調査会資料[12]を参考に燃料ホース抜けの安全を考慮して、体積変化の上限を 14 %とすると、許容される OME 混合割合は 10 %程度となる。ただし、量産化のためにはオーリング等のシール安定性なども考慮して判断する必要がある。

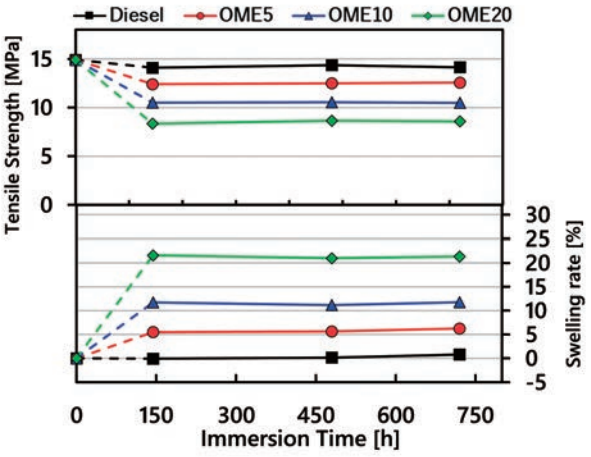


図 5　FKM の浸せき試験後の引張強度及び体積膨張率結果

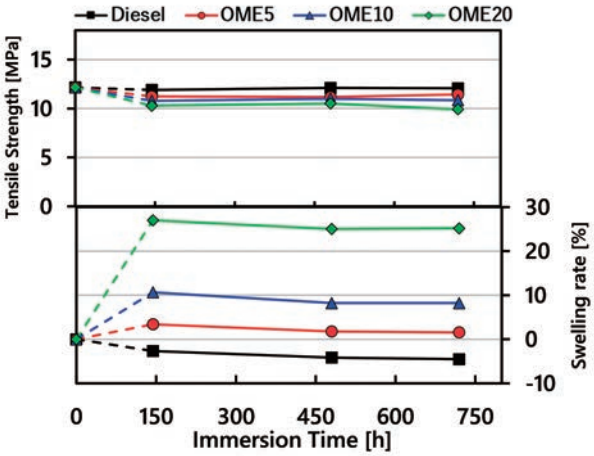


図 6　NBR の浸せき試験後の引張強度及び体積膨張率結果

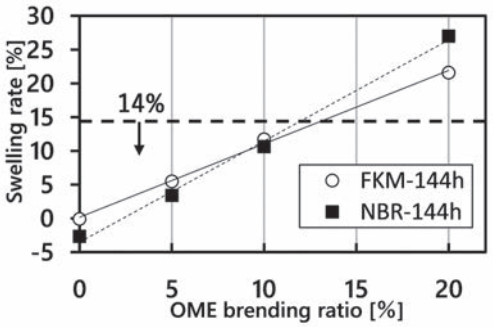


図 7　FKM 及び NBR の体積膨張率と OME 混合割合の比較

4　エンジン試験装置及び試験方法

4.1　供試機関及び試験装置

OME の混合割合の違いによるエンジン性能及び排出ガスへの影響を調査するため、多気筒エンジンにて試験を行った。供試エンジンの諸元を**表 3** に、概要図を**図 8** に示す。エンジンは直接燃料噴射式の 4 気筒ディーゼルエンジンを使用した。燃料流量計測は、体積式燃料流量計（小野測器社製、FP-224）を用いて計測した。クランクシャフトに取付けたアングルエンコーダ（AVL 社製、365C）のパルスを基準に、ピエゾ圧電式圧力センサ（KISTLER 社製、6052C）を用いて筒内圧力を全気筒計測し、燃焼解析を行った。排気管には排出ガス分析装置（Horiba 社製、MEXA-1600DEGR）とマイクロスートセンサ（AVL 社製、483）を取付け、排出ガス中の排出ガス成分と SOOT 濃度を計測した。

表 3　供試エンジンの諸元

Engine Type	Direct injection diesel
Maximum Torque [Nm/rpm]	375/1600-2800
Rated Power [kW/rpm]	110/2800
Bore × Stroke [mm]	φ95.4 × 104.9
Number of Cylinder	4
Displacement [L]	2.999
Fuel System	Common Rail
Supercharging system	Variable vane turbocharger with charge air cooler

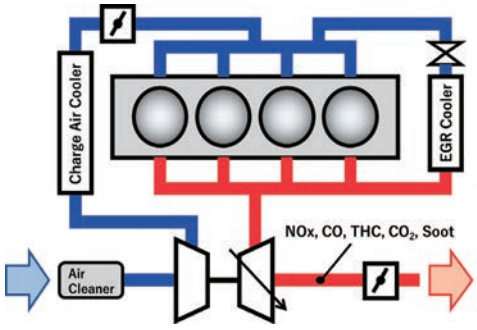


図 8　供試エンジン概要図

4.2　エンジン試験条件及び方法

はじめに、エンジンの全負荷条件にて、OME の混合割合を変更した際のエンジン出力特性への影響を調べた。エンジン回転速度は 600 rpm から 3200 rpm まで 200 rpm ごとに計測した。エンジン制御の適合値は既販車相当とし、タービン出口圧力は定格点（2800 rpm）にて排気調整バルブにて車両実装相当に調整した。

次に、混合燃料を供試機関に用いた場合の機関性能、排気特性及び燃焼への影響に関する知見を得ることを目的として、負荷条件により EGR（排気再循環：Exhaust Gas Recirculation）率を変更し熱効率と排出ガス性能への影響を調査した。燃費評価モードで、JE05 の高頻度の条件となるエンジン回転速度 1500 rpm、エンジントルク 200 Nm を試験ポイントに設定した。燃料噴射回数は 1 回、噴射タイミングは上死点前 3 °、噴射圧は 130 MPa に設定し、トルクが 200 Nm となるように燃料噴射量を制御した。吸気マニフォールド圧力は 53 kPa になるようにターボベーン開度も制御した。EGR 率が 0 %、5 %、10 %、15 %及び 20 %になるよう EGR バルブ開度を調整した。

5　エンジン試験結果及び考察

5.1　全負荷試験結果

OME の混合割合を増加させた場合の全負荷試験結果を**図 9** に示す。OME の混合割合を増やすことで、エンジン回転速度全域でトルクの低下を確認した。**図 10** に定格エンジン回転速度（2800 rpm）における、OME 混合割合を増やした際の、燃料体積当たりの低位発熱量の変化率とトルクの低下率を示す。本図より OME 混合割合増加に伴うトルクの低下と、燃料体積当たり低位発熱量の変化率に相関関係があることがわかる。全負荷条件では同一適合値を用いているため、ほぼ一定の体積流量の燃料が噴射されることから、投入熱量が低下したと考えられる。OME 混合割合が高い条件では、発熱量の変化率とトルク低下率に乖離がある。これは後述する熱効率の低下が一因と推測できる。

車両走行時のドライバビリティの観点から、トルク低下が 5 %程度まで許容できるとすると、OME の割合は 10 %程度まで混合可能である。

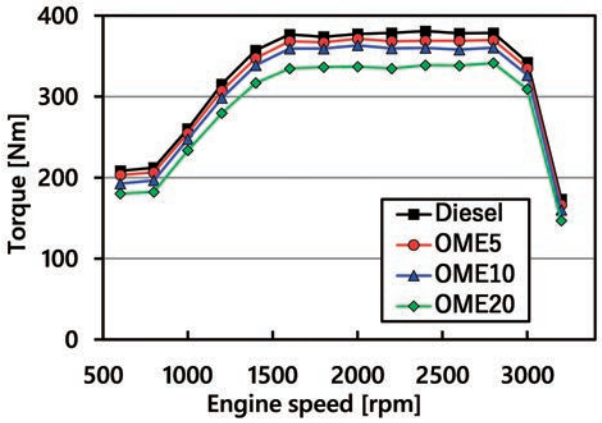


図 9　全負荷試験結果

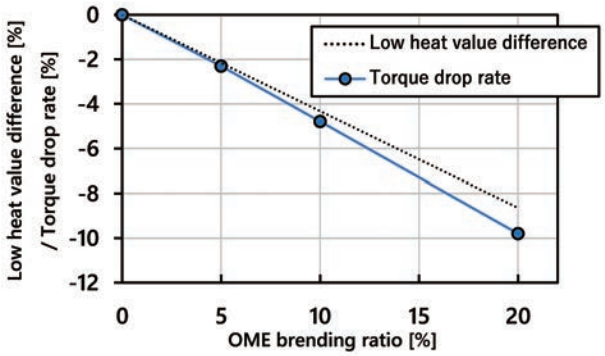


図 10　OME 混合割合に対する、トルク低下率及び燃料体積当たりの低位発熱量の変化率

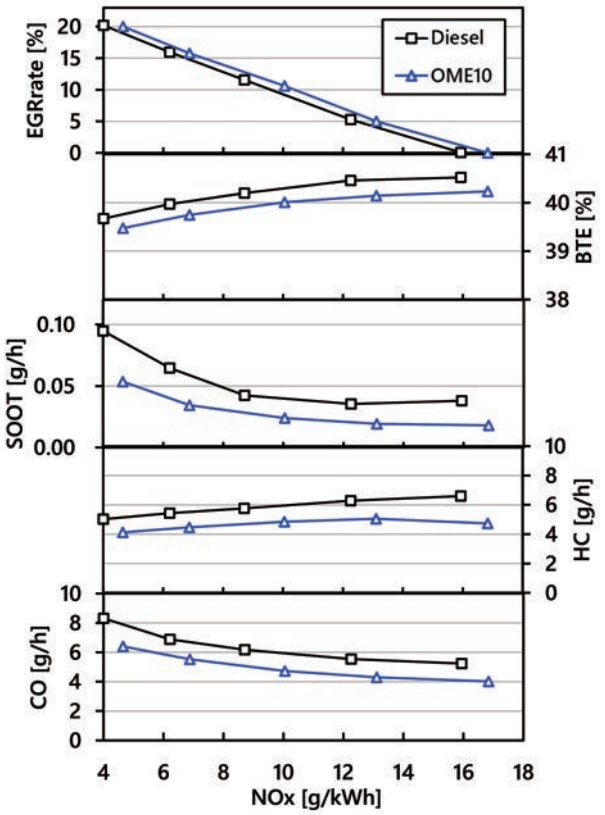


図 11　EGR 率変更し NOx 排出量を変更した際の、正味熱効率、SOOT、HC 及び CO 排出量結果

5.2 部分負荷試験結果

浸せき試験と全負荷試験結果から、OME の割合は最大で 10 %まで混合可能であることがわかった。そこで、部分負荷の EGR 条件下にて、OME を 10 %混合した際のエンジン性能、排気特性及び燃焼特性を軽油と比較した。既存のエンジンに OME を混合した場合を想定し、噴射パラメータ及び過給圧は前述の値に固定、EGR 率を変更し NOx 排出量を変化した場合の、BTE（正味熱効率：Brake Thermal Efficiency)、SOOT、HC 及び CO 排出量を比較した結果を**図 11** に示す。

OME を混合することで、同一 NOx 排出量で比較すると、SOOT、HC 及び CO 排出量は低下した。これは OME が含酸素燃料であることに起因すると考察され、SOOT、HC 及び CO の低下は文献 [5][6] と同様の傾向である。一方で熱効率は低下した。軽油と OME10 の結果を EGR15 %条件で比較すると、NOx 排出量は約 10 %増加し、正味熱効率は 0.6 %低下、SOOT 排出量は約 45 %と大幅に低下した。

図 12 に EGR20 %条件における、筒内圧力、筒内平均温度、熱発生率、熱発生積算値及びインジェクタ駆動電流について軽油と OME10 の結果を比較して示す。また、その際の全気筒の燃焼解析から計算した 4 気筒の平均 DCV（等容度：Degree of Constant Volume）を**図 13** に、EVO（排気バルブ開き時期：Exhaust Valve Open Timing）までの見かけの総発熱量と投入熱量の比から求めた、4 気筒平均の熱損失割合を**図 14** に示す。OME10 は体積当たりの発熱量が低くなることから、インジェクタ駆動電流が示す噴射期間が長くなった。一方で**図 13** に示す等容度が高い値となった。OME が含酸素燃料であり、かつセタン価が高いことから、軽油に比べ燃焼が活発化し燃焼期間が短くなったと考える。

しかしながら、排気バルブ開き時期までの熱損失割合が増加した。燃焼が活発化したことで筒内温度が上昇し、熱損失が増加したと考察する。この熱損失の増加により、熱効率が低下したと推測できる。今後、熱損失の増加原因を考察するため、燃料噴射パラメータ及び過給圧を最適パラメータに変更して比較検討する必要があり、シミュレーションを用いた比較も検討する。

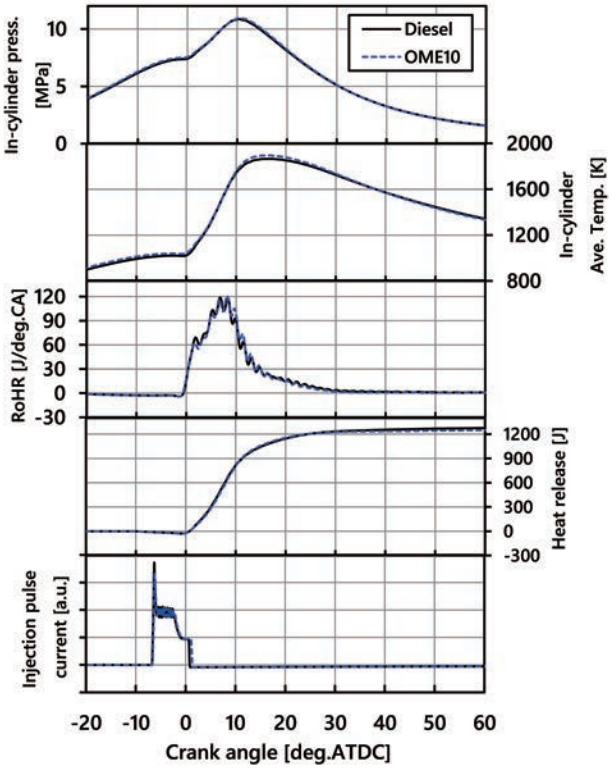


図 12　筒内圧力、筒内平均温度、熱発生率、熱発生積算値、及びインジェクタ駆動電流の結果（EGR20 %）

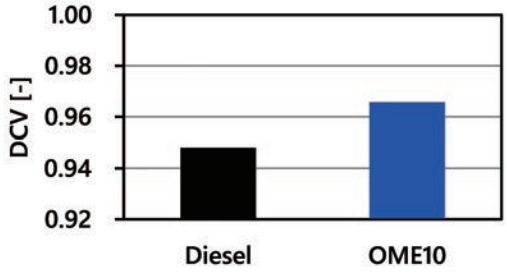


図 13　等容度（Degree of Constant Volume）

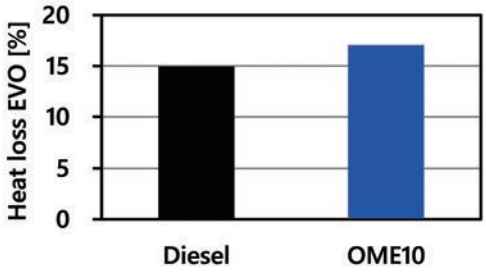


図 14　排気バルブ開き時期（EVO）までの熱損失割合

6　結論

本研究では、OME を軽油に少量混合した際の燃料性状を明確にし、ゴム製品に与える影響と既存機関へ適用した際の機関特性及び排気特性に及ぼす影響を調査して後述の知見を得た。

(1) 燃料性状調査の結果、軽油に OME を混合することで低位発熱量が低下した。また密度の増加及び動粘度の低下を確認し、OME を 20 %以上軽油に混合すると、JIS2 号軽油の規格範囲外となった。

(2) OME 混合軽油を用いて、ゴム材料の浸せき試験を実施した結果、OME の混合割合に伴い引張強度は低下し、体積膨張率が高くなった。

(3) OME を混合した軽油を供試エンジンに用いて、同一噴射量条件で試験した結果、OME 混合割合の増加に伴いトルクが低下した。トルク低下の割合は燃料の体積当たりの発熱量に相関があった。

(4) 同一トルク条件でエンジン性能及び排出ガス特性への影響を調べた結果、OME を軽油に混合することで、SOOT、HC 及び CO 排出量が低下した。これは OME が含酸素燃料であることに起因すると考察できる。一方で熱効率が低下した結果から熱損失の増加によるものと推測できる。

本稿は機械学会論文集 20-00374 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) 渡邊学：カーボンニュートラルに向けたモビリティの燃料, JSAE ENGINE REVIEW, Vol.12 No.2(2022)

(2) Fourin, efuel 普及の可能性とインパクト（2020）

(3) Z.Wang, et al.: Homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion of polyoxymethylene dimethyl ethers (PODE), Fuel, Vol.183(2016), pp.206-213.

(4) K. Gaukel, et al.: OME2: An example to pave the way to emission-neutral vehicles with internal combustion engine, International Vienna Motor Symposium 2016(2016)

(5) L. Pellegrini, et al.: Combustion behavior and emission performance of neat and blended polyoxymethylene dimethyl ethers in a light-duty diesel engine, SAE, 2012-01-1053, (2012)

(6) L. Pellegrini, et al.: Emission Performance of neat and blended polyoxymethylene dimethyl ethers in an old light-duty diesel car, SAE, 2013-01-1035, (2013)

(7) Z. Wang, et al.: Performance, combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with polyoxymethylene dimethyl ethers (PODE3-4)/ diesel blends, Energy Procedia, Vol.75(2015), p.2337-2344.

(8) W. Maus, et al.: OME1: A potentially sustainable diesel fuel, International Vienna Motor Symposium2014 (2014).
(9) 若林森音：実機相当雰囲気における OME の噴霧特性，第 30 回内燃機関シンポジウム (2019)，session95.
(10) L. Lautenschutz, et al.: Physico-chemical properties and fuel characteristics of oxymethylene dialkyl ethers, Fuel, Vol.173 (2016), pp.129-137.
(11) L. Lautenschutz, et al.: Corrigendum to “Physico-chemical properties and fuel characteristics of oxymethylene dialkyl ethers”, Fuel, Vol.209(2017), pp.812.
(12) 総合資源エネルギー調査会石油分科会石油部会燃料政策小委員会　第 4 回規格検討ワーキンググループ配付資料，〈https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/243519/www.meti.go.jp/committee/summary/0002070/0001.html〉，（参照日 2020 年 9 月 21 日）.

著　者


森田　真一

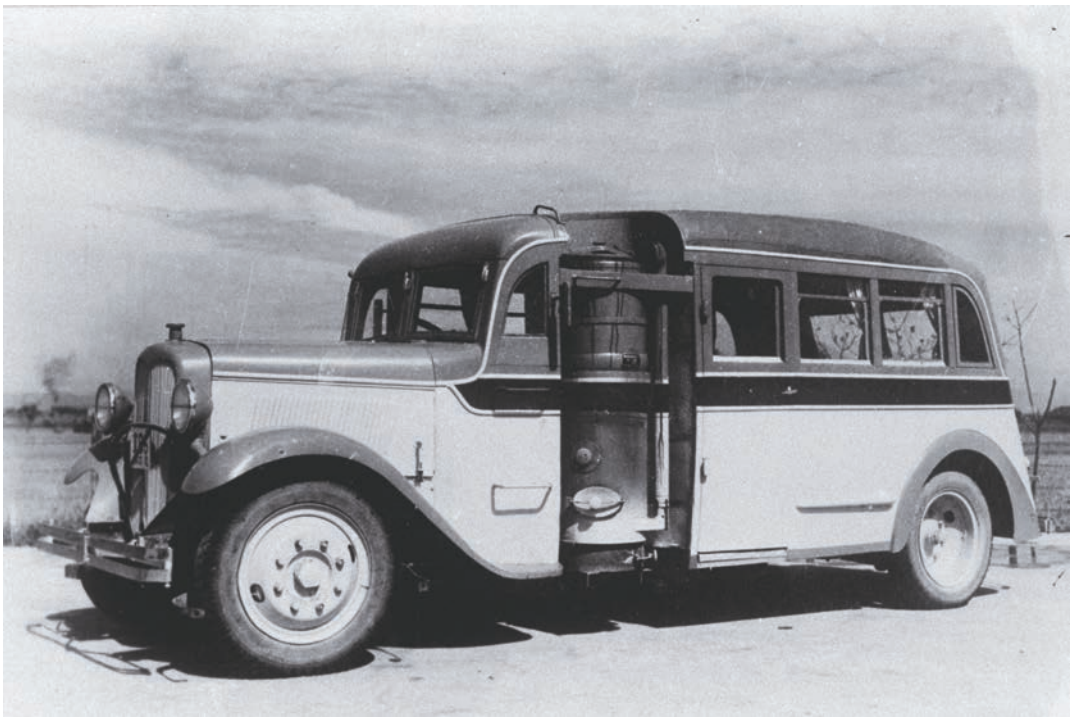

岡本　毅


瀬戸　雄史


小松　明


石川　直也

◇いすゞ歴史の一こま



BX40 薪炭バス（1938 年ごろ）

論文・報告

Transient Model-Based Calibration for Engine ECU Maps Using a Big Scale Multi-Objective Optimization Solver Running on the Cloud

Yifan Wei* Yicheng Hu* Vaibhav Kadam* Waiting Li*
Bruce Vernham* Steven Haines**

Abstract

Future 2024 and 2027 year's low NOx regulations require heavy-duty diesel engine trucks to drop the NOx emission from current 0.27 g/kW-h to 2024 year's 0.068 g/kW-h, and 2027 year's 0.027 g/kW-h [(1)]. This imposed significant challenges to diesel engine automakers. The demanding emission regulations and customer fuel economy requirements call for the needs of model-based design and model-based control development to satisfy product requirements. In order to increase calibration development efficiency, we proposed a method in this article to calibrate engine control unit (ECU)'s control targets' set-point map utilizing a novel optimizer running along with engine and ECU models on AWS cloud. The calibrated maps were tested on 4HK1 engine and showed good match between testing and simulation.

1 Introduction and calibration problem formulation

Model-based development and validation processes have been widely used in automotive industry from hardware prototyping to calibration and validation stages [(2)-(7)] Even though different types of simulation could significantly reduce physical testing work, they usually require extensive computational resources and could be time consuming to find ideal solutions for complex or nonlinear problems [(7)]. Therefore, optimization algorithms are frequently coupled with simulations to search for solutions. This demands solver's capability to solve problems effectively, therefore we proposed a new method called "weighted-optimization framework non-dominated sorted genetic algorithm (WOF-NSGA-II) ". Additionally, running on local personal computer or a cluster limited CPU[1)]-cores can be time consuming, thus, we tested an architecture on cloud with demanded number of cores for better parallelization. The optimization and simulation generated calibration maps were finally tested on engine, and simulations were compared against tests.

Note[1)] CPU: Central Processing Unit

2 Intro to general optimization algorithms

Simulation software were black-box to optimizers, therefore derivative-free methods, such as PSO (Particle Swarm Optimization) and GA (Genetic Algorithm), were popularly selected to solve these multi-objective and highly non-linear problems regarding engine development aspects [(8), (9)]. Such methods are effective for small-scale optimization problems (limited number of design variables), but engine control and calibration applications were large, due to various subsystems for high-level and low-level controllers, and many parameters were map-based to account for engine and emissions' transient behaviors. A novel derivative-free method which can tackle multi-objective and large-scale simulations was urgently needed to capture multi-objective tradeoffs like fuel consumption against NOx emission.

In the field of derivative-free multi-objective optimization, there is a well-known algorithm, NSGA-II (Non-dominant Sorted Genetic Algorithm), which is efficiency in generating the trade-off pareto front for small and medium scale problems [(10)] and is able to capture pareto fronts with different shapes. For example, it can successfully generate concave, discontinuous pareto front, which cannot be found

* Isuzu Technical Center of America, Inc. ** Optecon Consultants LLC

by weighted-sum method. However, computational experiments show that for large-scale problems, NSGA-II has a slow convergence rate due to the large design space and the ineffectiveness of the genetic operator [11]. Studies have reported several improved algorithms to deal with large problems, such as co-evolution, differential evolution, etc. [12], [13]. Recently, Zille et al. proposed a framework to solve large-scale multi-objective problems based on problem transformation, which is called the weighted-optimization framework (WOF) [14], [15]. Compared with other methods, this framework allows users to input their expert knowledge explicitly by defining design variable groups considering variable interactions. In this article, we implemented WOF with NSGA-II and proposed WOF-NSGA-II to solve ECU target set maps to achieve different BSFC[1]/BSNOx[2] trade-offs on a hot HDT[3] transient cycle.

Note[1] BSFC: Brake Specific Fuel Consumption

Note[2] BSNOx: Brake Specific Nitric Oxide Emissions

Note[3] HDT: Heavy Duty Truck

3 Intro to engine optimization and calibration

For traditional steady-state based engine calibration and optimization problems, because both the engine thermal mass and ECU controller responses plays marginal effects once engine reaches steady-state criteria, dyno testing or model-based calibration tends to optimize selected speed-load steady-state points.

However, the controller responses and engine thermal inertia could play huge role in transient cycle calibrations, and many control and calibration strategies involved transient correction maps. Therefore, during final validation stage calibration process, engine calibration engineers have to consider these effects while satisfying all engine design and planned requirements. By utilizing proposed framework by authors, engineers can optimize calibrations based on transient cycles, and optimization and calibration can be move forward to earlier phases of engine design and planning.

In this article, the authors picked in total 7 control target maps in order to optimize injection control timing and quantity, exhaust gas recirculation (EGR) rate and variable geometry turbocharger (VGT) boost. Due to the nature of transient based calibrations, each of the 7 maps were divided into 18 fueling levels - by - 25 speed levels grids as shown on Figure 1. The optimizer would optimize every individual points on the grid. Therefore, the solver needs to solve 3150 input variables, which represents 7 maps.

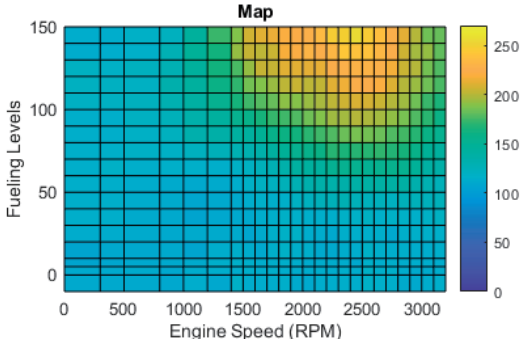


Figure 1 Example of a control target map with 18-by-25 grids

The final developed calibration maps and simulation results were validated against test results on MiL simulation for their hot HDT cycle based BSFC and BSNOx numbers and compared to those of a set baseline manual calibration maps with same MiL simulation. In the following context, the authors will later refer a group of 7 control maps as 1 set of optimized calibration.

4 Problem Formulation

The authors introduced the optimization problem formulation for the engine calibration application. The decision variables were 3150 points from the 7 calibration maps, where each map had 450 points. This work used x_{ij} to represent the jth element (individual grid point) in ith map, where $0 \leq j \leq 450$ and $1 \leq i \leq 7$. The collection of decision variables can be reorganized into a 7×450 matrix $\boldsymbol{X}$. Each calibration map might have upper and lower value, therefore, the upper and lower bound for each x_{ij} was determined, denoted by $\overline{x_{ij}}$ and $\underline{x_{ij}}$, respectively. The smoothness of the maps were also given as constraints ∂x_{ij}. Given some maps design $\boldsymbol{X}$, the simulation would evaluate two objective functions of interest, BSFC and BSNOx, denoted by $f_{bsfc}(\boldsymbol{X})$ and $f_{bsnox}(\boldsymbol{X})$, respectively. Both of the objective

functions were highly nonlinear and nonconvex and could be treated as black-box functions. In addition to that, the simulation would also output some other engine states/metrics, such as temperatures and pressures, which could have hard limits, such us turbo inlet temperature, and can be captured as optimization constraints. The authors used $m_k(\boldsymbol{X})$ to represent the kth metric in the output. And similarly, each metric had some predefined feasible region, denoted as $\mathcal{M}_k$, in order to capture the physical limitations of the engine.

The optimization problem can be summarized in the following mathematical function evaluation (FE) form:

$$\min \ \{f_{bsfc}(\boldsymbol{X}), f_{bsnox}(\boldsymbol{X})\}$$

$$s.t. \underline{x_{ij}} \le x_{ij} \le \overline{x_{ij}}, \ \forall (i,j)$$

$$\underline{\partial x_{ij}} \le \partial x_{ij} \le \partial \overline{x_{ij}}, \ \forall (i,j)$$

$$m_k(\boldsymbol{X}) \in \mathcal{M}_k, \ \forall k$$

The FE is expensive since the simulation is computationally intensive, and the minimization objective and constraint violation can be detected at the same time, which means the optimization problem cannot generate feasible points before sampling, but could be known if one point is in the feasible region after the FE. In order to remove infeasible samples in a consistent manner, this work reformulated the above problem into the following FE form, by converting the engine states metric constraint into a set of penalty terms in the objective functions:

$$\min \ \{f_{bsfc}(\boldsymbol{X}), f_{bsnox}(\boldsymbol{X})\} + \sum_k \lambda_k \mathbb{I}_{m_k(\boldsymbol{X}) \notin \mathcal{M}_k}$$

$$s.t. \underline{x_{ij}} \le x_{ij} \le \overline{x_{ij}}, \ \forall (i,j)$$

$$\underline{\partial x_{ij}} \le \partial x_{ij} \le \partial \overline{x_{ij}}, \ \forall (i,j)$$

Here λ_k was the penalty coefficient for violations of hardware limits of engine state/metric k, and it was picked so that when the engine hardware or operating condition constraints were violated, the penalty term would dominate two objective functions.

5 Implementation of Algorithm and Simulation Architecture

5.1 WOF-NSGA-II Optimization Framework

The authors implemented a framework that fused both WOF and NSGA-II algorithm, and a brief overview of the framework was provided. For more technical details and definition of terms, readers can refer to the original papers [10), (14), (15)]. A figure of the fused WOF-NSGA-II framework was shown in Figure 2.

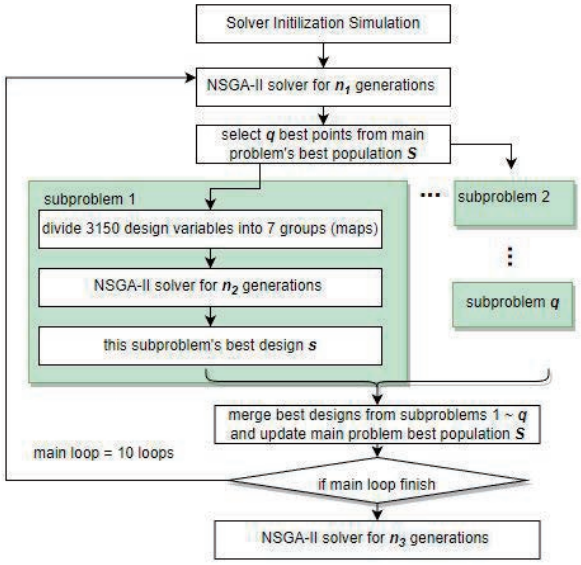


Figure 2 WOF-NSGA-II optimization problem solver overview

5.2 The NSGA-II Part

The framework was initialized with a population size of N. Each individual in the population represents one design. Without any prior information, a random initialization was used. If users have good baseline calibration maps to start with, the proposed solver can include that map in the initial as well. The population was updated using NSGA-II algorithm for some generations, which is shown in Figure 3. Inside the NSGA-II update, the current population would be evaluated via simulation, and then ranked using non-dominant sort algorithm. For individuals having the same rank, a metric called crowding distance was further calculated to represent local point density. The population was then filtered to keep elites only by comparing ranks and crowding distance (lower rank and larger crowding distance are favored).

A parent pool would be formed subsequently by random selection and binary tournament. Children generation would be generated by randomly selecting parent pairs and applying genetic operators including crossovers and mutations.

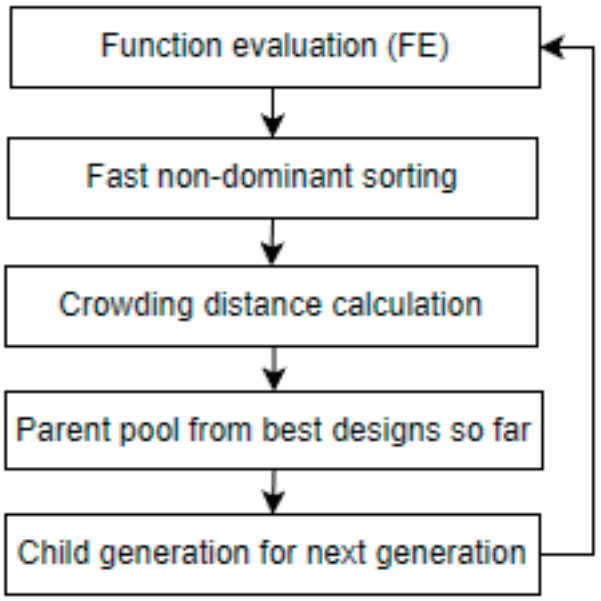


Figure 3 Standard NSGA-II optimization solver workflow chart

5.3 The WOF Part

After updates via the NSGA-II solver, the population were moved into the WOF phase. Firstly, q best designs from the population would be selected by comparing ranks and crowding distance as well. We denoted the corresponding designs as $\boldsymbol{X_1}, \boldsymbol{X_2}, \ldots, \boldsymbol{X_q}$. This represents q best calibrations found so far. And then, q corresponding subproblems, each with population size n, would be formulated and solved simultaneously in parallel using NSGA-II solver. This means that for each best calibration in q designs, the optimizer would do a further exploration.

To define a subproblem, this framework firstly took some design $\boldsymbol{X_a}$, and divided the design space into γ groups. For engine calibration application, since it has 7 independent calibration maps, it was natural that the authors picked γ=7, and it means grid points belonging to the same map were grouped together. The authors noted that this was problem-specific prior knowledge of this optimization problem, and the WOF could properly handle this information as an input. For now, the problem has 7 variable groups to represent 7 maps, denoted as $x^a_{1:}, x^a_{2:}, \ldots, x^a_{7:}$. For each group g, a weight variable w_g was assigned. For the subproblem, the framework viewed the 7 weight variables, $w_1, w_2, \ldots, w_7$, as new design variables. One way to construct the design in the original design space was to perform the following operation (which was called product transformation):

$$X'_a = \begin{bmatrix} w_1 x^a_{1:} \\ w_2 x^a_{2:} \\ \cdots \\ w_7 x^a_{7:} \end{bmatrix}$$

For product transformation, it could be observed that by setting all w_g=1, the center solution $\boldsymbol{X_a}$ that defines the current subproblem could be represented. And for the subproblem, by optimizing weight variable w_g, the algorithm was actually tuning the optimal levels of each calibration map while keeping the shape fixed (and for the previous NSGA-II update, it was more of shape tuning). Apart from product transformation, other transformation methods to construct design in the original design space were also available; examples include value transformation and interval-intersection transformation. It was also worth mentioning the shape gradients were imposed on the map discretization to ensure maps were smooth.

After solving q subproblems for some iterations using NSGA-II, the solver generated nq points from the union of population of subproblems, where n is subproblems' population size and q is the number of subproblems. Together with all simulation FE evaluations, a population filtration was conducted to keep N best points only. Then, the previous steps (NSGA-II solver and WOF) were repeated for some iterations. Finally, the WOF-NSGA-II solver had some extra generations with NSGA-II algorithm until all available FEs had been used or there was no observable improvement of the Pareto front.

6 Simulation and cloud architecture

The WOF-NSGA-II optimization algorithm shown in **Figure 2** was implemented in Python 3.8.10. It was coupled with model-in-the-loop (MiL) transient engine cycle simulations. The MiL (**Figure 4**) consists of the following parts: 1. VL22 4HK1 Engine Model in **GT-Suite**[1] 2. ECU Controller **Model in Matlab/ Simulink**[2] **compiled executable** 3. Calibration maps in **ASCII**[3] **file** 4. **C Code** to read calibration maps from **ASCII** file and pass it to **Simulink** ECU model. For each optimization FE with specific calibration design $\boldsymbol{X_1}$, a MiL evaluation was performed. Due to the nature of the NSGA-II solver and WOF framework, the developed WOF-NSGA-II solver can be implemented to run simulations for objectives' FEs in parallel manners. To further increase the simulation efficiency and reduce actual real world time, the solver were coupled to submit simulation evaluation jobs to the cloud with AWS as backbone computational resources. Number of CPUs to run are on demand depending on the optimization solver's request. The structures were shown on **Figure 5**.

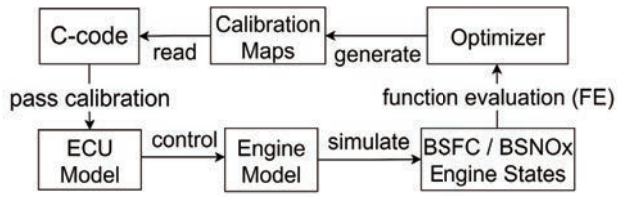


Figure 4 MiL Components Integration

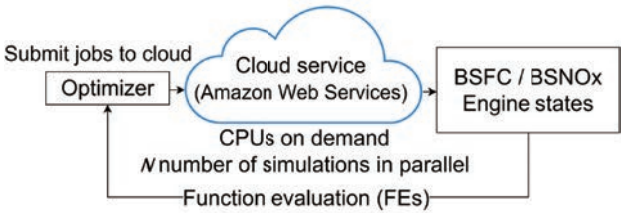


Figure 5 MiL, Solver and Cloud Integration

Refer to **Figure 3**, the WOF-NSGA-II setting has 300 random initialization points, q = 5 sub-problems to represent further exploration on 5 chosen calibration maps from population S = 20, $\gamma = 7\ for\ 7\ calibration\ maps$. For each sub-problem, NSGA-II solver setting has a population size s=10 to capture 10 best calibration maps in a generation, n2 = 10 for 10 generations. Pre-subproblem NSGA-II solver setting has S=20 populations to capture 20 best calibration maps in a generation, $n1$=10 generations. For post-big-loop wrap-up phase, NSGA-II solver has same setting as pre-subproblem NSGA-II of S=20 and n3 = 10. The big loop shown on **Figure 3** runs 10 times, this setting results to total 7500 simulation runs.

Each hot HDT simulation evaluation took around 20 minutes to complete, therefore total CPU time for 7500 simulation runs is around 2500 hours. If running on a serial manner, it would take more than 100 days, however running on the cloud with CPUs on demand, we finished the evaluation around 5 days.

Note[1] GT-Suite: Gamma Technology's Engine Simulation Software

Note[2] Matlab/Simulink: Engine Control Unit Simulation Software

Note[3] ASCII: File Format to Store Data

7 Calibration Map Validation

After running the optimization solver, the following BSFC vs BSNOx trade-off pareto **Figure 6** were achieved by using simulations. For validation, calibration engineer picked 3 different BSFC/ BSNOx levels and tested on actual engine dyno meter. The comparison between dyno test data and simulation data were shown as the following **Table 1** and **Table 2**.

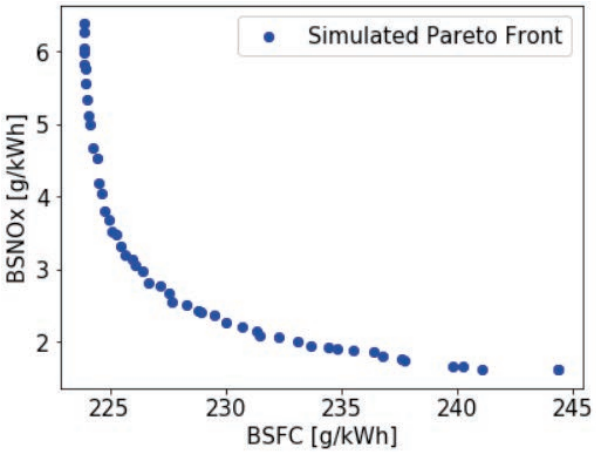


Figure 6 Pareto Front Achieved by using optimization and simulation

Three calibration were selected at the following fuel consumption v.s. NOx levels. Table 1 showed the prediction results coming from simulation platform.

Table 1 Engine performance states predicted using MiL

	Calibration 1	Calibration 2	Calibration 3
Total Power (kWh)	9.47	9.56	9.73
Total Fuel (kg)	2.15	2.20	2.35
Total Nox (g)	28.62	22.46	15.95
BSFC (g/kWh)	226.37	230.22	241.76
BSNOx (g/kWh)	2.98	2.32	1.62

The calibrations were output into ETAS INCA calibration files and loaded into ECU hardware to be tested on actual engine dyno meter. Table 2 showed the actual calibration performance and differences compared to simulation predictions.

Table 2 Engine performance states tested on engine dyno

	Calibration 1	Calibration 2	Calibration 3
Total Power (kWh)	9.39 (-0.85%)	9.36 (-2.14%)	9.25 (-5.19%)
Total Fuel (kg)	2.12 (-1.42%)	2.16 (-1.85%)	2.3 (-2.17%)
Total Nox (g)	26.12 (-9.57%)	20.72 (-8.40%)	14.04 (-13.60%)
BSFC (g/kWh)	225.46 (-0.40%)	230.61 (+0.17%)	248.69 (+2.79%)
BSNOx (g/kWh)	2.75 (-8.36%)	2.19 (-5.94%)	1.5 (-8.00%)

It was noted that accumulated fuel, accumulated NOx, BSFC and BSNOx are well captured in both trend and quantitative values. As in Table 2, the prediction of power had some deviations, because simulated torques seem to be more sensitive (around 20 N-m deviation) to calibration changes, while actual engine dyno results showed less sensitivities to calibration changes.

Fuel flow rate, airflow rate and boost pressure are well captured in simulations compared to testing results, as shown in Figure 7. There are few challenges remain in some operating regions where the feedback EGR valve angle (Figure 8) and feedback VGT position value deviates against test data. Potential improvements could be made by improving turbocharger maps accuracy and further validate Simulink ECU controllers. The NOx value at idle region are also not perfect Figure 9 due to NOx sensitivity, small deviation in EGR prediction could cause gaps between simulations and predictions. Additionally, Soot predictions had some missing spikes.

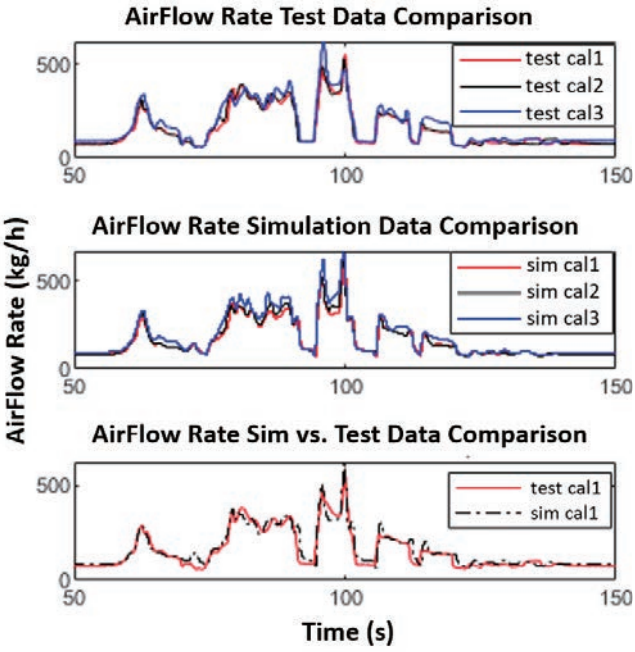


Figure 7 AirFlow Rates Comparisons [Zoom in]

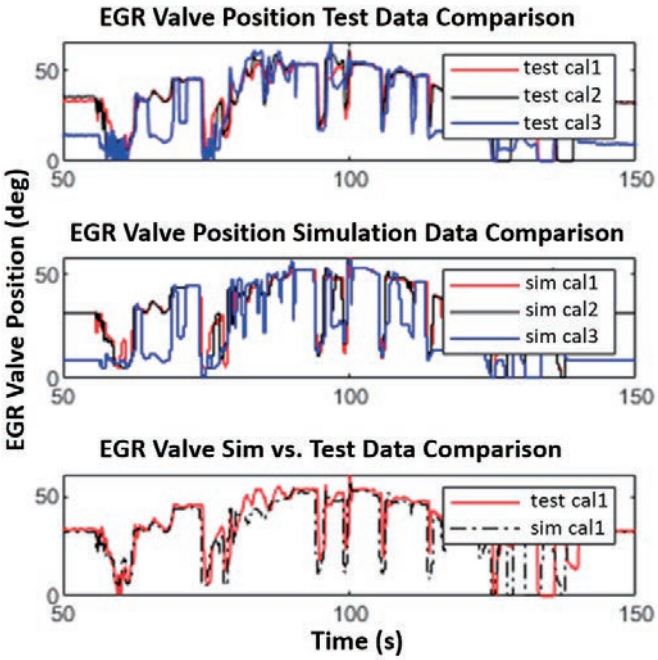


Figure 8　EGR Valve Position [deg] Comparisons [Zoom in]

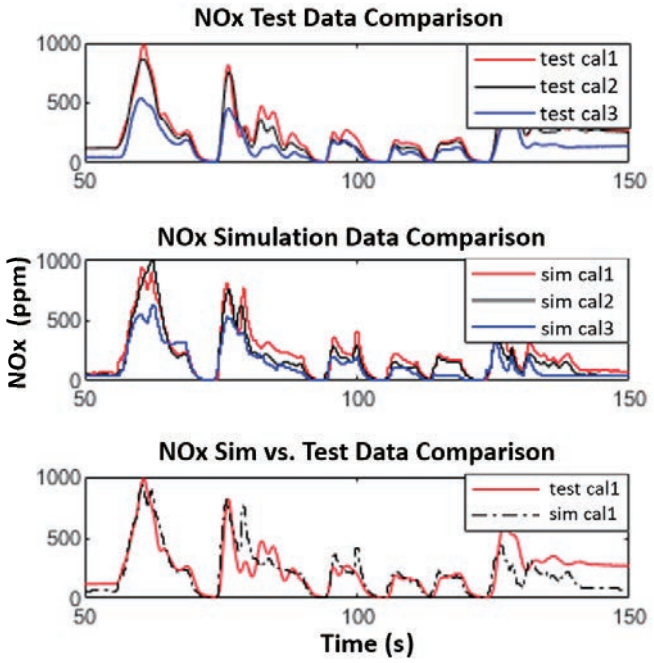


Figure 9　NOx [ppm] Comparisons [Zoom in]

Even though there are some aspects in the simulations to be further improved, but between simulation and testing results, air-path Figure 7 and NOx Figure 9 emission related changes and trends were well captured between different calibrations sets. Calibration and validation engineers could pick desired BSNOx and BSFC levels and generate early development calibration efficiently based on design targets using simulations, and further fine tune the calibrations for problematic regions with expert knowledge. This guided testing engineers with improved efficiency, and also could enable early calibration and validation at system design and development phases, where models could have been developed and re-purposed for calibration and validation purposes.

This article also demonstrated the proposed optimization solver was capable to solve big scale and highly non-linear problems and generated model-based calibrations for engine ECU target set point maps. The on-cloud simulation architecture made running large number of simulations in parallel feasible, and therefore, tremendous simulations can be finished in a reasonable amount of real-world time. By utilizing this architecture, we demonstrated the new simulation based approach to increase calibration development efficiency and showed good match between simulated results and testing results.

8　Conclusion

The authors proposed a fused optimization framework, called WOF-NSGA-II, by combining weighted optimization framework (WOF) and genetic algorithm NSGA-II. A model-in-loop simulation platform, including engine plant models and ECU control models, was utilized and coupled with WOF-NSGA-II solver. Simulations were running on the cloud in parallel and made reasonable simulation time achievable. The optimization solver or framework along with the MiL simulation platform proved to provide test-ready calibration maps and successfully generated BSFC vs BSNOx trade-offs for ISUZU 4HK1 diesel engine.

The future works will focus on further improve modeling methods and accuracy for ECU controls, engine plants and emissions models.

あとがき

本報告は内燃機関での事例でしたが、これらの最適化手法は対象が何であれ、入力と出力の関係がモデル化されたものであれば適用可能です。モデルベース開発は実機・実車をモデルに置き換えるのみならず、依然として人が行っているような最適設計或いは適合行為を、最適化手法を用いることで局所最適に陥ることなく最適度合いを高め、なおかつ本報告でも用いたクラウドを活用することで、最適解を見出す期間も短縮可能です。直近では内燃機関開発に用いる技術ですが、将来のカーボンニュートラル化など、他分野でも活かすことができるように今後も継続的な改善を進めていきます。

最後に例年と同じ言葉となりますが「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) Staff White Paper of California Air Resources Board: “California Air Resources Board Staff Current Assessment of the Technical Feasibility of Lower NOx Standards and Associated Test Procedures for 2022 and Subsequent Model Year Medium-Duty and Heavy-Duty Diesel Engines”, 2019-04-18, https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic//msprog/hdlownox/white_paper_04182019a.pdf

(2) Wei, Y., Uppalapati, L., and Vernham, B.: “Use of Predictive Engine and Emission Model for Diesel Engine Model Based Calibration,” SAE Technical Paper 2019-01-2227, 2019, https://doi.org/10.4271/2019-01-2227.

(3) Isermann, R. and Sequenz H.: “Model-based development of combustion-engine control and optimal calibration for driving cycles: general procedure and application,” Institute of Automatic Control and Mechatronics, Vol. 49, No. 11 (2016), p.633-640.

(4) Moiz, A., Pal, P., Probst, D., Pei, Y. et al.: “A Machine Learning-Genetic Algorithm (ML-GA) Approach for Rapid Optimization Using High-Performance Computing,” SAE International Journal of Commercial Vehicles, Vol.11, No.5(2018),p.291-306, https://doi.org/10.4271/2018-01-0190.

(5) Owoyele,O. and Pal,P.: “A Novel Active Optimization Approach for Rapid and Efficient Design Space Exploration Using Ensemble Machine Learning”, ASME Internal Combustion Engine Division, ICEF2019-7237.

(6) Li,M.,Li,G., and Azarm,S.: “A Kriging Metamodel Assisted Multi-Objective Genetic Algorithm for Design Optimization”, ASME Mechanical Design, 130(3): 031401, https://doi.org/10.1115/1.2829879

(7) Zhu, L., Wang, Y., Pal, A., and Zhu, G.: “Engine Calibration Using Global Optimization Methods with Customization,”SAE Technical Paper 2020-01-0270, 2020, https://doi.org/10.4271/2020-01-0270.

(8) Bendu, Harisankar, B. B. V. L. Deepak, and S. Murugan: “Multi-objective optimization of ethanol fuelled HCCI engine performance using hybrid GRNN-PSO.”, Applied Energy, Vol.187, (2017) p.601-611, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.072

(9) Zhang, Qiang, Ryan M. Ogren, and Song-Charng Kong: “A comparative study of biodiesel engine performance optimization using enhanced hybrid PSO-GA and basic GA.”, Applied energy, Vol.165, (2016) p.676-684. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.044

(10) Deb, Kalyanmoy, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, and T. A. M. T. Meyarivan: “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II.” ,IEEE transactions on evolutionary computation, Vol.6,No. 2 (2002), p.182-197. https://doi.org/10.1109/4235.996017

(11) Jensen, Mikkel T.: “Reducing the run-time complexity of multiobjective EAs: The NSGA-II and other algorithms.” IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.7, No.5 (2003), p.503-515. https://doi.org/10.1109/TEVC.2003.817234

(12) Antonio, Luis Miguel, and Carlos A. Coello Coello.: “Use of cooperative coevolution for solving large scale multiobjective optimization problems.” In 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation, IEEE, (2013), p. 2758-2765. https://doi.org/10.1109/CEC.2013.6557903

(13) Zamuda, Ales, Janez Brest, Borko Boskovic, and Viljem Zumer: “Large scale global optimization using differential evolution with self-adaptation and cooperative co-evolution.” In 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence), IEEE, (2008), p. 3718-3725.. https://doi.org/10.1109/CEC.2008.4631301

(14) Zille, Heiner, Hisao Ishibuchi, Sanaz Mostaghim, and Yusuke Nojima: “Weighted optimization framework for large-scale multi-objective optimization.” In Proceedings of the 2016 on Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion, (2016), p. 83-84.. https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2908961.2908979

(15) Zille, Heiner, Hisao Ishibuchi, Sanaz Mostaghim, and Yusuke Nojima: “A framework for large-scale multiobjective optimization based on problem transformation.” IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.22, No.2 (2017),p.260-275. https://doi.org/10.1109/TEVC.2017.27047

著　者


Yifan Wei


Yicheng Hu


Vaibhav Kadam


Waiting Li


Bruce Vernham


Steven Haines

論文・報告

米国における軽油の劣化と燃料タンク内部腐食について

Degradation of Diesel Fuel and Fuel Tank Internal Corrosion in the United States

渡邉　真未*　Mami Watanabe
沼澤　瑞樹*　Mizuki Numazawa
中野　大輔**　Daisuke Nakano

要　旨

米国向けの車両で、ラフアイドル・出力不足などの市場からの指摘が多くあった。燃料タンク内部に生じた錆が原因と推定され、さまざまな対策を実施してきた。しかし、対策後も同様な報告が続き、従前とは異なる原因の存在を疑った。また、米国以外ではこのような問題は発生していないため、別の観点から調査を実施した。本稿では、米国市場でのみ発生した原因及びその対策について報告する。

Abstract

There were many market problems with vehicles destined for the United States. It was presumed that the cause was rust generated inside the fuel tank, and various countermeasures were taken. However, similar complaints continued after the measures were taken, and it was suspected that the cause might be different from before. In addition, since similar problems have not occurred in markets other than the United States, we conducted investigation from a different viewpoint. This paper reports causes and countermeasures which occurred only in the U.S.A market.

1　はじめに

2007 年以降、米国向け車両にて走行中にエンジン警告灯が点灯し、ラフアイドル・出力不足に至るとの指摘が多発していた。車両を確認した結果、燃料タンク内部の上面及び底面に、錆の発生が確認されている（**図 1**）。加えて、燃料フィルタには発生した錆が異物として捕捉されていたことから、燃料フィルタの早期閉塞が燃料圧力低下の要因と推測された。一方、燃料タンク内部に発生した錆が原因とみられるフィルタ閉塞は、米国以外の仕向地では発生しておらず、指摘に至る期間も車両登録から 1 年以内と非常に短い期間となっていることも分かった。

当初、米国の燃料には分解系の軽油基材が多く含まれており、酸化安定性は著しく低いことから、使用の過程で酸化劣化し、生じた酸が燃料中に含まれることで、タンク内部で錆を発生させると推測されていた。そのため、燃料タンク材に加えて、タンク内で直接燃料と触れるパイプ及びセンサゲージなどの金属部品に対し、防錆性能に優れた材料に変更する対策を実施した。

対策により指摘は減少したものの、フィルタ閉塞が原因と思われるラフアイドル・出力不足が再び発生した。車両燃料フィルタを確認したところ、フィルタを閉塞させていた異物は錆とは異なり、外部由来と思われる赤褐色沈殿物で発生したことが分かった。一方、燃料タンクの内部上面には、外観が錆に類似した赤い付着物も確認された（**図 2**）。付着物は、擦ると簡単に拭き取ることができ、タンクの底面及び溶接部など一般に錆が発生しやすい部分には確認されていないことから、対策前とは異なる事象が発生していることが疑われた。加えて、燃料タンク底部に残存していた燃料には、滞留水及び沈殿物の含有も確認された（**図 3**）。

外部から混入したと思われる異物に対応するため、燃料フィルタのろ過性能を向上させる対策を実施し、ラフアイドル・出力不足などの発生を抑えることができた。しかし、燃料タンク内部上面全体に発生する錆のような付着物については、母材を浸食し、機能失陥につながる恐れがあるため、発生メカニズムの解明並びに対策材の開発を実施した。



図 1　対策前　燃料タンク内部（左；上面，右；底面）

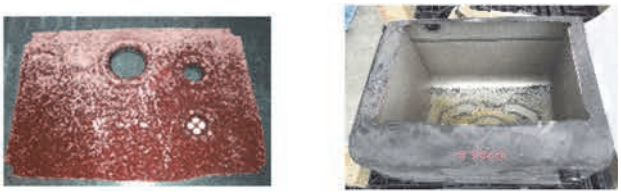


図 2　対策後　燃料タンク内部（左；上面，右；底面）

*車両審査実験第二部　　**シャシ設計第二部

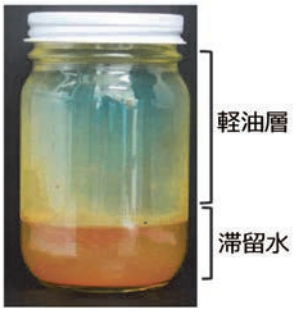


図３　タンク内部 燃料（滞留水＆沈殿物あり）

2　米国市場回収品の調査

市場より回収した燃料タンクの上面付着物（**図 4**）、及び燃料の分析を実施した。いずれも有機酸（ギ酸・酢酸）が検出され、当初原因と考えていた燃料よりも付着物から多くの有機酸を確認した（**図 5**）。米国燃料は、他の国々と比較しても酸化安定性が低い傾向にあり、劣化しやすい燃料であるため、燃料が酸化劣化した際に発生する有機酸が揮発し、タンク上部で結露、及び濃化したことで付着物が発生したのではないかと推測していた。今回の分析結果では、燃料中の有機酸量が著しく高くないことから、燃料の酸化劣化が原因ではなく、他の原因がある可能性が示唆された。そのため、米国市場の燃料環境について確認を実施した。

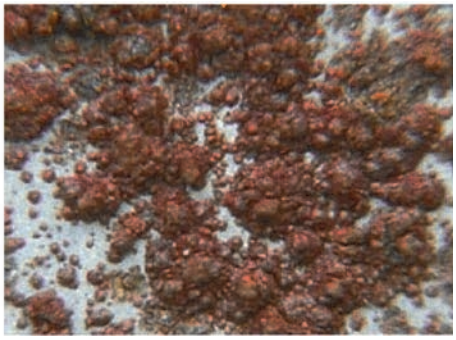


図４　燃料タンク内部上面　付着物拡大

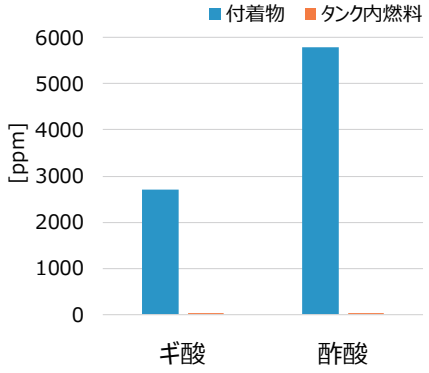


図５　有機酸分析結果

3　米国市場の燃料環境

3.1　硫黄量規制

米国市場では、2007 年に超低硫黄軽油（硫黄分 15 ppm 以下）が導入された。導入以前は、腐食などの指摘はなく、導入後に燃料を貯蔵する地下タンクの腐食が頻発していた（**図 6**）。また、いすゞの車両においても、同時期にフィルタ閉塞の指摘が発生しており、超低硫黄軽油導入による影響が示唆された。一方、日本国内においても超低硫黄軽油（硫黄分 10 ppm 以下）は導入されているが、同様な指摘が発生していないため、米国市場特有の原因もあることが示唆された。米国市場では、燃料はパイプラインで輸送されており、ガソリンなどの異なる油種がインターフェースを介して圧送している（**図 7**）。燃料以外にも水を圧送している場合もあり、これらがコンタミとして混入する可能性があることが分かった。



図６　米国市場 地下貯蔵燃料タンク内部 [1]



図７　燃料パイプライン

3.2　米国市場燃料環境確認（地下タンク状況）

2007 年に超低硫黄軽油が導入されてから頻発している米国市場の地下タンクの腐食について、EPA（米国環境保護局：Environmental Protection Agency）では全米 6 カ所の地下タンクの調査を実施している [2]。調査したすべての地下タンク内部には、**図 6** に示すような腐食の発生が確認されている。地下タンク燃料中の滞留水についても調査が実施され、多量の有機酸（特に酢酸）を検出した。また、滞留水からは、酢酸の発生源となる種々の酢酸菌も検出されている。米国ではガソリン中にエタノールが含まれるため、タンクローリーで輸送中などに軽油にエタノールが混入し、地下

タンク底部の滞留水に存在する酢酸菌の炭素源となり、酢酸を発生させるのではないかとの仮説が提起された。地下タンクの構造を確認すると、通気口が開放されており、外部から水及び砂塵などが浸入しやすいことが分かった。管理が悪い場合、水分が滞留しやすく、管理環境が悪いことも原因と考えられた。このような燃料が、車両に給油されれば、同様な腐食が地下タンクだけではなく、車両の燃料タンク内でも発生することが懸念された。一方、日本では、土壌汚染対策として、定期的に燃料タンクの耐圧試験が実施されている。タンクが腐食している場合、耐圧試験不適合になる可能性が高く、日本では定期的に清掃が実施され管理されている。そのため、米国市場のような問題は発生していないと考える。

4　実車回収品の燃料調査

フィルタ閉塞等が発生した地域の車両より回収した燃料について調査を実施した（**表 1**）。回収燃料中には、いずれも滞留水を確認し、エタノールについては検出されなかったが、有機酸（特に酢酸）を検出した。

また、微生物調査を実施したところ、いずれも微生物汚染で確認されるコロニーの発生（**図 8**）を確認し、EPA 調査同様に、酢酸菌の一つである *Gluconacetobacter liqufaciens*（**図 9**）が検出された。車両からも地下貯蔵タンク同様に酢酸菌が検出されており、酢酸菌よる腐食発生の可能性が示唆された。

表 1　車両情報

	車型	走行距離[km]
①	JALC4W164H	11,920
②	JALC4J160H	29,910

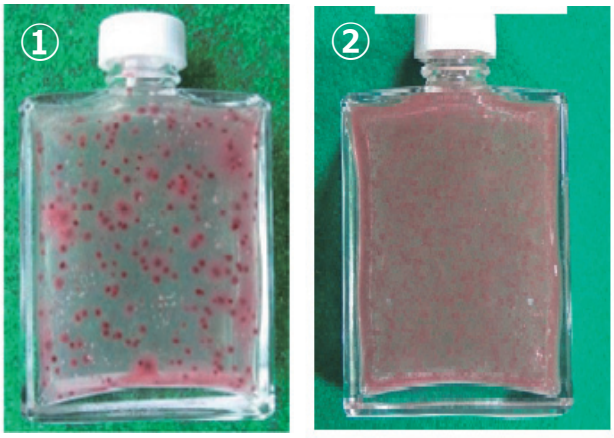


図 8　微生物調査（コロニー発生）

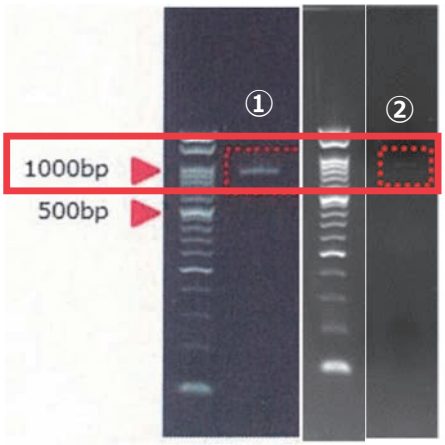


図 9　滞留水の微生物確認（DNA 解析）

5　腐食メカニズム

5.1　タンク内滞留水を用いた培養試験

車両回収品より採取した滞留水（酢酸菌含有）を使用して培養試験を実施した。酢酸菌とは、エタノールを酢酸に変換する細菌の総称で、世界中に広く分布する。細胞膜に埋め込まれた酵素（**図 10**）によってエタノールがアセトアルデヒドに酸化され、酢酸へと変換し、周辺環境を弱酸性とする。そのため、他の微生物が繁殖できない環境をつくると言われている。

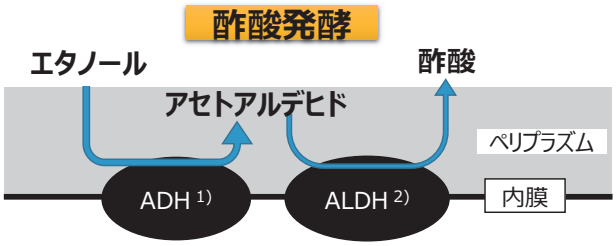


図 10　酢酸菌の膜結合型酵素が行う酸化発酵（酢酸発酵）

注 1) ADH（アルコール脱水素酵素：Alcohol dehydrogenase）
注 2) ALDH（アルデヒド脱水素酵素：Aldehyde dehydrogenase）

酢酸菌は、地下貯蔵タンク内部に混入したエタノールを栄養源としていると仮説が立てられていたが、実車回収品からはエタノールは検出されず、常にエタノールが存在していることは考えられないことから、軽油成分も代謝している可能性が示唆された。

そこで、培養液はエタノール及び軽油を炭素源として、試験を実施した。培養液には、タンクより回収した滞留水を加え、室温にて 7 日間放置後の培養液の観察と酢酸量の測定を行った。試験前の培養液は透明

（図 11）であるが、試験後は濁り（図 12）を観察した。試験後の酢酸量を確認すると、いずれの炭素源でも酢酸を検出した（図 13）。よって、軽油成分も炭素源として寄与している可能性が示唆された。

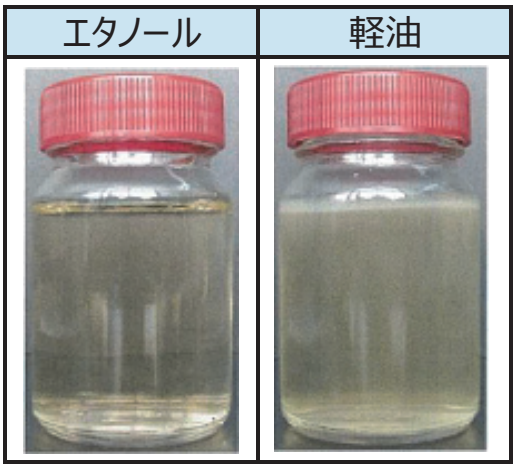


図 11　試験前外観（透明）

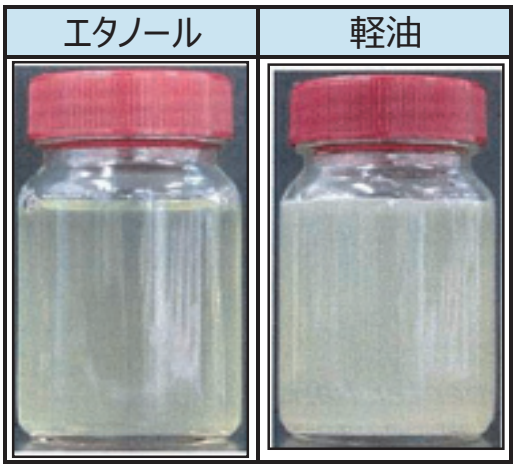


図 12　試験後外観（濁りが発生）

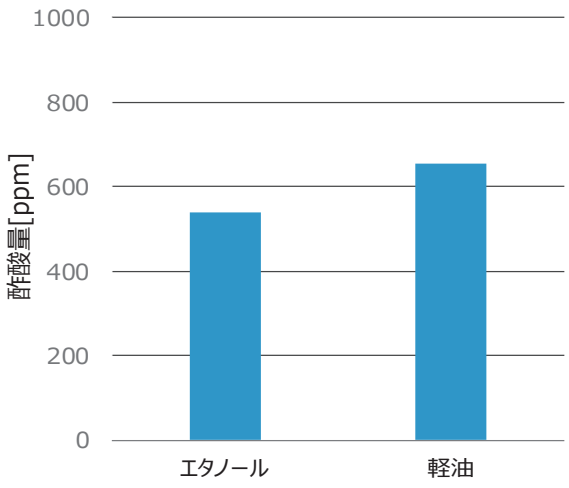


図 13　試験後の酢酸量

5.2　腐食の再現試験

酢酸菌による燃料タンク内部の腐食メカニズムを確認するため、腐食再現試験を実施した。試験は、エタノールを添加した腐食液に、購入した酢酸菌を使用した。メカニズム検証しやすくする目的で、軟鋼板と比較のためにステンレス鋼板を使用して、燃料タンクの形状を模擬したカップで実施した。カップに腐食液を充填し、同材カップにて図 14 に示すように蓋をし、車両を模擬して結露を促進させるために、カップ上面には保冷剤を置いて試験を実施した。

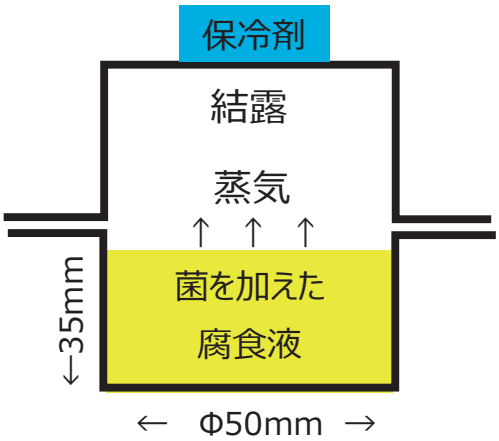


図 14　再現試験方法

7 日間放置後の各カップ材の外観を、図 15 に示す。軟鋼板は、米国市場で発生した燃料タンク同様に、カップ上面に腐食の発生を確認した。腐食液が入っていた部分には発生しておらず、腐食液より上部で発生を確認した。また、培養液の性状を分析すると、酢酸が増加しており、酢酸菌による増加を確認した（図 16）。調査の結果、米国市場同様に、酢酸菌によるタンク内部の腐食を再現することができた。しかし、通常の鋼板では、これ以上防ぐことができないため、更なる耐食性の高い開発材の検討が実施された。



図 15　再現試験後のカップ外観

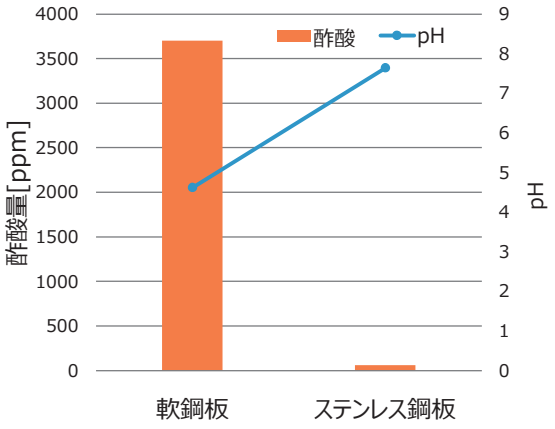


図 16　試験後培養液 分析結果

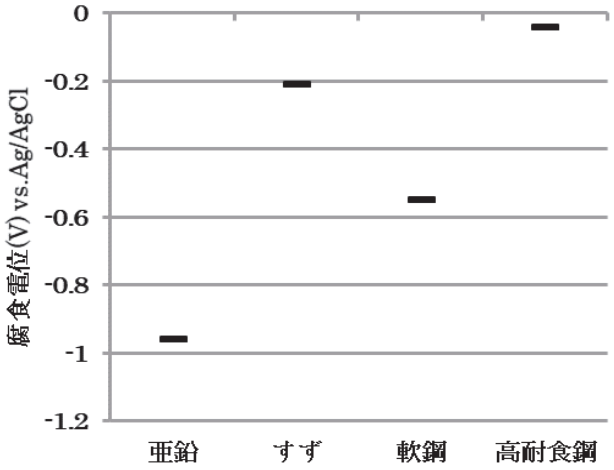


図 17　1000 ppm 酢酸水溶液中の電位測定

6　対策材について

6.1　対策材の検討

前章の試験結果から、低硫黄化により軽油中で酢酸菌が増殖し、酢酸が多く生成されることによって、燃料タンク内に腐食が発生することが明らかとなった。この対策として、より酢酸に強い対策材を検討した。

また、耐食性だけではなく、加工性及び成形性等も現行材料と同程度になるように検討した。

現行の燃料タンクで使用されている材質は、亜鉛－すずめっきと軟鋼の組み合わせである。この材料は、亜鉛の犠牲防食効果と、すずのバリア作用の合わせで高い耐食性が発揮される。しかし、米国での燃料タンクのような厳しい環境では、電位の低い亜鉛が抜け、すずのバリア作用も効果が薄くなってしまう。また、軟鋼と比較して、すずの方が腐食電位が高いため、鉄素地が露出した場合に軟鋼が先に腐食してしまい、赤錆が発生する。

そのため、対策材では、すずに犠牲防食効果持たせ、母材にすずより腐食電位の高い鋼板を使用することを検討した。

6.2　酢酸水溶液中での金属材料の腐食電位

各金属についての腐食電位を測定するため、試験を実施した。試験方法としては、燃料タンク腐食時を模擬するため、1000 ppm 酢酸水溶液を作製し、Ag/AgCl 電極を参照電極として室温で 24 時間電位測定を実施した。結果としては**図 17** に示すとおり、亜鉛＜軟鋼＜すず＜高耐食鋼となった。

このことから開発材では、亜鉛－すずめっき層から脱亜鉛が起きても、すずにより犠牲防食されることが期待されることが分かった。また、すずは元々耐食性に優れた金属であるため、犠牲防食効果が長続きし、母材の鋼鈑の腐食を抑制することが期待される。

6.3　金属材料の腐食試験

次に対策材を用いて腐食試験を実施した。冷延鋼板と対策材（高耐食性鋼＋亜鉛－すずめっき）のカップ試験片を作製し、腐食液を充填させ、室温で 750 時間静置した。また、カップ上面の結露を促進させるために、保冷剤を置いて試験を実施した。

750 時間後の各材料のカップ上面の外観を、**図 18** に示す。冷延鋼板のカップ上面では、赤錆の発生が認められたのに対し、対策材では赤錆の発生は、認められなかった。この結果から、めっき層による犠牲防食の効果があったと考えられる。これらの結果より、対策材は酢酸の腐食に対して、有効であるということが確認できた。

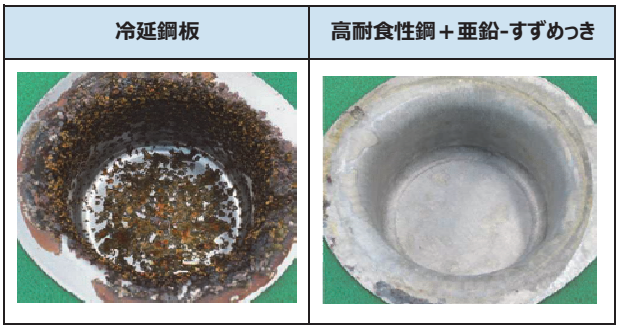


図 18　封入試験 750 時間（室温）でのアッパー側のカップ状態

7　おわりに

米国市場に限定して発生していた、車両燃料タンク内部の錆並びに付着物の発生要因は、当初、推測していた燃料の酸化劣化で生じる有機酸による腐食に加え、燃料タンク内に混入した酢酸菌の代謝により生成した酢酸による腐食であると判明した。

米国市場のみ発生した要因としては、① 2007 年以降に導入された超低硫黄軽油によって、以前は燃料中の硫黄分が、微生物の抑制剤として影響を与えていた可能性があること、②燃料貯蔵タンクの管理･清掃が不足しており、微生物の成長を増大させたことがあげられる。このような燃料が車両の燃料タンクに給油されたことで、米国市場のみで発生したと考える。

東南アジアなどでは、酸化劣化しやすいバイオ燃料（BDF）が使用されており、バイオ燃料の混合濃度も年々増加傾向である。近年では、低硫黄化軽油も導入されてきており、米国市場同様に燃料管理が悪い場合は、同様な問題が発生する懸念がある。そのような環境に対し、今回検討した対策材を使用することで、安定した走行環境を維持できると考える。また、対策材だけではなく、このような地域において燃料管理状態はとても重要であり、注意を行う必要がある。

本研究を実施するに当たり、日本製鉄㈱水口俊則様に多大なるご協力並びにご助言をいただいたことからここに謝意を表す。

本文献は公益社団法人腐食防食学会主催の講演会「第 65 回材料と環境討論会」及び「第 66 回材料と環境討論会」予稿集に掲載された内容を加筆修正の上報告するものである。

参考文献

(1) Tanknology : Tank Trouble Tuesday, September 4, 2018 , https://www.tanknology.com/tank-trouble-Tuesdays

(2) Battelle Memorial Institute:“Corrosion in systems storing and dispensing Ultra low sulfur diesel (ULSD), hypothesis investigation.”, p.14-19, p.32-33(2012). https://clean-diesel.org/pdf/ULSDStoringSystemCorrosion.pdf

(3) 水口 , 橋本 , 後藤 : 北米における軽油の劣化と金属の腐食挙動について , 第 65 回材料と環境討論会講演集 (2018),p.211-214

(4) 水口 , 橋本 , 後藤 , 布田, 滝川：北米の軽油スラッジから単離した酢酸菌の性状と鋼板の防食方法について, 第 66 回材料と環境討論会講演集 (2019), p.353-356

著　者



渡邉　真未



沼澤　瑞樹



中野　大輔

◇いすゞ歴史の一こま



横浜市内を走るいすゞ花電車（1950 年代前半）

論文・報告

コネクテッド・データを活用した実路走行大型車 SCR の水熱劣化度推定

Estimation of Hydrothermal Aging of SCR Catalysts for Heavy-Duty Vehicles Using Connected Data

本谷　綾子* Ayako Honya　岡　耕平* Kohei Oka　柴田　慶子** Keiko Shibata　榎　和広* Kazuhiro Enoki　石川　直也* Naoya Ishikawa

要　旨

ディーゼル大型車両 4 台から使用過程 SCR を回収し、その NOx 浄化性能を試験評価した。また、SCR の主な劣化要因である水熱劣化現象に着目し、車両のコネクテッド・データから算出可能な水熱劣化指数を考案して、約 14,000 台の SCR 水熱劣化進行度を推定した。同時に、水熱劣化の進行要因を分析し、新たな知見を見出した。

Abstract

We evaluated NOx purification performance of in-service SCR catalysts collected from four diesel heavy-duty vehicles. In addition, we devised a new SCR hydrothermal aging index that can be calculated from connected data of vehicles. And by using the index, we estimated the progress of SCR hydrothermal aging for about 14,000 user vehicles.

1　はじめに

近年、世界各国において実使用環境での自動車排出ガス低減への関心が高まり、実走行により近いディーゼル排出ガス評価試験サイクルが導入された [(1)]。同時に、使用過程における排出ガス浄化性能の維持も求められており、日本では低排出ガス車認定制度に耐久要件を課している [(2)(3)]。このため、実使用条件での排出ガス後処理装置の劣化進行について理解を深めることは、排出ガス低減を考える上で極めて重要である。

尿素 SCR（選択的触媒還元：Selective Catalytic Reduction）は、ディーゼル排出ガス中の NOx（窒素酸化物）を浄化する技術である。SCR 触媒の主な劣化要因は、水蒸気を含んだ高温排出ガスに曝露することによる水熱劣化と考えられている。このため、SCR の水熱劣化現象に関して世界で研究が進んでおり [(4)(5)]、著者らも水熱劣化による触媒性能低下を再現した水熱劣化モデルを構築し、前報 [(6)] において報告した。触媒の高温排出ガスへの曝露を避けることは、SCR 触媒に付着した炭化水素の除去に昇温が必要 [(7)] なことなどから事実上困難である。このため、あらゆる車両で水熱劣化による NOx 浄化性能低下が懸念されることから、市場全体を対象として使用過程 SCR の水熱劣化の進行度合いを調べる必要がある。

そこで、著者らは前報 [(6)] の水熱劣化モデルをもとに SCR 水熱劣化度の評価指標となる、「水熱劣化指数」を考案し、その算出にコネクテッド・データを用いることで、PPNLT（ポスト・ポスト新長期排出ガス規制：Post-Post New Long-Term Emissions Standard）適合ディーゼル大型車約 14,000 台の SCR 水熱劣化行度を推定した。また、算出した水熱劣化指数とコネクテッド・データを組合わせて分析することで、調査対象車両群の SCR 水熱劣化要因を推定した。本稿におけるコネクテッド・データとは、ネットワーク接続された車両から収集されたデータを指す。いすゞでは、商用テレマティクスサービスの“MIMAMORI”、及び“PREISM”において、ユーザー車両からコネクテッド・データを収集しており [(8)]、本研究ではこの収集データを使用した。

2　実験及び分析手法

2.1 SCR 性能評価試験

2.1.1　性能評価対象車両

実使用条件で用いられた SCR の触媒性能を評価するために、ユーザー車両 A、B、C、及び D の計 4 台から SCR を回収した。**表 1** にユーザー車両の諸元を、**図 1** にユーザー車両の排出ガス後処理システムの模式図を示す。また、**表 2** に各車両の SCR 回収時における総走行距離と平均車速を示す。**図 1** に示すとおり、この排出ガス後処理システムは、上流側に DOC（酸化触媒：Diesel Oxidation Catalyst）と CSF（キャタライズド・スート・フィルタ：Catalyzed Soot Filter）から成る DPD（排出ガス浄化装置：Diesel Particulate Defuser）を、下流側に SCR 触媒及び ASC（アンモニアスリップ触媒：Ammonia Slip Catalyst）から成る SCR をそれぞれ配置した構成となっている。

*㈱いすゞ中央研究所　　**法規・認証部

表 1　調査対象車両の諸元

Area	Japan
Engine type	Heavy-duty diesel engine 9.8 L
Emission regulation	PPNLT
SCR catalyst type	Cu-SSZ-13



図 1　排出ガス後処理システムの概要図

表 2　調査対象車両の総走行距離及び平均車速

	Vehicle			
	A	B	C	D
Mileage [×10^4 km]	24.1	24.3	43.4	43.8
Average velocity [km/h]	54.4	34.2	57.6	59.3

2.1.2 性能評価試験条件

回収した計 4 台分の SCR 触媒を、上流端面中心から 130 mm 下流にあたる位置で径 20 mm ×長さ 20 mm となるようそれぞれ切り出し、性能評価用試料とした。端面から一定の距離をとったのは、上流端面は局所的な被毒の可能性 [4] があり、触媒全体の性能の代表とするには下流部のほうがよりふさわしいと考えたためである。ただし、本論文中では割愛するが、端面を含む上流部についても触媒性能評価を行い、4 台とも性能低下はみられなかった。

作製した試料の性能評価には、触媒評価システム CATA5000（ベスト測器社製）を使用した。**表 3** に性能評価条件を示す。150 ℃で NH_3 を流通させ、触媒が飽和吸着に達したことを確認後、600 ℃までステップ昇温し触媒性能評価を行った。評価点は、各温度ステップにおいて触媒通過後のガス濃度がそれぞれ定常状態に到達した点とした。ガス成分は FT-IR（フーリエ変換赤外分光法：Fourier Transform Infrared Spectroscopy）により計測した。

表 3　SCR 性能評価条件

Test condition	NH_3+NO+O_2
Temperature [degC]	150 ⇒ 600
SV [h^{-1}]	60,000
NH_3 [ppm]	300
NO [ppm]	300
O_2 [%]	8
H_2O [%]	10
N_2	bal.

2.2 SCR 性能シミュレーション手法

前報 [6] で構築した SCR 水熱劣化モデルに、ユーザー車両 4 台それぞれの回収 SCR 入口の被熱温度、及び被熱時間履歴データを入力し、回収 SCR の NOx 浄化性能シミュレーションを行った。入力データは、車両の使用開始から SCR を回収するまでの期間に 0.5 s 間隔で積算し収集した。

2.3 SCR の水熱劣化度評価方法

2.3.1 水熱劣化指数の定義

本研究では、SCR の水熱劣化進行度の評価指標として、前報 [6] の SCR 水熱劣化モデルをもとに、次に述べる「水熱劣化指数」を定義した。

水熱劣化モデルにおいて、被熱温度 T_i における水熱劣化反応の速度定数 k_i は Arrhenius 型を仮定し、式 (1) で表現した。また、触媒劣化後の NH_3 吸着容量 Ω は式 (2) として記述した。

$$k_i = A \times \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right) \tag{1}$$

$$\Omega = \Omega_0 \times \exp\left(-\sum_i k_i t_i\right) \tag{2}$$

$$\sum_i k_i t_i = \sum_i \left\{A \times \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right) \times t_i\right\} \tag{3}$$

k_i：温度 T_i における水熱劣化反応の反応速度定数 , T_i：SCR の被熱温度 , A：水熱劣化反応の頻度因子 , E：水熱劣化反応の活性化エネルギー , R：気体定数 , Ω：触媒劣化後の NH_3 吸着容量 , Ω_0：未劣化 SCR の NH_3 吸着容量 , t_i：温度 T_i 条件下での被熱時間

式 (3) で表される $\Sigma\, k_i t_i$ は、SCR 水熱劣化の進行度を表す指標ととらえることができる。この式中における変数は、被熱温度 T_i と被熱時間 t_i のみであり、ある SCR の $\Sigma\, k_i t_i$ は、その SCR の被熱温度、及び被熱時間がわかれば導出できる。

本研究では、式 (4) に示すように、評価対象 SCR の $\Sigma\, k_i t_i$ を、製品開発段階における SCR 性能下限の目安サンプル（以下、「劣化基準品」と称す）の $\Sigma\, k_i t_i$（以下、式中では “α” と称す）で除した値を「水熱劣化指数（Aging index）」と定義した。水熱劣化指数は 0 以上の実数値であり、未使用 SCR の水熱負荷指数は 0、劣化基準品では 1 となる。値が大きいほど、SCR がより大きな水熱負荷を受けたことを意味する。

$$\text{Aging index} = \frac{\sum_i k_i t_i}{\alpha} \tag{4}$$

2.3.2 水熱劣化指数の算出手順

2.3.1 で定義した式 (4) に、各ユーザー車両それぞれの SCR 入口の被熱温度、及び被熱時間履歴データを入力し、水熱劣化指数を算出した。入力データは、**2.2** と同様にテレマティクス端末を介して収集したコネクテッド・データを使用した。

水熱劣化指数の算出は、**2.1 節**の SCR 性能評価を行った車両 4 台に加え、これら 4 台と車両諸元が同一な約 14,000 台のユーザー車両（以下、「ユーザー車両群」と称す）についても行った。なお、本研究は通常使用過程で進行する SCR 水熱劣化の分析を目的としており、分析対象車両については選抜を実施した [9]。

3　結果及び考察

3.1 実使用条件で用いられた SCR の水熱劣化度推定

3.1.1　回収 SCR の NOx 浄化性能評価

まず、ユーザー車両 4 台それぞれから回収した SCR の NOx 浄化性能評価を行った。**図 2** にその結果を示す。“Fresh” は未使用品、“Aged” は劣化基準品を表す。性能評価基準は、Standard SCR 条件、反応温度 250 ℃とした。4 台いずれの SCR とも、その NOx 浄化率は劣化基準品以上であり、十分な NOx 浄化性能を維持していることが示された。また、本論文中では割愛するが、**表 3** に示した反応温度 150-600 ℃の範囲で NOx 浄化性能を評価し、4 台とも反応温度 250 ℃以外の範囲においても劣化基準品以上の NOx 浄化性能であることを確認した。

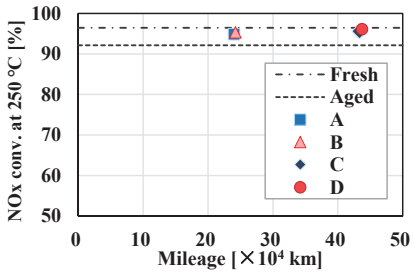


図 2　ユーザー車両 4 台の NOx 浄化性能評価結果

次に、**図 3** に NOx 浄化性能のシミュレーション結果を実測結果と比較して示す。横軸は水熱劣化指数とした。**表 4** には、各回収 SCR の水熱劣化指数の値を示す。**図 3** のシミュレーション結果の実線から、水熱劣化指数の値が大きくなるにつれ NOx 浄化率のシミュレーション値が減少するのがわかる。また、実測値とシミュレーション値を比較すると、4 台いずれの車両についてもよく一致したことから、前報 [6] の水熱劣化モデルの妥当性を検証できた。また、**表 4** によると、4 台のうち水熱劣化指数が最も高かったのは車両 A であるが、その値は 0.024 と低く、劣化基準品（水熱劣化指数 =1）を大幅に下回った。このことから、4 台いずれの車両とも、SCR が受けた水熱負荷は劣化基準品よりはるかに小さかったと考えられる。

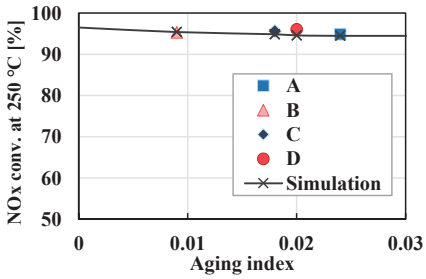


図 3　NOx 浄化率の予測値と実測値の比較

表 4　ユーザー車両 4 台の水熱劣化指数

	A	B	C	D
Mileage [×10⁴ km]	24.1	24.3	43.4	43.8
Aging index	0.024	0.009	0.018	0.020

3.1.2　ユーザー車両群の水熱劣化度推定

3.1.1 項の結果から、水熱劣化指数は実使用条件における SCR の水熱劣化度推定に活用できると判断した。そこで、ユーザー車両群の各車両（約 14,000 台）について水熱劣化指数を算出し、劣化基準品と比較した。**図 4** に、ユーザー車両群の各車両の水熱劣化指数をプロットして示す。横軸は総走行距離とし、**3.1.1 項**で SCR の NOx 浄化性能を評価した 4 台についても同時に示した。この図から、ユーザー車両群の総走行距離の伸びにともない水熱劣化指数が高くなる傾向が確認された。しかし、いずれの車両もその水熱劣化指数は劣化基準品の水熱劣化指数である 1 を大幅に下回ったことから、調査時点においてユーザー車両群の各車両の SCR が受けた水熱負荷は非常に小さく、十分な NOx 浄化性能を維持していたと考えられる。

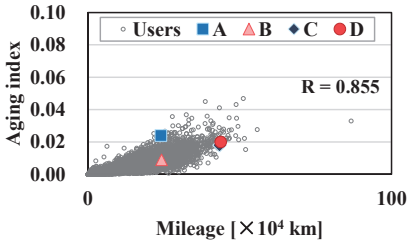


図 4　ユーザー車両群の水熱劣化指数と総走行距離

3.2 実使用条件における SCR 水熱劣化要因の推定

3.2.1　SCR の被熱履歴と水熱劣化指数の関係

3.1.2 項において、ユーザー車両群の SCR はそれぞれ十分な NOx 浄化性能を維持していたと推定された。しかし、総走行距離の伸びにともない水熱劣化指数が積算されており、緩やかではあるが水熱劣化が進行していたと考えられる。この水熱劣化進行の要因を特定できれば、実使用条件において SCR をより高性能なまま維持する制御の開発が期待できる。そこで、本項では水熱劣化指数と SCR の被熱温度の関係を分析し、水熱劣化進行因子の推定を行った。なお、本項の分析に使用した各種データは、MIMAMORI にて収集したコネクテッド･データを使用した。

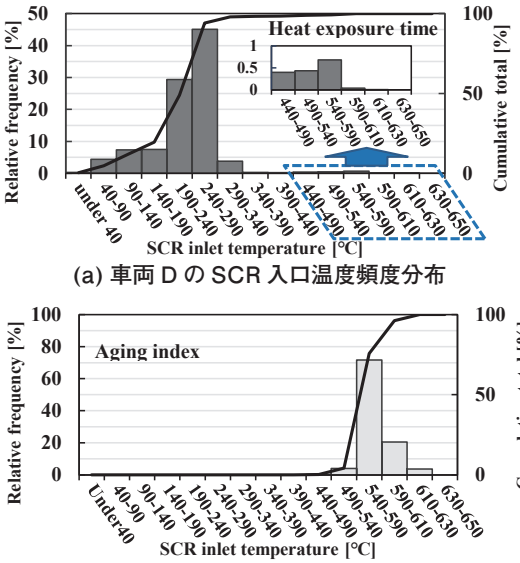
まず、ユーザー車両の SCR 被熱温度及びその被熱時間の代表例として、**図 5(a)** に車両 D の SCR 入口温度ごとの被熱時間度数分布を示す。この度数分布の分布形状は、240-290 ℃を中心とした低温かつ高頻度の主分布と、540-590 ℃を中心とした高温かつ

低頻度の副分布から成る二峰性分布であった。また、630 ℃以上の被熱履歴はみられなかった。本報では割愛するが、車両 A、B、及び C においても車両 D と類似した二峰性分布を示し、650 ℃以上の被熱履歴はみられなかった。低温が中心の主分布については、その温度から通常走行中の排出ガス由来と考えられる。一方で、540-590 ℃を中心とした高温の副分布は、通常走行とは異なる何らかの制御に由来すると推測された。一般的に SCR 入口の排出ガス温度が昇温する原因としては、DPD のアクティブ再生が挙げられる。アクティブ再生とは、排気管中に燃料を導入し、DOC で燃料を燃焼させて排出ガスを昇温することにより、CSF 内部に溜まったススを燃焼させる制御動作である。先行研究 [5] によると、アクティブ再生中の CSF 出口温度は約 600 ℃まで到達する。**図 1** に示したように、CSF は SCR の上流に位置することから、CSF 出口と SCR 入口はほぼ同義とみなせる。よって、540-590 ℃を中心とした副分布は、DPD アクティブ再生制御に由来すると考えられる。

続いて、SCR の被熱履歴において、水熱劣化指数の積算に最も寄与した温度領域を明らかにするために、横軸を SCR 入口温度として車両 D の水熱劣化指数の度数分布を作成し、**図 5(b)** に示した。なお、車両間の比較を容易にするために水熱劣化指数は正規化した。

図 5(b) の水熱劣化指数の度数分布形状は、**図 5(a)** の被熱時間の場合とは異なり、540-590 ℃を中心とした単峰であった。ただし、分布の広がる温度帯は、**図 5(a)** における副分布とほぼ一致していた。前述したように、540-590 ℃前後の被熱履歴はアクティブ再生に由来すると考えられる。このことから、車両 D の SCR 水熱劣化進行に対する DPD アクティブ再生の関与が示唆された。

被熱時間の主分布である低温の被熱履歴が水熱劣化指数の積算に寄与しなかった理由としては、SCR の耐熱性が挙げられる。前報 [6] によると、550 ℃で 100 h 水熱処理した SCR は、Fresh と同等の NOx 浄化性能を維持していた。水熱劣化モデル、及び水熱劣化指数は、この 550 ℃以下の水熱負荷に対する SCR の耐熱性が反映されている。そのため、車両 D の低温の被熱はその時間頻度が高いにもかかわらず、水熱劣化指数の積算に寄与しなかったと考えられる。また、前報において 650 ℃で 100 h 水熱処理した SCR は NOx 浄化性能の低下がごくわずかであったが、水熱処理温度が 750 ℃の場合は急低下したことが報告されている。43.8 万 km 走行した車両 D の SCR 性能が劣化基準品以上の水準を維持していたのは、SCR の被熱温度が 650 ℃未満に抑えられ、水熱劣化の進行が非常に緩やかになる環境が保たれていたためと考えられる。



(a) 車両 D の SCR 入口温度頻度分布

(b) 車両 D における水熱劣化指数の積算と被熱温度の関係

図 5　車両 D の SCR 入口温度と水熱劣化指数の関係

車両 D 以外についても SCR の被熱温度と水熱劣化指数の関係を調べるために、車両 A、B、C、D、及びユーザー車両群の水熱劣化指数について、横軸を SCR 入口温度とした累積相対度数曲線を作成し、**図 6** に示した。この図における車両 D の曲線は、**図 5(b)** の黒い実線と同一である。また、ユーザー車両群については全体の平均値を示した。**図 6** から、車両 A、B、C、及びユーザー車両群平均のいずれも、車両 D と同様に 440-630 ℃の高温の被熱履歴により水熱劣化指数が積算されたことが示された。ただし、**表 4** 中で最も水熱劣化指数の高かった車両 A はほかの車両よりも 610-630 ℃の頻度が高く、アクティブ再生中の SCR 被熱温度が比較的高温の傾向にあったことが示唆された。

本節の考察結果から、本研究の調査対象車両群における SCR 水熱劣化進行因子のひとつは DPD アクティブ再生であると考えられる。

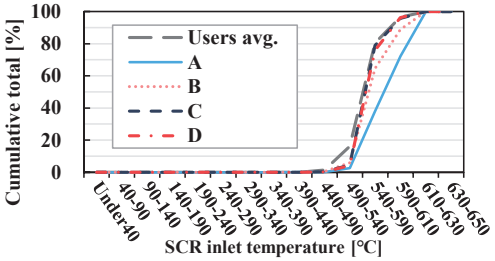


図 6　各車両の水熱劣化指数と SCR 入口温度の関係

3.2.2　DPD 再生と SCR 水熱劣化指数の相関関係

SCR 水熱劣化指数と DPD アクティブ再生の関係をより明らかにするために、アクティブ再生の実施回数（以下、「総再生回数」と称す）と、水熱劣化指数の相関について分析した。**図 7(a)** に、総再生回数を横軸として、ユーザー車両群の水熱劣化指数をプロットし

て示す。水熱劣化指数と総再生回数の相関係数 R は 0.713 で、正の相関が認められた。しかし、**図 4** の総走行距離と水熱劣化指数の場合は R=0.855 であり、これと比べると相関が弱いと言える。そこで、DPD アクティブ再生制御には複数のパターンがあることに着目し、制御パターンごとに水熱劣化指数との相関を分析することにした。ここで、本研究における調査対象車種のアクティブ再生制御パターンについて述べる。この車種では、「自動再生（Automatic regeneration）」と「手動再生（Manual regeneration）」という制御パターンが設定されている。自動再生は、走行中に制御プログラムにより自動でアクティブ再生が開始される。一方の手動再生は、停車中にユーザーの手動操作によりアクティブ再生が開始される。なお、総再生回数は自動再生及び手動再生の実施回数の総計である。**図 7(b)** は横軸を自動再生回数とし、**図 7(c)** では横軸を手動再生回数として、各ユーザー車両の水熱劣化指数をそれぞれプロットして示す。**図 7(b)** の自動再生回数と水熱劣化指数の相関係数 R は 0.902 と高く、両者には強い相関関係が認められた。一方、**図 7(c)** の手動再生回数と水熱劣化指数の相関係数 R は 0.130 と非常に低く、ほぼ相関がないことが示された。

これらの結果から、2 種類の DPD アクティブ再生制御パターンのうち、自動再生のみが SCR 水熱劣化の進行因子として作用したと考えられる。

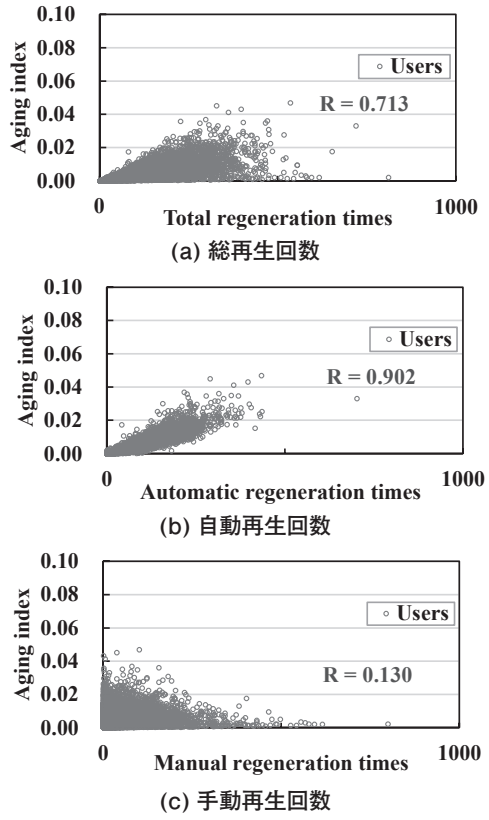


図 7　水熱劣化指数と再生回数の相関関係

3.2.3　再生制御パターンによる SCR 被熱温度の違い

式 (3) に示したとおり、水熱劣化指数は SCR 被熱温度及び被熱時間に左右される。特に SCR 被熱温度は式 (3) において指数関数の指数部分に含まれることから、より影響が大きいと考えられる。このため、再生制御パターンごとに水熱劣化指数との相関関係が大きく異なったのは、自動再生と手動再生それぞれの再生制御実行時の SCR 被熱温度に差があったため、という仮説を立てた。この仮説を検証するために、ユーザー車両群から自動再生のみ、あるいは手動再生のみを実施していた車両を抽出し、自動再生のみを実施した車両群を“Group1”、手動再生のみの車両群を“Group2”とした。**図 8(a)** に、横軸を再生回数として、Group1、及び Group2 各車両の水熱劣化指数をプロットして示す。自動再生のみを実施した Group1 は、再生回数の増加に伴い水熱劣化指数も高くなるのに対し、手動再生のみの Group2 では、再生回数が増加しても水熱劣化指数はほぼ 0 のまま横ばいであった。Group2 の水熱劣化指数は非常に低い値ではあったが、SCR の被熱温度と水熱劣化指数の積算の関係を調べるために、それぞれの Group ごとに**図 6** と同様の水熱劣化指数の相対度数分布を作成し、**図 8(b)** に示した。自動再生のみの Group1 では、540-590 ℃の被熱が水熱劣化指数の積算に最も寄与したのに対し、手動再生のみの Group2 の最頻値は 490-540 ℃で、540 ℃以上の頻度が非常に低かった。**3.2.1 項**で述べたように、水熱劣化モデルには 550 ℃以下の水熱負荷に対する SCR の耐熱性が反映されている。このために、最頻値が 490-540 ℃の Group2 では、各車両の水熱劣化指数が極めて低く抑えられたと言える。

自動再生と手動再生で SCR 被熱温度に差が生じた理由としては、再生制御中の排出ガス流量の差が考

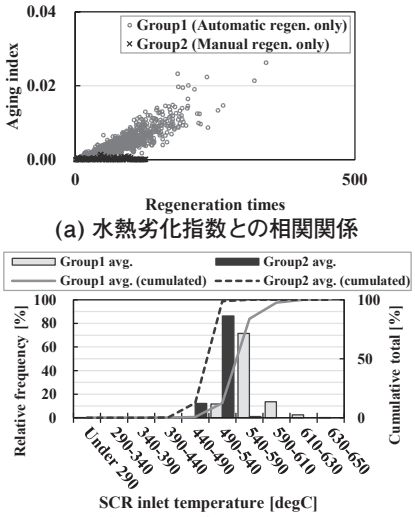


図 8　再生制御パターンの違いの影響

えられる。一般的に、車両走行中は停車中よりもガス流量が増加する。**3.2.2 項**で述べたように、自動再生は車両走行中、手動再生は車両停車中にそれぞれ実行される。このため、自動再生中は手動再生中よりもガス流量が多く、CSF 内部で高温化したガスがその温度を保ったまま SCR に到達しやすい環境が形成されていたと考えられる。

本節の考察結果から、自動再生と手動再生では再生実行中の SCR 被熱温度に差があり、自動再生中のほうがより高温となる傾向にあったことが示唆された。

4　おわりに

本研究では、実使用条件で用いられた車両 4 台の SCR 触媒性能評価、及び SCR 水熱劣化モデルによる性能シミュレーションと、ユーザー車両約 14,000 台の SCR 水熱劣化度の分析を行った。更に、調査対象車両群の SCR 水熱劣化進行因子を推定した。以下に得られた結果をまとめて示す。

1. ユーザー車両 4 台それぞれから回収した SCR は、いずれも劣化基準品以上の NOx 浄化性能を示した。また、水熱劣化モデルを用いて回収 SCR の性能シミュレーションを行い、実測値とシミュレーション値がよく一致したことから、モデルの妥当性を検証できた。
2. ユーザー車両群の各車両（約 14,000 台）それぞれの水熱劣化指数を算出し、SCR 水熱劣化の進行度を分析した。調査時点において、いずれの車両の水熱劣化指数も劣化基準品の 1/10 未満と小さく、それぞれの SCR は劣化基準品以上の NOx 浄化性能を維持していたと考えられる。
3. 今回調査対象としたユーザー車両群では、DPD アクティブ再生制御パターンの一種である自動再生が SCR 水熱劣化進行因子として作用したと考えられる。一方で、手動再生についてはその再生実施回数と水熱劣化指数の間にほとんど相関がみられなかった。これは、手動再生がガス流量の少ない停車中に実施されるために、再生実行中の SCR 被熱温度が水熱劣化のほとんど進行しない 550 ℃以下となりやすいことに起因すると考えられる。

データ活用による実使用条件での触媒劣化の分析は、排出ガス後処理システム開発手法のひとつになり得ると考えられる。今後は、本研究で得た知見を活かし、実使用条件でより高性能を維持可能な排出ガス後処理システムの開発を目指す。

本稿は、自動車技術会論文集 Vol.52 No.2 に掲載の論文 [9] を加筆修正の上報告するものである。

参考文献

(1) 鈴木央一：次期重量車用試験サイクルの概要と排出ガス性能評価法としての特徴，交通安全環境研究所フォーラム講演概要 (2014)，p.3-8

(2) 鈴木央一：ディーゼル重量車における排出ガス規制と対応技術の推移，マリンエンジニアリング，Vol. 49，No. 6(2014)，p. 776-781

(3) 石井素：自動車の排出ガス規制等の動向，マリンエンジニアリング，Vol. 47，No.6(2012)，p. 829-834

(4) Steven J. Schmieg et. al.: Thermal durability of Cu-CHA NH_3-SCR catalysts for diesel NOx reduction, Catalysis Today, Vol. 184, No.1(2012), p. 252-261

(5) Sougato Chatterjee et. al.: Heavy Duty Diesel Engine Emission Control to Meet BS VI Regulations, SAE Technical Paper (2017), 2017-26-0125, doi:10.4271/2017-26-0125.

(6) 岡耕平ほか：SCR 触媒の水熱劣化による NH_3 吸着量及び反応経路変化のモデル化，自動車技術会論文集，Vol. 51，No.2(2020)，p. 268-273

(7) 鈴木央一ほか：使用過程尿素 SCR 重量車における排出ガス性能変化の推移，自動車技術会論文集，Vol. 45，No.1(2014)，p. 43-48

(8) 今井淳一ほか：情報通信による遠隔モニタリング MIMAMORI・PREISM の開発，いすゞ技報，No.130(2018)，p. 72-77

(9) 本谷綾子ほか：コネクテッド・データを活用した実路走行大型車 SCR の水熱劣化度推定，Vol.52，No.2(2021)，p. 232-237

著　者


本谷　綾子


岡　耕平


柴田　慶子


榎　和広


石川　直也

論文・報告

Exploration and Sweeping for Autonomous Sweeper Truck in the Geofence Scenario

Weifan Zhang* Wenbo Yu* Qian Jia* Yi-Chen Zhang*

Abstract

Autonomous road sweepers are an enabling technology in addressing cleaning tasks at public open spaces with both commercial and social values. In this paper, we investigate exploration and sweeping tasks in geofence scenarios (e.g., a parking lot) using autonomous road sweepers. We firstly design an autonomous truck system including sensors and software modules. Then, to solve the exploration and sweeping tasks, we develop algorithms with latest artificial intelligence (AI) technology. Finally, we validate the whole system by finishing a demonstration in the parking lot of Isuzu Technical Center of America (ITCA) using an Isuzu MY21 truck. The demonstration simulates the tasks that given an unknown geofence area, the sweeper truck explores the environment, builds the map, and follows the generated path to clean and coverage most of the areas. The effectiveness of the proposed approach is verified.

1 Introduction

With the continuous improvement of artificial intelligence, self-driving technology has become the trend of automobile development in the future. The combination of high-tech self-driving technology and daily sanitation sweeper is a bold, innovative, and practical trial. Capable of working overnight without human interventions, the autonomous road sweeper is a promising solution to effectively clean public open spaces with a reduced cost [(1), (2)]. To finish cleaning tasks in different scenarios, road sweepers should have two main functions: exploration and sweeping.

Exploration is required if the map is unknown, and in such case, exploration should be executed at least once before assigning the vehicle sweeping task. While driving through the area, simultaneous localization and mapping (SLAM) enables the vehicle to build a map as localizing itself in it. To decide where to go during the exploration, a goal point could be decided through algorithms to search on the current frontiers. Then path planning algorithms take effort to generate a path for the control module to follow. In the whole process, the perception module works to detect static and dynamic vehicles, pedestrians, etc. The detection result could either be utilized to improve map quality by removing the obstacles marked on map caused by dynamic vehicles, or to help the planning system for dynamic avoidance.

Sweeping task requires the map which is built through exploration as an input. Apart from the same modules during exploration, a decision-making module is added to decide when to switch between exploration and sweeping missions.

In addition, the decision module also monitors the vehicle state and surrounding objects to react for emergency. For the planning module, a cost-effectiveness coverage path planning (CPP) algorithm need to be appended. However, designing the path planning algorithm for the sweeping stage is harder compared with the exploration stage for two reasons. First, the sweeper needs to turn more frequently to cover the geofence area; however, road sweepers are typically large in size [(3)], leading to a large vehicle turning radius. Second, since the coverage radius of autonomous road sweepers is close to half the vehicle width, the vehicle needs to operate near obstacles to maximally cover an area [(4)], making the coverage path sensitive to the map uncertainty. As a result, to ensure safe sweeping in an obstacle-cluttered environment, the coverage path planning algorithm should take into account the vehicle dynamics and the uncertainty in the map from the perception system.

To solve these problems, we develop a complete autonomous truck system with sensor configuration and software modules including perception, localization, planning, decision, and control. We adopt ROS system (Robotic Operating System) to mount different parts

* Isuzu Technical Center of America, Inc.

together. For the exploration and sweeping tasks, we design original path planning algorithms and compare the performance with other benchmarks. To validate the effectiveness of the proposed system, we accomplish a demonstration which simulates the tasks that given an unknown geofence area, the sweeper truck explores the environment, builds the map, and follows the generated path to clean and coverage most of the areas. It was done in the parking lot of Isuzu Technical Center of America (ITCA) using an Isuzu MY21 truck.

Based on the discussion above, the novelties and contributions of this paper are summarized as follows.

- A complete autonomous truck system is built and presented for real-word application.
- This paper provides a hierarchical planning system. It can highly efficient build the map at the same time avoid dynamic and unforeseen objects with considering vehicle constrains.
- The paper presents newly developed CPP algorithm for autonomous road sweepers in the obstacle-cluttered environments.
- The effectiveness and robustness of the proposed method in real-world applications are validated by the experiments.

The remainder of this paper is organized as follows. In Section 2, we provide the hardware and software system developed for the road sweeper. The detailed algorithms are then introduced in Section 3. In Section 4, the proposed approaches are validated through a demonstration. Finally, conclusions and future work are given in Section 5.

2 System Description

In this section, the setup of the testing vehicle is first introduced. An overview of the road sweeper system is shown in Figure 1.

2.1 Hardware

In our case, the test truck is equipped with three mechanical LiDARs and three industrial cameras. Figure 2 gives the sensors layout of the truck. The long range 40-channel mechanical LiDAR is mounted on the top of the truck head to have a board view, and two short range 64-channel mechanical LiDARs are placed on each side of the truck head to avoid blind spots. All LiDARs are running at the rate of 10 Hz. Three industrial cameras are installed in front of the truck to achieve approximately 150 degrees of field of view. All cameras are running at the rate of 15 Hz.

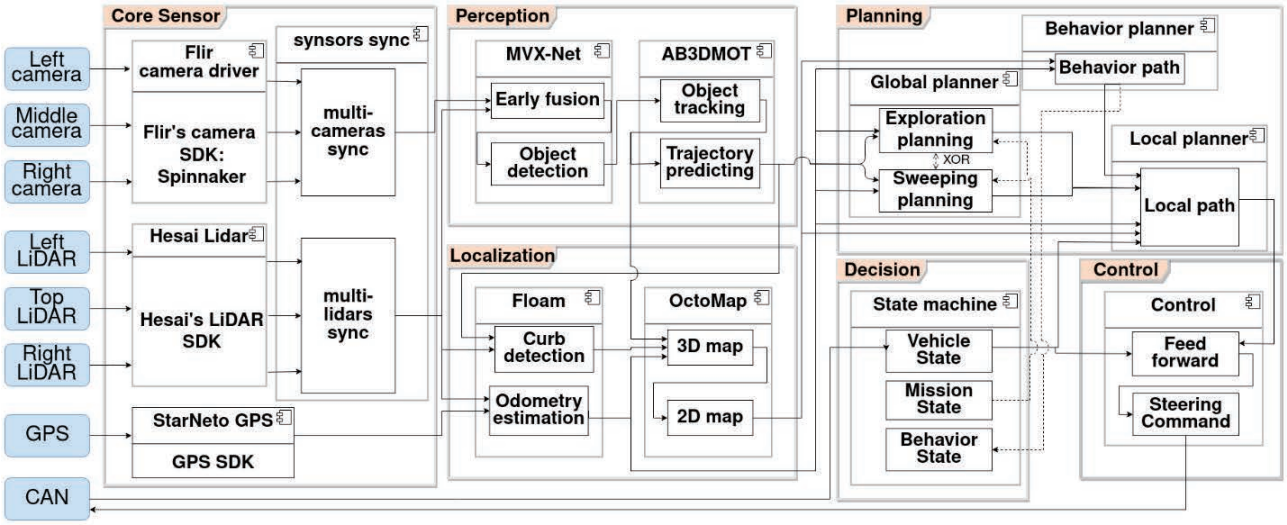


Figure 1 An overview of the systems involved in the perception, localization, planning, and control of the autonomous road sweeper.



Figure 2　Illustration of the sensors layout of the truck.

2.2 Perception and Tracking

As the "eye" of autonomous vehicles, the perception algorithm is designed to intelligently perceive the surrounding environments, which provides 3D information of surrounding objects to the downstream modules of the autonomous driving system. Moreover, by using 3D perception results as inputs, the tracking algorithm is implemented to track multiple objects over time. The tracking results will be the inputs of the downstream modules for decision making and planning algorithms.

2.3 Localization and Mapping

The important characteristic that could assist in autonomous navigation is the ability of the vehicle to concurrently construct a map for an unknown environment and localize itself within the same environment. This computational problem is known as SLAM.

To achieve the online SLAM task, we make use of the combination of the measurements from LiDAR, IMU, and GNSS to estimate the vehicle state in an unknown environment and output the vehicle's pose (i.e., position and orientation). The vehicle's pose and the lidar measurements are further used for registration of the point cloud to build a 3D occupancy grid map. In this work, the size of each grid in the occupancy grid is set to be 0.5 m × 0.5 m.

2.4 Decision Making

As the "brain" of autonomous vehicles, decision-making system is significant for the safe and efficient driving of vehicles. Decision making is the transition between the perception module and the motion planning module. In general, the inputs of decision-making system are environmental clues and status of ego vehicle, while the outputs are a series of strategies including high-level behaviors and low-level control commands that are fed into the motion planning module.

2.5 Planning

To solve the optimal planning task with abstraction and simplification, we break the task up into a hierarchy of optimization problems. By doing this, we can tailor the inputs and outputs of each optimization problem to the correct level of abstraction. At the top of this hierarchy is the mission planning, which focuses on solving the autonomous driving mission of navigating to the destination at the map level. The next level is the behavior planning, deciding which behaviors the vehicle should take. We then adopt a local planner to calculate a collision-free path and a velocity profile to the required goal state. Finally, the computed motion plan is passed to the controllers to follow. Each of these optimization problems has different objectives and constraints to solve it, which we will discuss in detail in the next section.

3 Methodology

In this section, the exploration and sweeping mission are firstly introduced. Then, the detailed algorithms for each module is formulated.

3.1 Tasks

3.1.1 Exploration

When the sweeper enters an unknown area for the first time, the exploration task is activated. The missions of the exploration task are fully exploring the designated area and constructing a map in the meantime. While exploring, obstacles like parked vehicles, curbs, and other static objects are plotted on the map. Dynamic obstacles, such as moving vehicles and pedestrians, won't be recorded into the final map, but they will be used for collision avoidance.

To explore continuously, the sweeper needs to update its target and plan paths at a fairly high frequency on the constructing map. Once the quality and completeness of the map reaches the desired level, the exploration mission is finished and the update of the map is terminated.

3.1.2 Sweeping

The sweeping mission requires the exploration mission to be completed at least once. The goal of the sweeping mission is to cover the designated area by the width of the sweeper cleaning system. At the beginning of the sweeping mission, a path optimizer generates a relative optimal sweeping path with high coverage rate and short traveling distance. Then, the sweeper follows the path and avoids any dynamic obstacles. The sweeping mission ends when the entire path is executed.

3.2 Perception and Tracking

3.2.1 3D Perception

As mentioned in **Section 2**, three LiDARs and three cameras are installed and need to be calibrated together. We use the open source ROS camera calibration package to get the intrinsic value for the camera and the Velo2cam [5] to get the extrinsic value between cameras and LiDARs. These calibrations are only needed to be done once unless any sensors layout changes.

As shown in **Figure 3**, the perception process has three steps. First, three LiDARs fusion is done to increase the density of the point cloud on objects. Second, using calibration parameters, the modified MVX-Net [6] fuses multi-modal low-level features from 3D LiDARs and industrial cameras to generate 3D information of surrounding objects in the local coordinate frame, including locations, dimensions, orientations, and confidence scores of the objects. Finally, combined with the localization information, these outputs in the local coordinate frame are converted into the global coordinate frame as the inputs for tracking component.

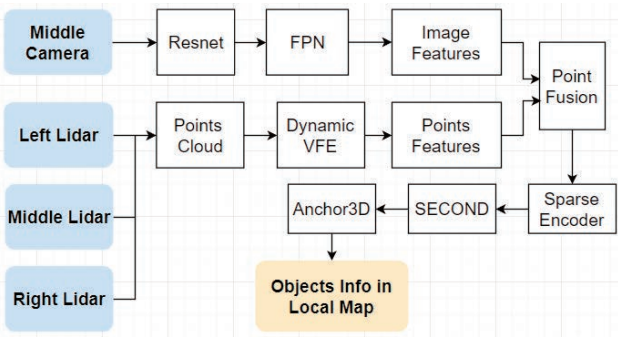


Figure 3 Structure of deep learning based neural network

3.2.2 3D Multi-Object Tracking

To generate dynamic and static objects, the AB3DMOT algorithm [7] is adopted. It mainly includes 4 modules, which are 3D object detection, 3D Kalman filter, data association, and birth and death memory. 3D object detection accepts the point cloud to generate perception results. 3D Kalman filter predicts the state of object trajectories from the previous frame to the current frame for state estimation. The Hungarian algorithm is utilized for data association. The Birth and death memory module is used for adding new trajectories or removing lost trajectories. After all these processes, dynamic and static objects can be differentiated.

3.3 Localization and Mapping

To achieve online SLAM task, we make use of the combination of F-LOAM [8] and OctoMap [9] to localize the truck and build the surrounding map in an unknown environment at the same time.

For the LiDAR odometry, F-LOAM formulates the SLAM problem as scan-to-scan match and scan-to-map refinement. The idea is to extract edge and planar features from the laser scan, and then the features are used to estimate the optimal pose of the truck between the current frame and the global map by minimizing point-to-plane and point-to-edge distance. In addition, we also modify the F-LOAM package and make it capable of receiving sensor data from IMU and GNSS. The estimated LiDAR odometry is then fused with the odometry from IMU and GNSS sensors to have a better 3D pose estimation and at the same time keep low computational cost.

The localization results are then passed to OctoMap for constructing a 3D map. The mapping approach is based on octrees and uses probabilistic

occupancy estimation. It explicitly represents not only occupied space, but also free and unknown areas. The resulting 3D occupancy map is then used to generate multi-layered projected 2D maps, which allows the planning component to plan a drive-able path as well as avoiding any collision.

3.4 Decision Making

We adopt finite state machine (FSM) to implement our decision-making module. FSM is the most representative rule-based method. With discrete inputs and outputs, corresponding actions are generated depending on the responding to external events and states of agents are then transited from one to another.

Based on our tasks, we design a mission state machine as shown in **Figure 4**. There are two main phases: exploration and sweeping. First, when the vehicle is started, the current state directly moves forward to the exploration state and sends out signals to the planning module to start the exploration task. Then it waits for the exploration finish signal and changes to sweeping state. After entering the sweeping state, it will generate a signal, which triggers the planning module to generate coverage path.

Besides of the mission state machine, we also design a vehicle state machine and a behavior state machine. The vehicle state machine monitors the hardware's health status and generates alarm if anomaly features appears. The behavior state machine monitors whether there are unexpected vehicles or pedestrians appear. And if such case happens, it will generate signals to interrupt the current mission and trigger the planning module to generate a safe path.

3.5 Planning

3.5.1 Exploration Planner

As indicated in **Figure 5**, the task for the exploration planner is to analyze the map and vehicle state, and then provide a global reference path. The planning space of the exploration planner is an occupancy grid map, in which each node contains the position information (x, y) and the probability of whether it is occupied by an obstacle.

In the **Figure 6**, the exploration planner firstly detects frontiers, which form the boundary between known and unknown spaces. To be more specific, the unknown space has a value of -1 and the known space has a value from 0 to 100, indicating the possibility of occupancy. A frontier is a region of interest where the goal is set for the vehicle to reach. The position of the goal is obtained by calculating the distance between the frontiers and the vehicle state, and selecting the closest one.

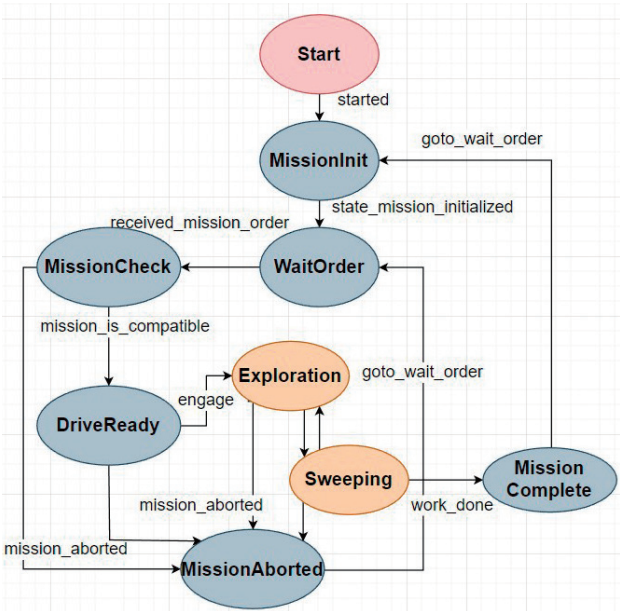


Figure 4 Mission state machine

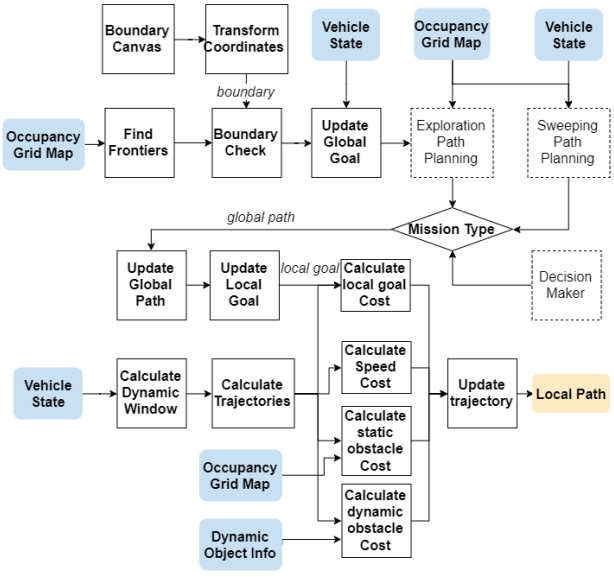


Figure 5 Planning flow chart

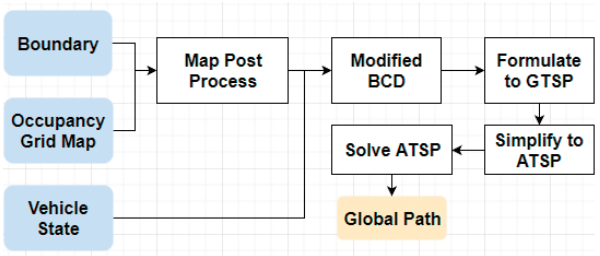


Figure 6 Exploration planner

To reach the goal position through a collision-free path, we implement a sampling-based path planning method based on the RRT-Connect algorithm [10], where both of the steering constrains and nonholonomic kinematics are taken into consideration.

The method works by incrementally building two rapidly- exploring random trees (RRTs) [11] rooted at the start and the goal configurations. While extending nodes, a sequence of points are inserted based on the kinematic model. The junction condition for both trees is checked at every iteration and the path is found once the condition meets. Notice that the junction condition also considers the vehicle model. Therefore, the exploration path is always feasible for vehicle maneuver.

The main challenge of the exploration planning is the update frequency. Although RRT-Connect is a relatively fast planning algorithm, the computation time scales up when the map grows. To stabilize the update frequency and speed up the planning process, we limit the sampling space using a time-varied ellipse, inspired by the batch informed trees (BIT) algorithm [12]. The sampling space is an ellipse whose focuses are the goal position and the vehicle position, while the eccentricity of the ellipse is decided by the BIT algorithm and changed with the iteration times.

3.5.2 Sweeping Planner

To cover the designated area, we propose a novel coverage path planning algorithm, which includes three steps, as shown in Figure 7. First, the map is post-processed with morphological operations and convexification to reduce the uncertainty in the map. Second, based on the post-processed map, the boustrophedon cellular decomposition (BCD) is modified to generate path segments that cover the sweeping area considering vehicle dynamics. Finally, a generalized traveling salesman problem (GTSP) is formulated and solved to connect the path segments for a CPP path with the minimum length.

The optimization problem of the CPP has two objective variables: the coverage rate and the length of the sweeping path. The coverage rate of a sweeping area is defined as the ratio between the number of covered grids and the number of total grids. The algorithm maximizes the coverage rate and minimizes the length of the sweeping path to reach that coverage rate.

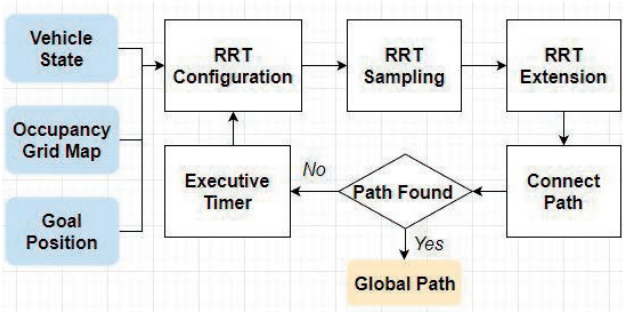


Figure 7 Sweeping planner

3.5.3 Behavior Planner

Behavior planner deals with unexpected objects. The inputs are the mission path and a list of the surrounding objects from the perception module and the tracking module. It monitors whether the surrounding objects (cars or pedestrians) block the path or tend to collide with the ego vehicle. If such case is detected, the behavior planner will start to replace the unsafe part of the mission path with the safe path. Our planner uses the hybrid A* algorithm to generate avoidance path. The hybrid A* is a robust path planning method for non-holonomic robots such as autonomous vehicles. Compared with the original A* algorithm, it also considers the limitation of the turning angle.

3.5.4 Local Planner

To increase the robustness of the system, a local planner is implemented between the global planner and the control module. The local planner is designed to generate a flexible and smooth path. For this purpose, the dynamic window approach (DWA) [13] is adopted. The DWA is capable of planning in real time and generating collision-free trajectories.

Compared to the regular DWA which has goals, obstacles, and speed costs, we add new cost functions to cope with our scenario. The cost functions are the following:

- Speed cost:

  Frequent velocity changing, including speed changing and steering oscillation, is undesirable and may cause uncomfortable maneuvers. This cost penalizes velocity changes. The cost value is proportional to the absolute difference between previous velocity state and new velocity state.
- Static obstacle cost:

  A newly introduced cost measures the distance from the considered trajectory to the static obstacles. The cost is zero when all obstacles are located out of the safe region along the trajectory.
- Dynamic obstacle cost:

  Similar to the static obstacle cost, this cost measures the distance from the ego vehicle trajectory and the trajectories of dynamic obstacles. The cost is zero when all trajectories of dynamic obstacles maintain a safe distance from the trajectory.

3.6 Control

In order to execute the path, we implement a PID controller as shown in **Figure 8**. First, the controller selects a sequence of way points from the local path and find a continuous fitting curve. Next, the input of the PID controller is the steering angle error and the lateral deviation, which are obtained from the fitted curve. Then, the PID controller with the dynamic vehicle model sends out a steering angle command in order to correct those two deviations. Finally, a discrete steering filter is introduced to the system, considering the thermoelectric property of the steering column.

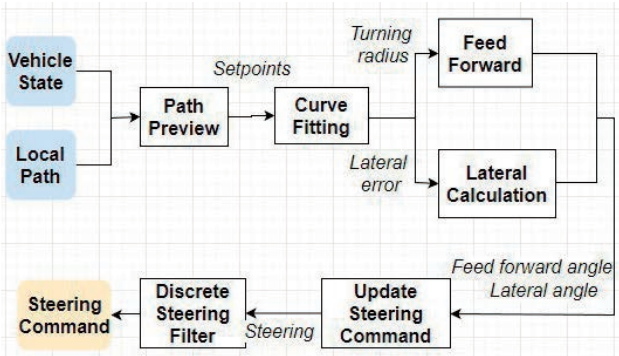


Figure 8 Control flow chart.

4 Demonstration Result

4.1 Maps and Experiment Settings

To access the performance of the proposed road sweeper system, we perform the test at the ITCA's parking lot as shown in **Figure 9**. The boundary highlighted in red in **Figure 9** represents the designated area of the exploration and sweeping missions.



Figure 9 A bird's eye view of the parking lot at Isuzu Technical Center of America. The truck on the road at the bottom is the testing vehicle.

4.2 Exploration Results

4.2.1 3D Map

The map built through the exploration stage is shown in **Figure 10**. The 3D map is then compressed to occupancy grid map.

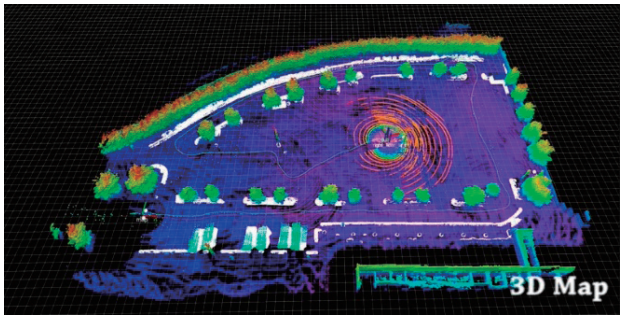


Figure 10 3D Map

4.2.2 Object Avoidance

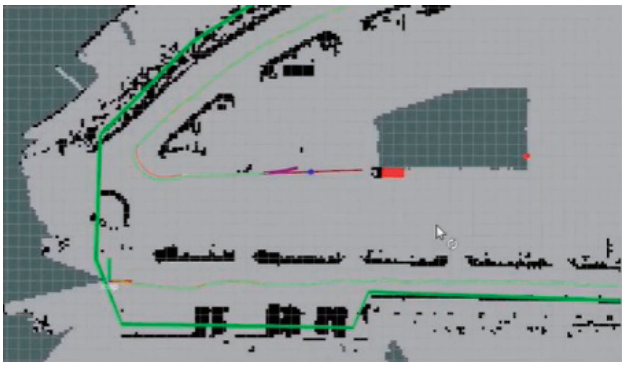
As is shown in **Figure 11(a)**, during the exploration stage, an unexpected moving vehicle the exploration path. Though the exploration planner fails to generate a collision-free global path in time. The local planner detects the possible collision and generates a short collision-free path to avoid the moving vehicle **Figure 11(b)**. It enables the vehicle to pass the object when the exploration planner finds a new path for vehicle to follow **Figure 11(c)**.

4.3 Sweeping Result

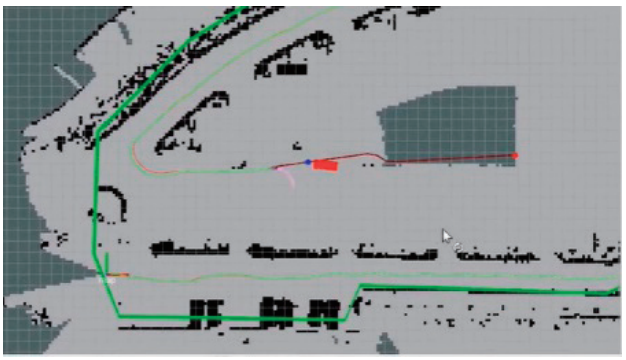
In this section, the CPP algorithm proposed in **Section 3** is validated. To demonstrate the dynamic feasibility of the proposed approach, a test-bed vehicle is deployed in the explored parking lot to evaluate the path. The coverage radius of the vehicle is set as 2 grids. The number of iteration for genetic algorithm is 1500 **Figure 12**.

- **Evaluation of the executed CPP path**

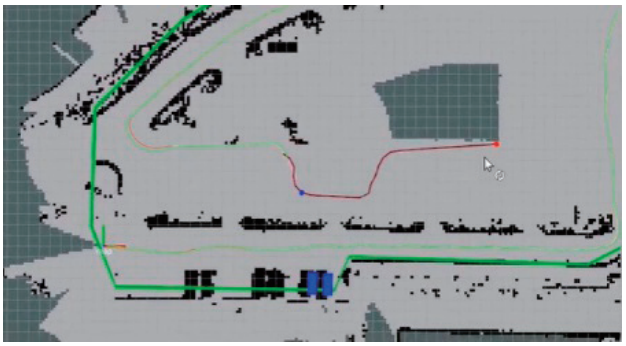
To further validate the proposed approach, the test-bed truck is employed to follow the CPP path planned by the proposed approach. The executed vehicle path is given in **Figure 12**. The coverage rate and the path length of the executed path are 83.01 % and 2924 m, respectively. As shown in **Figure 12**, the planned path can be well followed by the vehicle, and all the obstacles in the parking lot can be avoided. Meanwhile, the loss in the coverage rate is minimal (i.e. 1.61 %) between the planned and executed paths.



(a) Path following



(b) Local planner reaction



(c) Global planner reaction

Figure 11 Object avoidance example. The unexpected moving vehicle is represented in the red box in (a) and (b). The crimson line represents the global path planned by the exploration planner. The pink line in (b) represents the collision-free path planned by the local planner. (c) shows the avoidance path planned by the global planner.

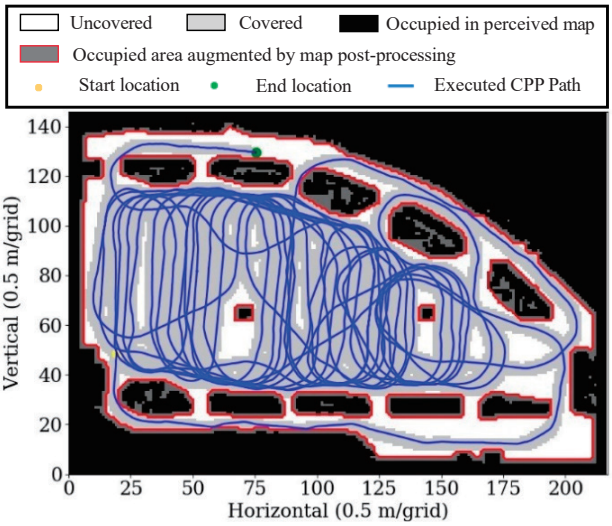


Figure 12　Executed path by following the CPP path planned with the proposed approach

5　Conclusion

In this paper we focus on exploration and sweeping tasks for autonomous driving system. We develop a hierarchical planning system which is highly efficient in building the map at the same time avoiding dynamic and unforeseen objects. We develop an original CPP algorithm with three steps: map post-processing, decomposition and optimal. A complete autonomous sweeper system is built for validation. The system contains sensors configuration and software modules including perception, localization, planning, decision making, and control. During the validation experiment, the sweeper truck is able to build a 3D point cloud map of the designated parking lot. Some designed behaviors have been tested during the exploration process that includes making right angle turns in a single lane, dodging incoming moving vehicles, and avoiding static obstacles. In the sweeping mission experiment, an optimal sweeping path with about 80 percent coverage rate is generated and successfully executed. The results show that the sweeper truck meets the design requirement. The proposed system can also be extended to complete other sweeping related tasks thanks to the modularized component design.

あとがき

米国のスーパーなどの大きな駐車場を深夜に清掃装置を架装した商用車が清掃しています。いすゞNシリーズの使われ方の一つであるそのような清掃車の自動運転化（無人運転化）という使命を受けて自動運転制御を自社開発しました。本稿で報告させていただいたように、初見の駐車場を無人で探索、最も効率的な清掃パターンを内包した最適化したシステム制御により自動清掃を実施し、かつ探索時点では存在しなかった外乱（他車両・自転車・歩行者の侵入など）にも耐えうるシステムとなっています。今後はこの開発で培った経験・スキルをいすゞ自動車といすゞ中央研究所の自動運転開発チームの一員として発揮していきます。

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）

References

(1) E. Prassler, D. Schwammkrug, B. Rohrmoser, and G. Schmidl, “A robotic road sweeper,” in International Conference on Robotics and Automation, IEEE, vol. 3, (2000), p. 2364-2369.

(2) J. Jeon, B. Jung, J. C. Koo, H. R. Choi, H. Moon, A. Pintado, and P. Oh, “Autonomous robotic street sweeping: Initial attempt for curbside sweeping,” in International Conference on Consumer Electronics. IEEE, (2017), p.72-73.

(3) C. Wang and G. Parker, “Analysis of rotary brush control character- istics for a road sweeping robot vehicle,” in International Conference on Mechatronics and Control. IEEE, (2014), p.1799-804.

(4) C. Luo, S. X. Yang, D. A. Stacey, and J. C. Jofriet, “A solution to vicinity problem of obstacles in complete coverage path planning,” in International Conference on Robotics and Automation, IEEE, Vol.1, (2002), p.612-617.

(5) J. Beltra´n, C. Guindel, A. de la Escalera, and F. Garc´ıa, “Automatic extrinsic calibration method for lidar and camera sensor setups,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022.

(6) V. A. Sindagi, Y. Zhou, and O. Tuzel, “Mvx-net: Multimodal voxelnet for 3d object detection,” in 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, (2019), p.7276-7282.

(7) X. Weng, J. Wang, D. Held, and K. Kitani, “3d multi-object tracking: A baseline and new evaluation metrics,” in 2020

IEEE/RSJ Interna- tional Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, (2020), p.10359-10366.

(8) H. Wang, C. Wang, C.-L. Chen, and L. Xie, "F-LOAM: Fast LiDAR odometry and mapping," p.4390-4396. [Online]. Ava

(9) A. Hornung, K. M. Wurm, M. Bennewitz, C. Stachniss, and W. Burgard, "OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees," Autonomous Robots, 2013, software available at https://octomap.github.io. [Online]. Available: https://octomap.github.io

(10) J. J. Kuffner and S. M. LaValle, "Rrt-connect: An efficient approach to single-query path planning," in Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automa- tion. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065), IEEE, vol.2,(2000), p. 995-1001.

(11) S. M. LaValle et al., "Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning," 1998.

(12) J. D. Gammell, S. S. Srinivasa, and T. D. Barfoot, "Informed RRT*: Optimal sampling-based path planning focused via direct sampling of an admissible ellipsoidal heuristic," in International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, (2014), p. 2997-3004.

(13) D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance," IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 4, No. 1(1997), p. 23-33, 1997.

著　者

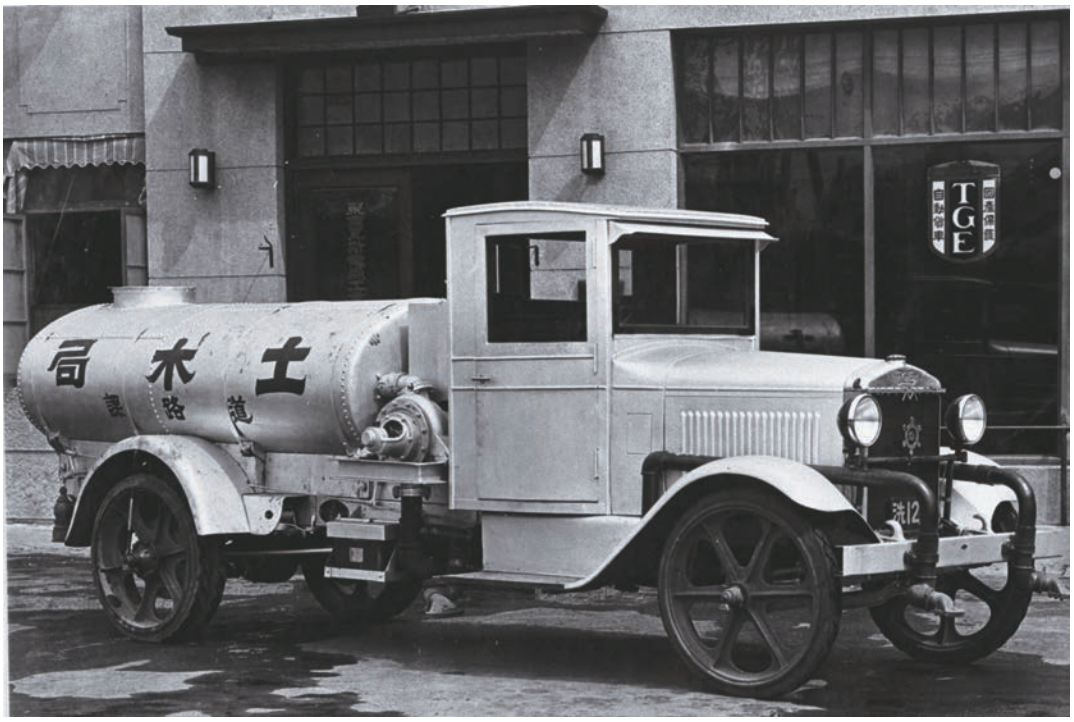

Weifan Zhang


Wenbo Yu


Qian Jia


Yi-Chen Zhang

◇いすゞ歴史の一こま



TGE-L 型散水車（1930 年ごろ）

論文・報告

トラック・バスの自動運転

Autonomous Driving of Trucks and Buses

對馬　一昭*
Kazuaki Tsushima

要　旨

近年の少子高齢化などによるトラック・バスのドライバ不足、更には地方交通の窮状などの社会問題と、e- コマースが拡大するなどの社会変容から、物流・移動サービスの自動運転実用化が強く望まれている。これに対する国の対応状況を整理し、自動運転で用いる技術を紹介した上で、トラック・バスの自動運転の現状を、いすゞが実施した福岡空港内際連絡線バスの実証実験を中心に解説する。

Abstract

Due to the shortage of truck and bus drivers due to the declining birthrate and aging population in recent years and social problems such as the plight of local transportation and social changes such as the significant expansion of e-commerce, the practical application of autonomous vehicle operation of logistics and mobile services has been strongly desired. After organizing the state's response to this and introducing the technologies used in autonomous driving, I explain focusing on the demonstration experiment of the Fukuoka Airport bus conducted by Isuzu on the current state of automated driving of trucks and buses.

1　はじめに [1]

1.1 顕在化する社会問題

1.1.1　ドライバ不足・高齢化

少子高齢化の日本にあって、特にトラック・バスのドライバ不足が深刻化している。国土交通省によると、いずれも長い労働時間、全産業比低い賃金などにより志望者が減っているためであると報告されている [2][3]。また、これらの車両を運転するためには、特殊な技能が要求され、加えて経験も必要であり、その免許取得にかかる費用も決して安くはない。このことも成り手が増えない一原因と考えられる。

1.1.2　物流構造の変化

国内の貨物輸送量は、輸送トンベースでみるとやや減少傾向にあり、輸送トンキロベースでみるとほぼ横ばいとなっている。全体量として増えてはいないが、一方で営業用トラックによるトンキロベースの輸送量は増加しているのが特徴的である。

また、トラック輸送の積載効率の推移をみると年々低下し、直近では約 40 %となっている。これは、近年 e- コマースが発達し、個人間取引が増加するなどの商習慣の変化に伴い、輸送荷物の小口化、多頻度化、時間指定配送などの影響による。加えて、2020 年からの新型コロナウイルス感染拡大による巣ごもり需要により、宅配便の取扱いが急増している。

1.1.3　地方での公共交通の現状

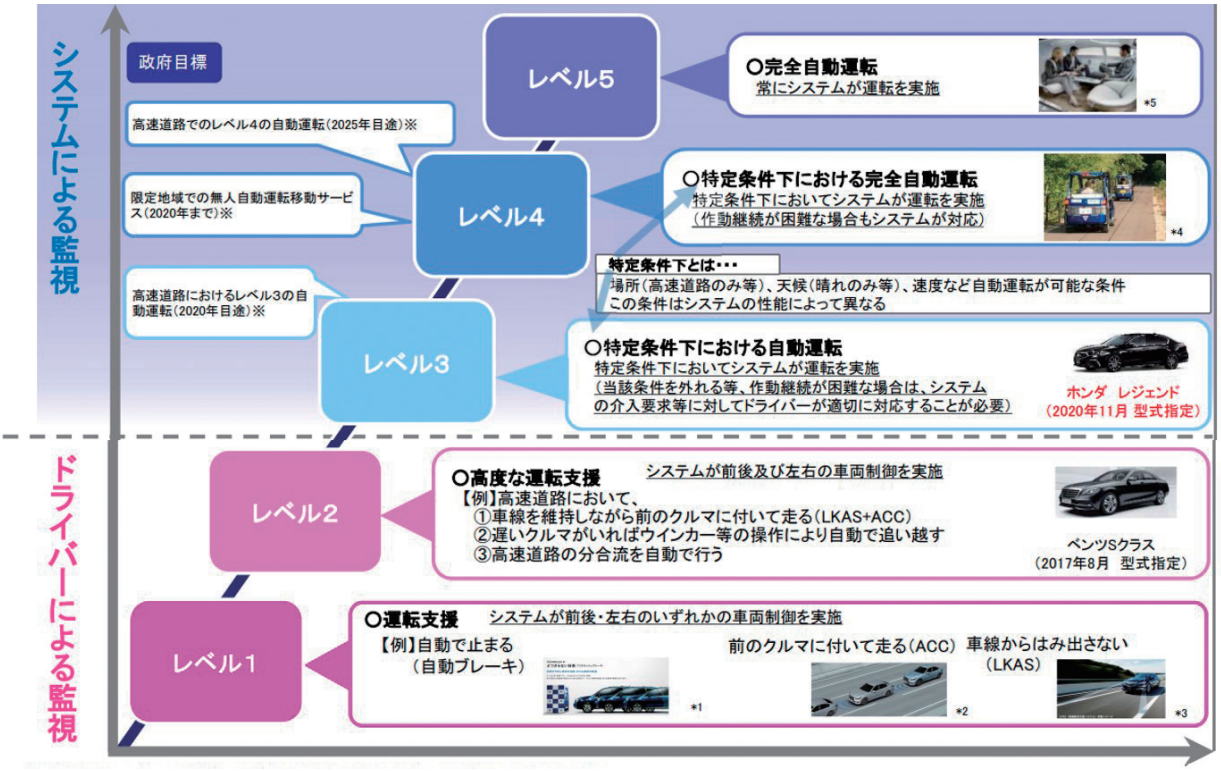
公共交通機関であるバスは、特に地方では重要なライフラインである。しかしながら、利用者の減少などから、令和 4 年版交通政策白書によると、日本のほぼ全てのバス事業者が赤字という経営状況にある [4]。現状は自治体が補助金を出すなどして、何とか路線を維持しているところが多く、赤字路線の廃止、運行本数の削減に踏み切らなければならないところも出てきている。加えて、前述のドライバ不足から、黒字路線であっても運行本数の削減をせざるを得ない場面もある。

地方在住で高齢になり運転免許を返上してしまうと、移動の手段が絶たれるという事態に陥ることのないように、これらの社会問題の解決策の一つとして、“トラック・バスの自動運転” の期待が高まっている。

1.2 自動運転のレベル

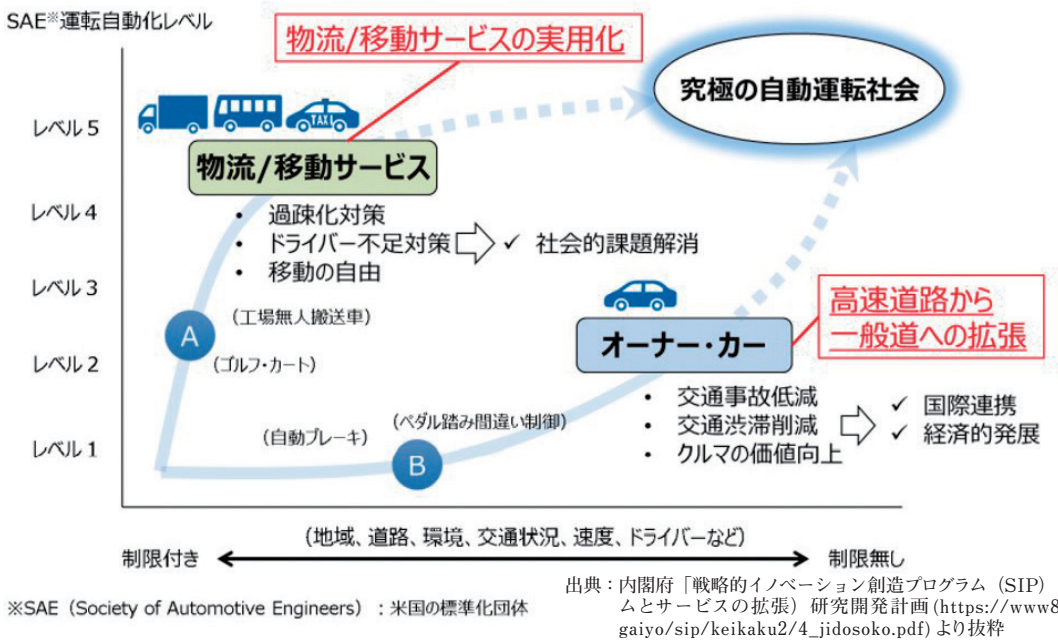
官民 ITS（高度道路交通システム：Intelligent Transport Systems）構想・ロードマップで規定された自動運転のレベル分けを**図 1** に示す。監視者がドライバからシステムに切り替わる、レベル 2 と 3 の間で、その技術レベルが大きく変わってくる。

* AS システム開発部



出典：国土交通省「自動運転車の定義及び政府目標」(https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001371533.pdf)

図 1　自動運転のレベル [5]



出典：内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）自動運転（システムとサービスの拡張）研究開発計画(https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku2/4_jidosoko.pdf)より抜粋

図 2　自動運転のロードマップ [6]

1.3　自動運転のロードマップ

走行環境条件の拡がりを横軸に、それに対する**図 1** の自動運転レベルの進化を縦軸にとったのが、**図 2** の自動運転のロードマップである。オーナーカーと物流・移動サービスのクルマで自動運転レベルの進化は大きく異なり、後者を担うトラック・バスは、限定された走行環境で高レベルの自動運転化への期待が示されている。

これを基に、経産省・国交省による自動走行ビジネス検討会では、無人自動運転サービスの社会実装を推進するため、2021 年度から 2025 年度までの 5 年間に取り組むべき次期プロジェクトを検討し、**表 1** に示す 4 テーマを掲げた。

表1　プロジェクト4テーマ[7]

テーマ1．2022年度に限定エリア・車両での遠隔監視のみ（レベル4）で自動運転サービスの実現に向けた取組

遠隔監視のみ（レベル4）で自動運転サービスについて、走行技術の確立のみならず、ビジネスとしての運用に向けて、遠隔監視を行う指令者の役割などサービスのあり方についても検討する。

テーマ2．さらに、対象エリア、車両を拡大するとともに、事業性を向上するための取組

様々なエリアや車両による自動運転サービスのユースケースを想定し、ＯＤＤ、運行条件に応じて仕様（サイズなど）・機能（センサー、ＧＮＳＳ、マーカーなど）を選定できる車両の開発を検討する。車両の開発段階から、具体的に導入できる場所やオペレーションコストを想定して、検討する。
同時に、ＯＤＤに応じて、適切な走行試験を選定できるよう、シミュレーションやテストコースの体制整備を検討する。

テーマ3．高速道路における隊列走行を含む高性能トラックの実用化に向けた取組

高速道路における自動運転トラックの実用化に向けて、車両そのものの走行技術の開発のみならず、高速道路上の車両や交通規制、落下物などの道路情報を活用した運行管理システムを検討する。車両開発については、隊列走行の課題も踏まえ、自立走行も可能な高性能レベル4トラックを検討する。

テーマ4．混在空間でレベル4を展開するためのインフラ協調や車車間・歩車間の連携などの取組

多数の車両や歩行者が混在する空間においてインフラ協調や車車間・歩車間の連携によりレベル4の自動運転を実現すべく、実証実験を行うのみならず、社会実装に向けて、スマートシティなどのモデル地域を定めて、コスト負担や維持管理の仕組みも含めて検討する。

出典：経済産業省「自動走行ビジネス検討会「自動走行の実現及び普及に向けた 取組報告と方針」Version 5.0 ～レベル４自動運転サービスの社会実装を目指して～」(https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/jido_soko/pdf/20210430_03.pdf) より抜粋

2　法規・ガイドライン

2.1 道路運送車両法

2020年3月に、高速道路等における低速自動運行装置を備える自動車の技術基準としてレベル3の自動運行装置の保安基準改正がなされた。

2.2 道路交通法

更に2022年4月には、改正道路交通法が成立し、特定自動運行として特定自動運行主任者を置くことによりレベル4が認められた。

2.3 各種ガイドライン・基準

このほか、自動運転の普及を鑑み各種ガイドラインが出されている。レベル4の道路交通法が閣議決定されたとはいえ、その内容はいまだ限定的であり、これによる道路運送車両法の改正もなされていない状況であることから、これらのガイドライン・基準を遵守することが重要である。

① 自動運転車の安全技術ガイドライン
（平成30年9月策定、国土交通省自動車局）
レベル3、4の車両に対する安全に関わる要件10項目をまとめたもの

② 公道実証実験のためのガイドライン
（平成28年5月策定、警察庁）
道路使用許可等の特段の手続なしに実施可能な公道実証実験の対象を明確化

③ 自動運転の公道実証実験に係る道路使用許可基準
（令和2年9月公表、警察庁）
遠隔型自動運転システム及び通常のハンドル・ブレーキと異なる特別な装置で操作する自動車の公道実証実験について道路使用許可の申請に対する取扱いの基準を定めた。

④ 遠隔型自動運転システムの公道実証実験に係る道路使用許可の申請に対する取扱いの基準
（平成29年6月策定警察庁）
遠隔操作を行うことができる自動運転車公道実証実験を可能とする構造指針などをまとめたもの。

⑤ 限定地域での無人自動運転移動サービスにおいて旅客自動車運送事業者が安全性・利便性を確保するためのガイドライン
（令和元年6月策定、国土交通省自動車局）
限定地域内のレベル4の無人自動運転移動サービスの安全性･利便性を確保すべき事項をまとめたもの。

3　自動運転の要素技術

3.1 世界初のレベル3自動運転技術

最初に、乗用車における自動運転技術を紹介する。ホンダ技術研究所㈱は、2021年3月にレベル3自動運転システム「トラフィックジャムパイロット（渋滞運転機能）」を搭載した新型レジェンドを発売した。これは、世界で初めてレベル3自動運転の型式指定を取得したものである。自動運転は、高速道路等での渋滞時50 km/h以下という限定された条件の下で可能となり、その際、前方から視線を外すいわゆる“アイズオフ”が認められる。

図3にその自動運行装置の構成を示す。センサとして、

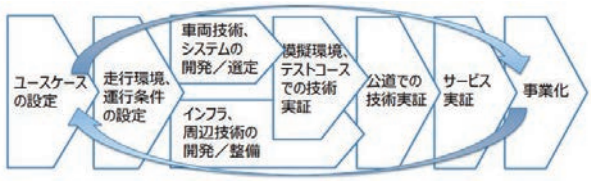
カメラ、LiDAR（Light Detection and Ranging）、レーダで外界認識をし、3 次元高精度地図、GNSS（全球測位衛星システム：Global Navigation Satellite System）の情報を用いて、自車位置及び道路状況を把握するシステムとなっている。



図 3　ホンダレジェンドの装置構成（本田技研工業㈱提供）

3.2 ユースケース /ODD

自動運転を考える際に、まずどういう運行設計領域 ODD[1] でどのようなユースケースに対応すべきかを考えることから開始する。ここでいう、ユースケースとは、走行シーンを具体的に記述したシナリオをまとめ、自動運転として望ましいふるまいを抽象的に記述したものを指す。**図 4** は自動運転サービスの事業化までのプロセスを示したものである。



出典：経済産業省「自動走行ビジネス検討会「自動走行の実現及び普及に向けた取組報告と方針」Version 5.0 ～レベル 4 自動運転サービスの社会実装を目指して～」(https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/jido_soko/pdf/20210430_03.pdf) より抜粋

図 4　自動運転サービスの事業化までのプロセス [7]

何らかの要因により ODD の条件を満たさない場合には、マニュアル運転への切り替え、縮退運転、MRM[2] 等の対応をせねばならない。

注 [1]　ODD（運行設計領域：Operational Design Domain）：自動運転システムが有効に作動する前提となる走行環境条件を示す

注 [2]　MRM（Minimum Risk Maneuver）：路肩などへの車両停止

3.3 自動運転の基礎技術

自動運転に用いる技術を機能別にまとめたのが**表 2** である。次項より重要なものを抽出して解説する。

表 2　自動運転基礎技術

認知	自己位置推定	GPS/IMU　高精度三次元地図 スキャンマッチング　SLAM
	環境認識	カメラ　Radar LiDAR 超音波センサ　センサフュージョン
判断	経路生成	グローバルパスプランニング (スタート地点からゴールまでの大まかなルート作成)
	経路計画	ローカルパスプランニング (設定された経路に対して安全な軌道を計算)
操作	経路追従 車両制御	縦制御・横制御
通信	自車情報 他車情報 交通情報	CACC　LTE/5G C-V2X 遠隔監視・操作 HMI　サイバーセキュリティ
機能安全		ISO26262　ISO21448(SOTIF) SaFAD 冗長化システム

3.4 高精度三次元地図

自己位置推定など、さまざまな情報の元となるのが、HD（高精細：High Definition）マップ、ダイナミックマップとも呼ばれる高精度の 3 次元地図そのもの、もしくは、それに交通施設情報などを加えたものを指す。次のとおり大きく 2 種類に分別される。

① 点群で構成されたポイントクラウドマップ
② 道路情報をもつベクターマップ

なお、②に付与される道路情報の例としては次のようなものがある。

- 信号機の位置
- 車線、停止線の位置
- ガードレール、高架、立体交差などの道路構造物
- 制限速度、道路規制情報

3.5 センシングデバイス

3.5.1 LiDAR

LiDAR は 1960 年代から飛行機に搭載し地形調査など気象の観測に使われてきた技術で、近赤外線レーザ光パルスを照射し、物体に当たって跳ね返ってくるまでの時間を計測、物体までの距離・方向を測定するデバイスである。電波に比べて光束密度が高く、短い波長のレーザ光を利用するので高い精度で位置・形状などを検出できる利点がある反面、光を吸収する黒色物、雨・霧・雪などの悪天候下では検出精度が下がるという不利な点もある。

3.5.2 ミリ波レーダ

ミリ波レーダは既に ADAS（先進運転支援システム：Advanced Driving Assistance Systems）で多くの車両に搭載されている。技術的には、ミリ波と呼ばれる周波数 30 GHz～300 GHz の電波を発し、その反射波を測定するというものである。カメラ、レーザなどに比べて霧、雨、スモッグ等の環境変化による影響を受けにくく、照度変化に関係なく対象物を検知する

ことが可能（夜間も検知可能）である。しかしながら、電波の反射率の低い樹木、段ボール箱、発泡スチロールなどの検出が困難であり、物体の識別が困難である。

3.5.3 カメラ

LiDAR の 100 倍もの情報量を持ち、物体の形状識別が可能なのが特長である。ディープラーニングと組み合わせることにより種別判別も可能となる。

1 つのレンズを持つ単眼式と、ステレオカメラに代表される複眼式の 2 つの方式がある。後者は、左右画像の視差により距離を計算することができるが、遠距離になると視差が小さくなり、また、夜間の輝度差が低下するため精度が低下してしまう。

3.6 センサフュージョン

3.5 節で記したセンサのほか、超音波センサなどもあるが、センサデバイスそれぞれの特徴を生かし、かつさまざまな環境条件の変化に対応し、確実な検知認識ができるよう、それぞれの性能を補完するセンサフュージョン技術が重要である。

3.7 SLAM

自己位置推定技術として、SLAM（Simultaneous Localization And Mapping）がある。これは、移動しながら複数の距離センサ、カメラから取得した情報を元にして、自己位置推定（Localization）を行いながら、環境地図の作成（Mapping）を同時（Simultaneous）に行うことを指す。

そのアルゴリズムには、大きく分けて 2 つのアプローチがある。

① ベイズ推定：自車位置とランドマーク位置の確率分布を逐次的に推定するもの
② 最適化　　：動作モデルと計測モデルから評価関数を構成しその最適解を求めるもの

この技術は、GPS（全地球測位システム：Global Positioning System）が利用できない場所（ビル街などの街中・屋内・トンネル内など）でも機能することが最大の特長であるが、センサデータには多くの誤差が含まれており、アルゴリズムにも近似による誤差が含まれるため、自己位置推定及び地図作成に不確実性を持つ。

ちなみに、自動掃除ロボットでもこの技術が用いられており、本体上部に設置されたカメラ、裏面のフロアトラッキングセンサ、車輪のエンコーダの 3 つのセンサを複合的に使用している。

3.8 GNSS/IMU

GNSS は、米国の GPS（Global Positioning System）、日本の準天頂衛星（QZSS）、ロシアの GLONASS、欧州連合の Galileo 等の衛星測位システムの総称であり、自車位置の把握に用いられる代表的な技術である。

それに加え、その精度を高めるために、RTK-GPS（Real Time Kinematic-GPS）を用いる場合が多い。位置の明確な基準局とその位置を求めようとする観測点で同時に GPS 観測を行い、基準局で観測したデータを無線等を用いて観測点へ送信し、基準局の位置に基づき観測点の位置をリアルタイムに求める手法である。誤差要因が消去され、センチメートルレベルの精度が得られる。

また、IMU（Inertial Measurement Unit）は、慣性計測装置であり、3 次元の慣性運動（直行 3 軸方向の並進運動及び回転運動）を検出する。加速度センサにより並進運動を、角速度センサ（ジャイロ）により回転運動を検出し、自車位置推定に用いられる。

3.9 サイバーセキュリティ

自動運転車そのもので得られる情報が限られているため、V2X 技術によるインフラ、他車などからの情報入手の必要性が高まっている。すると車両外部からのハッキングなどのサイバー攻撃を防ぐよう対処せねばならない。**2.1 節**のレベル 3 の自動運行装置の保安基準改正の内容にも含まれており、また、国連規則 UN-R155/156 では 2022 年からセキュリティ対応義務化がなされた。

3.10 HMI

自動運転システムが現在どのような状態にあるかをドライバ、セーフティドライバ、同乗・遠隔操作オペレータなどに知らせるために HMI（Human Machine Interface）が重要となってくる。特に、レベル 3 におけるオーバーライドリクエストにおいては的確な情報伝達が要求される。バスの乗客などに安心して乗っていただくためにも、システムの健全性を正しく伝える（異常を速やかに伝える）必要性があり、分かりやすさと正確さがポイントとなる。

3.11 遠隔監視・操作

改正道路交通法及びガイドラインに遠隔監視・操作に関わる要件が明示されている。特に遠隔監視では特定自動運行主任者を定義し、その義務が明確化された。

3.12 冗長化

道路運送車両の保安基準において“自動運行装置の機能について冗長性をもって設計されていること”とうたわれているように、自動運転システムのみならず、

ベースとなる車両の制動装置、操舵装置、電源系統の冗長化が求められている。ただし、単なる二重化で対応するのではなく、機能的に安全を保てるシステム設計が必要とされる。

4　乗用車とトラック・バスの差異

これまで多くの実証実験が行われてきた乗用車ベースの自動運転車と、トラック・バスのそれはどのような点が異なるのか抽出した。

まず、その車体の大きさ（幅・長さ・高さ）が挙げられる。トラック・バスは車体周辺をくまなく認知するために多くのセンサが必要となり、そのため高い位置にも設置することにもなる。そして、車線に対する車幅の余裕が小さいため、走行する車線の取り方を工夫する必要がある。

次いで車両重量が大きい点を挙げる。動力性能としてキビキビとした加減速・操舵が困難となるため、周辺車両等を早期に認識し、十分に余裕を持った走行計画を立てる必要がある。

最後に、車体剛性、トラックの運転台と車両間のサスペンション構造を挙げる。車両の動きと、センサの動きのズレが発生することが考えられ、補正する手段を講じなければならない。

5　トラック・バスの自動運転の現状

5.1　大型トラックの高速道路での隊列走行 [5]

経産省・国交省プロジェクトとして、2021 年 2 月、新東名高速道路の一部区間において、実際に後続車運転席を無人とした状態（後続車助手席には保安要員乗車）での後続車無人隊列走行を実施した。

5.2　中型バス

5.1 節と同様経産省・国交省プロジェクトとして、中型バスを用いた実証実験が 2020 年度に全国 5 か所（京阪バス、神姫バス、西日本鉄道、茨城交通、神奈川中央交通）で行われた。

5.3　永平寺参ろーど（福井県）

2021 年に、国内初の遠隔監視・操作型のシステムによる自動運転レベル 3 の実用化事例である。

5.4　他社の取り組み

5.4.1　日野自動車

2020 年 11 月に三重県伊賀市の川上ダム建設工事現場で大型ダンプによるレベル 4 相当の実証実験を実施した。

5.4.2　UD トラックス

2019 年 8 月北海道斜里郡斜里町ホクレン中斜里製糖工場で大型ダンプによるレベル 4 技術の実証実験を実施した。

6　いすゞの取り組み

2022 年 3 月に福岡空港の国内線ターミナルと国際線ターミナルを繋ぐ連絡線において自動運転大型バスの実証実験を行った。この実証実験は、西日本鉄道株式会社、三菱商事株式会社、福岡国際空港株式会社との共同プロジェクトとして行ったものである。**図 5** にそこで用いた車両の外観を示す。



図 5　福岡空港で実証実験を行った大型バス

この実証実験は、ターミナル間の連絡線の専用路を用い、他に交通参加者のいない限定空間という ODD において、セーフティドライバが乗車するレベル 2 で行った。前述のとおり、制限付きの道路環境において自動運転レベルを上げていくにふさわしい実証路を提供していただいた。

この車両に搭載した自動運転技術は、先に紹介したレジェンドと類似のセンサ構成、高精度地図利用のシステムとし、バスへの適用を図っている。センサとしては、LiDAR を主軸とした構成とし、あらかじめ取得した高精度地図と LiDAR で得られた点群情報をマッチングすることにより自己位置推定を行う。**図 6(a)(b)** に搭載センサの取り付け位置を示す。



図 6(a)　搭載センサ取り付け位置



図 6(b)　搭載センサ取り付け位置

加えて、各々のセンサ類の役割を次の①～⑤に示す。

① LiDAR：前後左右に各 2 つずつ計 8 つ搭載、車両周辺 360 度をスキャンし、道路構造物、車両などを検知する
② 望遠・広角カメラ：主に信号の灯火色を検知、それに加え周辺環境検知の補助を行う
③ ミリ波レーダ：側方の車両を検知する
④ ジャイロセンサ：自車位置測定の補正を行う
⑤ GNSS：自車位置推定の補正を行う

また、これらのセンサからの情報を処理するための機器類を追加搭載しており、**図 7** に示すように車室内の 5 座席分のスペースにラックを置いて格納した。



図 7　自動運転機器収納ラック

そして、いすゞがこれまで培ってきた、路線バス開発ノウハウ、例えばバスに普遍的に求められる乗り心地に着目し、立ち席でも不安全にならない減速度を求め、急操舵を抑制するなどの工夫をしながら、自動車として、バスとしての安全性確保に重点を置いて開発した。

この取り組みは、今回の実証実験に留まらず、今後機能を向上させながら繰り返し実施していく予定である。

7　おわりに

これまで乗用車で先行して進められてきた自動運転開発が、将来の社会問題の解決に加え、事業としてのあり方、そして技術的難易度を考慮した上で大きくその方向性を変え、人流・移動サービスの実用化に向かいつつある。

そして、自動運転技術は今まさに過渡期にあり、日々その技術レベルが変化しており、その技術をキャッチアップしながら、自動運転するクルマとしての在り方を考える必要がある。ただし、自動運転を社会実装していくには、クルマ単体だけではなり得ず、インフラとの協調及び社会のしくみづくり、そしてこれを受け入れる人の配慮が欠かせない。

自動運転の社会実装を目指し、それを主導する国としての取り組みを始め、いすゞとして目指すこれから社会を構築するため、個々のプロジェクトで引き続き尽力していく。

本稿は、2021 年 8 月に日本技術士会機械部会で講演した資料を再構成加筆修正したものである。

参考文献

(1)　對馬一昭：トラック・バスの安心安全，月刊技術士，No.4(2020), p.16-19
(2)　国土交通省：トラック運送業の現状等について , (2018), p.2
(3)　国土交通省：バス運転者を巡る現状について , (2014), p.3, p.5
(4)　国土交通省：令和 4 年版交通政策白書 , (2022), p.47
(5)　国土交通省：官民 ITS 構想・ロードマップ 2020, https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001371533.pdf
(6)　内閣府：戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）自動運転（システムとサービスの拡張）研究開発計画 , https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku2/4_jidosoko.pdf
(7)　経済産業省：自動走行の実現及び普及に向けた 取組報告と 方 針 Version5.0,https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/jido_soko/20210430_report.html

著　者



對馬　一昭

論文・報告

モデル予測制御を用いた小型トラック向け自動運転システム

Model Predictive Control for Autonomous Driving System of Medium Duty Truck

鈴木　元哉*
Motoya Suzuki

要　旨

昨今、交通物流改善及び交通事故防止といった社会課題解決に向け、商用車向け自動運転技術開発が活発化している。商用車向け自動運転開発の一環として、いすゞは主力製品であるエルフの自動運転システム開発に取り組んでいる。本システムでは車両運動制御としてモデル予測制御を適用し、自動運転時にはドライバーの操作を介さない自動走行を実現できる。本稿では、現在開発中の自動運転システムの概要を説明する。

Abstract

The practical application of automated driving technology for commercial vehicles will improve the efficiency of logistics. Furthermore, it can solve various social problems such as collision accidents, traffic congestion, and driver shortage. For realizing practical application of automated driving technology, we develop automated driving commercial vehicle for Isuzu “ELF”. The control system is based on model predictive controls. Our automated vehicle can be tracked to target paths with no needs for operations of drivers. In this report, we introduce our automated vehicle.

1　はじめに

自動車業界では、自動運転の研究開発が注目を集めている。自動運転技術実用化により、移動の利便性・物流の効率化等の品質向上が期待できる。また、衝突事故・渋滞等の交通に関する諸問題・運転者不足などのさまざまな社会問題解決に寄与が期待されている[1,2]。特に、米国と欧州の市場おいて、完成車メーカーと部品サプライヤーによる要素技術開発と実証試験が試みられている。自動車業界以外にも、さまざまな新規参入企業による研究開発も多数報告されており、自動運転を用いた配車・物流サービスなどの新たなビジネスが提案されている。日本国内においても、さまざまな自動車メーカーが自動運転システムに関する研究開発へ取り組んでいる。昨今の事例として、自動駐車機能を搭載した車両[3]、運転支援機能を備えた車両[4]等が報告されている。内閣府を中心とした戦略的イノベーション創造プログラム「自動運転（システムとサービスの拡張）」SIP-adus も提示されており、自動運転による大規模な実証実験も発表している。本プログラムでは、2020 年までに限定地域における自動運転サービス、2025 年までに高速道路での完全自動運転実現、を目標として設定している。

自動運転技術開発では、乗用車向けの技術開発が先行しており、商用車の自動運転化が立ち遅れているのが現状である。しかしながら、商用車業界において、運転者不足・過疎地での交通インフラの整備等の諸問題を自動運転にて解消することが期待されている[5、6]。特に、物流需要増加と少子高齢化によるドライバー不足が年々深刻化しており、そのような社会課題を解決するための手段として商用車の自動運転に対する要求が急速に高まっている。高速道路による都市間輸送の隊列走行車両と過疎地では無人運転等が望まれており、企業だけでなく政府と自治体なども研究開発を推進している。乗用車向けに実用化した自動運転技術を商用車へ転用できれば、商用車における自動運転も実現できる。一方、乗用車と商用車では走行条件と車両構造が大きく異なる。例えば、商用車は積載条件が大きく、自重に近い質量の積荷を積載し、走行する。積載物の重量により運動特性が大きく変動してしまい、自動運転の経路追従制御へ悪影響を与える可能性がある。積荷の設置場所によってはコーナリング性能が変化してしまうことも懸念される。また、全幅と全長が乗用車よりも大きい上に、狭い路地での自動配送・運搬も想定される。乗用車よりも高精度な目標軌道追従を実現する必要がある。重量変動の影響と目標軌道追従精度の理由から、乗用車向けの自動運転技術を商用車に転用することが困難だと考えられ、商用車の車両特性に応じた専用の自動運転技術が必要となる。

商用車の車両特性に応じた自動運転技術が必要という背景のもと、いすゞ自動車の先行開発を担うあるいすゞ中央研究所では、商用車固有の自動運転技術の研究開発に取り組んでいる。実証実験を見据えた取り組みとして、エルフをベースとした自動運転小型ト

*㈱いすゞ中央研究所

ラックの試作車を開発した。自動運転小型トラックでは、モデル予測制御にてステアリング角度を計算し、ドライバーの操作を介することなく目標軌道へ追従できる。

2　自動運転小型トラック

本章では、開発した小型自動運転トラックのシステム構成を説明する。**図 1** にエルフの外観図を示し、**表 1** に車両緒元を示す。自重に近い積載物の運搬を想定した車両である。エルフはキャブオーバトラックと呼ばれる車種であり、後輪を回転させることで車両が前後方向に走行する。ラックピニオン式の電動油圧パワーステアリングが搭載されており、ステアリング角度を目標ステアリング角度へ追従させることができる。自動運転機能の概要を説明する。**図 2** に車両制御系のブロック線図を示す。**図 3** に車両と目標軌道の座標系を示す。**図 3** において、e_1 が目標軌道と車両の横偏差、e_2 が目標軌道と車両の方位角偏差、δ がステアリング角度である。本自動運転車両では、車載用 GNSS（全球測位衛星システム：Global Navigation Satellite System）／INS（慣性航法装置：Inertial Navigation System）センサにて車両の自己位置情報を取得する。目標走行軌跡が地図データとしてあらかじめ車載機器に保存されており、目標軌跡と自己位置情報から横偏差 e_1、方位角偏差 e_2、曲率 ρ を計算できる。軌道追従制御器では、方位角偏差と横偏差がなるべく小さくなるように目標ステアリング角度を計算する。狭い路地での配送などを想定し、横偏差が常に 0.1 m 以下となるように走行する。軌道追従制御のアルゴリズムに関しては、**3 章**にて詳細を述べる。目標ステアリング角度を自動操舵用のパワーステアリングへ入力することにより、ステアリング角度を制御する。これらのアルゴリズムが車両制御用筐体である dSPACE 社製の AutoBox に実装されており、サンプリング時間

表 1　車両パラメータ

Symbol	Vehicle parameters		
	Description	Value	Unit
M	Total mass	3250	kg
l_f	Distance COG to front	1.185	m
l_r	Distance COG to rear	1.305	m
C_f	Front cornering power	93000	N/rad
C_r	Rear cornering power	92000	N/rad
I	Yawing moment	4.200	kgm^2
-	vehicle overall width	1.895	m
-	vehicle overall length	5.390	m
-	vehicle overall height	2.920	m



図 1　いすゞエルフ

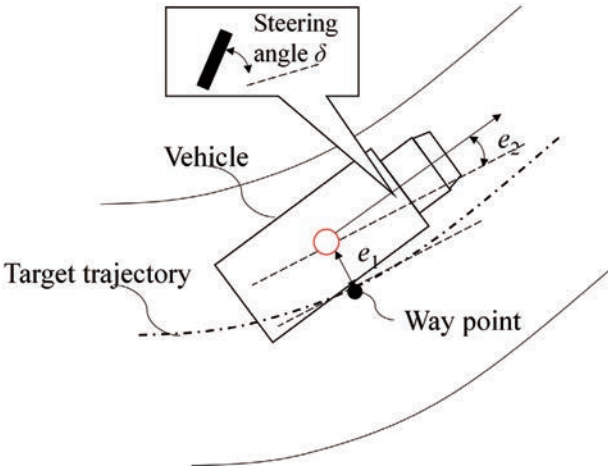


図 3　軌道追従システム

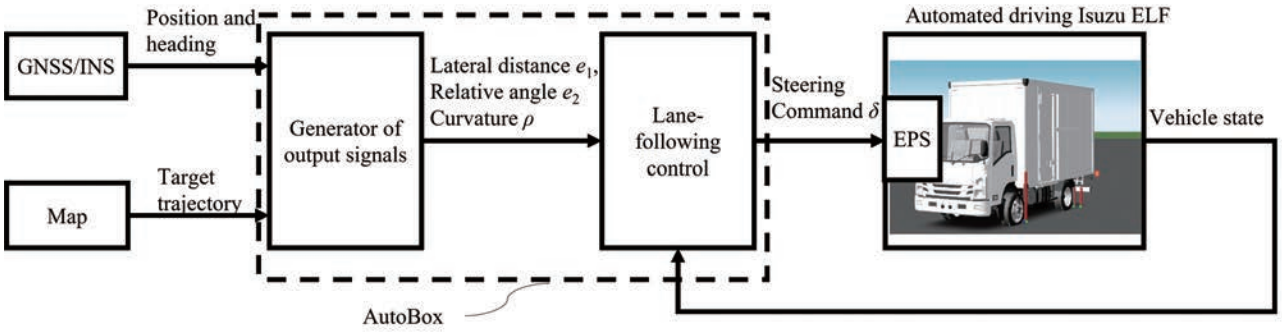


図 2　自動運転いすゞエルフのシステム構成

0.01 s の計算周期で実行される。本システムでは、ドライバーによるハンドル操作とアクセル・ブレーキ操作をせずに車両を目標軌跡に沿って自動的に走行させる。

3　軌道追従制御

自動車のステアリングシステムでは、ステアリング角度とステアリング角速度の上下限値が決まっており、パワーステアリングに起因する制約条件を考慮した軌道追従制御を実装する必要がある。先行研究では制約条件を考慮しながら軌道追従を実現するため、軌道追従制御則にMPC（モデル予測制御：Model Predictive Control）を適用することが提案されている[8-10]。本自動運転トラックにおいても、モデル予測制御にて軌道追従を実現する。

3.1 予測モデリング

MPC では、将来的な車両挙動を予測するための予測モデルが必要となる。ここでは、トラックの動特性を線形な等価二輪モデルとして導出する。参考文献[11]によれば、横偏差と方位角偏差を含む車両の状態方程式は次の式 (1)～(4) のように表現ができる。

［表記］論文中の数式に対する表記について説明する。サンプリング時間 ts の離散時間信号 w を表記する場合、時刻 $t=tsk$ における値を $w[k]$ と表記する。また、文脈から明らかな場合は連続時間信号の変数 t と離散時間信号の変数 k の表記を省略することがある。

$$\dot{x} = Ax + Bu + D\rho \quad \cdots (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{2C_f + 2C_r}{mv_x} & -\left(v_x(t) + \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{mv_x}\right) & 0 & 0 \\ \frac{2C_r l_r - 2C_f l_f}{Iv_x} & \frac{2C_r {l_r}^2 - 2C_f {l_f}^2}{Iv_x} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -v_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \cdots (2)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{m} \\ \frac{2C_f l_f}{I} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \cdots (3)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -v_x \end{bmatrix} \quad \cdots (4)$$

v_y は車両の横速度、v_x は車両の縦速度、ψ はヨー角、v は車両速度、δ は目標ステアリング角度、ρ が道路の曲率である。本稿では、この状態方程式を用いてモデル予測制御を設計する。

3.2 評価関数の設定

乗用車の自動運転システム開発において、さまざまなモデル予測制御の評価関数が提案されている。代表的な事例として、乗用車向けの評価関数を次のように提案した[2]。

$$J = \int_t^{t+t_p} \left(w_1 \dot{e_2}^2 + w_2 \dot{\psi}^2 + r\dot{\delta}^2\right) d\tau \quad \cdots (5)$$

$$e_{1min} \le e_1 \le e_{1max} \quad \cdots (6)$$

$$\Delta\delta_{min} \le \Delta\delta \le \Delta\delta_{max} \quad \cdots (7)$$

w_1、w_2、r は重み係数である。式 (7) の評価関数を最小化できれば、ヨーレートとステアリング角速度を低減でき、横方向のジャーク低減による積み荷の荷崩れ防止と乗り心地向上を実現できる。横偏差の上下限値を制約条件として設定しているため、車両が道路から逸脱しないようにステアリング角度を計算できる。一方、式 (7) の評価関数では横偏差と方位角偏差をステージコストとして扱っていないため、車両の横偏差と方位角偏差が小さくなるようにパラメータ調整できない。トラックの自動運転では狭い路地での走行・配送が想定される。車幅全幅と全長が乗用車よりも長いため、横偏差と方位角偏差をなるべく低減することが望まれる。また、状態変数である横偏差を制約条件として設定してしまうと、外乱等の影響による制約侵害（制約値が破られる）が懸念される。制約侵害が起きれば、最適な制御入力がない不安定な状態に制御系が陥ってしまう可能性がある。評価関数と制約条件に関する考察から、乗用車向けの MPC をトラックに適用することは容易でないと考えられる。

そこで、本システムでは小型トラック用軌道追従制御の評価関数を次のように設定した。

$$J_n = \sum_{k=1}^{N} \left(Q_1 {e_1}^2[k] + Q_2 {e_2}^2[k] + R_u \delta^2[k] + R_\Delta \Delta\delta^2[k]\right) \quad \cdots (8)$$

$$\delta_{min} \le \delta \le \delta_{max} \quad \cdots (9)$$

$$\Delta\delta_{min} \le \Delta\delta \le \Delta\delta_{max} \quad \cdots (10)$$

N は予測ホライズンである。Q_1、Q_2、R_Δ、R_u は、重み係数である。$\Delta\delta$ は一サンプル間のステアリング角度の変化量である。評価関数 Jn は、横偏差、方位角偏差、目標ステアリング角度、目標ステアリング角度の変化量の 4 つの項から構成される。評価関数の項に横偏差と方位角偏差が含まれているため、重み調整にて高精度な軌道追従を実現できる。制約条件に関しては、制約侵害のリスクを避けるため、目標ステアリング角度の上下限値と目標ステアリング角度の変化量のみとした。自動運転小型トラックでは、上記アルゴリズムを Mathworks 社 の Matlab/Simulink の Model

predictive control Toolbox を用いて AutoBox に実装した。**3.1 節**の状態方程式をゼロ次ホールド法にて離散化し、モデル予測制御の予測モデルとして適用した。式 (8) の評価関数は KWIK アルゴリズムにて実時間で最小化される [12]。本稿では、横偏差が 0.1 m 以下となるように MPC のパラメータを N=11、Q_1 = 23.25、Q_2 = 7.5、R_Δ = 4、R_u = 75 と設定した。ステアリング角度の制約に関しては、δ_{max} = 13.9626、δ_{min} = -13.9626、$\Delta\delta_{max}$ = 0.004、$\Delta\delta_{min}$ = -0.004 と設定した。

4　走行試験

本章では、自動運転小型トラックのテストコースにおける走行確認結果について述べる。

4.1 走行条件

図 4 にテストコースの目標軌跡を示す。**図 4** のテストコースは、いすゞ自動車内のコースである。本試験では、楕円状のテストコースを CCW 方向に自動旋回させる。安全上の理由から計測器と搭乗員以外の積載物がない条件下にて車両を制御する。計測器と搭乗員の質量は約 350 kg である。コクピットにはセーフティドライバー（以下「ドライバー」と略す）と試験指示者の二名が搭乗する。安全上の観点からドライバーが運転席へ搭乗するが、自動運転中のドライバーからのハンドル・アクセル操作を介さずに車両を自動走行させる。走行速度制御に関しては、クルーズコントロールにて車両の速度が徐行速度 5 km/h となるように設定した。

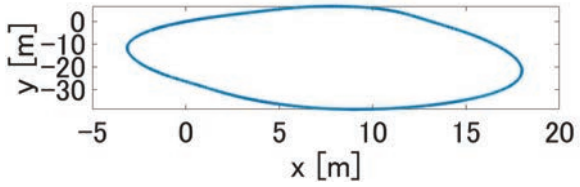
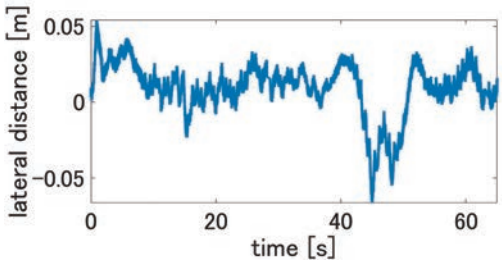


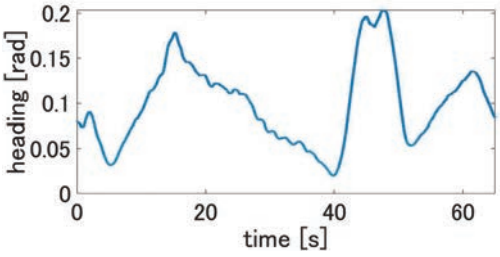
図 4　目標軌跡

4.2 試験結果

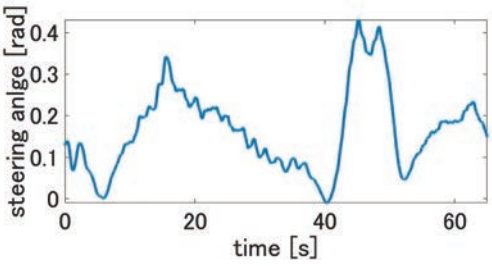
図 5 に制御応答を示す。**図 5** は車両の走行速度 5 km/h で車両がテストコースを一周した際の時系列データである。横偏差が 0.1 m 以下に収まっていることがわかる。ドライバーによるハンドル操作を介さずに車両が目標軌跡に沿って走行していることがわかる。ステアリング角度も上下限内におさまっており、アクチュエータの制約を守りながら軌道追従できていることがわかる。定性的なコメントではあるが、搭乗したドライバーが違和感のない走行を実現できた。本結果から、開発した自動運転小型トラックにて高精度な軌道追従を実現できることがわかった。



(a) 横偏差



(b) 方位角偏差



(c) 操舵角

図 5　実験結果

5　積載の影響分析

4 章の確認走行では、安全上の理由から積載物がない条件下にて車両を走行させた。一方、実用化と実証試験を見据えると、積載条件が自動運転小型トラックへ与える影響を分析する必要がある。そこで、高精度な車両シミュレータを活用し、積載による影響を分析する。

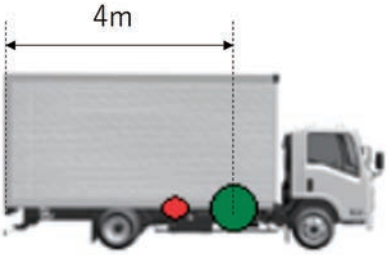
5.1 車両シミュレータ

車両シミュレータとして、Matlab/Simulink と Truck maker を組み合わせた数値シミュレータを用いる。Truck maker とは商用車のテスト専用シミュレーションである。Truck maker の車両モデルとテストコースモデルはさまざまな実験に基づいて設計されており、現実の車両と道路の特性を高精度に再現できる。本シミュレーションでは車両モデルと走行コース

を Truck maker にて構築し、**図 2** の AutoBox 内に実装されている Matlab/Simulink のプログラムを用いた。テストコースに関しては、**図 4** の走行コースを適用した。本シミュレーションにて積載条件が制御応答へ与える影響を分析する。ただし、予測モデルのパラメータを **表 1** の空車時のパラメータとして設定する。**図 6** に本シミュレーションにおける積載物の配置条件を示す。赤丸が積載していないときの車両の重心位置、緑丸が積載物の設置位置である。本シミュレーションでは、車両に 2 トンの積載物を緑丸の場所へ設置する。積載配置場所の影響を考え、車両後方から 1 m と 4 m の位置にそれぞれ積載物を設定した。この積載条件にて、**図 4** のテストコースを走行できるか検証した。



(a) 後位置での積載

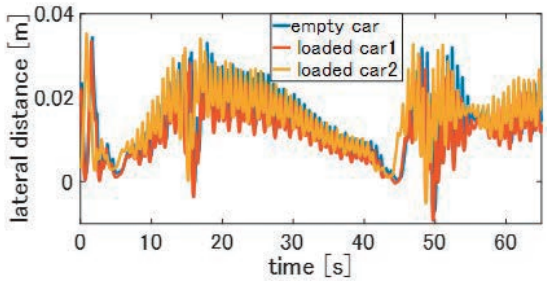


(b) 前位置での積載

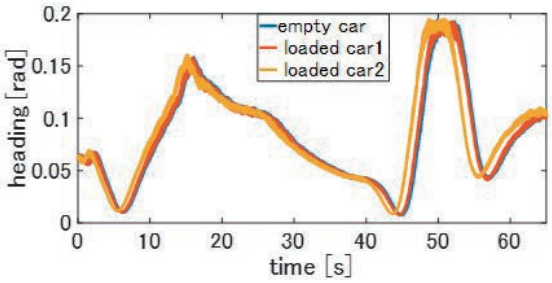
図 6　積載時の様子

5.2 数値シミュレーション結果

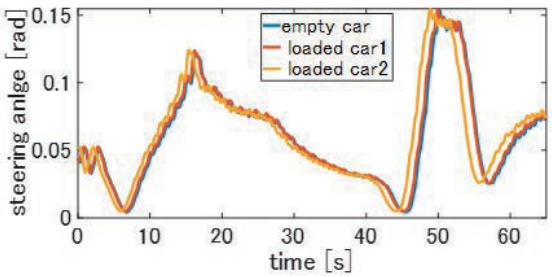
数値シミュレーション結果を**図 7** に示す。青線が空車時の制御応答、赤線が車両後方から 1 m の位置に積載した際の応答、黄線が車両後方から 4 m の位置に積載した際の制御応答である。積載変動による制御応答の差異がほぼ見られないことがわかる。車両後方から 4 m の位置に積載したときのみ制御応答の位相が変化しているが、横偏差は 0.1 m 以内まで抑えられていることがわかる。望ましい軌道追従精度を達成できたため、積載した際にも高精度な軌道追従制御を実現できることを確認できた。一方、積載物の設置位置によって応答性が変化してしまうため、制御系を設計する際には積載位置を考慮する必要がある。



(a) 横偏差



(b) 方位角偏差



(c) 操舵角

図 7　シミュレーション結果

6　おわりに

本稿では、研究開発活動の一環として自動運転小型トラックを試作開発した。モデル予測制御を用いた軌道追従制御を設計し、テストコースにて高精度な軌道追従を実現できることを確認した。また、実証試験・製品化を見据えた試みとして、積載物が軌道追従制御へ与える影響を分析した。数値シミュレーションの結果、走行速度が低ければ積載条件の影響をほとんど受けないことがわかった。今後はさまざまな積載条件下において、ロバスト性の高い軌道追従制御を開発する必要がある。また、本稿では軌道追従制御に関する説明のみとなったが、速度制御においても商用車固有の技術が求められている。今回の走行試験では徐行運転相当の速度 5 km/h にて検証したが、実証実験に向けてさまざまな速度条件での検証も必要となる。実用化に向けて多くの課題も残されており、継続的な技術開発が必要となる。

参考文献

(1) A.Geiger, et al.: “Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite,” In 2012 IEEE conference on computer vision and pattern recognition, (2012), p.3354-3361.

(2) M.Nagai: Evolution and Evaluation of Safety Offered by Active Safety, ADAS, and AD Systems, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.32, No.3(2020), p.484-493.

(3) Y.Hamaguchi et al.: Automated Steering Control System for Reverse Parking Maneuver of Semi-Trailer Vehicles Considering Motion Planning by Simulation of Feedback Control System, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.32, No.3 (2020), p.561-570.

(4) Y.Suda, K.Aoki: Current activities and some issues on the development of automated driving, Journal of Information Processing and Management, Vol.57, No.11 (2015), p.809-817.

(5) American Transportation Research Institute, “Indentifying Autonomous Vehicle Technology Impacts on the Trucking Industry,” 2016.

(6) 日本トラック協会,“日本のトラック輸送産業の現状と課題2021,”p. 1-64, 2021.

(7) 永山浩二 ： いすゞ「エルフ」の半世紀, いすゞ技報, No.123 (2011), p.35-39.

(8) C.E.Garcia et. Al: Model predictive control: Theory and practice-A survey, Automatica, Vol.25, No.3 (1989), p.335-348.

(9) R.Nakahara et.al: Model predictive braking control for heavy-duty commercial vehicles considering response delay of air-brake, International journal of automotive engineering, Vol.11, No.4 (2020), p.177-184.

(10) E.Kim et. Al: Model predictive control strategy for smooth path tracking of autonomous vehicles with steering actuator dynamics, International Journal of Automotive Technology, Vol.15, No.7 (2014), p.1155-1164.

(11) R.Rajamani: Vehicle dynamics and control 2nd edtion, Springer Science & Business Media, (2011).

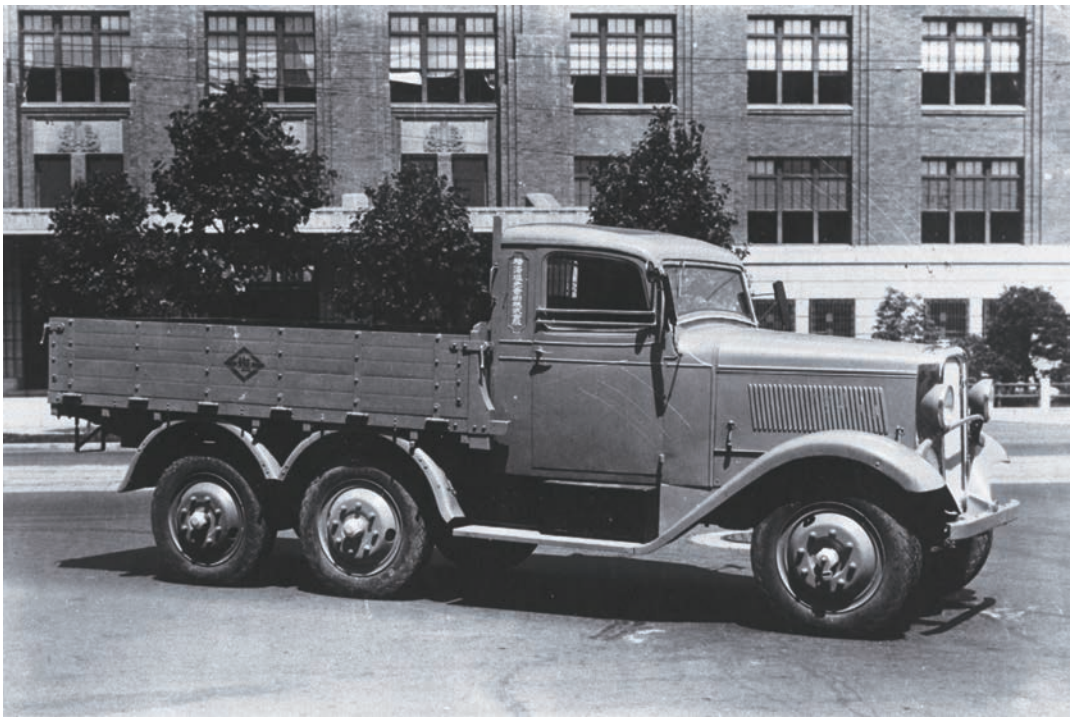
(12) Y.Irie, D.Akasaka: Trajectory Generation Using Model Predictive Control for Automated Vehicles-Maximize Usage of Road Width Like A Skilled Human Driver, International Journal of Automotive Engineering, Vol.12, No.1 (2021), p.24-31.

著　者



鈴木　元哉

◇いすゞ歴史の一こま



TU10型6輪トラック（1938年ごろ）

論文・報告

機能安全への取り組み

Approach to Functional Safety

阿部　信之*　Nobuyuki Abe
川崎　勝也*　Katsuya Kawasaki
小島　勝昭*　Katsuaki Kojima
越沢　俊文*　Toshifumi Koshizawa

要　旨

自動車の電気・電子システムが大規模化・複雑化する中、車両開発における機能安全への取り組みは、重要性を増している。

本稿では、機能安全に関する自動車業界のセクタ規格である ISO 26262 の成り立ちと規格要求事項の概要を解説し、いすゞ自動車における車両開発プロセスへの ISO 26262 規格要求事項の適用と商用車特有の取り組みについてまとめた。

Abstract

Vehicle development in accordance with ISO 26262 is becoming increasingly important as electrical/electronic systems become larger and more complex.

This paper describes the origins of ISO 26262, outlines the requirements of the standard, and summarizes its application to Isuzu Motors' Ltd.'s vehicle development process and approaches specific to commercial vehicles.

1　はじめに

自動車には多くの電気・電子システムが搭載されている。電気・電子部品が故障した結果発生する人への危害を、可能な限り少なくするための開発手段の一つが国際標準規格 ISO[1)] 26262 [(1)] 機能安全である。

ISO 26262 は自動車業界用のセクタ規格となっており、乗用車を中心に取り組みが進んで来たが、2018 年 12 月に発行された第 2 版から商用車も取り組みの対象となった。

本稿にて、いすゞ自動車の車両開発プロセスへの ISO 26262 規格要求事項導入時の考慮事項、及び商用車特有の機能安全への取り組みについて紹介する。

注 1) ISO（国際標準化機構：International Organization for Standardization）

2　ISO 26262 の成り立ち

2.1　規格の特徴

ISO 26262 は自動車の電気･電子及びソフトウェアコンポーネントで構成された安全関連システムに適用する規格であり、自動車業界の標準規格となっている。適用する期間はライフサイクル全般であり、自動車が開発、生産され、ユーザが使用し、最後に廃棄するまでが対象である。活動はアイテムと呼ばれる装置の単位で規格の要求事項に則り実施する。自動車開発時の検証方法、テスト方法、故障率の算出など、技術的内容にも細かく言及していることが本規格の特徴である。

2.2　機能安全規格の位置付け

機能安全規格 IEC[1)]/ISO 61508 を親規格とし、各種業界向けセクタ規格が制定されている。セクタ規格はプロセス産業、機械製造、交通運輸、医療器械全分野などのさまざまな分野があり、その中で自動車に特化したセクタ規格が ISO 26262 である。各種セクタ規格については**図 1** を参照のこと。

注 1) IEC（国際電気標準会議：International Electrotechnical Commission）

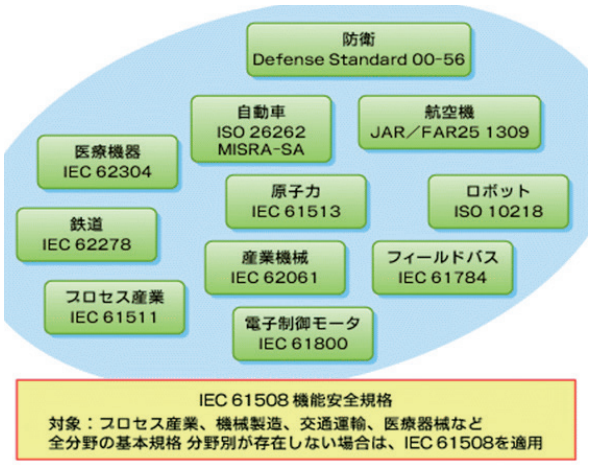


図 1　IEC/ISO 61508 と各種セクタ規格

2.3　ISO 26262 策定の背景

電気・電子システムが大規模化・複雑化する中、欧州を起点に「品質」、「環境」に続く第三の波として“安全”に関する規格化の動きが高まってきたことを背景に、安全に関する ISO 26262 が 2011 年に発行された。

*法規・認証部

2.4 ISO 26262と他のISO規格との関係

ISO 26262はISO 9001及びIATF[1)] 16949等の品質管理をベースに安全の考え方を更に拡張したもので、品質管理を実施されていることが機能安全活動実施の前提である。

また、今後は自動運転及び先進運転支援システム開発などに取り組むに当たり、新たに制定されたSOTIF（意図した機能の安全性：Safety of the Intended Functionality）（ISO 21448: 2022）(2) 及びサイバーセキュリティエンジニアリング（ISO/SAE [2)] 21434: 2021）(3) などの規格も考慮し、活動する必要がある。

注[1)] IATF（国際自動車産業特別委員会：International Automotive Task Force）

注[2)] SAE（自動車技術者協会：Society of Automotive Engineers）

2.5 機能安全の対象システム

自動車開発における機能安全の対象システムは、故障により、人に危害を及ぼす恐れのある電子制御システムである。例えばADAS（先進運転支援システム：Advanced Driver-Assistance Systems）、エンジン、駆動系、操舵系システムといった装置である。一般的にリスクが高い装置というのは、ドライバが操作していないにも拘らず、装置が意図せず作動し、走る、曲る、止まるに影響が出るシステムである。

2.6 ISO 26262対象車種

ISO 26262が対象とする車種は、モペッド（ペダル付きの原動機付自転車）を除いた量産車両である。2018年の12月に発行されたISO 26262規格第2版では、それまでの車両総重量3.5 tまでの乗用車という括りがなくなり、全ての量産車両が対象である。

2.7 ISO 26262を採用する理由

自動車製造業者がISO 26262を採用する主な理由は、次のa)～c)である。

a) 品質･安全の確保
b) 法規に準ずる国際規格への準拠
c) 社外への説明責任

ISO 26262を採用する1つ目の理由である品質・安全の確保は、昨今高度化する車載電子システムにおいて、ISO 26262を活動することで、“State of the Art”（考え得る最新の技術）により安全を担保することができる。

2つ目の理由「法規に準ずる国際規格への準拠」は、国内外を問わず自動車業界として、標準規格となっており、法規ではないが、いすゞもこの規格に準拠する必要があると考えている。なお、法規の中にISO 26262の説明を求められている物もあり、法規動向にも留意する必要がある。

例）
- UN[1)]-R79-04: ステアリングなどのかじ取り装置に関わる車両の認可に関する統一規定
- GB[2)]17675-2021: 自動車のステアリングシステム基本的要件

3つ目の理由「社外への説明責任」は、対外的に安全性作り込みの説明を行う際に、国際規格に基づいていなければ、自社の基準で安全に配慮した開発手法を取ったと主張しても社外への説明責任を果たしたとみなされない。結果として懲罰的なペナルティを科せられ、社会的な立場が揺らぐ恐れがある。

注[1)] UN（国際連合：United Nations）

注[2)] GB（中国国家標準規格：Guo jia Biao zhun）

3 ISO 26262規格要求事項の概要

3.1 機能安全を達成するためのアプローチ

故障しても安全であることを目指すのが機能安全の基本である。そのために、故障を系統別にランダム故障とシステマチック故障の2つに大別している。また、リスク分析によるASIL（自動車安全水準:Automotive Safety Integrity Level）導出、それに対する安全方策の割当てが機能安全達成には必要である。

3.1.1 ランダム故障

ランダム故障は、確率分布に従い発生する予測できない故障である。これには故障が発生しても安全な状態を保つ仕掛け（安全機構）を入れて対策をする。例えば、意図しない加速という故障の場合、故障発生を検知し、危険事象が発生する前に過剰な燃料噴射を抑制する安全機構を設け、意図しない加速を防ぐ対策。

3.1.2 システマチック故障

システマチック故障は設計プロセス、製造プロセスの変更に運用手順、文書化など、またはそのほかの関連要素により除外できる故障である。例えば、ソフトウェアのバグが原因の場合、バグを検出する検証手法を確実に実施するプロセスを設ける。これにより、プロセスに従い活動することでバグを防ぐことができる。

3.1.3　リスク分析

リスク分析は活動するアイテム単位で実施する。作業成果物のアイテム定義を作成し、機能ごとに関わる各装置とのインタフェースを明確にする。インタフェースごとにガイドワードを用いたHAZOP（Hazard and operability study）を使用し、故障モードを導出する。故障モードが実際にどんな状況で発生したら、どのようなリスクが起きうるかをHARA（ハザード分析及びリスクアセスメント：Hazard Analysis and Risk Assessment）で分析を行う。HARAでは安全目標とASILを導出する。

安全レベルのE（エクスポージャ：Exposure）は暴露確率とも呼ばれ、暴露確率とはシチュエーションの起こり得る確率を示す。これは部品が故障する確率ではなく、故障が発生する運転状況となる確率。例えば、直線道路走行に対して、急カーブの道路を走行することはまれである。

安全レベルのS（シビアリティ:Severity）は危害度とも呼ばれ、人への影響のことである。これは、米国で策定された人体の傷害尺度AIS（簡易式外傷スコア：Abbreviated Injury Scale）を使用し分類する。

安全レベルのC（コントローラビリティ：Controllability）は制御可能性とも呼ばれ、危険な事象になる前に危険をどのように回避できるかをシチュエーションと絡めて分類する（ISO 26262: 2018、Part3 6.4.3　危険事象の分類）。

エクスポージャ、シビアリティ、コントローラビリティそれぞれの簡易的な分類を**表1**へ示す。

表1　エクスポージャ、シビアリティ、コントローラビリティの簡易的な分類

E（Exposure）

E0（無い）	E1（稀に）	E2（時々）	E3（よく）	E4（かなり）

C（Controllability）

C0（不要）	C1（容易）	C2（可能）	C3（困難、不可）

S（Severity）

S0（無し）	S1（軽症）	S2（重症）	S3（致命傷）

ASILは3つの安全レベル、エクスポージャ、シビアリティ、コントローラビリティの度合いで決める（ISO 26262: 2018、Part3 6.4.3.10）。**表2**にASIL決定表を示す。

表2　ASIL決定表

シビアリティ	曝露の確率	コントローラビリティ		
		C1	C2	C3
S1	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	QM
	E3	QM	QM	A
	E4	QM	A	B
S2	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	A
	E3	QM	A	B
	E4	A	B	C
S3	E1	QM	QM	A
	E2	QM	A	B
	E3	A	B	C
	E4	B	C	D

3.1.4　安全分析

リスク分析後、リスクに応じた手当をしていく。リスク分析でインタフェースを明確にしたが、これに対応してどのインタフェースに手当をするかを明確化していく。手当は安全要求と呼ばれ、抜けがないように確実に安全要求を付与する。安全要求はシステムレベル、最終的にはハードウェアレベル、ソフトウェアレベルまで詳細化する。

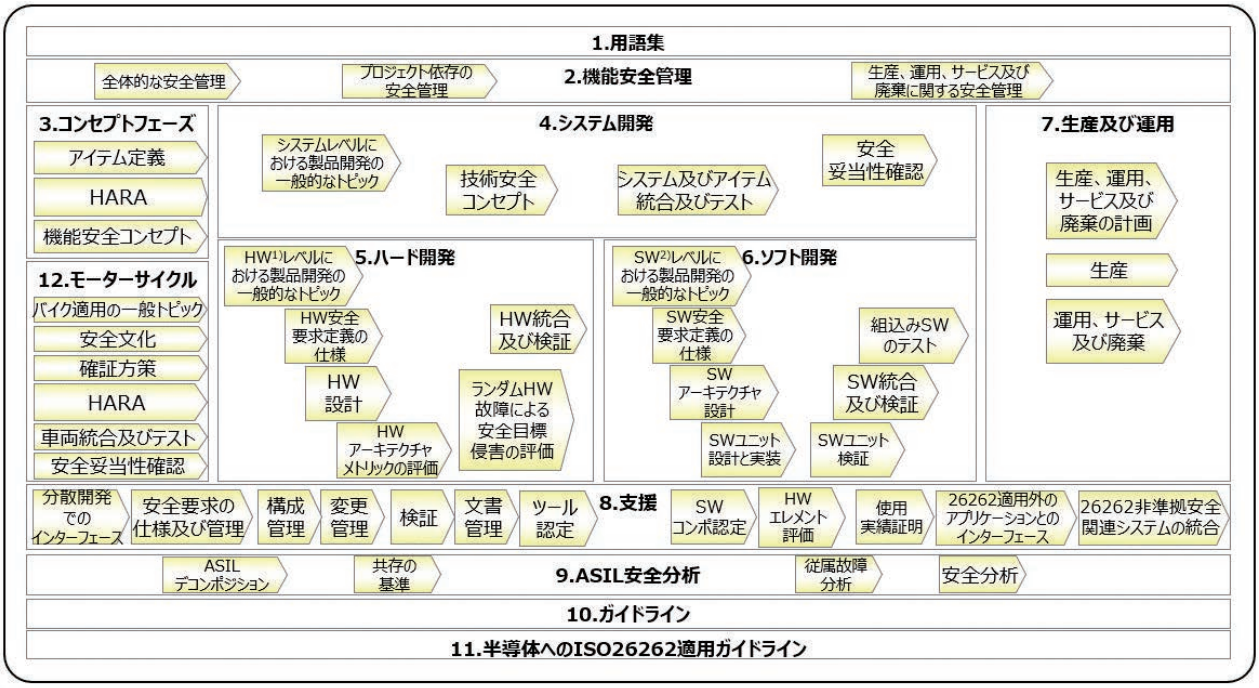
安全要求が確実に付与されているかを検証し、各安全要求に、規格で定められた手法に基づきテストを実施し、その結果を安全分析の報告書とする。

3.2　機能安全を達成するためのISO 26262構造

ISO 26262規格は12の章（Part）、約750頁で構成されている。開発及び生産の業務に関するマネジメントを説明したPart2。開発及び生産の流れそのものを説明したPart3からPart7まで。開発及び生産の業務を支える仕組みまたはルール等を説明したPart8、Part9が主なところである。その他、Part10は活動に関わるガイドライン、Part11は半導体へのISO 26262適用ガイドライン、Part12はモーターサイクルである。ISO 26262の規格構造を**図2**に示す。

3.3　車両開発全体としての取り組み

ISO 26262は車両開発全体での取り組みが求められている。通常、車両の開発は分散開発で自動車製造業者と、構成する部品を開発する多くのサプライヤーで行っている。そのため、戦略的な部品調達など、自動車製造業者、サプライヤー間の責務範囲を明確にする必要がある。機能安全活動ではDIA（開発インタフェース協定：Development Interface Agreement）と呼ばれる作業成果物において、お互いの責務範囲を明確にする。それにより、機能安全活動のプロセスの中で自動車製造業者、サプライヤーの実施することが明確になり、車両開発全体が規格に沿った取り組みとなる。



略語　注1)HW（ハードウェア：Hardware）、注2)SW（ソフトウェア：Software）

図 2　ISO 26262 規格構造

4　いすゞ自動車での取り組み

4.1 ギャップ分析

ISO 26262 の導入に先立ち、最初にギャップ分析を行った。規格の要求事項に既存のプロセスで対応できる項目は新しく規定を制定する必要はない。どの程度既存のプロセスに合致しているかギャップ分析を行い、新規で作成が必要になる要求事項を明確化した。

4.2 作業成果物について

自動車製造業者は装置の仕様などのコンセプトレベルに関する作業成果物を作成し、サプライヤーはシステムレベル以降のソフトウェア及びハードウェアなどに関する作業成果物を作成する。

ギャップ分析の結果、4 割は社内分、6 割がサプライヤー分となり、多くがサプライヤーの作業成果物となる。また、社内の作業成果物の内、新規 3 割、既存修正 6 割、既存流用 1 割となり、一部が既存の開発成果から流用可能であるものの、全ての作業成果物において作成ガイドとなる作成要領書を準備する必要があり、大分類の 5 項目、小分類の 30 項目を社内規定化した。

作成要領書に付属しているテンプレートは規格の要件に準じて作成した。各担当者はこのテンプレートを使用し作業成果物を作成するが、規格は解釈が難しいケースがあるので、分かりやすい記入例を示したサンプルを用意し、効率よく活動を推進できるようにした。

4.3 教育について

機能安全に関わる当事者は、機能安全活動を遂行するに当たり必要十分なレベルの能力を求められており（ISO 26262：2018、Part2 5.4.4　能力管理）、レベル別に教育を実施している。**表 3** に教育項目を示す。

基礎講習は活動に携わる全ての関係者が受講するもので、基本的な機能安全活動の知識を習得する内容となっている。主に機能安全活動の必要性、またはプロセスの流れ、機能安全に携わる各担当者の役割などを説明したものである。

表 3　教育項目

規格上必要な講習	基礎レベル	・機能安全の考え方の概略理解 ・社内ルール、活動実態の概略の理解 ・ISO26262規格構成全体の理解
	中級レベル	・ISO26262規格要求に基づき、OEM責任として実施すべき内容の理解 ・OEMが作成する各成果物の、考え方と作成方法の理解 ・具体的業務フローと、各部署の責任分担、構成管理の理解
	上級レベル	・ISO26262規格がサプライヤに求めている内容の理解 ・OEMとして、サプライヤの成果物をチェック、承認する知識の習得
有資格認定講習	安全管理者	・ISO26262の活動全体を掌握し、プロジェクトに沿って推進させるための　知識の習得
	アセッサ	・ISO26262の各成果物に対する要求に対し、その履行が 確実か否か判断するための知識の習得。

中級講習は基礎講習の履修者が対象となり、機能安全活動の実務、特に自動車製造業者が主に担当するコンセプトフェーズ（前述**図 2** 参照）からシステム開発を主体とした内容となる。実際に使用する作業成果物のサンプルを用いながら実践的な教育を行う。

上級講習は中級講習の履修者が対象となる。教育内容は主にサプライヤーの活動で作成された作業成果物、ハードウェアとソフトウェア領域の内容であり、これらをチェックできる知識を習得する目的で設定している。

このほかに安全管理者教育、アセッサ教育を設けている。機能安全活動で重要な役割を果たすこれらの役割は有資格業務として設定し、履修することで各役割に付くことができる。

安全管理者は機能安全活動の推進役である。教育ではプロセスを理解し、各作業成果物の作成の仕方を習得する。

アセッサは規格の観点から活動の規格準拠性をチェックする役割である。教育では確証方策の理解と、各作業成果物の作成の仕方を習得する。

4.4 支援について

作業成果物を作成する際に、記載内容のレベル感、程度感に迷うことが良くある。規格の要求事項の一部は漠然とした記載をされていることがあり、判断が難しい場合がある。このような場合、支援チームがサポートし、必要に応じて外部のコンサルタントに業界の相場観など情報提供を受けながら、作業成果物の作成を支援する体制を整えている。

5 商用車の機能安全

5.1 乗用車と商用車の違い

ISO 26262 規格の第 2 版から商用車もスコープに入った。商用車の機能安全活動における特徴は次の a)～d) に示す。

a) 多品種な車型
b) さまざまな車両総重量
c) 架装物を搭載する
d) 立席も備えた乗り合いバスも対象

5.1.1 多品種な車型

お客様の多用途、多目的なニーズに答えるため車型の種類が多く、車両運用状況、ホイールベースまたは車軸の違いなど、多くのバリエーションが一つの車型に含まれることが商用車の特徴である。機能安全活動で注意すべき点はリスク分析の際に全ての車型を網羅したシチュエーションを想定し、分析していることが必要である。**表 4** にシチュエーション分析をする際に分析要因となる項目と、その要因パターンとなる種類を示す。

表 4 シチュエーション分析をする際の分析要因と要因パターン

分析要因		要因パターン
ベース車両		トラクタ，大型トラック，中型トラック，小型トラック等
車両構成		サイズ(ホイールベース，フレーム長，車幅)，エンジン，車軸数等
車両運用	牽引有無	牽引，牽引ではない場合
	積載状況	空車，フル積載，偏荷重等
衝突相手		全ての車種

シチュエーション分析に必要なエクスポージャ、シビアリティ、コントローラビリティの商用車用の各テーブルが ISO 26262 第 2 版には掲載されている（ISO 26262:2018、Part3 付属書 B）。

シビアリティの算出には、相対速度と重量比が関係する。例えば同じ速度で走行していた乗用車同士の正面衝突であれば、お互い衝突する時に被害はほぼ同じなる。ところが、一方が大型商用車の場合、被害は重量配分で決まるため、乗用車の方が被害が大きい。

図 3 に異なる車両総重量の衝突被害のイメージを示す。乗用車とトラックが正面衝突した場合、極端に重量比が異なる場合は乗用車に大きな被害があることに注意が必要である。



図 3 異なる車両総重量の衝突被害のイメージ図

これを元にシチュエーション分析、HARA を行い、一番リスクの高いワースト条件の ASIL を導出する。**図 4** に ASIL 検討のイメージを示す。

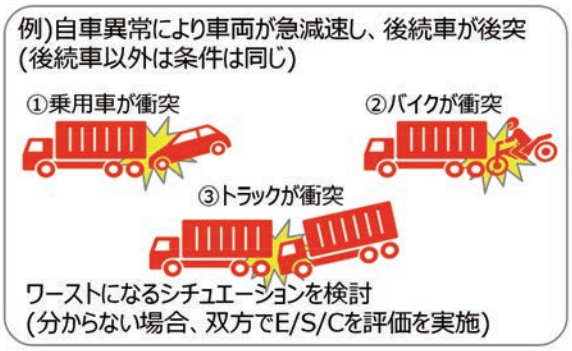


図 4　ASIL 検討のイメージ図

また、多品種生産の場合、まれに 1 年に 1 台しか生産しない車型も存在する。この場合、生産台数が少ないから、リスクも減少すると考えがちであるが、それは誤りである。公道を走るということはリスクも一律に降り掛かるということであり、生産台数に関わらず一様にリスクを考慮する必要がある。なお、規格にも同様の考えが記載されている（ISO 26262: 2018、Part3 6.4.5.4　及び 6.4.5.5）。

5.1.2　さまざまな車両総重量

車両の種類により総重量がさまざまであり、それに応じた機能安全活動をする必要がある。特に、積載有無による影響はリスク分析をする上では外すことはできない。**図 5** に空車重量と積載量の関係を示す。定積と空積では車両の挙動が大きく変わることが考えられるため、それに応じたシチュエーションを想定しリスク分析を実施しなくてはならない。

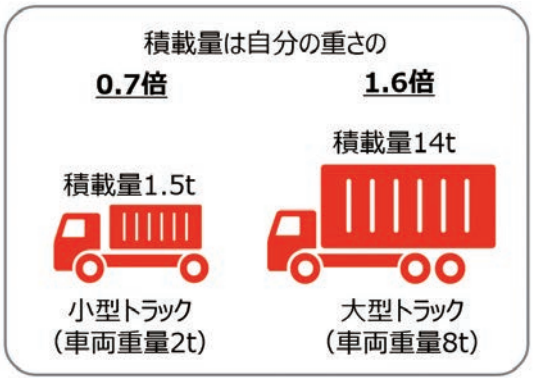


図 5　空車重量と積載量の関係

5.1.3　架装物を搭載すること

商用車は用途により架装物を搭載することでより専門性の高い用途に適用できることが特徴である。

この場合架装物と車両がセットで自動車として成立することになるため、ISO 26262 を準拠するには、自動車メーカ、架装メーカの双方がお互いに機能安全に影響が出ないように推進する必要がある。架装物に関しての考え方を架装要領書に記載し、申し送りをする。

5.1.4　立席も備えた乗り合いバスも対象

商用車には乗合バスも含まれる。立席では吊り手または手すりに掴まり、乗車中の揺れなどから身体を安定させながら乗車しているが、発進時或いは急停止時に吊り手などに掴まりきれずに転倒し車内事故となる。この場合においても乗客は交通関係者となることから、ISO 26262 機能安全の対象となる。

6　おわりに

現在、CASE（コネクテッド、自動運転、シェアリングサービス、電動化：Connected, Autonomous, Shared & Services, Electric）を意識した自動車開発が進められており、多くの複雑な制御装置を搭載し、同時にソフトウェアのコード数も膨大な量となっている。電気･電子システムが大規模化･複雑化する潮流の中で、車両開発における機能安全への取り組みは、より一層確実に実施されなければならない。

参考文献

(1)　ISO 26262: 2018 Road vehicles-Functional safety 自動車 - 機能安全 -
(2)　ISO 21448:2022 SOTIF 意図された機能の安全性
(3)　ISO/SAE 21434:2021 サイバーセキュリティエンジニアリング

著　者


阿部　信之


川崎　勝也


小島　勝昭


越沢　俊文

論文・報告

車両検査設備 インタフェース無線化及びソフト開発

Vehicle Inspection Equipment Wireless Interface and Software Development

高市　壮太*　　八田　達*
Sota Takaichi　　Toru Hatta

要　旨

近年、先進安全装置の充実に伴い、車両検査設備においてEOL(End of Line)書込み・検査の項目が増大しているため、EOL書込み工程で完了待ち時間が発生していた。本稿では、無線を利用した検査システムの構築に伴い車両通信インタフェースと検査ソフトを新たに開発し、EOL書込み完了待ち時間を解消した事例を紹介する。

Abstract

Recently, with the enhancement of advanced safety device, the number of EOL (End of Line) writing and inspection items has increased in the vehicle inspection equipment, which has caused the waiting time for completion of EOL writing in the process. In this article, we introduce an example in which the waiting time for completion of EOL writing was eliminated by newly developing wireless vehicle communication interface and inspection software along with the construction of a wireless inspection system.

1　はじめに

衝突被害軽減ブレーキ・操舵支援機能等の先進安全技術の普及拡大に伴い、自動車技術の電子化・高度化が急速に拡大している。いすゞにおいても、多数の車載ECU（電子制御ユニットElectronic Control Unit）・センシングデバイスが複雑に連携することで先進安全機能を実現しており、今後も自動運転化の流れを受け急速なデバイスの増加とシステムの高度化を見込んでいる。

車載ECU・センシングデバイスの増加を受け、車両検査工程へ要求されるEOL[1)]書込み・検査の項目が年々増加しており生産ラインの工数を圧迫している。小型車検ラインのEOL書込み工程においては、検査員の官能検査作業より作業中に行われるEOL書込み通信の方が時間が掛かり、検査員の待ち時間が発生していた。対策として、別工程へEOL書込み通信処理ができる設備を追加し、EOL書込み時間を分散させて平準化する設備能力増強が1つである。しかし、ハードワイヤで構成する従来の設備において展開できる工程は残されておらず、工程制約の緩和が課題であった。

本稿では、車検端末の更新を機に無線を利用した検査システムを構築し、工程制約を緩和させることで、これまで展開が困難であった工程に設備を展開できた事例を紹介する。

注[1)] 生産ラインの最終工程でECUのメモリにデータを書き込むこと、またダイアグ機能を用いて検査を行うこと。

2　無線を利用した検査システム

無線を利用した検査システムとは、**図1**に示す従来の検査システムにおいてハードワイヤで接続された部分を無線技術によりワイヤレス化したものである。検査サーバ、PC、車両通信インタフェース、OBD（車載式故障診断装置：On-Board Diagnostics）通信ケーブルで基本的に構成され、必要に応じてデジタル入出力デバイス、アナログ入出力デバイス、右ハンドルと左ハンドルの切り替え回路等が追加される。**図2**に示す無線を利用した検査システムでは、PCの代わりに汎用タブレットを採用することで検査サーバと端末間のLAN接続をWi-Fiへ置き換え、ワイヤレスを実現している。また、インタフェースを新規に開発することで、端末とインタフェース間の専用ケーブル接続をBluetoothへ置き換え、更にインタフェースと車両OBDコネクタを一体化することでインタフェースとOBD通信ケーブル間のワイヤレスを実現した。この無線を利用した検査システムで新規開発したインタフェースについては**3章**にて述べる。

*車体技術部

また、EOL 書込み・検査による車載 ECU との通信を実現するには、OBD 通信ケーブル・無線通信による接続に加えて、車載 ECU ごとの要求仕様に適合した検査ソフトが必要となる。インタフェースがワイヤレス接続を実現するために検査ソフトもワイヤレスに対応することが必須であることと、検査システム無線化するために持ち運び可能なタブレット端末で動作する検査ソフトを開発する。タブレット利用にあたってこれまでの Windows 環境に加え、工程の運用用途に合わせた機種の選定の幅を広げるため Android、iOS への対応を行った内容と、今後のソフト開発費低減に向けたソフト構造刷新について **4 章**で述べる。

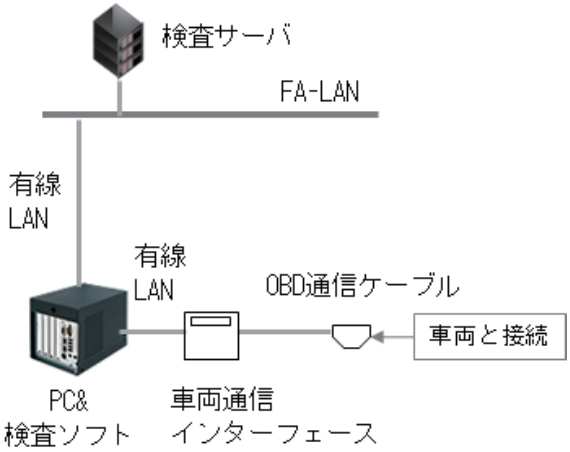


図 1　従前の検査システム

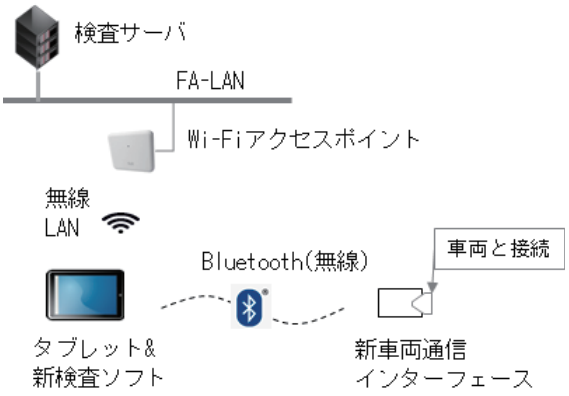


図 2　無線を利用した検査システム

3　車両通信インタフェースの無線化開発

3.1 車両通信インタフェースの役割

いすゞの車検ラインでは、車載 ECU に車両仕様データを書き込み組み立て工場の納入品番の削減に取り組んでいる。また、車載 ECU の自己診断機能・各種診断サービスを利用することで、目に見えないシステム故障、センサ故障、工程での結線不良、誤組み付けを検出し車両出荷品質を確保している。車両検査工程で使用している車両通信インタフェースの役割は PC からの信号を各種車載 ECU の通信仕様に変換することである。車載 ECU との通信仕様は大きく 4 つ存在し、仕様ごとにケーブルを交換することは非効率であるため、複数の通信仕様を PC からの制御信号のみで変更可能な車両通信インタフェースを開発している。一般流通品、他社完成車メーカの車両通信インタフェースは幾つか存在するが、いすゞの採用している通信仕様に全て合致しているものは存在しないためオリジナルでの開発を行っている。

3.2 新規開発におけるコンセプト

従前の車両通信インタフェースは 15 年以上ハードウェアを変更しておらず、車両 OBD コネクタ以外の外部接続コネクタ、新しい通信方式に対応していない。そこで今回、無線化に加え従来の不満点を改善し、いすゞの車両への適合性を向上させる。また無線を利用した検査システムではインタフェースを作業者が常に持ち運ぶこととなるため、従来よりも小型化させ、作業性を向上させる。

3.3 PC- インタフェース間の無線通信仕様の選定

従前・新規開発インタフェースのシステム構成をそれぞれ**図 3**、**図 4** に示す。無線を利用した検査システムでは PC にタブレットを用いる計画のため、タブレットで対応している Wi-Fi と Bluetooth に候補を絞った。そのうち Wi-Fi は検査サーバに接続口を占有されるため、インタフェースとの通信仕様は Bluetooth を採用した。Wi-Fi と比較した Bluetooth の利点は、ペアリングにより接続設定が容易であること、電源 ON から接続までが速いこと、そして消費電力の低さにある。接続距離・通信速度に劣るという欠点は存在するが、タブレットとインタフェースを長距離隔離しての運用、通信速度が要求される大容量データの書き込みに使用する計画はなく、実用性があると判断した。

また、各国 KD（ノックダウン：Knock Down）工場へ展開時に現地側の都合で Bluetooth を使用しない場合を考慮して USB Type-C 端子を実装した。USB 通信では車載 ECU との通信に加えてファームウェアのアップデート、エラーログの収集、そして無線通信が利用できない場合のバックアップとしても利用できる。

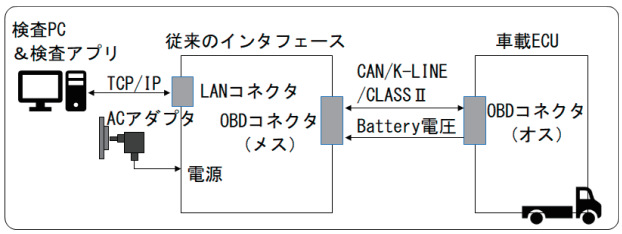


図３　従来のインタフェースのシステム構成

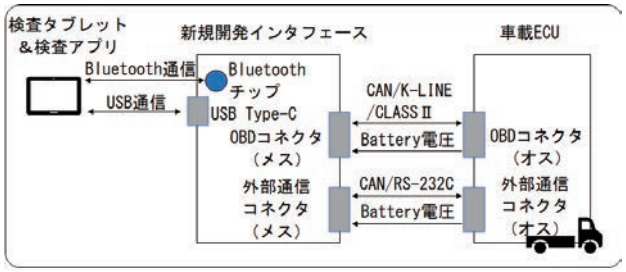


図４　新規のインタフェースのシステム構成

3.4　インタフェース - 車載 ECU 間仕様の改善検討

3.2 節で述べたとおり、従前のインタフェースには年々増えていく車載 ECU 仕様に対して対応できていない部分が存在し、新規開発に当たって **3.4.1 項**～**3.4.3 項**の改善を行った。

3.4.1　K-LINE 通信における通信電圧切替機能の追加

いすゞの一部の車載 ECU では K-LINE と呼ばれる ISO14230（路上走行車 ― K-LINE 上での診断通信）に準拠した規格を採用しており、通信用電圧において 12 V と 24 V の仕様が存在する。従前のインタフェースでは通信電圧値を任意に指定できないため、1 つの PC に対して 12 V 用と 24 V 用の 2 つのインタフェースを用意しかつ切替回路を設ける必要があった。新インタフェースでは定電圧生成 IC（集積回路：Integrated circuit）とスイッチング素子による専用切り替え回路を設けることで、検査ソフトから CPU（中央演算処理装置:Central Processing Unit）への専用コマンド（以下、「インタフェースコマンド」と称す）により搭載 ECU に合わせて任意の電圧値を選択できるように改良した。

3.4.2　車載の外部接続コネクタへの対応

車載 ECU が持つデータを外部機器へ出力したい場合に車両へ搭載される外部接続コネクタにおいて、結線保証を目的に車両通信による検査を実施している。工程の都合上、車両 OBD コネクタと外部接続コネクタをどちらも接続して検査しており、外部接続コネクタとの通信では従来のインタフェースとは別の機器を使用していた。外部接続コネクタの通信方式は CAN（Controller Area Network）とシリアル通信の接続規格の 1 つである RS-232C の 2 種が存在し、無線化にあたって新規開発インタフェースへ取り込む必要があった。インタフェースに車両 OBD コネクタとは別の外部接続コネクタを搭載し専用切替回路を実装することでインタフェースコマンドによって外部接続コネクタとの通信を可能とした。

3.4.3　終端抵抗切替機能の追加

高速通信を行う場合は通信の安定化を目的に終端抵抗を各端部に 2 つ設ける。車両状態においてはシャシ側とキャブ側でそれぞれ 1 つ車載 ECU またはワイヤハーネスに終端抵抗が実装されているが、キャブ単体状態においてはキャブ側 1 つしか装着されておらず、出荷検査において終端抵抗を挿入する必要があった。インタフェースに終端抵抗切替回路を実装することでインタフェースコマンドによってキャブ単体状態でも安定した通信を可能とした。

3.5　ハードウェア仕様の検討

車両通信インタフェースの無線化において課題となるのが、前述した機能追加による回路数の増加と作業性確保のための小型化を同時に達成することである。目標とした筐体サイズは、使用する通信 IC、追加機能含めた回路仕様を各種 IC（集積回路：Integrated circuit）・素子のデータシートを確認し、3D-CAD（Three-dimensional Computer-Aided Design）で車両レイアウトとの干渉を確認して作り込んだ。最終的にはモック品にて作業性を確認し、**図 5** に示す筐体サイズ幅 50 mm ×長さ 85 mm ×高さ 27 mm を目標とした。3D-CAD 上での干渉確認においては、車両 OBD コネクタの差し込み角度が車型によって水平差し込みと垂直差し込みが存在し、底面と右側面の隙間が小さいことが分かった。更に背面側にも隙間が小さいことから、**図 6** に示すようにインタフェースの左側面に外部接続コネクタと USB Type-C 端子を配置した。

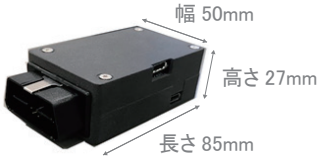


図５　新規開発インタフェースの外観



図６　新規開発インタフェースの外観（背面）

図 7 に示す従前の車両通信インタフェースのサイズは幅 150 mm ×長さ 115 mm ×高さ 40 mm であり、目標サイズと大きく超えているため、まずは不要となる回路の洗い出しを行った。無線化に当たり不要となる LAN（Local Area Network）端子、PC 通信用 RS-232C 端子、電源スイッチ、OBD 通信ケーブル用端子に加え、通信設定、エラー表示に使用していた LCD（液晶ディスプレイ：Liquid Crystal Display）モニタ及びスイッチを廃止した。そして、検査ソフト側でエラー検知ができるため不要と判断した。



図 7　従来のインタフェースの外観

次に、プリント基板においても筐体内を最大限活用できるよう筐体内の上面と下面に 1 枚ずつ配置し、かつ 6 層基盤とすることで配線パターンをできるだけ内層へ配線し、IC・素子を実装できる面積を増やした。更に半導体素子・チップ抵抗についても見直しを行い、従前の車両通信インタフェースの開発当時より小サイズな部品を選定することで、筐体サイズ・基盤面積ともに大幅に削減でき、目標サイズを達成した。

また、状態表示ランプにも無線化に合わせて改良を行った。作業者が車両通信インタフェースの状態を確認できるように LED を 3 種（緑：電源 ON、青：Bluetooth 接続中、橙：車両通信中）インタフェース背面に配置し、点灯制御を行えるよう回路を実装した。

4　検査ソフト開発

4.1　検査ソフト新規開発の目的

車両に対して EOL 書込み・検査を実施するため、検査ソフトとしては車両 ECU への送信データの生成し通信インタフェースを介して ECU へメッセージを送信、そして設備からのメッセージに対する ECU 応答メッセージを受信して車両の状態を読出す機能が必要である。

今回、検査ソフト側としては車両通信インタフェースとの新しい通信方式である Bluetooth に対応することに加え、これまでの固定端末による運用だけでなく持ち運び可能なタブレット端末にインストール可能なソフトを開発し、工程制約の緩和を目指した。

また、従前の検査ソフトにおいて、次のような課題があった。

- 年々車両に搭載される ECU が増加するとともに検査ソフト数も増加し、検査ソフトの開発期間に時間が掛かっている。
- 車両制御システムが年々複雑化することで検査内容も複雑となり、設備担当者は検査ソフト開発者に依存している、属人化の状態となっている。

今回の検査ソフト新規製作を機会に、これまでの検査ソフトの課題に対しても改善した。

4.2　動作環境の選定

タブレット端末で動作する検査ソフトを目標としたとき、タブレット端末の OS（Operating System）種類は、Windows10 と Android、iOS が挙げられる。現状の検査ソフト運用方法としては、通信検査中は車両から降りて別作業を実施すること、ドラムテスター走行中に実施するなどのさまざまな方法がある。これらの運用に対応することを想定したとき、画面の大きさ・外部ポートを自由に選択できるように、Windows10 と Android、iOS 全ての OS で動作可能な検査ソフトを製作することにした。

Windows10 と Android、iOS 3 つの環境で動作するソフトを開発するに当たり、開発環境は Xamarin を採用した。Xamarin とは C# 言語によるクロスプラットフォームの開発環境である。クロスプラットフォーム環境を採用することによるメリットとして、1 つの共有コードベースに Windows10、Android、iOS の全ての環境で動作するアプリケーションの製作が可能であり、ソフト開発工数の低減、かつソフト動作検証時間も低減することが可能である。また、検査ソフトの重要な機能である端末画面を使用した検査員への作業指示でも、Xamarin は UI（User Interface）コーディングも OS 間で 1 つに共有することが可能なことから、異なる OS 環境でも検査員は検査ソフトの使用感にほとんど差異を感じない。これにより、工程ごとの用途によって使用する端末環境が異なっていても、UI デザインは共通なことから検査員の検査端末操作の習熟に時間を要すことはない。

4.3 検査ソフト構成

従前検査ソフト構成を**図 8**、新規検査ソフト構成を**図 9** に示す。従前の構成では、検査対象の ECU ごとに検査ソフトを製作しており、検査サーバから受信する車両情報から検査項目を検索し各検査ソフトを起動するガイドアプリを介して検査を実施していた。従前の検査ソフト構成では、検査項目ごとにソフトが別々で存在するため、他の検査ソフトの変更・修正内容に影響されないことがメリットとして挙げられるが、ECU が追加・更新されるごとに検査ソフトを新規製作する必要があり、設備準備に時間を要していた。従前ソフトと新規検査ソフト構成の主な変更点は検査システムに必要な機能をソフト 1 本に集約したことである。具体的な内容としては、いすゞで使用する ECU の通信プロトコルに合わせて、車両データの書込み、品番読出照合などの検査目的に合った処理をまとめたプログラムである。各 ECU の通信仕様に適合させるためにコマンドのパラメータはソース内部埋め込みではなく、書換えが可能なテキストファイルで設定を可能とすることで、各 ECU の要求仕様に沿ったメッセージ送信・受信を従来ソフトより簡易的に行うことが可能となった。また、ソフト内部処理自体に変更を加えることはせずに検査で使用するテキストファイルを編集することで、各 ECU 仕様に沿った検査を 1 つのソフトで実施することが可能となった。

また、従前は新規 ECU の設定の度に検査ソフトを製作していたことで、ソフト変更の影響度は対象ソフトのみだったが、今回は 1 つのソフト上でまとめて検査機能を持たせていることからソフト変更時は検査項目全てに影響する。ソフト変更時のリスク対策として、新規 ECU 増加などにより新たな検査処理機能が必要となった場合は、新たに機能プログラムを製作することで、他検査項目に影響が出ないようにすることで対応する。

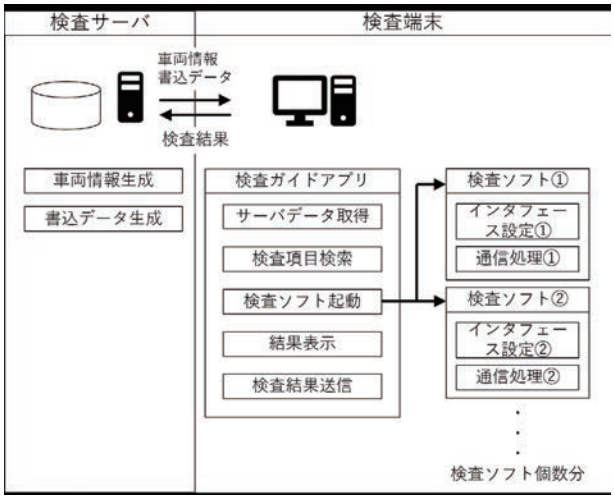


図 8　従来検査ソフト構成

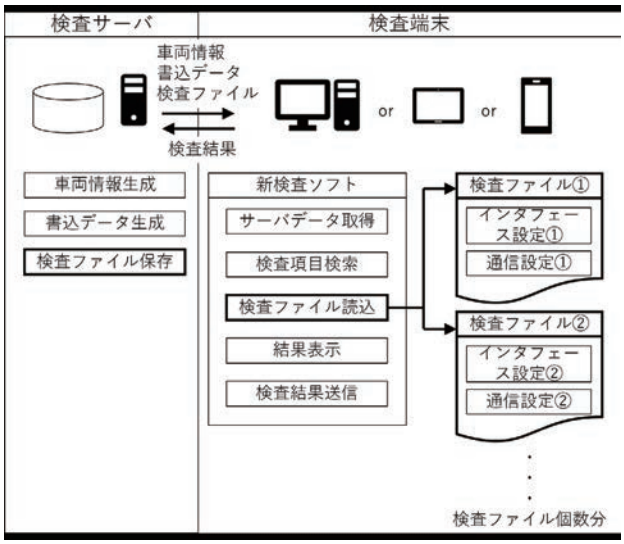


図 9　新規検査ソフト構成

5　効果

5.1 無線を利用した検査システム構築による効果

無線を利用した検査システムを各工程へ展開することで次の **5.1.1 項**～**5.1.3 項**の効果が期待できる。

5.1.1　工程制約の緩和

ワイヤレスな検査システムとなることで工程制約が緩和され、これまで展開できなかった工程へ設備を追加できるようになった。EOL 書込み項目が多いことで検査待ち時間が発生していた EOL 工程においては、書込み項目を追加工程へ分散し書込み時間を平準化することで、検査待ち時間を解消し、1 名の省人化を達成した。今後の自動運転化に伴う車載 ECU の増加に対しても、設備能力の増強が可能となった。

5.1.2　検査システム導入費の低減

従前の検査システムでは PC、車両通信インタフェース、そしてケーブル切り替え回路を保護する防塵ラックの製作、工場 LAN 用、車両通信ケーブルを数 10 m 敷設する工事が必要であったが、無線を利用した検査システムでは Wi-Fi アクセスポイント設置の初期費用はかかるものの、タブレット、無線車両通信インタフェース、そして収納ラックのみとなるため、大幅な導入費用の削減が期待できる。

5.1.3 消費電力の低減

従前では消費電力の大きいFA（Factory Automation）用PCを使用しており、加えてラインモニタ、外付けHDD、車両通信インタフェースでも電力を消費していた。無線を利用した検査システムでは省電力のタブレットを採用し、かつインタフェースの電源は車両から取得することから工場の電力消費の抑制が期待できる。

5.2 検査ソフト改善効果

従前は、検査項目ごとにソフトを新規製作していたため、設備準備に時間を要していた。新規ソフトでは、検査機能を1つに集約させた共通ソフトであることから、学習等の特別な動作が必要でなければソフトを改造することなく、検査パラメータの設定を行うことで設備準備を完了させることが可能となった。具体的な数値としては、直近20型ギガのモデルチェンジ対応時に従前ソフトと比較して設備準備期間を約3ヶ月短縮した。

次に、従前のソフトでは、検査設定の内容はほとんどプログラム内部埋め込みにしており、完成図書またはプログラミングコードを解析することでしか現状の検査設定を確認することができない。ECUによっては検査ソフトの初導入時から幾度と検査内容の変更が入ることがあり、その度に検査ソフトに修正を加えているため、検査内容が複雑となり、担当者のみが内容把握している状況であった。新規ソフトでは、検査設定はテキストファイル上で設定することで、検査内容を容易に確認することが可能となり、新規ソフト1つを理解していれば検査仕様を把握することが可能となった。

6 おわりに

本稿では将来の車載ECUの増加に伴うEOL書込み・検査工数の工程影響に対して、無線を利用した検査システムを構築して対策したことについて述べた。その中でも、新規開発した車両通信インタフェースの無線化と検査ソフトのタブレット対応及びソフト構造刷新について紹介した。そして、無線を利用した検査システムを構築することで工程制約が緩和され、工程の通信時間の平準化と将来車の通信工数増加に対して設備能力の確保ができた。今後の課題は、無線を利用した検査システムを車検ライン全域への展開と、機器テスタと連動したケースにおいての無線検査システムの構築である。機器テスタ用PC･PLC（Programmable Logic Controller）との各種信号では、現状は有線の入出力用信号線または有線LANでやり取りしているため、ワイヤレス化の検討を行うことである。

最後に、車両通信インタフェース及びソフト開発にご協力いただいたパナソニックFSエンジニアリング㈱様、及び、本稿執筆に当たりご協力いただいた関係者の皆様に感謝の意を表します。

著　者



高市　壮太



八田　達

論文・報告

北米向け小型キャブ梱包物流改善

Improvement of Packing and Logistics for ELF Series CAB

木村　直人*
Naoto Kimura

要　旨

海外の工場で組立を行うKD（ノックダウン：Knock Down）生産では、部品を包装・梱包して海上コンテナに積めて出荷している。そのKD出荷に関連するコストの中で台数が多く物流費も高い北米向けの梱包物流改善に取組んだ。輸送品質にリスクがあり、キャブの段積み出荷、及び鉄道輸送では採用してこなかったキャブ内への同梱を実施することにより、コンテナ本数削減を達成した。

Abstract

KD parts are packed and shipped in marine containers to be assembled at overseas plants. We improved packing and logistic KD cost for North America, where the number of units is large and the logistic cost is high. We carried out the shipment of the stacked cab for the first time. In addition, in the case of railway transportation, packaging was also carried out in the cab, which was not adopted because of the risk of transportation quality. As a result, the number of containers was reduced.

1　はじめに

継続的な合理化を進めるにあたりKDに関わる梱包費と現地までの物流費を調査したところ､CV（商用車：Commercial Vehicle）のKD出荷の内、北米向けだけで全体の約2割を占め、全仕向けの中で一番高く、梱包物流の改善を行うことで大きなコスト削減効果が狙えると考えた。特にボリュームが多い小型車に注目して海上コンテナ本数の削減に取り組むことにした。

また昨今の世界的な流れとして、カーボンニュートラルに向けた活動が盛んになっており、いすゞも「いすゞ環境長期ビジョン2050」を策定している。その中で使用エネルギー削減は生産部門として重要な課題の一つである。海上コンテナの削減は、国内の工場から出荷港、及び海外の入荷港からKD生産工場の間で搬送に必要なトレーラの数が減り、結果としてCO_2排出を削減することにつながる。

今回の目的であるコンテナ本数削減の課題として、新たにキャブ段積みによるコンテナ内充填率改善、鉄道輸送では未実施であったキャブ内同梱（同じケースに梱包すること）及びキャブ下同梱の拡大による梱包効率の改善を検討した。

2　梱包物流改善検討

2.1　改善目標

現状の北米向け一般部品をキャブと混載することを検討した結果、4LOT=24台分の出荷で1コンテナ削減することを目標とした（**図1**）。

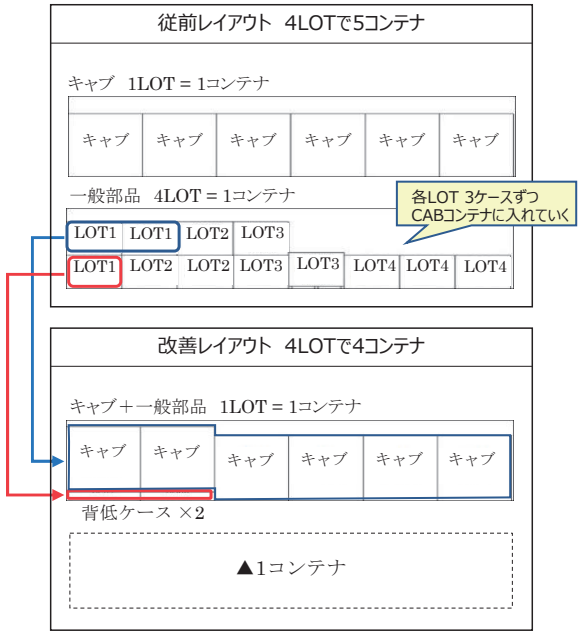


図1　北米向け4LOT（24台）コンテナレイアウト構想

*車両技術部

2.2 キャブコンテナ内充填率改善

KD 出荷では部品を梱包したケース（以下、「梱包したケース」を「ケース」と略す）をコンテナへ入れて出荷している。SKD（セミノックダウン：Semi Knock Down）出荷（ユニット部品が組立状態の KD 出荷形態）では基本的に 1LOT=6 台となっており、現状の北米向けについては 4LOT でグループ分けをしてコンテナをレイアウトしている。4LOT 分のキャブと一般部品を出荷するためには、これまで合計コンテナ 5 本が必要であった（**図 1** の従前レイアウト）。

現状はキャブケースを平置きでコンテナに搭載しているため、コンテナ上部が空間となっている（**図 2**）。その対策としてキャブケースと段積みが可能な背低ケースを開発し、段積み状態でコンテナへ搭載することにより、コンテナ内充填率の改善を検討した。背低ケースの耐荷重の検討において、日本から現地工場までの間に一旦北米の外部倉庫を経由して輸送しており、日本から外部倉庫までと外部倉庫から現地工場までのルートで段積み重量が異なるため、それぞれの条件で検討した。



図 2　コンテナへの KD ケース搭載例

（条件①） 日本→外部倉庫、キャブケースと段積み。背低ケースに掛かる重量は 1,000 kg 超。過去の KD 出荷において加速度計で測定したデータでは振動による衝撃荷重も発生しているが、**図 3** のような既存の箱型ケースの耐荷重は一般的に動荷重で用いられる安全率 5 以上を目安にしており（**表 1**）、中身の製品に品質問題がなければ多少のケースの変形・損傷については許容している。

しかし、今回は上段がむき出しのキャブであるため、下段の背低ケースが変形・損傷してしまうとキャブが傾いてコンテナの内壁に接触するリスクがあることから、衝撃荷重で用いられる安全率 12 以上を条件にした。

（条件②） 外部倉庫 → 現地工場、背低ケース 4 段積みのため、一番下のケースに掛かる重量は 3,000 kg 超。既存の箱型のケースと同様に安全率 5 以上を条件とした。

表 1　安全率の目安／背低ケース耐荷重検討

条件	静荷重	動荷重	
		繰返し荷重	衝撃荷重
安全率の目安 軟鋼	3	5	12

上記の条件①②で検討した耐荷重について、より厳しい条件となる条件②での耐荷重を背低ケースの必要耐荷重とした。既存仕様をベースに対して前後・左右パネル波板の二重化、補強板の追加、天ばり（梁）を 2 → 4 本へ変更を行うことで耐荷重を向上させた。新規背低ケース仕様について**図 3** に示す。

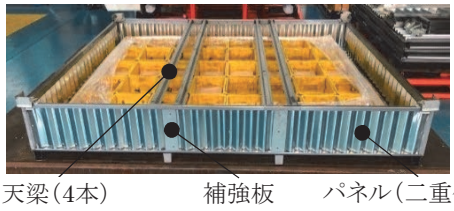


図 3　新規背低ケース仕様

2.3 キャブ同梱部品の拡大

キャブ梱包の現状について、通常トレーラ輸送の仕向けは小物部品から大物部品までキャブ同梱を実施しており、PP（ポリプロピレン：Polypropylene）バンドという資材を用いて段ボール箱をシートに固定したり、ケースの骨組みに固定したりしている。または**図 4(a)** のように部品をそのまま、または緩衝材で巻いてアクスルの上、及び空いているスペースに積み付けている。

しかし鉄道輸送では基本的に輸送時間が長く、輸送中の振動もトレーラに比べて大きいため、キャブ内には部品を同梱していない。またキャブ下についてもトレーラ輸送の仕向けと比較すると同梱部品が少ない荷姿となっている（**図 4(b)**）。



(a) 南アフリカ向け梱包仕様（トレーラー輸送）



(b) 北米向け梱包仕様（鉄道輸送）

図 4　キャブケース同梱状況

鉄道輸送環境下では振動によるこすれで運転／助手席への傷、ダンボール箱･緩衝材の破れ、バンドが緩むことによる荷崩れ、逆に荷崩れしないためにバンドを強く締めることでシートへの圧痕などが懸念される。振動によるこすれ及びバンドの緩みの対策については表面が柔らかく伸縮性のある材質を検討し、その中から価格面、入手のしやすさを考慮しゴムバンドを使用することにした。また背低ケースの使用数を抑制するためにキャブ下の空きスペースへ同梱部品を追加することも併せて検討した。キャブ同梱拡大の仕様を**図 5** に示す。

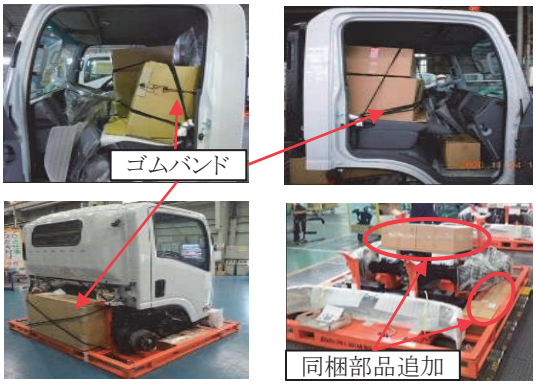


図 5　キャブ内･キャブ下同梱拡大仕様

3　評価･検証方法

JIS（日本産業規格：Japanese Industrial Standards）の包装貨物の振動試験方法に沿って実際の北米向けの出荷においてコンテナに加速度計を設置して取得した振動・衝撃データを基にした 60 分間の振動試験を実施する（**図 6**）。加えて港での荷役時に強い衝撃が加わることを想定した落下試験も実施する（**図 7**）。振動試験で発生した改善項目については対策を行い再試験にて評価を実施する。評価項目について問題ないことを試験で確認したあと、最終的には実際の出荷トライによる着荷確認を行い判断する。



コンテナ内での段積み状態を再現
x,y,z軸方向の振動を与える

図 6　振動試験



フォークリフトで持ち上げた状態から
フォークが抜けるまで後退させる

図 7　落下試験

4　試験の結果

試験の評価項目についての結果を**表 2** に示す。鉄道輸送を想定した振動試験及び落下試験を行い、キャブ同梱拡大についてはゴムバンドを使用することで、こすれによる段ボール箱の潰れ、シートへの傷・圧痕の防止、バンドの緩み防止ができたことを確認した。

表 2　評価項目＆振動試験の結果

項目	対象	評価項目	結果
キャブ段積み	キャブケース	①変形、破損、溶接剥がれ等	要改善
	背低ケース	②変形、破損、溶接剥がれ等	OK
		③上段キャブケースのズレ/荷崩れ	OK
キャブ同梱拡大	キャブ内	④同梱部品の箱の潰れ	OK
		⑤キャブ内装への傷、圧痕	要改善
	キャブ下	⑥同梱部品の箱の潰れ	OK
		⑦キャブ外装、アクスルへの傷	OK

4.1　支柱ポケットの底板溶接剥がれについて

キャブケースの構造は**図 8** に示すように、キャブマウントを受ける支柱を支柱ポケットに差し込んで、支柱抜け防止のピンを留める構造としている。今回の振動試験中に支柱ポケットの底板の溶接が剥がれて底板が抜けてしまった（**表 2 ー①**）。

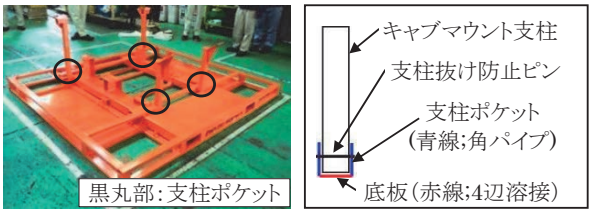


図 8　キャブケース（左）と支柱部の構造（右）

4.1.1　原因分析

現状との変化点を考えると、①キャブ内への同梱により支柱に掛かる重量が増えた、②キャブが平置きからケースとの段積みになった、という 2 点が挙げられる。まず①について、北米向けには今回の小型キャブに同梱した重量より重い中型キャブも出荷しており、

今回のキャブケースに比べて強度の低い 1WAY ケースを使用しているが、特に問題は起きていない。よって底板溶接剥がれの不具合について①の可能性は低く、②のキャブが平置きから段積みになったということが原因である可能性が高いと考える。

平置きの場合は支柱ポケットの底板はコンテナの床に接地しているため、上下方向に振動した際にコンテナの床が剛体のようになっていると考えることができる。そのため振動により支柱が上下して支柱ポケットの底板に衝撃が加わった場合にも底板がたわむことはなく、溶接部に負荷が掛からない状態になっている。

しかし段積みした場合は支柱ポケットの下は天梁になっており、支柱の上下動により底板に衝撃が加わった際に僅かなたわみが底板と天梁に発生すると考えられる。したがって底板の溶接部に負荷が掛かってしまい、それが繰返されることで最終的に溶接剥がれにつながったのではないかと考えた。支柱ポケット部の接地条件について**図 9** に示す。

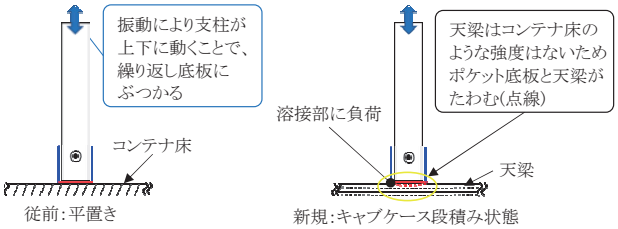


図 9　支柱ポケットの接地条件の違い

4.1.2　対策検討

天梁のたわみが溶接剥がれの原因だと考えたため、天梁の剛性を上げることを検討した。ポケット底板に支柱から負荷を受けた場合に、溶接部に発生する応力について机上検討を行ったところ、対策前の天梁（鋼板を曲げた部材）の上に載った状態では安全率が 3 程度であった。対策仕様の検討においてはキャブ支柱を受ける重要な部位であるため、背低ケースの条件①と同様に衝撃荷重で用いられる安全率 12 以上を条件とした。その条件に合う部材を**図 10** に示す簡易モデルにて解析を行い選定した結果、角パイプへ変更した。

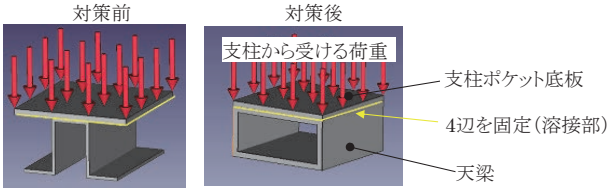


図 10　溶接部に掛かる負荷の机上検討

4.2　まとめ

底板の溶接剥がれについては対策後の仕様で再試験を実施して確認した結果、支柱ポケット底板の溶接剥がれがないことを確認できた。再試験の結果より天梁の剛性を上げることで底板の溶接剥がれ防止に対し効果があったと考える。

ゴムバンドのフック引掛け部のキャブ内装への傷については（**表 2 ー⑤**）、緩衝材を巻くことで対策可能なことを再試験で確認した。再試験において評価項目（**表 1**）に対し NG がないことを確認したあと、出荷トライを行い最終的に実際の鉄道輸送においても NG がないことを確認した。

5　おわりに

コンテナ本数削減という目的のためキャブコンテナ内充填率改善とキャブ同梱拡大という課題に取り組み、当初の目標通り現状 4 LOT で 5 コンテナ必要なところを 4 コンテナに削減が可能となった。結果として北米向けの年間コンテナ本数とトレーラ搬送で排出される CO_2 の削減を約 12 %達成した。本改善活動の中で、キャブコンテナ内充填率改善にはキャブを段積みするため背低ケースが追加となり、またキャブ同梱部品の拡大では梱包工数が追加となる。そのため梱包費は上がることになるが、物流費をそれ以上に下げることが可能であり、梱包費上昇分を含んでも大幅な合理化を達成することができた。

最後にご協力いただいた社内外関係者の皆様に御礼申し上げます。

著　　者



木村　直人

論文・報告

アルミダイカスト ハイサイクル鋳造工法確立

High Cycle Casting Method for Aluminum Die Casting

遠藤　威*
Takeshi Endou

吉本　幸平*
Kohei Yoshimoto

要　旨

アルミダイカスト製品の競争力強化と、コスト低減への大きな寄与を目的として、ハイサイクル化への取組みを行った。本稿では、ハイサイクル化のためのキー技術として開発した、離型剤塗布技術及び金型の内部冷却技術の事例と、内部冷却技術を CAE で検証した事例に関して紹介する。

Abstract

The challenge to the high cycle which greatly contributes to the cost reduction was carried out as a competitiveness strengthening technology of the aluminum die casting product. This paper introduces examples of mold release agent coating technology and mold internal cooling technology developed as key technologies for high cycle, and examples of internal cooling technology verified by CAE

1　はじめに

ダイカストとは、高温で溶融した合金を高速･高圧で金型内に注入することにより、高精度な鋳物を短時間で大量に生産できる鋳造工法である。軽量化及びコスト低減を目的に、自動車用部品のケース類を中心に多く採用され、いすゞでも自社工場でダイカスト部品の生産を行っている。今回、設備の老朽代替タイミングに合わせて、競争力強化のためにハイサイクル化に取り組んだ。サイクルタイムの目標値はベンチマークトップメーカーと同等以上の、従前比 33 %短縮に設定した。

2　サイクルタイム短縮概要

ダイカストの工程フローを**図 1** に示す。サイクルタイムを短縮するために、複数のロボットによる同時動作及び、油圧ポンプの吐出流量を増加して、金型油圧シリンダの動作速度を上昇させた。また凝固時間短縮のために、銅拡散接合の技術も採用した[(1)]。更に、離型剤塗布・エアブロー時間を短縮するため、離型剤塗布装置の仕様検討を行った。離型剤塗布装置は金型表面に離型剤を塗布したあと、付着した離型剤をエアブローで均一化する装置である。離型剤の塗布は、製品と金型の固着を防止し、更に金型を冷却する目的で行うため、製品形状に合わせた塗布が必要となる。そこで、離型剤塗布装置はロボット化及びノズル個体制御技術により、短時間で必要な量の離型剤だけを必要な部位に塗布できる仕様を検討した。

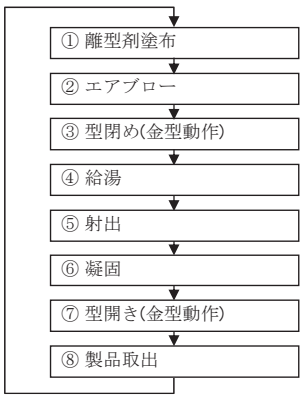


図 1　ダイカスト工程フロー

更に、サイクルタイム短縮での課題として、アルミニウム溶湯が金型内で凝固する際に、溶湯から奪った熱で金型温度は上昇する。金型は高温になると製品の品質異常及びマシン停止の原因となるため、1 サイクル内で一定の温度以下になるように抜熱する必要がある(**図 2**)。サイクルタイム短縮に伴って、短時間に従前サイクルと同等の抜熱を行わなくてはならないため、金型の冷却を強化し抜熱能力を向上する仕様を検討した。

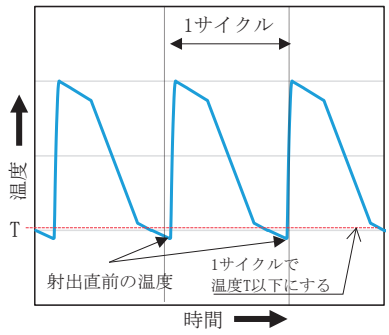


図 2　鋳造サイクルにおける金型温度変化の模式図

*要素技術部

3　離型剤塗布技術

3.1 離型剤塗布装置開発

離型剤塗布装置は、動作機構部とスプレーカセットで構成されている（**図 3**）。従前の動作機構部はアーム状の装置を使用していたが、今回は社内でも実績のある 6 軸のロボットを採用することで、スプレーカセットのノズルを製品形状に合わせて動作することができる仕様とした。従前のスプレーカセットでは、離型剤を塗布するノズルは、複数のノズルを束ねた系統ごとに塗布制御していたため、部分的に過剰な塗布をしていた。今回は、多様な製品の必要な部位に必要な量を短時間に離型剤を塗布するため、ノズル 1 つごとバルブを持たせ、それぞれのノズルを単独で塗布制御できるようにした。更に、ノズル数も従前の 2 倍とした（**図 4**）。その結果、動作時間及び離型剤塗布時間、エアブロー時間が縮まり、サイクルタイムを 10 %短縮でき、前述の仕様反映分と合わせて目標の 33 %短縮したサイクルタイムで動作することができた。

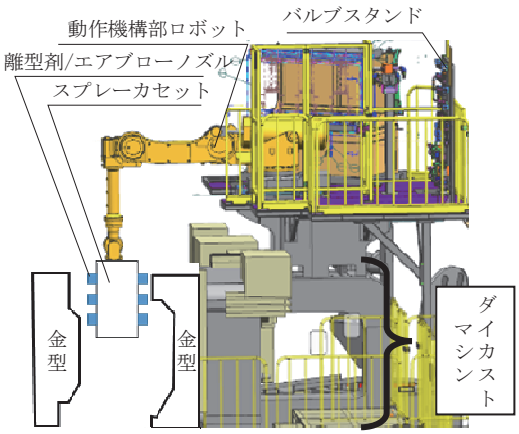


図 3　離型剤塗布装置及び周辺装置構成

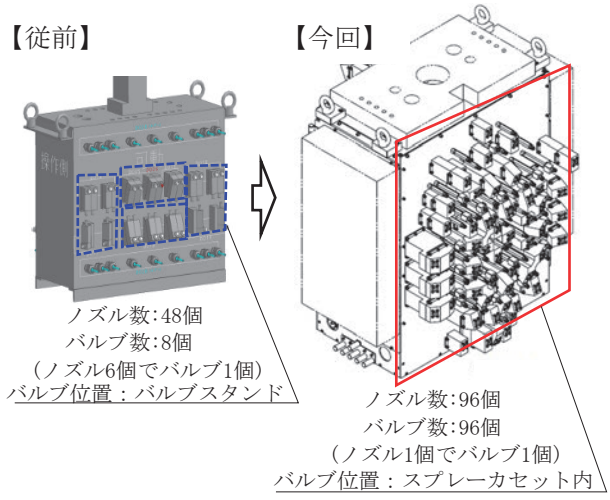


図 4　従前と今回のスプレーカセット仕様比較

4　内部冷却技術

4.1 金型の熱能力向上

金型の冷却を強化し抜熱能力を向上するためには、次の 3 つの方法を複合的に組み合わせる必要がある。

①金型内の冷却穴数を増加、抜熱面積を増やす。
②金型内の冷却穴深さを延長し、製品と冷却穴の距離を近づけて抜熱効率を上げる。
③金型冷却水の抜熱効率を上げる。

4.2 金型の冷却穴数増加

金型の抜熱は、金型に加工した穴の内部に冷却ユニットのパイプを冷却穴先端まで通して、冷却水を冷却穴の先端に噴出し、パイプの外側から冷却水を循環させている（**図 5**）。

金型の冷却穴は製品形状に合わせて必要な部位に設定する必要があり、3D モデル上で冷却配置が最適となるよう検討し、冷却穴数を従前の 1.5 倍～3 倍に増加した。

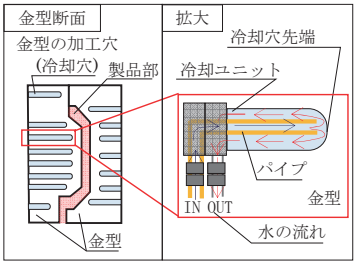


図 5　金型内部の冷却構造

4.3 冷却穴深さ延長による抜熱効率向上

製品側に冷却穴を近づけるほど抜熱効率は上げることができるが、金型が割れ、冷却水が型内に漏れるリスクが上昇する。そのリスク回避として次の 4 つの対策を反映し、冷却穴を製品側に近づけ抜熱効率を高めた。

①金型鋼材の材質変更
　金型に使用している鋼材を高温靭性及び、高温強度が従前よりも高い材質に変更した。
②細孔冷却の採用
　細い肉盗み形状の先端に冷却穴を近づけた際に、冷却穴側面の肉厚を確保するため、従前より細い直径 3 mm～6 mm の冷却穴を採用した（**図 6**）。

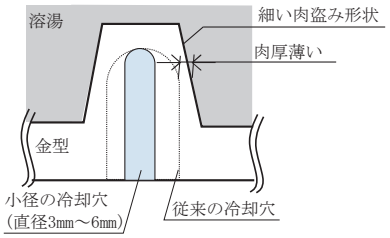


図 6　細い肉盗み形状の小径の冷却穴構造

③冷却穴に銅ブッシュを挿入

型表面からき裂が入っても水漏れを抑制できるように、あらかじめ銅の薄いブッシュを挿入した（**図 7**）。

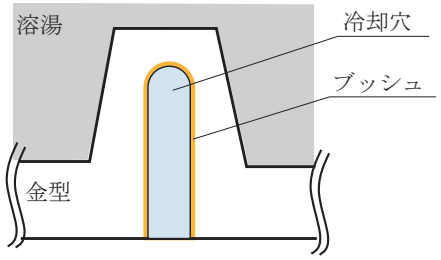


図 7　冷却穴の銅ブッシュ構造

④金型の入れ駒化

金型破損による水漏れ発生時に水漏れ部位のみを交換し簡単に復旧できるように、金型を部分的に別体化し入れ駒構造とした（**図 8**）。

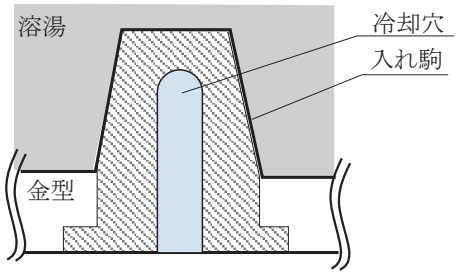


図 8　冷却穴の入れ駒構造

4.4 冷却水の圧送装置による抜熱効率向上

冷却穴に流れる水量を増やすことで抜熱能力を上げることができる。冷却本数の増加及び細孔冷却の採用で冷却水の配管抵抗が高くなることが懸念されたため、圧送ポンプ圧力は従前の 0.2 MPa → 0.9 MPa に上げた仕様を選定した。更に、吐出流量は、増やした冷却穴すべてに、十分な通水量を確保できる 600 L/min（従前比 5 倍）とした。

以上の抜熱能力向上のための方策を複合的に組み合わせて、製品ごと金型仕様を決定した。

5　CAE による抜熱能力向上の事前検証

5.1 概要

金型製作前に、CAE（Computer Aided Engineering）による金型温度解析で抜熱能力の確認を試みた。温度解析結果に大きな影響を与える設定値として、金型と冷却穴の熱伝達係数がある。これまで熱伝達係数は冷却構造別に一律で定義していたが、**4.2 節**で示した冷却穴先端は冷却水の対流が大きいため熱伝達係数は高く、側面は先端に比べ低いと言われている[(2)]。このため、今回の深い肉盗み形状への冷却効果を過大に判定してしまう恐れがあった。更に、今回新たな細孔冷却の採用及び、冷却水吐出圧力の増加でどの程度の冷却水が流れるか予測する必要があった。そこで、まず冷却穴に流れる冷却水流量の解析と、冷却穴の熱伝達係数の解析から熱伝達係数を決定することを試みた。

5.2 冷却水流量の解析

冷却水は配管で分岐され、各冷却穴に循環する。その分岐の過程で、各冷却穴にどのような流量比率で流れるか、解析で予測を試みた。冷却穴に流れる流量は通水経路で長さ及び太さ等の形状に依存する。そのため、金型内の通水経路の長さと穴径の情報を調査し、一次元流量解析ツールを使用し冷却穴に流れる流量を計算した。事前検証で行った冷却穴別の流量の解析値と実測値の結果を**図 9** に示す。異なる穴径で冷却系統の冷却水流量を誤差なく予測できたため、本解析手法を採用し評価を行った。

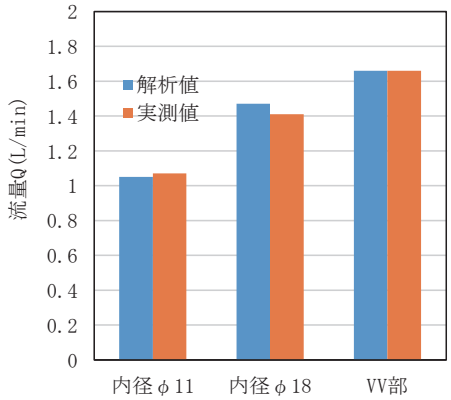


図 9　解析値と実測値の冷却穴別の流量結果

5.3 冷却穴の熱伝達率解析

冷却穴の熱伝達係数は、CFD（計算流体力学：Computational Fluid Dynamics）ツールを用いて計算した。冷却水流量は **5.2 節**の解析結果を使用し、冷却穴にパイプ内から冷却水を循環させた時の熱伝達係数解析結果を**図 10** に示す。冷却穴の先端部と側面部で熱伝達係数が大きく異なっている。その熱伝達係数分布情報を鋳造解析に反映した。

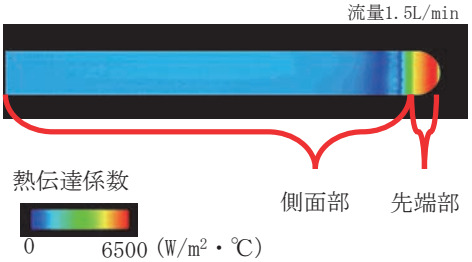


図 10　熱伝達係数解析結果

5.4 CAE を使った冷却評価と実機との比較

今回新たに決定した熱伝達係数を用いた金型温度解析で冷却性能の評価を行った。金型温度解析結果が目標サイクルタイムで、従前サイクルタイムで鋳造している金型温度以下になるまで冷却穴のレイアウトの検討を繰り返し、十分な抜熱能力があることを確認した上で金型製作を行った。

図 11 に従前の型温解析結果と今回決定した熱伝達係数で行った型温解析結果と目標サイクルタイムで鋳造した時の金型温度の実測値を示す。また、温度分布の定点における高温部の温度を**表 1** に示す。解析結果は、従前と今回の熱伝達係数を使用した。今回新たに熱伝達係数を決定したことで、温度差は 40 ℃から 6 ℃と大幅に改善した。また、温度分布に関してもより実測値に近づいている。

今回の CAE 解析を用いて、目標のサイクルタイムで、従前と同等の抜熱ができる冷却構造を具体化した。その結果、実機による目標のサイクルタイムで、金型温度が高くなることにより発生する製品の品質異常及び設備稼働上停止を従前同等に抑えることができた。

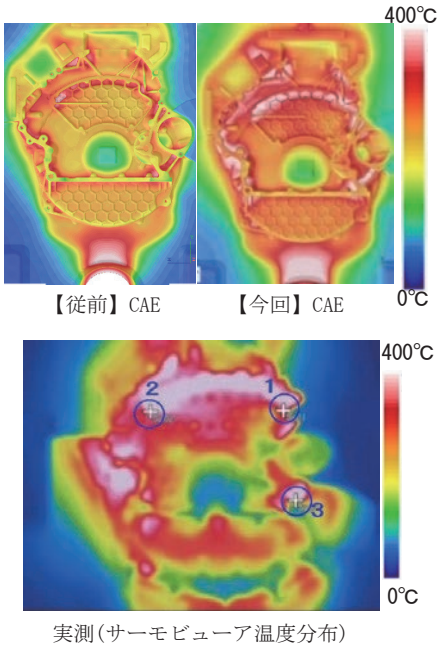


図 11　従前、今回解析結果及び実測の金型温度分布

表 1　定点における CAE 及び実測の金型温度比較

単位:℃

		従前		今回	
部位	実温度	解析温度	差	解析温度	差
1	339.5	304.9	−34.6	355.3	15.8
2	404.6	374.9	−29.7	402.5	−2.1
3	342.9	286.7	−56.2	346	3.1
差(Ave.)		−40(Ave.)		6(Ave.)	

6　今後の課題

今後の課題として次の取り組みを続ける。

- 金型の冷却強化と金型鋼材材質変更が金型寿命に与える影響を、長い期間で評価する。
- 業界最速のサイクルタイムを目指し、更なる冷却強化技術の調査･実証を進める。

7　おわりに

今回、鋳造機の老朽代替タイミングに合わせて、ハイサイクル化の取り組みを行い、目標のサイクルタイム 33 %短縮を達成した。他の鋳造機にも老朽代替に合わせ、この工法を水平展開する。また、金型冷却技術の研究を継続して、更なるハイサイクル手法の開発を進めていきたい。ダイカストではサイクルタイム短縮以外にも、製品不良率を今以上に低減することと、鋳造機の異常による停止を根絶する等の課題が残っている。今回得られた冷却強化及び CAE 等の知見を活かし、引き続き、製造、技術、金型設計、金型製作、保全など各担当部署と一丸となり、課題を解決し生産性向上、競争力強活動を続けていきたい。

最後になりますがハイサイクル工法の検証･導入に関し、ご協力いただいた関係者の方々に、この場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

(1)　鎌田 光春:新金型冷却構造による鋳造サイクルタイム短縮 , いすゞ技報 ,No.131(2019),p.151
(2)　田中 智子:CFD で算出した冷却穴孔の熱伝導係数の金型温度解析への適用 ,JDCA,(2014),p.115-121

著　者


遠藤　威


吉本　幸平

論文・報告

カムシャフト 油路交差孔の抜け際で発生するばりの抑制と除去

Occur at the Outlet of the Camshaft Oil Passage Crossing Hole Burr Suppression and Removal

平川　啓太*
Keita Hirakawa

要　旨

栃木第 3 工場小型カムシャフト加工ラインでは、油孔と軸心内の交差部に発生するばりを手作業で除去していた。この手作業が、ラインのネック工程で出来高の阻害要因であった。そこで、手作業でのばり取りの廃止を目的に、ドリル孔開け加工でばりの生成を抑制させ、自動装置で除去する取り組みを行った。

Abstract

In the camshaft processing line of the Tochigi No.3 factory, burrs generated at the intersection between oil holes and the shaft center were carried out manually. Since manual deburring work becomes the neck process of the line, for the purpose of abolishing manual deburring work, we succeeded in suppressing the burr generated by drilling and removing it by automatic equipment.

1　はじめに

1.1 背景･目的

2018 年のプロジェクトにおいて、栃木第 3 工場小型カムシャフト加工ラインに型式違いの 2 車型を取り込み、従前車型と合わせ、計 3 車型の混流生産を開始した。しかし、従前車から計画にない手作業でのばり取りを実施している。ついては、混流生産によって、この作業の負荷が高まり、計画値のサイクルタイムを超過することで、生産能力に影響が出ることがわかった。そこで、コスト低減を意識して、ばりを自動装置で除去させ、計画値のサイクルタイムを達成させなければならない。

カムシャフトとは、吸排気バルブを開閉させるための「カム山」と呼ばれる突起部を持つシャフトのことである。小型エンジンのカムシャフトは、**図 1** の 3D モデルのようにシャフトの中央に軸心孔があり、5 つジャーナルのそれぞれに油孔が開いてる。また、**図 2** のジャーナル断面ように軸心孔と油孔が交差している。油孔加工において、ドリル孔開け加工後、軸心内と油孔交差部に全数ばりが発生しており、作業者が手作業で除去していた。この孔は軸受けを油で潤滑させるための孔であり、ばりなどの異物があると、エンジンの焼き付きにつながるため、カムシャフトの油孔には異物付着に対する要求品質が非常に高く、「ばり・異物なきこと」と図面で定めている。しかし、切削加工を行うと、必ずばりが生成され、直近の生産設備では自動化が進展しても依然として人の手で取り除いている。この背景には生産技術者の関心が直接的に付加価値を生む 1 次加工に強くなる傾向があること、また切削加工時に生成されるばりを自動装置で除去する工法が確立されていないことが考えられる。

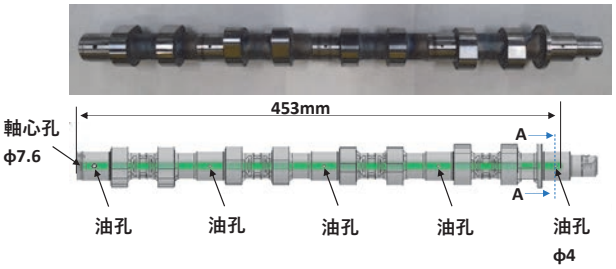


図 1　カムシャフトの外観写真及び 3D 半透明モデル

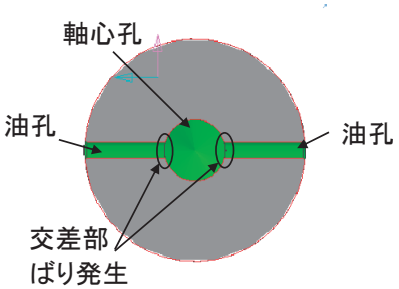


図 2　ジャーナル断面図 A-A 断面

* PT 技術部

1.2 加工概要

図 3 にカムシャフト加工ライン前半工程のフローを示す。まず工程 4（軸芯孔開け）にて**図 4** に示す全長 500 mm ϕ 7.6 のガンドリルを備えた専用機にて、ϕ 7.6 軸心孔の深さ 453 mm を加工する。そのあとに工程 6（油孔加工）にて**図 5** に示す「横型マシニングセンタ」と呼ばれる水平方向が X 軸、垂直方向が Y 軸、油孔深さ方向が Z 軸の 3 次元ユニット構造の装置で 5 つのジャーナル部に ϕ 4 油孔を孔開けする。ジャーナルの外側から中心に向かい、ドリルで孔開けすることで軸心孔と油孔が交差する。次に同一行程でワークを軸心孔中心に 180 度回転させたあと、もう片側も同様に孔開けすることで、**図 2** のように両油孔が貫通する。

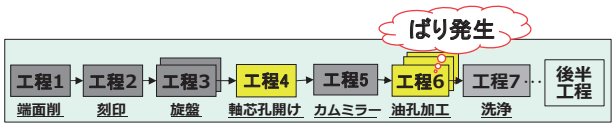


図 3　工程フロー

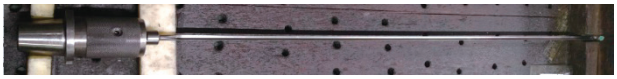


図 4　工程 4（軸芯孔開け）　ガンドリル

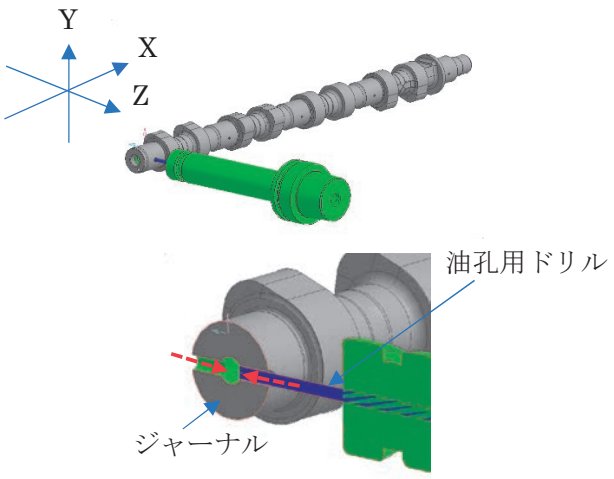


図 5　工程 6（油孔加工）　カムシャフト外観と軸の方向及び油孔の断面図

1.3 ばりの概要

「ばり」とは部品の機械加工または成形工程において、本来あるべき形状より外側にある出っ張り（加工残り、残留物）のことである。ばりは、切削加工、砥粒加工、鍛造、鋳造、溶接などあらゆる加工法においても生成される。今回は切削加工時、特に孔開け工具のドリルで孔を貫通させた際に抜け際で発生する交差部の異物のことである。

1.4 ドリル加工のばり生成メカニズム

「ドリル加工」とは、、マシニングセンタ、ボール盤に取付けて加工を行う「ドリル孔開け加工」をいう。ドリル孔開け加工において大半は「ロールオーバばり」が発生し、**図 6** のようにドリルが貫通する際に最後の切残しが塑性変形し、外側へ押し倒されて生じる。切削中の抵抗は必ずあり、その抵抗により被削材の切残しが生成される。

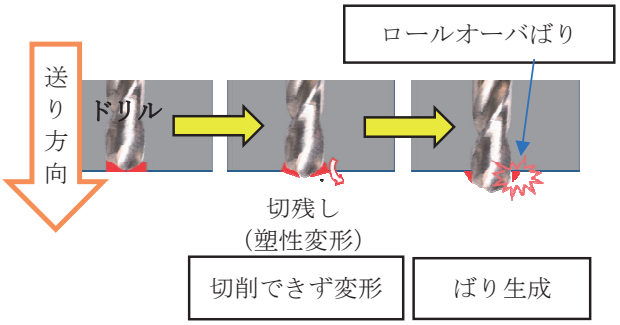


図 6　ばり生成のフロー図

2　現状把握

2.1 ばりの高さ

現状のばり高さは、**図 7** に示すように 0.45 mm～0.5 mm 程度であることがわかった。加工は**表 1** に示す条件でカムシャフトの油孔を開けている。測定方法としては、デジタルマイクロスコープの拡大鏡倍率による判定法を採用し、マイクロスコープをカムシャフトの軸心孔から通し、油孔交差部を測る。なお油孔加工用ドリルの刃具交換設定値は 90 本であり、1～90 本目の油孔を開けたカムシャフトの中からランダムで抜き取り、測定した。油孔はカムシャフト 1 本につき、5 箇所を孔開けするが、1 サイクルの中で最後に孔開けするジャーナルのばり高さを測定した。ばりが付着するワークの写真と、ブラシを使用して手作業で除去する際のワーク写真を**図 8** に示す。

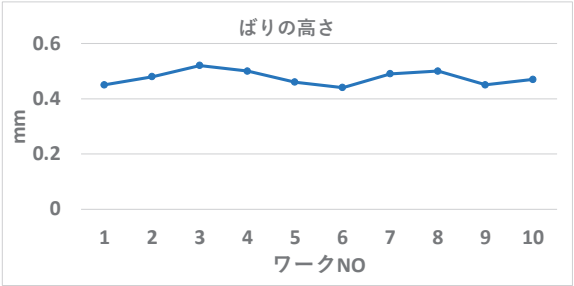
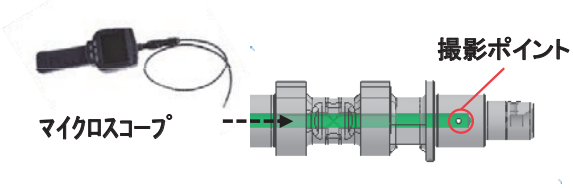


図 7　各ワークごとのばりの高さ

表１　加工条件

ドリル	材質：超硬
	外径：ϕ 4 先端角 140 度
切削条件	周速：35 m/min　送り：0.25 mm/rev
シャンク	HSK63A
ホルダ	コレットホルダ



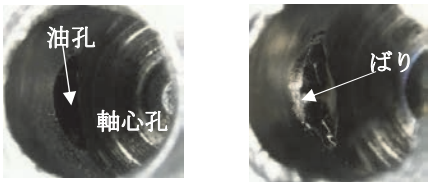


図８　ばり写真（左：手作業でのばり取り後、右：作業前）

2.2　従来工法のばり除去（裏面取りツールの活用）

従来、カムシャフトラインでは油孔を開ける工程にて生成されるばりを、同工程で「バーオフツール」という刃具を使用し、除去を狙った（加工条件は**表 2**）。この工法は孔開け後に裏面取りを付けることで、生成されたばりを削る用途で使用する。そして**図 9** のように工具内径に設けたプランジャーとピボットピンを介してブレードを出し入れする機構になっており、加工機の主軸に取付け、正転しながら刃具を孔内に挿入し、逆回転しながら刃具を抜き出すことにより刃が被削材に当たり、面取りを付ける工法である。

しかし、対象物がうまく除去できなかったため、なぜこのような結果になったのか確認し、次のようなことが分かった。

表２　バーオフツール加工条件

型式	CP-10 (Z-10093A)
周速	20 m/min
送り	0.15 mm/rev

【従来工法のばり除去 確認結果】

この工法では**図 10** に示す写真のとおり、孔の一部（A 部）では切削によって、面取りが付いたことにより、ばりが削られるも曲面であるために点線部には面取りが付かずに除去されないことがわかった。なぜなら、交差孔は、対称面の楕円のりょう（稜）線を削ることになるため、均一な面取りができないからである。

次に、ばりを除去する工法に関してベンチマークした結果、「液体ホーニング」という工法があることを知った。いすゞに実績のない工法であったため、新工法の取り組みとして、今回評価を行うことにした。

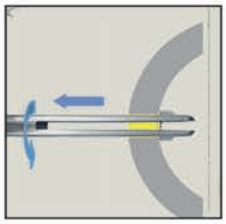


図９　バーオフツール

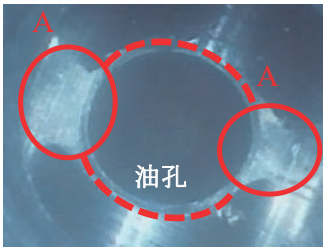


図 10　軸心内の写真

3　新工法を用いたばりを自動で除去する検証

3.1　液体ホーニングによる検証

液体ホーニングとは、**図 11** のように研磨剤と水の混合体をポンプで圧送し、圧縮空気の噴射エネルギーを利用してワークへ噴射することで表面処理を行う物理的な加工方法である。液体ホーニング装置の製作メーカーにばりの高さ 0.5 mm 程度のワークを 6 本持ち込み、**表 3** の条件で検証をした。



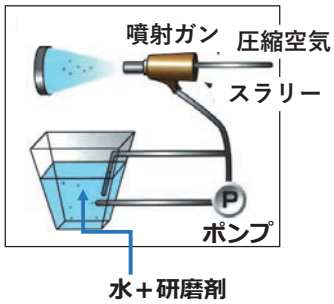


図 11　液体ホーニングの写真

表３　液体ホーニングの検証条件

研磨剤	メラミン樹脂　FS80
噴射圧力	0.5 MPa
噴射時間	5 s/1 孔
ノズルとワーク間の距離	10 mm
研磨剤濃度	25 %

【液体ホーニング工法の検証結果と考察】

6 本ともばりが完全に除去され、また実施前後で油孔内の粗さなど形状が規格内であることがわかった。ただし、コストにおいては研磨剤の原単位を今後の生産ボリュームから試算すると従来工法のバーオフツールの原単位より高くなる。コスト刷新という観点から、そのほかの案でばりを除去できる工法を検証することにした。

表 5　両ブラシの検証結果

毛材	線径	未使用	1本 使用後	連続本数 使用後		使用限界
ワイヤ SUS	φ0.08	 φ8.15	ばりの高さ0.45mm以下まで除去可能	 φ7.6	150本目 0.3mm以下のばり除去可能	150本
					150本目以降 金属疲労による毛先の折損でばり除去不可	
砥粒入りナイロン TX320C	φ0.3	 φ8.15	ばりの高さ0.35mm以下まで除去可能	 φ7.6	300本目 0.3mm以下まで除去可能	300本
					300本目以降 毛先の摩耗によりばり除去不可	

3.2　ブラシによる検証

図 12 のブラシを、**図 13** のように軸心内に通して回転させることで、生成されたばりをブラシの毛先で除去する工法がある。ブラシメーカーにご協力いただき、ワイヤブラシと砥粒入りのナイロンブラシを用いて対象物がどの程度まで除去できるか検証をした。検証方法としては、**表 4** に示す条件で実施し、ばりの高さは 0.3 mm～0.5 mm 程度のワークを用意した。

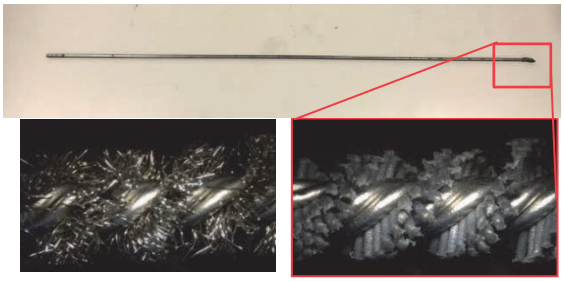


図 12　ブラシ毛先（左：ワイヤ、右：ナイロン）



図 13　破線矢印の方向にブラシを回転しながら挿入

表 4　ブラシの検証条件

装置	専用装置 KRT-340
回転数	500～1000 rpm
ブラシ時間	5～10 s / 1 孔
材質	ワイヤ　：SUS ナイロン：TX320C

【ブラシ工法の検証結果と考察】

表 5 にある 1 本使用後に示すように、ばりを落とす力はワイヤブラシの方が毛が硬いため、強いことがわかった。ワイヤブラシは使用するにつれ、徐々に外径が小さくなっている傾向になったが、毛が摩耗しているわけでなく、曲がってくせがついた状態であった。次にブラシの使用本数の限界値だが、150 本目以降から金属疲労による毛先の折損が発生し、使用本数の限度は 150 本と判断した。150 本目では 0.3 mm 以下までの対象物を除去できた。またワイヤブラシの線径は φ 0.08 mm だけでなく、φ 0.12 mm と φ 0.06 mm でも評価を実施したが、線径を変えることによるばりの落とす力、使用本数の限度は変わらないことがわかった。

続いて、砥粒入りナイロンブラシは使用するにつれ、ブラシの摩耗により、ブラシ径が小さくなるも、300 本目に 0.3 mm 以下までばりを除去できることがわかった。ただし、300 本を超えるとブラシ径がカムシャフトの軸心孔径 φ 7.6 より下回り、除去ができず、使用本数の限界は 300 本と判断した。また検証結果より、原単位はワイヤブラシの方が、ナイロンブラシより高い結果であった。

ブラシ工法において、原単位は液体ホーニングよりも安いが、従来の 0.5 mm のものは取れず、ブラシ連続使用後は 0.3 mm 以下までのものは除去できる。コスト優位のブラシ工法を採用するために、油孔孔開けで発生するばりの高さを 0.5 mm から 0.3 mm 以下に抑制させることを次の課題とした。

4　ばりを抑制する検証

4.1　要因推定・仮説

ドリルのメカニズムでも示したように、切残しが塑性変形することにより、ばりが生成される。ついては、切残し、塑性変形の量を少なくできるかがばり抑制のポイントとなる。そのために孔開け加工中の切削抵抗を下げることで、切残しの量を小さくできるのではないかという仮説を立てた。

仮説①周速・送りの変更
仮説②ドリルの先端角の変更
仮説③取り代変更

4.2　机上検討と現物確認

表 6 に示すように、仮説①では切削条件である周速と送りを 4 パターンで変更し、ばりの高さの変化量について検証を行った。次に仮説①で得られた最適な切削条件を設備設定とし、ドリルの先端 90 度、140 度、180 度の 3 種類用意して検証を行った。最後に仮説①②で得られた結果を元に、仮説③では従来 1 回のパスで ϕ 4 の油孔を孔開けしているが、工程を分割し、1 回目は ϕ 3.5 のドリルで孔開け、仕上げ代を径 0.5 mm 残し、2 回目は、ϕ 4 のリーマで孔を広げる加工をすることにより、切削負荷を低減させる。対象物の高さはマイクロスコープで測定した。

表 6　各検証の加工条件（＊マークは従来条件）

仮説①	周速（m/min）			
	25	35*	45	55
	送り（mm/rev）			
	0.05	0.15	0.25*	0.35
仮説②	ドリル先端角（度）			
	90	140*		180
仮説③	パス数（取り代変更）			
	1*		2	

4.3　結果と考察

まず検証 1 の結果を**図 14** に示す。周速と送りに関しては速度を遅くするにつれ、ばりの高さがが低くなることがわかった。速度遅くするにつれ、切削時の発熱量が下がり、被削材の軟化を防ぐことで、抜け際の塑性変形量が小さくなったと考えられる。また**図 15** のように回転当たりの送りに関しては遅くするにつれ、切り取り量が少なくなることで、刃具の切削抵抗が下がり、周速同様にばりが抑制できたと考えられる。周速 35 m/min、送り 0.15 mm/rev の条件では、この高さは 0.4 mm 程度で従来より 0.05 mm 程度小さくなる結果となった。

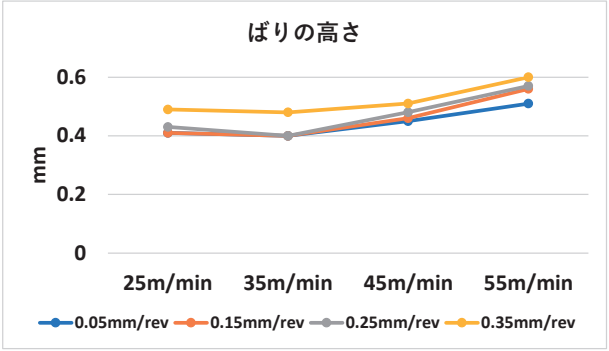


図 14　各周速、送りによるばり高さ

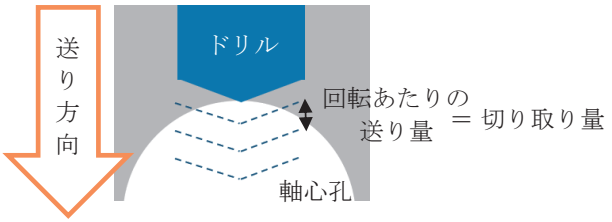


図 15　回転当たりの送り量について

続いて **4.3 節**より周速 35 m/min、送り 0.15 mm/rev を設備に設定し、先端角変更によるばりの高さの変化量の結果を**図 16** に示した。90 度から 140 度に先端角を大きくしたことで、この高さが低くなることがわかった。抜け際でドリルの先端が抜け始め、肩部が抜けるまでが切残し（塑性変形量）となるため、**図 17** のように先端角の違いで切残しに差が生まれ、ばりの大きさが変わったと考えられる。ただし、先端角 140 度と 180 度では、高さに変化がないことがわかった。交差孔の抜け際では 140 度と 180 度では切残しの差が少なかったと考えられる。従来は 140 度のドリルを使用していたため、140 度のドリルで次の検証を進めた。

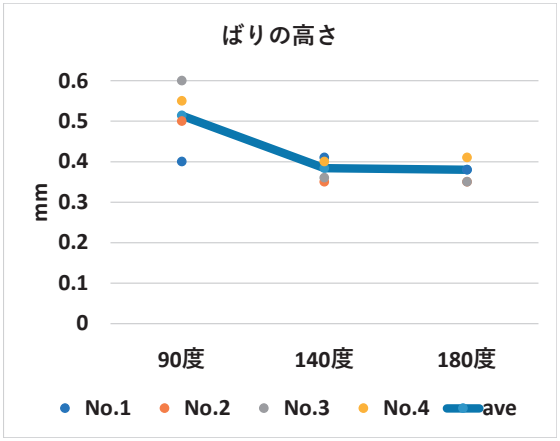


図 16　先端角によるばり高さ

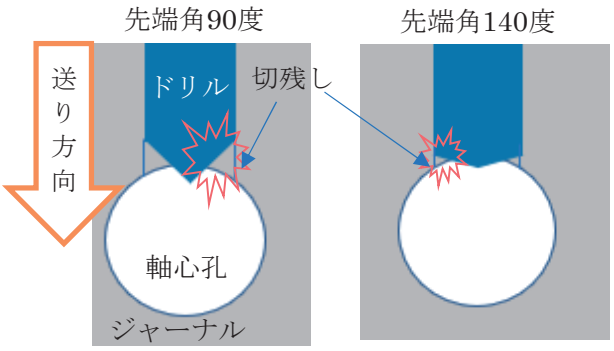


図 17　先端角違いについて

最後に仮説③取り代変更のばりの高さを**図 18**、写真を**図 19** に示す。仮説①②を併用した条件での高さの平均が 0.4 mm 程度だったのに対して仮説①～③を併用した結果では、0.3 mm まで抑制できた。**図 20** のように 2 パスにすることで ϕ 3.5 ドリルで生成したばりを ϕ 4 のリーマで一部削ったことにより、全体の高さを抑制することができた。

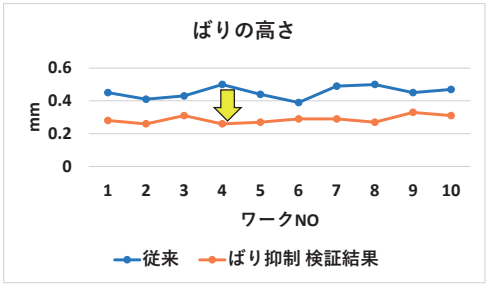


図 18　2 パス加工（取り代）によるばり高さの変化

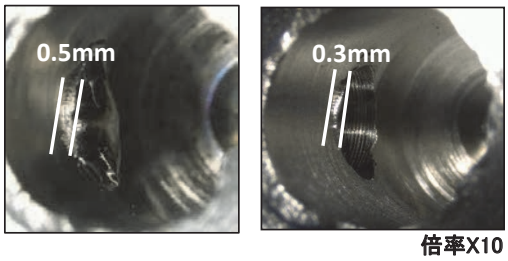


図 19　ばりの写真（左:従来パス 1 回、右:パス 2 回）

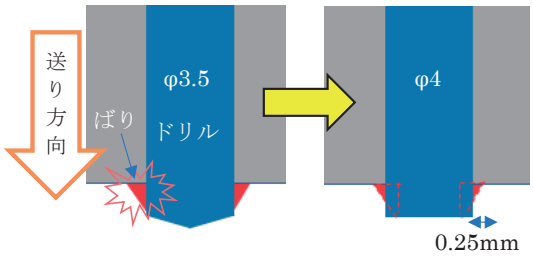


図 20　2 パス加工のばり状況

5　最終結果

3 章「ばりを除去する検証」及び **4 章**「ばりを抑制する検証」の結果のまとめを**表 7** に示す。

表 7　ばり除去の結果

ばり除去工法	品質	コスト	交差孔加工工法（工程 6）
液体ホーニング	ばり高さ 0.5mm 除去可	×	変更なし
ナイロンブラシ除去	ばり高さ 0.3mm まで除去可	○	工程分割 1→2 パスへ変更

両工法に対するコスト比較の結果、コスト優位のナイロンブラシ工法を採用した。カムシャフトという軸心深孔と油孔交差部に発生するばりを除去するためには、**4 章**で示すようにこれの生成を抑制させた上で、後工程にてブラシを回転させながら軸心内を通し、毛先で除去させる工法が有効である。この結果を受け、ナイロンブラシを油孔開けの後工程に当たる洗浄工程で取付けた設備を**図 21** に示した。分割（孔開け加工 2 パス化）、並びに洗浄工程でのブラシの追加により、当工程のサイクルタイムは＋ 0.16 min/ 台と計画値内であり、問題なしと判断した。ナイロンブラシの使用回数の限度を **3 章**の結果から 300 回に設定し、連続 300 本ばりがないことを評価した上で、量産工程への反映を実施した。ついてはこの活動の課題であった作業者によるばり取り作業を廃止（サイクルネック工程の廃止）することができ、サイクルタイムは計画値を達成した。

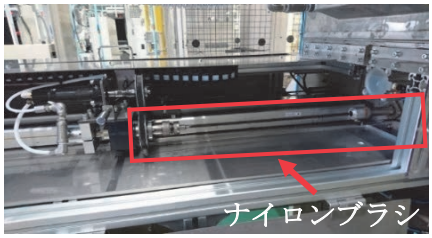


図 21　量産工程への反映:工程 6 洗浄工程

6　おわりに

今回、油孔と軸心内のばりを抑制することで、自動装置により除去することができた。ただし、同型エンジンでのほかのカムシャフトラインでは、全車型でばり有無の全数確認、並びにばりの除去を作業者が実施しているため、今回の活動を他ラインへも展開していきたい。また今回は、炭素鋼鋼材での調査だったが、そのほかの材質とばり高さの関係についても調査していきたい。

参考文献

(1)　北嶋弘一：バリ取り・エッジ仕上げ大全，日刊工業新聞社，(2014 年)

著　者



平川　啓太

解説・講義

欧州・日本のカーボンニュートラルに向けた政策動向

The Trend of Policies toward Carbon Neutrality in Europe and Japan

玉井　俊光*　Toshimitsu Tamai
鳥居　芳樹*　Yoshiki Torii
高下　佳祐*　Keisuke Takashita
鎌田　暁*　Satoru Kamada

要　旨

現在、世界各国が産業革命以降の地球の気温上昇を2℃以内に抑えるために、2050年までにCN（カーボンニュートラル：Carbon Neutrality）な社会を目指した政策が進められている。自動車業界にもGHG（温室効果ガス：Green House Gas）の削除・削減が求められており、本稿では欧州及び日本の政策動向についてまとめた。

Abstract

Today, countries all over the world are implementing policies to achieve carbon neutral (CN) society by 2050 to maintain the global warming not more than two degrees Celsius since the Industrial Revolution. The automotive industries are also required to delete/decrease GHG (Green House Gas). This summary describes the trend of policies in Europe and Japan.

1　はじめに

産業革命以降、人類は化石燃料の燃焼によるエネルギーを利用した技術発展を遂げ、急速に経済を成長させてきた。産業が発展すると同時に、世界各国でさまざまな環境汚染問題が局地的に発生し、特定物質の利用制限または代替物への移行などにより公害対策が行われてきた。昨今は温室効果ガス削減の対応に猶予がない状況であることがわかり、地球温暖化抑制の対応に焦点が大きく向けられている。本稿では気候変動に関するUNFCCC（国際連合枠組条約：United Nations Framework Convention on Climate Change）でのCOP（締約国会議：Conference of the Parties）及び、IPCC（気候変動に関する政府間パネル：Intergovernmental Panel on Climate Change）による評価報告書を受けて、2050年のCN社会に向けた国際的な地球温暖化抑制対策の方針、政策で先行している欧州と日本の動向を紹介する。

2　国際的なCNに向けた政策動向

2014年11月に公開されたIPCCの第5次評価報告書[(1)]によると、産業革命以降からの気温上昇を2℃以内に抑えなければ、気候変動の影響よるさまざまなリスクが生じるとの報告があった。これに対応するには産業革命以降のGHG総排出量を約3兆トン（CO_2換算）に抑える必要があるが、既に2011年までに約2兆トンを排出しており、それにより約1℃が気温上昇しているとのことである。地球温暖化抑制への対応としてCOP21（2015年11月、12月）[(2)]では世界約200ヵ国がパリ協定に合意し、加盟国それぞれが温室効果ガス削減目標を発表した。また、2018年10月に公表されたIPCCの1.5℃特別報告書[(3)]ではパリ協定で発表された目標を達成したとしても2030～2052年の間に約1.5℃気温が上昇すること、気温上昇を2℃より1.5℃に抑えることでさまざまな影響のリスクを大幅に減らすことができる科学的根拠が示され、温暖化対応に脆弱な国々へ1.5℃目標の主張を後押しすることとなった。また、この報告書には気温上昇を1.5℃に抑えるためには2050年ころまでにCO_2排出量を実質ゼロにする必要があるとされ、これに端を発して、COP26（2021年10月、11月）[(4)]では多くの国から2050年に向けてCO_2排出量を実質ゼロにする野心的な目標の見直しがあり、今後、世界的には2℃ではなく1.5℃以内に上昇を抑えることを各国目指すこととなった。

また、COP26開催に合わせて2021年5月にIEA（国際エネルギー機関：International Energy Agency）は2050年に向けて産業分野ごとに目指すべきCO_2排出ネットゼロへのロードマップ[(5)]を示し、自動車業界に対して2030年には乗用車の販売台数の60 %を電動車、2035年には内燃機関をもつ乗用車の廃止、重量車[1)]の50 %を電動車にするよう、具体的な目標値を提示した（**図1**）。なお、この目標は世界全体としての目標であるため、国ごとに対応が異なる野心的な目標設定が必要になると示されている。

注[1)] 重量車とはGVW15t超の大型トラックのこと。

*法規・認証部

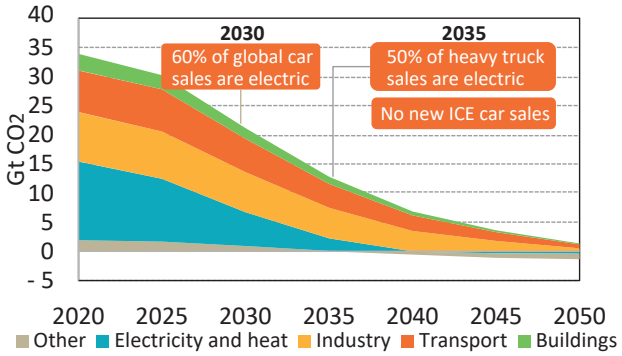


図 1　2050 年に向けた産業ごとの CO_2 排出ネットゼロのロードマップ（IEA のデータを元に作成）

3　欧州の CN に向けた政策動向

2018 年 11 月に欧州は、IPCC の 1.5 ℃特別報告書[3]を受けて、長期戦略ビジョン“A Clean Planet for all”[6]を公表した。従来目標の 2050 年に GHG80 %削減（1990 年比）から 2050 年に CN を目指す野心的な内容であった。

2019 年 12 月には 2030 年に GHG55 %削減（1990 年比）、2050 年に CN を目指し、EU を持続可能な経済社会へと導く指針“European Green Deal”[7]が公表された。ここではさまざまな部門に対する指針が掲げられているが、運輸部門の領域に注目すると 2050 年に GHG90 %削減を目標とし、それに向けた優先事項として現在の陸上貨物輸送の 75 %をより環境負荷の小さい鉄道等にモーダルシフトすることが示されている。また、移行ができない自動車に対しては、代替燃料車への乗り換えとそのインフラ普及拡大等が求められている。

2020 年 3 月には 2050 年の目標達成に向けて欧州全域で足並みを揃えて推進するため、新目標を反映した欧州気候法“European Climate Law”[8]が公表（2021 年 7 月に施行）され、これにより 2030 年及び 2050 年の目標に法的拘束力が備えられた。

2021 年 7 月には“European Green Deal”の 2030 年 GHG55 %削減に向けた各分野の具体的な取り組みが指令（Directive）または法規（Regulation）に落とし込まれ、政策パッケージとして“Fit For 55”が公表された。“Fit For 55”はさまざまな政策が直接または間接的に自動車に影響を及ぼす内容となっており、以降の **3.1 節**から **3.3 節**で自動車に関連する政策案を紹介する。

3.1　自動車 CO_2 規制の強化

乗用車･小型商用車に対する自動車 CO_2 規制強化[9]が提案され、2021 年の EU 全体の CO_2 排出目標値を基準値として、それに対する 2030 年、2035 年の CO_2 削減率が示された（**表 1**）。

表 1　乗用車 (a)･小型商用車 (b) の CO_2 規制強化概要

目標年	旧規制		新規制	
	(a)	(b)	(a)	(b)
2025 年	15%	15%	15%	15%
2030 年	37.5%	31%	55%	50%
2035 年	—	—	100%	100%

改定により新たに 2035 年に CO_2 削減 100 %と厳しい強化が提案されており、また規制値の強化だけではなく、ZLEV（Zero and Low Emission Vehicle：CO_2 排出量 50g/km 以下の自動車）の販売によって与えられる各メーカーの CO_2 削減量へのインセンティブを 2030 年に廃止する案等も含まれる内容であった。

大型車は乗用車･小型商用車とは走行距離等の使用条件が異なるため、慎重な議論が行われている。新規制の公表は 2022 年 11 月とされており、厳しい強化が予測されるが、商用車メーカーは特に長距離輸送の大型車に対する方針動向を注視する必要がある。

3.2　再生可能エネルギー指令

自動車用燃料を含むエネルギー部門の脱炭素化を促進するため、RED（再生可能エネルギー指令：Renewable Energy Directive）[10]の改定が提案され、2030 年までのエネルギーミックスに占める再生可能エネルギー（以下、「再エネ」と略す）比率の目標が従来の 32 %から 40 %に強化し、更に運輸部門の従前目標「2030 年の再エネ比率 14 %」に対し、より効果的な再エネの利用を促進するために、「2030 年の再エネ使用による GHG 削減率 13 %」提案している。これは自動車に対して脱化石燃料を利用した対策効果は限定的であり、かつ自動車の電動化は副次的な効果として市街地等の局地的な大気環境の改善も期待されるため、再エネ由来の電力使用が最も効果的な手段であるとしている。

3.3　代替燃料インフラ規則

再エネを含む代替燃料の普及には適切なインフラ整備が必須であるため、AFIR（代替燃料インフラ規則：Alternative Fuels Infrastructure Regulation）[11]が提案された。前身の DAFI（代替燃料インフラ指令：Directive on Alternative Fuels Infrastructure）[12]に対し、法規（Regulation）化されたことで欧州全域のインフラ整備が足並みを揃えて推進することとなる。また、各代替燃料の方針も変更しており、これまで運輸部門でインフラ普及を進めていた CNG（圧縮天然ガス：Compressed Natural Gas）、LNG（液化天然ガス：Liquefied Natural Gas）、LPG（液化石油ガス：Liquefied Petroleum Gas）に対しては、インフラは

既に成熟しつつあるとして現状維持となった。水素及び電気に対しては、発展を続けるFCV（燃料電池自動車:Fuel Cell Vehicle)、BEV（バッテリー自動車:Battery Electric Vehicle)、PHEV（プラグインハイブリッド自動車：Plug-in Hybrid Electric Vehicle）に対応するための目標を示した。

水素インフラは2030年までの目標として欧州横断輸送ネットワーク(以下、“TEN-T”と称す）上に150 km間隔でステーションを整備することが提案された。

電気インフラはTEN-T主要部に対して小型車と大型車ごとに、充電設備の総出力と、高出力充電に対応したプラグ数（最低設置数×最低出力）の目標値が提案された（**表2**）。

表2　TEN-T主要部における電気インフラ目標

電気		小型車	大型車
TEN-T主要部		60km ごと	60km ごと
2025年	総出力	300kW	1400kW
	プラグ	1基× 150kW	1基× 350kW
2030年	総出力	600kW	3500kW
	プラグ	2基× 150kW	2基× 350kW

3.4 欧州の政策状況

本章ではEUとしての大方針及び政策概要の一部を紹介した。目標達成に向けてはEU加盟27ヵ国ごとにエネルギー事情または経済事情等の条件が異なるため、各国ごとの適切な手段が採用される。また、これらはまだ提案（Proposal）であり、変更になる可能性もある。例えば、ウクライナ戦争を受け、2022年5月にEUはロシア産エネルギーからの脱却を目的に、エネルギー調達先の多様化、更なる省エネと再エネ利用の促進の取り組みを政策パッケージとして“REPowerEU Plan”[13]を公表した。“REPowerEU Plan”は“Fit For 55”での取り組みを強化したものであり、その1つに2030年の再エネ比率目標を40 %から45 %に更なる強化をしたものがある。

自動車メーカーからは欧州自動車工業会（ACEA）を通じ政策に対する意見が公表されており、例えば2021年12月に公表されたREDに対するポジションペーパ[14]には、電気と水素だけでなく、脱化石燃料を活用することで新車だけでなく使用過程車もCO_2削減の貢献が可能となり、更に既存インフラを活用することで電気自動車よりも迅速に結果を出すことが可能として、運輸部門の再エネ比率目標の強化及び道路輸送車両の目標設定の変更をEU当局に訴えているが、まだ自動車分野における脱化石燃料の具体的な指針の変更は示されていない。欧州当局はTank to Wheelに拘っているように読み取れ、ACEAの訴えを欧州当局がどう受け止めているかはまだ分からない状況ではあるが、その陰で自動車メーカーは政策変更に対応できるよう、あらゆる手段を講じて脱化石燃料に向けた開発に取り組んでいる。

4　日本のCNに向けた政策動向

4.1 日本のCN宣言

日本では2020年10月に菅元総理大臣が国会所信表明演説において2050年にCNを目指すことを宣言[15]し、脱炭素の潮流が如実に加速した。これまでパリ協定における日本の2050年のGHG削減目標は2013年度比80 %削減と決して低いハードルではなかったが、演説での「温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする」というキーワードは世間に大きく取り上げられた。温暖化対策は産業構造の変革を伴い経済成長につながることが強調され、次世代型太陽電池、カーボンリサイクルといった具体例も挙げながら、再エネ分野の革新的イノベーションが重要であると述べられた。また、原子力政策の推進とともに、これまでの石炭火力発電の政策を抜本的に見直すとの方針を示した。

4.2 2030年のGHG削減目標強化

各国が長期目標及び2030年の短期目標の強化を図る流れに乗じて、日本も2030年のGHG削減目標値を引き上げた。従来は2013年度比26 %削減であった目標値が、46 %削減に強化された[16]。2050年のCNはバックキャストの考えで設けられた目標であるのに対し、2030年の目標は可能な削減原資を積み上げるフォアキャストな試算が入っており、より各業界の足元課題に関わることになる。業界ごとの目標値の強化については、**4.4節**の地球温暖化対策計画の項目で示す。

4.3 グリーン成長戦略

菅元総理大臣のCN宣言を受け、経済産業省は関係省庁と連携して2020年12月に「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を策定[17]し、更に翌年6月にはより具体化したものを発表した。この戦略では14の重要分野が定められており、自動車産業は「⑤自動車・蓄電池産業」に政策案が記載された。各分野で高い目標が掲げられ、課題と今後の取り組みが明記され、予算、税、規制改革･標準化、国際連携まであらゆる政策を盛り込んだ実行計画がまとめられている。

2021年6月の具体化時には自動車・蓄電池産業における商用車の電動化目標が**表3**の通り明記された。

表 3　グリーン成長戦略における商用車の電動化目標

	2030 年	2040 年
8t 以下	新車販売の 20～30% 電動車	電動車と脱炭素燃料 対応車合わせて 100%
8t 超	5000 台先行導入	2030 年までに設定

2020 年 12 月の初版公表時は「遅くとも 2030 年代半ばまでに、乗用車新車販売で電動車 100 %を実現できるよう、包括的な措置を講じる。商用車についても、乗用車に準じて 2021 年夏までに検討を進める」とされていたが、2021 年前半に政府が行ったヒアリング等において、業界団体が商用車の用途の多様さ、電動化の難しさ、社会コストへの影響を省庁に訴えかけた結果、目標が見直しされた。しかしながら、これらは依然高い目標であり、また GVW 8 t 超の 2040 年の目標は保留とされていることから、今後の状況次第で厳しい目標が設定される可能性がある。メーカーが対応可能な目標設定を得るには次世代車両とエネルギーの双方の技術進展を踏まえながら、政策動向の把握及び省庁との会話継続が重要である。

また、新エネルギー車の普及に不可欠な充填インフラの目標も明記された。EV（PHEV を含む電気自動車を示す）については、公共用の急速充電器 3 万基を含む充電インフラ 15 万基を設置することで、2030 年までにガソリン車並みの利便性を実現するとされている。FCV については、2030 年までに 1,000 基程度の水素ステーションを最適配置で整備するとされた。

更にエネルギーについては、それぞれ「①洋上風力・太陽光・地熱産業（次世代再生可能エネルギー）」、「②水素・燃料アンモニア産業」、「③次世代熱エネルギー産業」という別の枠組みに記載があり、これらの業界情報も引き続き注視していく必要がある。

4.4　環境省　地球温暖化対策計画

4.2 節で記載した GHG 削減目標強化に伴い、環境省は 2021 年 10 月に地球温暖化対策計画を 5 年ぶりに改定 [18] し、部門ごとの削減率目標（**表 4**）を発表した。

部門別で最も強化されたのは、39 %削減から 66 %削減に引き上げられた家庭部門になる。産業部門も 7 %削減から 38 %削減と大きく引き上げられように見えるが、この部門は 2019 年には 16.5 %削減と目標 [19] を過達している状況下での強化である。対して運輸部門は 27%削減から 35 %削減の強化であるが、2019 年の実績が 7.7 %削減であることから強化の度合いは大きいと言える。これらの目標を達成するために部門の方針が掲げられ、運輸部門では (a)～(j) までの計 10 の取り組みが示された。次の **4.4.1 項**から **4.4.3 項**で自動車に大きく関わる内容を 3 つ紹介する。

表 4　日本の温室効果ガス排出量目標

温室効果ガス排出量・吸収量（単位：億 t-CO_2）		2013 排出実績	2030 排出量	削減率	従来目標
		14.08	**7.60**	**▲ 46%**	▲ 26%
エネルギー起源 CO_2		12.35	6.77	▲ 45%	▲ 25%
部門別	産業	4.63	2.89	▲ 38%	▲ 7 %
部門別	業務その他	2.38	1.16	▲ 51%	▲ 40%
部門別	家庭	2.08	0.70	▲ 66%	▲ 39%
部門別	運輸	2.24	1.46	▲ 35%	▲ 27%
部門別	エネルギー転換	1.06	0.56	▲ 47%	▲ 27%
非エネルギー起源CO_2、メタン、N_2O		1.34	1.15	▲ 14%	▲ 8 %
HFC 等 4 ガス（フロン類）		0.39	0.22	▲ 44%	▲ 25%
吸収源		-	▲ 0.48	-	（▲ 0.37 億 t-CO_2）
二国間クレジット制度（JCM）		官民連携で2030年度までの累積で 1 億t-CO_2 程度の国際的な排出削減・吸収量を目指す。我が国として獲得したクレジットを我が国の NDC 達成のために適切にカウントする。			

出典：環境省「地球温暖化対策計画の改定について」[20]（https://www.env.go.jp/earth/211022/mat02.pdf）より抜粋し、いすゞ自動車にて加工して掲載

4.4.1　(b) 自動車単体対策

自動車単体対策は、今回の改定でより電動化の方向性が強調された。これまで次世代自動車と定義されていた「クリーンディーゼル車」と「CNG 車」は対象から外され、満充電設備の道路内配置、走行中給電技術の研究支援、高速道路利用のインセンティブ付与等、より踏み込んだ電動化施策が追加された。FCV についても省をまたがる規制の一元化など、具体的なアクションについての記載を追加した。内燃機関搭載車については燃費基準策定を中心に、引き続き規制とインセンティブ制度の両輪措置を続けるとし、また日本ではあまり有力視されていない印象があるバイオ由来の燃料についても、CN の扱いとすることを改めて明記した。

4.4.2　(h) 脱炭素物流の推進

脱炭素物流の推進で商用車についての指針が示された。地域内配送は EV、長距離輸送は FCV と電動化の棲み分けが示され、物流施設及び配送網の集約化、輸送効率の合理化など、効率化も重要としている。また、EC（電子商取引：Electric Commerce）が増加していく状況下のため、再配達の削減及び受け取り方法の多様化についても言及された。**4.4.1 項**では述べられなかった大型 CNG トラック及びダブル連結トラックについても、この項目に記載されている。

4.4.3　(i) 電気・熱・移動のセクターカップリング

電気・熱・移動のセクターカップリングでは、エネルギー側から見た自動車のあり方が述べられている。エネルギーの地産地消または面的利用が重要とし、供給量コントロールの難しい再エネに対して柔軟な需要及びストレージとして、EV 及び FCV が位置付けられている。またバッテリー交換式 EV 等についてもこの項目に位置付けられ、実際に環境省による実証事業が行われている。

4.5 経済産業省　第６次エネルギー基本計画

4.4 の地球温暖化対策計画と同日、経済産業省はエネルギー基本計画の第６次改定を行った[21]。2050 年 CN と 2030 年度の新目標の達成はもとより、世界的な地球温暖化対策への取り組みを背景とした各種国際ルールにおいて、日本が主導で取り組むことも重要視している。また、脱炭素に向けての大きな変革に際しても、S＋3E（Safety+Energy,Security,Economical efficiency,Environment）が引き続きエネルギー政策の大前提に据え置かれている。

電力については、再エネの主力電源化を最優先とし、水素・アンモニア発電または CCUS（Carbon dioxide Capture and Storage）・カーボンリサイクルを前提とした火力発電のイノベーションを進めるとした。加えて需要サイドには、徹底した省エネルギーも追及している。同時に公表された 2030 年エネルギー需給の見通しも 2019 年に策定されたものから修正されている（**図２**）。また、再エネ比率は 22～24 ％から 36～38 ％に上方修正されており、水素・アンモニアは全体の電源構成の１％とされた。

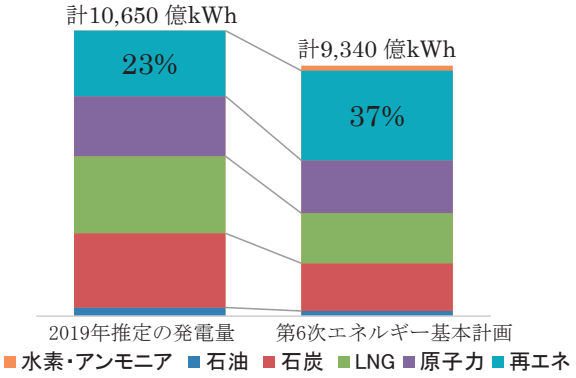


図２　2030 年エネルギー需給見通しの変化

発電量についても省エネルギー化を前提に 10650 億 kWh から 9340 億 kWh に削減した値に修正された。ただし、これは高い目標にむけて野心的に立てられた見通しで、安定供給を損なわぬよう施策の強度またはタイミングを十分考慮するとされている。なお、36～38 ％の再エネは、太陽光が 14～16 ％、水力が 11 ％、風力が５％、バイオマス由来が５％、地熱が１％とし、一番多くを占める発電源が水力から太陽光に置き変わる計画が立てられた。

水素については安定供給に向けて、海外からの輸入と国内資源を活用した製造基盤の確立が合わせて述べられた。具体的には国際水素サプライチェーンの構築、余剰再エネ等を活用した水電解装置での水素製造の商用化、などが述べている。水素製造コストについては 2021 年現在 100 円/N㎥であるが、2030 年に 30 円/N㎥、2050 年に 20 円/N㎥に低減させ、供給量については現在約 200 万 t/ 年のところ 2030 年に最大 300 万 t/ 年、2050 年に 2,000 万 t/ 年に拡大させる見通しである。水素の商業的運用は供給側のみならず需要側の取り組みが不可欠であり、FCV での利用のみならず水素を発電で用いることも見込まれている。

自動車の省エネルギーについては低燃費車の普及拡大、燃費基準の順守に向けた執行強化、省エネ法における荷主・運送事業者の評価の在り方検討、AI／IoT（Artificial Intelligence／Internet of Things）等を活用した物流全体の高効率化、などが述べられた。また、各種省エネ施策による削減量の見通しはエネルギーを原油換算した結果、自動車単体対策はこれまでの 939 万 kl から 990 万 kl と僅かに増加し、トラック輸送の効率化については進捗が好調であることから、47 万 kl から 425 万 kl に大幅に増加され、大きな期待が持たれている（**図３**）。

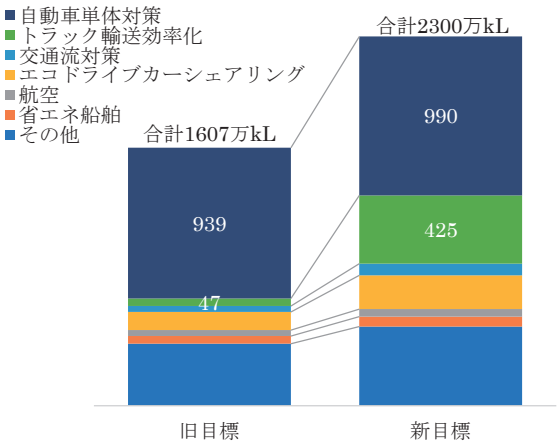


図３　運輸部門の省エネルギー量見通しの変化

4.6 国土交通省　国土交通グリーンチャレンジ

環境省、経済産業省の施策公表に先立ち、国土交通省は 2021 年７月に“国土交通グリーンチャレンジ”を策定した[22]。これは従来の国土交通省気候変動適応計画と国土交通省環境行動計画を、グリーン成長戦略に応じて統合したものである。2030 年度までに重点的に取り組む６つのプロジェクトがあり、自動車については「自動車の電動化に対応した交通・物流・インフラシステムの構築」と「デジタルとグリーンによる持続可能な交通・物流サービスの展開」に記載された。

自動車単体に対する施策については、地域内配送の EV 化、長距離輸送の FCV 化、それら次世代自動車への補助事業、燃費基準の向上といった内容が、他省の政策と同様に記載されている。EV に対する高速道路利用時のインセンティブ、走行中給電システムの技術開発支援、EV 充填機の公道設置といった内容は

地球温暖化対策計画と重複しているが、ここでは道路インフラに関わる内容が記載された。またレジリエンスの観点から、災害時に電動車から住宅に電気を共有する V2H “Vehicle to Home”、移動式電源車の価値の普及啓発が図られている。更に高速道路での自動運転・隊列走行等の検討推進、ダブル連結トラックの普及等による効率的な物流ネットワークの強化を図ることも記載された。人員の輸送については公共交通の利用促進が述べられ、LRT（次世代型路面電車：Light Rail Transit）、BRT（バス・ラピッド・トランジット：Bus Rapid Transit）、EV、FCV の導入を促進する旨を記載している。

国土交通省と環境省の自動車施策は基本的に歩調を合わせており、CN に応じて策定された政策においても重複した内容が多くあり、協力関係が伺える。また、次世代自動車についての補助事業及び技術開発事業など、両省が連名で行っているものが多いのも特徴的である。

4.7 日本の政策状況

CN に向けての日本の自動車政策は、欧州の政策に乗じて乗用車の電動化を大きく打ち出している一方、商用車については EV に絞らずさまざまな手法に可能性が残された表現になっている。FCV はもちろんのこと、合成燃料を用いた内燃機関もその可能性の 1 つとして位置付けられた。また、全体の CO_2 削減効果で見ると、自動車単体の電動化のみならず、利用の効率化による省エネルギー対策が大きな効果を持つことが分かる。

エネルギー政策から見ると輸入燃料に頼った火力電力に依存している現状から、より再エネ割合の高い電源構成への転換を目指すため、変動する供給に対応可能な需要側の変革が必要とされている。EV 及び FCV は電力需給がひっ迫した際の電力供給または供給過剰になった際のエネルギー貯蔵ができる点からも社会実装が求められている。

水素については世界でも早期に基本戦略を策定し、技術を先導してきたことから、特に経済産業省が強く推進していく意向が伺える。

本章で述べた日本の政策は発表した後に各業界団体からのコメントを要望する欧州とは異なり、事前に業界の意向を聞き取ったあと、CN をリードする欧州の様子も注視しながら、総合的に判断された内容になってはいるが、結果として自動車メーカーの意見を多く取り入れられている。また、商用車に関わる詳細については、エネルギー産業と商用メーカー等の状況を鑑みつつ、政策の落としどころを慎重に探っている最中である。

5 おわりに

世界各国は CN に向けて野心的な目標を掲げているが、多くの国ではまだその目標に対する具体的な政策・方針を立案している最中である。欧州は国際的な動きにいち早く対応し、世界に先駆けてさまざまな法律案を提出しており、これに対して関連する業界がコメントをすることで、実現性を持った内容に精査されつつある。他の国々も自国エネルギー事情を考慮した政策を立案しているが、欧州の政策に影響を受けたものが多く、日本も同じ状況である（政策体系を**図 4** に示す）。

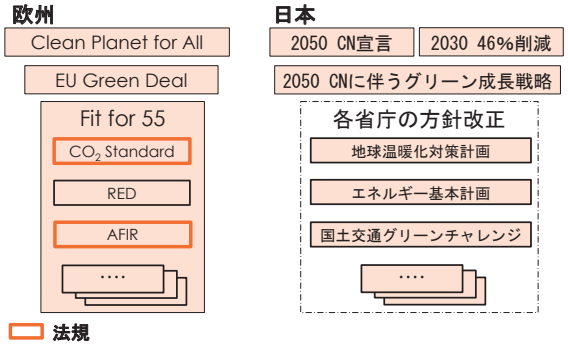


図 4 日本の温室効果ガス排出量目標

また、商用車はさまざまな用途に利用されることから、1 つの方針（例えば電動化）に絞った対応ではなく、用途に応じたパワーソースの開発を行う必要があり、世界各国に自動車販売を行っているいすゞ自動車も例外ではない。本稿では世界の CN の一端を紹介したが、記載した政策は生き物であり、今後、アメリカ及び中国等の経済大国の CN 対応により方針が変わってくることがある。そのため、複雑な商用車への対応を行うために引き続き動向を注視し、逐次整理していく必要がある。

参考文献

(1) IPCC, 2014 年, “Climate Change 2014 Synthesis Report”, IPCC ホームページ, (2022 年 6 月 6 日取得, https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/).
(2) UNFCCC, 2016 年, “Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015”, UNFCCC ホームページ, (2022 年 7 月 5 日取得, https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf).
(3) IPCC, 2018 年, “Global Warming of 1.5 ℃”, IPCC ホームページ, (2022 年 6 月 6 日取得, https://www.ipcc.ch/sr15/).
(4) UNFCCC, 2022 年, “Report of the Conference of the Parties on its twenty-sixth session, held in Glasgow from 31 October to 13 November 2021”, UNFCCC ホームページ, (2022 年 7 月 5 日取得, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cp2021_12E.pdf).

(5) IEA, 2021年, “Net Zero by 2050”, IEAホームページ, (2022年6月6日取得, https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050, All rights reserved).
(6) European Commission, 2018年, “COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE, THE COMMITTEE OF THE REGIONS AND THE EUROPEAN INVESTMENT BANK A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy”, EUホームページ, (2022年6月6日, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0773)
(7) European Commission,2019年, “COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS The European Green Deal”, EUホームページ, (2022年6月6日, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1588580774040&uri=CELEX:52019DC0640)
(8) European Commission,2021年, “Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 (‘European Climate Law’)”, EUホームページ, (2022年6月6日, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119)
(9) European Commission,2021年, “Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Regulation (EU) 2019/631 as regards strengthening the CO_2 emission performance standards for new passenger cars and new light commercial vehicles in line with the Union's increased climate ambition”, EUホームページ, (2022年6月6日, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0556)
(10) European Commission,2021年, “Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council, Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council and Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652”, EUホームページ, (2022年6月6日, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0557)
(11) European Commission,2021年, “Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council”, EUホームページ, (2022年6月6日, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0559)
(12) European Commission, 2014年, “Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure Text with EEA relevance”, EUホームページ, (2022年6月6日, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32014L0094)
(13) “COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS REPowerEU Plan”, EUホームページ, (2022年6月6日, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483)
(14) ACEA,2021年, “Position paper - Renewable Energy Use Directive (RED) and Fuel Quality Directive (FQD)”, ACEAホームページ, (2022年6月6日, https://www.acea.auto/publication/position-paper-renewable-energy-use-directive-red-and-fuel-quality-directive-fqd/)
(15) 首相官邸, 2020年,「第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説」, 首相官邸ホームページ, (2022年6月22日取得, https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html)
(16) 地球温暖化対策推進本部, 2021年,「日本のNDC(国が決定する貢献)」, 首相官邸ホームページ, (2022年6月22日取得, https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai41/siryou1.pdf)
(17) 内閣官房,2021年,「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」, 経済産業省ホームページ(2022年6月22日取得, https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf)
(18) 環境省, 2021年,「地球温暖化対策計画」, 環境省ホームページ, (2022年6月22日取得, https://www.env.go.jp/earth/211022/mat01.pdf)
(19) 環境省, 2021年,「2019年度における地球温暖化対策計画の進捗状況」, 環境省ホームページ, (2022年6月22日取得, https://www.env.go.jp/content/900502564.pdf)
(20) 環境省, 2021年,「地球温暖化対策計画の改定について」, 環境省ホームページ, (2022年6月22日取得, https://www.env.go.jp/earth/211022/mat02.pdf)
(21) 経済産業省資源エネルギー庁, 2021年「第6次エネルギー基本計画」, 経済産業省資源エネルギー庁ホームページ, (2022年6月22日取得, https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf)
(22) 国土交通省, 2021年「グリーン社会の実現に向けた「国土交通グリーンチャレンジ」」, 国土交通省ホームページ, (2022年6月22日取得, https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001412433.pdf)

著　者


玉井　俊光


鳥居　芳樹


高下　佳祐


鎌田　暁

解説・講義

横浜新本社の紹介

Introduction of Yokohama New Head Office

上田　茂樹*
Shigeki Ueda
高橋　拓生**
Hironao Takahashi
藤井　勉***
Tsutomu Fujii
今春　大介****
Daisuke Kompal
園田　啓介****
Keisuke Sonoda
櫛田　直*****
Tadashi Kushida
片倉　篤*****
Atsushi Katakura

要　旨

いすゞ自動車は、2022年5月9日に本社を東京都品川区から神奈川県横浜市に移転した。この度の移転は、幾つかの目的と効果を意図しての移転である。新たなオフィスの構築は、それらを具現化すべく行ったものであり、その内容について紹介する。

Abstract

On May 9, 2022, ISUZU Motors moved its headquarters from Shinagawa Ward, Tokyo, to Yokohama, Kanagawa Prefecture. The construction of the new office was carried out to embody them, and I will introduce how it was done.

1　はじめに

1.1 本社移転概要

いすゞ自動車（以下「いすゞ」）は、2022年5月9日に本社を創業の地である大森（東京都品川区南大井）から神奈川県横浜市西区に移転した。物件名は横濱ゲートタワー（竣工は2021年10月14日）。JR線・東急東横線・京急線「横浜」駅から徒歩3分、みなとみらい線「新高島」駅から徒歩1分に位置し、地上21階建地下1階建の建物である。いすゞグループはそのうち5階から15階の11フロア（約31,111 ㎡）を賃借している。移転人員数は約2,500名（いすゞ本社約1,200名、関連会社ほかで1,300名）であり、移転したいすゞグループ会社はいすゞ含め15社となった。

1.2 本社移転の目的

この本社移転は、オフィス環境整備による生産性向上、藤沢工場との近接化による業務効率の向上、グループ企業の連携強化、セキュリティ強化などを主な目的としている。

また、いすゞグループは、「中期経営計画2024」において、ESG（環境・社会・ガバナンス：Environment/Social/Governance）を視点とした経営への進化を掲げ、ダイバーシティの促進とコミュニケーションの変革によるイノベーションを創出する集団への転換を通して、グローバルなサステナビリティ企業を目指している。

よって、この本社移転により、さまざまな業種の企業が研究・開発拠点を構える横浜へ移転し、かつ従業員が働きやすく交わりやすいオフィスを設計することで、イノベーションの源泉となる内外コミュニケーションを促進することを狙いとした。

これらは100年に一度の変革期に機動的かつ能動的に対応する体制つくりを企図したものである。

2　移転先の横濱ゲートタワーについて

2.1 横濱ゲートタワーのコンセプト

横濱ゲートタワーは横浜みなとみらい21地区（以下「MM21地区」）の58街区（**図1**）にある。当地は横浜駅からMM地区への玄関口であり、横浜港へとつながるキング軸の重要な起点となる場所に当たる。

そのような場所にある横濱ゲートタワーは、新たなワークスタイルを実現するオフィス機能と横浜の新名所となる賑わい機能を導入し、MM21地区全体の都市ブランド向上に貢献する施設を目指して建設された。



図1　横濱ゲートタワーのあるMM21地区

*総務人事部　**生産技術企画部　***いすゞエステート㈱　****㈱坂倉建築研究所
*****鹿島建設㈱　******㈱フジマック

2.1.1 高機能かつ新しいワークスタイルを実現するオフィス

高い日射遮蔽性能を有する外装アルミカーテンウォール、新たな空調設備方式を採用した快適性の高い執務空間を実現し、サテライトワークスペースなどオフィスサポート施設を充実させた平面設計としている。また低層棟 3 階屋上にはアーバンテラス、2 階には本施設に勤めるオフィスワーカー専用のラウンジを配置し、さまざまなワークスタイルへ対応可能な施設となっている。

2.1.2 横浜市の新たな名所

横濱ゲートタワーのシンボルとなっている球体は、内部に横浜エリア初の出店となるプラネタリウム施設「プラネタリア YOKOHAMA」（**図 2**）である。さまざまなコンテンツを配信することで新たな情報発信拠点、観光スポットとしての役割を果たすことを期待されている。

横浜市の設定している海へ向かった都市軸「キング軸」の起点としての賑わいを創出できるよう、飲食店舗から物販店舗まで対応可能な商業施設を配置している。

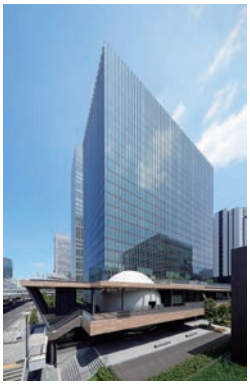


図 2　プラネタリウムを備えた横濱ゲートタワー

3　横浜新本社の設計コンセプトとデザインについて

3.1 横浜新本社のメインコンセプト

いすゞグループは横濱ゲートタワーのうち、主に 5 階から 15 階の 11 フロアを賃借した。

8 階と 12 階は階高と床荷重に余裕を持たせた「特殊フロア」として設計されているため、8 階を食堂・12 階を来客用会議室とした。そのほかは一般フロアであるためおおむねオフィスとした。

オフィス全体を通じてのコンセプトは“I-BASE”とし、“ISUZU Nexus Activity Base”という造語の略であり、このオフィスが単なる本社機能のみならず、社内外の Nexus（きずな）を深めて、イノベーションを創出する活動の拠点にしたいという想いによるものである。

3.2 内装設計コンセプト

“I-BASE”において大切にしている、いすゞブランド、いすゞプライドを象徴する“ISUZU WAY”を、内装コンセプトとして採用した。これは「運ぶ」を支える日本最古の自動車会社の歴史と未来への成長を結ぶ「道＝ WAY」を象徴するモチーフである。

このモチーフは ISUZU PLAZA（いすゞの企業ミュージアム）でも採用し、複数の展示テーマを空間的に統合するものとした。一方、“I-BASE”における“ISUZU WAY”は、いすゞの歴史を感じ未来へ新化する道、方法を表すことに主眼を置いている。

3.3.　デザインについて

積層型の建物にありがちな、層ごとに分断されてしまう内装を、“ISUZU WAY”という共通のモチーフで、新本社全体が統一感のある空間となることを目指した。

天井の形状と床の仕上げなどで、「道＝ WAY」を意識するように表現した。

いすゞの社名の由来である伊勢神宮の五十鈴川の流れ（**図 3**）を表現した装飾を要所に取り入れた。



図 3　五十鈴川の流れ

また、トラックキャブデザインの思想である「ヘキサポット」、車造りに欠かせない金属並びにコーポレートカラーの「白、赤、黒」を基調とした色彩計画により、従業員エンゲージメント並びに企業イメージの向上を狙ったデザインとした。更に、SDGs 及び ESG なども意匠デザインの中に明確に掲げ設計した。

建築デザインが織りなす空間は、ときとして色、形状及び質感などで人体に少なからず影響を与えているものである。例えば色彩が白一色だと落ち着かない空間となり情緒不安定になる。また、斜めの床では平衡感覚など感覚機能に変調をきたしてしまうこともある。当該計画デザインでは、人体に及ぼす影響に対して、違和感なく自然と体に馴染み、リラックスできる空間となるように配慮されたデザインとなっている。

4　各フロアについて

4.1　2 階総合受付

新本社における最初の顔となるエリア（**図 4**）である。

人工大理石のカウンターは、車体を連想させる曲面で自動車会社らしさを表現した。カウンター背面の光壁は、五十鈴川の流れを表現したキャストガラスで、いすゞの歴史と未来への道を来客者へ感じさせる。

ものづくりを体現する日本最古の自動車会社が来客を迎え入れるにふさわしい空間とした。



図 4　2 階受付

4.2　執務室エリア

新本社における中枢となるエリアが、執務室エリアである。座席については、昨今の働き方の変化及び組織変更などにフレキシブルに対応できるよう、グリッドプランを採用した。これはオフィスフロアをたてよこの「グリッド」で区画（**図 5**）し、空間ユニットの配置を決める手法である。これにより人員及び組織の変更による什器の増減及び入れ替えに柔軟に対応ができ、オフィスの美観も保つ工夫を行った。

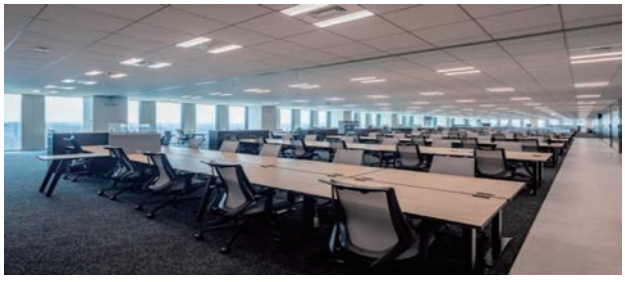


図 5　グリッドに区画した執務室

まず、レイアウトするに当たり、エレベーターコア側に会議室を配置した。壁際であるが採光が取れ、快適な会議が行われるよう、大きなガラスパーテーションを採用した。

次に、ベース席として、一般的な個人席の集合体ではなく、大きなテーブルを採用した。これにより個人机は単なる個人作業としての机以外にも、チームでコミュニケーションが取りやすくなうような工夫を行った。

この建物の特徴である、開かれた南面を最大に活かすレイアウト配置として、コミュニケーションをテーマにソファブース、マグネットスペースを設けた。マグネットスペースには給茶及び菓子等を配置することで、気軽なコミュニケーションの増進を狙った。

また、南面には集中を助ける防音ブース、カウンター席を設けることで、状況に応じて環境を変えながら、個人が自由に場所を選択して執務を行えるエリアを設えた。

これらのゾーニングの中心に従業員が行き交う動線“ISUZU WAY”を中心軸として設定した。これは先述のデザインコンセプトに加え、この動線を従業員が行き交うことで、従業員間の新たな出会いの促進を意図して配置したものである。

また、「バイオフィリックデザイン[1)]」を意識し、インテリアにグリーンを設えることで従業員のストレス緩和及びリラックス効果を狙った。

注 [1)] バイオフィリックデザイン：自然や生命を感じられる環境を取り入れたオフィスデザイン

4.3　12 階会議室エリア

“I-BASE”全体のインターフェイスとして位置付け、フロア中央部を受付ホールとし、採光の取れる東西南側に会議室を配置した。南東角、南西角は眺望を楽しむことができるオープンミーティングスペースとした。コアのある北側にバックヤードを設け、受付に近い場所は、営業的利用を行うプレゼンテーションルームと商談室とした。

受付ホールは入口から外に視線が抜ける空間とした。受付カウンターを円弧の LED モニターの壁で囲い、受付の中心性を高め、天井には光幕照明を設え、“ISUZU WAY”を表現（**図 6**）した。



図 6　12 階受付と大型 LED モニター

エントランスから東西に延びる廊下は、壁面を照らす間接照明で強調された天井で“ISUZU WAY”を表現し、曲がり角をアール壁面とすることで、廊下の連続感を演出した。

会議室と廊下の間仕切りはガラス壁で、明るく開放的な空間とし、少人数で利用するM（中）会議室、大人数利用のL（大）会議室、可動間仕切りによるフレキシビリティーを持ったLL（特大）会議室の3タイプを設けた。

SDGsへの取り組みとして、教育的側面から事業紹介等を行うLEDモニター展示及びジオラマ展示、環境的側面からインテリアグリーンをそれぞれ受付ホールに配置した。また、礼拝室をコア側に設けダイバーシティにも対応している。

4.4 12階診療所エリア「横浜診療所」

いすゞ病院の分室の役割を担う。内装は明るく健康的な印象となるよう、木と白色を基調とした空間とした。バリアフリー対応としてストレッチャー及び車いすに配慮した通路は、各所室に隣接するLL会議室と一体化させることで、健康診断の会場としても使用できるフレキシブル性に富んだレイアウトとした。

また、施設内のホスピタリティ推進の一環として健康相談室を当該フロアに設けている。

4.5 8階食堂エリア“YOKOHAMA Terrace”

関連会社を含む全従業員が、利用目的を限定せずに一日中集うことができるコモンエリアである。従来の社員食堂のように昼食のみに利用するのではなく、朝食～夕食、カフェ、ワーキング、ミーティング、リラックス、レクリエーション、パーティーなどの利用が可能である。

コア側に厨房を配置し、自然採光のとれる東西南側を大きな食堂ホールとした。

食堂ホールの通路と壁は、いすゞと関わりの深い伊勢神宮、藤沢工場、栃木工場などの方角に向かうように設計（「軸線」という）した。これは五十鈴川を連想させる波打つ鏡面の天井（**図7**）と合わせて、“ISUZU WAY”を表現する。



図7　水面天井とスケルトン天井

床は高低差を設け差エリア分けを行い、利用者が目的及び内容に応じて最適な場所を自ら選択できるようにした。個々の集中力を高めて利用する一人用席。リラックスしながら交流を深めるソファ席。部門間を飛び越えたミーティングでも利用できる大テーブル席。個人利用からコミュニケーションを誘発するものまで、変化に富む領域を展開した。

また、オープンキッチンの厨房は食堂ホールとの一体感を演出し、スケルトン天井と合わせて気積が大きく開放的な空間とした。

食事提供カウンターは、車体を連想させる曲面を用いたカウンターを設計。中央に位置する大テーブルは、伊勢神宮の神宮杉から切り出された無垢板テーブルとし、五十鈴の杜を表現したインテリアグリーンを配置。いすゞの原点及び歴史、技術に触れられる要素を設えている。

4.6 8階厨房エリア

今回の厨房には、省人化と効率化を目的に2種類のロボットを導入した。

1つは、コンベアを流れる洗浄済みの食器をピッキングし、仕分ける食器自動仕分ロボット（**図8**）と、もう1つは食器などを無人で搬送する自律移動搬送ワゴン（**図9**）である。



図8　食器自動仕分けロボット



図9　自律移動搬送ワゴン

下膳後の食器洗浄は、高温多湿な環境で長時間の立ち仕事を余儀なくされる。また食器類の運搬では相応の力も求められるため、これをロボットに置き換えた。

食器仕分ロボットは、画像認識技術を用いて食器の種類を認識し、AI に連なる技術で食器の種類及び仕分場所を学習し、関節機能を備えた産業用ロボットでもあるアームが食器をピッキングし、仕分けるものである。

自律移動搬送ワゴンは搬送ルートを計算し、センサで障害物を察知し、食器類を離れた場所まで無人で運ぶものである。一度に運べる重さは最大で 70 kg。米 1 俵（60 kg）よりも重い食器類の積載が可能なものである。

これらは厨房で働く従業員の労働環境の改善並びに作業効率の向上につながるものであり、ひいては SDGs に資するものとして導入した。

5　IT 環境の整備について

従業員が働きやすいオフィス環境を整えるために、IT 環境の整備を合わせて行った。セキュリティ・BCP（事業継続計画：Business Continuity Plan）強化、ペーパーレス促進、業務効率化などの課題に対し、次の **5.1 節～5.3 節**のように IT 機器を導入した。

5.1　セキュリティ・BCP 強化
- 入退室管理・来客者管理 -

2 階のエレベーターホール前に「フラッパーゲート」を設置し、オフィスへの入場制限を実施。いすゞグループのオフィスへの入場導線を極力しぼることで、不正侵入を防いでいる。また一般的なフラップよりもハイフラップのフラッパーゲートを採用することで、乗り越えての不正入場を困難にしている。

また、来客者は「事前予約制」として、従業員がシステム上で許可した来客者のみが入場できる仕組みを導入した。これは Office365 と連携しているシステムで、Office365 の outlook に従業員が自身のスケジュール登録する際に、同時に「来客者への入場案内（入場に必要な QR コード発行）」と「会議室予約」を可能にしたものである。Outlook では従業員間のスケジュール調整も同時に行えるので、来客者管理を厳格に行えるようになったのみならず、今までのスケジュールの調整手間を大きく減らし、業務効率の向上にもつなげている。

なお、入退室管理・来客者管理をすることは、災害時に在場数及び在場者を容易に把握する、いわゆる「在場管理」が可能となるため、BCP 強化ともなっている。

5.2　ペーパーレス促進
- 電子決裁とオンラインストレージ -

移転に当たり長年の書類の蓄積が課題であった。書類はオフィスに置けばオフィスの有効面積を減らすため、オフィスの利用効率が悪いのみならず、書類に依存した働き方は、働く場所を限定するため業務効率も劣ることになる。したがって、本社移転の際には文書削減活動を実施した。書類を電子化（PDF 化など）し、併せて削減を実施することで、8 割の書類削減を達成した。なお、新たな書類を増やさぬように、2 点の工夫を行った。1 点目は電子決裁システムの導入、2 点目はオンラインストレージ（電子文書の保管）の導入である。社内への浸透はいまだ道半ばだが、昨今の在宅勤務の働き方の浸透も相まって、少しずつ進展しつつある。

5.3　業務効率化

5.3.1　会議室（予約システム、WEB 会議システム）

以前から慢性的な会議室不足が課題であり、従業員からの不満の声が多かった。移転の大きな目的が内外コミュニケーションの促進であるため、ボトルネックになる可能性があった。原因を調べると「カラ予約」が常態化しており、それが大きな原因であった。これを自動解消し、会議室の回転率を上げる会議室予約システムを導入した。先述の通り、来客予約がスケジュールとも連動しているので、更に業務効率化に寄与するものになった。

また、会議室には「WEB 会議システム」を常設とした。これは昨今の働き方の変化において、WEB 会議が主流となってきたことから、WEB 会議をすぐに実施できるシステムを導入した。カメラ・マイク及びスピーカーを備えており、特段の調整なく WEB 会議が始められるものである。これ以外にも無線接続で PC が簡単につながる機器も併せて導入し、これらで、会議の設営にかかる時間を削減し、会議本来の内容に集中できるよう業務効率化にも資するべく工夫している。

5.3.2　Teams 電話

固定電話は昨今の場所を選ばない働き方に合わなくなったので、これを廃止し、Teams 電話を導入した。Teams で会議及び Teams 間の会話を行えるが、これに外線電話機能及び多機能電話機能を搭載した「Teams 電話」へ拡張することにした。これは固定電話並びに携帯電話の配布を前提とせず、PC でも操作できるため、設備投資にかかる費用が低減でき、かつインターネット環境さえあれば、場所を選ばない昨今の働き方に適したものである。

5.3.3　デジタルサイネージ

デジタルサイネージ（以下、「サイネージ」と略す）（**図 10**）を導入した。これはオフィスにモニターを配置し、情報を発信するものである。これにより、社内に情報の浸透を得られるほか、災害時のメッセージ発信及び聴覚障害の方への対応など、多面的な効果が得られている。



図 10　執務室内のデジタルサイネージ

また、それ以外にも 8 階食堂でメニュー提供用のサイネージ及び 12 階の来客スペースにおいて LED の大型モニターにて企業紹介などを行うサイネージなど、各所使い方の異なるサイネージを導入している。

5.3.4　LED 大型モニター

LED 大型モニター（**図 11**）については、デジタルサイネージ以外にも会議室のモニターなど、複数個所で導入した。



図 11　15 階に設置した大型 LED モニター

従来の液晶モニターに代わり、明るさ及び画像表現力が高く、ベゼルがないことからも視認性がよい。また、エネルギーの消費効率並びに故障の場合の部分交換など、管理面でも優れる。

5.3.5　ビーコン

オフィス内で従業員の位置情報が確認できるビーコンを導入した。これはフリーアドレスを採用すると、コミュニケーションが活性化する一方で、会いたい従業員に会いづらくなることを避けるもので、簡単に所在が分かる仕組みである。GPS と異なり範囲はオフィスに限られることもあり、プライバシーを担保しながら、位置情報の把握を簡易化することで業務効率化を図り、またコミュニケーションの活性を企図したものである。

6　WELL 認証について（申請中）

WELL 認証とはオフィスなど空間に関する世界的な評価制度である。その空間で過ごす人の健康を重視する制度であり、日本での取得件数はさほど多くないが、世界的にはこの認証の導入が進んでいる。近年の健康経営に関する関心の高まり以外にも、いすゞが中期経営計画で掲げた ESG 経営にも合致していることからも認証を目指している。本誌の発行時点では、申請を行っている段階である。

7　おわりに

横浜新本社の移転に当たり、多くの社内外のみなさまに多くのご協力をいただいた。末筆ながら厚く御礼申しあげる。

創業の地を離れて、新たな船出となった本社移転であるが、諸先輩が築いたいすゞの伝統及びブランドを大切にしながらも、「100 年に一度の変革期に ALL ISUZU で立ち向かう」という新たな想いが、全従業員に伝わるようなオフィスにしたい、と思って取り組んだ。

この新たな横浜の地から、多くの社内外の出会いを経て、数々のイノベーションが生まれることをひとえに願うものである。

著　者


上田　茂樹


高橋　拓生


藤井　勉


今春　大介


園田　啓介


櫛田　直


片倉　篤

解説・講義

人とくるまのテクノロジー展 2022 への出展

Automotive Engineering Exposition 2022 Hosted by JSAE

蛭川　正敏*
Masatoshi Hirukawa

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 2022」(以下「人テク展 2022」と略す) が開催された。新型コロナウイルス感染拡大の影響があったものの、3 年ぶりの会場展示が実現し、昨年 (2021 年) 導入されたオンライン展示と併せて実施した。

本稿では、いすゞの出展内容について紹介する。

Abstract

"Automotive Engineering Exposition 2022" hosted by the Society of Automotive Engineers of Japan, Inc. was held. It was the first venue exhibition in three years due to the COVID-19 pandemic, and it was a hybrid with the online exhibition started last year (2021).

In this article, I introduce the contents of the exhibits at this event.

1　はじめに

本年 (2022 年) に開催された人テク展 2022 は、新型コロナウイルス感染拡大の影響で、3 年振りの会場展示となった。また、昨年 (2021 年) に初めて導入されたオンライン展示も併せて開催された。

人テク展 2022 は、日本をはじめとする多くの国・地域が「カーボンニュートラル達成」という目標に向けて取り組んでいることを背景に、「熱い思いで切り拓こう！カーボンニュートラルへの道」をスローガンを掲げた [(1)]。

いすゞは、人テク展 2022 方針のもと感染症にも配慮しながら最新技術を厳選して紹介した。

2　人テク展 2022 の開催概要

人とくるまのテクノロジー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、自社の製品技術をアピールし、自動車技術者との意見交換を深める場として多くの企業が出展している [(1)]。

本年は 5 月 25 日 (水) ～27 (金) にパシフィコ横浜 (ONLINE STAGE1 5 月 25 日 (水) ～31 日 (火))、そして 6 月 29 日 (水) ～7 月 1 日 (金) にポートメッセなごや (ONLINE STAGE2 6 月 29 日 (水) ～7 月 5 日 (火)) で開催された。

本展示会は、自動車メーカー、自動車関連企業、メディア関係及び学生などさまざまなお客様が来場された。会場とオンラインの来場者数の詳細は次のとおり [(1)]。

① 人テク展 2022 横浜
　横浜会場来場者数　　：43,665 人
　ONLINE STAGE1 アクセス者数　：104,265 人
② 人テク展 2022 名古屋
　名古屋会場来場者数　　：16,414 人
　ONLINE STAGE2 アクセス者数　：38,967 人

いすゞの出展ブースにおいても、多くのお客様が来場され、活況を呈した (**図 1**)。



(a) お客様来場



(b) 取材対応

図 1　会場の様子

*開発技術企画部

3　いすゞの出展

いすゞブースでは、従来から展示している先進安全、環境、MIMAMORI の技術を中心に紹介した。

新製品紹介は、PPV（Pick-up Passenger Vehicle）の新型 MU-X 及び感染症対策として商品化したエアロゾルフィルター中心に車室内環境技術を説明した。

また環境技術コーナーを設け、環境対応技術、BEV（バッテリー式電気自動車：Battery Electric Vehicle）そして LNGV（液化天然ガス自動車：Liquified Natural Gas Vehicle）を紹介した。更に、先進安全技術・自動運転技術、MIMAMORI のコネクテッド技術を紹介した。

会場展示（**図 2**）での内容と紹介方法は**表 1** のとおりで、この文書と動画情報をオンラインでも展開した。また、ブースの通路幅を十分確保し、消毒液を設置するなど、感染症対策を行った。

表 1　会場展示内容

紹介内容	紹介方法
新型 MU-X	実車、パネル、動画
車室内環境技術	実物、パネル、動画
環境対応技術	パネル
BEV	パネル
LNGV	パネル、動画
先進安全技術･自動運転技術	パネル、動画
コネクテッド技術	パネル、動画



図 2　いすゞ出展ブース

3.1　新型 MU-X

今回展示した 2 代目新型 MU-X（**図 3**）は、2020 年 10 月に 7 年ぶりにフルモデルチェンジした車両で、生産国であるタイのみならず、アセアン地域、オーストラリアなど世界 60 ヵ国以上のお客様に支持されている。

新型 MU-X は、“Robust and Exclusive” をベースコンセプトとして開発した。“Robust” はベース車両となるピックアップトラックの D-MAX と共通のコンセプトで、耐久信頼性、省燃費性、走破性、環境性、安全性など、いすゞ車ならではの強みを意味する。一方、“Exclusive” は新型 MU-X 独自のコンセプトで、スタイルの良さ、所有していることの満足感など、SUV としての魅力を意味する。



図 3　新型 MU-X

新型 MU-X で新たに採用した技術は**図 4** のとおりである。また、豪州に投入した車両は ADAS（Advanced Driver Assistance System）をはじめとした各種装備による安全性能が評価され、2021 年 9 月の ANCAP（Australasian New Car Assessment Program）において最高位の 5 ☆を獲得した。



図 4　新型 MU-X に採用した新技術

3.2　車室内環境技術

いすゞは、乗員の健康に関わる「車室内空気質」を重要技術分野として位置付けている。今回、近年の新型コロナウイルス感染拡大により重要度が増している公共交通機関におけるウイルス対策を中心に、次の **3.2.1 項～3.2.3 項**の取り組みを紹介した。

3.2.1　エアロゾルフィルターの商品化
（対象捕集物質：飛沫核（ウイルス）、花粉、ほこり）

ウイルス対策という未知の分野に挑むため、まず国交省及び外部専門機関と協力体制を構築した。そして、乗員の有無での換気量評価、車両の隙間の気密計測、空調の吸い込み口の換気量評価、走行中の換気量及び圧力データ収集といった現状把握を行い、エアロゾルフィルターを開発した（**図 5**）。



図 5　エアロゾルフィルター

エアロゾルフィルターの性能については、エアロゾル粒子を可視化する新しい技術「ヘリウムバブル -PIV」を用いて評価を行い、シミュレーションでもエアロゾル粒子捕集効果を確認した。既存の空調を利用しつつ空気を浄化するために工夫を凝らし、本製品は 15 分で 0.3 μ m のエアロゾル粒子を 99.9 %除去可能（相当換気回数 38 回／時間）という高い性能を実現できた。

3.2.2　飛沫プロテクターの商品化
（対象遮蔽物質：飛沫（ウイルス））

バスの運転席と客席の間に仕切りを設置することで飛沫感染を抑制することができる、飛沫プロテクター（**図 6**）を商品化した。



図 6　飛沫プロテクター

3.2.3　VOC（揮発性有機化合物：Volatile Organic Compounds）対応内装と工法の取り組み
（対象低減物質：VOC、におい）

製造工程では、内装材、接着剤と塗料から発生する化学物質の量を管理し、規制成分のみならず健康に影響を及ぼす未規制成分も低減できるよう取り組んでいる。

3.3　環境対応技術

いすゞグループは 2050 年に全車カーボンニュートラル化することを見据え、段階的な目標を設定した。今回、このカーボンニュートラル戦略を説明し、「商用車の電動化」及び「高性能内燃機関車の開発とカーボンニュートラル燃料の活用」についての考え方を併せて紹介した。

3.4　BEV

カーボンニュートラル社会の実現に向け、まず 2022 年度に小型 BEV トラックの量産販売に向けた開発を推進している。2019 年よりコンビニ配送車、小口配送車そして塵芥車で BEV モニター活動を実施しており、それぞれの検証概要を紹介した（**図 7**）。



図 7　BEV

3.5　LNGV

2021 年 10 月大型トラック「ギガ LNG 車」を商品化し（**図 8**）、ディーゼル車と同様に約 10 分で LNG を充填可能な上、1000 km 以上の航続距離を実現した。

また、いすゞはカーボンニュートラル燃料が実用化されることを見据え、燃料を使う側に立ち次の 3 つの活動に参画しており、LNG 車開発と合わせて紹介した。

① 東京湾岸ゼロエミッションイノベーション協議会への参加
② 小規模分散型 LNG 充填所ネットワーク構築による大型トラック物流の低炭素化手法の実証事業への参画
③ カーボンニュートラル LNG バイヤーズアライアンスへの加盟



図 8　LNGV

3.6 先進安全技術・自動運転技術

中型トラック「フォワード」に新たに設定した全車速域[1)]における自動車間距離維持制御機能である「全車速ミリ波車間クルーズ」に加え、重要技術として交差点での右左折時及び出会い頭の事故を抑制する「交差点警報」を紹介した。

また、少子高齢化による労働力不足をはじめとした社会課題の解決に向けた開発活動として、2022 年 3 月 8 日から 4 月 8 日まで福岡空港国内線国際線連絡バス道路にて実施した、大型自動運転バスの実証実験の取り組みを紹介した。

注[1)] 全車速域：GVW（車両総重量：Gross Vehicle Weight）8 t 未満は 0～120 km/h 、GVW8 t 以上は 0～90 km/h

3.7 コネクテッド技術

近年運送事業者の方から法令順守・生産性向上の要求が高まっている。これらに応えるべく国内商用車メーカー初となる商用車ドライバー向け運行管理スマートフォンアプリ「MIMAMORI ドライバー向けアプリ」を開発し、2022 年 3 月よりサービスを開始した。

今回、運行管理システム MIMAMORI と連携した次の 4 つのアプリ機能を紹介した。

① 日常点検：補助員なしの 1 名で日常点検が可能
② 荷役作業：荷主のサインと作業記録をサーバーに記録可能
③ 労務管理：ドライバー自身の勤務状況、残りの乗務可能時間そして休憩時間を確認可能
④ 位置情報：目的地までの所要時間とルート検索、同業者の車両位置を地図上で表示可能

4 お客様の反応

いすゞブースでは、特に実車展示の新型 MU-X と環境対応技術への関心が高く、先進安全技術などもお客様から多くの質問をいただいた（**図 9**）。また、メディアも関心を寄せた新型 MU-X とエアロゾルフィルターの現地取材の記事がウェブに掲載された。

オンライン展示でも、各展示物のアクセス件数から、会場展示と同様の反応が得られた。加えて、「出展社お問い合わせフォーム」にて多くの商談申し込みと質問を受け、内容に応じて専門部署とともに対応した。



図 9 説明の様子

5 おわりに

会場展示は、新型コロナウイルス感染が収束していない中での 3 年振りの開催であったが、2019 年の時の活気が戻ってきているようだった。また、オンライン展示でも多くのアクセス・お問い合わせをいただき、盛り上がりを感じた。

今後もお客様からの関心を集められる商品とトレンドを押さえた技術の紹介を行い、いすゞのプレゼンス向上に努めたい。

最後に本展示会の出展にご協力をいただいた協力企業及び社内関係部署の皆様に御礼を申し上げます。

参考文献

(1) 自動車技術展 - 人とくるまのテクノロジー展 2022，公益社団法人自動車技術会，2022 年 7 月 11 日更新，https://aee.expo-info.jsae.or.jp/ja/

著 者



蛭川 正敏

社外発表（2021年1月 ～ 2021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
1/22	（公社）自動車技術会 No.1-20シンポジウム 将来パワートレーンの戦略 （ディーゼル機関部門委員会）	商用車用動力源の動向といすゞの取り組み	宇野　忍 森山　大祐 小林　優介	エンジン装置設計部 〃 〃
3/17	（公社）自動車技術会 第3回ガス燃料エンジン部門委員会	天然ガス自動車の普及動向 ～急速に普及拡大するアジアの状況について～	原　裕一	NGV企画・設計部
5/26 ～ 5/28	（公社）自動車技術会 2021春季大会	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	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	車両審査実験第二部 産業総合技術研究所 国立保健医療科学院 東京工業大学 新潟県立大学 豊橋技術科学大学 CAEデジタル開発推進部 国土交通省 神戸大学、理化学研究所 産業総合技術研究所
5/26 ～ 5/28	（公社）自動車技術会 2021春季大会	大型商用車用ディーゼルエンジンの吸気閉弁時期の機関性能への影響	髙塚　智博 橋本　宗昌 小松　明 榎　和広 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃
6/24 ～ 6/25	（一社）品質工学会 第29回品質工学研究発表大会	金属材料、素形材開発における市場品質問題への取組み	衛藤　洋仁	車両審査実験第二部
7/6	（公社）自動車技術会 自動車技術会フォーラム2021 自動車の大変革を担う材料技術の最新動向Ⅰ（鉄鋼） （材料部門委員会）	「運ぶ」を支える取り組み、材料技術の課題と今後の期待	衛藤　洋仁	車両審査実験第二部
7/6	（公社）自動車技術会 自動車技術会フォーラム2021 車体の最新技術2021 （構造形成技術部門委員会）	新型 D-MAX / MU-X の車体技術	金光　伸彦 佐々木　直樹	車両設計第三部 〃
8/20	（公社）日本技術士会 機械部会8月例会	トラック･バスの自動運転	對馬　一昭	ASシステム開発部
9/2	（公社）自動車技術会 №02-21講習会 燃料･潤滑油入門 （燃料潤滑油部門委員会）	潤滑油の規格② 大型車用エンジン油の規格	星野　崇	車両審査実験第二部
9/3 ～ 10/3	（一社）日本ハイパーサーミア学会 38回大会	エックス線診療車へのエアロゾルフィルタによる感染対策	達　晃一 篠原　直秀 岩井　彩 栗原　昇 橋本　秀直 三澤　雅樹 内藤　航	車両審査実験第二部 産業総合技術研究所 〃 〃 バス商品企画・設計部 産業総合技術研究所 〃
9/14 ～ 9/17	（公社）日本金属学会 2021年秋期 第169回講演大会	「運ぶ」を支える取り組み、材料技術の課題と今後の期待	衛藤　洋仁	車両審査実験第二部
9/15 ～ 9/16	（一社）日本機械学会 M&M2021 材料力学カンファレンス	中性子回折法による自動車用高周波焼入れシャフトの残留応力分布測定	山田　明徳 永井　航 齋藤　記一 衛藤　洋仁 高橋　宏治	車両審査実験第二部 〃 〃 〃 横浜国立大学

発表日	発表先	表題	発表者	所属
9/15 〜 9/16	dSPACE dSPACE Japan User Conference 2021	いすゞパワートレイン制御システム開発を支えるHIL開発ストラテジー	堂上　大志	PT電子制御開発部
10/13〜 10/15	（公社）自動車技術会 2021秋季大会	アンモニアスリップ触媒における水熱劣化影響のモデル化 ー貴金属触媒層の酸化活性および選択性に関する水熱劣化影響のモデル化ー	岡　耕平 本谷　綾子 柴田　慶子 小澤　恒 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃
		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） ー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ー	大堀　鉄平 猪股　浩典 小澤　恒 板垣　裕 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 〃 〃
		電気ヒータによる大型商用車の排気ガス昇温に関する検討	髙塚　智博 橋本　宗昌 小松　明 榎　和広 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃
		薄板矩形断面の圧縮曲げで荷重維持性能を向上する座屈抑制面の検討	堀井　舜 宮前　惇	㈱いすゞ中央研究所 〃
11/19	（公社）自動車技術会 No.11-21シンポジウム「動力伝達系の最新技術 2021」（動力伝達系、CVT・ハイブリット部門委員会）	ピックアップトラックMT車の駆動系NV開発	佐藤　悠樹 西山　惇史 福田　広志	駆動商品企画・設計部 シェフラージャパン㈱ 〃
11/29	静岡県立大学 2021年度 第6回環境科学専攻月例セミナー	車室内の空気質について ー車室内発生ガスとウイルスに関する最近の話題ー	達　晃一	車両審査実験第二部
12/2 〜 12/4	室内環境学会 2021年室内環境学会学術大会	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	達　晃一 篠原　直秀 鍵　直樹 金　勲 坂口　淳 高見　健人 内藤　航	車両審査実験第二部 産業技術総合研究所 東京工業大学 国立保健医療科学院 新潟県立大学 東洋紡㈱ 産業技術総合研究所
12/15	（一社）電気学会 産業応用フォーラム「次世代自動車用車載・インフラ電源システム」	自動車電源システム	西村　怜馬	㈱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
2021/03	(公社) 自動車技術会 自動車技術会論文集 2021年, 52巻, 2号	高速度赤外線カメラを用いたエンジン筒内熱損失低減に関する研究	宮下　和也 鈴木　浩高 松本　淳志 香川　景章 山下　健一	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃
		アンモニアスリップ触媒のプラントモデル構築検討 (第3報) ー混合触媒モデルの複層触媒の性能予測への適用ー	田口　将宏 米山　香澄 大堀　鉄平 藤井　謙治 榎　和広 板垣　裕 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃 〃 〃
		アンモニアスリップ触媒のプラントモデル構築検討 (第2報) ー2種類の混合触媒をモデル化する新規な手法の開発ー	米山　香澄 田口　将宏 大堀　鉄平 藤井　謙治 榎　和広 板垣　裕 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃 〃 〃
		コネクテッド・データを活用した実路走行大型車SCRの水熱劣化度推定	本谷　綾子 岡　耕平 柴田　慶子 榎　和広 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃
2021/05	(公社) 自動車技術会 自動車技術会論文集 2021年, 52巻, 3号	企画段階におけるRDE 開発環境の構築とその活用	大久保　泰宏 瀬戸　洋紀 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃
2021/05	(一社) 日本機械学会 日本機械学会論文集 Vol.87, No.897, 2021	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 岡本　毅 瀬戸　雄史 小松　明 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃
2021/08	(公社) 自動車技術会 自動車技術 Vol.75, No.8	トラック (総合, デザイン, 車体構造)	高松　勇太 古屋　隆彦 丸山　一彦	小型・中型商品企画・設計部 デザインセンター 小型・中型商品企画・設計部
2021/09	(公社) 自動車技術会 自動車技術会論文集 Vol.52, No.5	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	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	車両審査実験第二部 産業総合技術研究所 国立保健医療科学院 東京工業大学 新潟県立大学 豊橋技術科学大学 CAEデジタル開発推進部 国土交通省 神戸大学、理化学研究所 産業総合技術研究所
2021/10	メカニカル・テック社 Mechanical Surface Tech 64号	自動車の表面改質 炭素鋼窒化処理部品の化合物層がねじり疲労強度に及ぼす影響	山田　明徳	車両審査実験第二部

(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

（2022 年 9 月 30 日現在）

〈編集委員長〉

宮永　俊作　（開発技術企画部）

〈編集委員〉

谷山　由和　（産業エンジン開発部）
山之内　大介　（CAE. デジタル開発推進部）
椎貝　竜二　（AS システム開発部）
平田　順　（デザインセンター）
松浦　文生　（駆動商品企画・設計部）
児玉　裕　（NGV 企画・設計部）
和田　潤一　（PT 商品企画・設計第三部）
湯本　淳　（車両設計第二部）
河野　直樹　（PT 商品企画・設計第二部）
渡橋　弘敏　（PT 実験第一部）
小峰　保　（PT 実験第二部）
飯島　成規　（xEV システム開発部）
高木　正一　（バス商品企画・設計部）
甲斐　崇　（グローバル CV 商品企画・設計部）
白土　清　（PT 商品企画・設計第一部）
星野　理香　（シャシ設計第一部）
芹澤　尚宜　（シャシ設計第二部）
森　瑞樹　（車両設計第三部）
江部　淳　（エンジン装置設計部）
早坂　淳　（大型商品企画・設計部）
竹村　正樹　（電装・制御開発部）
高松　勇太　（小型・中型商品企画・設計部）
冨松　浩一　（LCV 商品企画・設計部）
高野　二郎　（車両審査実験第一部）
高橋　創一　（車両審査実験第二部）
坂尾　和也　（PT 電子制御開発部）
南　健司　（車両技術部）
中島　健朗　（（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〉

青林　龍多　（開発技術企画部）
渋谷　弘之　（開発技術企画部）
齊藤　彰彦　（開発技術企画部）
蛭川　正敏　（開発技術企画部）

編　集　後　記

昨今、世界規模の気候変動や日本では労働人口減少など、多くの問題を抱えています。いすゞはカーボンニュートラル及びトラック・バスの自動運転実現を視野に諸問題の解決に取り組んでおります。本号では、いすゞグループで行っている具体的な取り組みを紹介しました。

また2022年5月に、創業より慣れ親しんできた大森の地（東京都品川区）を離れ、神奈川県横浜市に本社を移転しました。これは、働きやすいオフィスと最新のIT環境の整備による生産性向上に加え、藤沢工場との近接化により業務効率向上を図るものであり、本号にて横浜新本社の紹介をしました。

そのほか、作業工程の変更や通信システムの改善活動など、生産部門が生業とする取り組みについても記事にして掲載しております。

末筆ながら、本号の製作にご協力いただいた皆様方に心より御礼を申し上げます。

（蛭川　正敏：いすゞ技報編集事務局）

表紙について

今回の表紙は「エルガ 自動運転 実証実験車」です。

2022年の3月から4月にかけ、福岡空港にて各パートナーとともに大型路線バスの自動運転に関する共同実証実験を行いました。

公共交通におけるドライバー不足の解決策の一つと期待されている自動運転の実現をはじめ、いすゞは今後もさまざまな社会課題の解決に努めてまいります。

（杉浦　康：デザインセンター）

いすゞ技報　第134号

2022年11月1日　発行

編集兼発行人　宮永俊作

発行　いすゞ自動車株式会社
〒140-8722
東京都品川区南大井6丁目26番1号

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)

©2022　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