

J_{ARI} R_{esearch} J_{ournal}

2021年度
特 集 号

特集：「試験・計測・評価の手法」



目次

JARI Research Journal 掲載区分 4

JARI Research Journal (JRJ) の特集号・デジタル冊子化に際して 5
鎌田 実

【環境	計	評】	<u>Ex situ</u> TEM 法による PEFC 触媒層の電気化学測定と構造解析	・・・	7
			清水 貴弘, 上野 武夫		
【環境	計	】	車両改造不要な FCV 燃費試験方法の開発 -CVS を用いた酸素バランス法の課題調査-	・・・	14
			矢野 勝, 下坂 琢哉, 石戸谷 重之		
【環境	試	】	放射光 X 線によるリチウムイオン電池の内部短絡現象のその場観察		23
			高橋 昌志, 後藤 翼		
【環境	試	評】	リチウムイオン電池の熱連鎖試験における 窒化珪素ヒータを用いたトリガ手法の調査	・・・	30
			後藤 翼, 前田 清隆, 高橋 昌志		
【環境		評】	LES による筒内直接噴射式ガソリン機関の 局所燃料濃度のサイクル変動評価	・・・	37
			松岡 正紘, 伊藤 貴之, 辻村 彬人, 中山 智裕		
【環境	計	】	環境計測用ドローンを用いた大気質計測	・・・・・・・・・・	49
			早崎 将光		
【安全	試	評】	GTR7 のための後面衝突頸部保護性能試験方法に関する研究	・・・	63
			中嶋 太一, 清田 浩嗣, 西出 治宝, 加藤 和彦		

* **試**：試験法 **計**：計測法 **評**：評価法

◇技術資料◇

- 【環境 試 計 ●】 [低レベル PM 排出車両を対象としたフィルタ重量法の測定精度向上に関する研究 JARI における AICE 研究成果の紹介](#) 75
松本 雅至, 松浦 賢
- 【環境 ● 計 評】 [Random Cycle Generator を用いたシャシダイナモメータ上での実路排出ガス評価手法の研究](#) 84
松岡 正紘, 伊藤 貴之, 相馬 誠一, 羽二生 隆宏
- 【環境 試 ● ●】 [吸入試験のための簡易なナノマテリアルの飛散方法の検討](#) 92
伊藤 剛, 阿久津 康生, 萩野 浩之

◇研究活動紹介◇

- 【環境 試 計 評】 [JARI における AICE 研究成果の紹介](#) 98
伊藤 貴之, 松野 真由美, 松岡 正紘, 松本 雅至, 林 誠司, 北村 高明
- 【自動走行 ● 計 ●】 [自動運転の安全性評価を狙いとしたシナリオ分析用交通外乱データ収集技術（定点カメラ観測）—第1報:基本フレームの構築／軌跡精度の予測と検証—](#) .. 105
中村 英夫, 古田 暁広, 横山 洋児
- 【自動走行 試 計 評】 [生活支援ロボットの安全検証方法の研究開発と今後の事業展開の紹介](#) .. 118
勝田 智也

◇解説◇

- 【環境 ● ● 評】 [自動車排出ガス計測における走行モード](#) 125
森川 多津子

* 試 : 試験法 計 : 計測法 評 : 評価法

◇研究速報◇

- 【自動走行】 [自動運転中の車線変更介入方策に対する
ドライバの反応と受容性に影響を与えるドライバの特徴](#) … 135
ムスリム フサム, アントナ-マコシ ハコボ, 内田 信行, 伊藤 誠
- 【自動走行】 [視野障害者における高度運転支援システムの事故低減効果算出](#) … 145
大田 浩之, 安達 章人, 内田 信行, 北島 創, 青木 宏文, 稲上 誠, 田島 淳

◇技術資料◇

- 【環境】 [使用実態を考慮した業務用車両における電動車普及可能性の検討](#) … 157
金成 修一, 森川 多津子, 田宮 日奈, 富田 幸佳, 伊藤 晃佳

◇研究活動紹介◇

- 【新モビリティ】 [ソフトウェアアップデート国際標準化活動について](#) … 167
渡辺 秀侑, 長谷川 信

◇解説◇

- 【環境】 [「エコドライブ10のすすめ」の改訂と広報用リーフレットの作成](#) … 171
鈴木 徹也, 平井 洋, 沖山 清美
- 【環境】 [車両への液体水素の充填に関する調査](#) … 176
山田 英助

* この期間に掲載された原稿であるが、特集原稿とした4件を除く

JARI Research Journal 掲載区分

掲 載 区 分	記 載 概 要
研究速報 Research Report	独創性のある研究，または卓越した成果のみられた研究について，その内容を早期に報告するもので，中間報告的なものも含め，研究の動機，手段，経過，および結果についての考察・評価を含めて，記述したもの。
技術資料 Technical Report	研究・試験・検査の業務の過程において，他に類例を見ない新規，かつ価値ある内容の手法，基準データなどが得られた時に，その使用価値と使用範囲を示したもの。 〔自己が利用するものに限らず，広く業界内に使用されているものを紹介し，その一部として自己の試験・研究結果から得られた手法などを付け加えたもの〕
調査資料 Survey Report	特定の事項に関する試験結果，性能解析，ユーザ調査などの調査結果をまとめたもの。単なる数値の紹介に留まらず，さらに数値を解析し，集約したうえ，論評を加えたもの。 〔主として，他機関において行った資料などを基に整理してまとめたもの〕
研究活動紹介 Research Activity	JARI の研究活動に関し，プロジェクトの進捗状況の報告，試験施設，設備，装置などの紹介記事，海外出張報告，JARI 主催・共催のイベント開催結果報告，年報など。
解 説 Review	自動車技術の専門分野，関連分野，または特定の主題について，最近の進歩，将来予測，現状の技術動向および研究・開発状況，報告レポートの要約・説明などをまとめたもの。

JARI Research Journal (JRJ) の 特集号・デジタル冊子化に際して

研究所長 鎌田 実



JRJ の最新号を特集号という形でお届けします。

JRJ のこれまでは、速報性を重んじて、毎月、記事を HP に載せるという形態をとってきましたが、さらに JARI の活動を広く多くの皆様方に発信し、ご理解いただくにはどうしたらいいのか、所報編集委員会等での議論を進め、今回のように特集号として既報も含め、デジタル冊子体の形で出すこととしました。

私は、2020 年 6 月に研究所長に着任し、弊所の活動が、なかなか十分に知られていないと感じ、色々な形で弊所を知ってもらい、その結果、仕事での結びつきが出来ていくような流れを作りたいと思いました。

弊所では 2022 年 1 月より、ホームページの刷新を行いました。見栄えだけでなく、旧来のものより、必要な情報にたどり着きやすくなるように、担当に工夫をしてもらいました。まだまだ工事中の所もありますが、徐々に充実していきますので、これについてのご意見等いただけると幸いです。

研究成果の発信としては、年報、研究論文集、そして JRJ といった元々は紙媒体であった冊子体、それからシンポジウム等のイベントの開催などがありますが、今回、それぞれの役割を見直し、ご覧になれる方々にとって役に立つ情報として読んでいただけるようにするにはどうしたらよいか、検討を重ねました。

私の個人的なことを記すと、昭和の時代を 30 年、平成の時代を 30 年を生きてきて、後半の 30 年は大学教員として過ごしました。昭和のその時代は、高度成長期で、自動車産業が目覚ましい発展をしてきました。弊所もその発展の一翼を担い、情報発信としては、「自動車研究」を発行してまいりました。私自身も、学生時代から、この「自動車研究」を愛読していました。

平成の時代になって、日本の自動車産業は世界トップレベルの実力を有し、また各社で試験研究設備を整えるようになり、弊所の役割も、国や業界横断型の取り組みにおいて、新しいものの試験法策定や標準化の仕事が多くなってきて、「自動車研究」の紙面も変わってきました。そして、2011 年に、それまでの役割を終えて、速報性のある電子化された JRJ という新たなミッションでの情報発信に変わりました。

所内で行われた研究成果を論文としてまとめ、それを学術講演会や学術誌への投稿を行って来ていますが、学術誌掲載のものは許可を得て研究論文集という形で採録するようになり、それ以外の活動成果については、JRJ で扱い、さらに昔の自動車研究のように弊所の様々な活動を知っていただくような媒体にしていきたいという思いから、今回このような特集号というデジタル冊子体での刊行に至りました。

新バージョンの第 1 号の特集は「試験・計測・評価の手法」です。弊所の得意とする試験・計測・評価は、対象とするものにより様々な形態・やり方があり、それらを一つの特集号としてまとめてみました。皆様方のお役に立てれば幸いです。

特集 「試験・計測・評価の手法」

新規の原稿の他，特集に関係した原稿を一度に読めるよう，再掲しています。

原稿の再掲にあたっては，以下の対応をしております。

- ・ JARI Research Journal として過去 2 年程度内に日本自動車研究所の HP（ホームページ）に公開されたものから選出。
- ・ 原稿のフォーマットが途中で変わったため，現在のフォーマットに統一。
- ・ 利用しやすさ向上のために，リンク情報を追加。
 - － 参考文献に URL がある場合は Web サイトへのリンク
 - － Web 上に公開されている原稿へのリンク
 - － 再掲原稿は，元原稿へのリンク。
- ・ 掲載後，情報に UP DATE があるものは，最新情報を朱書きテキストボックスにて追記。

Ex situ TEM 法による PEFC 触媒層の 電気化学測定と構造解析

Electrochemical Measurements and Structural Analyses of the Catalyst Layer of a PEFC
by Ex Situ TEM

清水 貴弘^{*1}

Takahiro SHIMIZU

上野 武夫^{*2}

Takeo KAMINO

Abstract

We investigated a new method for the analysis of the degradation mechanism of the electrocatalysts of a polymer electrolyte fuel cell (PEFC) by *ex situ* transmission electron microscopy (TEM). With a newly developed sample holder, electrochemical measurements and observation of the same field of view before and after the measurements were realized for a small piece of a membrane electrode assembly in gas atmospheres simulating durability tests for the PEFC. The *ex situ* TEM analyses revealed that the trend of structural changes such as corrosion of the carbon support and coalescence of Pt particles and that of a decrease in the electrochemically active area of Pt were in the same manner as the results for durability tests with a single cell. Therefore, the new method established in this study serves as a fundamental technique for tracing the changes in the morphology and electrochemical property of the electrocatalysts.

1. はじめに

深刻化する地球温暖化問題に起因する種々の課題を解決するため、使用時にCO₂を排出しない水素エネルギーの利活用が求められている。モビリティ分野では、固体高分子形燃料電池（PEFC）を搭載し、水素を利用して発電した電力により走行する燃料電池自動車（FCV）の普及拡大に向けた取り組みが進められており、水素基本戦略¹⁾で定められたFCV普及台数の目標値（2030年時点で80万台）を達成するには、車両の低コスト化が重要な課題の一つとなっている。

FCVの低コスト化には、PEFCの主要な構成部材である膜電極接合体（MEA）の材料のうち、Pt等の貴金属を使用する電極触媒使用量の大幅な低減が必要不可欠となる。したがって、材料開発の観点からは、高性能かつ高耐久性を有する電極触媒の設計指針を得るため、その劣化メカニズムを詳細に解析することが喫緊の課題である。電極触媒の劣化メカニズムを解析するための手法としては、耐久試験を模擬した電位サイクル試験を実施し、電極触媒の微細構造変化を解析することが一般的である。ところが、単セルを使用した電位サイクル試験（電気化学測定）と一般的な透過電子顕微鏡（TEM）観察を組み合わせた従来の手法²⁾では、一度観察した試料は単セルに戻せなくなるため、MEAの耐久性評価試験前後に同一試料かつ同一視野の触媒層を観察することは不可能である。そのため、Mayrhoferらは、過塩素酸を用いた電解液中で種々の電位範囲で電位サイクル試験を行い、その前後に行った電極触媒の同一視野TEM観察から、Pt粒子の移動や凝集、カーボン担体の変位を明らかにした³⁾。しかし、この方法は水溶液中での実験であるため、PEFCが通常使用されるガス雰囲気とは異なることが課題となっていた。一方、我々の研究グループでは、*In situ* TEM法によりPEFCのカソードを想定した加湿空気雰囲気中で電極触媒の同一視野を動的に観察する技術を開発し、空気中の水分がカーボン担体を酸化する過程でPt粒子の移動や凝集が生じることを明らかにした⁴⁾。しかしながら、この方法ではMEAの耐久性評価試験に準じた電気化学測定との両立が課題となっていた。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 電動モビリティ研究部 博士（工学）

*2 山梨大学燃料電池ナノ材料研究センター 博士（工学）

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士（工学）
(2022年3月現在)

そこで本研究では、PEFCで用いられる電極触媒の劣化による構造変化過程を詳細に解析するための新たな手法として、電気化学測定前後のMEAについて、*Ex situ* TEM法により触媒層の同一視野を観察する技術を検討した。

2. 実験方法

2.1 MEA 作製

電極触媒には市販Pt/C (TEC10E50E, TKK) を用いた。触媒インクの調整には20% Nafion分散溶液を用い、アイオノマーとカーボン担体の重量比は1:1とした。これらを用いて作製した電極面積25 cm²の触媒層シートをホットプレスにより電解質膜 (Nafion 117, DuPont) と接合し、MEAとした。電極触媒層中のPt担持量はアノード、カソードともに0.3 mg cm⁻²とした。

2.2 電気化学測定および TEM 観察

MEAの耐久試験を模擬した電位サイクル試験には、電気化学測定装置 (SP-150, BioLogic) を用いた。電位サイクル試験では、反応ガスとしてプッシュ缶入りの標準ガス (H₂, N₂, ジーエルサイエンス) または高純度ガス (N₂) を使用した。MEA触媒層の構造変化観察には、TEM (H-7650, 100 kV, Hitachi) を用いた。

3. 結果および考察

3.1 試料ホルダの構造と観察試料作製

はじめに、MEAの電気化学測定とその前後の触媒層のTEM観察を両立するため、試料ホルダの構造と観察試料作製について検討した。

従来の手法では、MEAの触媒層をTEM観察する場合、樹脂包埋した試料からウルトラミクロトームを用いて厚さ0.1 μm程度の超薄切片を作製する。そしてそれを直径3 mmの金属製グリッドに載せた状態で標準の試料ホルダに取り付け、TEM試料室に導入して観察を行う。この方法では、JARI標準セルのような燃料電池単セル⁶⁾での電気化学測定前にMEAを部分的に摘出してTEM観察試料を作製すると、観察済の試料を再度単セルに組み込んで電気化学測定を行うことが不可能となる。したがって、単セルでの電気化学測定を前提とした場合、測定前後に触媒層の同一視野をTEM観察することは困難である。

このため、本研究ではPEFCの耐久性評価試験に必要な単セルの機能の一部をTEM試料ホルダ自体に持たせることを検討した。具体的には、観察対象とするMEAをTEM試料ホルダに固定し、アノードとカソードそれぞれに独立してガスを導入することとMEAの電気化学測定を行うことが可能な構造とした。試作したTEM観察用試料ホルダの構造をFig. 1に示す。

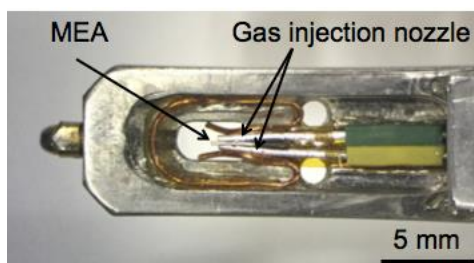


Fig. 1 MEA-TEM holder⁷⁾.

この試料ホルダは、(1) 観察試料を2本のガス供給ノズルで保持する、(2) ガス供給ノズルと観察試料の隙間から触媒層のTEM観察が可能である、(3) それぞれのガス供給ノズルは独立した配管であり、観察試料に水素と空気等の2種類の異なるガスを連続的に供給可能である、(4) ガス供給ノズルは導電性があり電気化

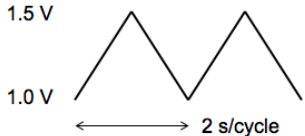
学測定用端子として機能する、といった特長を有する。

観察試料は、単セルで使用可能な電極面積 25 cm^2 のMEAの一部を摘出し、TEM試料室に導入可能なサイズに加工した小片とした。電極サイズは上述の試料ホルダに固定するため、幅 $2\sim 3\text{ mm}$ 、高さ $0.5\sim 1\text{ mm}$ とした。この方法ではMEA触媒層の最外層の構造変化を観察するため、試料の樹脂包埋や超薄切片の作製は行わない⁷⁾。MEA作製に使用する電解質膜には、膜厚 $183\text{ }\mu\text{m}$ ⁸⁾のNafion 117を使用した。FCCJプロトコル等の試験法^{9), 10)}で標準材料として使用される電解質膜は膜厚 $25\text{ }\mu\text{m}$ ⁸⁾のNR211だが、MEA小片を自立した状態で試料ホルダに固定するため、本研究では膜厚の大きな電解質膜を選定した。

3.2 TEM 試料室内での電位サイクル試験

耐久性評価試験前後の触媒層の同一視野をTEM観察するため、一例として、TEM試料室内で電位サイクル試験を実施することを試みた。FCCJプロトコルの起動停止試験に相当する電位サイクル試験をTable 1に示す方法により行った。

Table 1 Experimental details for start/stop cycle test.

Scan range	1.0~1.5 V vs. RHE
Scan rate	500 mV/s
Wave form (2 cycles)	
Cycle	1,000
Atmosphere	Temperature: Room temp. Anode gas: Dry H_2 , 1~5 mL/min Cathode gas: Dry N_2 , 1~5 mL/min Pressure: 1.5 / 1.5 Pa

電位サイクル試験を1,000サイクル実施する前後の触媒層（カソード）の構造変化をFig. 2に示す。初期と比較して1,000サイクル後には、矢印で示すカーボン担体間の距離が約 38 nm から 26 nm へと小さくなった。また、破線で囲った領域では、薄いグレーで示されるアイオノマーについて、カーボン担体間を橋渡しするように伸びている部分が太くなり、一点鎖線で囲った領域では凸部が左上の領域に隠れるような構造変化がそれぞれ観察された。

一般的に、MEAの触媒層を構成するカーボン担体やアイオノマーのような有機材料をTEM観察する場合、電子線照射による試料損傷が懸念される。本研究では、電子線照射量を抑えた上、電子ビームを拡げた状態でTEM観察を行い、観察時間内に試料損傷が認められないことを予備実験により確認している。また、約30分間の電位サイクル試験中は電子線を照射していないことから、Fig. 2に示した構造変化はTEM観察中の電子線照射による試料損傷ではなく、電位サイクル試験による触媒層の構造変化であると考えられる。

このことから、起動停止試験に相当する電位サイクルにより触媒層中のカーボン担体の酸化が進行し、アイオノマーを含めた触媒層全体に構造変化が生じたことが考えられる。なお、この構造変化は、同試験を実施した場合の単セルでの構造変化¹¹⁾と同様の傾向を示すことを確認した。

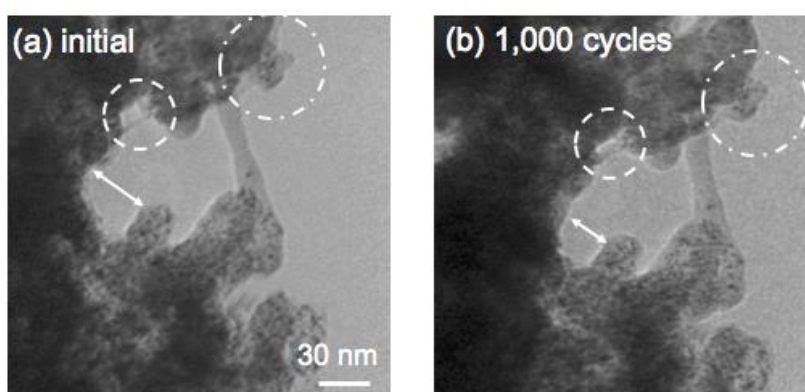


Fig. 2 TEM images of the cathode catalyst layer (a) before and (b) after 1,000 start-stop cycles.

The partial pressures of H₂ and N₂ in the sample chamber are controlled to 1.5 Pa, respectively.

The arrows show the positional change of carbon support and the dashed and one-dotted circles show the structural and positional change of the ionomer, respectively.

3.3 試料反応装置内での電位サイクル試験

続いて、耐久性評価試験前後の触媒層の同一視野をTEM観察するため、一例として、電位サイクル試験のみをFig. 3に示す試料反応装置内で実施することを試みた。電位サイクル試験等の反応はTEM試料室の外で実施することから、この方法を*Ex situ* TEM観察と呼ぶ。*Ex situ* TEM観察では、反応ガスの圧力や加湿条件をPEFCが実際に使用される環境により近づけることが可能である。

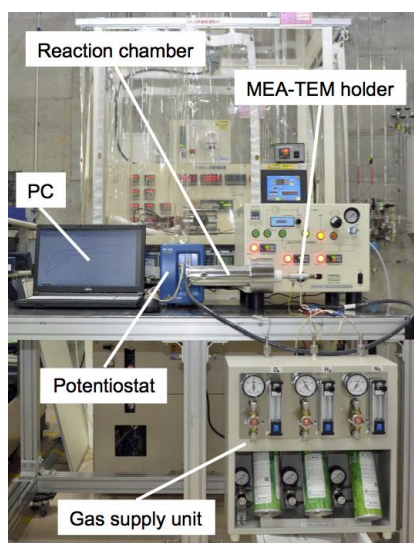


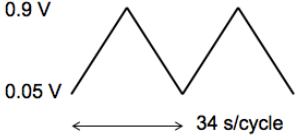
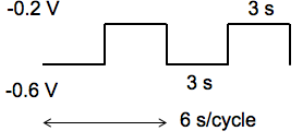
Fig. 3 Experimental apparatus for electrochemical measurements.

Wet N₂ gas is supplied to the reaction chamber from a fuel cell test stand behind the apparatus.

本項では、触媒層の構造変化について、Pt粒子の形状変化をより詳細に観察するため、FCCJプロトコルの負荷応答試験に相当する電位サイクル試験をTable 2に示す方法で行った。コンディショニングはMEAの性能を引き出すために電極触媒合成時やMEA作製時に混入した不純物を除去する操作であり、触媒層の初期構造をTEM観察した後に実施した。PEFCの電気化学測定では、参照電極として可逆水素電極（RHE）を

用いることが多い。本測定では、試料ホルダの構造上、常圧ではアノード／カソードに供給したガスが試料付近で混合することが想定されることから、Ptの電気化学的有效表面積（ECA）を算出する際に行うサイクリックボルタンメトリー（CV）で不具合が生じる恐れがある。このため、コンディショニング後に実施する負荷応答試験とCV測定では両極に供給するガスはN₂とし、アノードの触媒層中のPtを擬似参照電極として使用した。

Table 2 Experimental details for the load-change cycle test.

	Conditioning	Load-change cycle test
Scan range	0.05~0.9 V vs. RHE	-0.6~-0.2 V vs. Pt
Scan rate	50 mV/s	---
Wave form (2 cycles)		
Cycle	50	1,000
Atmosphere	Temperature: 91~92° C Anode gas: Dry H ₂ , 1~5 mL/min Cathode gas: Wet N ₂ , 100 mL/min Dew point: 78° C Pressure: 1 atm	Temperature: 91~92° C Anode and cathode gas: Wet N ₂ , 100 mL/min Dew point: 78° C Pressure: 1 atm

コンディショニング前後と電位サイクル試験後の触媒層（カソード）の構造変化の*Ex situ* TEM観察結果をFig. 4に示す。Fig. 4 (a), (b), (c) はそれぞれ初期、コンディショニング後、1,000サイクル後である。Fig. 4 (a) と (b) を比較すると、コンディショニング前後では触媒層中のPt粒子の構造変化は認められなかった。一方、Fig. 4 (b) と (c) を比較すると、電位サイクル試験後に矢印で示す部位でPt粒子の凝集・粗大化が認められた。このPt粒子の形態変化は、単セルでの負荷応答試験と同様の傾向を示している⁵⁾。破線で囲った領域では、カーボン担体とともにPt粒子の位置が変化したことも確認された。

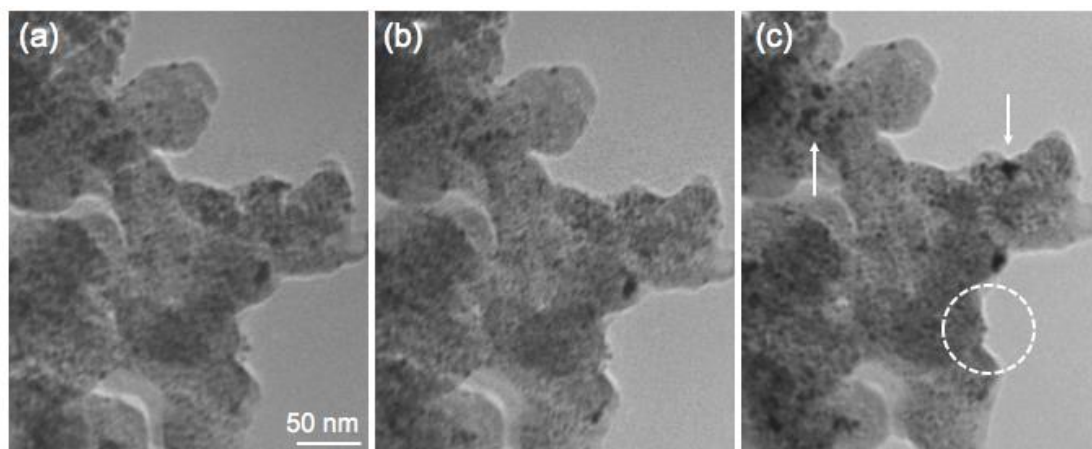


Fig. 4 *Ex situ* TEM observation of the cathode catalyst layer (a) before, (b) after conditioning, and (c) after 1,000 load-change cycles. The arrows show coalescence of Pt particles and the dashed circle shows displacement of Pt particles with carbon support.

電位サイクル試験前後には、MEAのカソードに対してCV測定を行った。コンディショニング後（初期）と電位サイクル試験後のCV測定結果をFig. 5に示す。プロットの形状から、通常の水溶液系あるいは単セルでのPtのCV測定結果とは異なり、水素脱離波とPt酸化物還元波が目立たないことが確認された。

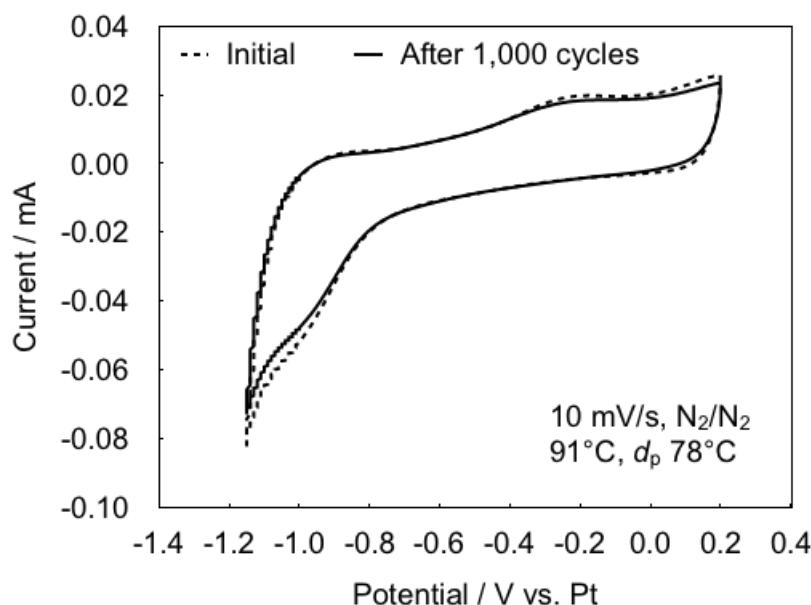


Fig. 5 Cyclic voltammograms for the MEA after conditioning (initial) and after 1,000 load-change cycles.

ECAの算出方法については、プロットの形状が異なることから、一般的なプロトコルの方法を適用することが難しいと考えられる。そのため、水素吸着波を還元電流側の-0.6 V付近から-1.1 V付近と想定し、二重層容量算出のベースラインを-0.6 V付近の右上がりの直線に近似することで、それらが囲む面積から水素吸着電量を算出した。PtのECAは、コンディショニング後（初期）の $59 \text{ m}^2/\text{g}$ に対して、1,000サイクル後には $52 \text{ m}^2/\text{g}$ となり、初期の約88%に減少した。今回のCV測定条件およびECA算出方法は単セルで実施する一般的なプロトコルとは異なるが、負荷応答試験後にECAが減少する傾向は単セル試験の場合²⁾と同様であった。

4. まとめ

本研究では、PEFCで使用される電極触媒の構造変化過程を詳細に解析するため、MEAを用いた電気化学測定前後に同一試料、同一視野の触媒層の構造をTEM観察する手法を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. 試作した試料ホルダを用いることで、単セルでも使用可能な電極面積 25 cm^2 のMEAから摘出した小片の固定、小片が置かれるガス雰囲気制御、そして外部からの電圧印加による電位サイクル試験を実現し、試験前後の触媒層を同一視野で*Ex situ* TEM観察することが可能となった。
2. *Ex situ* TEM法により実施した電位サイクル試験により、カーボン担体、アイオノマーの構造変化や、Pt粒子の凝集・粗大化とそれに関連する電気化学的活性表面積の変化等の単セルでの試験結果に合致する電極触媒の特性変化が確認された。

これによって、PEFCを想定したガス雰囲気下でMEAの電気化学的な処理を行い、電極触媒の同一粒子の構造変化過程を詳細に追跡するための基盤技術が確立された。

今後の課題としては、自動車用PEFCで実際に使用される膜厚（ $10 \mu\text{m}$ 前後¹²⁾）の電解質膜を使用した

MEAを試料ホルダに固定する方法の検討，アノードとカソードの電極触媒を短時間に交互に観察することにより両極の構造変化をパラレルに解析する方法の開発，CV測定結果について波形が単セルでの結果と異なる理由の解明などがあげられる。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費（基盤研究（B）JP16H04528）の助成を受けて実施された。

参考文献

- 1) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議：[水素基本戦略](https://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002.html),
<https://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002.html> (2020.8.27)
- 2) Y. Hashimasa et al.: [Verification of Durability Test Methods of an MEA for Automotive Application](#), ECS Trans., 50 (2), 723 (2013)
- 3) K.J.J. Mayrhofer et al.: [Non-destructive transmission electron microscopy study of catalyst degradation under electrochemical treatment](#), J. Power Sources, 185 (2), 734 (2008)
- 4) T. Yaguchi et al.: [Development of a technique for in situ high temperature TEM observation of catalysts in a highly moisturized air atmosphere](#), J. Electron. Microsc., 61 (4), 199 (2012)
- 5) 清水貴弘ほか：[加湿・乾燥空気中におけるNafion付きPt/Cのその場TEM観察](#), JARI Research Journal, JRJ20150401 (2015)
- 6) 橋正好行，沼田智昭：燃料電池単セル，実用新案登録第3219697号（2019）
- 7) T. Kamino et al.: [Development and Application of a Sample Holder for In Situ Gaseous TEM Studies of Membrane Electrode Assemblies for Polymer Electrolyte Fuel Cells](#), Microsc. Microanal., 23 (5), 945 (2017)
- 8) The Chemours Company：[Nafion™ Sulfonic Membranes](#), <https://www.nafion.com/en/products/sulfonic-membranes> (2020.8.27)
- 9) 燃料電池実用化推進協議会：[固体高分子形燃料電池の目標・研究開発課題と評価方法の提案](#),
http://fccj.jp/pdf/23_01_kt.pdf (2020.8.27)
- 10) NEDO「セル評価解析の共通基盤技術」：[セル評価解析プロトコル](#), <https://www.nedo.go.jp/content/100537904.pdf> (2020.8.27)
- 11) Y. Katayanagi et al.: [Cross-sectional observation of nanostructured catalyst layer of polymer electrolyte fuel cell using FIB/SEM](#), J. Power Sources, 280, 210 (2015)
- 12) R. Borup et al.: [FC135: FC-PAD: Fuel Cell Performance and Durability Consortium](#), 2018 Annual Merit Review Proceedings, https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review18/fc135_borup_2018_o.pdf (2020.8.27)

【執筆者追記】（2022 年 3 月）

●最新の状況

(P 6 BL 2)

アノードとカソードの電極触媒の構造変化を同時に観察する方法の検討，

↓

アノードとカソードの電極触媒を短時間に交互に観察することにより両極の構造変化を
パラレルに解析する方法の開発

●最新リンク情報

1) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議：[水素基本戦略](#),

<https://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002.html> (2020.8.27)

↓

1) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議：[水素基本戦略](#),

https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/index.html (2022.2.15)

車両改造不要な FCV 燃費試験方法の開発

－CVS を用いた酸素バランス法の課題調査－

Development of a Fuel Consumption Measuring Method without Vehicle Modification

－Oxygen Balance Method using a Constant Volume Sampler－

矢野 勝^{*1}

Masaru YANO

下坂 琢哉^{*2}

Takuya SHIMOSAKA

石戸谷 重之^{*3}

Shigeyuki ISHIDOYA

Abstract

An oxygen balance method using a Constant Volume Sampler (CVS) was investigated as a fuel consumption measuring method for fuel cell vehicles (FCV) that does not require vehicle modification. Because a highly accurate oxygen concentration measurement is required, the technology for measuring oxygen concentrations in the environmental atmosphere was used. In each phase of the WLTC (Worldwide Light duty Test Cycle), differences between the gravimetric method and the oxygen balance method using the CVS ranged from -4% to 0.5%.

1. 背景

燃料電池自動車（以下、FCV）燃費試験方法を定める ISO23828 には Normative（規範）として質量法、圧力法、流量法が定められている。いずれも車外から水素（以下、 H_2 ）を供給する方法であり、FCV の水素供給ラインに外部から水素供給ラインを介入させる改造が必要である^{1)~4)}。近年、国内外で完成車検査の重要性が高まっており、早期に FCV の車両改造不要な燃費試験方法の確立が必要である。

これを実現する手段として、排出ガス中の酸素（以下、 O_2 ）濃度の変化量を計測することによって、反応に使われた H_2 量を算出する酸素バランス法が考えられる。（一財）日本自動車研究所では NEDO 水素社会構築共通基盤整備事業（2005 年度～2010 年度）において、排出ガスの流量と濃度を直接計測する直接計測法を実施し、酸素バランス法の原理確認を行った⁵⁾。

一方、経済産業省が 2019 年 3 月 12 日に策定した水素・燃料電池戦略ロードマップでは、2030 年までに FCV の国内普及目標を 80 万台としている。今後の FCV の普及を考えた場合、内燃機関自動車の燃費・排出ガス試験設備として普及している Constant Volume Sampler（以下、CVS）を FCV の燃費試験に用いることができれば、設備や試験担当者を共有でき、メリットが大きいと考えられる。

そこで本報では、CVS を用いた FCV の車両改造不要な燃費試験方法を考案・検討し、その課題について調査した。

2. バックグラウンド補正のための非反応性ガス変換法

CVS を用いた内燃機関自動車の燃費計測には、計測対象成分のバックグラウンド補正のために排出ガス希釈率（以下、DF: Dilution Factor）が用いられているが、この DF をそのまま FCV に適用することはできない。そのため、本報では DF を用いないバックグラウンド補正手法として非反応性ガス変換法を提案する。考え方の理解のために 2.1 にて直接計測法を示し、2.2 にて今回採用した CVS 法について示す。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 電動モビリティ研究部

*2 国立研究開発法人産業技術総合研究所 博士（工学）

*3 国立研究開発法人産業技術総合研究所 博士（理学）

* 原稿受理 2020 年 3 月 10 日

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部

(2022 年 3 月現在)

2.1 直接計測法における非反応性ガス変換法

直接計測法は、FCV の排出ガスの流量、ガス濃度 (O_2 , H_2 , H_2O) を連続的に計測し、 O_2 消費量を算出し、反応した H_2 を換算する手法である。計測手法の概略図を Fig. 1 に示す。 O_2 消費量は FCV が吸入および排出した O_2 量の差分より求めるため、吸入と排出の両方に流量計が必要となる。しかし、この方法は流量が過渡的に変化する際に流体に生じる弾性等によって、吸入・排出における流量計間で差を生じやすい。

そこで、吸入側の流量計を省略して H_2 消費量を求めることとした。算出式を式(1)～(3)に示す。

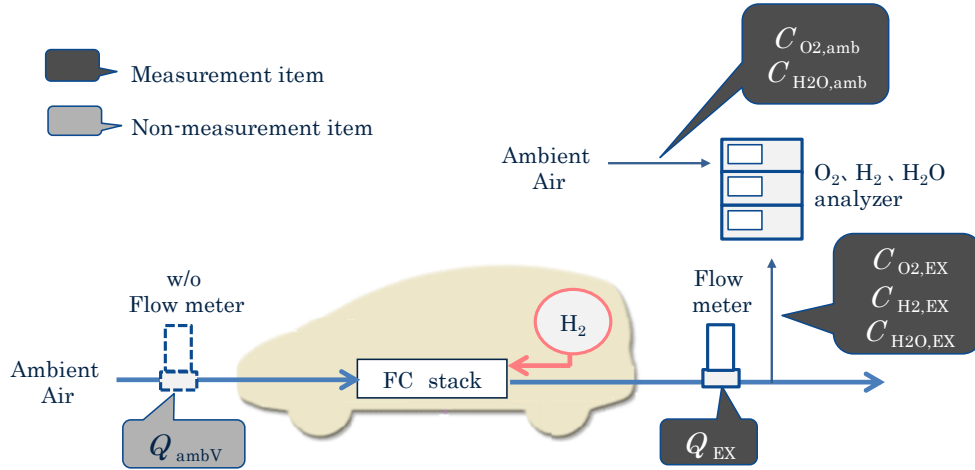


Fig. 1 Schematic diagram of the oxygen balance method by direct measurement.

$$\begin{aligned}\Delta Q_{O_2} &= Q_{ambV} \times C_{O_2,amb} - Q_{EX} \times C_{O_2,EX} \\ &= (Q_{EX} \times C_{URG,EX}) \times (C_{O_2,amb} / C_{URG,amb}) - Q_{EX} \times C_{O_2,EX} \quad (1)\end{aligned}$$

$$Q_{H_2,EX} = Q_{EX} \times C_{H_2,EX} \quad (2)$$

$$\Delta Q_{H_2} = \Delta Q_{O_2} \times 2 + Q_{H_2,EX} \quad (3)$$

以下の量は、いずれの量もドライの状態での流量および濃度を表す。

- Q_{ambV} : 吸入空気流量 [m^3/min]
- $C_{O_2,amb}$: 吸入空気中の O_2 濃度 [vol.%]
- $C_{H_2O,amb}$: 吸入空気中の H_2O 濃度 [vol.%]
- $C_{URG,amb}$: 吸入空気中の非反応性ガス濃度 [vol.%]
- Q_{EX} : 排出ガス流量 [m^3/min]
- $C_{O_2,EX}$: 排出ガス中の O_2 濃度 [vol.%]
- $C_{URG,EX}$: 排出ガス中の非反応性ガス濃度 [vol.%]
- $C_{H_2O,EX}$: 排出ガス中の H_2O 濃度 [vol.%]
- $C_{H_2,EX}$: 排出ガス中の H_2 濃度 [vol.%]
- $Q_{H_2,EX}$: H_2 流量 [m^3/min]
- ΔQ_{O_2} : O_2 消費流量 [m^3/min]
- ΔQ_{H_2} : H_2 消費流量 [m^3/min]

質量保存の観点から、燃料電池の反応に寄与しない N_2 や Ar , CO_2 (以下、非反応性ガス。式中では URG : Unreacted Gases) の量は、吸入と排出において同じである。そのため吸入した O_2 量は、排出ガス中の非反応性ガス量と吸入する空気中の O_2 濃度と非反応性ガス濃度の比から求めることができる。すなわち、以下の式(4)の関係があり、これを式(1)の一行目の式に代入することで二行目の式が得られる。なお、 $C_{URG,amb}$, $C_{URG,EX}$ は、吸入および排出ガス中の酸素および水素濃度を 100 vol.% から引くことにより求められる。

$$Q_{ambV} \times C_{URG,amb} = Q_{EX} \times C_{URG,EX} \quad (4)$$

この式(1)～(3)の算出方法を、本報では非反応性ガス変換法と称する。一方、燃料電池スタックはアノードの H_2 純度を一定の水準に保つために適時 H_2 を排出している。この行為をパージと言う。パージされた H_2 量の計測は、バックグラウンド補正が不要であるため、単純に式(2)で求めることができる。燃料電池の発電には O_2 の 2 倍のモル体積の H_2 が消費されるため、最終的な H_2 消費量は式(3)により求める⁵⁾。

2.2 CVSを用いた非反応性ガス変換法

CVS を用いた非反応性ガス変換法は、内燃機関自動車と同様の CVS を用いて FCV の排出ガスをバッグにサンプリングする。

直接計測法と CVS 法は、使う計器や計測方法が大きく異なるが、次の理由により基本的に H_2 消費量の算出の考え方は同じである。計測手法の概略図を Fig. 2 に示す。燃料電池スタックは吸入した O_2 の半分程度を消費し、残りは排出する。CVS 法では水蒸気の液化を回避するため、排出ガス量の 10 倍以上の希釈ガスで排出ガスを希釈する。この希釈混合したガスを希釈排出ガスと呼ぶ。この希釈排出ガスは、空気利用率のきわめて低い FCV からの排出ガスとみることもできる。その場合の H_2 消費量は、式(1)～(3)を流用して求めることができる。算出式を式(5)～(7)に示す。式(1)～(3)との違いは、CVS 法の場合はバッチ法であるため、流量(Q)を体積(V)に置き換えていることと、吸入空気が車両経由 (V_{ambV}) に加えて希釈空気経由 (V_{ambD}) が加わり 2 系統になっている点である。

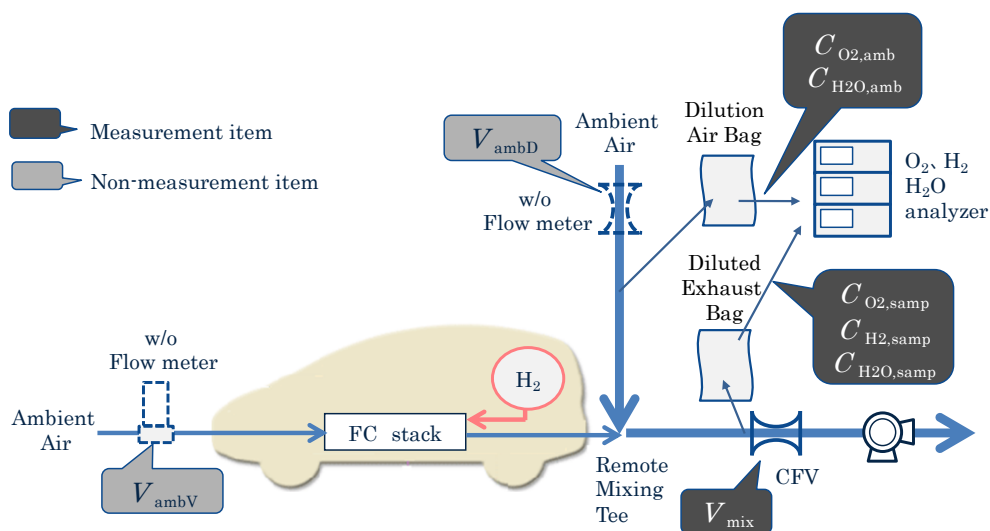


Fig. 2 Schematic diagram of the oxygen balance method using CVS.

$$\begin{aligned}\Delta V_{O_2} &= (V_{ambD} + V_{ambV}) \times C_{O_2,amb} \\ &\quad - V_{mix} \times C_{O_2,samp} \\ &= (V_{mix} \times C_{URG,samp}) \times (C_{O_2,amb} / C_{URG,amb}) \quad (5)\end{aligned}$$

$$V_{H_2,EX} = V_{mix} \times C_{H_2,samp} \quad (6)$$

$$\Delta V_{H_2} = \Delta V_{O_2} \times 2 + V_{H_2,EX} \quad (7)$$

ここで用いる記号は以下の通りであり，前節と同じ記号は説明を省略する．また，いずれもドライの状態での流量および濃度を表す．

V_{ambV}	: 吸入空気量 [m ³]
V_{ambD}	: 希釈ガス量 [m ³]
V_{mix}	: 希釈排出ガス量 [m ³]
$C_{O_2,samp}$	: 希釈排出ガス中の O ₂ 濃度 [vol.%]
$C_{URG,samp}$	: 希釈排出ガス中の非反応性ガス濃度 [vol.%]
$C_{H_2,samp}$	: 希釈排出ガス中の H ₂ 濃度 [vol.%]
$C_{H_2O,samp}$	: 希釈排出ガス中の H ₂ O 濃度 [vol.%]
$V_{H_2,EX}$	: H ₂ 放出量 [m ³]
ΔV_{O_2}	: O ₂ 消費量 [m ³]
ΔV_{H_2}	: H ₂ 消費量 [m ³]

3. 試験方法および試験設備

車両の走行条件の模擬には，シャシダイナモメータを使用した．FCV からの排出ガスは，車両からの排出直後に気液分離され，加熱導入管等を介して希釈ガスと混合し，採取装置を介して CVS のバッグに採取される．また，希釈ガスは，排出ガスと混合される前の段階で CVS のバッグに分取した．気液分離した凝縮水は，排気漏れを生じない閉鎖空間に溜め置いた．排出ガスの採取に関しては，気液分離器を介在させる以外は，内燃機関自動車用の CVS (希釈トンネルはガソリン用)をそのまま流用した．

ガス分析に関わる装置の仕様を Table 1 に，概略図を Fig. 3 に示す．計測系統は分析計の仕様の都合によりウェットガス (Fig. 3 上部)，ドライガス (Fig. 3 下部) の 2 系統とした．

バッグに採取したガスの分析対象は O₂，H₂，H₂O (気体) であり，既設の内燃機関自動車用の分析システムには含まれないため，独自に装置を組み上げた．ガスの分析には時間を要するため，希釈排出ガスを CVS によっていったんバッグに分取した後，個々に 20 L のアルミニウムバッグに分取した．なお，アルミニウムバッグは H₂ の透過が無視できるものを採用した．一方，CVS 装置の採取用バッグ (Kynar 社製) の H₂ の透過性も試験には有意差を与えない程度であることを確認している．

Table 1 Test equipment specifications for gas analysis

Item	Manufacturer/Model	Remarks
O ₂ analyzer	Air Liquide/POM-6E	Paramagnetic type.
MFC (Mass Flow Controller)	Alicat/MC-100SCCM-D/5M	Flow control for O ₂ analyzer
Digital multimeter	Agilent/34970A	for analog output of O ₂ analyzer
H ₂ sensor	RIKEN KEIKI/GD-70/ES	Max 2000ppm
MFC	HORIBA STEC/Z500 (300sccm,30sccm)	Flow control for standard gases.
Dew point sensor	VAISALA/DM70/DMP74A	

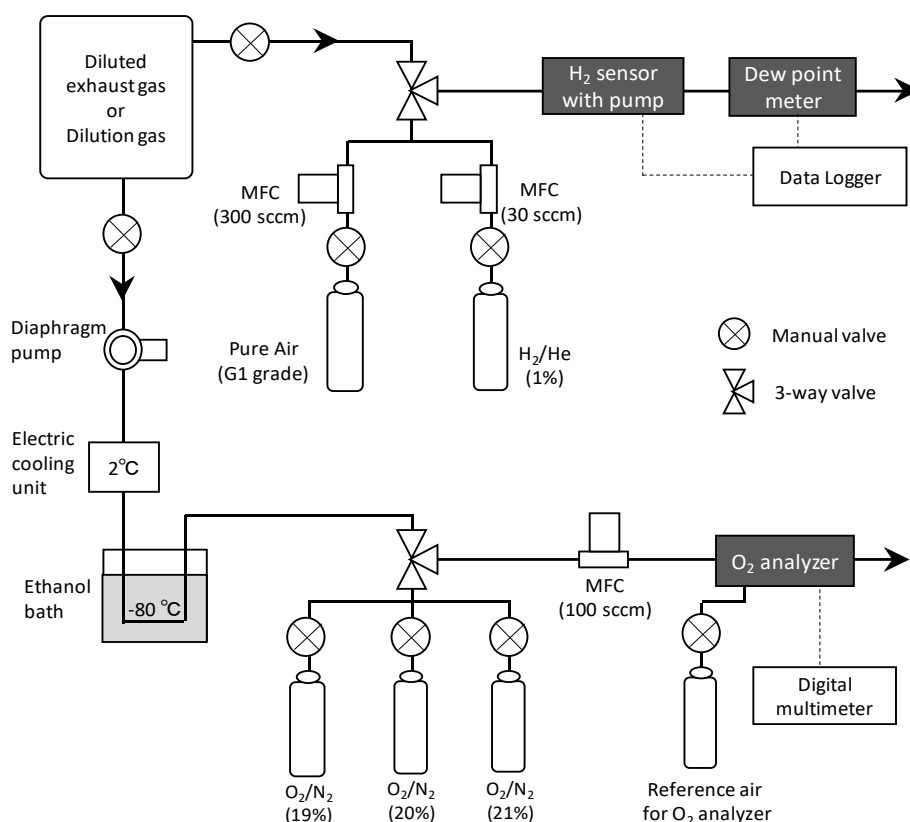


Fig. 3 Schematic diagram of the measurement system for O₂, H₂ and H₂O in diluted exhaust gas and diluting air.

ウェットガス系統では、H₂、H₂O 濃度を分析した。H₂ センサーは試験前後に標準ガスによって構成し、標準ガスは純空気と 1 vol.% の H₂ を流量比混合法で供給した。H₂O 濃度は露点計によって求め、希釈排出ガス量のドライ換算に活用した。

ドライガス系統では O₂ 濃度を分析した。ガスの除湿は圧送ポンプを経由して 2 段階で行い、露点は水蒸気の状態を無視できる程度として -80°C (0.54 ppm) とした。除湿したガスはマスフローコントローラーによって流量制御したのち、O₂ 分析計に送った。O₂ 分析計の校正用に用いた標準ガスを Table 2 に示す。本手法における O₂ 分析では、例えば 20 vol.% (200,000 ppm) の O₂ を ±50 ppm 程度で計測する必要がある。しかし、現在計量法校正事業者登録制度 (以下、JCSS) に則った校正証明付きの標準ガスは 20±0.2vol.% (±2,000 ppm) が限度であり、要求を満たすことができない。

一方、産業技術総合研究所 計量標準総合センター (以下、NMIJ) では、JCSS に属さない標準ガスの提供を行っており、本調査用に標準ガスを作製した。その結果、Table 2 に示すように、O₂ : 20 vol.%±50

ppm の計測精度を満たすのに十分な標準ガスを得られた。また、Table 2 の O₂ 標準ガスを活かすには高精度な O₂ 分析を行う必要があり、NMIJ より同種のガスの提供を受けて大気中の O₂ 分析を行っている同所環境管理研究部門 大気環境動態評価研究グループの技術を活かし、高精度な O₂ 分析を実現した^{6),7)}。

Table 2 Standard gases for O₂ analyzer

Gas, values	Uncertainties
O ₂ /N ₂ : 191,524.1 μmol/mol	7.2 μmol/mol
O ₂ /N ₂ : 199,548.4 μmol/mol	7.5 μmol/mol(k=2)
O ₂ /N ₂ : 210,793.3 μmol/mol	7.7 μmol/mol(k=2)

酸素バランス法の計測誤差の評価基準として質量法を用いた。質量法は、車外の高圧水素容器から燃料として H₂ を FCV に供給し、試験前後で容器の質量計測を行い、その変化分を H₂ 消費量とするものである。電子天秤はメトラー社 XPE64003LC (64 kg/5 mg) を風防内に設置し、専用の高圧容器昇降機構を用いて再現性に配慮した質量計測を行った。FCV 燃料消費量測定法を定める GTR (Global technical regulation, 国際技術基準) No.15 では、質量法に用いる電子天秤の最小読み取り値を 100 mg 以下と定めており、今回用いる電子天秤は十分な読み取り分解能を持っている。

なお、高圧水素容器は Mn 鋼製 47 L 容器であり、充填される H₂ ガスは G1 級（不純物 0.1 ppm 未満、ジャパンファインプロダクツ社製）を用いた。

4. 試験車両

試験には既販の小型乗用タイプの FCV を用いた。試験車両の諸元を Table 3 に示す。酸素バランス法実施のための車両改造は施さないが、比較基準である質量法を実施するため、車載容器からの H₂ 供給を停止し、同容器と燃料電池スタック間に車外から H₂ を供給するための改造を施した。

Table 3 Test vehicle⁸⁾

Item	Specifications
Type	FCV
Sales start date	2014/12/15
Vehicle Mass	1,850kg
Size(L,W,H)	4,890×1,815×1,535mm
Wheelbase	2,780mm
FC stack	PEFC, 370cells, Max114kW
Fuel	Compressed hydrogen
Hydrogen Tanks	2 (front 60.0L/rear 62.4L), 70MPa
Battery	NiH ₂ , 6.50Ah
Motor	Permanent Magnet Synchronous Motor
Max power / Max torque	113kW, 335Nm
Drive system	FWD
Max speed	175km/h

5. 試験条件および試験結果

5.1 試験条件

試験条件を Table 4 に示す。今回は本手法の課題調査のため、限られた試験実施回数の中で複数の条件を与えた。速度パターンは全て WLTC (Worldwide Light duty Test Cycle) とした。速度パターンを Fig. 4 に

示す。なお、本報では WLTC の各フェーズを速度域の低い順に L, M, H, eH と略式で記す。シャシダイナモ室の温度は 23, 40, -7℃とし、臨界流量ベンチュリ（以下、CFV）は 5, 7, 9 m³/min を用いた。

Table 4 Experimental conditions

Item		Specifications
C/D	Test cycle	WLTC
	Room temp.(°C)	23, 40, -7
FCV	Starting SOC	Uncontrolled
	Air conditioner	-7°C・23°C > OFF, 40°C > ON
Exhaust	CFV(m ³ /min)	5, 7, 9
	Heating pipe temp.	70°C

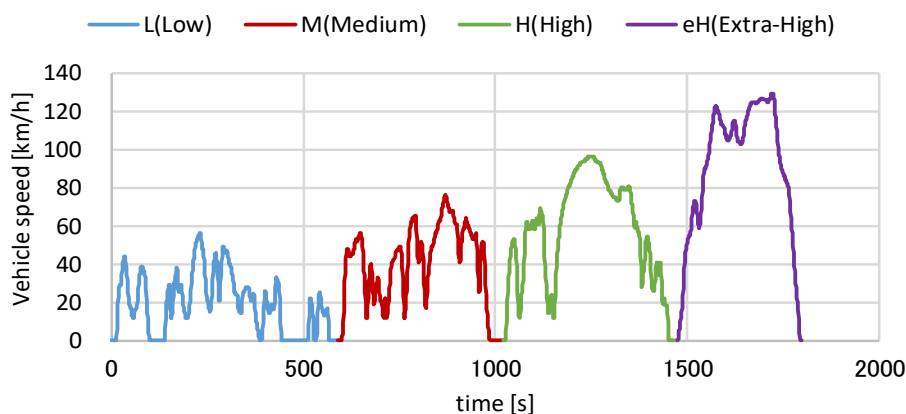


Fig. 4 WLTC class 3 test cycle

5.2 試験結果

評価基準である質量法による H₂ 消費量と、酸素バランス法による H₂ 消費量の差異（以下、誤差）を Fig. 5 に示す。誤差は-4%～0.5%の間に分布しており、全体として質量法の結果に対しマイナスの傾向であった。H₂ 消費量の少ない L フェーズは、比較的誤差が大きく、CFV が小さいほど誤差がマイナス傾向になっている。一方、M・H・eH フェーズは、シャシダイナモ室の温度が低いほど誤差がマイナスの傾向になっている。また、コールドスタートの影響を確認するため、40℃、-7℃のそれぞれの室温環境において、各 1 回ホットスタートの L フェーズを行った。それぞれのコールドスタートとホットスタートの L フェーズの誤差を比較すると、逆の傾向を示しており、複数の誤差要因が重なった可能性が考えられる。

なお、本報で掲載するデータには含まれないが、今回の試験全体を通じて希釈排出ガス中の H₂ 濃度は、各フェーズ間で比較するとバラつきが大きかった。また、FCV がパーズする H₂ 量は一般的に H₂ 消費量全体の数パーセントと考えられる。これより想定される希釈排出ガス中の H₂ 濃度に対して、試験結果の H₂ 濃度は低濃度となった。この原因については検討の余地を残すが、FCV 特有の課題と考えられる。

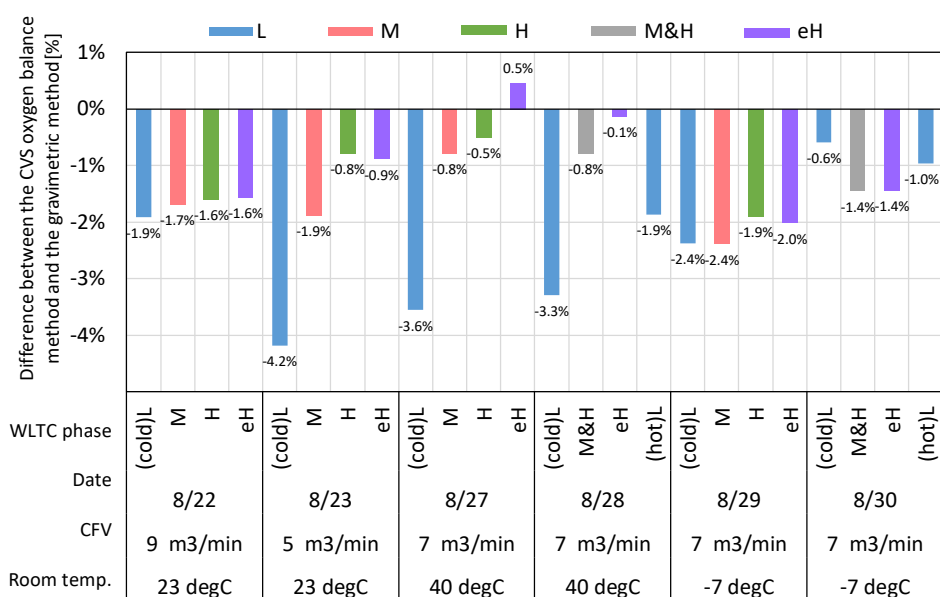


Fig. 5 Difference between the CVS oxygen balance method and the gravimetric method (each phase of WLTC)

WLTC モード燃費を Fig. 6 に示す. eH フェーズは採用国の走行事情によって適用除外となるため, Fig. 6 では, eH の有無によって標記を分けている. Fig. 6 より, 誤差は概ね-2%~-1%の間に分布し, Fig. 5 と同じく質量法の結果に対して全体的にマイナス傾向であった.

酸素バランス法の誤差の目標を評価基準比で $\pm 1\%$ 以内とした場合, Fig. 5, Fig. 6 とともに誤差の平均値は目標を達成できない. 酸素バランス法を車両改造が必要な質量法の代替にするには, 誤差は $\pm 1\%$ に近づける必要がある. そのためには, 今後誤差要因の解明と, その改善を進める必要がある.

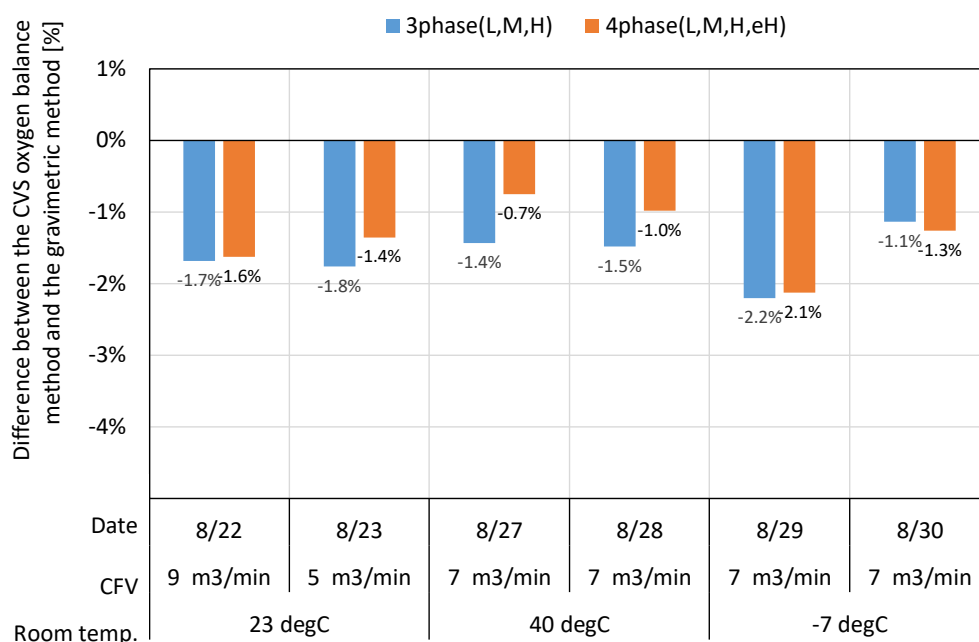


Fig. 6 Difference between the CVS oxygen balance method and the gravimetric method (WLTC mode)

6. まとめ

車両改造不要な FCV 燃費試験方法の早期確立が求められる中、FCV を評価対象として CVS を用いた酸素バランス法の課題調査を行った。結果を以下にまとめる。

評価試験では、シャシダイナモ室の温度、CFV、WLTC の各フェーズをパラメータとして変化させ、質量法を基準に酸素バランス法の誤差を評価した。その結果、WLTC のフェーズ毎の誤差は-4%~0.5%程の間に分布し、WLTC モード全体では誤差は-2%~1%程の間に分布した。

酸素バランス法の誤差の目標を±1%以内とした場合、現段階では目標を達成できない。そのためには、今後誤差要因の解明と、その改善を進める必要がある。

CVS 法は内燃機関自動車の排出ガス測定手法として半世紀以上も使われ続けており、信頼性の高い手法である。そのため、本手法の誤差要因の解明の際、FCV 特有の課題を発見し、改善していくことが重要と考える。またそれにより、本手法が実用化に大きく近づくことになると思う。

謝辞

本報は一般社団法人日本自動車工業会からの委託事業の一部をまとめたものである。本調査にご協力をいただいた皆様に深く感謝する。

- 1) 矢野 勝ほか：[燃料電池自動車の燃費計測手法（質量法、圧力法）](#)，自動車研究，Vol.26, No.6, p.257-260(2004)
- 2) 矢野 勝ほか：[燃料電池自動車の燃費計測手法（脈動に対応した流量法）](#)，自動車研究，Vol.29, No.6, p.243-246 (2006)
- 3) Yano, M. et al., [Development of Fuel Consumption Measurement Method for Fuel Cell Vehicle \(Flow Method corresponding to Pressure Pulsation of Hydrogen flow\)](#), SAE Paper 2007-01-2008
- 4) Kuroda, E. et al., [Calculation of Hydrogen Consumption for Fuel Cell Vehicles by Exhaust Gas Formulation](#), SAE Paper 2008-01-0465
- 5) 矢野 勝ほか：[車両改造不要な FCV 燃費計測手法の開発（酸素バランス法の検証実験）](#)，自動車研究，Vol.30, No.7, p.339-342 (2008)
- 6) Aoki, N., Shimosaka, T., [Development of an Analytical System Based on a Magneto - pneumatic Oxygen Analyzer for Atmospheric Oxygen Determination](#), Analytical Sciences, Vol.34, No. 4, (2018)
- 7) Ishidoya, S. et al., [Development of a continuous measurement system for atmospheric O₂/N₂ ratio using a paramagnetic analyzer and its application in Minamitorishima Island](#), Japan. SOLA 2017, 13, 230-234.
- 8) [トヨタ MIRAI 主要諸元表](#)
https://toyota.jp/pages/contents/mirai/001_p_001/pdf/spec/mirai_spec_201501.pdf

放射光 X 線によるリチウムイオン電池の内部短絡現象の その場観察

In-situ Observation of Internal Short Circuit Phenomenon in Lithium Ion Batteries
Using Synchrotron X-ray Imaging

高橋 昌志^{*1} 後藤 翼^{*1}
Masashi TAKAHASHI Tsubasa GOTOH

Abstract

For a forced internal short circuit (FISC) test and a ceramic nail prick test assuming an internal short circuit due to particle metal contamination, in-situ observation was performed during an internal short circuit phenomenon using synchrotron X-ray imaging. As a result, the relationship between voltage drop behavior and the number of short circuit layers could be confirmed in detail on X-ray CT images.

1. はじめに

リチウムイオン電池 (LIB) は、例えば取り扱いを誤り、過充電、過放電、外部短絡といった状況になった場合には、電池内部で自己発熱反応が起こり、最終的には熱暴走に至る可能性がある。通常、LIB を使用する場合には安全装置を内蔵した電池を使用したり、制御系統に保護回路を設けて、そのような事態が発生することを未然に防いでいる。しかし、微小金属粉の混入や集電体の折れ曲がりによる内部短絡およびその内部短絡に起因する熱暴走は、安全装置や保護回路が正常に作動していても防ぐことができない事象である。このような保護回路等で防ぐことができない内部短絡に対して安全性を確保する目的で作られた民生用 LIB を対象とした試験法が、JIS C8714¹⁾や IEC 62133-2²⁾などに規定されている強制内部短絡試験 (FISC 試験) である。

一方、自動車用 LIB でも民生用と同様に内部短絡が発生するリスクがあることから、単セルを対象とした自動車用 LIB の安全規格である IEC 62660-3³⁾にも FISC 試験が規定されている。しかし、FISC 試験は単セルを解体し金属異物を模擬した一辺 1 mm の L 字ニッケル片を挿入する必要があるため、技術面及び安全面で実施が難しい場合があることから、より容易かつ安全に実施できる代替試験の選択が可能となっている。代替試験の候補としては、単セルを解体する必要性が無いセラミック釘を使用した釘刺し試験が、関連情報として IEC/TR 62660-4⁴⁾にまとめられている。ただし、FISC 試験との同等性の確認などが課題として挙げられており、標準試験法として採用するにはさらなる検証が必要となっている⁵⁾。

筆者らは FISC 試験の代替候補であるセラミック釘刺し試験について、特に FISC 試験との内部短絡層数の同等性について調査してきた^{6,7)}。FISC 試験の内部短絡時の短絡層数は 1~2 層に対して、セラミック釘刺し試験時の短絡層数は多くなる傾向にあった。なお、短絡層数の数え方は、Fig. 1 に示す通り負極層-正極層短絡で 1 層、負極層-正極層-負極層短絡で 2 層短絡としている。試験時に内部短絡を検知する方法としては、予めセル電圧の低下幅を決め、その低下幅以上の電圧低下が確認された時点に内部短絡したと見なし、FISC 試験では加圧治具またはセラミック釘の移動を自動停止する操作を行っている。過去の結果より、FISC 試験とセラミック釘刺し試験で、電圧低下幅を同一値にしても、セラミック釘刺し試験のほうが若干短絡層数が多くなる傾向が見られている⁷⁾。これまで短絡層数の評価は、試験後のセルを解体し、セパレータの貫通穴の有無で確認していたため、電圧低下挙動と短絡層数の関連性が不明であった。そこで今回、短絡手法の違いによる電圧低下挙動と短絡層数の関連性を比較するため、放射光 X 線を用いた内部短

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部

* 原稿受理 2020 年 4 月 10 日

絡時のその場観察を行った。

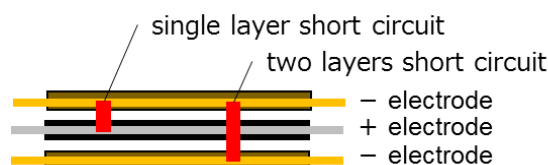


Fig. 1 How to count the number of short circuit layers

2. 試験方法

試験は大型放射光施設 SPring-8 の白色 X 線回折ビームライン (BL28B2) にて実施した。LIB が熱暴走して発煙、発火を伴うと、設備や試験員に被害を及ぼす可能性があるため、LIB が熱暴走しても安全に試験ができるように、釘刺し装置付属の耐爆チャンバーと排ガス処理装置等で構成される、公益財団法人高輝度光科学研究センター (JASRI) 所有の蓄電池安全性試験システムを使用した。Fig. 2 に X 線透過イメージングの概略図、Fig. 3 に耐爆チャンバーの写真を示す。高エネルギー放射光 X 線は耐爆チャンバー内に設置した LIB を通過し、耐爆チャンバー背面の 2 次元 X 線検出器により X 線透過像を取得する。また、試料台はスリッピング付き回転ステージとなっており、チャンバー内の LIB を回転させて X 線検出器と同期しながら X 線透過像を計測し、3 次元像を再構成することが可能である。

SPring-8 の高エネルギー放射光による X 線透過イメージング技術と熱暴走に耐えうる蓄電池安全性試験システムを組み合わせることで、これまでほとんど報告例が無い内部短絡や熱暴走に至る可能性のある不安全状態の LIB セル内部の動的挙動を、高空間・高時間分解能によりその場で観察することが可能となる。

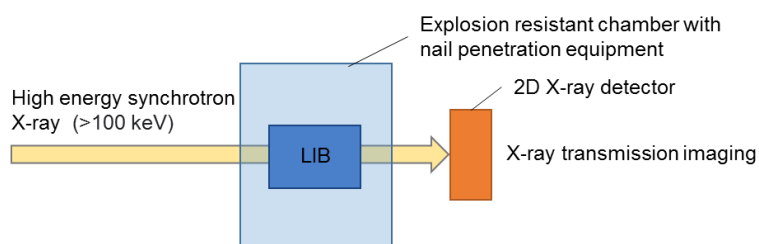


Fig. 2 Schematic diagram of X-ray transmission imaging

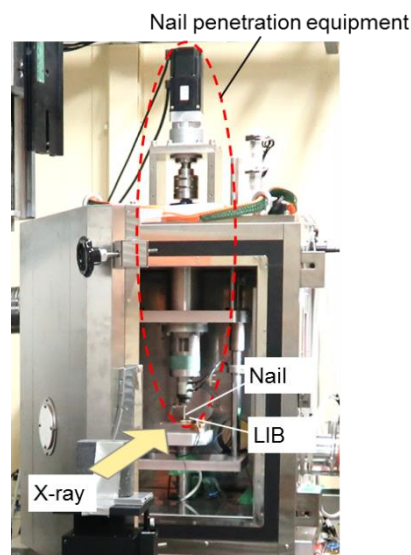


Fig. 3 Explosion resistant chamber

試験には市販のパウチ形 LIB (定格容量：110 mAh、寸法：15 mm×27 mm×4 mm) を用いて、FISC 試験およびセラミック釘刺し試験を実施した。FISC 試験は JIS C8714 などの試験法に準拠して実施した。具体的には、LIB を解体して最外周の負極活物質とセパレータ間に一辺 1 mm の L 字ニッケル片を挿入し、再度巻き戻した LIB に対して、セル外側から規定の加圧治具を用いて押圧した。セラミック釘刺し試験は、先端をニッケルとした $\phi 1$ mm、先端円錐角度 30° のセラミック釘を用いて、解体していない

LIB に対して刺した。いずれも充電状態を 100 % として実施した。なお、加圧治具またはセラミック釘の降下速度と停止タイミングについては後述する。

FISC 試験およびセラミック釘刺し試験での内部短絡時のセルの内部状況について、X 線透過像または CT (Computed Tomography) 像により観察した。X 線 CT 像は任意の面のスライス画像を取得できるため、X 線透過像よりも詳細に短絡部を観察することが可能である。なお、使用したシステムの X 線透過イメージングの空間分解能は 10 μm 、時間分解能は 10 ms である。

3. 結果と考察

3.1 X 線透過像による観察

FISC 試験時のセル電圧、加圧治具変位およびセル表面温度の経時変化を Fig. 4 に、X 線透過像を Fig. 5 に示す。また、セラミック釘刺し試験時のセル電圧、セラミック釘変位およびセル表面温度の経時変化を Fig. 6 に、X 線透過像を Fig. 7 に示す。加圧治具またはセラミック釘は、降下速度を 0.1 mm/s として試験し、セル電圧が ≥ 50 mV 低下時点で短絡が発生したと見なし、降下を自動停止させた。X 線透過像は 10 ms 毎の画像を取得した。

FISC 試験前 (before) の X 線透過像では、電極体の積層状態があまり鮮明に確認できない。これは、セルの解体と電極を巻き戻す作業をしたことにより、電極体の平面度が低下したためである。加圧治具で押圧すると、さらに電極体に変形して不鮮明になっており、短絡直前 (a) と短絡直後 (b) の画像に明確な差は見られない。セラミック釘刺し試験前 (before) の X 線透過像は、セルの解体作業を行っていないため電極体の積層状態が鮮明に確認できる。短絡直前 (a) の画像では、釘先端はセル表面から 2 枚目の負極層程度まで到達しているように見えるが、実際には釘の荷重により釘先端部の電極体がたわんで貫通せず短絡に至っていないと推察される。また、FISC 試験と同様に短絡直前と短絡直後 (b) の画像に明確な差は見られない。以上のことから、今回の試験条件では、X 線透過像での観察によりセル内部の動的挙動は確認できるが、どの層で短絡したかなど詳細な短絡挙動は確認できないことがわかった。なお、あらかじめ撮影用に設計された LIB では、釘刺し時の X 線透過像から短絡層数がある程度確認できることが報告されている^{8),9)}。

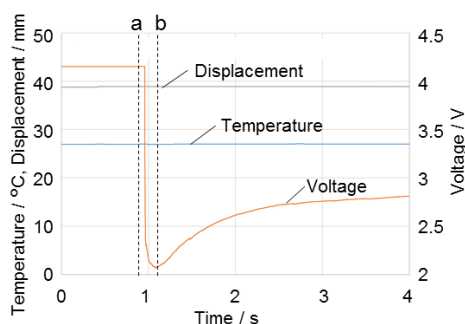


Fig. 4 Cell temperature, voltage and pressing jig displacement during the FISC test.

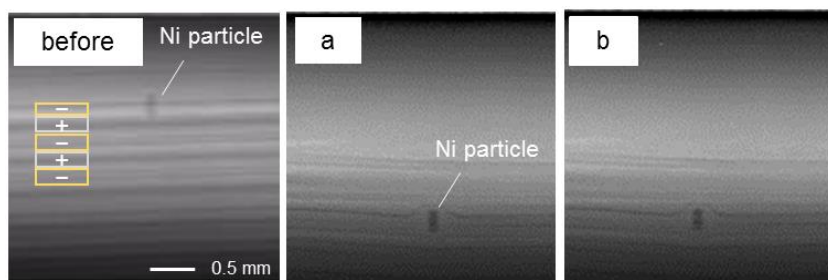


Fig. 5 X-ray transmission images of the FISC test: (before) before the test, (a) immediately before short circuit, (b) immediately after short circuit.

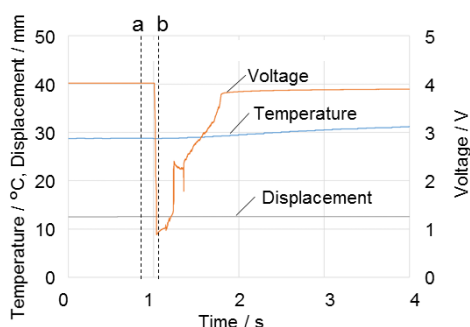


Fig. 6 Cell temperature, voltage and nail displacement during the nail prick test.

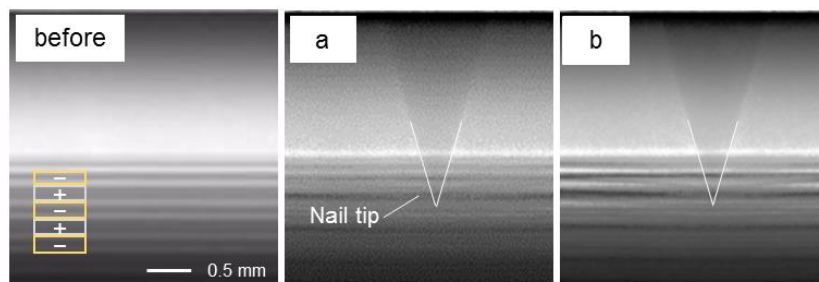


Fig. 7 X-ray transmission images of the nail prick test: (before) before the test, (a) immediately before the short circuit, (b) immediately after the short circuit.

3.2 X線CT像による観察

X線透過像では詳細な短絡挙動が確認できなかったことから、X線CT像による観察を行った。X線CT像を取得するには、LIBを回転させてX線透過像を計測し、3次元像を再構成する必要があることから、セラミック釘を連続的に降下させるのではなく、断続的に降下させた。具体的には、セル電圧の低下を確認した時点でセラミック釘を停止させ、釘固定を解放させた後、試料台を回転させてX線CT像を取得した。その後、再度セラミック釘を降下させて、電圧の低下を確認した時点で同様の操作を繰り返した。なお、FISC試験では最初のセル電圧の低下により0 V付近まで到達したため、繰り返しの操作は行わなかった。

FISC試験時のセル電圧、加圧治具変位の経時変化をFig. 8に、短絡後に加圧治具を上昇させて取得したX線CT像をFig. 9に示す。また、セラミック釘刺し試験時のセル電圧、セラミック釘変位およびセル表面温度の経時変化をFig. 10に、短絡前後のX線CT像をFig. 11に示す。

FISC試験では、X線CT像より、セル表面から2枚目の負極集電箔がニッケル片により切断されているのが確認できる。また、1枚目の正極層に電解液等の反応によるものと考えられる空隙がニッケル片端部付近で確認された。なお、ニッケル片が2枚目の正極層まで到達しているか判別できなかった。以上のことから、今回のFISC試験は2層短絡となっており、短絡の起点は主としてニッケル片の端部で発生しているものと推察された。

セラミック釘刺し試験では、1枚目の負極層に釘先端が到達した時点(a)では短絡に伴う電圧低下は確認されていない。最初スパイク状の電圧低下が確認された時点(b)では、1枚目の正極層に釘先端が到達している。さらに釘を降下させると、2回目の電圧低下が確認された時点(c)で2枚目の負極層、3回目の3V以上の大きな電圧低下が確認された時点(d)で2枚目の正極層まで釘先端が到達していることを確認した。以上のことから、スパイク状の電圧低下は短絡層数が増加するごとに発生していることがわかった。また、3回目の電圧低下が確認された時点では3層短絡となっているが、FISC試験のような急激な電圧低下は確認されず、電圧は緩やかに低下している。このことから、FISC試験とセラミック釘刺し試験で形成される短絡の厳しさは、短絡層数に相関は見られず、FISC試験のほうがより少ない短絡層数で厳しい短絡となっていることがわかった。

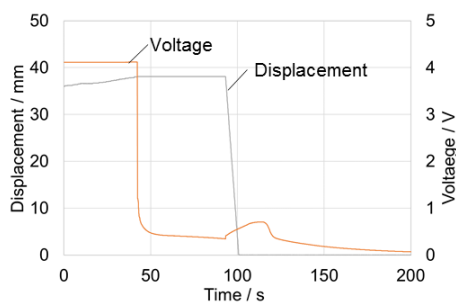


Fig. 8 Cell voltage and pressing jig displacement during the FISC test.

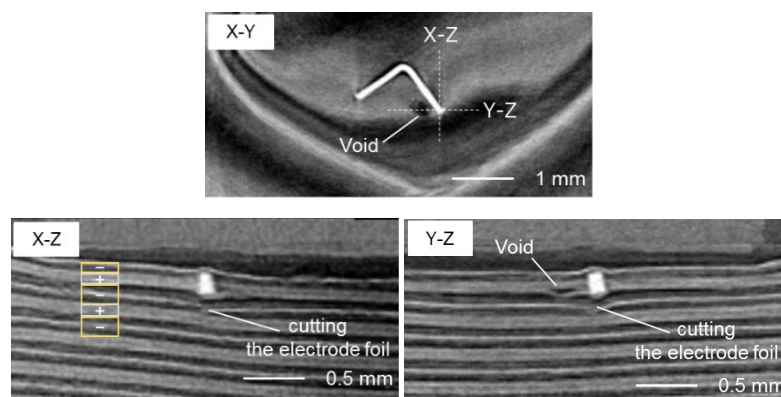


Fig. 9 X-ray CT images of the FISC test after the short circuit: (X-Y) X-Y cross section, (X-Z) X-Z cross section, (Y-Z) Y-Z cross section.

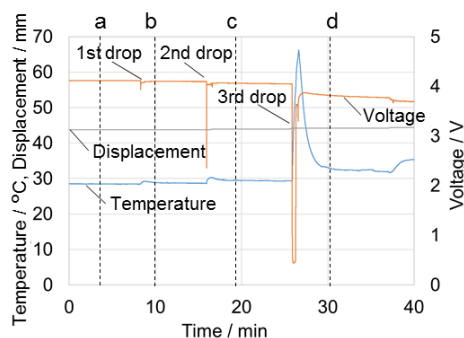


Fig. 10 Cell temperature, voltage and nail displacement during the nail prick test.

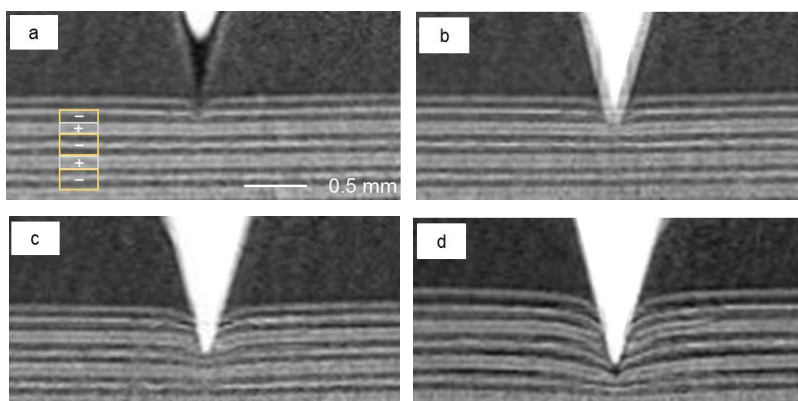
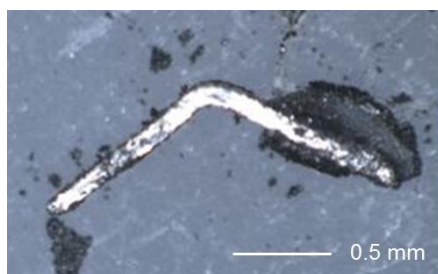


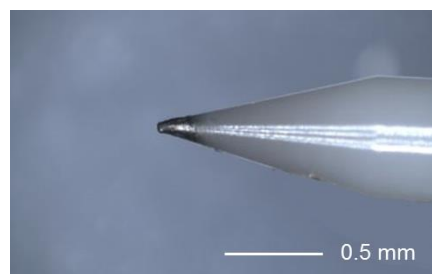
Fig. 11 X-ray CT images of the nail prick test:

(a) before the short circuit, (b) after the short circuit at the first voltage drop, (c) 2nd voltage drop, (d) 3rd voltage drop.

試験後のニッケル片とセラミック釘の画像を Fig. 12 に示す。FISC 試験で用いたニッケル片は、端部に反応物や正極活物質が付着しており、端部のダメージが大きいことがわかる。これは、X 線 CT 像から推察された、短絡の起点がニッケル片端部で発生していることと一致している。セラミック釘は、先端のニッケル部が丸くなっており、短絡による熱で熔融したものと推察される。



Ni particle



Ceramic nail

Fig. 12 Image of Ni particle and ceramic nail after the test.

短絡の厳しさは、短絡部に流れる短絡電流や、短絡部の発熱量の大きさにより評価できる。短絡部の短絡

電流 I は式 (1)、発熱量 W_{short} は式 (2) より算出される。

$$I = E / (R_{internal} + R_{short}) \quad (1)$$

$$W_{short} = E^2 R_{short} / (R_{internal} + R_{short})^2 \quad (2)$$

ここで、 E は起電力、 $R_{internal}$ は内部抵抗、 R_{short} は短絡抵抗である。短絡電流は、短絡抵抗が小さいほど大きくなるが、発熱量は内部抵抗と短絡抵抗が同一の値となった時に最大値を取る。今回供試した LIB の内部抵抗は約 240 mΩ に対し、ニッケル片とセラミック釘自体の計算上の短絡抵抗は 3 桁程度低い値となっており、短絡の厳しさに関して両者にあまり違いは無いはずである。しかし、実際の試験では FISC 試験のほうがより厳しい結果となったが、これは、電極層と短絡物の短絡時の接触面積の違いが影響していると考えられる。実際の試験では、短絡による熱で短絡物が溶融したり、反応物が付着するなどして、短絡抵抗は増加するが、接触面積の小さいセラミック釘ほどその傾向は大きくなり、短絡が持続しなくなる。そのため、FISC 試験のほうがより少ない短絡層数で厳しい短絡となったと推察される。

4. まとめ

今回、FISC 試験およびセラミック釘刺し試験による内部短絡時のセルの内部状況について、大型放射光施設 SPring-8 の X 線回折ビームラインにて X 線透過像または CT 像により観察した結果、以下のことを確認した。

- ・今回用いた市販のパウチ形 LIB による X 線透過像観察では、釘の荷重で電極体が変形した影響により、短絡層の状況を明確に確認できなかった。そこで、短絡途中に釘固定を解放させる機構を入れ、試料台を回転させることが可能な状態として短絡時の X 線 CT 像を取得した結果、より詳細に短絡層の状況を確認することができた。
- ・セラミック釘刺し試験の X 線 CT 像より、短絡時のスパイク状の電圧低下は短絡層数が増加するごとに発生していることがわかった。
- ・FISC 試験とセラミック釘刺し試験で形成される短絡の厳しさは、短絡層数に相関は見られず、電極層と短絡物の接触面積の違いによる短絡抵抗の差が影響しているものと推察された。

これまで内部短絡試験方法の違いによる短絡の厳しさを比較する方法として、主に短絡層数の比較を行っていたが、短絡層数以外に電極層と短絡物の接触面積を考慮した短絡抵抗の比較が必要である。今回の観察手法を用いることで、これまで不明であったセル内部の電極層のどの位置で短絡が形成され、その際にどの程度の電圧低下が発生するか観測できることから、積層された各電極層と短絡物の接触面積や短絡抵抗をある程度予測することが可能となる。また、短絡抵抗などをもとに導出される発熱量を比較することで、異なる内部短絡試験方法の熱的な同等性の評価ができるものと考えられる。なお、今回は容量の小さい市販のパウチ形 LIB を用いて試験したが、自動車用 LIB はさらに容量が大きいため、自動車用 LIB の短絡現象を把握するには、実規模レベルの LIB を用いて評価する必要がある。

従来、LIB の内部短絡や熱暴走に関わる研究で利用されてきた解体分析では、種々の反応停止後の情報しか得られなかったが、高エネルギー放射光による X 線透過イメージング技術と熱暴走に耐えうる蓄電池安全性試験システムを組み合わせた今回の設備を用いることで、セル内部の時々刻々と変化する反応過程を直接観測できることから、異物混入による内部短絡現象のみならず、種々の LIB の不安全事故に至る反応メカニズムの解明に役立つものと考えられる。ただし、試験可能なセルは、18650 型セル程度が最大であるため、自動車用途などの大きなセルを観測するにはさらに大型の設備が必要であり、今後の開発を期待したい。

試験に協力いただいた京都大学と JASRI の関係各位に深く感謝する。

本研究は、SPring-8 の BL28B2 において、課題番号 (2019A1023, 2019B1348) のもとで実施された成果の一部である。

参考文献

- 1) JIS C8714:2007, [携帯電子機器用リチウムイオン蓄電池の単電池及び組電池の安全性試験](#), 2007-11-12
- 2) IEC 62133-2:2017, "[Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for portable sealed secondary lithium cells, and for batteries made from them, for use in portable applications - Part 2: Lithium systems](#)", 2017-02-07
- 3) IEC 62660-3:2016, "[Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles - Part 3: Safety requirements](#)", 2016-08-29
- 4) IEC TR 62660-4, "[Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles - Part 4: Candidate alternative test methods for the internal short circuit test of IEC 62660-3](#)", 2017-02-13
- 5) 高橋雅子： [電動車両用電池・充電に関する国際標準化の動向](#), JARI Research Journal, 20190202 (2019)
- 6) 高橋昌志, 前田清隆： [自動車用リチウムイオン電池の内部短絡試験方法の調査](#), JARI Research Journal, 20150902 (2015)
- 7) 前田清隆, 高橋昌志： [自動車用リチウムイオン電池の強制内部短絡試験の代替試験法の検討](#), JARI Research Journal 20171001 (2017)
- 8) Yokoshima, T. et al. : [Direct observation of internal state of thermal runaway in lithium ion battery during nail-penetration test](#), J. Power Sources, Vol. 393, No. 67 (2018).
- 9) Yokoshima, T. et al. : [Operando Analysis of Thermal Runaway in Lithium Ion Battery during Nail-Penetration Test Using an X-ray Inspection System](#), J. Electrochem. Soc., Vol. 166, A1243 (2019)

リチウムイオン電池の熱連鎖試験における 窒化珪素ヒータを用いたトリガ手法の調査

Investigation of a Trigger Method by Using a Silicon Nitride Heater
in a Thermal Propagation Test for Lithium Ion Batteries in Vehicles

後 藤 翼^{*1}

Tsubasa GOTOH

前田 清隆^{*1}

Kiyotaka MAEDA

高橋 昌志^{*1}

Masashi TAKAHASHI

Abstract

The methodology for thermal propagation test in electric vehicles has been discussed in an ISO meeting. Japan insists that the purpose of a thermal propagation test is to "evaluate the behavior of a lithium ion battery pack when an internal short circuit occurs in one cell of the pack". Although the Forced Internal Short Circuit (FISC) test is a representative test method, it's difficult to apply it to battery packs in automobile applications. As a triggering methodology for the test, we investigated that whether the number of internal short-circuit layers equivalent to the FISC test is feasible or not by using a silicon nitride heater. The results indicate that the methodology has good repeatability of the supposed number of internal short circuit layers, if the heater is stopped at an appropriate time.

1. はじめに

電動車両の駆動用リチウムイオン電池には様々な保護機能があるが、内部短絡については保護機能で防ぐことが不可能である¹⁾。仮に電池パック内で内部短絡した1セルが熱暴走に至った場合、隣接セルも次々に熱暴走に至る熱連鎖が発生し、電池パックが発火に至る可能性がある。現在、電動車用リチウムイオン電池パックの熱連鎖試験法 ISO6469-1 AMD が国際標準の場において議論されており、世界各国が様々な試験法を提案している。他国は1セルの強制熱暴走を前提とした試験法を多数提案しているが、日本はセル製造時の異物混入が内部短絡発生要因であることを前提としているため、「パック内の1セルにおいて異物混入相当の内部短絡が発生した際のパックの挙動評価」を試験目的としている。内部短絡時の安全性評価試験としては、単セルを対象とした強制内部短絡(FISC: Forced internal short circuit)試験²⁾が代表的な試験であり、当該手法では1~2層程度の短絡層数が得られる。しかしながらFISCは、単セルを対象としたセルの分解を伴う試験法である。自動車用電池パックはセルが密に積層された構造であるため、パック内における任意の単セルに対して当該試験法を適用することは難しく、釘刺し、加熱等の代替手法が検討されている。

本研究では、熱連鎖試験のトリガ手法に汎用の板状窒化珪素ヒータを用いて電池の外部加熱を行うことにより、特別仕様の試験装置等を用いることなく内部短絡を発生させることが可能であること、加えてヒータ加熱により得られた短絡層数は日本が主張する、セル製造時の異物混入相当の内部短絡と同程度のものであることを検証した。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 電動モビリティ研究部

* 原稿受理 2020年1月10日

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部

(2022年3月現在)

2. 実験方法

2.1 使用電池およびヒータ

試験対象はアルミラミネートセル(NCM 系, 容量 10Ah, 積層型)とし, 試験時の SOC は 100%とした. Table 1 にヒータの仕様を示す. 試験時はヒータとセルが密着した状態で加熱を行うものとした.

Table 1 Heater specifications

Dimensions	W17×L118×T4 mm
Heating area	50 mm
Power	400 W (maximum value)
Rate of temperature rise	100 °C/min (setup value)

2.2 計測項目

Table 2 に計測項目を示す. また Fig. 1 に示す 3 点を温度の計測位置とし, 各々 TC1~TC3 とする. 温度計測にはシース形状の K 型熱電対を用いた. 本試験においては車載時の積層された電池の拘束状態を再現すべく, ヒータをベークライト板を用いて拘束した.

Table 2 Measurement items

V _{cell}	Cell voltage
TC1	Heater temperature
TC2	Cell surface temperature (10mm from the edge of the heater)
TC3	Cell surface temperature (behind the heater)

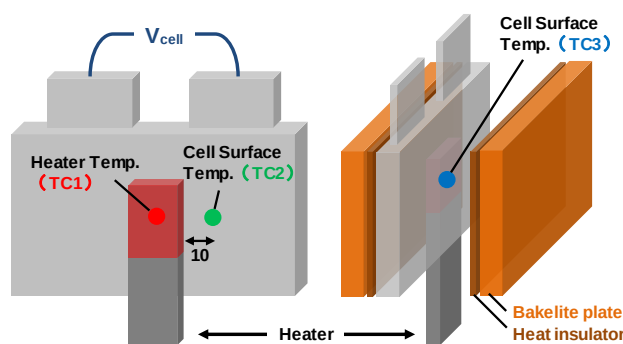


Fig. 1 Measurement points and test setup

2.3 短絡層数の定義と評価方法

供試したリチウムイオン電池は正極と負極がセパレータで隔てられており, それが複数層重ねられた積層構造のセルとなっている. 当該試験においてヒータからの熱がセルの外装に加えられることにより, セパレータが熔融ないし収縮に伴い正負極が接触し短絡が発生する. これに従い, ヒータ加熱面から起算してセパレータに空孔が見られた枚数を短絡層数として定義するものとする (Fig. 2). 試験後はセルを放電し, 分解観察を実施した. 空孔の確認には目視ないし顕微鏡を用いた.

なお, セルは外周にセパレータが複数回巻かれた構造となっているが, 加熱により最表面のセパレータに

空孔が生じても短絡は発生しないため、最外周のセパレータは短絡層数に含まない。

After disassembly

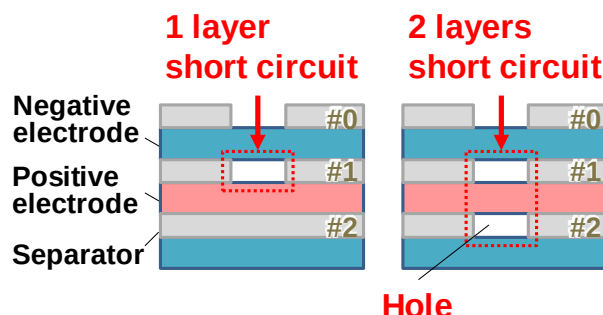


Fig. 2 Definition of the number of short circuit layers

3. 試験結果

3.1 停止条件探索のための予備試験

1～2 層短絡を得るヒータ停止条件を探索するため、熱暴走をするまでヒータ加熱を行う予備試験を実施した。Fig. 3 に試験結果を示す。

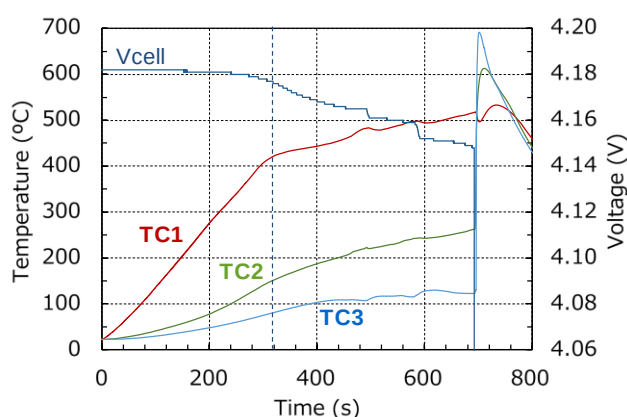


Fig. 3 Results of preliminary test

加熱開始直後はセル電圧に変化は見られないが、180 秒頃から徐々に電圧が低下し始め、300 秒頃になると継続的な電圧低下が確認された。次いで 420 秒頃から断続的な発煙が確認され、その後 694 秒において急激な電圧低下と発火が確認された。

本結果より、3 分後以降から電圧が低下し始め内部短絡発生の兆しが見られており、また 5 分頃から電圧降下の傾きが大きくなっていることから、点線で示される $\Delta V = 5\text{mV}$ となった時点では確実に内部短絡が発生しているものと見られる。そこで本研究では 5mV のセル電圧低下を基準としてヒータ加熱を停止する事とした。

3.2 停止条件毎の短絡層数の確認

内部短絡の判断基準として電圧低下 $\Delta V = 5\text{mV}$ の時点でヒータを停止した試験 (test No.1) を実施した。試験結果を Fig. 4 に示す。ヒータ停止後も電圧が低下しており、加熱開始から 10 分時点では 9mV の電圧低

下となった。ヒータ加熱により発生した短絡がしばらく継続しているものと推定される。結果としてセルは発煙には至らなかったものの、セル表面温度 TC2 は 140°C まで上昇した。

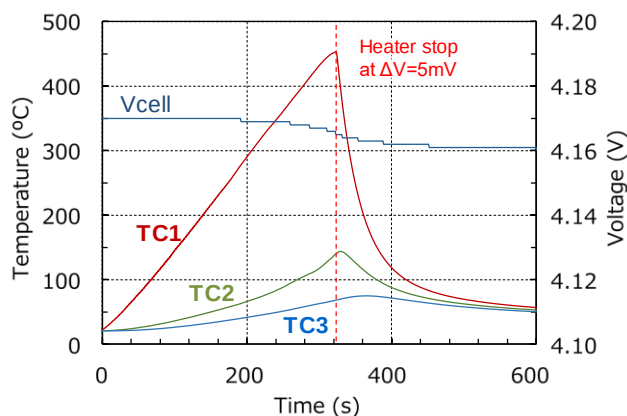


Fig. 4 Results of test No.1

セパレータの観察結果を Fig. 5 に示す。9 層目まではヒータ加熱に起因する空孔が目視で確認されたが、10 層目は顕微鏡像でも空孔が見られなかった。よって短絡層数は 9 層であったと断定した。



Fig. 5 Results of observation of separators

前述の通り、本試験はセル製造時の異物混入に相当する 1 層ないし 2 層の短絡層数を得ることを目的としているため、9 層短絡という結果は明らかに過多である。そのためヒータ加熱の停止条件を緩和した試験条件を検討し、加熱時間による停止判断条件のもと試験を 2 回実施した (test No.2, No.3)。結果を Fig. 6 に示す。それぞれの加熱時間は test No.2 が 230 秒、test No.3 が 260 秒である。

いずれにおいても電圧低下幅は 2mV であったが、短絡層数は test No.2 が 2 層短絡、より加熱時間の長い test No.3 が 3 層短絡の結果となった。加熱時間の差が短絡層数に影響していると見られる。

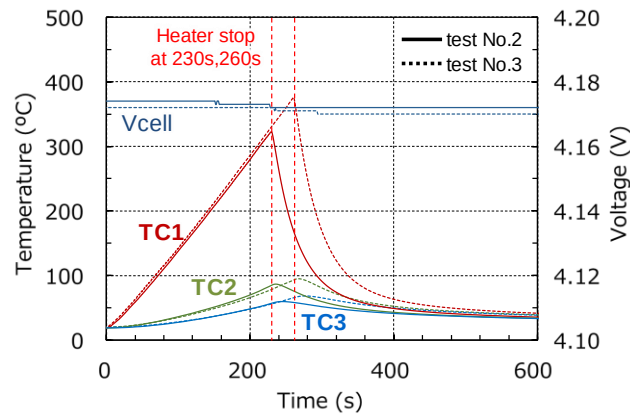


Fig. 6 Results of test No.2 and No.3

3.3 繰り返し性検証試験

3.2 で得られた試験結果より，加熱時間と短絡層数の間には相関が存在し，加熱時間の管理により短絡層数をコントロールすることが可能と考えられる．そこで，短絡層数と各計測パラメータの相関について解析を行った．前節での試験結果における各温度 TC1～TC3 に加え，ヒータ加熱時間 t_1 を短絡層数でプロットした結果を Fig. 7 に示す．全てのパラメータに良好な相関が見られたが，中でも最も良い相関が得られたのはセル表面温度 TC2 であった．

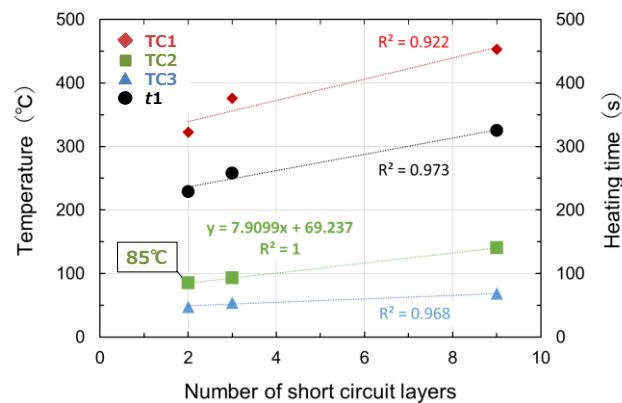


Fig. 7 Correlation between temperatures, heating time and the number of short circuit layers

この結果を踏まえ，2 層短絡が得られた test No.2 のヒータ停止時の温度である $TC2 = 85^{\circ}\text{C}$ をヒータ停止条件として設定し，試験法の繰り返し性確認のための試験を 2 回実施した (test No.4, No.5)．結果を Fig. 8 に示す．

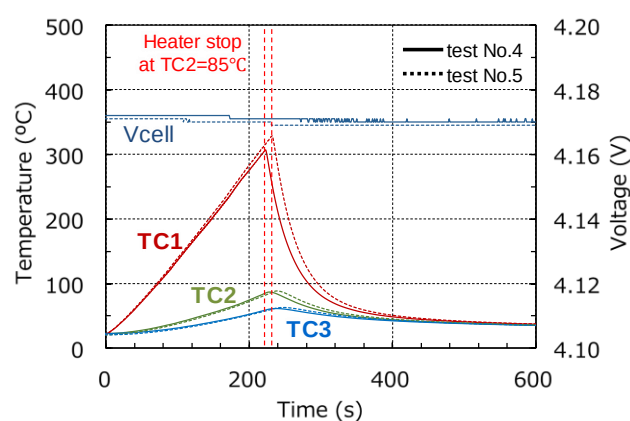


Fig. 8 Results of test No.4 and No.5

電圧，温度挙動共に概ね一致しており，短絡層数はどちらも 2 層の結果が得られたため，再現性にも優れた試験法であると言える。

3.4 総括

以上，全 5 試験の結果をまとめたものを Table 3 に示す．なお ΔV はいずれもヒータ停止時の値である．加えてセパレータの観察結果について Fig. 9 に示す．短絡発生個所と見られるセパレータの空孔部を赤色で示している．目視での観察が不可能なものについては倍率 50 倍の顕微鏡を用いて観察を行った結果を示した．

Table 3 List of all the test results

Test No.	Test purpose	Stop criteria	Heating time (s)	ΔV^* (mV)	Number of short circuit layers
1	Verification of the number of short circuit layers	$\Delta V = 5 \text{ mV}$	323	5	9
2		$t_1 = 3\text{m}50\text{s}$	230	2	2
3		$t_1 = 4\text{m}20\text{s}$	260	2	3
4	Confirmation of test No.2 reproducibility	$TC2 = 85^\circ\text{C}$	220	1	2
5			232	2	2

*when a heater is stopped

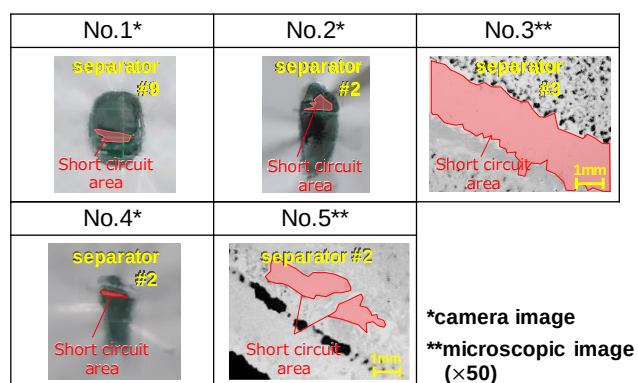


Fig. 9 Results of observation of separators

4. おわりに

板状窒化珪素ヒータを用いてリチウムイオン電池セルの外部加熱を行うことにより，日本が ISO 国際会議において主張するセル製造時の異物混入に相当する短絡層数を得ることが出来た．加えて短絡層数とセル表面温度の間に良好な相関が見られ，繰り返し性にも優れる結果になった．従って，本研究において実施したヒータ加熱は熱連鎖試験時のトリガ手法として有用である．ただし，本研究はセルを対象として内部短絡発生の有無を調査したものである．ISO 規格は車載電池パックの評価を行うための規格であることから，今後車両を対象とした試験の実施が必要である．

謝辞

本研究は経済産業省/野村総合研究所（NRI）の平成 30 年度省エネルギー等に関する国際標準の獲得・普及促進事業委託費（省エネルギー等国際標準開発（国際標準分野））（電動車に関する国際標準化）において得られた成果であり，関係各位に深く感謝する．

参考文献

- 1) UNECE, EVS-GTR 6th session, <https://wiki.unece.org/display/trans/EVS+6th+session> (2019.10.21)
- 2) International Electrotechnical Commission, IEC 62660-3:2016 (2016)

LES による筒内直接噴射式ガソリン機関の局所燃料濃度の サイクル変動評価

Evaluation of Cycle-to-cycle Variations for Local Fuel Concentration using Large Eddy Simulation

松岡 正紘^{*1}
Masahiro MATSUOKA

伊藤 貴之^{*1}
Takayuki ITO

辻村 彬人^{*2}
Yoshito TSUJIMURA

中山 智裕^{*2}
Tomohiro NAKAYAMA

Abstract

The evaluation for the fuel concentration near the spark plug is important for direct injection gasoline engine to improve the thermal efficiency with stratified concentration of fuel mixture. This study investigated the cycle to cycle variations for the fuel concentration near the spark plug region using Large Eddy Simulation (LES) which can realize to simulate the cycle variation for the flow field. The results show that the LES can evaluate not only the differences of mean value but also deviation regarding the local fuel concentration between engine operating conditions.

Key Words: Cycle-to-cycle Variations, Large Eddy Simulation, Gasoline Engine, Direct injection

1. はじめに

環境問題やエネルギー資源枯渇の問題などから、内燃機関に対する燃費や排出ガスの改善要求はますます厳しくなっており、ガス流動や燃料噴射などの緻密な制御が必要となってきた¹⁾。これらに対応するためには、エンジン筒内における燃焼に影響する現象の把握や予測が重要となる。

エンジン始動後の触媒暖機制御においては、排出ガスの温度を高めるため、一般的に点火時期を遅角させる。このような条件下においては、燃焼のサイクル間変動抑制が課題になる。サイクル間変動の要因究明については、実験的な分析^{2),3)}に加え、実験では計測困難な物理量を評価することが可能な数値解析もまた有力な手段となる⁴⁾。

本研究では、4気筒実機の冷間始動直後における暖機運転時のサイクル間変動挙動を対象とし、変動挙動の異なる2条件において、LESによる多サイクル計算を行い、主として点火プラグ近傍の燃料濃度変動挙動に着目した解析を行った。この点火プラグ近傍の燃料濃度の変動や筒内流動の変動からサイクル間の燃焼変動の要因を考察した。

2. 計算手法および供試エンジン

2.1. 解析ソルバおよびサブモデル

本研究では、ガソリンエンジンのシリンダ内挙動を数値可視化するためのシミュレーションソフトとして開発された HINOCA⁵⁾を用いた。HINOCAでは、等間隔直交格子(cartesian grid)と境界埋込(immersed boundary, IB)法を組み合わせた手法が採用されており、従来の物体適合格子(body fitted grid)と比較して、計算に必要なメッシュ作成を短時間で行うことができ、ピストンやバルブなどの移動境界の取り扱いが容易である。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士(工学)

*2 株式会社 SUBARU 車両環境開発部

* 本原稿は JSAE 著作権規制に基づく JSAE 20214820 の転載である

* 原稿受理 2022年2月10日

乱流モデルには、サイクル間変動の主要因の一つと考えられるサイクル毎の流動場の非定常性を再現可能な LES を用いた。Sub Grid Scale (SGS) 応力モデルには、壁近傍の減衰関数を必要としない Wall Adapting Local Eddy-viscosity (WALE) モデルを用いた。

燃料噴霧の液滴分裂モデルは、Kelvin-Helmholz 不安定性による 1 次分裂と Rayleigh-Taylor 不安定性による 2 次分裂の両方を同時に解く KH-RT モデル⁷⁾とし、Table 1 に示すモデル定数を用いた。

Table 1 Parameters of spray model for calculations

KH-RT model parameters		
B_0	KH model size constant	0.61
B_1	KH model time constant	20
C_{RT}	RT model size constant	0.1
C_3	RT model time constant	0.5
C_L	Break up length constant	1.0

計算格子はベース解像度を 1.0 mm とし、バルブ近傍および、吸気ポート部は、形状をより正確に再現するため、適合格子細分化法 (Adaptive Mesh Refinement, AMR) を用いて細分化を行った。これにより、計算格子数は最大で 300 万程度である。

壁面境界条件は等温壁を仮定し、シリンダ面、ピストン面、およびヘッド面の温度をそれぞれ 333 K, 400 K, および 500 K とした。

計算には、Intel Xeon Gold 6148 (2.4 GHz) のクラスタ型計算機を用い、MPI+Open MP のハイブリッド並列により、480 コア程度を用いて並列計算を行った。

2.2 供試エンジンと計算条件

供試エンジンは、排気量 2.0 L の筒内直接噴射式の過給ガソリンをベースとした単気筒可視化エンジンとした。Table 2 に主要諸元を、Fig. 1 に計算で用いた形状データを示す。

Table 2 Specifications of test engine

Displacement	0.5 L
Bore x Stroke	86 mm x 86 mm
Number of Cylinders	1
Compression Ratio	10.0
Intake valve open/close	3(degCA BTDC)/53(degCA ABDC)
Exhaust valve open/close	65(degCA BBDC)/1(degCA ATDC)

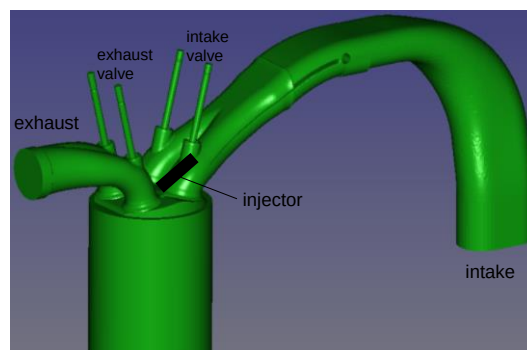


Fig. 1 Geometry data for calculations

2.3 燃料濃度分布の計測方法

燃焼室中央断面における混合気濃度の計測には、レーザ誘起蛍光法 (Laser Induced Fluorescence, LIF) を用いた。蛍光剤にはアセトンを用い、イソオクタン (媒質) とアセトン (蛍光剤) との混合液を燃料として使用し、それらの混合分率は質量比で 8:2 とした。ピストンのストローク方向と直交する方向からレーザシート光 (Nd:YAG レーザの第 4 高調波) を入射し、照射された断面における蛍光シグナルを ICCD カメラで計測した。蛍光シグナル強度は、燃料濃度に比例するが、雰囲気圧力・温度の影響を受けるため、文献⁸⁾による方法で補正した。また、レーザシート光の減衰の影響を Lambert-Beer の法則を仮定して補正し、波長選択フィルタを用いることでレーザシート光と ICCD カメラ間における蛍光強度の減衰影響を抑制した。また、計測画像中にレーザ参照光を取り込むことで、レーザ強度のショット間ばらつきを補正した。

3. 自由噴霧の再現性評価

自由噴霧の CFD 解析により、噴射パターン、噴霧外観、ペネトレーションの検証を行った。検証は標準大気環境下 (298 K, 101kPa) にて燃料噴射圧 7 MPa と 15 MPa で実施した。

Fig. 2 に燃料噴射圧 7 MPa の噴霧をインジェクタ下流 30 mm における噴霧断面を実験と計算で比較した結果を示す。計算における噴射角度を、Fig. 2(a)の実験で得られた噴射パターンから幾何学的に推定した噴射角度に対して、やや広角に設定することで実験の噴射パターンと良い一致が確認された。

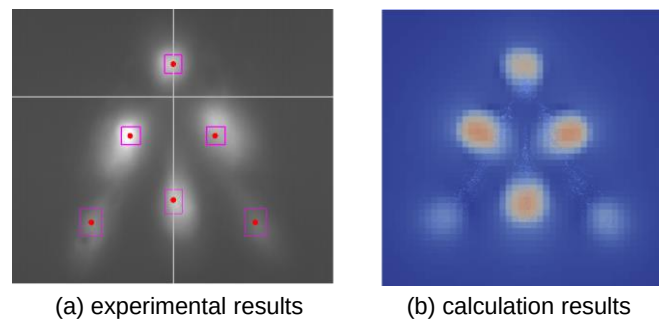


Fig. 2 Comparison of spray injection pattern between experiments and calculations

計算で得られた各噴射時期における噴霧外観について、実験 (散乱光画像) と計算の比較を Fig. 3 に示す。また、噴霧のペネトレーションについて計算と実験で比較した結果を Fig. 4 に示す。ここで、実験における噴霧到達位置は、各時刻における噴霧画像の輝度値を水平方向に積算した値の鉛直方向プロファイルを参照し、最大輝度値の 30% の位置として定義した。一方、計算においては各時刻において噴射された総燃料質量の 98% が到達した位置として定義した。計算の噴霧ペネトレーションは、燃料噴射圧力によらず実験結果と良く一致している。

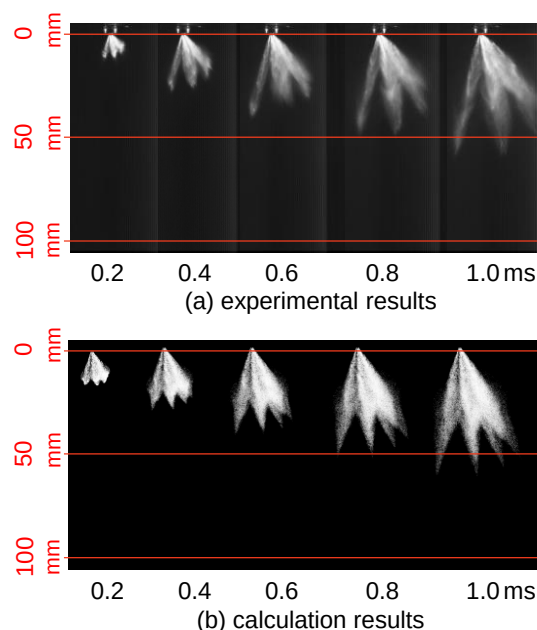


Fig. 3 Comparison of spray shape between experiments and calculations

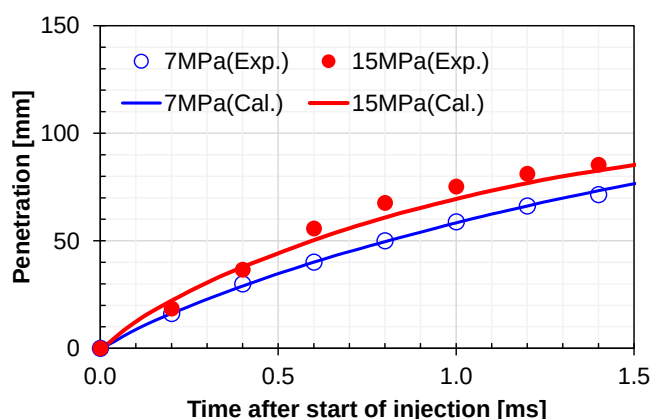


Fig. 4 Comparison of spray tip penetration between experiments and calculations

4. 筒内流動の再現性評価

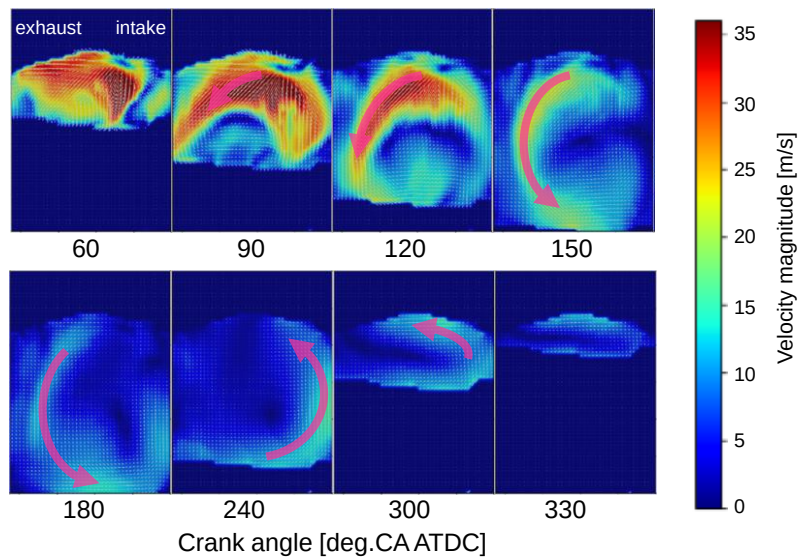
筒内流動の再現性を確認するため、モータリング運転時において、粒子画像流速測定法（Particle Image Velocimetry, PIV）による筒内流動の可視化を行い、PIV 結果と計算結果の比較を行った。モータリング運転条件は 1200 rpm のスロットバルブ全開（wide-open throttle, WOT）である。PIV データは 64 サイクルの平均とし、計算は 5 サイクルの平均とした。なお、計算開始後の 1 サイクル目は流動が安定していない可能性を考慮し、2～6 サイクルの計算結果を用いた。

PIV 結果と計算結果の比較を Fig. 5 に示す。PIV 結果で観察された筒内流動を計算で表現できている。

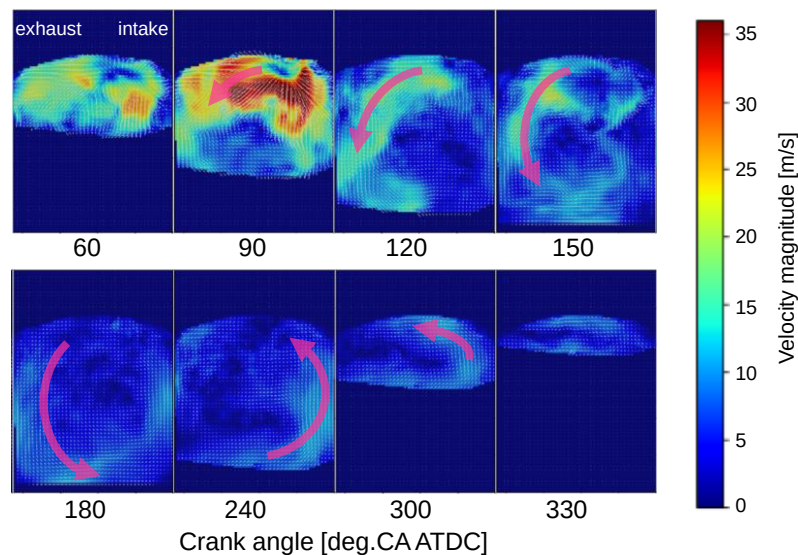
さらに、PIV 結果と計算結果についてより定量的な評価を行うため、同一座標における速度ベクトルの絶対値と向きについて計算結果と PIV 結果の比較を行った。PIV 結果と計算結果について、流速絶対値の比較を Fig. 6 に、 $\cos\theta$ の比較を Fig. 7 に示す。流速絶対値の一致度については計算と実験の比で評価し、この数値が 1 の場合は、実験と計算の流速が等しいことを示す。また、ベクトルの向きの一致度については、計算と実験の速度ベクトルのなす角を θ とした際の $\cos\theta$ の値で評価した。 $\cos\theta$ の値は、計算と実験の速度ベ

クトルの向きが一致する場合は $\cos\theta = 1$ となり，向きの乖離が大きくなるほど小さな値となる．

Fig. 6 中の右上の数値は流速絶対値の断面平均値の比（計算/実験），Fig. 7 中の右上の数値は $\cos\theta$ の断面内平均値を表す．流速絶対値の比較については，クランク角度によって，1.0 からの乖離が大きい領域が異なり，流速絶対値が計算と実験で異なる空間領域についての明確な傾向は見られない．断面平均値で見ると 10～20% 程度の乖離となっている．一方，Fig. 7 の速度ベクトルの一致度に注目すると，各クランク角度において，1.0 からの乖離が大きい領域が点在するものの，流速絶対値と同様にその位置について各クランク角度で共通する傾向などは見られず，多くの領域で 1.0 に近い値となっている．断面平均値は概ね 0.7～0.8 程度であり，各クランク角度における局所的な速度ベクトルの向きを計算で概ね再現できていると考えられる．



(a) experimental results



(b) calculation results

Fig. 5 Comparison of flow pattern between experiments(PIV) and calculations

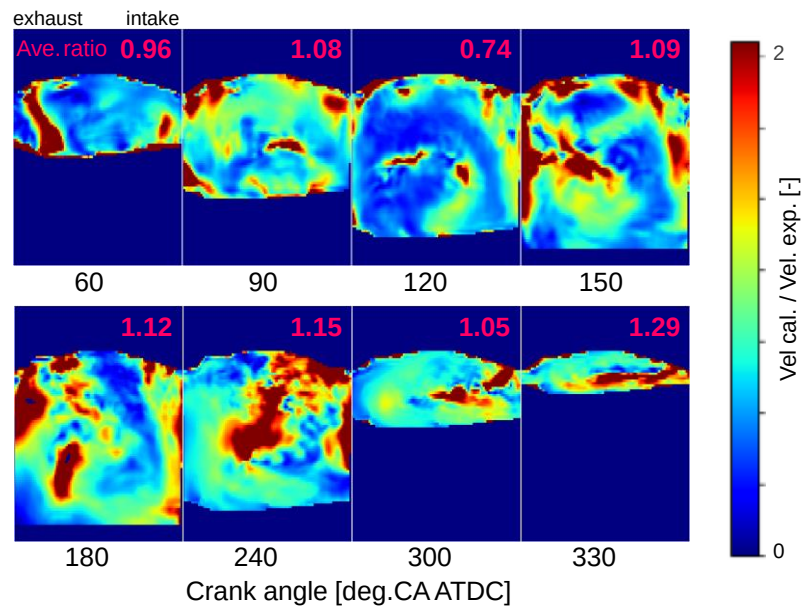


Fig. 6 Ratio of calculations to experiments for velocity magnitude

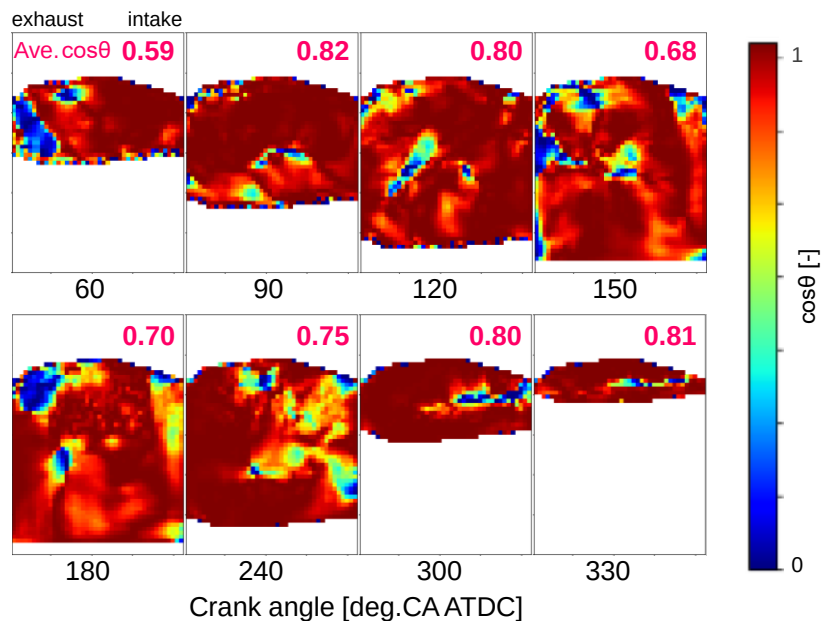


Fig. 7 Comparison of the directions of charge motion between experiments and calculations

5. 点火プラグ近傍の燃料濃度のサイクル間変動評価

5.1 実機におけるサイクル間燃焼変動の評価条件

サイクル間燃焼変動の評価運転条件を Table 3 に示す. この 2 条件は 4 気筒実機の冷間始動直後における暖機運転時に負荷変動の挙動が異なる条件であり, LIF によって燃焼室内の燃料濃度分布およびサイクル間の変動を確認した. その結果, Fig. 8 に示すように点火時期におけるプラグ近傍の当量比がサイクル毎に変動する様子が確認される. Fig. 9 には, プラグ近傍当量比のサイクル平均値と変動係数 (Coefficient of variation) を示す. ここで, 変動係数は, 標準偏差を平均値で除した値と定義される

Table 3 Operating conditions for evaluation of cycle-to-cycle variations

	Condition①	Condition②
Number of engine	1588 rpm	1514 rpm
Intake pressure	-23.5 kPa	3.1 kPa
Injection timing	105/320° ATDC	105/320° ATDC
Density@320° ATDC	4.0 kg/m ³	5.3 kg/m ³
Air fuel ratio		14.5
Ignition timing		375° ATDC

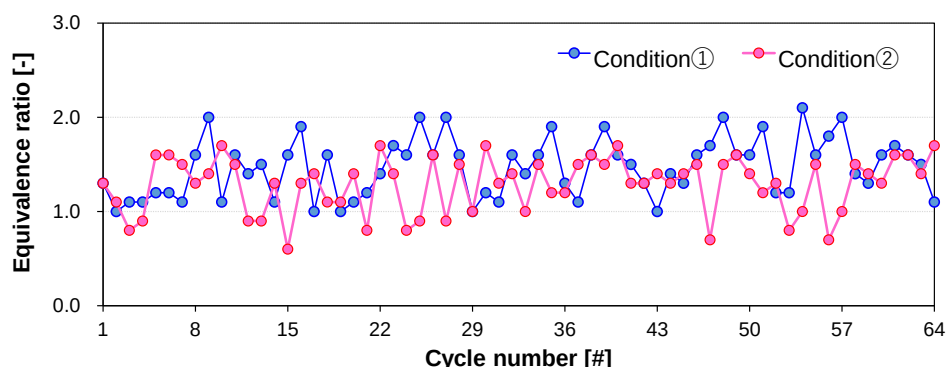


Fig. 8 Cycle-to-cycle variations of equivalence ratio near the spark plug (experiments)

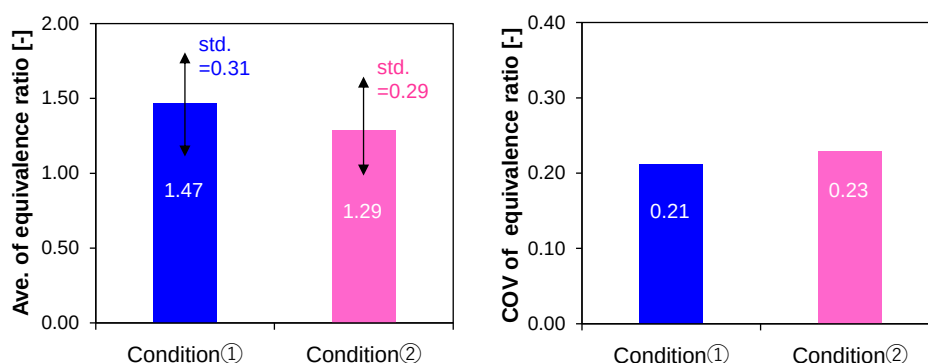


Fig. 9 Comparison of equivalence ratio near the spark plug for each condition (experiment)

条件①と条件②を比較すると、平均値は条件①の方が高く、逆に変動係数は条件②の方が高い。すなわち、条件①の方がプラグ近傍の当量比のサイクル間変動が小さく、条件②の方がサイクル間変動が大きい条件である。この傾向は実機におけるサイクル間燃焼変動挙動と同じ傾向であり、サイクル間燃焼変動の主要因の一つとしてプラグ近傍の当量比のサイクル間変動が考えられ、これを計算で再現可能か確認を行った。

5.2 計算におけるサイクル間変動の計算方法

本計算モデルにおいては、噴霧液滴の壁面付着や液膜蒸発挙動に関する検証が十分ではないため、これらの影響を除外して、筒内流動の変動のみで実験の傾向を再現できるかに主眼を置く。そのため、本研究では Fig. 10 に示すように、モータリング計算を複数回（2～15 回）繰り返し、それぞれのモータリングが終了した後に燃料を噴射する計算を実施することとした。すなわち、モータリングの繰り返し回数により、異なる筒内流動場を作り、そこへ燃料噴射した際のプラグ近傍の当量比のサイクル間変動を評価した。なお、モータリングの筒内流動を評価した際と同様に、1 サイクル目は流動が安定しない可能性を考慮して除外し、2 サイクル目以降の結果を用いて評価した。

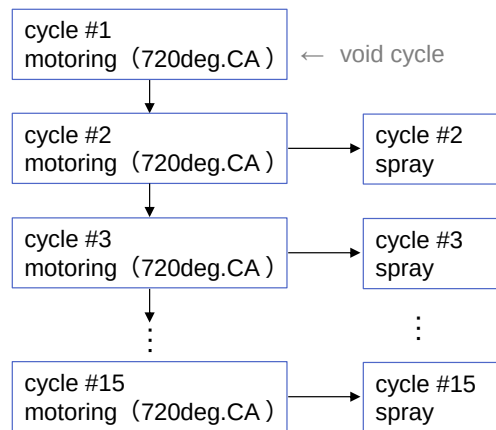


Fig. 10 Simulation procedure for evaluating cycle-to-cycle variations

5.3 サイクル間変動の計算結果

Table 3 に示す条件①について計算した 14 サイクル分の点火時期 (375°ATDC) における燃焼室内の当量比分布を Fig. 11 に示す. LES により流動のサイクル間変動のみを考慮して計算した場合においても, サイクル毎に当量比分布が大きく異なる様子が確認される.

Fig. 12 は LIF 結果における 64 サイクル分の当量比の平均値と, 計算における 14 サイクル分の当量比の平均値の比較である. ここで, 当量比の絶対値が LIF と計算で異なり, 計算においては, 断面平均で 1.0 を下回る結果も見られたため, 濃度分布を LIF 結果と比較するために, 当量比の表示レンジを調整して示している. ここで, 計算の断面平均当量比が 1.0 を下回った理由として, 吸入空気量の過大評価や燃料の壁面付着および付着燃料の蒸発挙動の誤差などが考えられる.

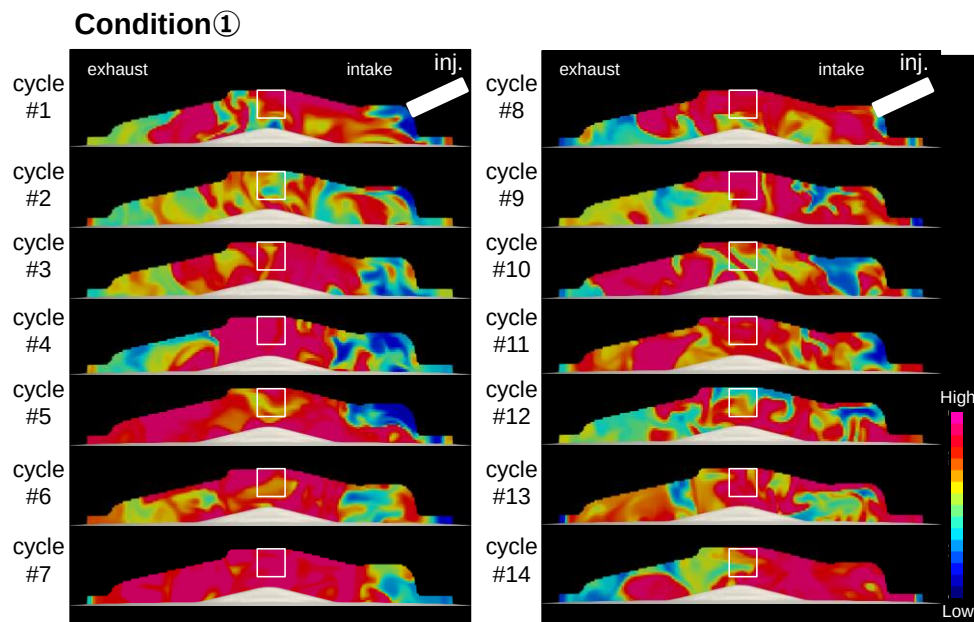


Fig. 11 Distribution of equivalence ratio in each cycle

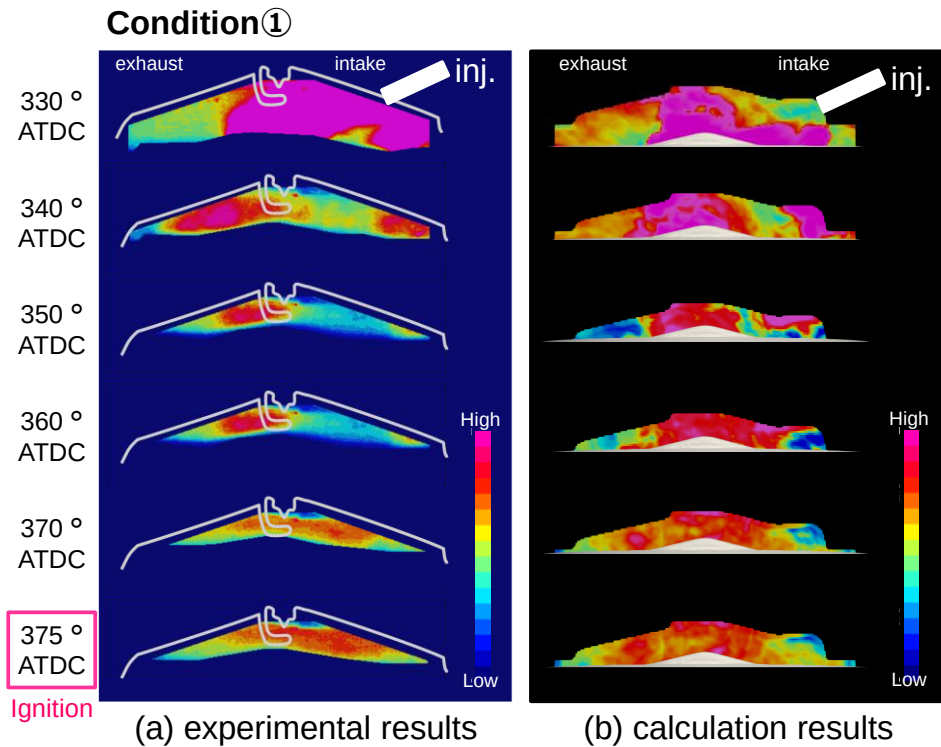


Fig. 12 Comparison of equivalence ratio between experiments (LIF) and calculations

条件①, 条件②におけるプラグ近傍の当量比について, 計算と実験で得られたプラグ近傍の当量比の平均値および変動係数の比較を Fig. 13 に示す. 平均値については, 条件①に対し条件②が小さくなり, 条件違いによる差を再現できている. 変動係数については, 条件①に対し条件②が大きくなり, 実測と計算が同じ傾向となることが確認される. これにより, LES によって条件違いのサイクル間の局所的な燃料濃度分布の変動挙動を再現できる可能性が示唆される.

条件①の方がプラグ近傍の当量比が高くなった要因としては, 2 段目の燃料噴射時の筒内密度の差に起因した噴霧貫徹力の違いと考えられ, Fig. 14 に示すように, 当量比範囲を 2 段目の噴霧輪郭を把握できるように調整すると, 2 段目噴射時の筒内密度の低い条件①の方が噴霧貫徹力が大きく, プラグ近傍に燃料蒸気塊が集まり易い傾向が見られる.

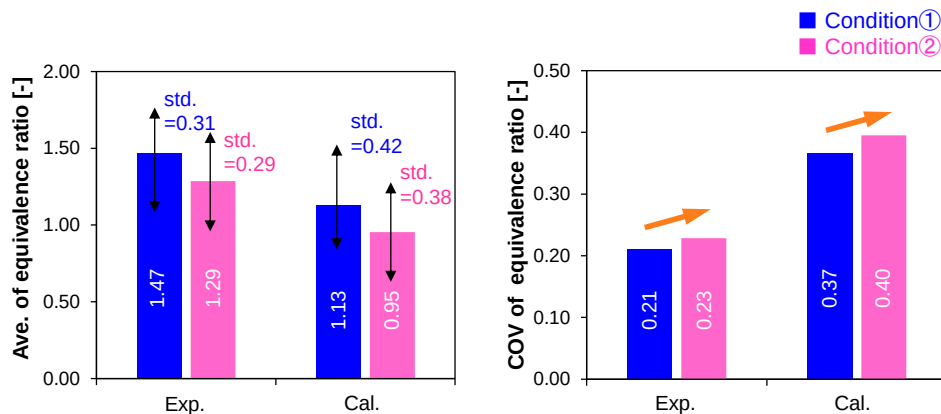


Fig. 13 Comparison of equivalence ratio near the spark plug between experiments and calculations

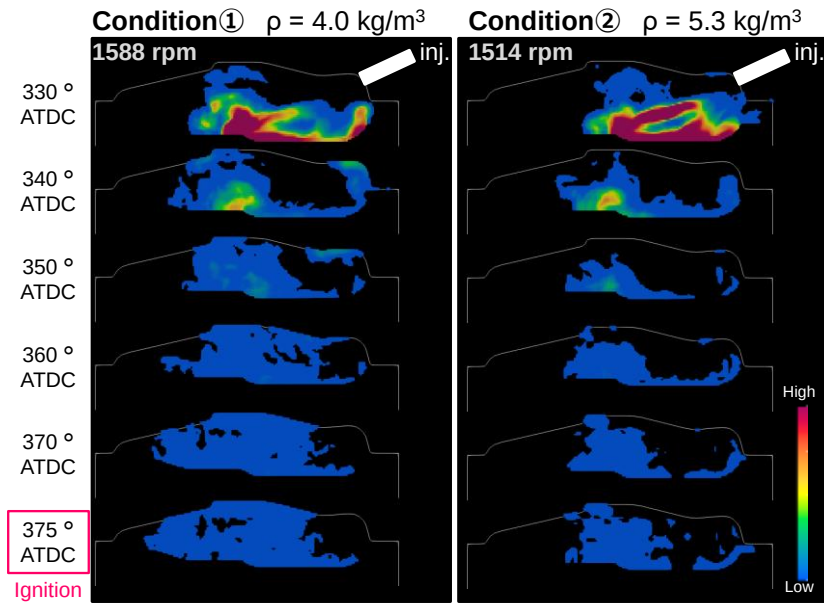


Fig. 14 Distribution of equivalence ratio at 2nd injection timing

計算した全 14 サイクルのプラグ近傍の当量比，速度ベクトルの絶対値の断面平均値，および水平方向とのなす角 ψ の断面平均値の時間変化を Fig. 15 に示す．図中の実線はサイクル平均値，エラーバーはサイクル間の変動幅を示す．サイクル平均値に着目すると，流速絶対値，ベクトルの向き ψ ともに条件①，②で大きな差異は見られないが，Fig. 16 に示す点火時期における変動係数においては，流速， ψ ともに，条件①よりも条件②が小さく，当量比の変動係数とは異なる傾向がみられる．すなわち，条件違いによる筒内流動の変動幅の差がプラグ近傍の当量比の変動に与える影響は小さいと考えられる．

以上より，本研究で対象としたサイクル変動の差の主要因は，サイクル毎のプラグ近傍当量比の変動差であると考えられ，点火後の火炎伝播に影響を及ぼす筒内流動の変動の影響は小さいと考えられる．

本研究では，吸排気および圧縮・点火直前までを計算対象としたが，点火・火炎伝播過程まで含めてシミュレーションを行うことで，実験では困難なサイクル間燃焼変動のさらなる現象解明とともに，その抑制手法をシミュレーションによって検討できる可能性が期待される．

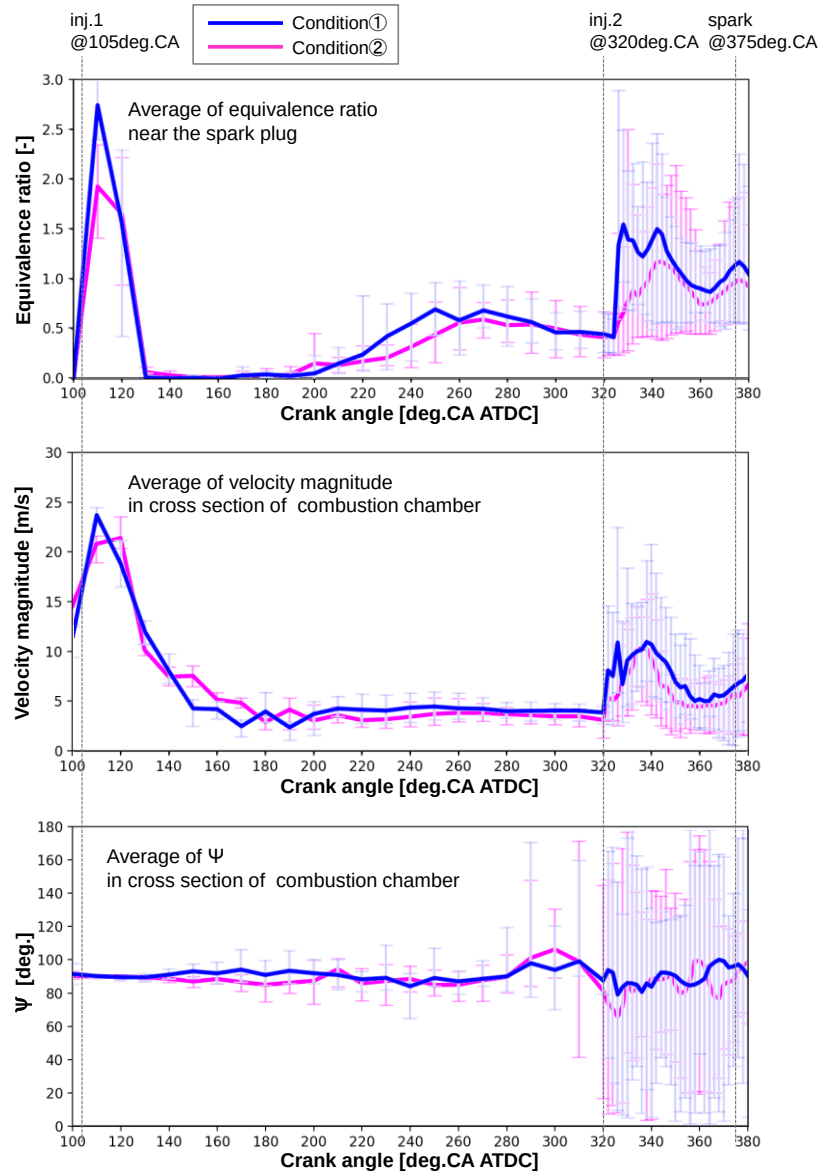


Fig. 15 Behavior of equivalence ratio, velocity magnitude and ψ in each cycles

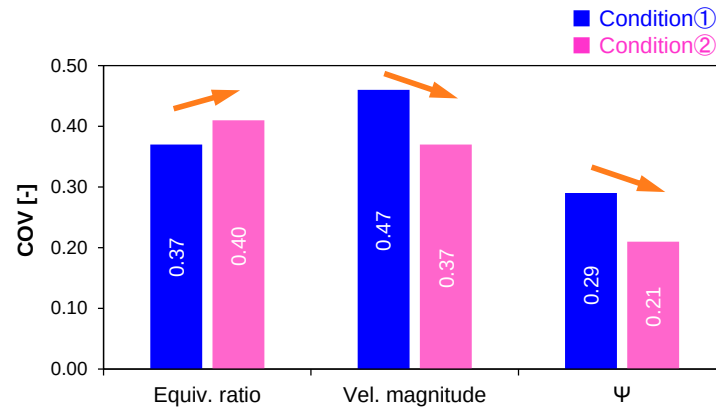


Fig. 16 Comparison of COV of equivalence ratio, velocity magnitude and ψ at spark timing (375 deg.CA ATDC)

4. まとめ

本研究では、ガソリンエンジンのサイクル間燃焼変動を対象に、等間隔直交格子と IB 法に基づいた圧縮性流体解析ソフトウェア HINOCA を用いて多サイクル計算を行い、火花点火時におけるプラグ近傍の当量比のサイクル間変動挙動とその変動因子を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) ペネトレーションなどの燃料噴霧の外観、および速度ベクトルの絶対値や向きなどの筒内流動に関して、使用した計算コード、設定で実験の傾向を概ね再現可能である。
- (2) HINOCA を用いた LES 解析により、サイクル間燃焼変動に影響を及ぼすと考えられるプラグ近傍の燃料濃度の変動挙動を再現可能である。
- (3) 運転条件違いによる筒内流動の変動は、点火プラグ近傍の燃料濃度変動の傾向とは一致せず、サイクル間燃焼変動の主要因は、サイクル毎のプラグ近傍の当量比の変動差であると考えられる。

謝 辞

本研究は自動車用内燃機関技術研究組合の委託事業の成果である。ここに関係各位への感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Joshi, A.: [Review of Vehicle Engine Efficiency and Emissions](#), SAE Int. J. Advances & Curr. Prac. in Mobility Vol.2, No.5, p.2479-2507, 2020-01-0352 (2020)
- 2) Grosch, A., Beushausen, V., Thiele, O., and Grzeszik, R.: [Crank Angle Resolved Determination of Fuel Concentration and Air/Fuel Ratio in a SI-Internal Combustion Engine Using a Modified Optical Spark Plug](#), SAE Technical Paper, 2007-01-0644 (2007)
- 3) Hanabusa, H., Kondo, T., Hashimoto, K., and Furutani, M.: Study on Cyclic Variations of Laminar Flame Speed in Homogeneous Lean charge Spark Ignition Combustion, SAE Technical Paper, 2016-01-2173 (2016)
- 4) Kranz, P., Fuhrmann, D., Goschütz, M., Kaiser, S. et al.: [In-Cylinder LIF Imaging, IR-Absorption Point Measurements, and a CFD Simulation to Evaluate Mixture Formation in a CNG-Fueled Engine](#), SAE Int. J. Engines, Vol.11, No.6, p.1221-1238, 2018-01-0633 (2018)
- 5) 溝渕 泰寛: [自動車エンジン燃焼解析ソフトウェア HINOCA \(火神\) の開発](#), 日本燃焼学会誌, Vol.58, No.186, p.191-196 (2016)
- 6) Nicoud, F. and Fucros, F.: [Subgrid-Scale Stress Modelling Based on the Square of the Velocity Gradient Tensor. Flow, Turbulence and Combustion](#), Vol.62, No.3, p. 183-200 (1999)
- 7) Patterson, M. A., and Reitz, R. D.: [Modeling the effects of Fuel Spray Characteristics on Diesel Engine Combustion and Emission](#), SAE Paper, 980131 (1998)
- 8) 中山 智裕, 石田 礼, 金子 誠, 森川 弘二: LIF を用いた直噴エンジンの混合気分布とサイクル変動の解析, 日本機械学会・自動車技術会内燃機関シンポジウム講演論文集, Vol.21, p.401-406 (2010).

【執筆者追記】(2022 年 3 月)

●最新の状況

本発表が、自動車技術会の「ENGINE REVIEW」で紹介されました。

[自動車技術会：レポート：第 32 回内燃機関シンポジウム —中島飛行機発祥の地でエンジンの原点を考えよう—, ENGINE REVIEW, Vol.12, No.1 \(2022\)](#)

環境計測用ドローンを用いた大気質計測

Air Quality Monitoring Using an Environmental Drone

早崎 将光^{*1}

Masamitsu HAYASAKI

Abstract

In this study, an environmental drone measurement system for monitoring the vertical profile of air pollutants and meteorological variables was created. In the cold season, we observed the formation of a near surface strong temperature inversion in all cases. In some of the cases, increases of PM_{2.5} and black carbon concentrations were observed in association with an early morning peak of commuting traffic. The presence of an upper-level temperature inversion may cause accumulation of air pollutants emitted from near the ground.

1. 序論

無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle: UAV），一般的にはドローンと呼称される飛行体は，近年の技術発展に伴う性能向上（機体・搭載カメラなどの両方）や機体販売価格の低下などにより，世界的に急速に普及しつつある．日本国内でも官邸・経産省・国交省などが主導し，物流・災害対応・医療・農林水産業・測量・監視（インフラ維持管理・警備業）など様々な業務でドローンの利活用を進めるべくロードマップ¹⁾を設定している．ロードマップで示されるドローンの利用計画を見ると，2022年度内にレベル4（有人地帯での目視外飛行）の飛行実現を目標としており，将来的には人口密度の高い都市域での運用をも視野に入れた利活用を想定している．

様々な分野でのドローン利活用が推進されている中，近年では大気環境科学分野にも利用されつつある．国外の研究例では，港湾部におけるオゾン（O₃）センサを搭載したドローン観測から，船舶排煙の一酸化窒素（NO）による船舶航路上空での明瞭なO₃消失が報告されている²⁾．また，複数の大気汚染物質計測用ドローンの自律飛行観測から，地域スケールの大気質指数を得る試みなども報告されている³⁾．日本国内においても，埼玉県における上空O₃観測^{4),5)}や淡路島でのPM_{2.5}・O₃計測などが実施されている⁶⁾．

大気汚染研究の歴史的背景を見ると，1960年代から70年代にかけての「公害問題」が顕在化した時代では，自動車や固定発生源（工場，発電所，燃焼施設等）を起源とする高濃度の大気汚染物質排出が主に問題視されていた．特に高濃度となる季節や対象物質としては，盛夏期のオゾン（O₃）や晩秋～初冬期の窒素酸化物（NO_x）や浮遊粒子状物質（Suspended Particulate Matter: SPM）などが挙げられる⁷⁾．大気環境改善のための排出規制の適用・強化が進展し，年平均濃度などで見れば大気汚染物質の濃度は大幅に低減したが，近年でも短時間の高濃度イベントはたびたび発生している^{8),9)}．従来研究で寒候期における短期の高濃度汚染の原因として挙げられているのが，地表付近の安定成層の形成，すなわち気温逆転層の形成である．気温逆転層では安定成層状態となるため鉛直方向の運動が生じにくく，地上近傍から排出された大気汚染物質の多くは逆転層内やその下層側に閉じ込められやすくなる．したがって，現代でも気温逆転層が形成されていると思われる場合に高濃度大気汚染イベントが発生する場合がある¹⁰⁾．

高濃度大気汚染の要因の一つである気温逆転層に関しては，実態把握のための観測的研究もおこなわれてきた．例えば，気象研究所（茨城県つくば市）に建設された気象観測鉄塔（高さ213 m）では，7高度（10, 25, 50, 100, 150, 200, 213 m）に気温・湿度・風向風速などのセンサを設置し，長期測定（1975–2009年）が実施されていた．観測開始初期段階での報告では，高度100 m程度までの気温逆転層の存在とその時間発展に関する事例も紹介されている¹¹⁾．ただし，同鉄塔は老朽化が著しかったこと，維持管理に多額の費用

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士（理学）

* 原稿受理 2020年10月10日

がかかること、新しい観測技術（ウィンドプロファイラなどのリモートセンシング技術）の導入で一部データは代替できたこと、など多くの理由が重なり、2011年6月に解体された。気象要素鉛直分布の直接観測は途絶えたが、鉛直観測の意義が失われたわけではない。実際に、ヒートアイランド関連研究¹²⁾や筑波山の斜面温暖帯研究¹³⁾などでも、気温逆転層の動態やその影響範囲に関する研究がおこなわれてきた。ただし、いずれも短期かつイベント的事象の研究であるうえに、大気汚染物質濃度の測定はない。

したがって、気象学・大気環境科学の両分野で気温逆転層という現象に対する学術的関心は近年でもあるものの、気象要素や大気汚染物質濃度の地上近傍（地上～高度 100 m 程度）における鉛直分布の観測資料が十分とは言えない。人間社会にとって身近な領域でありながら、既存の大気汚染常時監視測定局だけでは汚染物質動態の全容を把握しきれていない可能性がある。

ドローンの技術発展・普及に加え、小型かつ安価なセンサ類が開発・販売されていることから、本研究ではこれら汎用製品から気象要素・大気汚染物質濃度の鉛直分布を測定するドローンシステム（以下、「環境計測用ドローン」という）を構築し、現実大気での運用結果とその観測値の初期的な解析結果を報告する。

2. 測定方法

2.1 環境計測用ドローンの全体構成

環境計測用ドローンの構成概要図および実機の外観写真を Fig.1 に示す。ベースとなるドローン機体 (DJI 社製, Matrice 600 Pro) の上面にカーボン製のポール (φ 25 mm) を立て、ポール上端部に風向風速計を設置する。採気が必要な PM_{2.5}, 黒色炭素 (Black Carbon, BC と表記), O₃ などのセンサ類は, PM_{2.5} センサ本体・BC センサ採気部をそれぞれポール途中に取り付けた 2 つのシェルター内にそれぞれ設置した。これら採気部は, プロペラが発生させる気流の影響を出来る限り小さくするよう, プロペラ回転面よりも上方に取り付けた。気象要素計 (温度・湿度・気圧) も同様にポール途中のマウンタ上に固定した。気象要素計の測定部に対する太陽からの直達光の影響を小さくするために, 白色のプラスチック製プレートで測定部上面を覆った。

センサ関連部品をドローン上面に立てたポールに取り付けるため, 機体の重心が上方に遷移する。ドローンを安定飛行させるため, BC 計本体やデータ記録用小型パソコンなどの重量物を制御ボックスに格納して機体下部に面ファスナーを使って固定することで, 機体の重心を低くした。

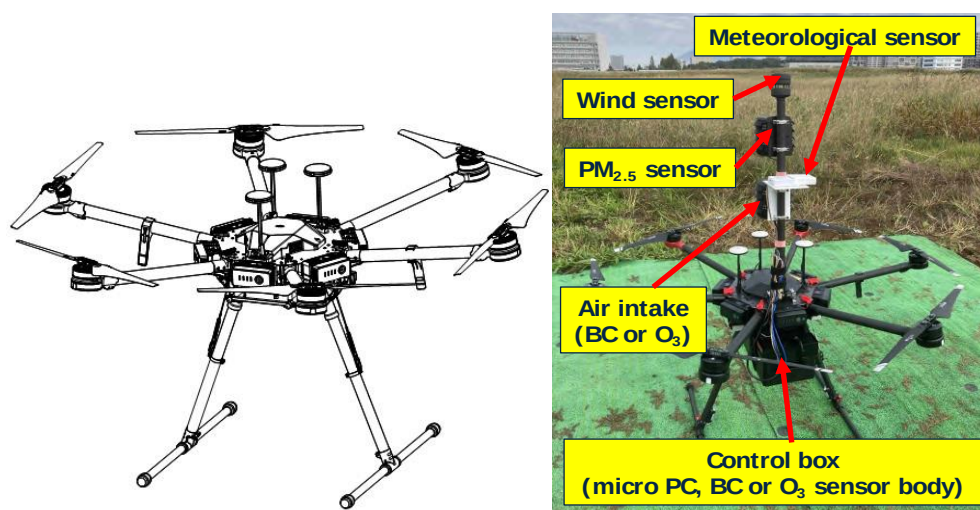


Fig. 1 (Left) External view of the drone (Referred from Matrice 600 Pro User's Manual), (Right) Photo of the JARI environmental drone.

2.2 PM_{2.5} 質量濃度計（神栄テクノロジー, PMS1, PMI1）

PM_{2.5} 計は、[神栄テクノロジー社](#)による PM_{2.5} センサキット PMS-EVM1 を選択した。PMS-EVM1 は、PM センサ部（PMS1）と通信用インタフェース（PMI1）の 2 製品で構成される。本製品の特徴は、PM センサ部分に通気用の小型ファンを持ち、一定流量の空気塊を吸引することである。本製品以外にも小型の PM_{2.5} センサはあるが、その多くは熱対流式であり、自然吸排気による計測である。本研究のようにドローンに搭載して計測する場合、自然吸排気方式だと機体の振動や風の強弱により吸引する空気塊の量にバラツキが生じる可能性がある。したがって、ファンにより一定量の空気塊を吸引する本製品の方が熱対流式のセンサよりも測定時の精度が担保されやすいと考えて導入した。

2.3 気温・湿度・気圧計（International Met Systems 社, iMet-XQ2）

環境計測用ドローンに搭載する気象要素計として、[International Met Systems 社](#)による [iMet-XQ2 UAV sensor](#)（以後 iMet-XQ2 と表記）を選択した。iMet-XQ2 は、UAV・ドローンへの搭載用として開発された気象要素計の第 2 世代機で、気温・気圧・湿度の 3 項目と GPS による位置・時刻情報を測定・記録する。これら気象要素の測定時間間隔は 1 秒で、気象要素の測定精度は気象庁を含む全世界の気象機関が使用する高層気象観測用ゾンデのセンサ部分とほぼ同等の仕様である。測定は内蔵バッテリーにより駆動し、満充電時には最大で連続 300 分（5 時間）の計測が可能である。データは内蔵メモリ（16 MB；15 時間分の観測値を記録可能）に保存され、USB ケーブル接続によりパソコンへのデータ転送が可能である。

2.4 風向風速計（FT Technologies 社, FT205）

風向風速計は、[FT Technologies 社](#)による FT205 を使用した。FT205 は UAV・ドローンに搭載するために開発された小型風向風速センサで、高さ 55 mm、質量 100 g と小型かつ軽量である。計測原理は音響共振法（Acu-Res[®] Technology）で、可動部分がないために過酷な環境でも計測することが可能である。

2.5 BC 計（AethLabs 社, microAeth MA200）

BC 計には、microAeth MA200（[AethLabs 社](#)、以後 MA200 と表記）を使用した。MA200 は、質量 420 g、外形寸法 L: 136.75 mm, W: 85 mm, D: 35.75 mm の軽量・小型センサである。容量 3200 mAh のリチウムイオンバッテリーおよび 16 GB のメモリを内蔵している。屋外活動時の個人曝露量計測などが想定用途として製造元が挙げていたが、小型かつ可搬性が高い測定器のため、ドローン搭載機器として採用した。

測定原理は、紫外線から赤外線までの 5 波長（375, 470, 528, 625, 880 nm）の透過光（減衰量）を計測する光吸収方式である。捕集部にはポリテトラフルオロエチレン（Polytetrafluoroethylene: PTFE）フィルタ（15 スポット；φ 3 mm）を用意し、捕集スポットへ前述の 5 波長の光を照射して、透過光の強度から光吸収性の炭素エアロゾルの質量濃度に換算している。測定時間間隔は 1 秒から 5 分間隔まで 6 種類から選択可能だが、極端な高濃度空気塊の計測（例：野焼き・山火事現場近傍での計測）でもない限り、出来るだけ長いインターバルでの測定を推奨している。なお、本製品には粒径カットオフがないため、測定された BC 濃度は粗大・微小の両方が含まれている。

2.6 オゾン計（2B Technologies 社, Personal Ozone Monitor）

ドローン搭載可能な小型オゾン計として、Personal Ozone Monitor（[2B Technologies 社](#)）を選択した。本製品は小型・軽量（バッテリー込みで質量 450 g）でバッテリー駆動による計測（カタログ値で稼働時間 5–8 時間；温度に依存）が可能である。本計測器は米国 EPA が定める精度基準を満たしており、小型ながら十分な測定精度が保証されている。測定方式は紫外線吸収式（光源：水銀ランプ、波長 254 nm）で、測定時間間隔も標準で 10 秒とドローン観測で利用可能なインターバルが設定可能である。BC 計と同様に、

ポール中間点付近に取り付けた採気部から計測大気を吸引する (Fig. 1 参照) . ホバリング飛行時の各高度での計測値は, PM_{2.5} センサ (最小時間間隔が 1 分) に合わせ, 1 分平均値 (10 秒値 6 個の平均) で評価した.

2.7 センサ制御部

搭載センサのうち, 内蔵メモリを持たない PM_{2.5} センサ及び風向風速計の計測値は, 通信ケーブルを介してデータロガーやパソコン上に記録する必要がある. 本研究では, 観測システム開発の時間短縮のために, 各センサメーカーが提供するアプリケーション類 (一部を除き Windows 10 用) を利用した. これらのアプリケーションを利用するプラットフォームとして, 小型ノートパソコン GPD MicroPC (製造販売: GPD テクノロジー社) を導入した. GPD MicroPC は産業用小型 PC の一種で, 通信機器接続 RS232C ポート, 有線 LAN ポートを持ち, USB (Type-A) ポートを 3 ポート装備するなど, 接続インタフェースが充実している. また, 搭載バッテリー (Li-Po, 2×3100 mAh) で 6–8 時間程度駆動でき, ドローン観測飛行時にも十分な持続時間がある. 同小型 PC の USB ポートから風向風速計・PM_{2.5} 通信用インタフェース (FT205 および PMI1) への電力供給もおこなえるため, センサ類駆動用バッテリーを別途用意する必要が無く, 搭載物の重量軽減にも貢献している.

3. 大気環境計測

3.1 計測手順

大気汚染物質濃度をドローンで計測する手法は, 実施可能になってからの歴史が短く, 測定対象・搭載センサも研究ごとに異なるため, 現時点では公式の手順はない. 本研究では, (1) 想定される気温逆転層を検出するためのデータの種類・数, (2) 大気汚染物質濃度測定装置の計測時間間隔, (3) 利用するドローンの飛行可能時間, (4) 飛行高度の制約, などを総合的に考慮し, 観測飛行手順を構築した.

先行研究で検出された気温逆転層は, その厚さが 100 m 未満から数百 m 規模までである^{11), 12), 13)}. ドローンの飛行高度の制約 (上限 150 m) がある中で, 気温逆転層やそれに伴う大気汚染物質濃度の鉛直プロファイルを測定するため, 上限高度以下の複数高度で測定値が必要となる.

風向風速計および気象要素センサは応答時間が短く, 1 秒間隔でのデータ取得でも十分な精度がある. また, 気温逆転層の存在高度を検討する場合にも, 高時間分解能の測定値があれば鉛直移動時の測定値を使うことでその高度を類推できる可能性がある. このため, 本研究では気象要素に関する 2 つのセンサについては, 最短時間間隔の 1 秒で計測する. PM_{2.5} および BC 濃度は, PM_{2.5} 計の計測時間間隔が最短で 1 分なので, BC 濃度の計測時間間隔もそれに合わせて 1 分とする. 短い時間間隔での計測はバラツキが大きいいため, 計測値の信頼性向上のためには 1 高度あたりの計測数が複数あるのが望ましい. ただし, ドローンの飛行可能時間 (最大搭載容量で約 20 分) と観測上端高度 (150 m) の双方を考慮し, 同一高度での計測数は 2 回 (2 分間ホバリング) とした.

上記条件から定めた観測飛行手順だと, 下記のように離陸から着陸まで約 18 分の飛行時間となる:

離陸 (58 分頃)

第 1 高度 (30 m) 到達 (00 分), ホバリング計測 (00–01 分, 01–02 分; 2 サンプル)

第 2 高度 (60 m) 到達 (03 分), ホバリング計測 (03–04 分, 04–05 分; 2 サンプル)

第 3 高度 (90 m) 到達 (06 分), ホバリング計測 (06–07 分, 07–08 分; 2 サンプル)

第 4 高度 (120 m) 到達 (09 分), ホバリング計測 (09–10 分, 10–11 分; 2 サンプル)

第 5 高度 (150 m) 到達 (12 分), ホバリング計測 (12–13 分, 13–14 分; 2 サンプル)

第 5 高度を離脱 (14 分以後), 離着陸ポイントまで下降し着陸 (16 分頃)

現在使用している環境計測用ドローンの機体性能では, 計測終了時のバッテリー残量は 30% から 40% 程度である. 暖候期かつ弱風・静穏時ならば比較的余裕のある飛行プランだが, 寒冷時や強風時にはバッテリ

一消耗が大きくなるため、同一の観測飛行手順でもバッテリー残量が残る僅か（JARI ドローン観測チームでは、飛行時の条件次第だが、残量 15 から 20%を観測中断・即時帰還の目安に設定）となることもある。現時点では、季節等の条件にかかわらず同一測定条件で運用することを優先した。

観測対象とする時間帯は、研究面の重要事項（気温逆転層が形成されやすい寒候期の日の出前、人為起源汚染物質排出源の一つである自動車交通のピーク時間帯を含める、など）を優先としつつ、観測従事者の勤務事情なども含めて総合的に考慮し、4 時～9 時の毎正時（計 6 フライト）とした。

3.2 計測場所

観測飛行時には、ドローンの離着陸準備等の作業場所として、一般財団法人日本自動車研究所（以下、「JARI」という）ロボット試験センター北側の空き地（以後 D29 と表記）を使用した（Fig.2）。D29 は、東西・南北それぞれ約 300 m あまりのオープンスペースで、表面は草地である（年 2-3 回の除草を実施）。D29 の敷地境界部には柵が設けられてあるため、関係者以外が立ち入る可能性は低い。D29 の南端部にドローン観測のための地上ステーションを設置し、隣接するロボット試験センター建屋から電工ドラム経由で電源を引いた。同ステーションでは観測飛行前後の機体・センサ類のメンテナンスや観測データ回収等の作業おこなう。

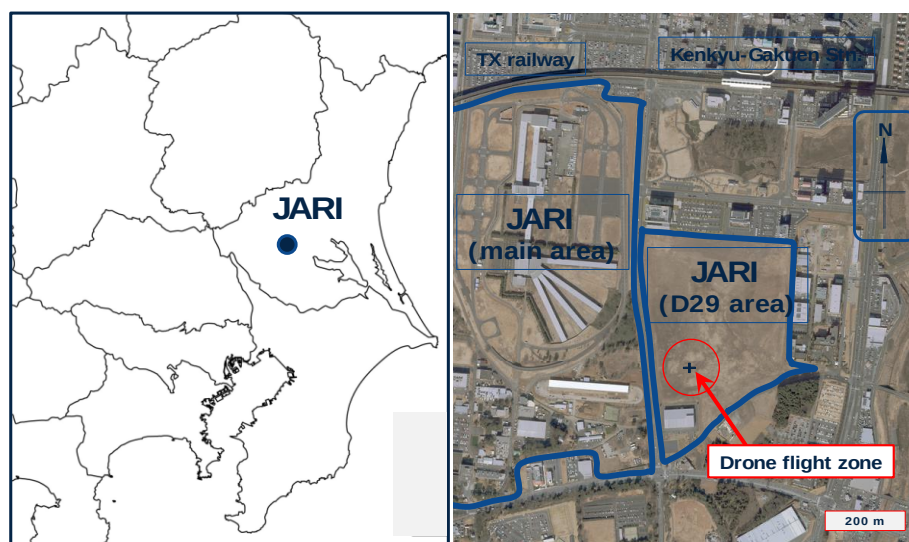


Fig.2 Map of the observation site (Tsukuba, Ibaraki, Japan).

4. ドローン観測結果

序論で言及したように、ドローンによる気象要素・大気汚染物質濃度の観測では、気温逆転層の形成条件下で大気汚染物質の鉛直濃度差の有無を確認する事を主なターゲットとしている。本研究で 2019-2020 年度に実施したドローン観測日および観測項目を Table 1 に示す。初回の観測である事例 1（2019 年 11 月 20-21 日）では、夜間観測に関する準備や JARI ドローン観測チーム（操縦士：2 名、データ回収・周辺監視者：2 名で構成）の操縦訓練が不足していたことなどを考慮し、外部業者の操縦士にドローン操縦を委託した。事例 2 以後では JARI ドローン観測チームのみで観測を実施した。一部の事例で欠測や機体不調などによる観測飛行の中断もあったが、主な測定対象である気象要素および $PM_{2.5}$ 濃度はほとんどの飛行観測で取得できた。以後の節では、気温逆転層や汚染物質濃度の鉛直分布に関して興味深い特徴が見られた事例に注目し、それらの特徴を記載する。

Table 1 List of dates and monitoring items of the drone observations.

No.	date	Meteorol. (T, RH, wind)	PM _{2.5}	BC	O ₃	#flights	Sunrise time	memo
1	2019-11-20 to 2019-11-21	○	○	○	-	15	06:21	Start from 15JST, end at 09JST (Flight hours: 15-23, 01, 04-09 JST)
2	2020-08-04	○	○	-	○	3		Daytime (10, 12, 14JST)
3	2020-09-17	○*1	○	-	NA	3		Daytime (10, 12, 14JST), O ₃ data missing
4	2020-10-27	○	○	○	-	6	05:56	Morning (04 – 09JST)
5	2020-12-01	○	○	○*2	-	6	06:30	Morning (04 – 09JST)
6	2021-01-20	○	○*3	○	-	4	06:47	Morning (04 – 07JST)
7	2021-03-16	○	○	-	NA	6	05:48	Morning (04 – 09JST), O ₃ data missing

*1: 10JST missing, *2: wrong data acquisition interval (five minute), *3: 05JST PM_{2.5} missing

4.1 暖候期 (昼間) の O₃ 観測例

2020 年 8 月 4 日および 9 月 17 日の昼間に、O₃ 計を搭載して日中の観測をおこなった (事例 2, 3) . 事例 2 の観測は JARI ドローン観測チームとしての初運用日であったため、観測飛行からデータ回収など全体の運用手順確認を中心に実施した. 当初計画した飛行観測プラン (高度 30 m 間隔で 2 分ホバリング、飛行時間 : 約 18 分) のバッテリー残量は、カタログ値や搭載重量などをベースにした推計であった. 実運用時のバッテリー残量に余裕を持たせるために、事例 2, 3 の観測では高度 50 m ごとのホバリング飛行 (3 高度、各高度 2 分ホバリング、飛行時間 : 約 12 分) とした. 事例 2, 3 実施日の天気図を Fig. 3 に示す. 事例 2 (8 月 4 日) は、北日本を除き太平洋高気圧に覆われて晴天となり、つくば (館野) では最高気温 33.4 °C を記録した. 同観測では気象要素の測定を連続で行っているため、飛行観測時だけでなく地上待機時の測定値も記録している. 一方、事例 3 (9 月 17 日) は停滞前線が日本列島上にかかり曇りがちな天候となったが、南寄りの風の中で晴れ間もあったため、最高気温は 29.1 °C まで上昇した.

観測日全体の測定値時系列を Fig. 4 に示す. 8 月 4 日の観測では、初回飛行 (10 時) 以後、地上では 30 °C 以上の高温が継続しているが、高度 150 m では約 28 °C (10 時) , 29 °C (12 時) , 31 °C (14 時) で、地上での平均気温 (ドローンのプロペラ起動前、地上据え置き時の平均) に比べ約 4–5 度程度低い. 鉛直方向の気温減率は、静力学平衡から導出される乾燥断熱減率 (1.0 °C/100 m) より大きい. これは日射により加熱された地表面の直接影響で、地表面近傍で高温となっているためである. どの時間帯・高度でも湿度は 60%未満であり、高湿度による吸湿性エアロゾルの質量増加 (PM_{2.5} 濃度上昇) の影響は小さいと考えられる.

また、8 月 4 日の PM_{2.5} と O₃ の高度分布を見ると、PM_{2.5} 濃度は鉛直方向にほぼ一様濃度だが、O₃ 濃度は地表面近傍で低く上空で高い (Fig. 5) . PM_{2.5} 濃度が鉛直方向にほぼ一様なのは、地表面加熱に伴う鉛直対流が活発であることの反映と考えられる. 一方、O₃ の鉛直濃度は、12 時のフライトだと地上で 65.0 ppb, 150 m で 75.6 ppb (いずれも 2 分平均) と約 10 ppb 程度の濃度差がある (Fig. 5) . 前駆物質の測定値がないため推測となるが、地上で O₃ が低濃度となる要因として一酸化窒素 (NO) による消失反応の影響が考えられる. 測定場所 (D29) 近辺には NO の大規模発生源施設はなく、観測場所の近隣道路の自動車由来が多いと推測される.

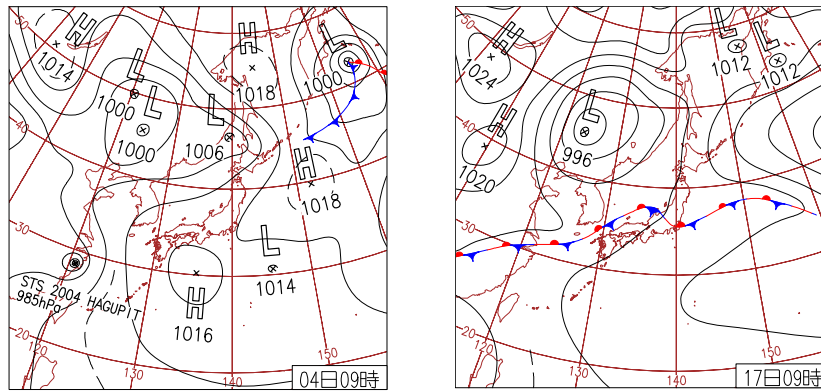


Fig. 3 Weather chart of the observation period. Left: 4 August, right: 17 September 2020 (Referred from the Japan Meteorological Agency).

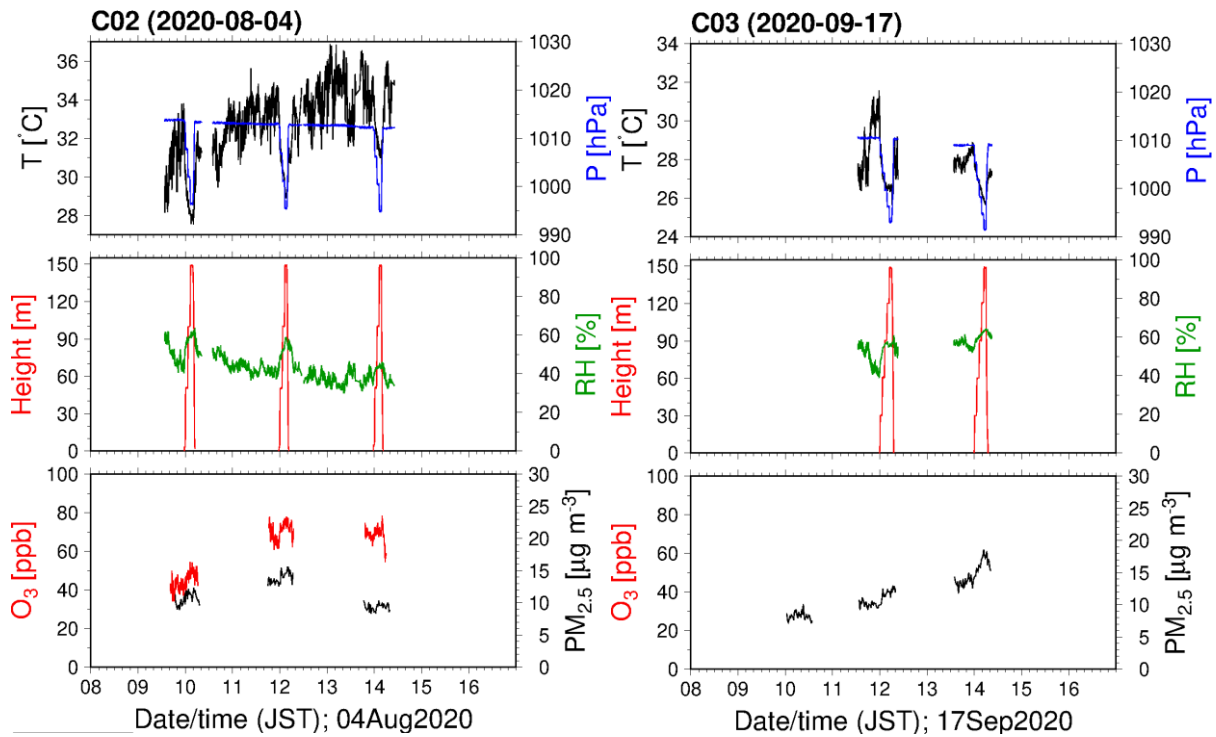


Fig. 4 Time series of meteorological variables (temperature, atmospheric pressure, relative humidity) and concentration of ozone (O_3) and $PM_{2.5}$. (Left) 4 August and (right) 17 September 2020.

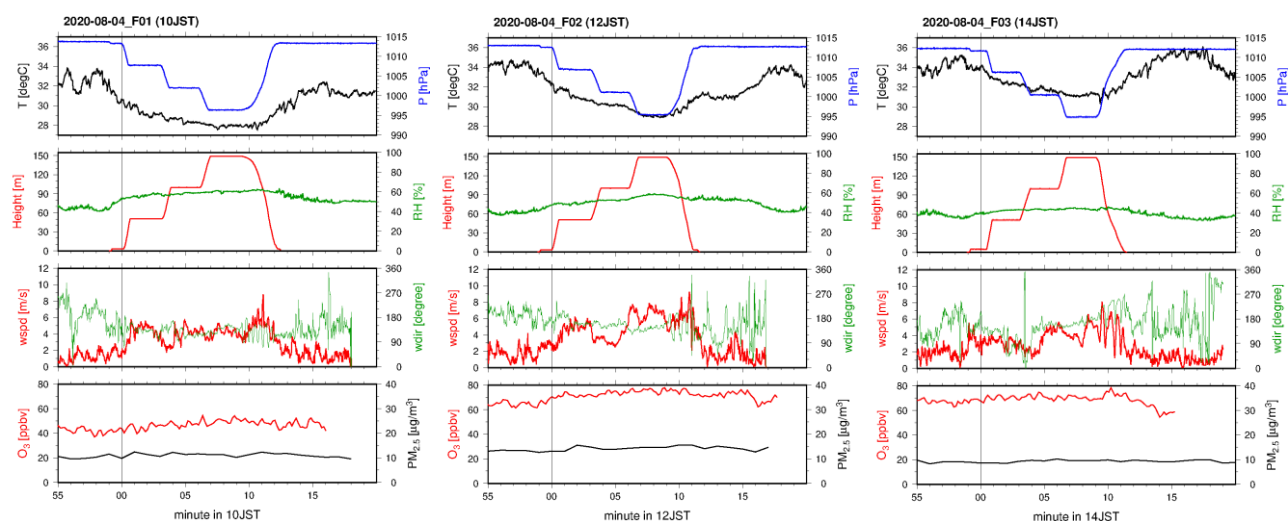


Fig. 5 Time series of meteorological variables and air pollutant concentration in an individual flight (Case 2, 4 August 2020).

4.2 寒候期のPM_{2.5}及びBC濃度観測

寒候期の気温逆転層の形成時を狙った観測は、計5回実施した (Table1, 事例1, 4, 5, 6, 7)。このうち、事例1 (Case 1, 以後 C01と表記) と事例4 (C04) で顕著な気温逆転層の形成と大気汚染物質濃度上昇が見られたため、本報告ではそれら観測事例の気象条件および大気汚染物質動態について詳細記述をおこなう。

4.2.1 気象概況・広域大気汚染状況

事例1, 4の天気図をFig. 6に、地上における大気汚染物質および気象要素の時系列をFig. 7に示す。事例1では、観測前日 (11月19日) に低気圧通過に伴う降雨があり、その後は南寄りの風で最高気温は20℃を上回った。その後、冬型の気圧配置が強まって北～北西風が強まり、観測1日目 (11月20日) の午前中には10分平均風速で5 m/s以上、最大瞬間風速では10 m/sを上回る強風となった。1日目14時過ぎから北西風は急速に弱まり、第1回観測をおこなった15時には、10分平均風速で3 m/s程度となった。1日目は12時頃に最高気温 (約15℃) を記録後、気温が急速に低下していった。このような気象条件の変化は、オホーツク海にあった低気圧の東方への移動と引き続く大陸からの高気圧の張り出しによって冬型の気圧配置が緩んだことを反映している。

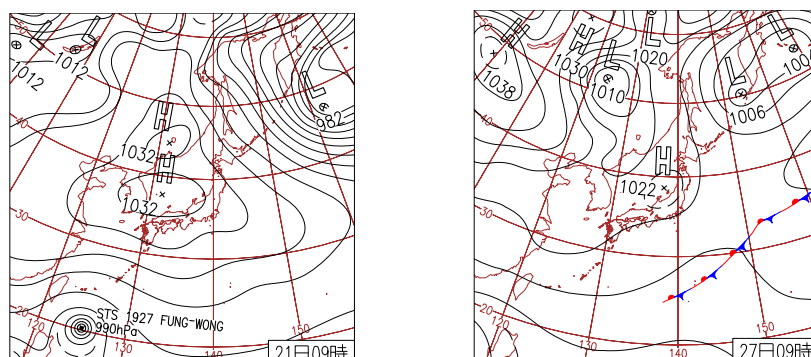


Fig. 6 Weather chart of observation period (21 November 2019 and 27 October 2020; referred from the Japan Meteorological Agency)

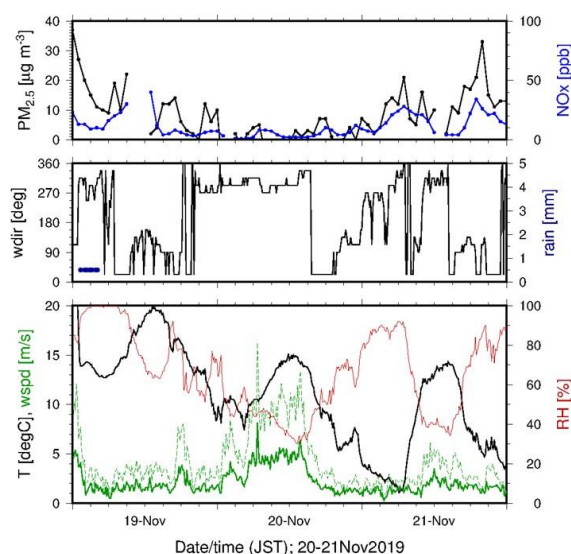


Fig. 7 Time series of air pollutant concentration in Shimotsuma, Ibaraki (upper panel) and meteorological variables in Tsukuba, Ibaraki (middle and lower panel) during 19-21 November 2019.

4. 2. 2 観測全体概要 (事例 1, 4)

事例 1, 4 の観測期間全体のドローン測定結果を Fig. 8 に示す. 事例 1 では 1 日目 (11 月 20 日) 午後から 2 日目 (同月 21 日) にかけての高気圧の張り出しを反映し, 地上気圧 (上段青線) は時間と共に上昇傾向にある. 地上気温は 2 日目の日の出 (6:21, Table 1 参照) の直前で最低気温 (1.4 °C) となった. 観測地点から約 5 km 離れたつくば (館野) の AMeDAS 観測値とほぼ同じ最低気温であり, ある程度の空間規模をもった気温低下であったと言える. Fig. 8 左で示すように, 事例 1 の大気汚染物質濃度は, 観測開始時点で PM_{2.5}・BC 濃度共に極めて低い (それぞれ 1–2 µg/m³ 程度および 0–200 ng/m³ 程度). 前項でも示したように, 事例 1 の観測前日 (11 月 19 日) の午前に降水があり, 引き続いて北寄りの強風となったことから, 大気中エアロゾルが湿性沈着で除去され, さらにエアロゾルがほとんど含まれない清浄気塊の移流が継続したことで PM_{2.5} および BC が低濃度となったと考えられる. 1 日目 (11 月 20 日) の 20–21 時頃に PM_{2.5} および BC 濃度は小さな極大値を取るが, その後は大きな濃度変動もなく, 夜間～明け方にかけては 3–6 µg/m³ 程度 (PM_{2.5}) および 300–700 ng/m³ 程度 (BC) と低い濃度レベルで推移した.

明け方頃からは緩やかな濃度上昇がみられ, 2 日目の 8 時頃 (事例 1 の 14 回目の観測飛行. 以後 C01F14 と表記) に地上での濃度最大値を記録した. PM_{2.5} および BC 濃度の最大時 (8 時, C01F14) には, それぞれ 15 µg/m³ および 1700 ng/m³ と, 観測飛行 1 回目 (C01F01) と比べ 10 倍以上, 日の出直前の 5 時, 6 時 (それぞれ C01F11, C01F12) と比べても約 3 倍の濃度となった. 気温逆転層は 2 日目 1 時から存在が確認できており, 少なくとも 2 日目 6 時までは地上で最低気温となる『接地型』の気温逆転層が見られた.

事例 4 は午前 4 時の第 1 回飛行観測時 (C04F01) から気温逆転層が存在しているため, 逆転層の形成時間帯は不明である. しかし, 事例 1 と同様に, 気温逆転層の存在下でも大気汚染物質濃度が急激に上昇するわけではない. 汚染物質濃度の極大は, 事例 1 と同様に 7–8 時 (C04F04, C04F05) であった. 以後の節で, 注目すべき個別時刻での鉛直分布観測についての詳細を解説する.

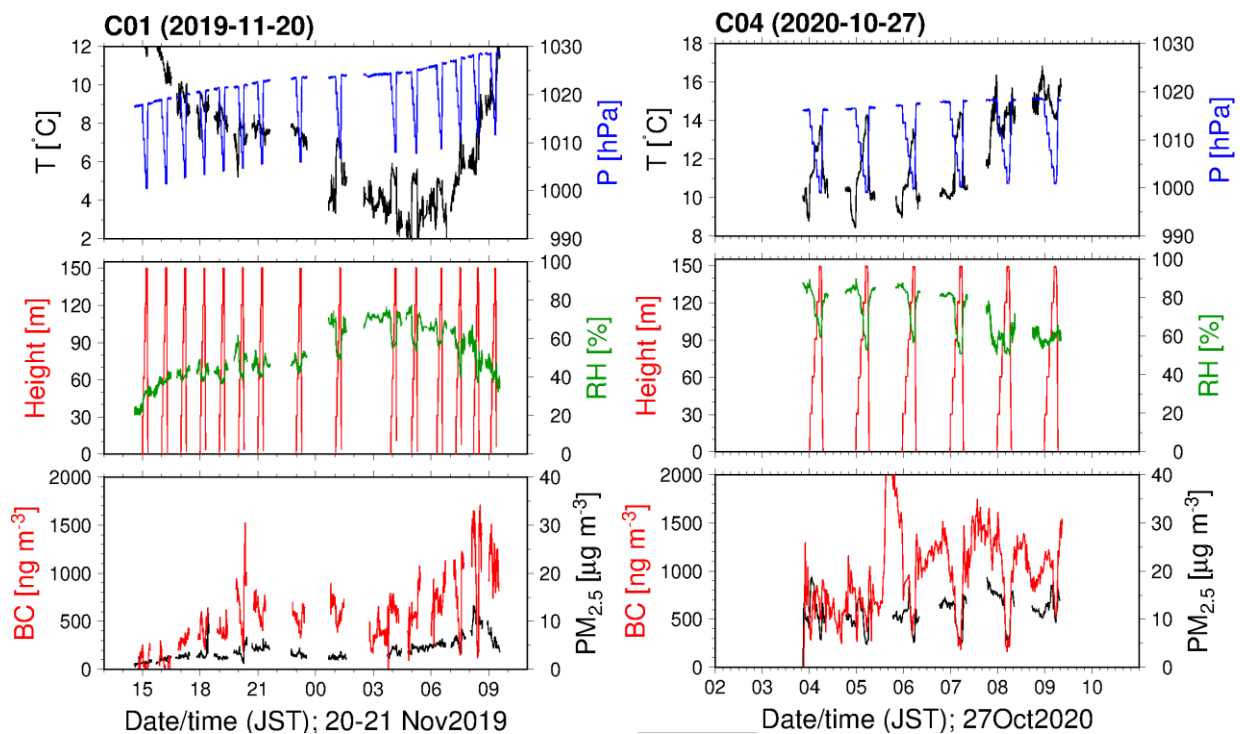


Fig. 8 Time series of meteorological variables and air pollutant concentration of Case 1 (left, 20-21 November 2019) and Case 4 (right, 27 October 2020).

Upper panel: temperature (black; unit: °C) and pressure (blue; unit: hPa),

middle panel: height above ground (red; unit: meters) and relative humidity (green; unit: %),

lower panel: black carbon (red; unit: ng/m^3) and $\text{PM}_{2.5}$ (black; unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

4.3 事例ごとの気象要素・大気汚染物質の鉛直分布

4.3.1 事例1の場合

個別フライト観測時の鉛直分布を示すため、各フライトでの測定値の時系列を Fig. 9 に示す。フライト 1 回目 (C01F01, 2019 年 11 月 20 日 15 時, Fig. 9 左) は、前日から続いていた北寄りの強風が弱まってきた時間帯で、地上付近の気温は $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度と温暖であった。ドローンの観測高度の上昇に伴い気温は低下しており、高度 150 m では平均 $11.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ であった。高度差 150 m で気温差が約 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、鉛直気温減率になおすと $-1.67\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ であり、乾燥大気の気温減率 ($-1.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) よりも気温低下幅が大きい。これは、日射による地表面加熱とそれに伴う熱対流で地表付近の温度が高いことを反映していると考えられる。前節でも示したように、大気中のエアロゾル量は極めて低濃度で、 $\text{PM}_{2.5}$ および BC 濃度はほぼゼロに近い。

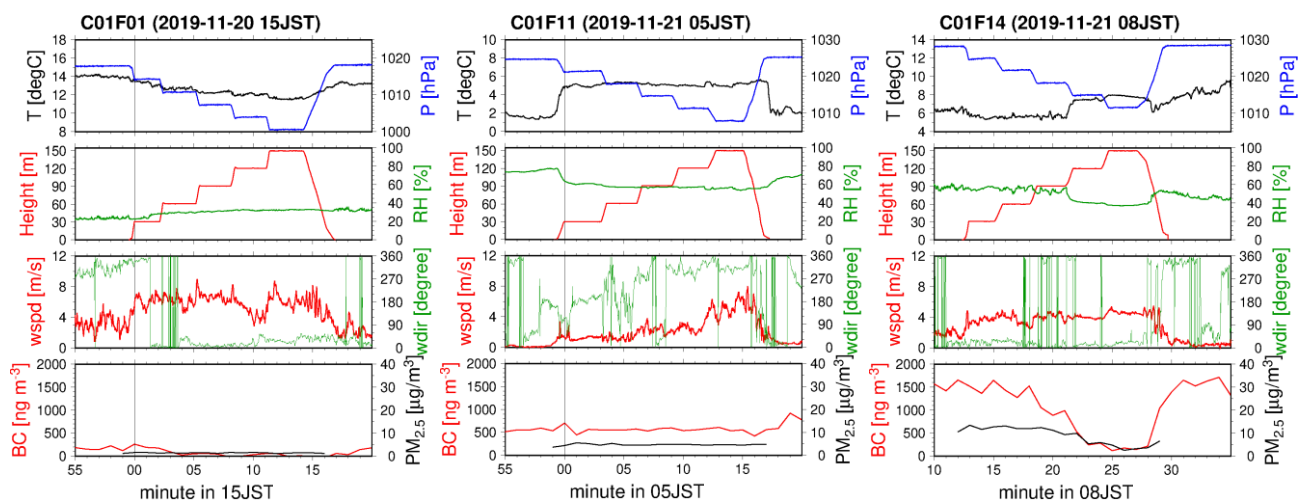


Fig. 9 Time series of meteorological variables and air pollutant concentration of individual flight flights in Case 1 (20-21 November 2019). Left: 15JST 20 November, center: 05JST, and right: 08JST 21 November.

観測飛行 11 回目 (C01F11, 11 月 21 日 05 時, Fig. 9 中央) では, 特徴的な温度分布を示した. 平均地上気温は 1.5 °C だが, 高度 30 m の平均気温は 5.0 °C と, 高度差 30 m で 3.5 度高い. 高度 30 m 以上は 5 °C 前後 (各高度でのホバリング時の 1 分平均値: 4.9-5.3 °C) でほぼ一定気温であることから, 事例 1 では地上と高度 30 m との間で気温逆転層を形成していたと言える. この時, 湿度や PM_{2.5}, BC の濃度も高度 150 m 以下ではほぼ一様であることから, 5 時 (C01F11) の高度 30-150 m の空気塊は, 気温・湿度に加えエアロゾル濃度に関してもほぼ均質な大気状態であったと言える.

観測飛行 14 回目 (C01F14, 11 月 21 日 08 時) では, 気温及びエアロゾル濃度の両方に関して, 非常に特徴的な鉛直分布が見られた (Fig. 9 右). 地上では平均 6 °C で高度 30-90 m でもほぼ同程度 (5.5-5.7 °C) である. 日の出 (6:21) 後の地表面加熱により, 地表付近で昇温し熱対流による気塊の鉛直拡散が高度 90 m まで及んでいると推測される. それより上層, 高度 90 m と 120 m の間で, 再び気温逆転が生じている. C01F11 の地上-高度 30m 間ほどの気温差はないが, 高度 120 m の平均気温は 7.5 °C であり, 高度 30-90 m と比べ約 2 度の気温逆転となっていた. PM_{2.5} や BC 濃度は, 90 m より下層で高く, 5 時の濃度の約 3 倍程度になっていたが, 120 m 以上では 5 時と同程度の低濃度であった.

4.3.2 事例 4 の場合

事例 4 でも, 5 時のフライト (C04F02, Fig. 10 左) 時点で気温逆転層が形成されていた. 鉛直気温差は地上と高度 30 m 間で最も大きく, 地上気温が平均 8.8 °C に対し, 高度 30 m では 11.0 °C であった. 事例 4 の場合は, 事例 1 とは異なり高度 30 m より上層でも高度上昇に伴い気温が上昇していた. 高度 150 m では平均 14.2 °C となり, 地上との気温差は 5.4 °C に達した. 日の出 (5:56) 以後, 地上気温は次第に上昇し, 8 時 (C04F05) の地上気温は 15.6 °C であった. 高度 30-90 m の気温は地上より低く, 13.5 °C 前後でほぼ一定 (13.2-13.6 °C) だった. PM_{2.5} 濃度は, 地上から高度 90 m までほぼ一定であることから, 事例 4 の 8 時 (日の出から約 2 時間) における鉛直混合のおよぼ高さは, およそ 90 m 程度と推測される.

高度 90 m と 120 m との間には, 事例 1 でも見られたように気温逆転が存在する. 高度 90 m までは平均 13.5 °C だが, 高度 120, 150 m では 14.4 °C と, 約 1 °C の気温差となっている. PM_{2.5} および BC 濃度も, 高度 90 m 以下と 120 m 以上とで鉛直濃度差があり, 高度 120 m 以上での PM_{2.5} 濃度は 90 m 以下のそれと比べ半分以下である.

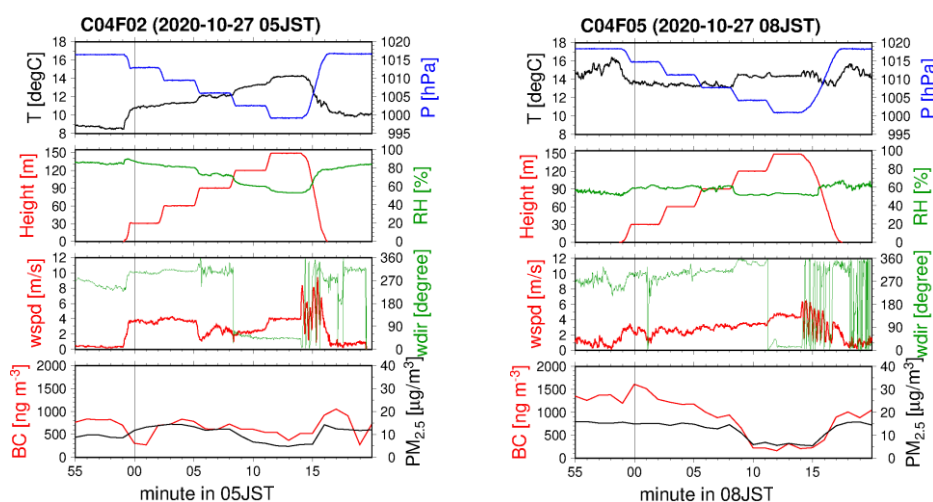


Fig. 10 Time series of meteorological variables and air pollutant concentration of individual flight flights in Case 4 (27 October 2020). Left: 05JST, right: 08JST.

4.4 事例 1,4 以外の寒候期ドローン観測事例の鉛直分布

前節までに挙げた事例 1, 4 以外でも、全ての寒候期夜間～早朝観測事例において、早朝に気温逆転層が形成されていた (Fig. 11) . 気温逆転の強さ (ここでは気温差で評価) や鉛直規模 (気温逆転が見られる高度) は事例により異なるものの、全ての事例で 5 時に最大の気温逆転となっていた. ただし、大気汚染物質濃度は全ての事例で高濃度となるわけではなかった. 低濃度が持続する場合もあれば近隣の常時監視局での汚染物質濃度などと比べても高すぎる場合などもあった. 気温逆転層の形成だけでなく、観測対象日の前日からの大気汚染状況や降水・強風などの履歴、観測時間帯での湿度影響、さらに自動車以外の周辺からの排出状況 (野焼きなどの有無) など、想定される要因を詳細検討する必要があると考えられる.

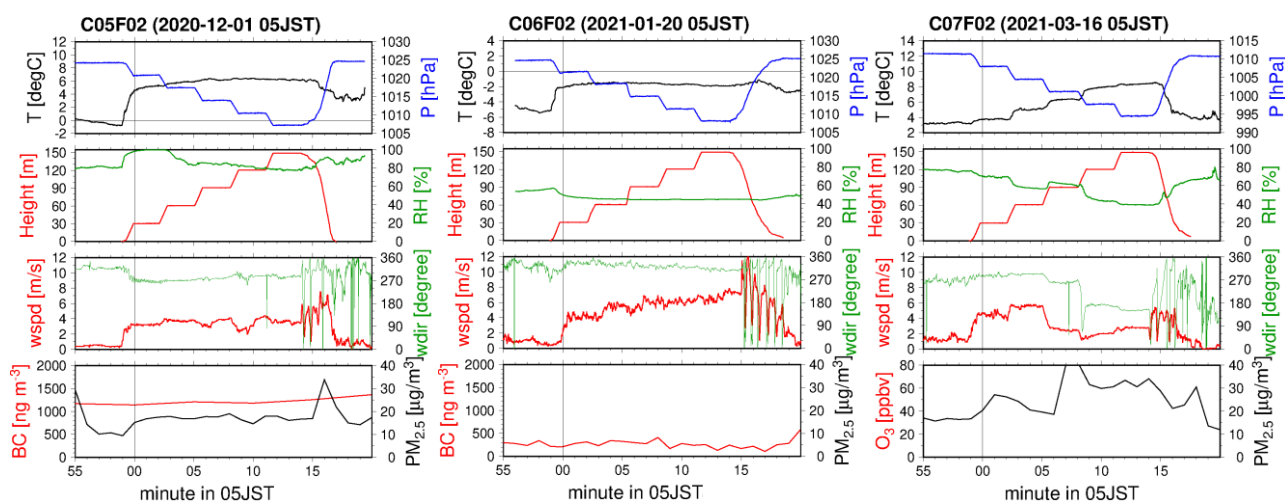


Fig. 11 Time series of meteorological variables and air pollutant of 05JST flight concentration of the 05JST flights in Case 5 (1 December 2020), Case 6 (20 January 2021), and Case 7 (16 March 2021).

5. まとめ

ドローンに小型センサを搭載した大気環境計測システム (環境計測用ドローン) を導入し、観測手順の作成から現実大気の観測などを実施し、ドローンによる大気汚染物質鉛直濃度分布の観測態勢を構築した. 現

在使用しているドローンの最大搭載可能重量は 5 kg 程度のため、搭載可能なセンサは小型かつ軽量のものに限られる。制約は大きいながらも、基本的な気象要素（気温・湿度・風向風速）と $\text{PM}_{2.5}$ ・BC・ O_3 濃度の測定装置をドローンに搭載し、気温逆転層の形成とそれに伴う大気汚染物質濃度の鉛直濃度分布を観測した。一部事例では、通勤時間帯（8 時）で上空に気温逆転が見られ、気温逆転層より下層側で $\text{PM}_{2.5}$ ・BC 濃度が高く、それより上層側では低濃度であった（事例 1, 4）。気温逆転層は安定度が大きく、対流活動が抑制される。このような気象条件では、地上付近から排出された大気汚染物質は上空の気温逆転層により「フタ」をされた形となるため、気温逆転層より下層側で濃度上昇したと推測される。現代では自動車を含め様々な排出源からの大気汚染物質の排出規制が進展しているため、排出総量は「公害問題」が取り上げられていた時代と比べ大きく減少している。しかし、本研究で示したように、時間帯・気象条件によっては排出物が地上付近で蓄積し、短期的な濃度上昇が発生しうると考えられる。

本研究で得た気温逆転層と大気汚染物質動態のうち、鉛直スケールに関する知見は、今後の化学反応モデルの性能向上に貢献できる可能性がある。化学反応モデルとは、気象条件・汚染物質排出などを入力データとして与え、化学反応過程（例：光化学 O_3 生成、各種の二次粒子生成など）を計算する数値モデルの一種である。観測された気温逆転の高度スケールを現状の化学反応モデルの鉛直層の配置・層数などと比較すると、化学反応モデル側の鉛直解像度は必ずしも十分とは言えず、モデル内で再現できない可能性がある。今後の化学反応モデルによる大気汚染物質濃度推計の再現性を向上するためには、地上付近の気温逆転層の再現性向上が一つの解決策になる可能性がある。

大気環境基準に $\text{PM}_{2.5}$ が導入された直後は大気環境基準の達成率も低かったが、近年では $\text{PM}_{2.5}$ 濃度も低下し、直近の大気汚染状況報告ではほぼ全国で環境基準を達成している¹⁴⁾。一方で、光化学オキシダント (Ox ；現在主流の測定原理では、 O_3 とみなせる) は、現代でも環境基準達成率がほぼゼロである。日本における光化学 Ox 環境基準が諸外国と比べ特殊との指摘もあるが、たとえ諸外国と同じ評価手法を適用した場合でも、環境基準達成率は低水準である¹⁵⁾。 O_3 は発生源から直接排出される（一次排出）のではなく、 NOx や揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds) などの前駆物質の光化学反応により大気中で生成する二次汚染物質である。効果的な Ox (O_3) 低減対策を立てるためには、前駆物質を含め O_3 生成に関わる物質全体の排出量・濃度把握が必要である。ドローンによる大気汚染物質濃度の観測は、本研究で示したような気象条件に起因する濃度変動を捉えることができるため、現在の観測網では把握しきれていない、現実の大気中での汚染物質の総量把握に繋がる可能性がある。現状ではドローンを用いた観測場所に制約がある（例：操縦者の有視界内での飛行）が、将来的により高いレベルでの飛行（操縦者の視界外の飛行や自律飛行）が可能となれば、地上での観測が乏しい場所に機材を持ち込むなど機動的な運用により観測データの情報不足を補う働きを期待できる。

参考文献

- 1) 首相官邸 小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会：第16回「空の産業革命に向けたロードマップ2021」,
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/kanminkyougai_dai16/siryou4.pdf (2021.9.10)
- 2) Gronoff et al.: [A method for quantifying near range point source induced O3 titration events using Co-located Lidar and Pandora measurements](#), Atmospheric Environment, Vol. 204, p.43-52 (2019)
- 3) Rohi et al.: [Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones](#), Heliyon, Vol. 6, (2020)
- 4) 埼玉県環境科学国際センター： [ドローンを活用した光化学スモッグ調査（第2弾） 全国初！深夜から翌朝の、未知の時間帯を解明](#), 報道発表資料（2019年7月19日）（2021.10.3）
- 5) 米持真一ほか：ドローンを活用した首都圏郊外上空の汚染物質計測，第62回大気環境学会年会要旨集（3A1055），(2021)
- 6) 神戸新聞： [ドローンで大気汚染監視 淡路で模擬飛行 神大，新明和など](#)，2020年12月2日掲載（2021.10.3）
- 7) Yoshikado, H., Mizuno, T., Shimogata, S.: [Terrain-induced air stagnation over the southern Kanto Plain in early winter](#), Boundary-Layer Meteorology, 68, p.159-172 (1994)
- 8) 吉門 洋，魚崎 耕平： [濃尾平野の初冬期高濃度大気汚染 -気象学的構造における関東との違い-](#)，大気環境学会誌，35巻，

-
- p.63-75 (2000)
- 9) 田中 清敬ほか：[都心上空と地上の大気質観測によるPM_{2.5}等の高濃度時の立体解析—2015年12月上旬の事例—](#)，大気環境学会誌，52巻，p.51-58 (2017)
- 10) 富山 一ほか：[野焼き発生の時間分布調査及び稲作残渣野焼きによる大気汚染物質排出量の日変動推計](#)，大気環境学会誌，52巻，p.105-117 (2017)
- 11) 花房 龍男ほか：[筑波研究学園都市に新設された気象観測用鉄塔施設](#)，気象研究所技術報告第3号，(1979)
- 12) 日下 博幸ほか：[冬季晴天日におけるつくば市のヒートアイランド：予備観測の結果](#)，日本ヒートアイランド学会論文集，Vol. 4，p.10-14 (2009)
- 13) 植田 宏昭ほか：[筑波山の東西南北4斜面における高度100 m 間隔での通年観測](#)，天気，58，p.777-784 (2011)
- 14) 環境省：令和元年度大気汚染物質（有害大気汚染物質等を除く）に係る常時監視測定結果，
https://www.env.go.jp/air/mat01R1_rep.pdf (2021.9.7)
- 15) 早崎 将光：[米国EPA基準を適用した我が国における光化学オキシダントの全国動態](#)，JARI Research Journal, JRJ20190604, (2019)

GTR7 のための後面衝突頸部保護性能試験方法に関する研究

Study on Neck Injury Protection Performance Test Methods in Rear-end Collision for UN GTR No.7

中嶋 太一^{*1}

清田 浩嗣^{*1}

西出 治宝^{*2}

加藤 和彦^{*2}

Taichi NAKAJIMA

Hirotsugu SEITA

Harutomi NISHIDE

Kazuhiko KATO

Abstract

UN ECE/WP29/GRSP/GTR7 proposed the new neck injury protection performance test methods in rear-end collision using the rear impact test dummy (BioRID-II) for reduction of minor neck injury occurrence in rear-end collision. We have been conducted research on dynamic sled test methods, neck injury evaluation methods and certification test methods using BioRID-II dummy in order to propose the neck injury protection performance test methods in rear-end collision for GTR7. This paper reported on those studies and results.

KEY WORDS : Safety, Rear end collision, Test

1. はじめに

追突事故による頸部傷害は、その発生頻度と傷害にともなって生じる後遺障害等の社会的損失の観点から、国内のみならず諸外国においても重要な問題とされており、追突時の頸部傷害低減に向けた取り組みとして、各国の自動車アセスメントにおける評価試験の他、国際的な統一評価基準の制定が進められている。具体的には、UN ECE/WP29/GRSP において、各国の専門家による会議体「ヘッドレスト GTR (Global Technical Regulation) インフォーマル会議」が設置され、国際的に統一されたヘッドレストの要件や頸部傷害評価のための試験方法 (GTR No.7 : 以下、「GTR7」と称す) が検討されている。GTR7 では、初めにヘッドレストに対する要件として、静的バックセット (シートに着座させた人体模型頭部とヘッドレストとの水平距離) が Phase1 として提案され、2008 年 3 月の WP29 で採択されたことにより国際的な統一基準として成立した。また、翌年の 2009 年からは、日本がテクニカルスポンサーとなって、BioRID-II ダミー (後面衝突評価用ダミー) を用いた動的試験法の導入に向けた Phase2 の活動が開始され、以来 (一財) 日本自動車研究所、ならびに (一社) 日本自動車工業会では、BioRID-II ダミーを用いた試験・評価法に関する研究¹⁾⁸⁾を実施し、動的試験方法やその評価方法を検討してきた。約 10 年間にわたって様々な議論がなされた結果、2019 年 12 月の第 66 回 GRSP 会議において Phase2 の最終提案が合意され、2020 年 11 月の WP29 への上程が決定した。併せて、Phase2 の活動では、BioRID-II ダミーの標準化 (Mutual Resolution 1) の検討も同時に進められており、特に BioRID-II ダミーの検定試験方法については、ダミー製造メーカー主体による検討が行われてきた。また、協定規則第 17 号 (UN-R17 : 座席に関する協定規則) へ Phase2 の内容を反映する改定も予定されており、法規認証試験としての信頼性を確保した試験方法にすることが重要である。そのためにも、適切な検定試験に適合した BioRID-II ダミーを用いた動的試験を実施し、ダミ

*1 一般財団法人日本自動車研究所 安全研究部

*2 一般社団法人日本自動車工業会

* 本原稿は JSAE 著作権規制に基づく JSAE 20206298 の転載である

* 原稿受理 2022 年 2 月 10 日

一の個体差によって発生する試験結果のバラツキを極力低減させ、実安全に寄与するような評価方法を提案することが求められていた。

そこで本稿では、GTR7 を最終化するために検討した BioRID-II ダミーにおける試験結果のバラツキの低減に関する検討結果について述べるとともに、最終的に GTR7 に提案された動的試験方法とその評価方法、ならびに検定試験方法について紹介する。

2. BioRID-IIダミーの試験結果のバラツキ低減に関する検討

動的試験時に発生する BioRID-II ダミーにおける試験結果のバラツキ低減のために、過去に様々な検討^{1)~5)}を実施してきたが、GTR7 を最終化するにあたり、本研究では主にダミー頸部に着目した検討を行ない、その影響を確認した。

2.1 ダミー頸部における個体差の影響確認

BioRID-II ダミーは、人体忠実性の観点から、頸椎から腰椎までフレキシブルな構造となっており、各椎体間にはゴム製のバンパーが取り付けられている。また、頸部の各椎体にはワイヤーが貫通しており、これらのゴムバンパーの寸法や荷重特性とワイヤー張力のバランスによって頸部の挙動がコントロールされている。このように、BioRID-II ダミーの頸椎から腰椎の構造は従来の Hybrid-III ダミー等に比べて複雑になっており、個体差によって生じる試験結果のバラツキが懸念されている。更に、各椎体は樹脂でできているため、ワイヤーの摺動摩擦により生じる各椎体のワイヤー貫通穴の削れが確認されており、削れの程度はダミーの個体差によって異なるため、その影響も懸念されている。そこで本研究では、頸部の違いが試験結果に与える影響を調査するため、使用年数の異なる 2 体のダミーを用いて、頸部のみを入れ替えた (Fig. 1) 検討を検定試験で実施した。

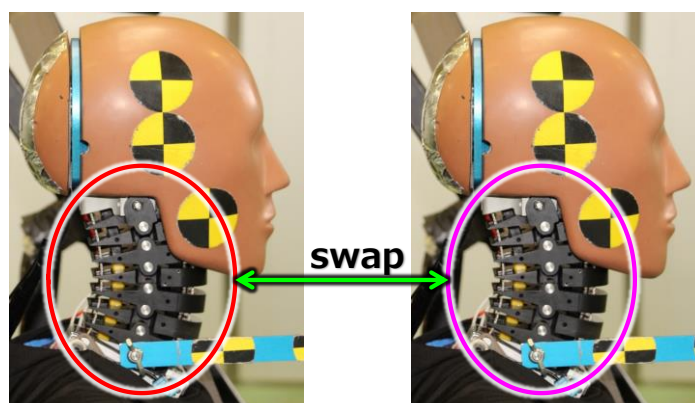


Fig. 1 Neck Swap between the Two BioRID-II Dummies

2.1.1 試験方法と試験条件

検定試験は、ダミー製造メーカーが発行している Certification Manual⁹⁾のヘッドレスト無しの検定試験条件に従って実施した。ヘッドレスト無しの検定試験は、レールの上を滑走するミニスレッドに BioRID-II ダミーの上半身を取り付け、質量 $37.60 \pm 0.11\text{kg}$ のインパクトを $4.7 \sim 4.8\text{m/s}$ の速度で打撃するものである。計測項目は、Certification Manual に規定されているインパクトの荷重 (Probe Force) やスレッドの加速度 (Sled Acceleration)、ダミー各部位の回転角 (Pot.A : 頭部回転角, Pot.B : 頸部回転角, Pot.C : 第 1 胸椎 (T1) 回転角)、ならびにダミー頸部の上部における Y 軸まわりのモーメント (UpperNeck-MY) 等とした。なお、試験の実施に先立ち、各ダミーの初期状態を極力同一にするため、JNCAP 後面衝突頸部保護性能試験⁹⁾で採用されている検定試験 (以下、「旧検定試験」という)⁹⁾を実施し、旧検定試験における適合要

件を満足させた。また、ダミー頸部の個体差による試験結果への影響については、使用年数が経過してワイヤー貫通穴が比較的大きく削られているダミーと、使用年数が比較的新しく、ワイヤー貫通穴の削れが少ないダミーの 2 体を用いて確認することとし、さらに古いダミーでは、新品の頸部を取り付けた試験も実施し、新しい頸部による試験結果への影響も確認した。なお、今回使用した 2 体の BioRID-II ダミーは、製造年が 2008 年（シリアル番号：095G）のものと、2014 年（シリアル番号：DP1998）のものを用いた。今回実施した検定試験の条件を Table1 に示し、検定試験時の状況を Fig. 2 に示す。また、今回使用した 2 体のダミーの同じ椎体におけるワイヤー貫通穴の削れの違いについて Fig. 3 に示す。

Table 1 Test Matrix

Test No.	Test-1	Test-2	Test-3	Test-4	Test-5
Dummy	095G			DP1998	
Neck	095G	DP1998	New	DP1998	095G

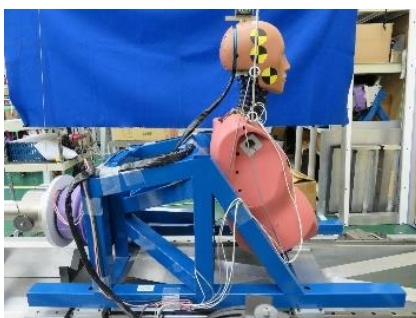


Fig. 2 Certification Test without Head Restraint



Fig. 3 Difference in Worn Holes

2.1.2 試験結果

ダミー頸部の個体差による試験結果への影響については、主に Pot.A (頭部回転角)、ならびに UpperNeck-MY に着目し、ダミーに元々取り付けられていた頸部での試験結果に対して、頸部を入れ替えた場合にどの程度試験結果が変動したかによって確認した。Fig. 4 に、Pot.A と UpperNeck-MY における時系列応答を示す。

Pot.A について、「095G + New Neck」の条件では、オリジナルの「095G」ダミーにおける応答とは異なり、比較的新しいダミーである「DP1998」の試験結果に類似しており、頸部の違いによる影響を受けていることがわかる。しかし、「095G + DP1998 Neck」の条件では、オリジナルの「095G」ダミーの応答と

類似しており、この組み合わせにおいては頸部の違いによる影響は小さいと考えられた。一方、「DP1998+095G Neck」の条件の場合においても、オリジナルの「DP1998」ダミーの応答とは異なる結果を示し、頸部の違いによる試験結果への影響が生じていると考えられた。

一方、UpperNeck-MY については、いずれの条件においてもオリジナルのダミーの応答からの変化は小さく、値の差は 2Nm 程度に収まっていた。そのため、UpperNeck-MY については、頸部の違いによる傷害値への影響は小さいと考えられた。

このように、Pot.A の頭部回転角には、頸部を入れ替えたことによる影響が生じたが、動的試験で評価される UpperNeck-MY では、その影響が小さかった。そのため、ダミーの個体差による試験結果のバラツキについては、頸部以外の他の要因がある可能性が示唆された。

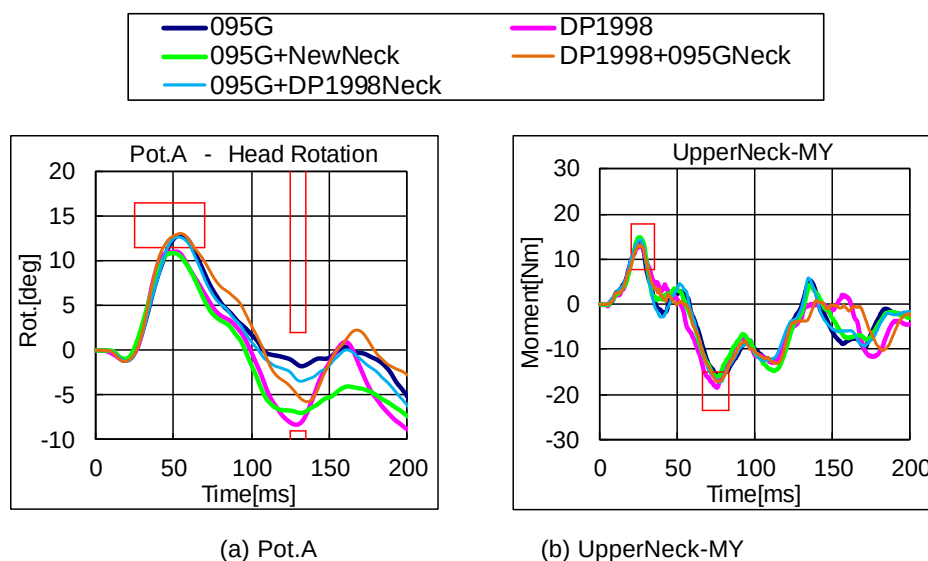


Fig. 4 Responses in Certification Test using Different Neck

2.2 ダミー頸部におけるゴムバンパー硬度の影響確認

2.1 節に示したように、ダミー頸部の違いによる試験結果への影響は小さいことがわかった。しかしながら、ダミー頸部には、各椎体間にゴム製のバンパーが装備されており、ゴムバンパーの製品バラツキや経年劣化による試験結果への影響が懸念された。さらに、ゴムバンパーの製品バラツキについては、ダミー製造メーカーで出荷管理がなされているものの、その管理方法が硬度計を使用した簡易的な計測方法であるため、計測者の違いによる硬度の測定結果のバラツキが懸念された。そのため、最近では、ゴムバンパー全体を静的圧縮試験機で圧縮することによる新たな硬度管理方法が提案されており、以前よりも計測結果の再現性が高くなっている。しかしながら、新たな管理方法におけるゴムバンパーの圧縮荷重要件については、その妥当性の検討がなされていないのが現状であった。そこで本研究では、次のステップとして、ゴムバンパーの硬度の違いが試験結果に与える影響を調査するため、2.1 節で述べた比較的使用年数の新しい 1 体のダミーを用い、ダミー製造メーカーから提案されている荷重要件の範囲内での上限と下限に近いゴムバンパーをそれぞれダミー頸部に装備させ、検定試験、ならびに動的試験を実施した。

2.2.1 試験に使用するゴムバンパーの硬度計測

本研究で使用するゴムバンパーを選定するため、初めにダミー製造メーカーが提案しているゴムバンパーの静的圧縮試験を実施した。静的圧縮試験は、ゴムバンパーを 1N 圧縮した時点を基準に、そこからゴムバンパー高さの 20%まで分速 10mm の負荷速度で圧縮していき、20%に達した時点の荷重値を評価するもの

である。なお、ダミー頸部には、ARA-220 と呼ばれる黒いゴムバンパー（頸部の椎体の前側と後側の一部）と ARA-227 と呼ばれる黄色のゴムバンパー（頸部の椎体における後側の一部）の 2 種類が装備されている。動的試験では、特に前傾側の挙動時に発生する試験結果のバラツキが懸念されているため、本研究では頸部の前側に装備されている ARA-220 のバンパー 8 個に着目して検討した。静的圧縮試験状況を Fig. 5 に示し、ARA-220 のゴムバンパーの外観を Fig. 6 に示す。また、Fig. 7 に示す静的圧縮試験結果から、今回使用した ARA-220 のゴムバンパーは、荷重要件の上限よりもやや低い硬度のゴムバンパー（以下、硬めのゴムバンパーという）と下限付近の硬度のゴムバンパー（以下、柔らかめのゴムバンパーという）であることがわかる。

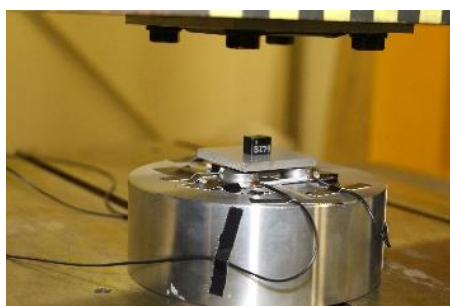


Fig. 5 Compression Test for Bumper



Fig. 6 ARA-220 Bumper

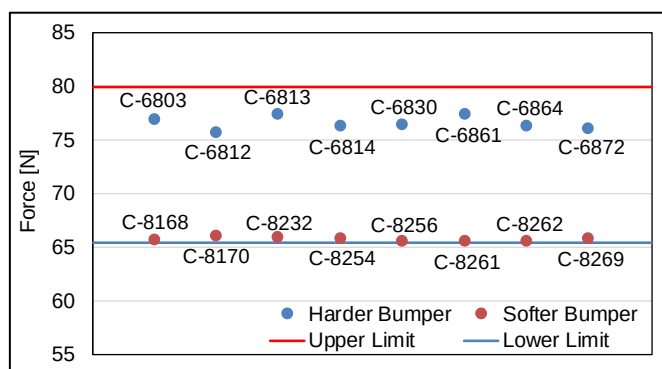


Fig. 7 Compression Test Results for ARA-220

2.2.2 ヘッドレスト無しの検定試験

検定試験は、ダミー頸部における個体差の影響確認時と同様に、ヘッドレスト無しの検定試験を実施し、試験結果についても、Pot.A（頭部回転角）と UpperNeck-MY に着目し、ゴムバンパー硬度の影響を確認

した。ゴムバンパー硬度の違いによるこれらの時系列応答の比較結果を Fig. 8 に示す。また、検定試験の適合判定の要否を Table2 に示す。Fig. 8, ならびに Table2 より、硬めのゴムバンパーと柔らかめのゴムバンパーともに、Pot.A 以外は要件を満足した。なお、Pot.A については、ダミー製造メーカより、Pot.A の適合要件の変更を事前に通告されていたため、今回の試験結果では Pot.A の適合判定の要否を問わないこととした。

試験結果について、ピーク値に着目すると、Pot.A における+側（屈曲側）では、硬めのゴムバンパーが「 10.3° 」、柔らかめのゴムバンパーが「 10.8° 」であり、その差は「 0.5° 」とわずかであった。一方、-側（伸展側）についても、硬めのゴムバンパーでは「 -9.7° 」、柔らかめのゴムバンパーでは「 -8.8° 」であり、その差は「 1° 」以内であった。また、UpperNeck-MY における+側（屈曲側）では、硬めのゴムバンパーが「 13.1Nm 」、柔らかめのゴムバンパーが「 12.7Nm 」であり、その差は「 0.4Nm 」とわずかであった。また、-側（伸展側）でも、硬めのゴムバンパーでは「 -17.3Nm 」、柔らかめのゴムバンパーでは「 -17.1Nm 」となっており、その差は「 0.2Nm 」とわずかであった。このように、検定試験では、ダミー製造メーカから提案されている荷重要件内のゴムバンパーを使用することで、試験結果のバラツキを低減できる可能性が示唆された。

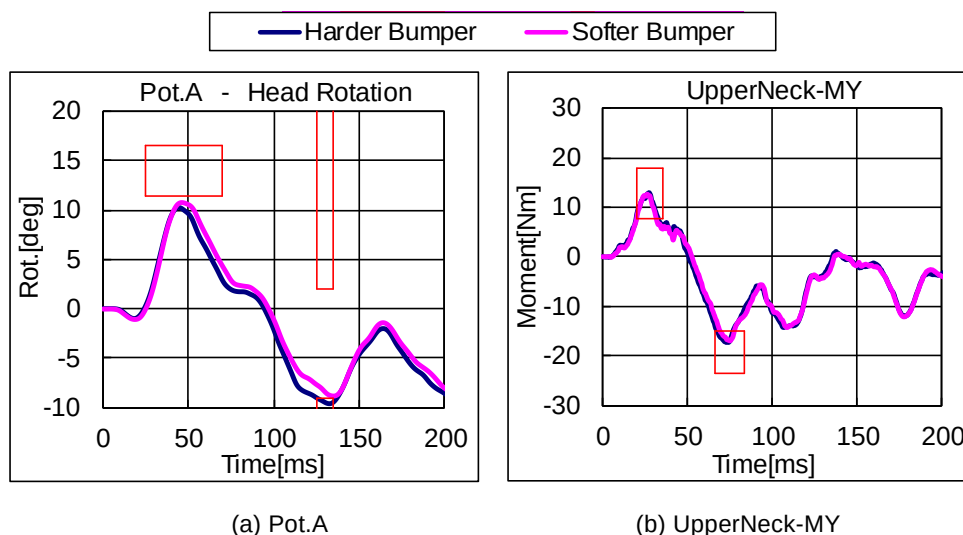


Fig. 8 Responses in Certification Test using Neck with Different Bumper Stiffness

Table 2 Certification Test Results

Measurement	Requirement	Unit	Time[ms]	Harder Bumper	Softer Bumper
Temperature	19-25	°C	-	20.0	20.0
Humidity	10-70	%	-	50.0	50.0
Pendulum Velocity	4.70-4.80	m/s	-	4.77	4.77
Peak Impactor Force	8000-9700	N	-	8581	8472
Peak Sled Acceleration	137-170	m/s ²	-	149	145
Peak Sled Velocity 1	2.25-2.50	m/s	20-30	2.43	2.40
Peak Sled Velocity 2	2.10-2.50	m/s	135.00	2.42	2.44
	2.00-2.40	m/s	140.00	2.34	2.36
Peak T1 Acceleration	183-267	m/s ²	18.5-30.5	225	222
Peak Head Rotation 1 (Pot.A)	11.5-16.5	deg	25-70	10.3	10.8
Peak Head Rotation 2 (Pot.A)	-9 - 2	deg	125-135	NG	OK
Peak Neck Link Rotation 1 (Pot.B)	4.00-6.50	deg	18.5-28.5	5.0	5.2
Peak Neck Link Rotation 2 (Pot.B)	-36 - -30	deg	98-108	OK	OK
Peak Neck Link Rotation 3 (Pot.B)	-36 - -29	deg	165-175	OK	OK
T1 Rotation (Pot.C)	-19 - -16.5	deg	73-78	OK	OK
Total Head Rotation (Pot.A+B)	-41 - -25	deg	100-110	OK	OK
Total Head Rotation (Pot.A+B)	-41 - -25	deg	170-190	OK	OK
Total Thoracic Rotation (Pot.C+D)	-21 - -10	deg	125-135	OK	OK
UpperNeck-MY Flexion	7.7-17.8	Nm	20-35	13.1	12.7
UpperNeck-MY Extension	-23.5 - -15	Nm	66-83	-17.3	-17.1

↑ ↑
「OK」:規定されている全ての時間において、要件内に入っている場合に合格となる。

2.2.3 動的試験

ダミー頸部に装備されているゴムバンパーの硬度の違いが動的試験における結果に与える影響について調査した。なお、動的試験でも検定試験時と同様に、ARA-220 のゴムバンパーにおける硬度の違いに着目し、ダミーとゴムバンパーも検定試験時と同一のものを使用した。

(1) 試験方法

動的試験は GTR7 に提案されていた試験方法を参考に、硬めのゴムバンパーと柔らかめのゴムバンパーでそれぞれ 2 回ずつ、計 4 回の試験を実施した。計測項目は、ダミーの頭部や第一胸椎 (T1) 等の加速度、ならびに頸部荷重やモーメントとした。また、試験時におけるダミー各部位の挙動を確認するため、高速度ビデオカメラにより撮影した。シートの設定方法について、基本は GTR7 に提案されていた試験方法に従ったが、シートの個体差によるバラツキを極力排除するため、シートの高さ調整については、GTR7 の試験方法に提案されていた中間位置ではなく、最下端位置に設定した。なお、今回のシートの場合、シートの高さ調整に連動してシートバック角度が変化するタイプであったため、シートバック角度については、シート高さの中間位置での角度を測定し、その角度と同様になるように、最下端位置でのシートバック角度を設定した。また、ダミーの着座位置については、H-point 法により、ヒップポイント位置やバックセット (ダミー後頭部とヘッドレストとの距離) 等を計測し、4 つのシートにおける計測結果の平均値に対して BioRID-II ダミー着座時の目標値へ換算し、着座させた。

(2) 試験結果

Fig. 9 は、4 回の試験におけるダミー挙動について、頭部 (Head Angle) - 頸部 (Neck Angle) の相対回転角 (HA-NA)、ならびに頭部 - 第一胸椎の相対回転角 (HA-TA) を示したものである。また、Fig. 10

は、4回の試験におけるダミーの主要計測項目として、NIC と UpperNeck-MY の傷害値の時系列応答を示したものである。Fig. 9 に示すように、ダミーの頸部挙動に関しては、4回の試験のうち、柔らかめのゴムバンパーを装備した T-04 の試験において、他の試験よりも、HA-NA で約 3° 、HA-TA で約 2° ほどプラス側（前傾側）の回転角が大きい。一方で、Fig. 10 に示すように、傷害値でもゴムバンパーの硬度の違いによる影響をわずかながら受けており、UpperNeck-MY では T-04 の試験において最も大きな値を示し、他の試験よりも値が 20% 程度大きくなっていたものの、絶対値では 2.5Nm 程度のバラツキであった。このように、動的試験時において、柔らかめのゴムバンパーを装備した場合に若干の値の上昇が見られたものの、ダミー製造メーカから提案されている荷重要件内のゴムバンパーを使用することで試験結果のバラツキは許容範囲内に収まると考えられた。

なお、柔らかめのゴムバンパーで傷害値がわずかに上昇していた要因については、HA-NA にも現れているように、柔らかめのゴムバンパーを装備することで、頸部の回転挙動が大きくなり、その結果、頭部と頸部を連結している部分に装備した荷重計で計測される UpperNeck-MY の値も上昇したと推察された。

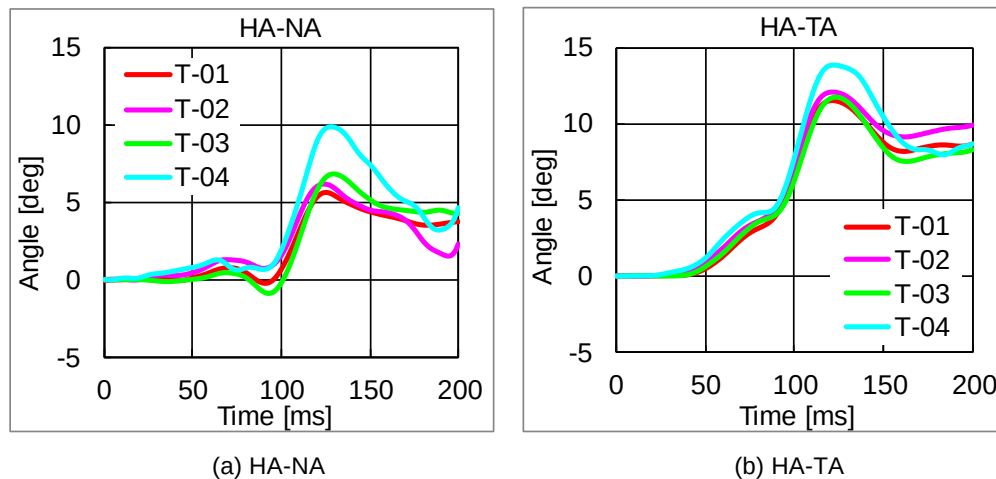


Fig. 9 Comparison of Dummy's neck Behavior

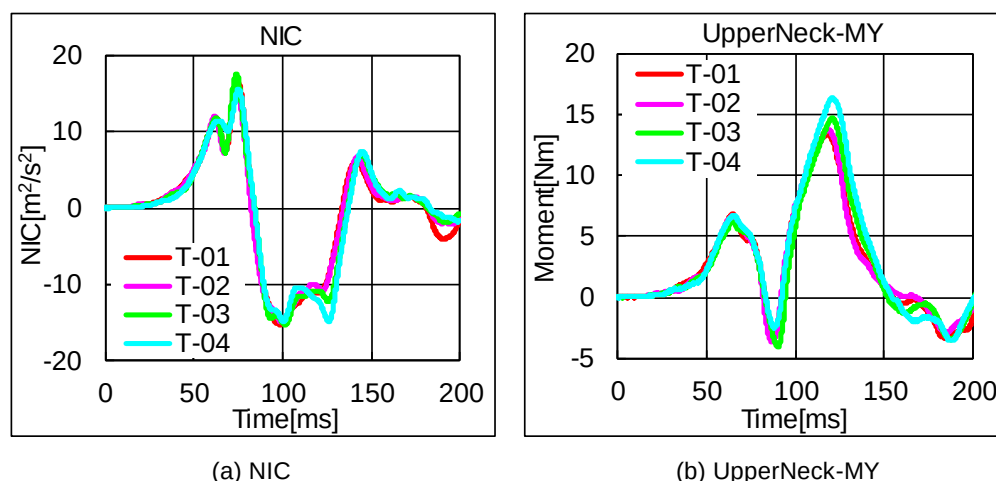


Fig. 10 Comparison of Dummy's injury values

3. GTR7の後面衝突頸部保護性能試験方法

BioRID-II ダミーを用いた後面衝突頸部保護性能試験 (Fig. 11) は、各国のアセスメントで先行して実施

されているが、法規としてのダミーを用いた同様の試験は、米国の連邦自動車安全基準（以下、FMVSS という）において、FMVSS202a¹⁰が運用されている。しかしながら、FMVSS202a では、前面衝突用ダミーの Hybrid-III 50th Male ダミー（以下、HY-III_50M という）が使用されているため、BioRID-II ダミーを使用した法規としての試験は、GTR7 で初めて検討されることとなった。そのため、GTR7 の動的試験方法は各国のアセスメントを参考に検討が進められ、アセスメントや FMVSS202a と同様に、自動車そのものを使用した試験ではなく、加速式、もしくは減速式のスレッドによるシート単体の衝撃試験として検討されることとなった。動的試験方法の検討に際し、試験時の衝撃速度が重要になるが、各国のアセスメントや FMVSS202a の条件を見ると、アセスメントでは主に $\Delta V=16\sim 24\text{km/h}$ の範囲で、一方、FMVSS202a では $\Delta V=17.3\text{km/h}$ で規定されている。一般的に、アセスメントは法規よりも高い速度で試験が実施されており、米国からは、GTR7 の衝撃速度を FMVSS202a よりも高い速度にするよう提案がなされた。そのため、GTR7 の衝撃速度は、 $\Delta V=17.3\text{km/h}$ 以上の速度で設定されることとなり、様々な検討がなされた結果、日本のアセスメントである JNCAP の後面衝突頸部保護性能試験で 2009～2011 年に実施されていた条件の $\Delta V=17.6\text{km/h}$ が GTR7 の衝撃速度として提案された。また、試験時のシートバック角度やダミー設定方法等の試験条件も JNCAP の同試験方法を参考に設定されることとなった。一方で、BioRID-II ダミーを使用した場合の動的試験時に発生する試験結果のバラツキが指摘されていたものの、バラツキ低減に関する検討が継続的に進められた結果、過去の研究結果³⁾⁵⁾等を参考に、極力バラツキの少ない試験になるようダミー設定時の要件等が提案されることとなった。

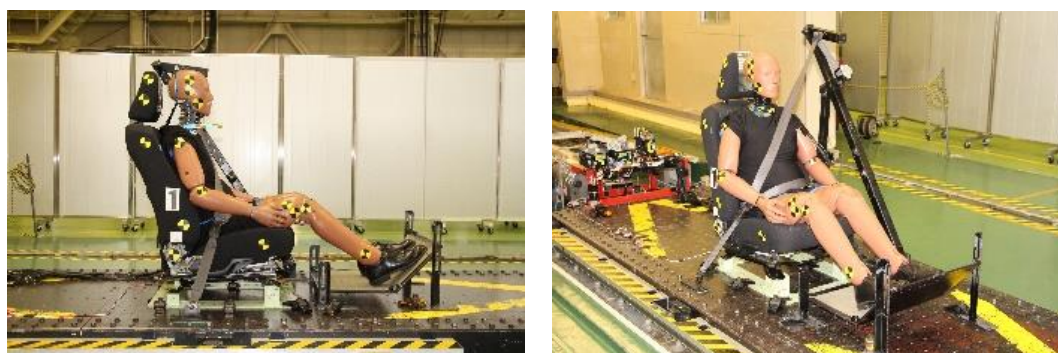


Fig. 11 Dynamic Sled Test with BioRID-II

4. GTR7における頸部傷害評価指標

動的試験方法に併せて、頸部傷害評価指標の検討も必要であるため、既存の評価指標を参考に、GTR7 のための適切な頸部傷害評価指標について検討されてきた。具体的には、日本における倫理的配慮に基づいて実施された志願者実験や人体有限要素モデルによる事故再現シミュレーションの結果に加え、米国における供試体実験の結果も併せて、傷害リスクに基づいて検討した日米共同研究からの傷害評価指標、ならびに基準値の提案⁹⁾と、これまでの EuroNCAP の試験結果に基づいて検討された欧州からの同提案¹⁰⁾の 2 つの提案に対して、長きにわたって様々な議論がなされてきた。両者の考え方が異なるため、Table3 に示すように基準値が異なっていたが、最終的には日本が提案した頸部傷害評価指標をもとに、精査した EuroNCAP の試験結果が考慮された基準値で合意され、Table3 の右側に示すような GTR7 としての頸部傷害評価指標とその基準値が提案されることとなった。

Table 3 Injury Criteria for GTR7

		Japan / U.S.	Europe (Germany)		GTR7 Proposal	
		AIS1+: 50% (WAD2+: 82.9%)	EuroNCAP Results			
NIC _{Max}		23 m ² /s ²	23 m ² /s ²	NIC _{Max}		25 m ² /s ²
Upper Neck	F _X (Backward)	640 N	360 N	⇒	Upper Neck	F _X (Forward / Backward) 360N
	M _Y (Flx./Ext.)	34 Nm	30 Nm			M _Y (Flx./Ext.) 30 Nm
Lower Neck	F _X (Backward)	640 N	360 N		Lower Neck	F _X (Forward / Backward) Monitor
	M _Y (Flx./Ext.)	34 Nm	30 Nm			M _Y (Flx./Ext.) 30 Nm

5. GTR7におけるBioRID-IIダミーの検定試験方法

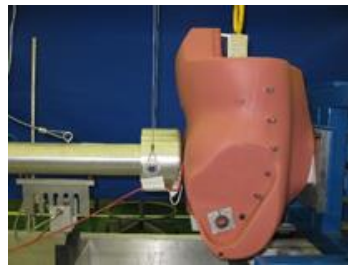
動的試験方法や頸部傷害評価指標の検討に併せて、BioRID-II ダミーの検定試験方法の検討も進められてきた。検定試験の方法や要件は、ダミーの個体差によって生じる動的試験時の試験結果のバラツキを低減させることをねらいとして定められるものであり、検討されてきた検定試験方法としては、主にダミーの上半身を対象とした試験とダミーを構成する部品を対象とした試験の大きく2つに分けることができる。まず、ダミーの上半身を対象とした試験については、当初、ダミーを取り付けたミニスレッドがインパクトによって打撃され、テフロンシート上を滑走する方式の旧検定試験が採用されていた。しかしながら、旧検定試験ではミニスレッドが固定されていないため、衝撃がミニスレッドに加わった際にミニスレッドの前方が浮き上がるなどの問題が生じていた。そのため、ミニスレッドを打撃する方法に変更は無いものの、検定試験装置の改善が施され、ミニスレッドがレールの上を滑走する方式（以下、新検定試験という）に変更された。しかしながら、旧検定試験の適合要件に比べ、新検定試験では、適合要件が緩和された部分があったため、検定試験結果のバラツキが懸念された。そのため、本件の対応を GTR7 インフォーマル会議において議論することになり、ダミー製造メーカーを含めて様々な検討がなされた。これによって、本研究における検討結果（本稿の2章参照）なども考慮され、検定試験方法がアップデートされることとなった。

一方で、ダミーの構成部品を対象とした試験については、Jacket や Pelvis が対象となり、新検定試験で使用されるミニスレッドに Jacket や Pelvis を取り付け、インパクトによって衝撃が加えられる方式が採用された。しかしながら、Jacket や Pelvis の単体試験における適合要件は非常に厳しい条件が提案され、使用年数が比較的新しく、かつ適切に部品管理されているダミーでもその要件に適合できないなど、ダミーの検定試験として不合理な条件となっていた。本件についても、GTR7 インフォーマル会議において議論することとなり、日本における Jacket や Pelvis の単体試験に関する研究結果⁷⁾を踏まえて適合要件が再考され、検定試験方法がアップデートされた。

このように、GTR7 インフォーマル会議で BioRID-II ダミーの検定試験方法に関する議論がなされたことにより、BioRID-II ダミーのより適切な検定試験方法（Fig. 12）として、Certification Manual がアップデートされることになり、2019年11月にはダミー製造メーカーより Certification Manual の Rev.E¹¹⁾が発行された。



(a) Certification Test without Head restraint



(b) Jacket Test



(c) Pelvis Test

Fig.12 Certification Test for BioRID-II

6. まとめ

本稿では、GTR7 の制定に向けた対応として、これまでに実施してきた BioRID-II ダミーにおける試験結果のバラツキ低減に関する検討結果について述べるとともに、最終的に GTR7 に提案された動的試験方法とその評価方法、ならびに検定試験方法について紹介した。以下に得られた主な結果を示す。

- ・ BioRID-II ダミーの動的スレッド試験において発生する試験結果のバラツキの要因となるダミー頸部の個体差については、椎体間に装備されているゴムバンパー硬度の特性を適切に管理することで、検定試験や動的試験時における試験結果のバラツキを低減できる可能性があることがわかった。

- ・ 追突時の頸部傷害評価のための動的試験方法や評価指標、ならびに BioRID-II ダミーの検定試験方法について、GTR7 インフォーマル会議において日本のこれまでの様々な研究の成果を踏まえた議論がなされた結果、国際統一基準となる GTR7 が提案されることとなり、より適切で合理的な方法の提案に寄与した。

7. おわりに

GTR7-Phase2 における動的試験方法や傷害評価指標とその基準値については、約 10 年間という長期間の活動と議論を経て、ようやく最終提案に至り、2019 年 12 月の第 66 回 GRSP 会議で合意された。GTR7 の制定により、追突事故による頸部傷害受傷者が一人でも多く削減されることが望まれ、国際的な実安全への貢献に寄与できれば幸いである。

謝辞

本研究の推進に際しご協力を頂いた（一社）日本自動車工業会/安全部会/保護装置分科会/後突頸部傷害ワーキンググループの委員の方々、ならびに試験実施に多大なるご協力を頂いた株式会社ヒューマネティクス・イノベティブ・ソリューションズ・ジャパン、（一社）日本自動車部品工業会（トヨタ紡織株式会社、テイ・エステック株式会社）、ならびに交通安全環境研究所の関係者の方々に對し、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Nakajima, T et.al: [Study on Impact Response \(Injury Value\) Variation Factors for BioRID-II Dummies](#), 22nd ESV Conference, Paper Number 11-0201, (2011)
- 2) Nakajima, T et.al : [Calibration Test Method for enhancing the BioRID-II Dummy's Repeatability and Reproducibility](#), IRCOB Conference, (2012)
- 3) 中嶋太一ほか: [頸部傷害低減のための後面衝突試験方法の検討](#)-ダミーの着座姿勢、ならびにシートの設定方法の検討-, 自動車技術会学術講演会予稿集(2014), 20145219
- 4) 中嶋太一ほか: [後面衝突用ダミー \(BioRID-II\) のための再現性向上に関する研究-Spine と Jacket の特性に着目した検討-](#), 自動車技術会学術講演会予稿集(2014), 20145645
- 5) 中嶋太一ほか: [BioRID-II ダミーにおける初期位置の設定方法とその影響に関する考察-GTR7 における後面衝突試](#)

-
- [験方法の制定に向けて](#)，自動車技術会論文集，Vol.47 No.2，p.497-502，20164192（2016）
- 6) 中嶋太一ほか： [ヘッドレスト評価試験における頸部傷害低減性能基準の検討](#)，自動車技術会論文集，Vol.48 No.2，p.405-410，20174214（2017）
- 7) 中嶋太一ほか： [BioRID-II ダミーの検定試験における単体試験方法の妥当性検討-GTR7 における検定試験の制定に向けて](#)，自動車技術会論文集，Vol.49 No.5，p.1005-1010，20184571（2018）
- 8) 中嶋太一ほか： [BioRID-II ダミーにおける新たな検定試験方法の検討-GTR7 における検定試験方法の制定に向けて](#)，自動車技術会論文集，Vol.50 No.3，p.844-849，20194353（2019）
- 9) Humanetics Innovative Solutions Inc., BioRID-II Dummy Certification Manual ARA-9901[Rev.A] (2016)
- 10) 49 CFR PART 571, FMVSS No.202a, Headreststraint
- 11) Humanetics Innovative Solutions Inc., BioRID-II Dummy Certification Manual ARA-9901[Rev.E] (2020)

低レベル PM 排出車両を対象とした フィルタ重量法の測定精度向上に関する研究

Study on Improving the PM Measurement Accuracy of the Filter Gravimetric Method
for Lower PM Emission Vehicle

松本 雅至^{*1} 松浦 賢^{*2}
Masashi MATSUMOTO Ken MATSUURA

1. はじめに

近年、自動車からの排出ガスに含まれる粒子状物質（Particulate Matter, 以下 PM）に関する排出量の規制強化が検討されており、例えば米国では 2025 年に 1mg/mile (0.62mg/km) の PM 排出量規制値が設けられる予定である。一方で、PM 排出量の測定法に関しては規制開始当初から根本的な変更を伴うことなくフィルタ重量法が適用されており、PM 排出量規制が強化されるに伴ってフィルタ重量法の測定精度向上が技術的課題として認識されている。今後の PM 排出量に対する規制強化を鑑みると、従来のフィルタ重量法における PM 排出量の測定精度を把握し、必要に応じて技術的改善を加えることが必要である。国内の低レベル PM 測定法に関する研究報告においては、PM 排出量の繰り返し再現性に対する希釈空気、フィルタホルダや PM 捕集フィルタの種類といった各種因子の影響度について示されている^{1), 2)}。また、JC08 モードにおいてはディーゼル中量貨物車からの PM 排出量の測定バラツキが 0.03mg/km 以下となる見通しも得られているが³⁾、現行車両と WLTC (Worldwide harmonized light duty test cycle) モードの組み合わせにおいても同等の結果が得られるかは別途検証が必要である。一方で、米国においては 2025 年における PM 排出量の規制強化を見据えて PM 測定法の改善研究が実施されているが、低レベル PM 測定法の確立に資する最終的な結論は示されていない⁴⁾。

以上を踏まえ、本研究では PM 排出量規制が 0.5mg/km へと強化されるケースを想定し、測定のバラツキ（本研究では標準偏差 1σ と定義する）が 0.5mg/km の 1/10 である 0.05mg/km 以下となる低レベル PM 測定法を、現状の試験設備をベースに提案することを目的とする。これまで、著者らは直噴ガソリン乗用車を用い、PM 捕集フィルタの種類や PM 捕集時のフィルタ通過ガス流速（以下、フィルタ面速度）が測定バラツキに及ぼす影響を把握し、測定バラツキの抑制に有効な因子を組み合わせた推奨測定法を検討した⁵⁾。ここで、当該結果は定期的に排気導入管や希釈トンネルへの清掃を施している設備において得られた知見であるため、清掃の実施が困難である設備での試験を想定すると、トンネルブランクレベルを低減させる手法を検討することが求められる。そこで、本報告では排気導入管および希釈トンネルの加熱設定を変化させることによるトンネルブランクレベルへの影響を把握し、併せて WLTC (ホットスタート) モード走行時の PM 排出量ならびに測定バラツキへの影響を解析した。また、これまでの研究結果を踏まえてメンブレンフィルタ使用時における課題への対策およびフィルタ面速度の推奨範囲を検討した。

2. 試験設備および試験方法

2.1 フィルタ秤量設備、PM 捕集フィルタ

本試験では秤量機器としてウルトラマイクロ天秤（METTLER TOLEDO製、XPR2UV）、測定対象物の除電機器としてコロナ放電方式除電器（KEYENCE製、SJ-H108）をそれぞれ使用した。また、PM捕集フィルタにおいてはガラス繊維フィルタとしてTXフィルタ（PALL製、TX40HI-20-WW 47mmφ）を選定し、メンブレンフィルタとしてPTフィルタ（Measurement Technology Laboratories製、PT47P）を使用した。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士（工学）

*2 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部

* 原稿受理 2021 年 8 月 10 日

2.2 供試車両，供試燃料

本試験では供試車両として筒内直接噴射方式ガソリンエンジンを搭載した車両1台を使用した。また，供試燃料は認証用レギュラーガソリンである。なお，試験はシャーシダイナモ設備で実施した。

2.3 試験条件

Table 1に排気導入管および希釈トンネルに対する加熱設定の組み合わせを示す。本試験では，排気導入管を加熱する場合には設定温度190℃とし，希釈トンネルの設定温度は47℃とした。なお，いずれの加熱設定においても排気導入管および希釈トンネルは断熱材で保温した。

Table 1 排気導入管および希釈トンネルに対する加熱の組み合わせ

Heating pattern	Exhaust transfer tube	Dilution tunnel
1	with heating*	w/o heating
2	w/o heating	w/o heating
3	with heating*	with heating**

* Target temperature : 190℃

** Target temperature : 47℃

Table 2に試験順序を示す。本試験ではトンネルブランク試験および車両を用いたモード走行時のPM測定（以下，車両試験）を実施した。いずれの測定においてもPM捕集用にTXフィルタとPTフィルタを同時にセットし，フィルタ面速度は保安基準の別添42（軽・中量車排出ガスの測定方法，以下，別添42と称す）に規定される100cm/sで揃えた。車両試験における走行モードはWLTCモードの低速～高速フェーズからなる3フェーズのホットスタートとし，PM排出量および測定バラツキについては走行モードトータルの積算値で評価した。一方で，トンネルブランク試験においては車両試験と同じ測定時間でのトンネルブランク排出量および測定バラツキを評価した。また，各加熱設定におけるトンネルブランクレベルへの影響を把握するため，トンネルブランクレベルを意図的に高めるための運転（以下，汚し運転と称す）を検討した。本報告では，汚し運転としてWLTCモードの低速～高速フェーズから成る3フェーズのホットスタートの繰り返しや，車両からの時間当たりのPM排出量が多くなることを狙った0-100km/h加速運転の繰り返しを検討した。

また，本研究では推奨測定法としてフィルタ面速度を別添42における規定の範囲外である150cm/sに高めることを提案している⁵⁾。一方で，従来研究においてはフィルタ面速度が高いほどPM捕集効率の低下が懸念されている⁶⁾ことを踏まえ，本試験ではTXフィルタおよびPTフィルタに対してフィルタ面速度を80，100および150cm/sに設定した際のPM排出量および測定バラツキへの影響を解析する。なお，試験は加熱パターン2において実施した。本試験設備では最大3セットのフィルタホルダを同時に使用可能であるため，異なるフィルタ面速度条件での同時サンプリングをTXフィルタ，PTフィルタの順にそれぞれ実施した。

Table 2 試験順序

Test sequence	
Cleaning for exhaust transfer tube & dilution tunnel	-
Tunnel blank test (before dirty driving)	N=4
WLTC(L/M/H)-hot (before dirty driving)	N=4
Driving for dirty exhaust transfer tube & dilution tunnel	-
Tunnel blank test (after dirty driving)	N=4
WLTC(L/M/H)-hot (after dirty driving)	N=4

3. 結果と考察

3.1 排気導入管および希釈トンネルの加熱設定がトンネルブランク排出量に及ぼす影響

Fig. 1に汚し運転前後におけるトンネルブランク排出量を示す．なお，本結果は加熱パターン1のみ汚し運転としてWLTC（ホットスタート）モードと0-100km/h加速運転の両方を繰り返した．これより，いずれの加熱パターンにおいても汚し運転前後におけるトンネルブランクレベルは非常に小さく（0.02mg/km未満），排気導入管や希釈トンネルの加熱によるトンネルブランクの抑制効果に差異は見られなかった．

Heating pattern	Exhaust transfer tube	Dilution tunnel	Driving for dirty exhaust transfer tube & dilution tunnel	
			WLTC (hot) 20 times	0-100km/h acceleration 90 times
1	with heating	w/o heating	○	○
2	w/o heating	w/o heating		○
3	with heating	with heating		○

 Heating pattern 1 (Exhaust transfer tube : with heating, Dilution tunnel : w/o heating)
 Heating pattern 2 (Exhaust transfer tube : w/o heating, Dilution tunnel : w/o heating)
 Heating pattern 3 (Exhaust transfer tube : with heating, Dilution tunnel : with heating)

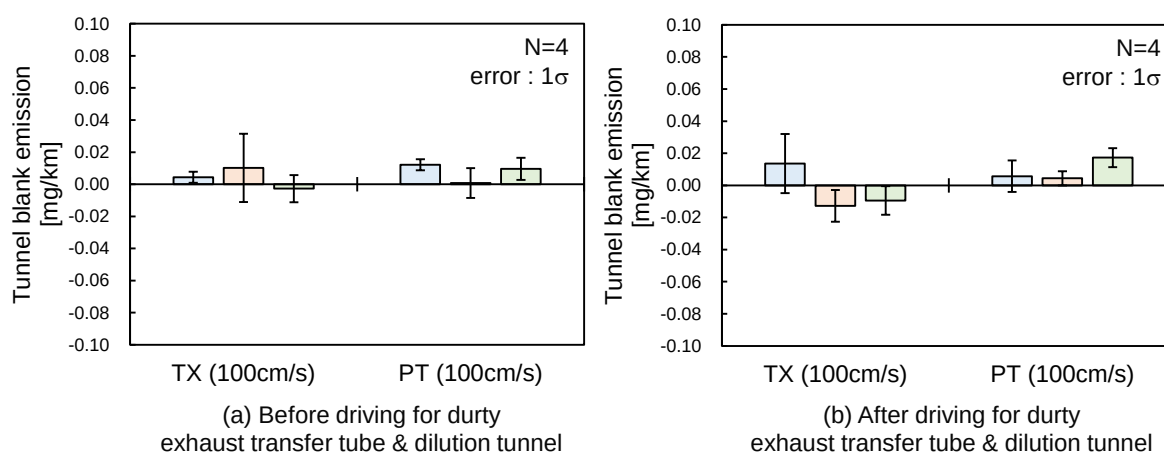


Fig. 1 汚し運転前後におけるトンネルブランク排出量

そこで，加熱パターン3において追加の汚し運転によるトンネルブランクへの影響を検討した．0-100km/h加速による汚し運転では希釈トンネルにおける壁温上昇がブランク湧出に寄与している可能性があるため，

WLTC (ホットスタート) モードの繰り返しを追加の汚し運転とした。なお、加熱パターン3では希釈トンネルを加熱する設定ではあるが、希釈トンネルからのブランク湧出を懸念して汚し運転中のみ希釈トンネルを加熱しないこととした。また、希釈トンネル内の希釈排出ガス滞留時間の増加を期待して、汚し運転中の定容量希釈サンプリング装置の流量をトンネルブランク排出量測定や車両試験におけるPM排出量測定における設定値の半分に低下させた。

Fig. 2に追加汚し運転としてのWLTC (ホットスタート) モードの繰り返し回数とトンネルブランク重量およびトンネルブランク排出量の関係を示す。本検討ではWLTC (ホットスタート) モードを180回繰り返し走行したが、トンネルブランク重量およびトンネルブランク排出量はほとんど変化しておらず、いずれの結果も測定バラツキの範囲内であった。

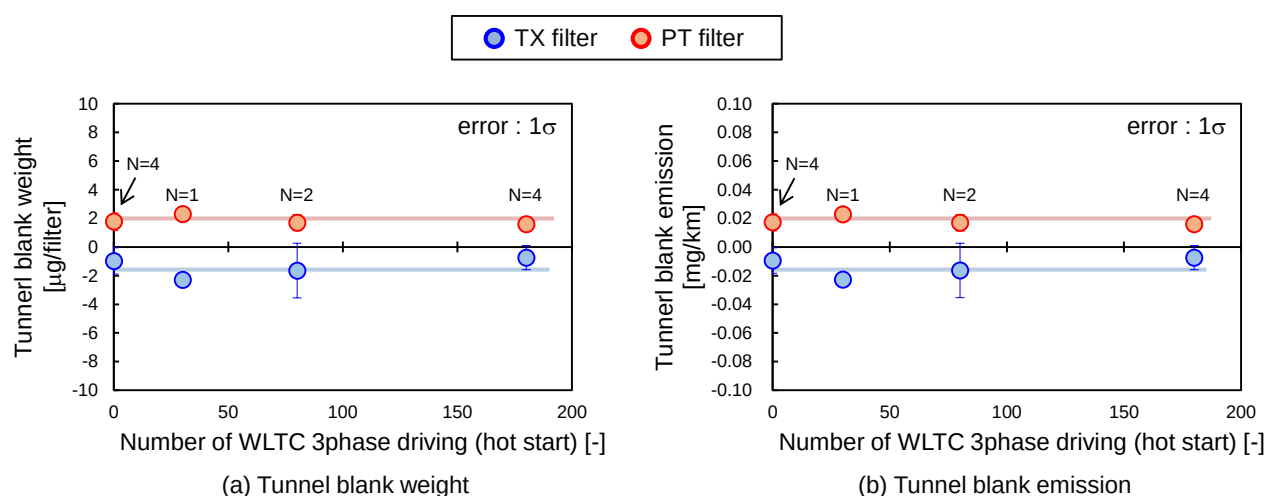


Fig. 2 汚し運転 (WLTC ホットスタート) の繰り返し回数に対するトンネルブランクレベルの推移
-加熱パターン3 (排気導入管：加熱あり，希釈トンネル：加熱あり) -

そこで、排気導入管の入口近傍および希釈トンネル内のPMサンプリングプローブ先端近傍における管内部壁面の付着物を石英フィルタ (PALLFLEX製, TYPE 2500QAT-UP) に採取し、熱光学式炭素分析計 (DRI製, Model 2001 OC/EC Carbon analyzer) による有機性炭素 (OC) および元素状炭素 (EC) の分析を実施した。Fig. 3にOC/EC分析結果を示す。排気導入管および希釈トンネルの管内部壁面の付着物におけるOC/ECの構成比率は概ね同等であった。また、希釈トンネルの加熱温度である47℃で湧出するOC1は検出されず、排気導入管の加熱温度である190℃で湧出するOC2についても、わずかに含まれる程度である。すなわち、排気導入管や希釈トンネルの壁面付着物においては湧出しやすいと考えられる比較的軽質なOCがほとんど含まれていないため、トンネルブランク排出量にほとんど変化が生じなかったと推察される。

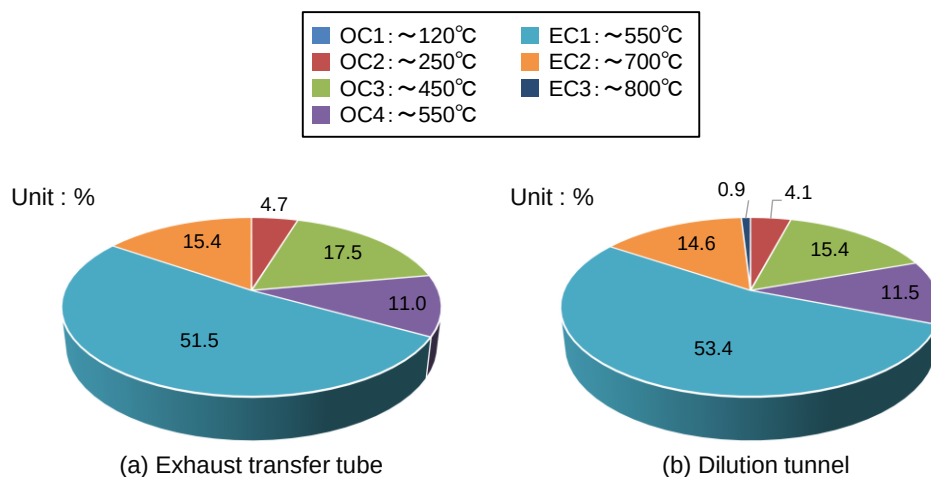


Fig. 3 排気導入管および希釈トンネル内の壁面付着物に対する OC/EC 分析結果
-加熱パターン 3 (排気導入管：加熱あり，希釈トンネル：加熱あり) -

3.2 排気導入管の加熱設定が PM 排出量に及ぼす影響

Fig. 4に排気導入管の加熱設定を変化させた際の汚し運転前後における車両試験でのPM排出量を示す。また、図中には測定バラツキ 1σ (mg/km) を記載し、()内には変動係数CoV (%) を併記した。汚し運転の前後を問わずに、排気導入管を加熱した場合と比較して、排気導入管を加熱しない場合ではPM排出量が大幅に減少した。この要因として、排気導入管を加熱しないことにより生じる水分の凝縮が挙げられる。すなわち、排気導入管を加熱しない場合にはテールパイプからの排出ガス中に含まれる水分が温度低下によって凝縮し、凝縮した水分内に排出ガス中のPMが取り込まれることで希釈トンネルに流入するPM量が減少したと推察される。現行の別添42においては、排気導入管に関して断熱材を用いるか、管を露点よりも高い温度または70℃以上に加熱することと規定されている。しかしながら、本試験結果のように断熱材を使用するのみでは凝縮水に起因したPMロスが発生し、PM排出量を過小評価する可能性があると考えられる。なお、排気導入管を加熱しない場合でも車両試験における排気導入管の壁温度は60～70℃であることを確認しており、別添42の70℃以上加熱という規定からも大きくは乖離していなかった。従って、現行の別添42における加熱規定では排気導入管において水分凝縮を十分に抑制し得るとは言えないため、加熱温度の規定を見直す必要があると考えられる。

次に、各加熱設定ごとに汚し運転前後のPM排出量および測定バラツキの変化にそれぞれ着目する。排気導入管を加熱した場合では汚し運転前後におけるPM排出量および測定バラツキに差異は見られず、この要因としてトンネルブランクレベルが汚し運転前後でほとんど変化していないことが挙げられる。一方で、排気導入管を加熱しない場合では汚し運転前と比較して汚し運転後では幾分PM排出量が増加している。これは、本測定前に汚し運転である0-100km/h加速運転を繰り返したことで排気導入管内の温度が高くなったことが挙げられる。すなわち、汚し運転により凝縮していた水分が蒸発することで、PMが凝縮水に取り込まれる影響が軽減されたと推察される。また、排気導入管を加熱した場合と同様に、汚し運転前後における測定バラツキの差異は小さい。

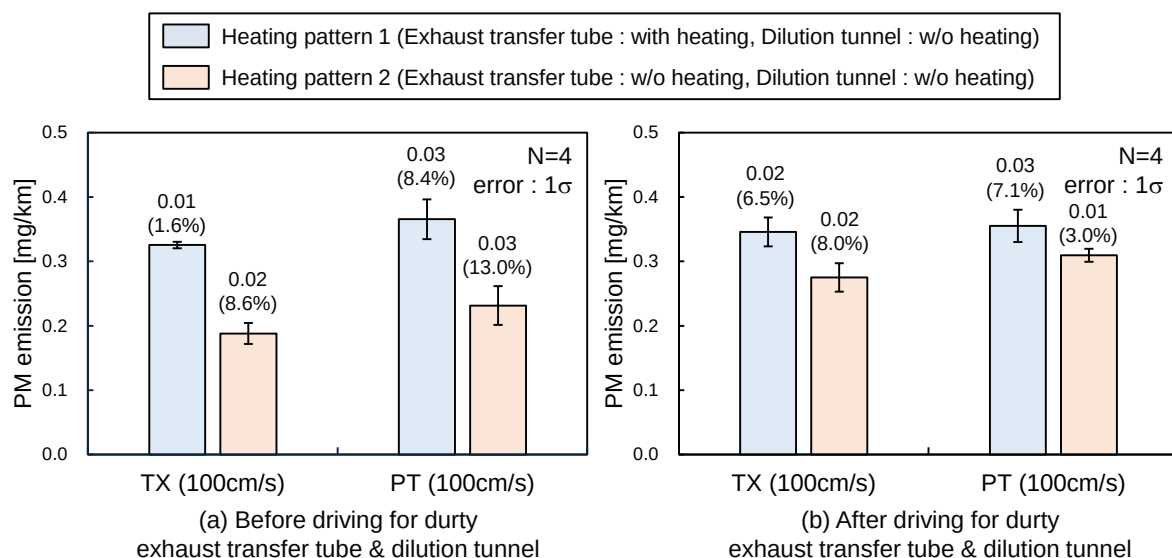


Fig. 4 排気導入管の加熱設定を変化させた際の汚し運転前後におけるPM排出量 (車両試験)

3.3 フィルタ面速度がPM排出量の測定精度に及ぼす影響

Fig. 5にフィルタ面速度を変化させた際のPM捕集重量, PM排出量およびCoVを示す. フィルタの種類によらず, おおむねフィルタ面速度に比例してPM捕集重量は増加しており, PM排出量に換算することでフィルタ面速度による差異はほとんど生じていないことがわかる. これより, 本試験のようにトンネルブランクレベルが非常に小さい状態ではフィルタ面速によるPM排出量への影響は顕在化しないと考えられる. また, フィルタ種類によらずフィルタ面速度を高めてもCoVはほとんど変化していないことが確認され, この要因としても試験時のトンネルブランクレベルが非常に小さいことが挙げられる. 一方で, 本結果に対しては排出ガス規制の強化に伴って車両からのHC排出量が少なくなっていることも寄与していると推察される. なお, CoVについてはTXフィルタのほうがPTフィルタよりも大きくなっているが, いずれも0.05mg/km以下 (本研究におけるPM排出量測定バラツキの許容上限値) であった.

以上より, トンネルブランクレベルが非常に小さい場合では80~150cm/sの範囲でフィルタ面速度を変化させてもPM排出量や測定バラツキに及ぼす影響はTXフィルタ, PTフィルタともに小さいことがわかった.

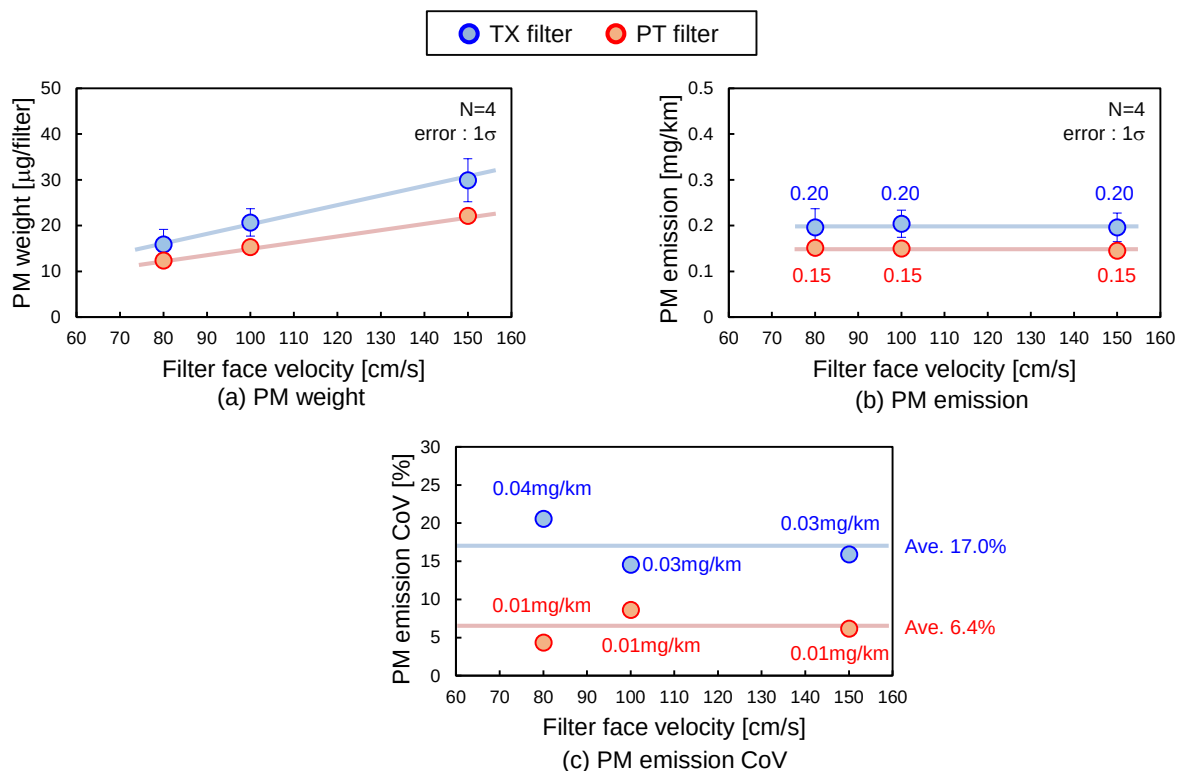


Fig. 5 フィルタ面速度が PM 排出量および測定バラツキに及ぼす影響 (車両試験)

3.4 別添 42 (軽・中量車排出ガスの測定方法) における改定案の検討

排気導入管における加熱温度の検討

本試験条件では排気導入管を加熱しなくても WLTC (ホットスタート) モード走行時の排気導入管の温度は 60~70℃程度であり, 別添 42 の 70℃以上加熱という規定からも大きくは乖離していなかった. しかしながら, 車両試験後には排気導入管内に凝縮水の発生が確認され, これに伴って PM 排出量を過小評価する可能性を指摘した. このことから, 現行の別添 42 における排気導入管の断熱および加熱に関する規定において, 排気導入管の加熱温度に関する見直しが必要であると考えられる. 水分凝縮を十分に抑制するためには当該部の温度が 100℃以上であることが好ましいと考えられるが, 当該部の温度に影響を及ぼすモード走行時の排出ガス流量や排出ガス温度のプロファイルが供試車両に依存することを勘案すると, より高温の加熱条件が適切と考えられる. また, 排気導入管における水分凝縮や排気管温度が HC 測定結果に影響を及ぼす懸念があり, 現行の別添 42 においても排出ガス分析計の HC 採取流路に対する加熱温度は 190℃ $\pm$ 10℃に規定されている. 以上より, PM 排出量測定および排出ガス測定の両観点から排気導入管を 190℃程度に加熱することが望ましいと考えられる.

メンブレンフィルタ使用時における課題への対策検討

一般に, メンブレンフィルタは帯電性が高いことに起因する秤量結果への影響が懸念されている. 著者らは各種フィルタに対する除電がフィルタ秤量結果に及ぼす影響を確認し, メンブレンフィルタである Teflo フィルタを秤量する際には十分に秤量対象が除電されていることを確認することが肝要であることを示した⁵⁾. また, Teflo フィルタは除電することで分銅や TX フィルタと同様に最大で 2 μg 程度の繰り返し秤量精度となることを確認した⁵⁾.

以上を踏まえると, Teflo フィルタや PT フィルタといったメンブレンフィルタを使用する際には分銅や TX フィルタと同程度の繰り返し秤量変動になるまで除電を施す必要があると言えるが, 帯電量と秤量変動

の定量的な相関関係は明らかとなっていない。そのため、別添 42 におけるメンブレンフィルタ使用時の帯電規定ではなく、除電後のメンブレンフィルタの繰り返し秤量変動が分銅や TX フィルタと同程度であることを確認した上で使用することが望ましいと考えられる。

PM 捕集時におけるフィルタ面速度範囲の検討

トンネルブランクレベルが非常に小さい場合 (0.02mg/km 未満) では 80~150cm/s の範囲でフィルタ面速度を変化させても TX フィルタ、PT フィルタともに PM 排出量や測定バラツキに及ぼす影響は小さかった。一方で、トンネルブランクレベルが幾分高い状態 (0.1±0.02mg/km 程度) においては、現行公定法に準拠した PM 捕集設定である TX フィルタ (フィルタ面速度: 100cm/s) の条件において PM 排出量の測定バラツキが 0.06mg/km であり、測定バラツキ 0.05mg/km 以下を満たさなかったことが確認された⁵⁾。そのため、トンネルブランクレベルが幾分高い状態においては、別添 42 に規定されるフィルタ面速度範囲である 20~105cm/s では、いずれのフィルタ面速度においても測定バラツキが大きくなる可能性が懸念される。これらの結果を踏まえると、トンネルブランクレベルに応じて測定バラツキ 0.05mg/km 以下となるフィルタ面速度が変化すると考えられ、多様なトンネルブランクレベルに対応するために別添 42 におけるフィルタ面速度の範囲を 80~150cm/s に設定することが望ましいと考えられる。

4. まとめ

本報告では、トンネルのブランクレベルの低減に対して排気導入管および希釈トンネルにおける加熱の影響を把握するため、各部の加熱設定を変化させた際のトンネルブランク測定および WLTC (ホットスタート) モード走行時の PM 排出量ならびに測定バラツキを解析した。また、別添 42 における改定案に関して排気導入管の加熱温度およびメンブレンフィルタ使用時における課題への対策および PM を捕集する際のフィルタ面速度の推奨範囲を検討した。得られた結果を以下に示す。

- ・排気導入管を加熱しない場合、テールパイプから排出された PM が排気導入管内の凝縮水分に取り込まれることで希釈トンネルに流入する PM 量が減少し、PM 排出量が過小評価される可能性がある。別添 42 への改定案として、PM 排出量測定および排出ガス分析計の両観点から、排気導入管を排出ガス分析計の HC 採取流路における加熱温度と同程度である 190℃程度に加熱することが望ましい。
- ・トンネルブランクレベルを高めるために種々の汚し運転を検討したが、いずれの加熱パターンにおいても汚し運転前後におけるトンネルブランクレベルは非常に小さく、排気導入管や希釈トンネルの加熱によるトンネルブランクの抑制効果に差異は見られなかった。また、トンネルブランクレベルが小さいことに起因して、PM 排出量測定における CoV に関しても加熱設定による差異は見られず、汚し運転の有無によらず測定バラツキは 0.05mg/km よりも小さかった。
- ・トンネルブランクレベルが非常に小さい場合では、80~150cm/s の範囲でフィルタ面速度を変化させても PM 排出量や測定バラツキに及ぼす影響は TX フィルタ、PT フィルタともに小さい。多様なトンネルブランクレベルに対して PM 排出量の測定バラツキを低減するため、別添 42 への改定案としてフィルタ面速度の範囲を 80~150cm/s に設定することが望ましい。
- ・メンブレンフィルタ使用時には除電後の繰り返し秤量変動が分銅や TX フィルタと同程度であることを確認した上で使用することが望ましい。

Table 3 に本研究で検討した別添 42 の改定案まとめを示す。

Table 3 別添 42 (軽・中量車排出ガスの測定方法) における改定案まとめ

Factor	Current regulation	Recommendation
Transfer tube heating	With heating ($\geq$ dew point or 70°C)	With heating (190°C target)
Neutralization for membrane filter media	Neutralization	Neutralization until weighing variability of membrane filter becomes equivalent to that of glass fibre filter or reference weight
Filter face velocity	20~105cm/s	80~150cm/s

5. 課題および展望

昨今の PM 排出量規制の強化に伴って車両からの PM 排出量は非常に少なく、今後は更なる低レベル PM 排出車両が認証試験を受けると想定されるため、従来よりは試験設備におけるトンネルブランクレベルの増加が緩慢化すると考えられる。一方で、特に希釈トンネルへの清掃を施すことが困難である設備状況では、従来のディーゼル車やガソリン車など様々な特性の排出ガスを流通させてきたことにより生じた高いトンネルブランクレベルを容易に解消することが難しい。このような状況下で低レベル PM 排出車両を試験すると、本報告における改定案のみでは測定バラツキの小さい PM 排出量測定が困難となる場合も想定される。今後も車両からの PM 排出量を高精度に測定するためには、PM 排出レベルに応じた試験環境や測定機器が必要であり、海外動向も踏まえながら測定方法自体の見直しが必要になる可能性がある。

参考文献

- 1) 松浦賢，土屋賢次：[フィルタ重量法によるPM測定方法の精度向上に関する研究（第1報）－エンジン試験における全量希釈トンネルでの検討－](#)，自動車技術会論文集，Vol. 37，No. 3，p.115-120 (2006)
- 2) 松浦賢，土屋賢次：[フィルタ重量法によるPM測定方法の精度向上に関する研究（第2報）－エンジン試験における全量希釈トンネルおよびマイクロトンネルでの検討－](#)，自動車技術会論文集，Vol. 38，No. 4，p.197-202 (2007)
- 3) 土屋賢次，松浦賢：[フィルタ重量法によるPM測定方法の精度向上に関する研究（第3報）－シャーシダイナモ試験における全量希釈トンネルでの検討－](#)，自動車技術会論文集，Vol. 38，No. 3，p.117-122 (2007)
- 4) Chris Tennant, Hector Maldonado: Very Low PM Mass Measurement, CRC Project Final Report, No. E-99 (2016)
- 5) 松本雅至，松浦賢：[1mg/mile未満のPM排出車両におけるフィルタ重量法の測定精度](#)，自動車技術会論文集，Vol. 51，No. 1，p.186-191 (2020)
- 6) David A. et al: [An Investigation of the Effect of Differing Filter Face Velocities on Pariculate Mass Weight from Heavy-Duty Diesel Engines](#), SAE Technical Paper, No. 960253 (1996)

Random Cycle Generator を用いた シャシダイナモメータ上での実路排出ガス評価手法の研究

Study of a real driving emission test using a random cycle generator on a chassis dynamometer

松岡 正紘 *1
Masahiro MATSUOKA

伊藤 貴之 *1
Takayuki ITO

相馬 誠一 *2
Seichi SOMA

羽二生 隆宏 *2
Takahiro HANIU

Abstract

Real driving emission regulations using portable emission measurement systems (PEMS) will be applied from October 2022 for light and medium-duty diesel vehicles in Japan. This means that during vehicle development it is more important to consider various situations. However, since an actual driving test depends on the surrounding traffic conditions and the weather, there is a high possibility that a test cannot be completed. For efficient vehicle development, it is necessary to develop an evaluation method that can simulate real driving emission in the laboratory. In this research, a random cycle generator (RCG) that can generate a real driving cycle that simulates various traffic situations was developed. Furthermore, the random cycle was run on an environmental chassis dynamometer. As a result, an alternative evaluation method for real driving emission (RDE) tests was proposed, which is not affected by actual traffic conditions or weather.

1. 背景と目的

大気環境保全の観点から、自動車の排出ガス規制は年々厳しいものとなってきた^{1),2)}。我が国においては、ディーゼル軽・中量車について、2022年10月より Portable Emission Measurement Systems (以下、PEMS) の車両搭載を前提とした、路上走行時のディーゼル軽・中量車排出ガスに関する技術基準 (以下、実路排出ガス試験法)³⁾ が適用される予定であり、実使用環境における排出ガスが評価の対象となる。車両開発においては、様々な実路の交通状況や環境を考慮した設計とすることが、これまで以上に重要となる。

しかしながら、実路での試験は周囲の交通状況や環境に依存するため、開発に必要な評価が常に実施できるとは限らない。また、実路走行試験を行うための車両への PEMS 搭載にも工夫が必要であり、工数増加の一因となっている。これらの課題を解決する効率的な車両開発手段として、実路ではなく利便性の高い実験室にて、様々な交通状況を模擬した実路排出ガス評価手法が求められている。

本研究では、この評価手法の一つとして、様々な交通状況を模擬した実路走行サイクルを生成可能な Random Cycle Generator (以下、RCG) を開発し、RCG により生成されたサイクルをシャシダイナモメータ上で走行することで、車両開発にも有用な実路排出ガス評価手法を提案することを目的とした。

2. RCGの開発

RCG の開発に関する既往研究としては、Kooijman らによる研究例⁴⁾ があり、WLTC⁵⁾ モード作成時のデータベースを基に、代表的な車速パターンを生成する RCG が開発されている。この研究では、排出ガス試験などでの利用が想定されて行われており、RCG の有用性が示されている。他方、RCG を車両開発に活

*1 一般財団法人日本自動車研究所 エネルギー・環境研究部 博士 (工学)

*2 一般財団法人日本自動車研究所 エネルギー・環境研究部

* 原稿受理 2020年9月10日

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士 (工学)

*2 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部

(2022年3月現在)

用することを想定した場合、RCGには、生成するサイクルの加速強度や走行距離・時間が調整できること、データベースに国内の実路走行データを用いることなどが求められる。

本研究では、車両開発におけるRCGの活用を念頭に、様々な交通状況の模擬を可能とするため、生成するサイクルの加速強度を調整できるようにRCGを設計した。また、本RCGのデータベースには、一般財団法人日本自動車研究所（以下、JARI）が保有する乗用車の実路走行データを用いた。

2.1 RCGでのサイクル生成方法

本研究で開発したRCGは、実路走行データのデータベースから抽出されたショートトリップ（1回の発進から停止までの区間のこと。以下、ST）を組み合わせることで、目標走行距離や時間に応じたサイクルを生成する。本RCGは、サイクルを生成する際に用いるSTやSTの組み合わせに任意性を有するロジックを用いることで、毎回異なるサイクルを生成することが可能となっている。

本研究で開発したRCGでのサイクル生成方法について、具体的な手順を以下の1～3に示す。

1. データベースから抽出したSTについて、最高速度が70 km/h未満のものとそれ以上のものに分類し、STの走行距離に対する累積頻度分布を取得する（Fig. 1 ①参照）。
2. 設定された目標走行距離や時間に応じて、サイクル生成に必要な数となる数のSTをFig. 1 ①から概ね等頻度間隔となるように選択する。例えば、70 km/h未満のSTから5個を選択してサイクルを作成する場合は、Fig. 1 ②のように10、30、50、70、90%タイルにおけるST（ST-1～ST-5）が、サイクルの生成に用いるSTの基準となる。ただし、本RCGでは、サイクル生成する際に用いるSTにランダム性を持たせるため、基準となるSTから前後で5%（70 km/h未満の全ST数の5%の個数）の幅でランダムにSTを選択することとした。
3. Idleについても、STと同じ要領でIdle時間を基準とした頻度分布を取得し、その頻度分布から、サイクル作成に必要なST数より一つ多い数のIdleを選択する。このように選択したSTとIdleを、IdleとSTが交互となるようにランダムに配置することで、RCGサイクルを作成した（Fig. 1 ③参照）。

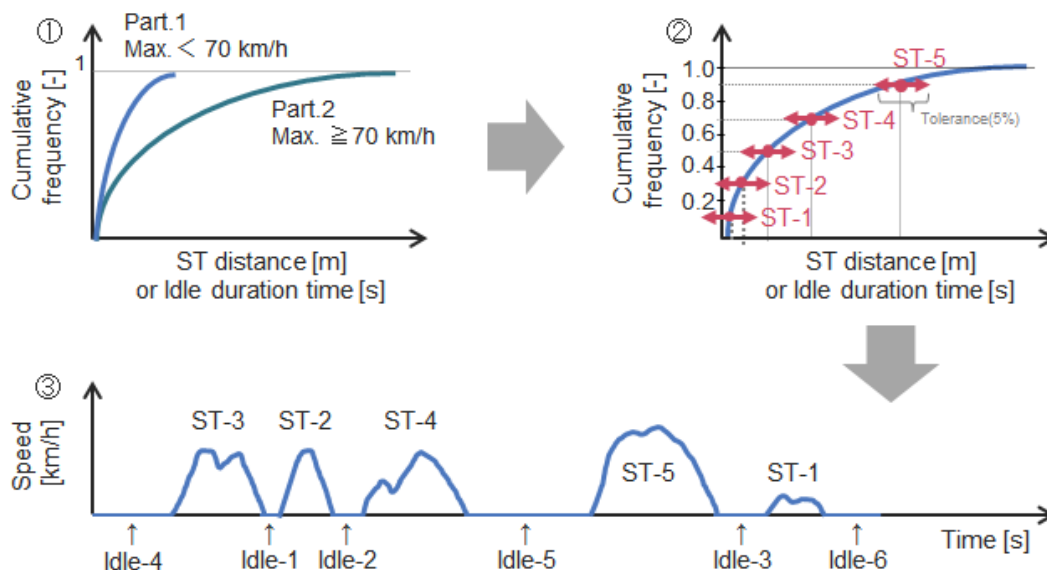


Fig. 1 Concept of designing the random cycle generator.

2.2 RCGサイクルの加速強度の調整

本 RCG では、サイクル生成に使用する ST の Relative Positive Acceleration (以下、RPA) とサイクルの Va95 を考慮することにより、生成するサイクルの加速強度を調整可能とした。

RPA は 式 (1) で求められる加速度の指標であり、この値が大きいほど加速が厳しい条件のサイクルとなる。

$$RPA = \sum(v \times a) / \sum v \quad [m/s^2] \quad \text{---(1)}$$

ここで、 v は瞬時速度、 a は正の瞬時加速度である。

また、Va95 はサイクル中の「速度×加速度(正)」の値を昇順にソートした際の 95% タイルの値である。

RPA, Va95 は、実路排出ガス試験法における実路走行試験の成立要件を判定する指標としても使用されている。RPA は加速度が低い走行をした場合に試験不成立とするための下限値、Va95 は加速度の高い走行をした場合に試験不成立とする上限値であり³⁾、実路走行試験ではこれらの要件を満足する必要がある。本 RCG では、サイクル生成に用いる ST に RPA と Va95 の閾値を設けることで、生成するサイクルの加速強度を調整可能とした。

2.3 RCGサイクルの試作

開発した RCG を用いて、加速強度の低い方から順に、RCG1, RCG2, RCG3 と称す三つの RCG サイクルを生成した。各 RCG サイクルの加速強度は、実路走行データより取得した走行区間毎の平均車速に対する加速強度分布を参考に、平均的な値 (WLTC モードより弱めの加速強度)、やや高め of 値 (WLTC モード相当)、高めの値 (WLTC モードより強めの加速強度) となるように設定した。なお、各 RCG サイクルの目標走行時間は、実路排出ガス試験法を参考に約 100 分間 (約 60 km) とした。

各 RCG サイクルの車速パターンを Fig. 2 に示す。また、各 RCG サイクルの RPA と Va95 を Fig. 3 に示す。なお、図中には、実路排出ガス試験法で定められている RPA の下限値と Va95 の上限値を併記した。Fig. 3 から、生成した三つの RCG サイクルはいずれも実路排出ガス試験法の成立要件として定められている RPA と Va95 の閾値を満足していることが確認できる。また、各 RCG サイクルの RPA と Va95 の大きさは、RCG3 > RCG2 > RCG1 となり、各サイクルの加速強度の調整も実現できている。参考として、Fig. 4 に各 RCG1 サイクルと WLTC モードの車速に対する加速度を示す。特に RCG3 では、WLTC モードに比べて加速度の絶対値や変化量が大きく、アグレッシブなサイクルとなっていることが確認できる。

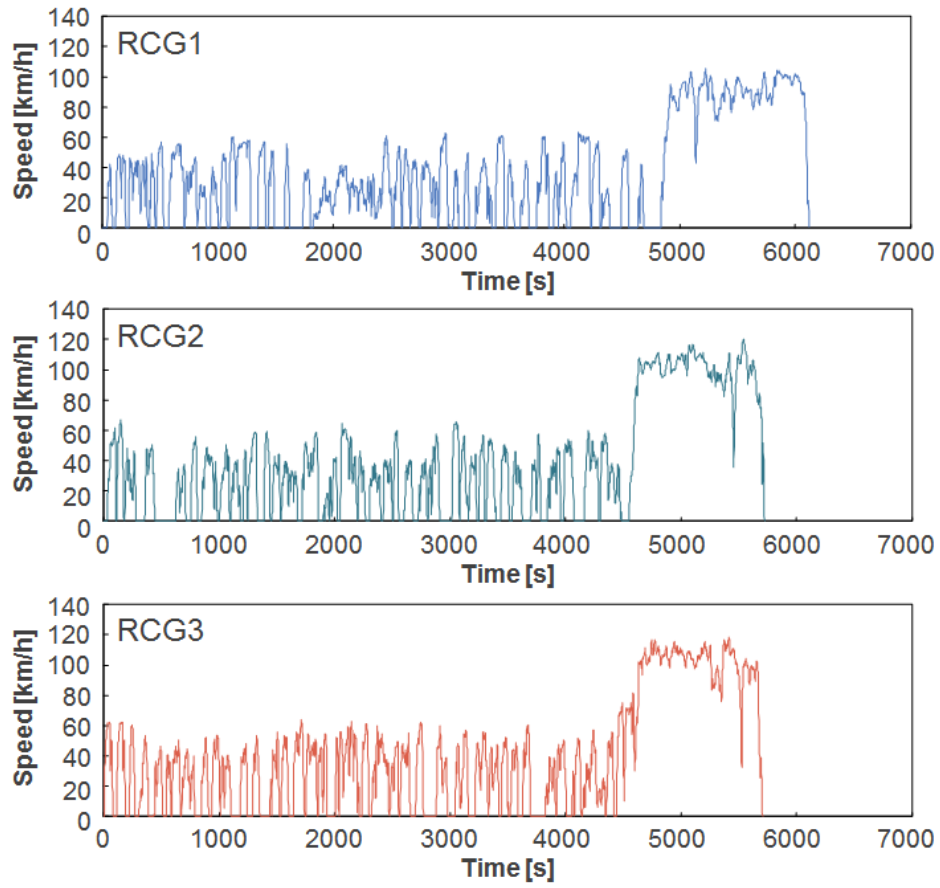


Fig. 2 RCG cycles 1, 2, 3 generated by the RCG.

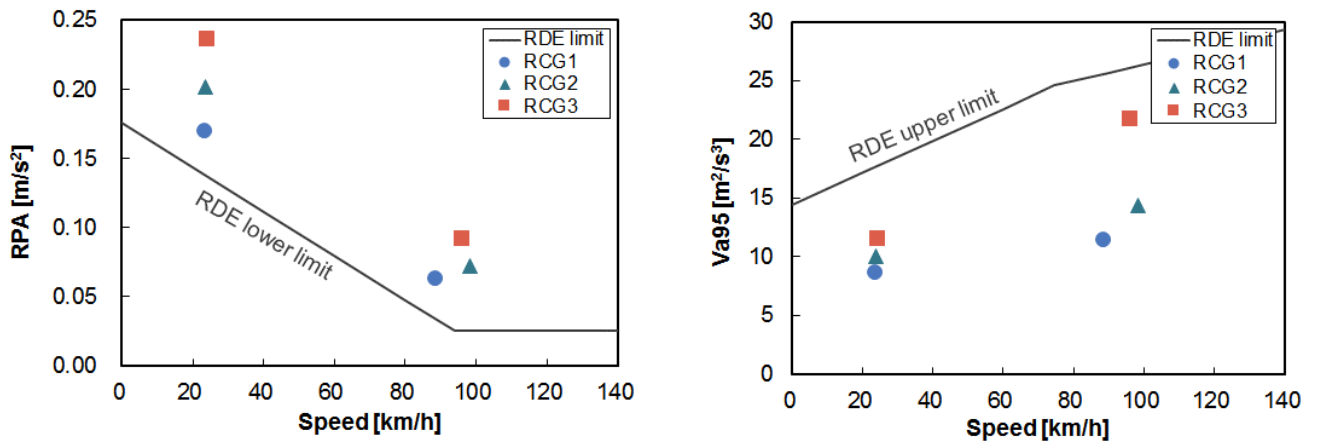


Fig. 3 Values of RPA and Va95 for each RCG cycle.

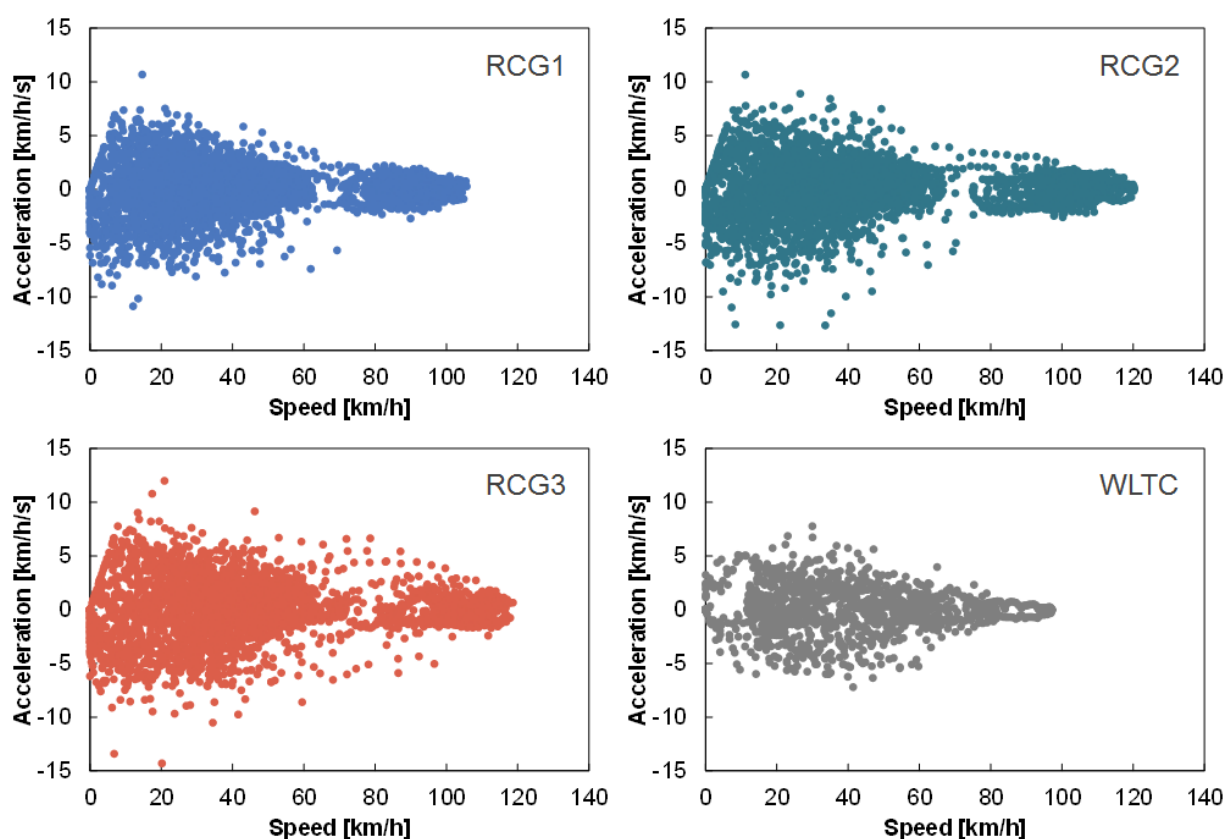


Fig. 4 Comparison of acceleration vs. speed for each RCG cycle and WLTC.

3. シャンダイナモメータ上でのRCGサイクル走行試験

開発した RCG を用いて生成した RCG1～3 をシャンダイナモメータ上で走行し、排出ガス計測を実施することで、RCG を用いたシャンダイナモメータ上での実路排出ガス評価の検証を行った。

3.1 試験車両と試験設備

供試車両には、ポスト新長期規制適合の、排気量 1,498 cc のディーゼル小型乗用車を用いた。供試車両の主な諸元を Table 1 に示す。主な排出ガス低減対策は、排出ガス再循環装置 (Exhaust Gas Recirculation: 以下, EGR) , ディーゼル酸化触媒 (Diesel Oxidation Catalyst: 以下, DOC) , ディーゼル微粒子除去装置 (Diesel Particulate Filter: 以下, DPF) である。RCG サイクルの加速強度を大きくした際には、エンジン負荷の増大に伴い、排出ガス中の窒素酸化物 (以下, NO_x) が増加すると考えられる。本試験では、主に各 RCG サイクル走行時の NO_x 排出量の変化に注目した。

試験設備には、JARI の環境型シャンダイナモメータを用いた。環境型シャンダイナモメータの設備諸元を Table 2 に、また、その外観を Fig. 5 に示す。本環境型シャンダイナモメータは環境温度を -40～+50℃、日射条件などを設定することができ、幅広い環境条件における排出ガス試験への対応が可能である。各 RCG サイクルの排出ガス試験は、WLTC モードの通常試験温度である 23℃の環境温度で、車両暖機後に実施した。また、RCG3 については、より現実に近い使用条件を想定し、15℃の環境温度で、冷間始動、日射あり、エアコン ON の条件でも試験を実施した (以下, RCG (15℃))。

Table 1 Test vehicle specifications

Test vehicle	Vehicle type	Passenger car
	Emission regulation year	2009
	Length [mm]	4060
	Width [mm]	1695
	Height [mm]	1525
	Ride capacity [persoms]	5
	Vehicle weight [kg]	1130
	Gross vehicle weight [kg]	1405
Engine	Fuel	Diesel
	Cylinderes, Valves	L4, DOHC
	Compression ratio	14.8
	Displacement [cm3]	1498
	Max. power [kW/rpm]	77/4000
	Max. torque [N · m/rpm]	250/1500-2500
	Engine features (NA/Tc)	Tc
	After Treatment System type	EGR + DOC + DPF
Transmission	Transmission type	6AT
	Forward	3.552~0.599
	Back	3.389

Table 2 Specifications of the environmental chassis dynamometer

4WD Light vehicle Enviromental Chassis Dynamometer		
Environment	Temperature (°C)	-40 ~ 50
	Humidity (%RH)	30~90 (10 ~ 40°C)
	Solar radiation (W/m ²)	400 ~ 1200 (METAL HALIDE)
Chassis dynamometer	Roller diameter (mm)	1219.2 (48 inch)
	Roller width (mm)	800
	Maximum vehicle speed (km/h)	180
	Roller material	Aluminum alloy, surface(tungsten carbide)
	Inertia range (kg)	454~4000(2WD), 454~4000(4WD)
	Type	FC-DY
	Rated power (kW)	220(absorption), 200(drive)
	Engine cooling fan	Equivalent vehicle speed type, 160 km/h, 1867 m3/min
	Manufacturer	MEIDEN



Fig. 5 Appearance of the environmental chassis dynamometer.

3.2 各RCGサイクル走行時のNOx排出量

各 RCG1～3 をシャシダイナモメータ上で走行した際の NOx 排出量を Fig. 6 に示す。また、Fig. 7 に、各 RCG サイクル走行時の NOx の Conformity Factor (以下、NOx-CF) を示す。NOx-CF とは、NOx 排出量の規制値に対する比であり³⁾、実路排出ガス試験法での排出ガス評価に用いられる指標である。この値が 1.0 以下である場合には、規制値よりも低エミッションといえる。

Fig. 6、Fig. 7 から、各 RCG サイクルを走行した際の NOx 排出量は、加速強度が大きいほど増加する傾向がみられ、走り方や環境条件によって大きく変化することがわかる。特に、Fig. 7 で示される NOx-CF は、比較的加速強度の小さい RCG1、RCG2 では全体的に 1.0 を下回るものの、加速強度の大きい RCG3 では 1.0 を超過する状況が確認できる。また、RCG3 と RCG3 (15℃) を比較すると、環境温度や車両暖機状態、エアコン負荷などが NOx-CF に影響を及ぼしていることがわかる。

今回の評価では、実路走行試験で RCG2 程度の加速強度で走行が行われた場合には余裕を持って基準を満足するが、RCG3 程度の加速強度での走行を想定した場合には超過する結果が得られた。2.3 で示したように、RCG3 は WLTC モードに比べて極端に加速度の高いサイクルではあるものの、実路排出ガス試験法の要件の範囲内であるため、排出ガス低減の対策が必要といえる。以上のように、本研究では、新たに提案した「RCG を用いたシャシダイナモメータでの実路排出ガス評価手法」を用いて、様々な走行条件（車速パターン、環境温度、車両条件）における排出ガスを効率的に評価し、本手法が、実路排出ガス対応への開発ツールとして活用できる可能性を示すことができた。

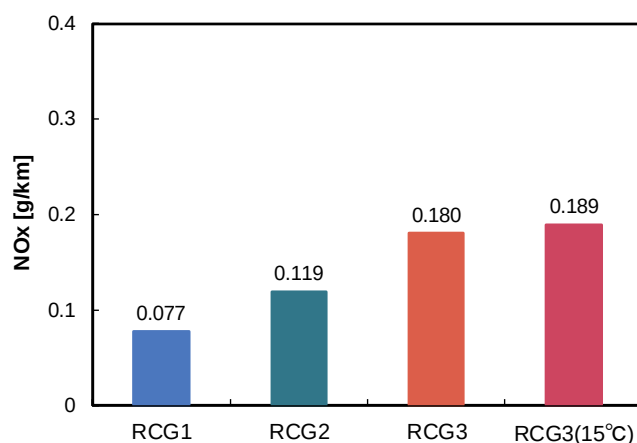


Fig. 6 Comparison of NOx emissions in each RCG cycle.

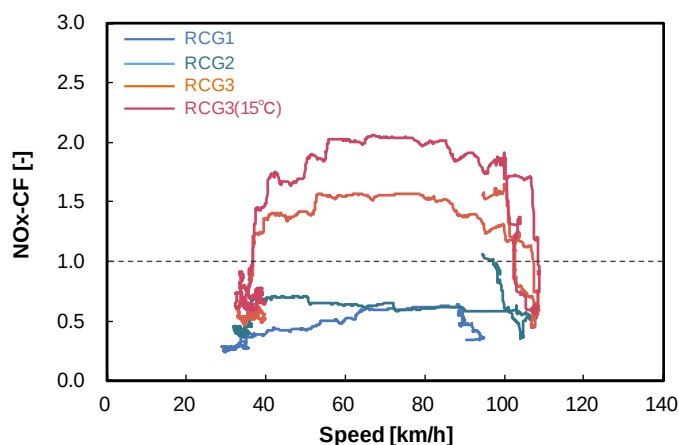


Fig. 7 Comparison of NOx-CF in each RCG cycle.

4. まとめ

本研究では、実路走行試験を行うことなく、シャシダイナモメータ上で実路排出ガス評価を実施可能な手法を構築することを目的とし、実路走行サイクルを生成可能な RCG を開発した。この RCG により生成したサイクルを実際にシャシダイナモメータ上で走行し、排出ガス評価を検証することで、実際の道路状況や環境温度などに左右されない、実路走行試験の評価手法を提案した。本手法は、様々な走行条件（車速パターン、環境温度、車両条件）における排出ガスを効率的に評価することを可能とし、実路排出ガス低減のための有用なツールとして活用できることが示された。

5. 今後の展望

開発した RCG は JARI のオリジナルプログラムであり、様々な閾値変更やパラメータの追加などを柔軟に変更できる。このため、実路走行試験の評価目的に応じた車両開発に適用することが可能である。また、RCG は環境型シャシダイナモメータと組み合わせることで、環境温度や日射条件をも考慮した、よりリアルワールドに近い環境での試験を実施することが可能と考えられる。今後は、RCG の機能向上や環境型シャシダイナモメータ活用方法の検討を進め、シャシダイナモメータでの実路排出ガス評価手法を発展させたい。

参考文献

- 1) Josh Miller, Li Du, Drew Kodjak. "[IMPACTS OF WORLD-CLASS VEHICLE EFFICIENCY AND EMISSIONS REGULATIONS IN SELECT G20 COUNTRIES](#)", (2017).
- 2) 国土交通省.「[新車に対する排出ガス規制について、自動車排出ガス規制の経緯](#)」, https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_tk10_000002.html
- 3) 国土交通省.「[道路運送車両の保安基準の細目を定める告示 別添119 路上走行時のディーゼル軽・中量車排出ガスに関する技術基準](#)」, (2018.3)
- 4) Dennis G. Kooijman, Andreea E. Balau, Steven Wilkins, Norbert Ligterink, Rob Cuelenaere. "WLTP Random Cycle Generator", 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, (2015).
- 5) 国土交通省.「[道路運送車両の保安基準の細目を定める告示 別添42 軽・中量車排出ガスの測定方法](#)」, (2018.3)

吸入試験のための簡易なナノマテリアルの飛散方法の検討

Examination of a Simple Airborne Dispersion Method of Nanomaterials for Inhalation Exposure Testing

伊藤 剛^{*1}
Tsuyoshi ITO

阿久津 康生^{*2}
Yasuo AKUTSU

萩野 浩之^{*3}
Hiroyuki HAGINO

1. はじめに

欧州委員会（European Commission, EC）は、2011年のREACH規制（2011/696）¹⁾で初めてナノマテリアルについて定義し、その後、2018年12月3日に改定したREACH規制（2018/1881）²⁾では、ナノフォームとして「構成粒子が固定されていない状態の粒子や、凝結体または凝集体であり、個数に基づいたサイズ分布のうち50%以上が、少なくとも一つの次元のサイズにおいて1 nmから100 nmの範囲である粒子を含む、自然由来あるいは人工的に製造された物質を指す」と再定義した。この定義の範疇に含まれる様々な材質および形状のナノマテリアルがこれまでに開発されており、その特性を活かし、工学や医学など幅広い分野で活用されている。その一方、ナノマテリアルは極めて微小であることから、生体内に取り込まれやすく、身体全身に拡散されることが懸念され、さらに、表面活性が高い材質の場合は、その比表面積が高いことから、微量でも生体に悪影響をおよぼすことが危惧されている。新たに開発されたナノマテリアルが従来にない優れた機能を持つ一方、その新たな機能により従来知られていない有害性が現れる可能性を否定することはできない。そのため新機能の有用性に関する情報のみならず、安全性に関する情報がなければ、新しいナノマテリアルを安心して使用することはできない。ナノマテリアルの法規制については、欧米を中心にルール作りが積極的に進められており、とくに欧州域内に新規のナノマテリアルを輸出する場合、REACH規制に則り、手続きする必要があるが、安全性に係わる情報の取得は必須とされている。

改定されたREACH規制（2018/1881）では、ナノマテリアルは極めて微小であるため特異的な曝露パターンを持つ可能性があり、その曝露経路として吸入が重要であることが指摘されている。しかし、ナノマテリアルの吸入曝露試験の実施は難しく、懸濁液（固体微粒子が分散した液体）の気管内投与による安全性試験が実施されているのが現状である。ナノマテリアルの気管内投与と吸入曝露を比較し、肺で認められる影響に差がないことを示す報告もあり、気管内投与の実験結果は貴重で有用と思われる。しかし、懸濁液の気管内投与では、液体としての投与であり、溶媒の影響が含まれること、また、鼻腔に曝露されず、嗅神経を経由した脳への影響を含まないこと、鼻腔の粒子に対する防御機能が考慮されないことなどの理由から、現実のナノマテリアルの吸入曝露による気道および肺への影響を一部反映できていない可能性がある。これらのことから、現実の環境での曝露経路として想定される吸入曝露によるナノマテリアルの安全性試験の実施が期待されている。

これまでに報告されているナノマテリアルの吸入曝露試験では、主な曝露方法として、ナノマテリアルを溶媒に懸濁し、超音波処理によりミストとして飛散させ、サーモデニューダーで乾燥させることで、固体の粒子として吸入させる方法がある。曝露物質を濃縮可能な優れた方法ではあるが、溶媒にナノマテリアルを懸濁させることで成分が溶出したり、加熱により変性し、形態が変化する可能性もあり、ナノマテリアルの性質によっては必ずしも適切な方法ではない可能性がある。その他にも様々な手法が検討されているが、多種多様な粒子への汎用性、簡便性、安定性、再現性など、多くの課題が残されている。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士(医学)

*2 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部

*3 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士(工学)

* 原稿受理 2021年12月10日

そこで本研究では、実験動物にナノマテリアルを吸入曝露させるための現実的で簡便な方法を本研究所において構築することを目的に、振動によりナノマテリアルを飛散させ、曝露する実験系を構築し、ナノマテリアルの吸入曝露試験のための本手法の適用可能性について検討した。

2. 方法

2.1 ナノマテリアルの吸入曝露のための簡易な実験系の作製

本研究では、実験動物にナノマテリアルを吸入曝露させるための現実的で簡便な方法を本研究所において構築することを目的としており、できる限り特別な装置を使わず、再現しやすい簡易な実験系の構築を重視し、振動を利用したナノマテリアルの飛散方法を検討することとした。

高濃度の微小なナノサイズの物質は、大気中でブラウン運動により物質同士が衝突を繰り返すことで凝集する。ナノマテリアルの製造現場等の空間では、ナノマテリアルが高濃度で存在し、凝集の過程も含んでいると思われる。その凝集もナノマテリアルの特性の一部であり、生体への取り込まれやすさや有害性の発現に少なからず影響をおよぼすと考えられる。ナノマテリアルの毒性メカニズムの研究として、粒子を分散させ、その影響を詳細に解析することは不可欠ではあるが、今回は安全性試験としてのナノマテリアルの飛散方法の検討を目的としており、凝集の過程も含んだ曝露手法として検討した。

ナノマテリアルは極めて微小であるが、静置した状態では自然に飛散することはないため、ナノマテリアルに振動を加え、舞い上がったナノマテリアルを送気により曝露ボックス内に送り込む方法を検討することとし、以下を用い、簡易な実験系を試作した（図1）。

- ① ポンプ (GA380V-DA, 榎本マイクロポンプ製作所社)
- ② ボルテックスミキサー (SI-0286, サイエントフィックインダストリーズ社)
- ③ 粒子攪拌容器 (直径 90 mm × 高さ 118 mm)
- ④ 流量計 (RK1650, KOFLOC 社)
- ⑤ アクリル製マウス用曝露ボックス (300 mm × 300 mm × 100 mm, 9 L)
・ 容積 : 9 L
・ 換気回数 : 13回/時
- ⑥ NILU フィルターホルダー (外寸 70 mm × 90 mm, 東京ダイレック社)
- ⑦ BOLA 製チューブ (送気用, 直径 8 mm)

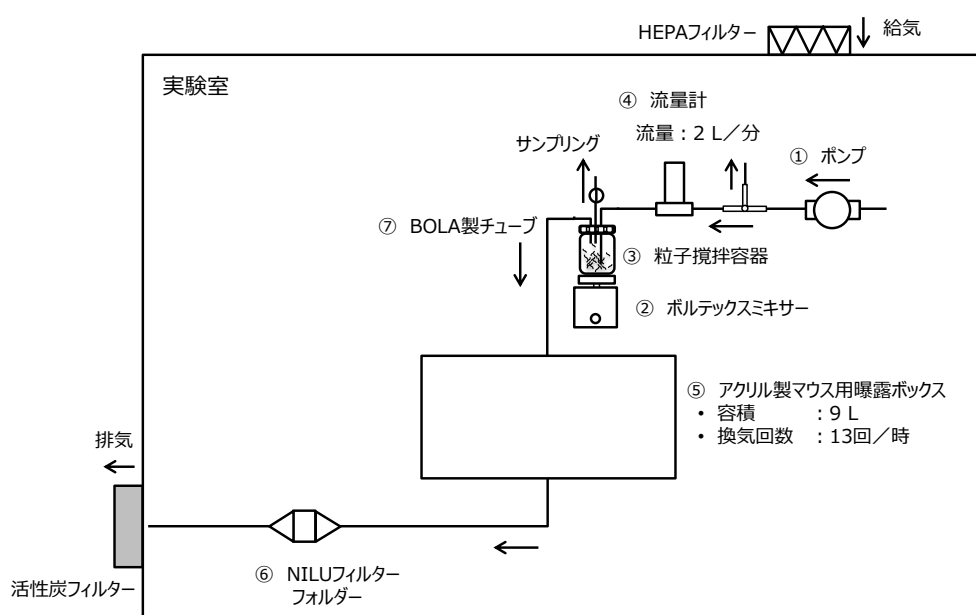


図1 ナノマテリアルの吸入曝露のための簡易な実験系

2.2 ナノマテリアルの飛散および計測

飛散方法の検討に、ナノ繊維の一つであるセルロースナノファイバー (Cellulose Nanofiber, CNF) を用いることとし、食品添加物として利用されているCarboxymethylated Cellulose Nanofibrils (Spray-dried, Cotton material Dry, CNF-CM-SD-C, Cellulose Lab) を選択した。このCNFは、幅：10～13 nm、長さ：1000～3000 nmであり、少なくとも一次元が100 nm以下というナノマテリアルの定義に含まれている。

CNF 10 gを粒子攪拌用容器に入れ、ポンプおよび流量計を用い、2 L/minで送気した。今回は、振動によるCNFの飛散の様子を確実に把握するために、粒子攪拌用容器内で飛散したCNFを直接サンプリングし、簡便な計測装置として光散乱方式の質量濃度計であるパーティクルマスモニター (GT-331, 柴田化学株式会社) を用い、CNFの質量濃度を粒径別に計測した。

計測は、室内空気 (バックグラウンド, BG) , CNFを入れた粒子攪拌用容器を静置した状態、1回強振した直後の状態、ボルテックスミキサ (弱：0, 中：5, 強：10) で振動を与えている状態、の各条件でサンプリングし、CNFを粒径別に、0.5～1.0, 0.5～2.5, 0.5～7, 0.5～10 μm , 総浮遊粒子状物質 (Total Suspended Particles, TSP) の質量濃度を計測し、さらに、0.5～1.0, 1.0～2.5, 2.5～7, 7～10, >10 μm の粒径範囲毎の質量濃度を算出した。

3. 結果

室内空気 (BG) , 粒子攪拌用容器を静置した状態、一度強振した直後の状態の粒子の質量濃度を計測した結果を図2に示す。BGの粒子の質量濃度はおよそ0.01 mg/m^3 であった。粒子攪拌用容器を静置した状態での容器内の粒子の質量濃度は、BGとほぼ同値であった。粒子攪拌用容器を、一度強振した直後の状態では、1～2.5 μm の粒径において、30 mg/m^3 の質量濃度の粒子が計測された。<1 μm , あるいは、>2.5 μm の粒子は、1～2.5 μm の粒子よりも質量濃度としては低かった。さらに、容器を振った5分後には、ほぼ静置と同じ質量濃度まで低下した。

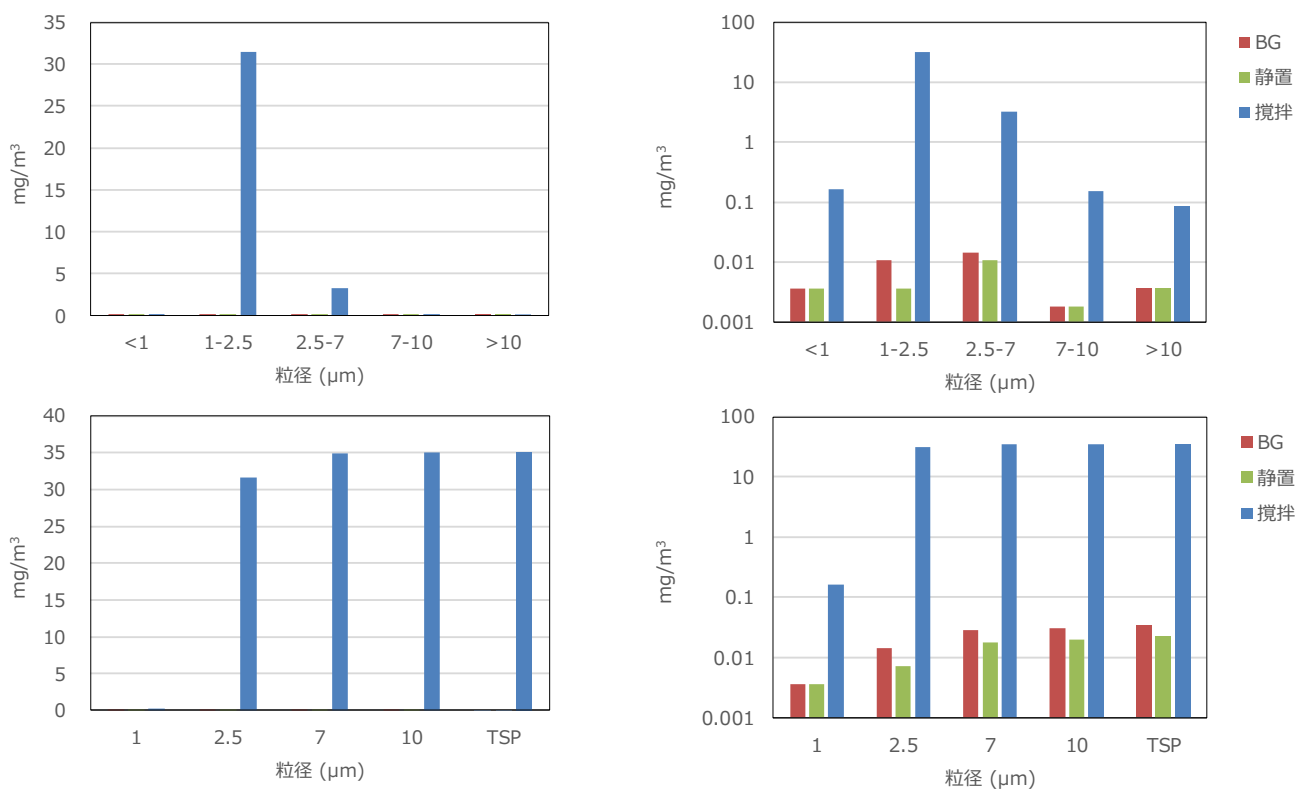


図2 粒子攪拌用容器内のCNFの質量濃度 (1回攪拌)
(上段：粒径範囲，下段：カットオフ粒径，左図の縦軸は線形表記，右図の縦軸は対数表記)

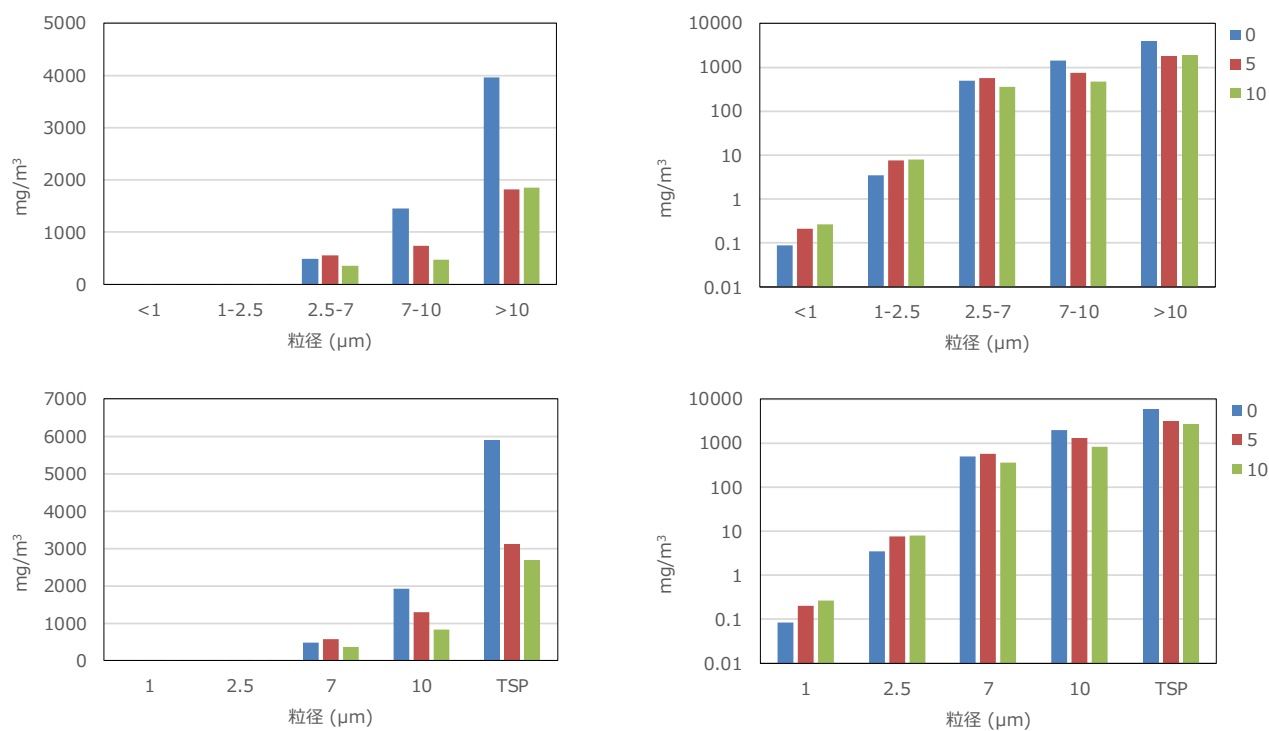


図3 粒子攪拌用容器内のCNFの質量濃度 (継続的振動)
(上段：粒径範囲，下段：カットオフ粒径，左図の縦軸は線形表記，右図の縦軸は対数表記)

4. 考察

日本政府は、日本のナノテクノロジーの国際競争力を強化するために、これまでナノマテリアルの研究開発を推進し、その戦略により様々な高機能のナノマテリアルが開発されてきた。その開発されたナノマテリアルを世界的に展開するためにはREACH規制等に対応する必要がある、たとえ有益な材料であっても、安全性試験は不可欠である。

近年ではナノマテリアルの中でも、CNFがその機能性の高さから注目を集めている。セルロースは植物細胞の細胞壁および植物繊維を主成分とする炭水化物であり、化粧品や食物添加剤として使用されていることから、基本的には有害性はない、あるいは低いと考えられている。しかし、セルロースをナノマテリアルとして加工することで従来にはない高い機能が備わったように、その形態を変化させることで従来知られていない有害性が出現する可能性が考えられる。

CNFは様々な分野で活用されており、液相で製造され、懸濁液の状態で供給されている製品もある。そのため、CNFの懸濁液を用いて経皮吸収による皮膚組織への影響を評価することは、現実的な曝露経路を反映した評価として適切である。一方、粉体のCNFの呼吸器系への影響については、これまで主にラットへの懸濁液の気管内投与により評価が進められてきた。しかし、親水性の高いCNFに水を加えるとスラリー状になるため、その状態で気道に取り込まれることは考えにくく、CNFによる呼吸器への影響として最も懸念されるのは、乾燥した粉体のCNFの吸入毒性であると思われる。そのため、粉体のCNFの安全性試験を実施するためには、CNFの吸入曝露試験が必要であり、CNFを飛散させる手法が必須である。そこで本研究では、実験動物にナノマテリアルを吸入曝露させるための現実的で簡便な方法を本研究所において構築することを目的に、簡易にナノマテリアルを飛散させ、曝露する実験系を構築し、ナノマテリアルの吸入曝露試験への本手法の適用可能性を検討した。

はじめに、CNFを入れた容器を1回強振し、粒子濃度を計測した。その結果、1~2.5 μm の粒径において、30 mg/m^3 の濃度の粒子が計測され、<1 μm 、あるいは、>2.5 μm の粒子の質量濃度は相対的には低かった。最も高い質量濃度が1~2.5 μm で観察されたのは、CNFの長さが1000~3000 nmであることからおおむね妥当と思われ、この条件ではあまり凝集していない印象であった。

CNFの懸濁液のラット気管内投与実験では、1 mg/mL 程度の濃度のCNF懸濁液およそ200 μL が投与されている。このラット気管内投与による肺胞面積当たりの粒子の沈着量と同レベルの沈着量を吸入曝露試験で実現するには、肺胞表面積、呼吸量、肺表面への粒子沈着率（20 %換算）、曝露時間（4時間設定）を基に概算すると、ラットで19.5 mg/m^3 、マウスで3.8 mg/m^3 の粒子濃度が必要と計算される。今回認められた30 mg/m^3 の濃度があればこれらの濃度は調整可能であり、吸入曝露による安全性評価のために必要な質量濃度レベルの吸入曝露試験が本手法で達成できると思われた。ただし、容器を強振した5分後には、ほぼ静置の状態と変わらない濃度まで低下した。このことから、この条件で吸入曝露試験を実施する場合、およそ4時間の曝露時間にわたり、定期的に容器内のCNFを飛散させなければならず、何かしら安定的に粒子を飛散させるための工夫が必要と思われた。

次に、安定的に粒子を飛散・曝露する方法として、簡易にボルテックスミキサーを使用する方法を検討した。その結果、ボルテックスミキサーの振動強度に関係なく、大きい粒径の粒子が多く観察され、>10 μm の粒子は1.5~4 g/m^3 であり、極めて高い質量濃度レベルが確認された。しかし、1~2.5 μm の粒径の粒子は、10 mg/m^3 以下の質量濃度であり、大きい粒子と比較して相対的に低かった。ボルテックスミキサーの使用により、高濃度のCNFを飛散させることが可能ではあるが、一方、強い振動を加えることで、CNFが凝集する可能性が示された。現実的な曝露レベルを想定し、適した曝露濃度および粒径となるように振動の強度、頻度、時間など、さらに検討する必要があると思われた。

今回はナノマテリアルの飛散方法として、ボルテックスミキサーを活用した簡易な振動法を試行した。精

度の高いナノマテリアルの曝露法を目指す場合には、高価な装置、複雑な操作の手間および時間、熟練した技術者が必要になると思われる。そのような手法を標準化した場合、その技術は普及しにくく、ナノマテリアルの安全性に係わる情報収集の遅れを招くことが心配される。不正確な吸入曝露試験の実施は許容できないが、実際の曝露条件を正確にモニターすることを重視し、ナノマテリアルの飛散方法は出来る限り簡便な手法を選択し、積極的に吸入曝露試験を推し進めることが重要と思われる。今回の検討により、簡便な実験系を構築し、高濃度の粒子を飛散させることが可能であり、その有用性を確認することができたと判断した。しかしながら、今回の手法はあくまで試行段階であり、ボルテックスミキサーを活用した極めてプリミティブなものである。実際に安定的に吸入曝露試験を実施するためには改善・確認すべき点がまだ多く残されており、実験系の洗練化、再現性の確認など、さらに進めていく必要がある。

計測法については、簡易なパーティクルマスモニターを用いることでCNFのおおよその粒径と濃度分布を把握することができた。しかし、この計測法では、微小粒子 (<0.5 μm) は計測範囲に含まれず、個数濃度分布に関する情報は得られない。ナノ粒子の計測に広く利用されている走査式モビリティパーティクルサイザー (SMPS) と光散乱粒子計数装置 (OPC) を組み合わせた、10 nm~10 μm のCNFの粒径分布を把握する試みが行われている。今回用いたCNFは、幅：10~13 nm、長さ：1000~3000 nmであることから、SMPSとOPCの組合せによる広い粒径範囲を網羅した測定方法が必要となる。

以上のことから、簡易な手法として振動によりナノマテリアルを飛散させ、曝露する実験系を本研究所において構築し、ナノマテリアルの吸入曝露試験への本手法の適用可能性が示された。今後さらに実験系を洗練化し、曝露条件の再現性を確認する必要がある。

参考文献

- 1) European Commission: [COMMISSION RECOMMENDATION of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial](https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:275:0038:0040:EN:PDF), Official Journal of the European Union L275: 38 (2011)
<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:275:0038:0040:EN:PDF>
- 2) European Commission: [COMMISSION REGULATION \(EU\) 2018/1881 of 3 December 2018](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1881&from=EN), Official Journal of the European Union L 308/1 (2018)
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1881&from=EN>

JARI における AICE 研究成果の紹介

AICE Research Achievements in JARI

伊藤 貴之 *1

Takayuki ITO

松野 真由美 *1

Mayumi MATSUNO

松岡 正紘 *1

Masahiro MATSUOKA

松本 雅至 *1

Masashi MATSUMOTO

林 誠 司 *2

Seiji HAYASHI

北村 高明 *1

Takaaki KITAMURA

1. はじめに

自動車用内燃機関技術研究組合¹⁾（以下 AICE と記す）は、国内自動車メーカーが協調して自動車用内燃機関に関する共通課題を設定し、大学・研究機関の英知により研究を推進するという産学連携に取り組んでいる。JARI は AICE の設立から関与し、2014 年 4 月の AICE 設立以来は、AICE 活動の運営を担う組合員として、また、AICE が推進する基礎応用研究の実施者として AICE 活動に参画している。特に研究面では大学等国内研究機関と連携し、いくつかの研究テーマでは研究リーダーとして取りまとめをおこなうことにより、成果の導出に貢献してきた。また、経済産業省主導で推進されている自動車に関するモデルベース開発²⁾（MBD：Model Based Development）の普及についても、JARI は AICE と連携して推進している。ここでは、JARI が主体となって推進して得られた研究成果、ならびに MBD 推進活動について紹介する。

2. JARI が実施した AICE 研究の成果紹介

JARI は AICE 研究事業において、主として自動車排出ガス後処理技術の向上に関する研究を大学等国内研究機関と連携して推進し、多くの成果を得てきた。ここではその一部を紹介する。

2.1 DPF 再生時のオイル希釈予測モデル³⁾

排出ガス規制の強化により、ディーゼル機関への排出ガス後処理装置の装着が進んでおり、とりわけ Particulate Matter（PM）の除去を目的とした Diesel Particulate Filter（DPF）は多くの車両で採用されている。DPF に堆積した PM は、定期的に高温ガスを供給することで、燃焼除去する必要がある。その手法として、筒内ポスト噴射方式が普及している。この方法は酸化触媒（DOC）への未燃炭化水素（HC）供給用の特別な燃料噴射弁が不要であるなどの優れた面がある一方で、低温・低圧雰囲気場に噴射された燃料がシリンダ壁に付着することで、オイル希釈が進むなどの課題がある。本研究では、ポスト噴射によるオイル希釈のメカニズムを明らかにするとともに、オイル希釈率推定方法の確立を目的とした。

オイル希釈率の推定には、Fig. 1 に示すように、ポスト噴射による（i）軽油成分の壁面付着、（ii）壁面付着軽油のピストンリングを介したオイルパンへの輸送とオイルへの混入、（iii）オイル中に混入した軽油成分の蒸発、といった各現象を把握することが重要となる。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 エネルギー・環境研究部 博士（工学）

*2 一般財団法人日本自動車研究所 エネルギー・環境研究部

* 原稿受理 2019 年 11 月 10 日

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士（工学）

*2 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部

(2022 年 3 月現在)

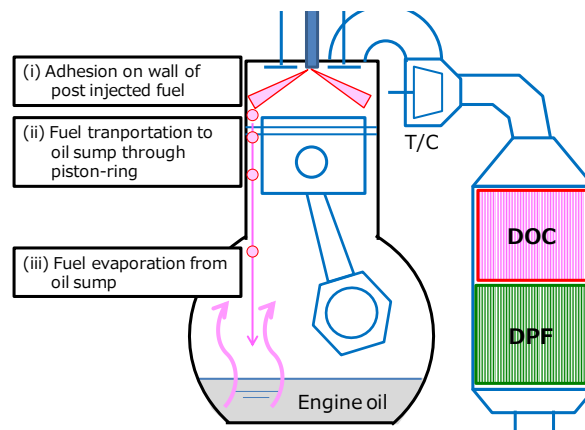


Fig. 1 ポスト噴射によるオイル希釈のメカニズム

そこで、AICE のワーキング内において、ポスト噴射時相当の低温・低圧雰囲気における噴霧発達と壁面付着燃料量を推定可能なポスト噴霧モデルが構築された⁴⁾。JARI においては、オイル中に混入した燃料成分の蒸発速度について実機を用いて調べ、その実験式モデルを構築した。これをポスト噴霧モデルと連成させることで、DPF 再生時のオイル希釈と通常運転時における希釈オイルからの燃料蒸発現象を再現可能とし、エンジン実使用時におけるオイル中の燃料含有率を推定する方法を構築した。

本研究で構築した推定方法の精度を確認するため、Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC) の low phase の再生運転 2 回と WLTC 通常運転 4 回を 1 セットとして、これを 10 セット繰返した際のオイル中の燃料含有率について実験値と計算値で比較した結果を Fig. 2 に示す。計算値は、実験値をやや過大に評価する傾向があるものの、オイル中の燃料含有率の変化を良く再現できている。

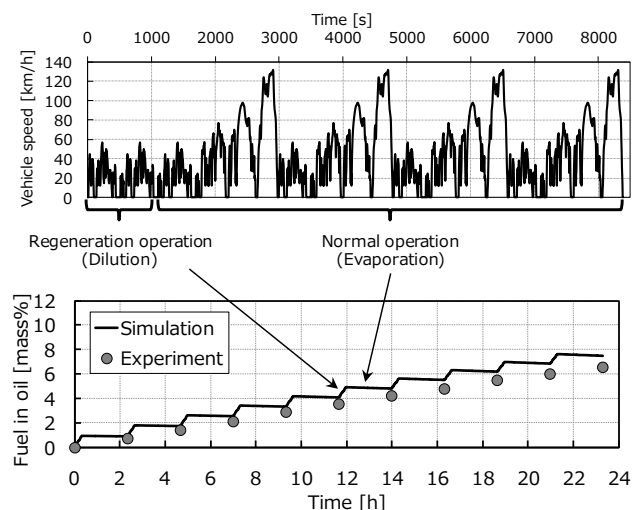


Fig. 2 オイル中の燃料含有率のシミュレーション結果例

2.2 アッシュ加速堆積手法

上述のように、DPF に堆積した PM 中のスートは定期的に燃焼除去されるが、エンジンオイル添加剤由来の金属成分は焼失せずに DPF 内にアッシュとして残存する。DPF 内にアッシュが堆積していくことで圧力損失挙動が変化し、PM 燃焼制御に影響を及ぼすため、アッシュ堆積形態を決定する因子の特定、およびアッシュ堆積形態と圧力損失との関係を明確にする必要がある。

エンジンベンチを用いたアッシュ堆積サンプル作製や市場サンプルの回収には長期間を要するため、本研究においては、英国 Cambustion 社製の連続燃焼式の軽油バーナーを搭載したディーゼル粒子発生器（DPG: Diesel Particulate Generator）を用いてアッシュ加速堆積試験を実施している。DPG の概略を Fig. 3 に示す。本装置はディーゼルバーナーの A/F 制御により、スート発生量を任意に制御可能で、最大 20 g/h のスートを発生させることが可能である。JARI では、ディーゼルバーナー火炎へのオイル噴射によるアッシュ生成が可能となるよう、独自に改良している。また、フィルタ前段に三元触媒（TWC）およびディーゼル酸化触媒（DOC）を設置するなど、配管レイアウトも容易に変更できる。アッシュ加速堆積試験では、アッシュ生成の指標となる硫酸灰分を市販のエンジンオイルの 5 倍～10 倍に高めた濃縮オイルを用い、約 80 °C に温調したオイルを軽油拡散火炎に間欠噴射することによりアッシュを生成させる。本試験システムでは、アッシュ発生量（オイル消費量）を任意に設定することができる。また、DPF 内アッシュ堆積分布は再生開始時に DPF 内に堆積しているスート量を変えることにより制御することができる。（Fig. 4）

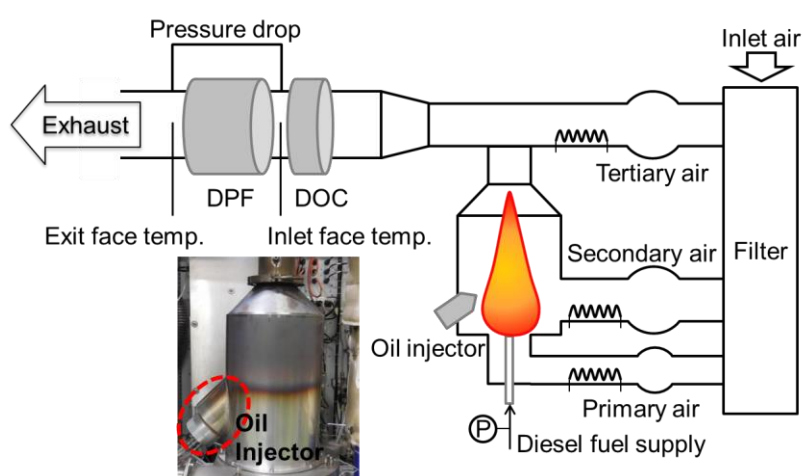


Fig. 3 DPG の概略図

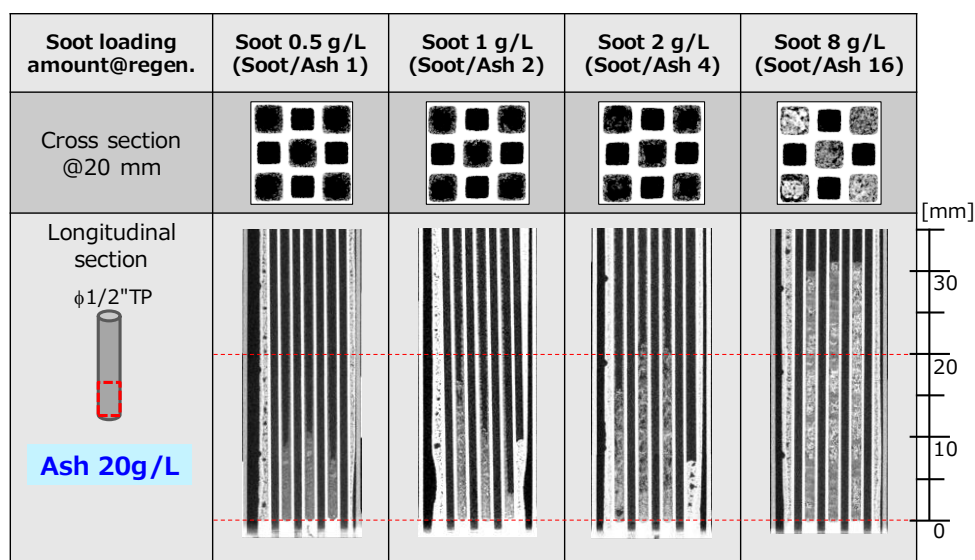


Fig. 4 強制再生時に DPF 内に堆積しているスート量によるアッシュ堆積形態の違い
(1/2 インチテストピース縦断面の X-ray CT 画像)

本研究においては、スートおよびアッシュ堆積時のコールドフローによる通気抵抗やスート堆積時の圧損評価に加え、フィルタ内堆積アッシュの構造解析も実施している。マクロ構造については、X線CTスキャンを用いたアッシュ堆積状態の評価およびアッシュかさ密度分布評価^{5),6)}、ミクロ構造については、アッシュ透過率や空隙率、粒径分布などから検討している。また、カットフィルタを用いて再生時のPM燃焼およびアッシュ輸送挙動を高速カメラを用いて撮影し、アッシュ堆積メカニズムを検討した^{7),8)}。

今後ガソリン車においても排出ガス規制強化の対策としてガソリン微粒子フィルタ（Gasoline Particulate Filter: GPF）の導入が進むと考えられる。そのため、現在はガソリンエンジン実機相当の試験条件実現に向けて、EGR（Exhaust gas recirculation）オプションを追加し、理論空燃比近傍での燃焼条件の作りこみなどGPF評価条件の拡大について検討中である。

2.3 HNCO標準ガス生成装置⁹⁾

ディーゼル車の排出ガス規制強化により、特にNO_x排出量を低減させることを目的として、尿素SCRシステムなどの高度な後処理装置の導入が進んでいる。新たな規制では、適合すべき運転領域が拡大することから、システム設計に用いられるNO_x浄化予測モデルについては、より一層の高精度化が求められている。尿素SCR触媒システムにおいては、とくに、噴射された尿素水からのNH₃生成過程に不明確な点があり、NO_x浄化予測モデルの高精度化には、これを明らかにしてモデルに組み込むことが重要である。

そのひとつとして、尿素水からのNH₃生成過程において、中間生成物として生じるイソシアン（HNCO）の加水分解反応の解明がある。HNCOは標準物質が市販されておらず、その計測手法が確立されていないのが現状である。このため、HNCOの加水分解反応に関する研究例は少なく、それらの研究においても、HNCOの定量計測手法が不明なものが多い。

そこで、本研究では、HNCO濃度計測法を確立してHNCO加水分解反応速度を計測し、モデルに反映することを研究目的とした。

ここでは、HNCO濃度計測法を確立するために構築した「HNCO標準ガス生成装置」について紹介する。

本研究では、シアヌル酸を熱分解させて生成したHNCOを急速冷却して、液体状態で捕集した（Fig. 5参照）。ここでの課題は温度管理であり、気体のHNCOを重合しない程度の高温（350℃以上）に保ち、そこから-78℃に急冷することで液体のHNCOを取得した。なお、実験で用いるガス状のHNCOは、この液体のHNCOにN₂ガスを流通させて得ることとした。

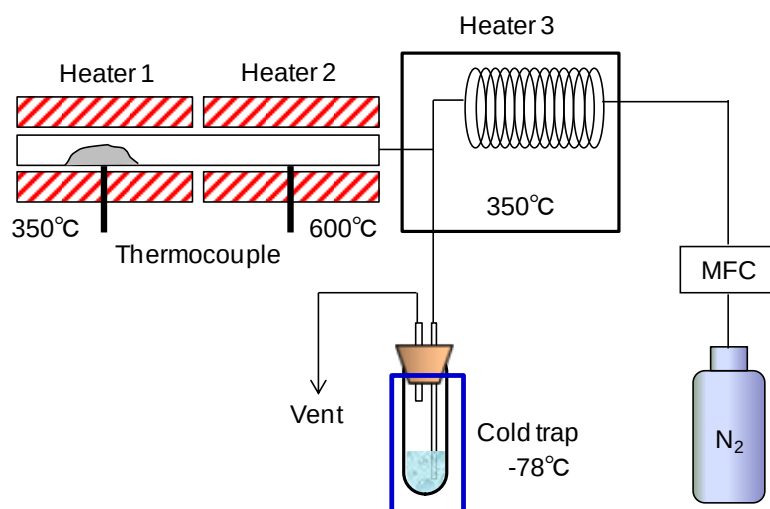


Fig. 5 HNCO 発生の概略図

液体の HNCO より得られる HNCO ガスの純度を確認するため、PTR-MS (Proton Transfer Reaction Mass Spectrometer) を用いて HNCO ガスの質量スペクトルを、FT-IR(Fourier transform infrared spectrometer) を用いて赤外線吸収スペクトルを取得した (Fig. 6 参照)。質量スペクトルをみると、HNCO の質量数 43 に対応する信号強度は他の質量数の信号強度よりも 6 桁以上大きく、信号強度から計算される HNCO の純度は 99.5 %であった。また、赤外線吸収スペクトルからも他成分ガスの混入はみられないことが確認できた。

以上の高純度な HNCO 標準ガス生成により、HNCO の定量計測が可能となり、実験から HNCO 加水分解反応速度を求めることを可能として、NO_x 浄化モデルの高精度化への貢献も果たしている。

また、ここで構築した HNCO 標準ガス生成装置については、特許を取得している。

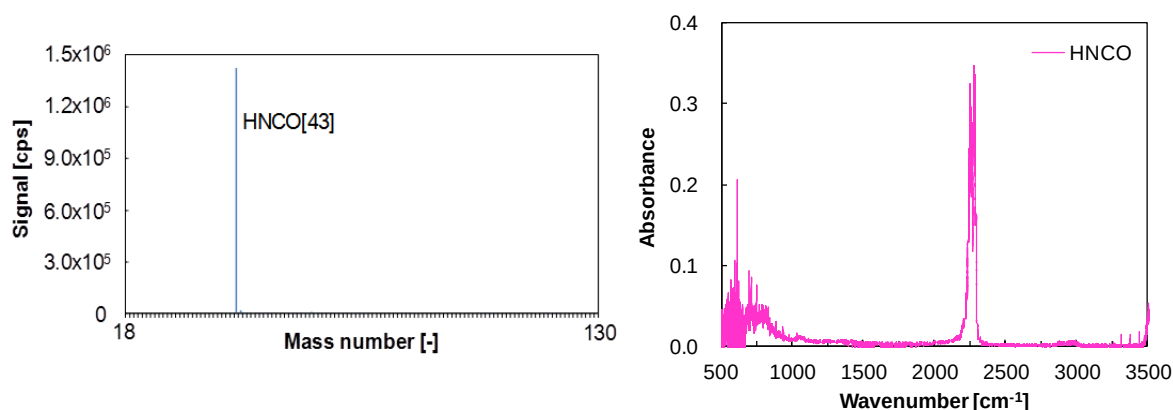


Fig. 6 HNCO ガスの純度確認 (質量スペクトル: PTR-MS と赤外線吸収スペクトル: FT-IR)

2.4 白煙評価方法

ディーゼル乗用車は市場における使用状況や燃料性状により、未燃の炭化水素や硫黄分に由来する白煙を排出することがある。2014～2016 年度に実施した白煙抑制技術研究においては、白煙発生メカニズムを解明し、排気エミッションを犠牲にすることなく白煙を画期的に低減することを目的に研究活動を実施した¹⁰⁾。

本研究課題においては、白煙という見た目を如何にして定量的に評価するかが重要である。そのため、本研究では白煙観察に特化した可視化ボックスを作成し、排出挙動をビデオカメラで撮影した後に画像解析することで見た目の定量化を実現した。

Fig. 7 に白煙可視化ボックスの外観を示す。ボックス上面には LED ライトを設置しており、テールエンドから排出される白煙に起因する散乱光をボックス側面に設置した観察窓を介してビデオカメラで撮影可能としている。また、テールパイプの挿入口はテールパイプ径よりも大きく設計されており、ブロワーにより排出ガスと同時に大量の実験室内空気を吸引可能な構造とした。これにより、可視化ボックス内で排出ガス温度を急激に低下させ、テールエンドでの白煙の発生を実現している。



Fig. 7 白煙可視化ボックスの外観

画像解析において、ビデオカメラで撮影された白煙画像に対して背景画像を差し引くことで得られる白煙由来の輝度値を白煙排出量として評価する。Fig. 8に白煙排出挙動の解析例と撮影画像例を示す。本システムでは瞬時の白煙排出挙動のみならず積算の白煙排出量も評価可能である。

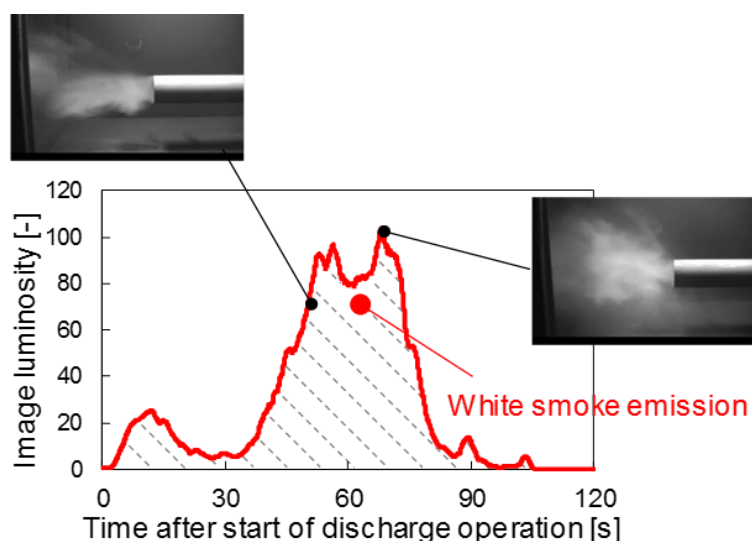


Fig. 8 白煙排出挙動の解析例

これらの研究は、AICE 組合員である自動車メーカー、共同研究企業である部品サプライヤなどの技術者が参加するワーキンググループにおいて技術検討や結果解析をともにこない、推進された。その成果は AICE 組合員等に共有され、各社内の開発で有効に活用されている。

3. JARIにおけるMBD推進活動について

自動車の開発効率化には、試作・実験を減らしてシミュレーション技術により開発・性能評価のプロセスを進める MBD が有効であるが、MBD は、自動車メーカーや一部の部品メーカーが対応している程度で、サプライチェーン一体となった MBD の浸透が課題である。経済産業省では MBD の有効活用として統一的な考え方に則ったモデルで企業内および企業間のすり合わせ開発を高度化する「SURIWASE2.0」構想を推進し、自動車産業の国際競争力をより高める取組みを進めている。

このような官民が一体となり目指している自動車産業全体での MBD 活用について、開発手法の普及や

高度化を進めるため、2019年4月にJARIエネルギー・環境研究部「MBD推進グループ」が新設された。MBD推進グループは、内燃機関分野のMBD活用についてAICEと密接に連携を取りながら、最新の物理式を組み込んだサブモデル構築、モデルの精度検証・実用検証やモデルの管理、ならびに、講習会の開催やユーザーサポートなどのMBD普及に向けた活動を進めている。

4. おわりに

欧州を中心に「脱内燃機関」に向けた動きが加速されつつあり、IEA（国際エネルギー機関）の技術普及シナリオでは内燃機関のみを搭載する車両が減少し、代わりに電動車両が拡大することが予測されている。しかし、電動車両の大半は内燃機関を利用するハイブリッド車が占めることから、内燃機関は将来にわたり自動車の有力な動力源であり続けることは変わらない。JARIはAICEとの連携を深め、今後も内燃機関に関する基礎応用研究を推進し、さらには開発効率化に向けたMBD普及の活動を進めていく。

参考文献

- 1) [自動車用内燃機関技術研究組合](http://aice.or.jp) : <http://aice.or.jp> (2019.11.11)
- 2) [経済産業省ニュースリリース \(2017年3月31日\)](https://www.meti.go.jp/press/2016/03/20170331010/20170331010.html) : <https://www.meti.go.jp/press/2016/03/20170331010/20170331010.html> (2019.11.11)
- 3) Ito, T. et al, [Prediction of Oil Dilution by Post-injection in DPF Regeneration Mode](#), SAE 2019-01-2354
- 4) 小島宏一ほか, [DPF再生時のポスト噴射によるオイル希釈率の推定 \(第1報\)](#), 自動車技術会論文集, Vol.50 No.5, pp.1230-1235 (2019)
- 5) 薄井 陽ほか: [ディーゼルパティキュレートフィルタ内のアッシュ堆積および輸送に関する研究\(第1報\) -X線CT撮影によるアッシュ堆積密度分布の定量化-](#), 自動車技術会論文集, Vol.49 No.6, pp.1193-1198 (2018)
- 6) 松野真由美ほか: [ディーゼルパティキュレートフィルタ内のアッシュ堆積および輸送に関する研究 \(第2報\) -強制再生頻度がアッシュ堆積分布に及ぼす影響-](#), 自動車技術会論文集, Vol.49 No.6, pp.1199-1204 (2018)
- 7) 松野真由美ほか: [ディーゼルパティキュレートフィルタ内のアッシュ堆積および輸送に関する研究 \(第4報\) -アッシュ輸送の観察およびアッシュ堆積形態の詳細解析-](#), 自動車技術会2019年春季学術講演会講演予稿集, No. 20195141 (2019)
- 8) Mayumi Matsuno and Takaaki Kitamura, [Direct Visualization of Soot and Ash Transport in Diesel particulate Filters during Active Regeneration Process](#), SAE2019-01-2287.
- 9) Matsuoka, M. et al., [Kinetic Measurements of HNCO Hydrolysis over SCR Catalyst](#), SAE 2018-01-1764
- 10) Masashi Matsumoto and Takaaki Kitamura, [Mechanism of White Smoke Generation Derived from Hydrocarbons Accumulations on Diesel Oxidation Catalyst](#), SAE 2018-01-0641

自動運転の安全性評価を狙いとしたシナリオ分析用 交通外乱データ収集技術（定点カメラ観測）

－第1報：基本フレームの構築／軌跡精度の予測と検証－

Traffic Disturbance Data Collection Technology for Scenario Analysis for the Purpose of Safety Evaluation of Automated Driving (Fixed Point Camera Observation)

－1st Report: Construction of a Basic Framework, Prediction and Verification of Trajectory Accuracy－

中村 英夫*¹ 古田 暁広*² 横山 洋児*²
Hideo NAKAMURA Akihiro FURUTA Youji YOKOYAMA

1. はじめに

周辺監視義務をシステムが有する高度な自動運転車（レベル3以上¹⁾）を早期に社会実装するためには、安全性を確実に担保できる評価手法が必要である。自動運転のレベル定義を Table 1 に示す。欧州では PEGASUS プロジェクト²⁾や Horizon2020³⁾ に代表される産官学が協調して自動運転システムの評価プロセスの標準化を進める動きが活発化しており、自国の道路交通事情を中心に評価プロセスの構築を推進している。したがって、日本でも国内の交通事情を鑑みた安全性評価のプロセスや手法の研究開発を進める必要がある。このような背景で、経済産業省からの委託事業である「自動走行システムの安全性評価技術構築に向けた研究開発プロジェクト（2018年度～）」^{4),5)}（SAKURA プロジェクト⁶⁾）では、まずは一般量産車の自動運転（レベル3以上）を対象として、国際動向を踏まえつつ、自動運転システムの安全性評価に必要なプロセスと評価手法の開発と検証を行っている。具体的には、シナリオベースの安全性評価手法を検討しており、シナリオおよび紐づく各種パラメータの妥当性を裏付ける実交通環境データの収集と分析も行っている。また、社会実装が比較的に早いとされる高速道路や自動車専用道路を当面の対象としている。特に、衝突リスクに影響する複数車両の相互関係に係る交通外乱データ（車線変更や加減速など）の収集を実施している。本事業では、計測車両と定点観測の二つの方法で交通外乱データを収集しているが、本稿では定点観測による交通外乱データの収集、画像処理を使った軌跡データ抽出と精度予測／検証、データ収集状況を紹介する。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 ITS研究部

*2 パナソニック株式会社 コネクティッドソリューションズ社

* 原稿受理 2020年12月10日

*1 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部

(2022年3月現在)

Table 1 自動運転レベル定義

NHTSA レベル	SAE レベル	SAE 名称	操舵／加速／減速 の実行主体	走行環境 監視	バックアップ主体 (緊急時)	システム 能力
0	0	Non-Automated 非自動化	ドライバ	ドライバ	ドライバ	制約あり
1	1	Assisted 支援	ドライバ＋ システム (加減速or操舵)	ドライバ	ドライバ	制約あり
2	2	Partial Automation 一部自動化	システム (加減速＋操舵)	ドライバ	ドライバ	制約あり
3	3	Conditional Automation 条件付自動化	システム (加減速＋操舵)	システム	ドライバ	制約あり
4	4	High Automation 高度自動化	システム (加減速＋操舵)	システム	システム	制約あり
	5	Full Automation 完全自動化	システム (加減速＋操舵)	システム	システム	制約なし (ドライバ必要なし)

2. 交通流定点観測の過去事例

近年、多くの交通研究者によって、交通流のカメラ映像収集、および、車両軌跡（車両位置の時系列データ）への変換が試みられている．Fig. 1はTRB 2007 Annual Meetingで紹介された文献⁷⁾からの引用であり、連邦道路管理局が推進したプロジェクトでの定点映像収集風景と画像処理データである．高層ビル屋上に、固定または三脚設置した複数カメラで撮影している．画像はオルソ変換（視点を真上へ移動させる座標変換）した後と思われる．どの車両の認識枠も実際とはかなりズレているが、特にトレーラのように車高が高い大型車両は、二車線に跨るほど車形が大きく変形して認識枠のズレも大きい．処理途中かもしれないが、車両軌跡（車両位置）を正確に把握することの難しさの一端が読み取れる．

なお、この文献には、参考文献として、ヘリコプター、飛行機、道路インフラなどにカメラを設置して交通流の映像データを収集して分析した他事例も多く紹介されている．

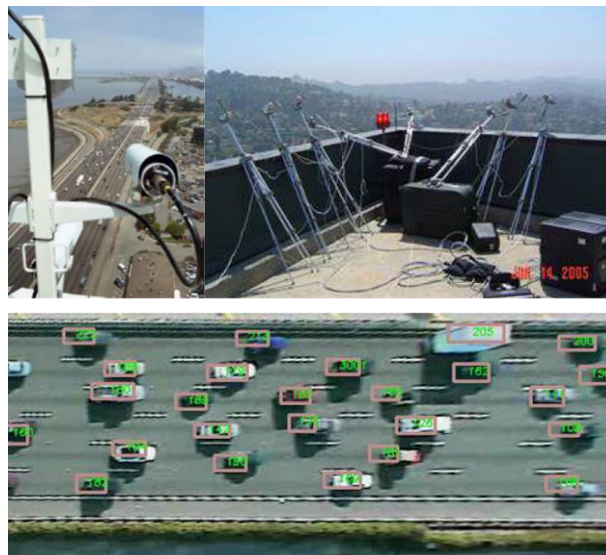


Fig. 1 ビル屋上からの定点観測風景
(TRB 2007 Annual Meeting の文献⁷⁾より)

3. 定点観測の特徴整理

定点観測による交通流データ収集の一般的な特徴（利点と課題）を Table 2 に示す。

Table 2 定点観測の特徴

項目	利点	課題
自然な交通データ	ドライバに特別な意識をさせないデータ収集	—
場所に起因した特徴あるデータ	道路構造に起因した特徴あるデータを効率良く収集	—
道路構造の把握	道路構造の把握が容易（限定されたエリア）	—
観測エリア毎のデータ収集	観測エリアにいる複数の交通参加者の挙動データを収集	観測エリアを広げるには複数カメラと労力が必要
オクルージョン	撮影場所に大きく依存（高い場所が望ましい）	撮影場所に大きく依存（高い場所が望ましい）
撮影場所の確保	—	借用交渉に労力（隣接ビルやインフラの所有者の許可が必要）

4. 撮影スタイル

首都高速の場合は、道路が高架で隣接ビルがある場合が多く、要件（道路構造など）を満たす箇所に隣接する民間ビル屋上を借用して撮影した。都市間高速の場合は、要件を満たす箇所はもとより道路に隣接するビルはほとんど無く、道路上に掛かる橋梁や土手上にカメラを三脚設置して撮影した。（Fig. 2 参照）これらは公道であるため管轄の警察署に事前に「道路使用許可申請」を行った。

監視員が付いて約 8 h 程度の撮影を行う場合は、複数のカメラ（4 K, 60 fps）を公道上で三脚設置して市販の同期保存システムで撮影した。（Fig. 3 参照）無人で 1 week 連続で撮影する場合は、複数のネットワークカメラ（4 K, 30 fps）を隣接するビル屋上に工事が不要な試作治具で取付けて、クラウド経由で同期させて保存する試作システムを使って撮影した。（Fig. 4 参照）無人 1 week 連続撮影は、ニアミスデータの収集を主目的に実施した。

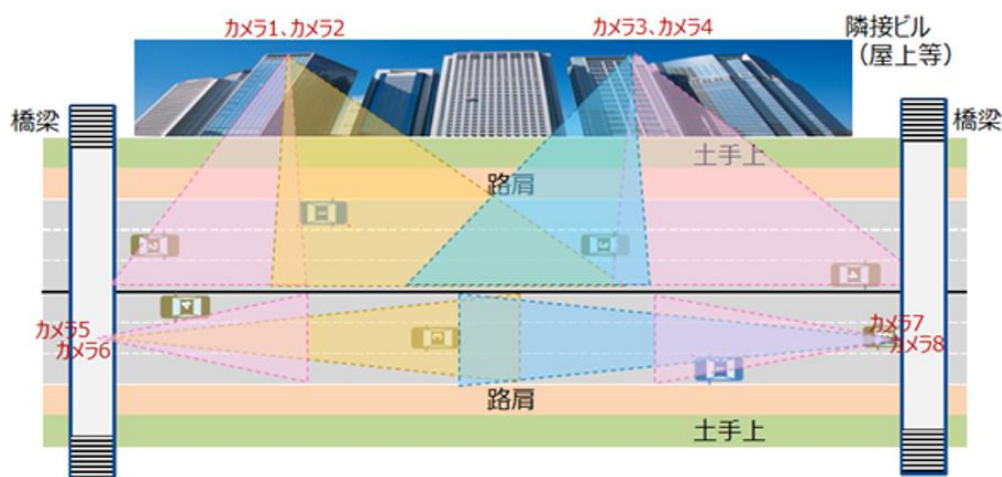


Fig. 2 カメラ設置場所イメージ (ビル屋上・橋梁上)



Fig. 3 ミラーレス一眼カメラによる同期保存システム（市販品）（有人屋 8h 程度の撮影）

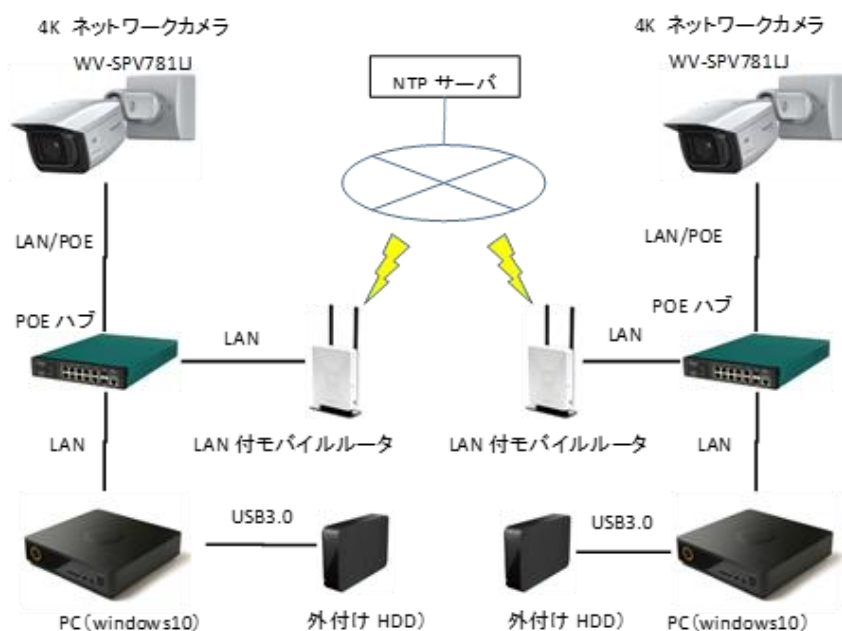


Fig. 4 ネットワークカメラによる同期保存システム（試作品）（無人 1 week 連続の撮影）

5. 軌跡データの抽出と軌跡精度の予測/検証

実交通環境の定点カメラ観測で収集した映像データから、道路（静止構造物）に対する車両（移動体）の軌跡データ（位置の時系列データ）を画像処理で抽出する。この数値化を正確に行うことで、シナリオ分析の妥当性を担保する。

5.1 軌跡精度の目標

高速道・自専道での自動運転車を前提に、安全性評価を目的としたシナリオ分析に使う車両軌跡の目標精度を以下とした。車両前後方向は、高速走行時の制動性能から導出し、車両横方向は、車線変更時の車両挙動と対比される白線（レーンマーカ）幅を元に設定した。

車両前後方向： $\pm 50\text{ cm}$ 以内

車両横方向： $\pm 10\text{ cm}$ 以内

5.2 交通外乱データ収集の全体流れ

定点観測による交通外乱データ（互いに関係しあう複数の車両軌跡データ）を収集する作業の主な流れを Fig. 5 に示す。

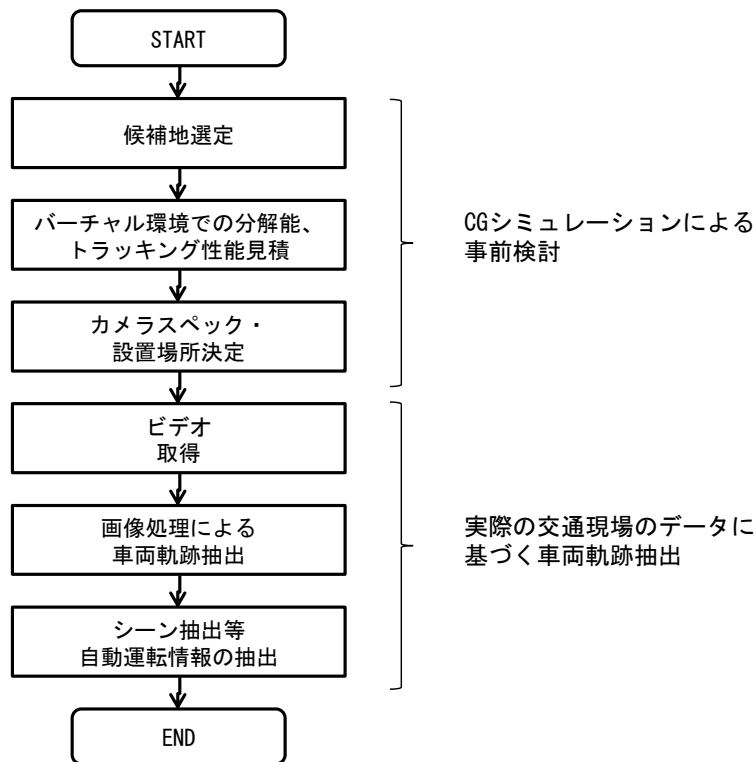


Fig. 5 交通外乱データ収集の流れ

1) 候補地選定

観測場所の選定要件整理（道路構造など），カメラ設置場所の調査と借用交渉，道路管理会社への届け出，所轄警察への道路使用許可申請（公道で撮影する場合）を実施した。

2) バーチャル環境での事前検討

車両軌跡データの質（精度）を向上させるため、バーチャル環境での CG シミュレーションによる軌跡精度予測を行い、撮影仕様（カメラの設置場所や画角設定など）を吟味した。定点観測はやり直しが困難なのでこの事前検討が重要である。

3) ビデオ取得（現場撮影）

上述のバーチャル環境で決めた撮影仕様に従い、複数台のカメラを設置して撮影した。さらに、観測エリ

アのデジタルマップ（軌跡抽出に必要な参照点情報）を作成すること、および、車両軌跡データの精度検証に使う自己位置情報（リファレンス値）を得ることを目的に、モバイルマッピングシステム（以下、「MMS」という）を搭載したリファレンス測量車両を全レーンで走行させた。

4) 画像処理による車両軌跡抽出

バーチャル環境で検討した画像処理方法を基本に、カメラ映像とデジタルマップ情報を使って、観測エリアを通過する全車両の認識（AI 深層学習利用）とトラッキング（カルマンフィルタ利用）、オルソ変換（鳥瞰図への変換）、各種誤差要因への補正（車両高による影響への幾何学的な補正など）、複数カメラの軌跡結合などを行った。バーチャル事前検討には含まれない処理として、カメラレンズの歪補正（個体バラツキ対応）、カメラ振動補正（陸橋の振動が伝わることもある）なども行った。

5.3 バーチャル環境での精度予測

CG シミュレーションによる軌跡抽出と精度予測の概要を、首都高 1 号線本線下り（浜崎橋 JCT⇒芝浦 JCT）例に紹介する。JCT と JCT に挟まれた本線であり車線変更が頻繁に発生する。



Fig. 6 定点観測の撮影範囲／上が真北(例：首都高／浜崎橋 JCT⇒芝浦 JCT) (Google Maps 利用)

- ・シミュレーション環境：Unity
- ・3D 地図データ：ゼンリン 3D 都市モデルデータ
- ・カメラモデル：4 K (3840×2160) , 60 fps
- ・車両モデル：車両力学に従わない簡易モデル
(等速運動, 等加速度運動, 円運動の組合せで走行シナリオを作成)

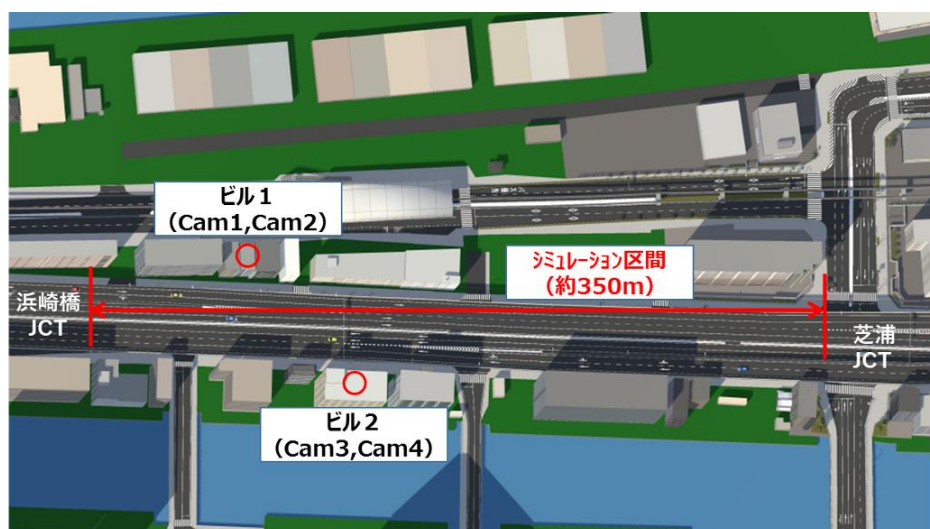


Fig. 7 カメラ設置候補ビル／概ね右が南南西
(例：首都高／浜崎橋 JCT⇒芝浦 JCT) (ゼンリン 3D 都市モデル利用)

Fig.7 に示すように、定点観測エリア（全長約 350 m）の北側しか、撮影用にビル屋上を借用できなかったため、最南端付近の軌跡精度の悪化が危惧された。ビル 1,2 の各屋上にカメラ 2 台（合計 4 台）を設置した場合に得られる映像を CG で予測した。CG と実映像の比較例を Fig. 8 に示す。道路構造など周辺環境や走行車両とカメラ位置の関係をバーチャル環境に良く再現できていることがわかる。

バーチャル環境での車両軌跡導出と精度予測の流れを Fig. 9 に示す。予測された軌跡誤差を Fig. 10 に時系列グラフで示す。グラフ中の赤点線は、5.1 節で示した軌跡精度の目標範囲を示す。道路の芝浦 JCT 側は、最寄りのビル 2／Cam4 からの距離がある程度以上遠くなると精度が急に悪化することが予想された。逆にそこを除けば概ね目標精度を満たす見込みがあると言えた。現状のバーチャル環境では、再現できていない誤差要因（レンズ歪や微弱な振動の影響など）もあるので、定量的な評価とシナリオ分析への利用可否判断は、5.4 節のリアルワールド軌跡精度検証で実施した。

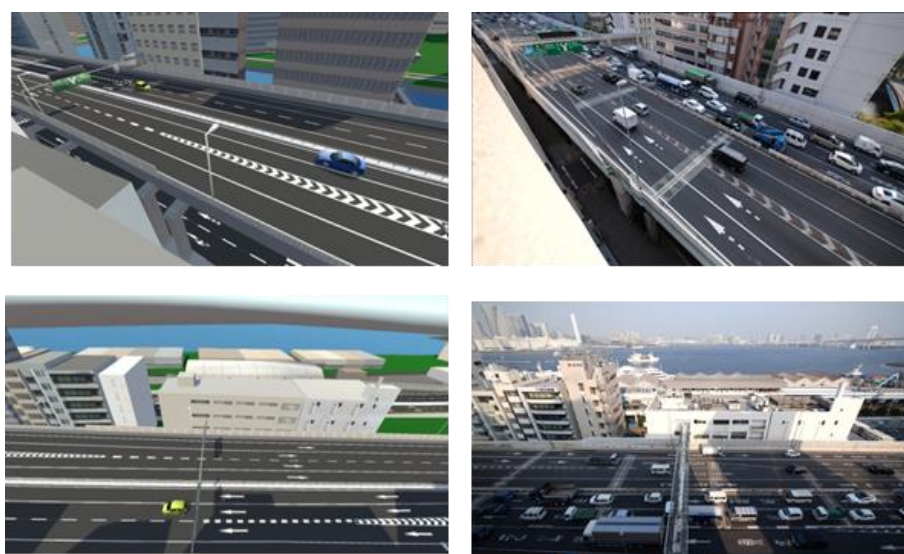


Fig. 8 CG と実映像の比較
(左：CG，右：実写，上：Cam2，下：Cam3) (ゼンリン 3D 都市モデル利用)

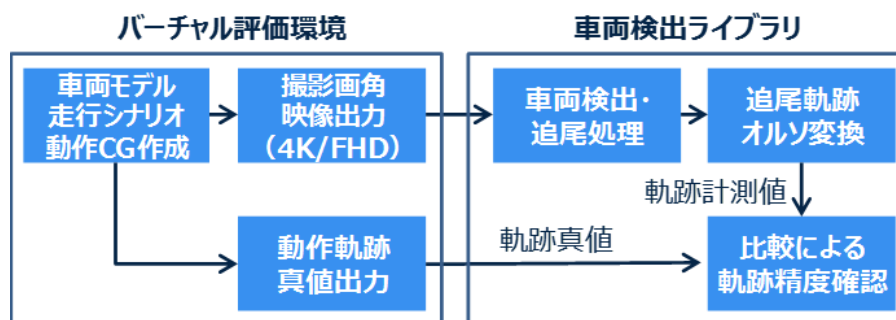


Fig. 9 バーチャル環境での軌跡精度予測の流れ

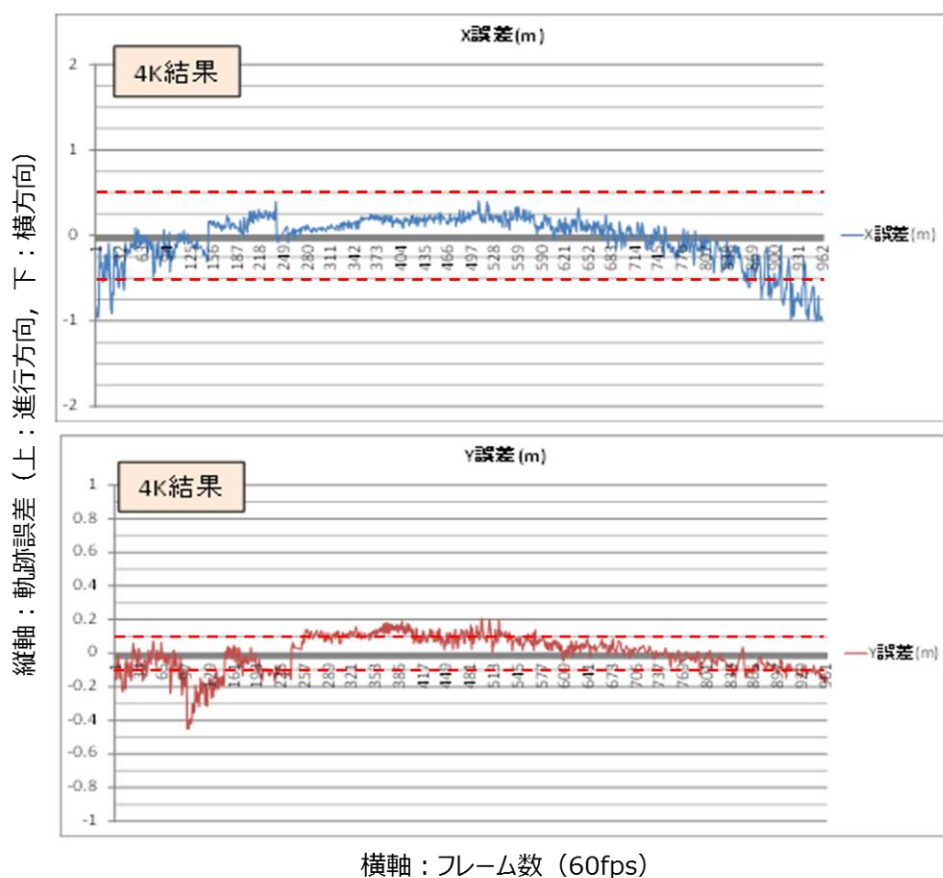


Fig. 10 車両軌跡の予測結果（例：首都高／浜崎橋 JCT⇒芝浦 JCT）

5.4 リアルワールドでの精度検証

実交通環境での車両軌跡導出と精度検証の流れを Fig. 11 に示す。検証された軌跡誤差を Fig. 12 に時系列グラフで示す。予測結果同様に、最寄りのカメラ（ビル 2／カメラ 4）から 150 m 以上遠方（観測エリアの南端付近）では急激に誤差が増加して、170 m 以上遠方では目標精度の 4 倍以上に至り限界を迎えた。したがって、最寄りのカメラ（ビル 2／カメラ 4）から 150 m 以上遠方をシナリオ分析の対象から除外すべきと判断した。2018 年度に定点観測を実施した 5 箇所において、軌跡誤差のバラツキを正規分布と見立てて、標準偏差 σ でまとめた結果を Table 3 に示す。観測場所によって、カメラ路面高やカメラから観測エリアまでの距離が異なることが軌跡精度に影響する。 $2\sigma \leq$ 目標精度、少なくとも $\sigma \leq$ 目標精度となる領域

のみシナリオ分析に使えると今回は暫定的に判断した。

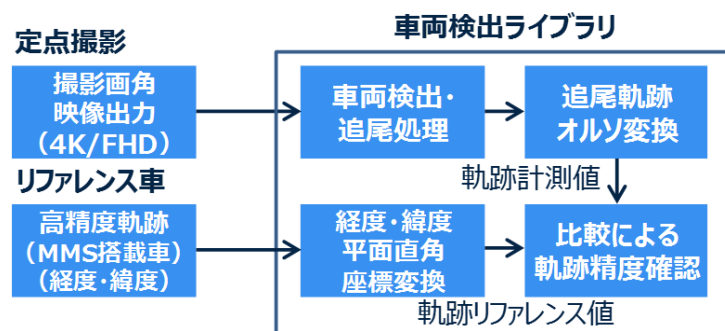


Fig. 11 リアルワールドでの軌跡精度検証の流れ

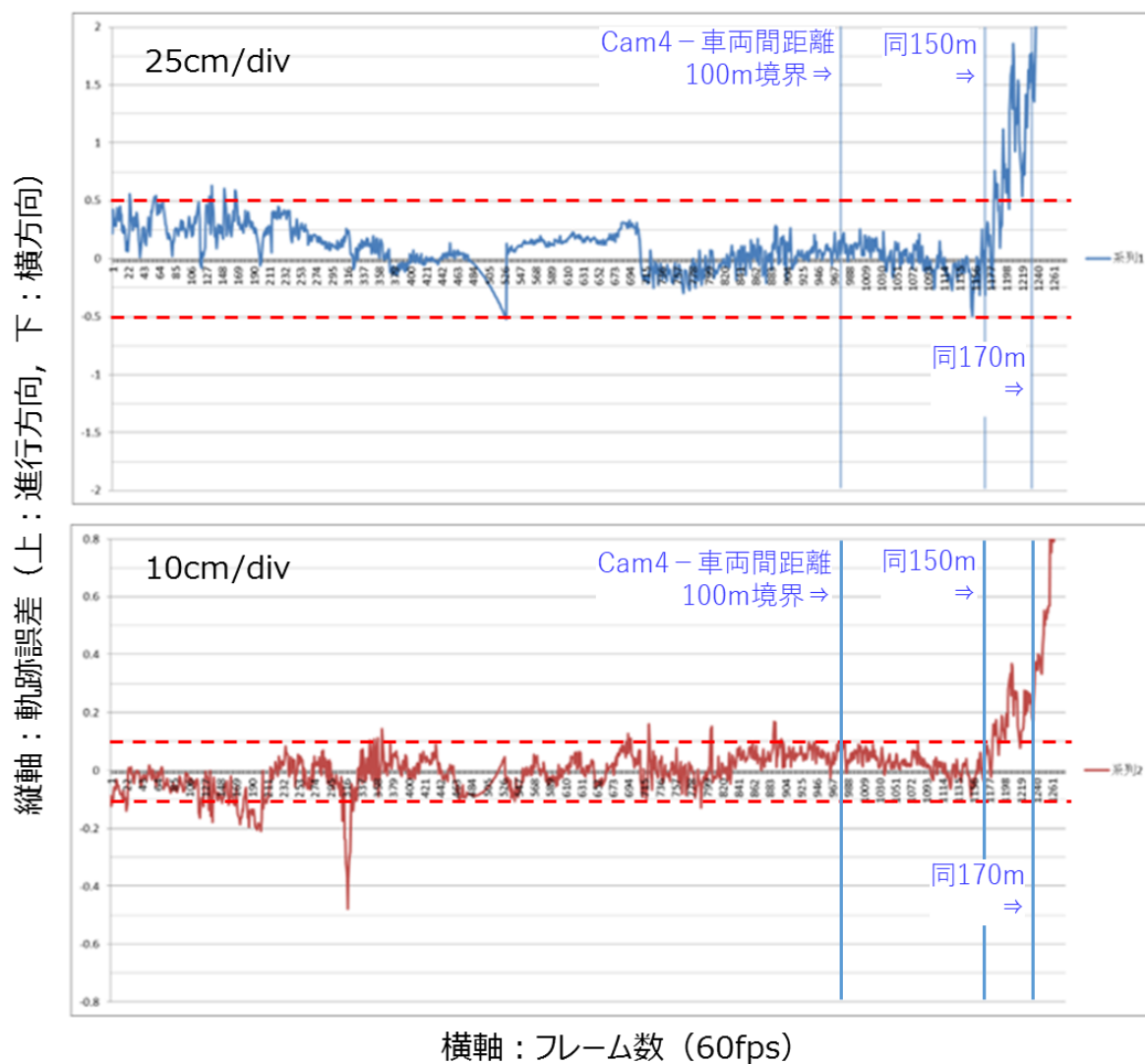


Fig. 12 車両軌跡の検証結果（例：首都高／浜崎橋 JCT⇒芝浦 JCT）

Table 3 軌跡誤差の標準偏差（実環境精度検証）

撮影地	標準偏差 σ [m]					
	カメラ100m以内		カメラ150m以内		精度検証全域	
	進行方向	横方向	進行方向	横方向	進行方向	横方向
①首都高/日の出	0.18	0.067	0.17	0.066	0.84	0.16
②首都高/参宮橋	0.28	0.1	0.33	0.095	0.36	0.083
③東名/八王子	0.31	0.068	0.34	0.067	0.34	0.067
④東名横浜IC/上り分岐	0.23	0.15	0.43	0.21	0.71	0.24
⑤第三京浜/港北	0.17	0.034	0.16	0.041	0.22	0.049

（進行方向：青: $2\sigma \leq 0.5\text{m}$ 、緑: $0.5\text{m} < 2\sigma \leq 1\text{m}$ 、赤: $1\text{m} < 2\sigma$ ）

（横方向：青: $2\sigma \leq 0.1\text{m}$ 、緑: $0.1\text{m} < 2\sigma \leq 0.2\text{m}$ 、赤: $0.2\text{m} < 2\sigma$ ）

6. 課題と対策

Fig. 13に示すように、カメラから見て対象車両の手前にある周辺車両（大型トレーラなど）や道路構造物（ガントリー標識板、側壁など）で遮蔽されるオクルージョンの影響により、誤検出（検出枠のズレなど）や軌跡途絶が発生する場合がある。特に橋梁などからの撮影では、カメラの路面からの高さは10m程度と低く、オクルージョンが発生し易い。認識エンジンの改善や、追加学習を行うことでそれらの影響を低減できるが完全に解消することは現状出来ない。

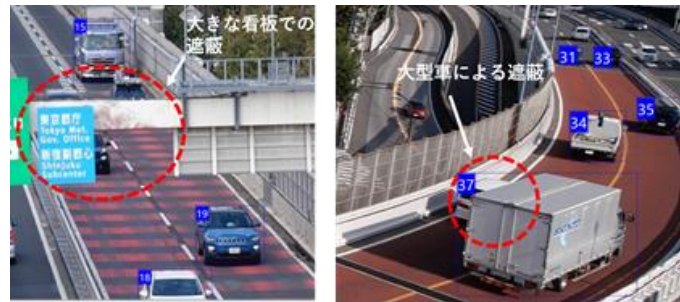


Fig. 13 オクルージョン

そこで、2019年度の一環として、可視化ツール（カメラ座標上や地図座標上で車両軌跡を表示）や軌跡編集ツール（カメラ座標上で検出枠と車両の位置関係を確認しながら遮蔽前後の軌跡を正しく補間計算）を使ってオペレータ作業で、オクルージョンによる軌跡途絶や誤検出（検出枠の大きなズレ）を修復した。Fig. 14には、修復作業前の車両軌跡（10分間）と、修復後の車両軌跡（10分間）を示す。1本の軌跡が車両1台分に相当する。5章の軌跡精度検証の事例で使った場所と同じであり、2車線と2車線が合流して4車線になる場所である。図中の破線は白線を示す。ともに、定点観測エリアの最初から最後まで、途絶なく繋がった軌跡を表示したものである。途絶や大きなズレを生じたままの車両軌跡はシナリオ分析に使えないので、現状、この修復作業は必須である。

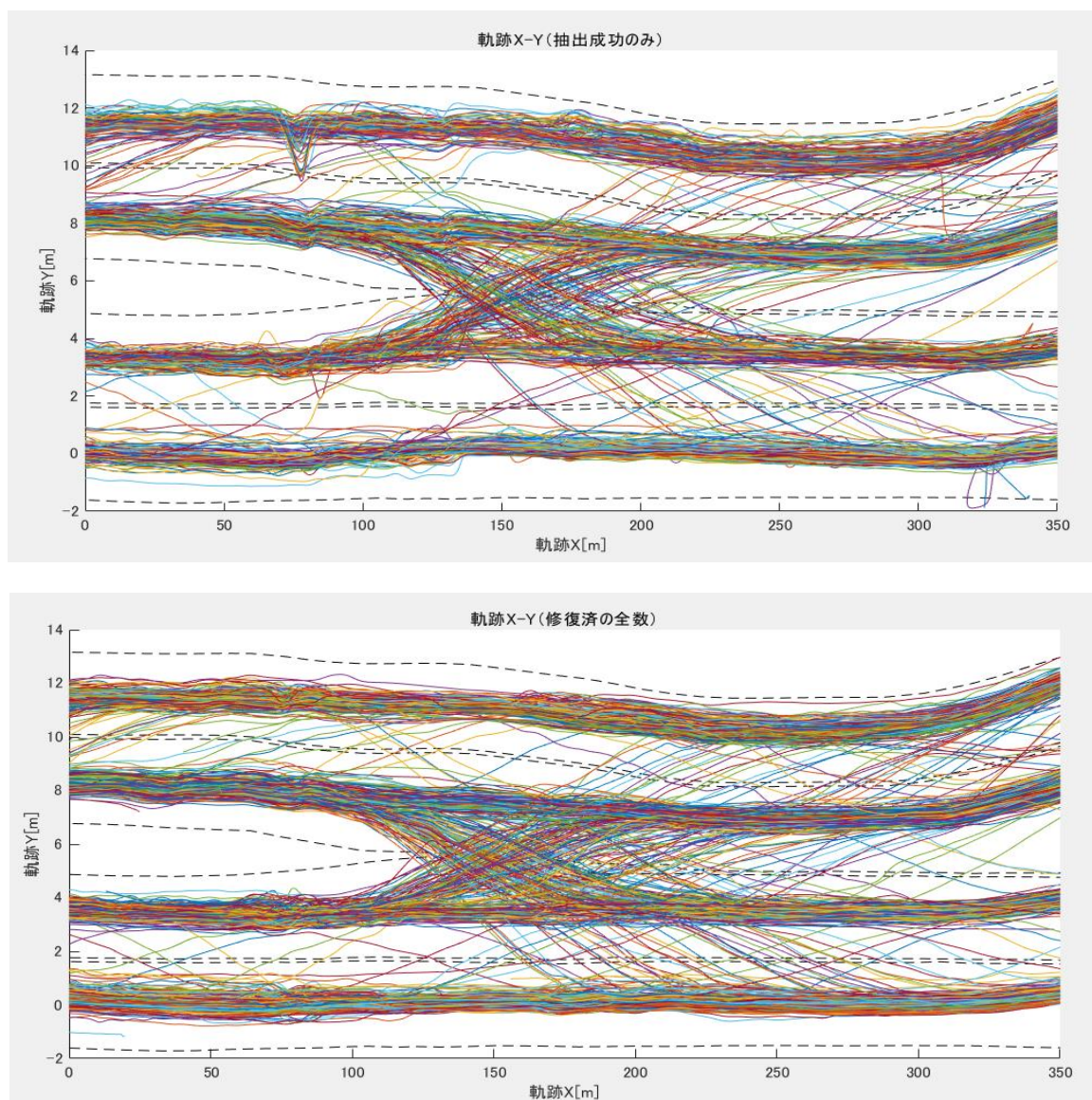


Fig. 14 途絶修復前後の軌跡比較 (10 分間) (例：首都高／浜崎橋 JCT⇒芝浦 JCT)
(上段：修復前 476 本，下段：修復後 737 本)

7. データプロファイル (2018～2019 年度)

2018 年度から 2019 年度に定点観測で収集した交通外乱データのプロファイルを Table 4 に示す。道路構造（本線，合流路，分岐路，ランプ路，急カーブ），交通流特徴（車線変更，渋滞，バイクすり抜けなどの多発域）を考慮して撮影場所を選定した。未分析（軌跡未抽出）の映像が多く残っており，今後のシナリオ分析状況に応じて追加分析（軌跡の追加抽出）を行うことが可能である。

Table 4 定点観測データのプロフィール (2018～2019 年度)

		撮影 時間	軌跡 抽出済 時間	走行 台数	軌跡 抽出数	カメラ 台数	撮影高度 (路面～カメラ)
1	首都高速1号 (浜崎橋JCT～ 芝浦JCT下り)	440 分	80分	5782台	5474台	4台	24m(ℓ°ℓ1) 30m(ℓ°ℓ2)
2	首都高速4号 (参宮橋コーナー上り)	380 分	40 分	1326台	1254台	4台	14.4m(ℓ°ℓ)
3	東名高速 (八王子街道付近 本線下り)	380 分	100分 渋滞	3211台 4673台	3089台 4510台	2台	9.6m(橋)
4	東名高速 (横浜IC上り分岐)	512 分	70 分	3176台 (分岐2757 台)	3038台	4台	10.7m(橋) 17m(ℓ°ℓ)
5	第三京浜 (折本付近本線下り)	420 分	165 分	6732台	6613台	3台	12.9m(土手) 12.2m(橋)
6	首都高速5号 (東池袋下り合流)	108 時間	10 時間	26097 台 (合流2106 台)	25675 台	3台(R1)	47m(NBℓ°ℓ)
7	東名高速 (横浜IC上り合流)	380 分	80 分	3449台 (合流921 台)	3335台	2台	10m
8	東名高速 (横浜IC下りランプ)	380 分	80 分	2311台	2076台	2台	10m

8. おわりに

自動運転の安全性評価を狙いとしたシナリオ分析用交通外乱データを効率的に収集可能な手法として、定点カメラ観測による手法を確立し、首都高や都市間高速道など主だった国内データの収集を実施した。高い軌跡精度を得るために、バーチャル環境での事前検討（撮影仕様検討、軌跡精度の予測）、現場撮影（事前検討結果に基く撮影、リファレンス車走行による道路測量とリファレンス位置の取得）、映像と測量情報を使った軌跡抽出（画像処理、トラッキング、座標変換、各種補正、軌跡結合）からなるプロセスと手法を確立した。

謝辞

定点観測を行うために、観測対象となる高速道や自専道に隣接するビル屋上をお貸頂いたビルオーナー様、また、本事業を委託して頂いた経済産業省様には多大なご協力を頂き感謝致します。

参考文献

- 1) National Highway Traffic Safety Administration, " Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles" <http://www.nhtsa.gov> (令和 2 年 12 月現在)
- 2) Research project PEGASUS Effectively Ensuring Automated Driving. http://www.pegasus-projekt.info/files/tmpl/pdf/1st_European_CCAD_Side_Event_Folien.pdf (令和2年12月現在)
- 3) Horizon 2020 <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en> (令和 2 年 12 月現在)
- 4) 平成 30 年度高度な自動走行システムの社会実装に向けた研究開発・実証事業（自動走行システムの安全性評価技術構築に向けた研究開発プロジェクト）成果報告書，一般財団法人日本自動車研究所（2018）
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H30FY/000351.pdf
- 5) 平成 31 年度高度な自動走行システムの社会実装に向けた研究開発・実証事業（自動走行システムの安全性評価技術構築に向けた研究開発プロジェクト）成果報告書，一般財団法人日本自動車研究所（2019）

https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2019FY/000329.pdf

6) SAKURA, https://www.sakura-prj.jp/project_info/ (令和 2 年 12 月現在)

7) Vijay Kovvali, Ph.D., T.E. : Video-Based Vehicle Trajectory Data Collection, Annual Meeting of the TRB (2007)
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1065.1117&rep=rep1&type=pdf> (令和 4 年 2 月現在)

【執筆者追記】(2022 年 3 月)

●最新の状況の追加

9. 課題と展望

自動運転システム開発は、高速道路や自動車専用道から一般道へと徐々に進んでおり、安全性評価技術の検討も同様に進むと思われる。一般道は、高速道路や自動車専用道に比べて、道路構造や交通参加者の種類や挙動が一般に多種多様である。従って、一般道において定点観測による交通外乱データ取得を行う場合、本稿で紹介したような方法を流用するだけでなく、欧州で既に取り組まれているようなドローンの活用やインフラセンサの活用なども含めて多種多様なデータ収集方法を予め準備しておく必要があると考える。

生活支援ロボットの安全検証方法の研究開発と 今後の事業展開の紹介

Introduction to the Research and Development of Safety Evaluation
for Personal Care Robots, and Future Business Plans

勝田 智也 ^{*1}

Tomoya KATSUTA

Abstract

JARI は 2009 年から、生活支援ロボットの安全性評価事業を本格的に立ち上げ、国プロジェクトの活動を通じて安全試験方法や安全規格の知識を蓄えてきた。昨年、ロボット安全試験センターを取得し、更にロボットメーカーに役立つ安全検証サービスを提供し、ロボットと人間が共存する安全な社会創りに寄与していく。

JARI launched a safety evaluation business for personal care robots in 2009, and has accumulated knowledges of safety testing methods and safety standard requirements through participating in national government projects. Thanks to the acquisition of the Tsukuba robot safety testing center last year, JARI aims to provide more useful safety evaluation services for robot manufacturers and to contribute to the realization of a safe society where humans and personal care robots coexist.

1. はじめに

2020 年の東京オリンピック・パラリンピックイヤーを翌年に迎え、昨今は様々なロボットを報道や、時には街中で目にするが増えて来た。クラウドの発達や GPU^{注1}などの高性能化・低価格化によりディープラーニングの実用性が飛躍的に向上し、アプリケーションレベルで我々の身近に生活支援ロボットが存在するようになり、人とロボットが共存する便利な世の中の到来がいよいよ近いことを予感させる。しかしながら、ロボットの自律性が上がるにつれ、トラブル発生時の人の介入度は下がるため、電気製品などと同様の既存の安全技術では安全性の確保に対応しきれなくなる。また、用途や形状、使用環境などに応じてロボットのタイプは多種多様であり、それぞれのロボットのタイプに応じた個別の危険源に関する情報と、その具体的安全方策はまだ未成熟である。そのような懸念がある中、一般財団法人日本自動車研究所(以下、「JARI」という)は 2009 年の国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の事業(以下、「NEDO 事業」という)から、現在の国立研究開発法人日本医療研究開発機構の事業(以下、「AMED 事業」という)におけるまで約 10 年に渡り参画し、生活支援ロボット・介護ロボットの安全試験方法の研究・開発と標準化支援活動을続けてロボット安全の知見を蓄えて来た。その知見を活かし、国内のロボットメーカーの開発を安全の面から支援するため 2018 年 10 月に、それまで国立研究開発法人産業技術総合研究所(以下、「産総研」という)が所有していたつくばロボット安全試験センターの機能を譲り受けて、機械安全試験(電気安全試験を含む)、電磁両立性の試験(以下、「EMC 試験」という)、生活支援ロボット安全の為の開発コンサルティングの 3 本

*1 ロボット開発支援室 安全検証グループ

注1 Graphics Processing Unit の略称。

リアルタイム画像処理に特化した演算装置のこと

*1 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部

(2022 年 3 月現在)

柱を基幹サービスとして提供を始めた。本稿ではその経緯、成果および今後の展開について紹介する。

2. JARIの国家戦略プロジェクトへの参加

JARIは2009年からのNEDO事業において生活支援ロボット、2013年の経済産業省の事業(以下、「METI事業」という)、および2014年から現在に至るまでのAMED事業においてロボット介護機器の安全に関する試験方法の研究・開発、規格策定の支援活動、および先行してロボットを開発するメーカーへの試験の提供を約10年に渡り続けてきた。その取り組みの概要を項目ごとに以下に述べる。

2.1 安全試験方法の開発・研究

安全試験方法開発のアプローチとしては大きくは二通りある。一つ目は、他の工業分野ですでに実績のある安全試験をロボット用に当てはめる方法である。JARIには国内JIS規格を始め、ISO^{注2)}、IEC^{注3)}、CISPR^{注4)}など国際規格の安全・試験規格に精通したメカ・電気・EMCの技術者がおり、家電、産業機械や医療機器など、すでに他の工業界で実績がある安全試験を利用し、条件設定を最適化することでロボット用に適用させる。例えば、携帯電話、放送波などの電波や、様々な電磁環境下でロボットが不安全な動作をしないか確認するEMC試験では、従来の電気製品と同様のEMC試験規格の条件を引用するが、被試験ロボットの不安全動作抑制の検証を行う目的から、EMC測定に影響しないように不安全動作を連続で行わせる工夫が必要になる。そのため、典型的な不安全動作を模擬するための特殊な試験設備などをロボット安全試験センターでは予め備えている。

二つ目は、まったく新しい安全試験方法を開発することである。ロボットの新たな機能は日々開発され、その安全性試験方法の妥当性確保と試験を実現するための試験装置を個々のメーカーが開発することは、開発工数を増加させ、大きな経営負担となる。そこで取り組みの一例として、JARIでは昨今のシルバーカータイプのロボットが提供する下り坂での抑速ブレーキ機能に対して、高齢者に適したブレーキの適性値を調査・研究し、抑速用ブレーキの要求基準を設定し、それを確認する試験装置を開発した。現在はその要求基準と試験方法をISO/TC^{注5)} 173 WG1を通じ国際規格に盛り込む方向で規格の開発が進められている。このように人間工学に基づいた実験を行い、今までは無かった安全の要求基準を開発することは、研究機能を持ち、且つ公平な中立機関としてのJARIに求められる役割となっている。

2.2 標準化支援活動

標準化活動においては主に三つの技術カテゴリで支援をしている。一つ目はISO/TC 299 Roboticsへの参画であり、NEDO事業「生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発」で蓄積した知見を活かし、2014年に生活支援ロボットの安全性の国際規格ISO 13482:2014の発行に貢献した。この規格の特徴としては様々なタイプのロボットに適用できるよう汎用性を重視している。そのため安全分析における最も一般的な手法であるリスクアセスメントを要求することを基本とし、その中で生活支援ロボットで考慮すべき危険源と安全要件の一般的な例を述べるにとどめている。従って具体的な試験方法に落とし込んだ情報は少なく、今後は具体的な要求や試験方法を盛り込む対応が期待されている。その対応のため、ISO/TC 299 WG2では、前述の規格に付随する技術レポートISO TR 23482-1を新たに発行し、生活支援ロボットに適用できる具体的な試験方法を掲載し、2019年中に発行する予定である。この規格に記載の試験方法のいくつかはJARIで開発した試験方法がベースとなっており、このことは前述した試験法開発の活動が国際的に認められたことを表している。

二つ目はISO/TC 173 Assistive productsへ参画し、AMEDロボット介護機器開発・標準化事業の研究

注2 国際標準化機構：(英: International Organization for Standardization)の略称

注3 国際電気標準会議：(英: International Electrotechnical Commission)の略称

注4 国際無線障害特別委員会：(仏: Comité international Spécial des Perturbations Radioélectriques)の略称

注5 ISOの技術委員会：(Technical Committee)のこと。規格原案作成のために専門家によるワーキンググループ(WG)を持つ

成果を活用した福祉機器の為の標準化支援を行っている。現在の福祉機器は国際的にロボット化およびロボット技術実装の開発が進められている。また、欧州など海外先進国において福祉機器は医療機器として扱われるのが一般的である。そこで ISO/TC 173 では国際潮流を鑑み、医療機器独特の背景を考慮した上で、ロボット特有の危険源情報、安全方策や検証方法を盛り込んだ国際規格の開発が進められており、JARI は研究成果をベースに規格原案作成に貢献している。

三つ目は ISO/TC 199 Safety of Machinery へ参画し、ISO/TC 199 WG12 において人と機械が干渉した場合の傷害耐性に関して、METI 事業で研究を推進している。傷害誘発実験結果に基づく内出血の発生傷害条件のヒトへの換算評価の研究成果を活用した基準作りに貢献している。

2.3 ロボット試作機への実試験の提供

NEDO 事業、METI 事業および AMED 事業では、安全性や効果性能の基準を開発するコンソーシアムと、実際にロボットの試作開発を実践する開発補助事業者の 2 本の柱があり、お互いに連携して研究・開発を進めている。この取り組みの中で、安全性基準を開発するコンソーシアムが開発した安全試験方法は、開発補助事業者の試作機の安全性評価に活用される。JARI は安全性基準を開発するコンソーシアムの一員として、開発した試験方法を実際のロボットに適用する活動をしてきた。そのフィードバック情報をより効率的な試験方法にブラッシュアップさせて、試験方法の効率性と妥当性を改善してきた。

国内のロボットメーカーによるロボット開発の促進がなされる一つの必要条件として、安全規格がより実践的な要求内容になることが期待されている。JARI は安全試験方法の開発、実機への適用による妥当性の確保、試験方法の標準化の三つの取り組みで規格要求の熟成へ貢献をしている。

3. 安全試験事業を開始

JARI は NEDO 事業、METI 事業および AMED 事業の活動を通じ蓄積した生活支援ロボットの安全試験と安全検証の試験設備と知見を、国内メーカーがロボットを市場に投入する時の安全性検証に活用できるよう、それまでは産総研が運営していたつくばロボット安全試験センターの機能を 2018 年 10 月に譲り受け、機械安全試験(電気安全試験を含む)、EMC 試験、開発コンサルティングなどの技術サービスを提供できる体制を構築した。

ロボット安全試験センターは、生活支援ロボットの安全検証のための国内最大級の試験施設である一方、ロボットに限らず、例えば自動車用コンポーネントなど、その他の製品でも条件が適合すれば試験ができる汎用性のある試験施設である。AMED 事業などを通じた経験とメーカー意見を参考にし、開発工程の上流段階から必要な検証ができるよう再構築を図った。試験施設は走行・対人・強度・EMC と四つのテーマ別に区分したエリアが存在し、単発の試験は勿論、機械安全・電気安全・EMC 試験とワンストップで総合的な試験が提供できるようになった。そのエリア別の試験設備の一部を以下に述べる。

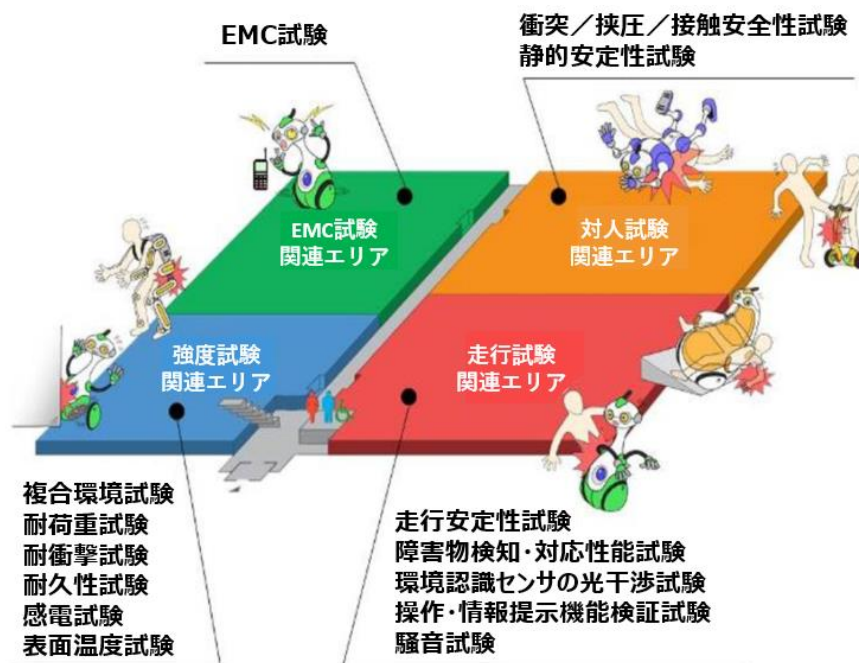


Fig. 1 ロボット安全試験センターの四つの試験エリア

(1) 走行エリア

走行試験関連エリアでは、試験するロボットを動作させて、その動きを記録することが可能である。そのための計測装置と、試験するロボットを動作させる場所や環境が備わっているのがこのエリアである。

例えば、ロボットの自律走行において障害物検出後の回避行動がプログラム通り動作するかを、10 m×10 m の走行範囲を 18 台のモーションキャプチャカメラで撮影することで時系列にて数 mm 単位での位置情報の測定を行うことが可能である。また、様々な路面(P タイル、絨毯、フローリング、アスファルトなど)を走行させたり、15 度までの傾斜路(10 m×3 m および 5 m×5 m の区画で実現できる)を利用し、室内のバリアフリー環境や屋外の坂道を模擬したり、様々な走行安定性試験が実施できる。



Fig. 2 傾斜走行試験路(フローリング路面仕様)

(2) 対人エリア

人のいる環境で生活を支援するロボットの場合、衝突時に人にどれだけの危害が及ぶかを評価する必要がある。そのための衝突試験や転倒試験などを実施するエリアである。

ロボット用の衝突試験システムの牽引装置に試作機ロボットを装着して 20 km/h まで、0.1 km/h 毎の速度設定で再現性の高い衝突試験が実施できる。バリア荷重計で衝突時の荷重を測定はもちろん、例えば自動車用のダミー人形(成人女性や3歳児など)を用いて、生活支援ロボットの意図する活動環境に存在する人への危害がどの程度か推定することにも利用できる。

また、静止しているロボットの安定性を確認する転倒試験設備や電気エネルギーによる感電・火傷・火災リスクを評価する IEC 電気安全の試験設備などもある。



Fig. 3 ロボット用衝突試験システム

(3) 強度エリア

人が搭乗・装着したり、周辺に人がいる環境で生活を支援するロボットは、強度不足によって転落・転倒・活電部の露出による感電や火傷・火災などの危険事象が懸念される。その安全検証のために、耐久性や衝撃、静荷重、耐環境性、振動などの試験を行うエリアである。

超大型の複合環境試験機(温度・湿度・振動負荷を同時に印加することが可能)や耐久性試験機などがあり、車椅子タイプやセニアカータイプなど比較的大きな搭乗型ロボットなどにも対応ができるため、ロボットに限らず様々な工業分野からの試験のニーズがある。



Fig. 4 複合環境試験機(温湿度・振動環境)

(4) EMC エリア

人のいる環境で生活を支援するロボットに電磁波を印加したときのロボットの動作変化を観察したり、ロボット自身が動作時に発生する電磁ノイズを測定したりするエリアである。

10 m 電波暗室やシールドルームにおいて、CISPR 規格などに準拠した通常の EMC 試験が可能な上、自律動作するロボットに電磁波を与えた時に不安全的な異常動作が無いことを確認するため、NEDO 事業や AMED 事業などで蓄積した知見や工夫を活かした各種試験方法の提供が可能である。

なお、EMC 試験においては 2019 年 9 月を目途に ISO/IEC 17025 の試験所認定の取得を予定しており、これによりロボット分野以外にも含めた様々な国際規格に合致した試験サービスが提供出来るように準備を進めている。

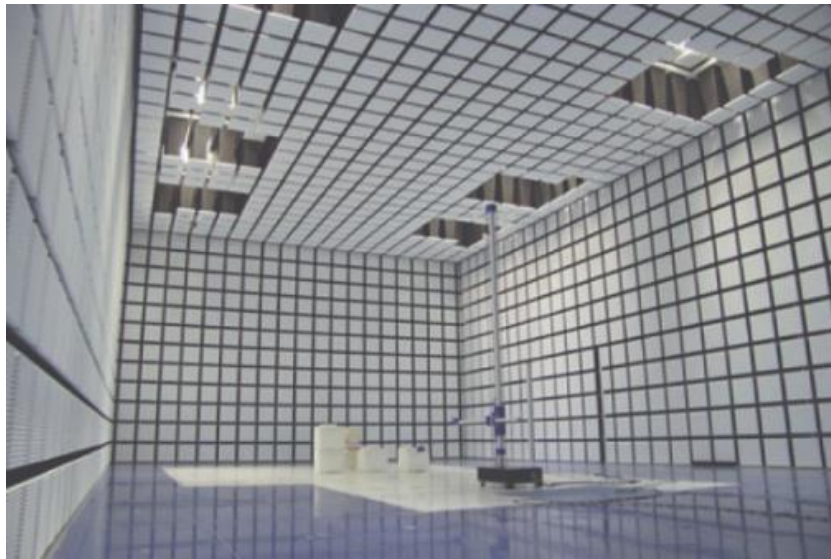


Fig. 5 EMC 試験エリアの 10 m 暗室

4. 開発コンサルティング事業

ロボットメーカーの開発上流から試験サービスを提供していく中、いくつかのメーカーからは自社のロボットについて、どのような試験を行うべきか、試験企画・計画の支援を要望される場合があった。その要望に応じるため過去の知見を活かした試験プランの作成支援コンサルティングを提供してきた。JARI はこれまでに蓄積した試験方法やその手順書などを活用して、メーカーの目的に応じた試験の企画・コンセプト作りや、対象のロボットの機能や構造に合わせた試験設備と測定治具を調整し、それを試験計画書としてメーカーに提供する試験企画サービスを行っている。

また、生活支援ロボットの安全検証はリスクアセスメントから導出された危険状態と保護方策を基に行うことが規格で要求されるため、リスクアセスメントに馴染みのないロボットメーカー向けに、リスクアセスメントプロセスの解説と実践時の疑問解決など、安全検証前に行うべきリスクアセスメントのセミナー、コンサルティングサービスも提供している。

また、保護方策を制御によって実現するためには機能安全の技術を導入することが必要であり、メーカーの要望に応じたオンサイトセミナーなどを行っている。

ロボットの安全設計を初めて行う場合においては、国際規格の要求する構造設計や試験方法、およびこれらを導出するリスクアセスメントの正しい推進を独力で進めることに自信がない場合がある。そこで JARI がメーカーのニーズに合わせた、試験企画、リスクアセスメントコンサル、機能安全セミナーなど生活支援ロボットの安全性確保のための開発支援サービスを提供している。

生活支援ロボットの安全に対する考慮事項は上流から始まるため、理解不足のままで試作機や量産機を製造してしまうと結局は設計変更・金型変更などの後戻りコストが発生してしまう。このことを避けるため、なるべく開発上流から正しい要求理解をして、安心して開発を推進して頂けるような支援プログラムを提供している。

5. 国内メーカーへの開発支援の強化

ここまで述べてきたすべての取り組みは、国内メーカーが ISO 規格や IEC 規格等の国際規格、並びに JIS 規格や SG 基準などの安全に関する規格・基準類に準拠し、人が存在する環境にロボットを量産導入するための活動を支援することに繋がっている。

現在の生活支援ロボットの規格類は今後も熟成が必要な状況であるため、安全検証活動の妥当性は依然としてメーカーに依存する部分が多い。JARI は妥当性のある検証方法とは何かを追求し、ロボットが引き起こす危害の研究と試験方法の開発を進めて国内メーカーを支援してきた。この開発支援をさらに信頼性が高いものとするために、国内の第三者認証機関と生活支援ロボットメーカーおよびロボット関連事業者向けの安全検証・認証方法に関して連携を強化した。これにより JARI のコンサルティング・安全試験などの技術サービスで得た知見や結果を認証取得準備に活かすことができ、国内メーカーにより価値のある技術サービスが提供できるようになった。

開発メーカーが安心してロボットを市場に投入できる道筋を作ることが、人々が安心してロボットと共存する社会の実現に繋がると考えて、今後も JARI は安全検証方法の研究・開発、標準化活動、メーカーへの開発支援の 3 本柱で活動を続けていく。

自動車排出ガス計測における走行モード

－ガソリン・LPG 乗用車を例として－

Driving Modes in Automobile Exhaust Gas Measurement

－For Gasoline and LPG Passenger Cars－

森川 多津子^{*1}

Tazuko MORIKAWA

1. はじめに

わが国に自動車は急速に普及しはじめた 1960 年代は、自動車排出ガスに起因する大気汚染への対策も急務であった時代である。自動車排出ガスの規制は 1966 年に開始され、1968 年の大気汚染防止法の施行により、国土交通省の道路運送車両の保安基準¹⁾(以下、保安基準)に基づいて規制されるようになった²⁾。それ以来、自動車排出ガス規制は、わが国の都市大気環境の改善に欠かせない役割を果たしてきたと言える。

自動車排出ガス規制では、走行距離当たりの大気汚染物質の排出量が規定されているが、自動車から排出される大気汚染物質の排出量は自動車の走り方、走行のパターン(走行モード)で大きく変わる。そのため自動車排出ガスを計測する際の走行モードは規制値同様、厳密に定義しておく必要がある。本稿ではガソリン・LPG を燃料とする乗用車に焦点を絞り、自動車排出ガスの規制値と規制値を測定する走行モードである試験モードの推移、実環境における自動車排出ガス量を求める走行モードである実走行モード、今後の自動車排出ガス量の推計のための新たな計測手法の活用について解説する。

2. 自動車排出ガス規制値と試験モード

2.1 対象となる大気汚染物質

現在の大气汚染防止法の規制対象は、ばい煙・揮発性有機化合物・粉じん・水銀・有害大気汚染物質・自動車排出ガスの 6 種類であるが、施行当初はばい煙と自動車排出ガスが対象であった。自動車排出ガス規制で対象となる大気汚染物質は、大気環境基準が定められている物質とは必ずしも同一ではない。表 1 に自動車排出ガス規制の大気汚染物質と、対応する大気環境基準の物質を示す。

ここで窒素酸化物(NO_x)は一酸化窒素(NO)と二酸化窒素(NO_2)の合計である。自動車のみならず、固定発生源を含む他の発生源にも共通して言えることであるが、大気環境基準が NO_2 であるのに対し、排出ガスは NO も含まれるよう NO_x として規制されている。これは、主に大気中に存在するオゾン(O_3)により、 NO が数秒～数分以内という比較的短時間のうちに酸化されて呼吸器に影響のある NO_2 になるためである。 NO_x の重量換算は全量を NO_2 として計算する¹⁾。

粒子状物質(PM)は大気環境では粒径によって基準が設けられているのに対し、排出ガスでは粒径の区分は設けられていない。ちなみに自動車排出ガス中の PM は粒径が $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 程度である³⁾。

大気環境基準で定められており自動車排出ガス規制にはない物質として二酸化硫黄(SO_2)と光化学オキシダントがあるが、 SO_2 は燃料中の硫黄分に起因するものであり、また、光化学オキシダントは大気中の化学反応で生成し、発生源から排出されるものではないため、それぞれ設定されていない。

^{*1} 一般財団法人日本自動車研究所 エネルギー・環境研究部 博士(工学)

* 原稿受理 2019 年 4 月 10 日

^{*1} 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士(工学)

(2022 年 3 月現在)

表 1 自動車排出ガス規制で定める大気汚染物質と対応する大気環境基準の物質

排出ガス規制で定められている物質	大気環境基準の物質
一酸化炭素(CO)	同左
窒素酸化物(NOx)	二酸化窒素(NO ₂)
非メタン炭化水素(NMHC (2005年新長期規制開始以前は全炭化水素(THC)))	大気環境基準はないが光化学オキシダント生成防止のための指針値が定められている
粒子状物質 (PM)および黒煙	浮遊粒子状物質(SPM) 微小粒子状物質(PM _{2.5})

2.2 自動車排出ガス規制の推移

自動車排出ガス規制値は保安基準にて、試験前の車両条件、車両の運転方法、排出ガスサンプリング手法や分析機器の要件に至るまで詳細に定められている。排出ガスはシャシダイナモメータとよばれる設備で計測するが、その内容や規定は保安基準の第 31 条や他の解説に譲る⁴⁾。

自動車排出ガス規制が開始されてから現在までのガソリンおよび LPG 乗用車の規制値を表 2 に示す。自動車排出ガス規制値は 1966 年の開始当初は排出ガス濃度で規定されていたが、規制が本格的に実施されるようになった 1973 年から単位走行距離あたりの排出量で規定されるようになった。排出ガスを計測する際の車両の運行方法である試験モードの詳細は次節で述べるが、試験モードの始動方法もエンジンが暖機された暖機始動(ホットスタート)だけの設定から、1975 年以降、エンジンが冷えている冷機状態で始動する冷機始動(コールドスタート)の試験モードが加えられた。これは排出ガスを浄化する三元触媒が冷えた状態では浄化性能が悪く、大気汚染物質が多量に排出されるためである。2005 年の新長期規制からは暖機始動と冷機始動のそれぞれの始動方法での排出量に係数をかけて合算した値で規制するコンバイン方式がとられてきた。新長期規制導入時には炭化水素(HC)の規制が全炭化水素(THC)から非メタン炭化水素(NMHC)になるなどの変更もあった。2018 年に開始した現行の平成 30 年規制はすべて冷機始動での試験となっている。

試験モードは排出ガス規制値と共に定められているため、表 2 中の注¹⁾および注²⁾に記した、1991 年の 10 モードから 10・15 モードへの変更、2008 年および 2011 年の 10・15 モードおよび 11 モードから JC08 モードへの変更は、実質的な規制強化となっている。

表 2 ガソリン・LPG 乗用車の排出ガス規制の流れ ^{5),6)}

規制年(規制名)	試験モード *1	備考	CO	HC	NOx	PM
1966 (昭和 41 年)	4 モード (%)	濃度規制	3	-	-	-
1969 (昭和 44 年)	4 モード (%)	濃度規制	2.5	-	-	-
1973 (昭和 48 年)	10 モード (g/km)	ガソリン	26	3.8	3	-
		LPG	18	3.2	3	-
1975 (昭和 50 年)	10 モード (g/km)		2.7	0.39	1.6	-
	11 モード (g/test)		85	9.5	11	-
1976 (昭和 51 年)	10 モード (g/km)	等価慣性重量	2.7	0.39	0.84	-
	11 モード (g/test)	1000 kg 以下	85	9.5	8	-
	10 モード (g/km)	等価慣性重量	2.7	0.39	1.2	-
	11 モード (g/test)	1000 kg 超	85	9.5	9	-
1978 (昭和 53 年)	10 モード (g/km) → 10・15 モード (g/km)		2.7	0.39	0.48	-
	注 1)					
	11 モード (g/test)		85	9.5	6	-
2000 (平成 12 年, 新短期規制)	10・15 モード (g/km)		1.27 (0.67)	0.17 (0.08)	0.17 (0.08)	-
	11 モード (g/test)		31.1 (19.0)	4.42 (2.20)	2.50 (1.40)	-
規制年	試験モード		CO	NMHC	NOx	PM
2005 (平成 17 年, 新長期規制)	10・15 & 11 モード → JC08 モード (g/km)		1.92 (1.15)	0.08 (0.05)	0.08 (0.05)	-
	注 2)					
2009 (平成 21 年, ポスト新長期規制)	JC08 モード (g/km)	リーンバーン直噴車	1.92 (1.15)	0.08 (0.05)	0.08 (0.05)	0.007 (0.005)
2018 (平成 30 年)	WLTC モード (g/km)	ストイキ直噴車	2.03 (1.15)	0.16 (0.10)	0.08 (0.05)	0.007 (0.005)

■は冷機始動, □は冷機始動と暖機始動の結果を合わせたコンバイン方式

()は型式指定車及び装置指定車の基準値(認証基準)

注 1) 1991 年 10 月より 10・15 モード

注 2) 2005 年 10 月より 10-15 モード×0.88+11 モード×0.12

2008 年 10 月より 10-15 モード×0.75+冷機始動 JC08 モード×0.25

2011 年 10 月より暖機始動 JC08 モード×0.75 + 冷機始動 JC08 モード×0.25

2.3 規制値のための試験モード

自動車からの大気汚染物質の排出量はエンジン負荷により変化するため、アイドリング、加速、定速走行、減速といった運行状況でまったく異なるものとなる。そのため一連の走行モード中でのそれらの運行状況や比率を厳密に定める必要があった。これが規制値のための試験モードである。図 1~6 にこれまで自動車排出ガス規制に用いられてきた試験モードを掲載する。それぞれの試験モードには適用されていた時期も

記載した。それによると図1の4モードは名称の通り、アイドリング・加速・定速・減速の4つの単純なモードで成り立っているが、その後、試験時間も徐々に長く複雑化し、より実際の走行パターンに近いものになっていることがわかる。現行規制のWLTCモードは、国連の自動車基準調和世界フォーラム(WP29)にて成立した「乗用車等の国際調和排出ガス・燃費試験法(WLTP, Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure)」の、世界における典型的な走行条件を代表する軽量車の走行パターンとして策定されたものである。本来のWLTCモードは、低速・中速・高速・超高速の4フェーズからなるが、わが国における走行実態を鑑み、車両の速度-加速度分布に乖離のある最後段の超高速フェーズは採用していない。なお、WLTCはWorldwide harmonized Light duty driving Test Cycleの略で、英語の"Test Cycle"は「試験モード」に相当するが、ここでは保安基準に準じてWLTCモードと表記した。

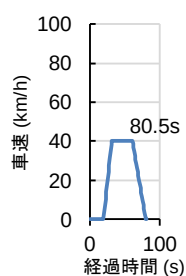


図1 4モード (暖機始動, ~1973.03)

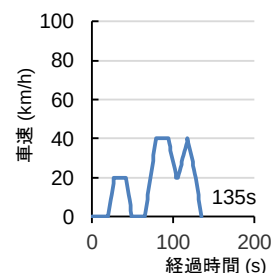


図2 10モード (暖機始動, 1973.04~1991.03)

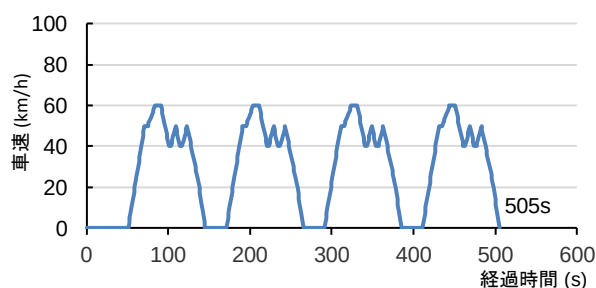


図3 11モード (冷機始動, 1975.04~2008.09)

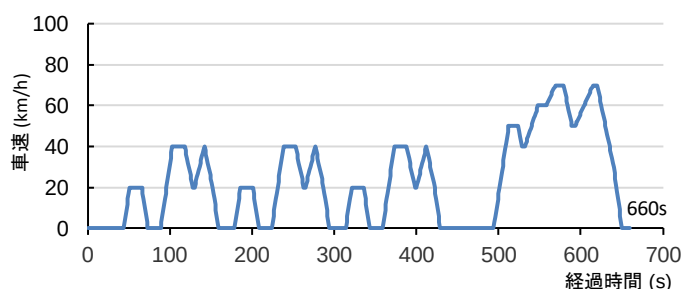


図4 10・15モード (暖機始動, 1991.10~2011.09)

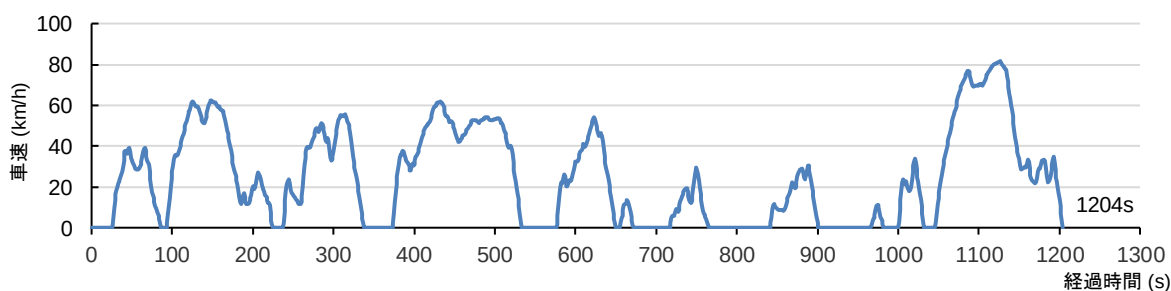


図5 JC08モード (冷機および暖機始動の結果を組合せて使用(コンバイン方式), 2008.10~2018.09)

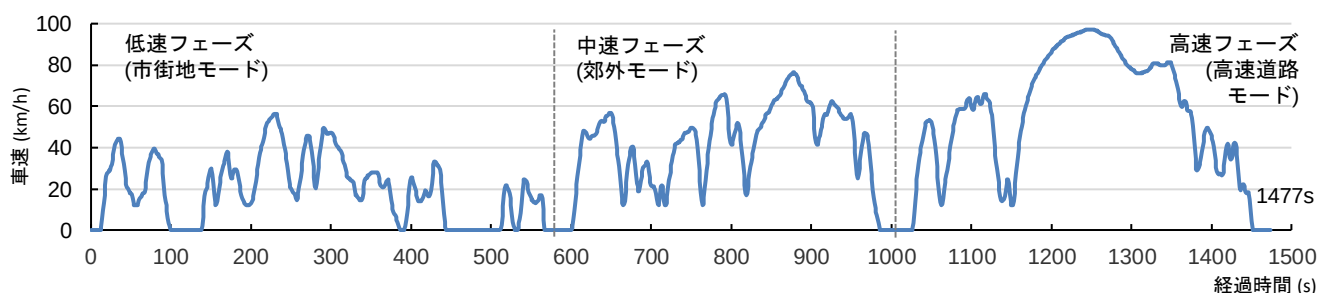


図6 WLTC モード (冷機始動, 2018.10~)

3. 実走行モードと自動車排出ガス原単位

3.1 実走行モード

規制値のための試験モードが実際の車両の運転状況とかけ離れており、都市大気環境への影響を把握するには無理があることは、比較的早い段階から知られていた。そのため、実環境における自動車からの大気汚染物質の排出量を算出するには、自動車の安全・環境基準の認証プロセスとは別の流れとして、実際の車両の走行状態を再現した「実走行モード」を構築し、排出ガスの計測をする必要があった。

東京都公害研究所(現：東京都環境科学研究所)では 1970 年代初頭から都内の走行状況についての調査を行っており、1977 年には現在使用されている東京都の平均車速別の No.1~11 の実走行モードがほぼ出来上がっていた(東京都モード)⁷⁾。No.1~10 が一般道、No.11 が高速道に対応し、いずれも走行データから代表的と思われるデータをそのまま抜き出して作成している。No.1~10 の一般道での平均車速は 4.53~46.39 km/h の範囲内で、平均車速が高い No.9~10 は深夜の環状 7 号線における走行データに基づいている。

日本自動車研究所(JARI)でも 1996 年に実走行モードを作成している(JARI モード)⁸⁾。東京都モードとは異なり、東京都内の実走行データの調査で得られた加速度・速度分布や、定速走行時の速度分布、発進から停止までのショートトリップ^{注 3)}区間の特徴などを踏まえて走行モードを構築したものである。軽・重量車別、細街路・一般道路・高速道路別となっており、軽量車の一般道路の実走行モードは平均車速別に 5 種類構築されている。

他に道路環境影響評価に用いる目的で作成された土木研究所モード(土研モード)がある⁹⁾。土研モードは JARI モード作成の手法を踏襲しているが、ベースとなった実走行データは関東・中部・近畿の国道から広く得た点に特徴がある。軽量車・重量車別、一般道路・停止ありの自動車専用道路・停止なしの自動車専用道路種別となっており、軽量車の一般道路の実走行モードは平均車速別に 6 種類である。

これらの 3 種類の実走行モードから、平均車速が 14 km/h 前後および 44 km/h 前後の例を図 7 に示す。

図 7 によると 3 種類の実走行モードの違いは見た目では判別できない。それらの実走行モードの細かな差異については、土研モード作成時に、実走行の調査データとの比較調査で確認されている。それによると、東京都モードは一般道路でのアイドル時間比率が低く、JARI モードおよび土研モードは、停止のある高速道路モードにおいて、それぞれ低速時間比率が若干低く、加速・定速などの時間比率が違う例があるなどが確認されている。しかし、それらは問題になるほどの大きな差異ではないとされている⁹⁾。

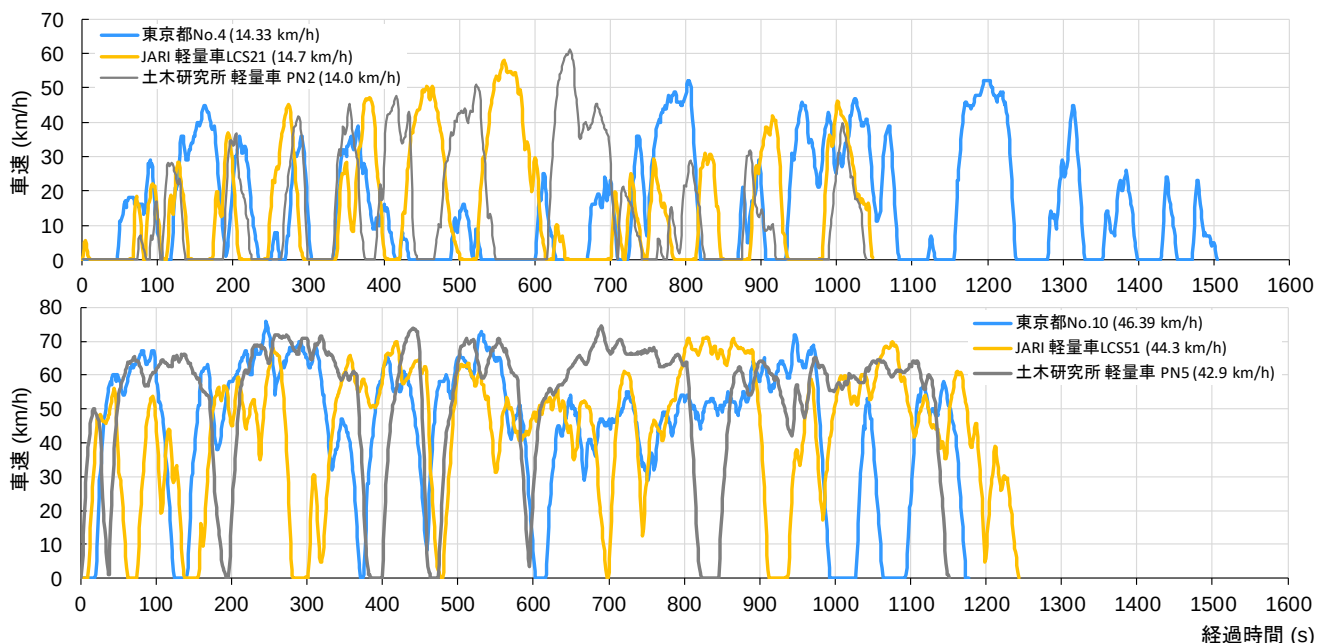


図 7 東京都、JARI、土木研究所の実走行モード比較例

(上図：平均車速 14 km/h 前後の走行パターン，下図：平均車速 44 km/h 前後の走行パターン)

3.2 自動車排出ガス原単位

環境省では毎年、国内の研究機関や自治体、独自で実施した実走行モードの計測結果を収集し、規制年別・大気汚染物質別に燃料別・車種別・車両総重量別の自動車排出ガス原単位を作成している¹⁰⁾。自動車排出ガス原単位は、全国や自動車 NOx・PM 法対象地域などにおける自動車から排出される大気汚染物質の総量を推計するために用いられるものである。

使用されている実走行モードの種類は定められていないが、図 7 で示した 3 種類が主なものである。最近では実走行モードのデータ以外にも、JC08 モードの値(平均車速 24.4 km/h)や、WLTC モード試験結果を低速フェーズ(同 18.9 km/h)・中速フェーズ(同 39.5 km/h)に分解したものも、実際の走行状態を反映しているものとして用いられている。得られた実走行モード結果は、平均車速 V (km/h, 旅行速度)を説明変数、単位走行距離あたりの排出率 EF (g/km, 重量車の場合は重量を考慮し重量あたりで g/km/t と表す)を従属変数として下記の関数式のパラメータ a , b , c , d を重回帰分析により求めて作成している。

$$EF = a + b/V + c \cdot V + d \cdot V^2$$

ガソリン乗用車の自動車排出ガス原単位からの CO, HC(THC で統一), NOx の例を図 8 に示す。物質により EF の形状が異なること、また規制が強化される毎に排出量が大きく下がっていることが確認できる。

注 3) ショートトリップ: 発進から停止までの走行。信号間の短い走行や、渋滞での短い発進停止のサイクルもこれにあたる。

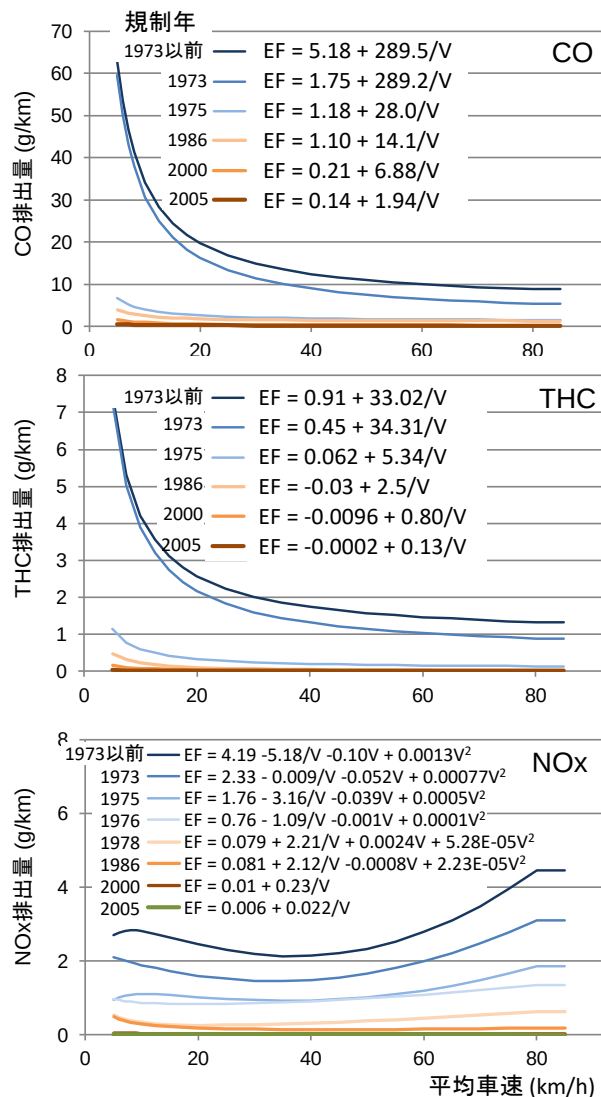


図8 自動車排出原単位の例 (ガソリン・LPG 乗用車)

4. RDE試験と自動車排出ガス量の把握

より実態に近い走行状況を再現したいというニーズ、特に試験モードで得られる燃費(カタログ燃費)と実走行燃費の乖離の解消、排出ガス規制に関する不正防止の観点¹¹⁾から、実路を走行中の車両の排出ガス濃度を直接計測する路上走行試験(RDE, Real Driving Emission)による規制の検討がわが国でも議論されている。欧州ではすでに2017年9月より、RDE試験法で得られたデータをWLTCモードの基準値と比較可能な測定値に換算し、評価をおこなっている。

RDE試験では、実路におけるあらゆる環境要因を反映した排出ガス濃度の計測ができるため、規制という観点だけではなく、排出ガスの計測結果に影響を及ぼす環境要因の検討も可能となる。著者らはRDE試験結果から、車両の瞬時の速度・駆動力と排出量データを整理し、任意の走行モードにおける排出量を推計する手法を構築した¹²⁾。その手法は、瞬時瞬時の運転状態における排出量を算出するために開発された速度・駆動力排出マップ¹³⁾を利用する方法である。

図9に速度・駆動力排出マップの例を示す。この例では1秒毎の車速、駆動力、NOx排出量 g/s を、車速を2 km/h 刻み、駆動力は200 N 刻みで平均化・補間して作成している。

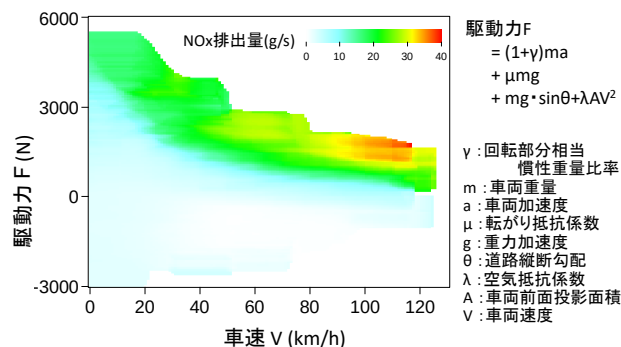


図 9 速度-駆動力排出マップの例

著者らは、任意の走行モードの速度・駆動力の時系列データを速度-駆動力排出マップに当てはめることにより、その走行モードでの試験結果に相当する排出量を算出することを可能にした。図 10 にその手順を示す。それにより排出ガス原単位そのものや、外気温度の影響を排出量に反映するための温度補正係数などの作成に適用することが可能となった。この手法は拡張性が高く、今後、RDE 試験の広がりにつれて、より実態を反映した排出量の推計につなげることができると考えられる。

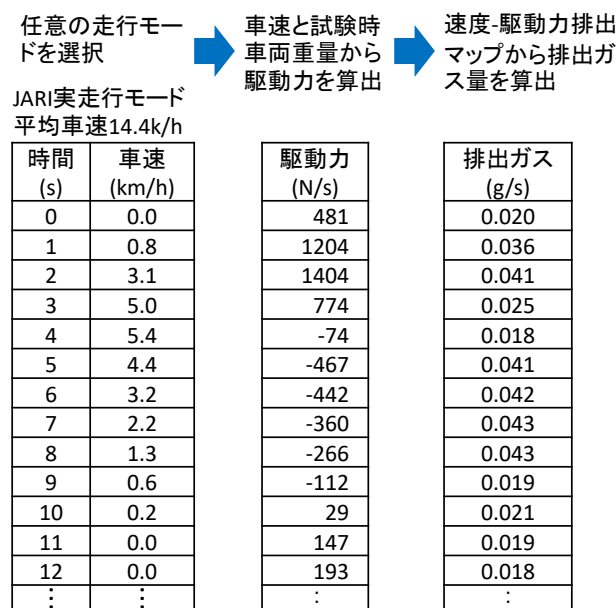


図 10 速度-駆動力排出マップから実走行モード相当の排出量を推計する手順の例

5. おわりに

大気環境の改善を目指して、排出ガスを規制する側も、大気中への排出量を算出する側も、共に実環境における排出実態を考慮した走行モードや試験法の検討を重ねてきた。本稿ではその一部を紹介してきたが、PM_{2.5}や光化学オキシダント、温室効果ガスに関連する短寿命気候汚染物質など自動車排出ガスが関わる大気汚染課題はまだ残されている。気温などの環境要因による影響や、排気後処理装置およびエンジン本体の劣化に伴う排出量増加など、より実際に近い排出状況を把握するため、今後も排出ガス計測手法の検討は続けられていくと考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路運送車両の保安基準, http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr7_000007.html (2019.5)
- 2) 環境庁：昭和 44 年版公害白書, <http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/s44/index.html> (2019.5)
- 3) Kittelson, D. B. (1998), Engines and nanoparticles: a review, Journal of Aerosol Science, Vol. 29, pp. 575-588
- 4) 公益財団法人日本自動車輸送技術協会：技術解説ーシャシダイナモメータによる車両評価
http://www.ataj.or.jp/technology/chdy_technology.html (2019.5)
- 5) 国土交通省：新車に対する排出ガス規制について, <http://www.mlit.go.jp/common/001191370.pdf> (2019.5)
- 6) 環境庁：昭和 45 年版公害白書, <http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/s45/index.html> (2019.5)
- 7) 東京都公害研究所：自動車排出ガスに関する調査研究, 公害研究所資料, 1-4-18 (1977)
- 8) 平井洋ほか：排出係数測定用の実走行モードの作成方法について, 自動車研究, 第 18 巻, 第 12 号 (1996)
- 9) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：自動車排出係数の算定根拠, 国土技術政策総合研究所資料, No.141 (2003)
- 10) 株式会社 数理計画：平成 30 年度 自動車排出ガス原単位及び総量算定検討調査 (2019)
- 11) 国土交通省：排出ガス不正事案を受けたディーゼル乗用車等検査方法見直し検討会 最終取りまとめ：
<http://www.mlit.go.jp/common/001182444.pdf> (2019.5)
- 12) 富田幸佳, 森川多津子：実路走行時の排出ガス試験値を用いた自動車 NOx 排出量算定のための温度補正係数作成手法, JARI Research Journal, 20180701 (2018)
- 13) 林誠司：過渡排出量推計モデル＋走行風による初期拡散モデル構築, JCAP 技術報告 PEC-2004AQ-03, 一般財団法人石油産業活性化センター, (2005)

2021 年度 下期(10~3 月)掲載原稿 集約

JARI Research Journal として、この半年間に HP にて個別に公開してきた各種原稿を一覧して見つけやすくできるよう集約いたしました。

原稿の集約にあたっては、以下の対応をしています。

- ・ JARI Research Journal として、2021 年 10 月から 2022 年 3 月までに、
日本自動車研究所の HP（ホームページ）に公開された原稿が対象。
- ・ 利用しやすさ向上のために、リンク情報を追加。
 - 参考文献に URL がある場合は Web サイトへのリンク
 - Web 上に公開されている原稿へのリンク
 - HP 上の個別公開原稿へのリンク

自動運転中の車線変更介入方策に対するドライバの 反応と受容性に影響を与えるドライバの特徴

Effects of Demographic Characteristics on Driver Reaction and Acceptance of
Lane Change Interventions During Conditionally Automated Driving

ムスリム フサム^{*1}
Husam MUSLIM

アントナ-マコシ ハコボ^{*1}
Jacobo ANTONA-MAKOSHI

内田 信行^{*1}
Nobuyuki UCHIDA

伊藤 誠^{*2}
Makoto ITOH

Abstract

This study conducted a driving simulation experiment to compare four automated driving systems (ADS) during lane change demanding situations on highways while accounting for the drivers' gender, age, and experience. While an ADS is activated, the vehicle approaches traffic congestion on the left-hand lane. ADS-1 can reduce the speed to synchronize with the congestion. ADS-2 reduces the speed and issues an optional request to intervene, advising the driver to change lanes manually. ADS-3 offers to overtake the congestion autonomously if the driver approves it. ADS-4 overtakes the congestion autonomously without the driver's approval. Results of drivers' reaction and acceptance indicated that differences between ADS designs increase when considering the combined effect of driver's gender, age, and experience more than when the effect of each factor is considered separately. While preliminary, these findings may help us understand how ADS users' behavior can differ based on several demographic human factors.

1. Introduction

The last two decades have witnessed a rapid development of automated driving systems (ADS). The goal is to realize an ancient human vision of self-driving vehicles. The Society of Automotive Engineers categorized this vision into six levels (L) of driving automation, escalating gradually from no driving automation L0 to full driving automation L5 ¹⁾. Partial driving automation L2, which combines the feature of lane-keeping assistance and adaptive cruise control systems, represents a border between conventional human-controlled vehicles and automated vehicles. L2 system offers a shared responsibility of the dynamic driving task (DDT), which is also divided into sustained lateral and longitudinal vehicle motion control (LVMC) that is performed by the system and objects and events detection and response (OEDR) that the driver must carry out. Ultimately, when the L2 system is engaged, the driver is driving and has to monitor both the system and the roadway, respond appropriately, and retake the vehicle control where needed ²⁾. Concerns have been expressed on the potential effects of monotonous and predictable driving on drivers' attention while supervising the automated system operation ^{3), 4)}. Further investigations have also been conducted on how drivers will accept, trust, and interact with L2 systems during dangerous conditions ^{5), 6)}.

With conditional driving automation systems (L3) mastering the LVMC and OEDR subtasks, the driver is no longer required to monitor the driving environment. However, from the safety perspective,

*1 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部 博士(工学)

Japan Automobile Research Institute Autonomous Driving Research Division Dr.Eng

*2 筑波大学 システム情報工学研究科 博士(工学)

University of Tsukuba Faculty of Engineering, Information and Systems Dr.Eng

* 原稿受理 2022年1月10日

the driver should be able to take the control back from the system when necessary or when, occasionally, requested by the system ⁷⁾. This limitation has motivated a large amount of research to understand the effects of drivers' engagement on their take-over performance ⁸⁾.

Several studies have described the adverse effects of drivers being out of the control and monitoring loop on their ability to perform cognitive processing and retrieve manual control after automated driving ⁹⁾. Other studies show that differences in driver's take-over performance when monitoring the roadway or engaged in non-driving related tasks exist but are not significant ¹⁰⁾. Some other studies stated that unless the driving task is fully automated, there would be an explicit role for the human driver ¹¹⁾. When encountering a situation that requires driver intervention, is driver's engagement during automated driving all that matters?

In the aviation domain, automation is complex, and the pilots, usually a pilot and a copilot, must monitor a high number of parameters ¹²⁾. Maintaining safety in such a complex system is an organizational effort, and pilots are highly competent and trained to cope with the dynamically changing workload and situations ¹²⁾. The human-machine interface (HMI) in automotive automation could be less complex, but the driving environment is faster-paced, and drivers are less qualified compared to aviation ¹³⁾. In both aviation and automotive domains, the performance of operation tasks, tactical tasks, and strategic decisions is highly dependent on humans' ability to learn from heuristics and experience. Such human skills and abilities dependent task performance suggests a possible role of age and experience when operating airplanes and vehicles and deserves attention on the influence of these factors when regaining control from highly automated systems ^{14), 15)}.

Age has been found to affect humans' hazard perception, reaction time, cognitive processing speed and quality, and task switching ability ¹⁶⁾. With manual driving, the driving performance of elderly and experienced drivers when exposed to secondary tasks is less affected than that of younger drivers who better performed secondary tasks with less attention to the driving task ¹⁷⁾. With automated driving, the take-over time by younger drivers was generally shorter than that of older drivers, but this difference was not statistically significant ¹⁸⁾. However, some studies have further investigated the association between drivers' age and gender and found a significant difference between younger male drivers and older female drivers in terms of reaction time and task performance during different conditions of manual driving ¹⁹⁾. Although the influence of driver-related factors (age, experience, and gender) on driver-system interaction and acceptability has been investigated, how such factors is by different system designs and capabilities, and combine to impact driver's engagement, take-over decision, and control remains unclear. In this study, the focus is to evaluate users' interaction with different ADS designs during non-critical automated driving, while accounting for driver gender, age, and experience.

The present study investigates the impact of demographic human factors (gender, age, and experience) on driver decision-making and control when exposed to different ADS designs and traffic conditions. The proposed system represents an idealized automated driving system that can perfectly master the LVMC subtask at low speeds of up to 60 km/h and carry out OEDR subtask to a limited extent. The investigated scenarios simulate an automated vehicle (with the ADS installed) approaching a traffic congestion (20 km/h) while the adjacent lane was available with light traffic circulating at 60 km/h. All test scenarios were not safety critical (no imminent crash), so the focus could be on understanding the accuracy and the promptness of the cognitive processing required to maintain safe driving performance. It was hypothesized that the more the system requires driver's decisions and control, the less the drivers accept the system. It was also hypothesized that the drivers would instead

use the automated driving functions of the system when available than interrupt the automated process of the system.

2. Method

2.1 Participants and Apparatus

Forty participants (Female = 20, Male = 20; Mean_{age} = 44.5 $\pm$ 15.4) holding a valid driver's license were recruited to participate in a driving experiment at the University of Tsukuba, Japan. The experiment was implemented in a medium-fidelity driving simulator built by Honda (Fig. 1). The simulator consists of a dynamic car mockup mounted on four movable legs, in which an actual car seat and dashboard are placed with 120 degrees projection screen and three small LCDs to simulate the front, rear, and side driving views, respectively.

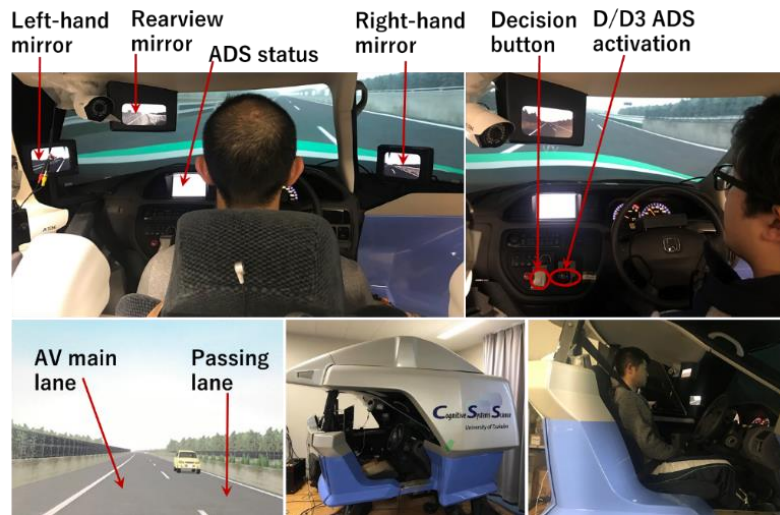


Fig. 1 A driving simulator cockpit with a single driver seat, an automatic transmission system (D: manual driving/D3: automated driving), and the approve/disapprove button.

2.2 ADS and HMI designs

An ADS was available at a speed ranging between zero and 60 km/h based on traffic conditions. The drivers could activate and deactivate the system by shifting the gear stick between D for manual driving and D3 for the automated driving mode. The status of ADS was displayed in a separated LCD located in the middle of the dashboard (Fig. 1, top-left). The system had four different states, as described in Table 1. The toggling of the system status has been associated with an acoustic alert to arouse the driver's attention. When the system is activated, LVMC and OEDR subtasks can entirely be delegated to the system, and the driver's control and monitoring are no longer required.

Four test scenarios (10 min each) were conducted on a two-lane highway during the daytime. In the first five minutes of each scenario, the traffic was smooth and light such that the ADS could control the vehicle at full speed (60 km/h) constantly. In the sixth minute, the system encountered traffic congestion on the left-hand lane. However, the traffic on the right-hand lane was still smooth, with few cars passing at 60 km/h. The ADS changed its state from HMI-2 to HMI-3 (Table 1) and reduced the speed to 20 km/h in accordance with the slow traffic ahead. The congestion could be avoided by changing lanes towards

the passing lane. Four ADS designs were proposed to perform such avoidance maneuvers.

Table 1 HMI display of the automated driving system states.

System status	HMI Display	Description
Deactivated		HMI-1: the human driver performs LVMC and OEDR subtasks.
Activated at full speed 60 km/h		HMI-2: the ADS performs LVMC and OEDR subtasks. System and environment monitoring is optional.
Activated during traffic congestion (<20 km/h)		HMI-3: the ADS reduces the speed in response to slow traffic ahead.
Activated with driver's Action Required		HMI-4: an ADS requests the driver's intervention to improve the performance. However, driver's intervention is not essential or urgent.

- 1) ADS-1 (baseline): the system could only keep the lane and continue automated driving at a slow speed (20 km/h). The drivers had to decide the next course of action by themselves (e.g., keep automated driving at slow speed or take over and change lanes).
- 2) ADS-2: the system displays HMI-4 requesting the driver to take over and change lane manually. However, the driver could ignore the request and let the system continue driving at 20 km/h.
- 3) ADS-3: the system displays HMI-4 requesting the driver's permission to execute an automatic lane change. The driver could approve the automatic lane change by pushing a button (Fig. 1, top-right) or ignore the request and let the system continue automated driving at 20 km/h.
- 4) ADS-4: the system displays HMI-4 informing the driver that an automatic lane change will start in 6 s. The drivers could disapprove of the lane change execution by pushing a button (Fig. 1, top-right) within the 6 s period.

2.3 Experimental Design and Procedures

This experiment was designed so that each driver experienced the four ADS designs. For each participant, the driving experiment started with two training drives, followed by four testing drives such that each system was tested once during the testing phase. The participants encountered the four ADS designs in a randomized order to reduce the effect of experience.

Participants were divided into two groups based on their age and driving experience (years of holding a valid driver's license), respectively. The younger group consisted of drivers younger than 45 year-old with driving experience between 1 and 24 years. The older group consisted of drivers older than 45 year-

old with driving experience of more than 25 years. Both groups were further subdivided into two subgroups based on their previous experience of using ADS during the past three years. For driver gender, the participants were divided into males and females, with age and experience factors balanced between groups.

3. Results and Discussions

Table 2 presents descriptive statistics of the groups and subgroups sizes and distributions based on the type of the first drivers' response to the change in traffic condition and system status. Subjects were divided into groups and subgroups in terms of gender, age, and experience. The purpose of the table is to understand the combined effects of the driver's demographic human factors (gender, age, and experience) and the ergonomic implications of the different ADS designs on the type of driver's control input.

It is apparent from the table that the vast majority of the participants decided to change lanes manually or automatically to avoid traffic congestion. Very few participants decided to keep the lane and continue with automated driving at a slow speed (20 km/h). For ADS-1, although there was no change in the system's HMI when encountering traffic congestion, approximately 85% of the participants took over the vehicle control and changed lanes manually. For ADS-2, 92% of the participants responded to the system's request to resume the manual control and overtake the traffic congestion. 90% of the participants pushed the decision button to permit ADS-3 automatic lane-change maneuver. Finally, about 40% of the participants pushed the button to interrupt ADS-4 automatic lane-change maneuver.

Table 2 Statistical data of the first control input by the drivers when encountering the traffic congestion for each system in consideration of drivers' gender, age, and experience.

Group Classification			Type of the first driver reaction										Lane change maneuvers	
Gender (20 drivers/ group)	Age (10 drivers/ group)	Experie- nce (5 drivers/ group)	Hands on the steering wheel				Decision Button		None					
			ADS -1	ADS -2	ADS -3	ADS -4	ADS -3	ADS -4	ADS -1	ADS -2	ADS -3	ADS -4	Manual	Automatic
Male	<45	ex*	5	5	0	0	5	2	0	0	0	3	11/20	8/20
		nex*	3	4	0	1	4	3	2	1	1	1	11/20	5/20
	>45	ex	5	4	0	1	5	0	0	1	0	4	10/20	9/20
		nex	4	5	1	2	4	0	1	0	0	3	12/20	7/20
Female	<45	ex	4	5	0	1	5	0	1	0	0	4	10/20	9/20
		nex	5	4	0	0	5	2	0	1	0	3	11/20	8/20
	>45	ex	4	5	1	1	3	2	1	0	1	2	11/20	5/20
		nex	4	5	0	0	5	0	1	0	0	5	9/20	10/20
Total (/40 drivers)			34	37	2	6	36	9	6	3	2	25		

* ex: experienced; nex: non-experienced

In all of the investigated scenarios, drivers' response was optional when the automated vehicle approached the traffic congestions, but their decision-making was time-dependent on the system design. Under ADS-1 and ADS-2, the drivers were able to perceive the traffic on the adjacent lane and make a lane-change decision accordingly, with no time limitation. However, with ADS-3 and ADS-4, the drivers had limited time (6 s) to decide whether it would be safe to automatically let the system perform the lane-change maneuver. Therefore, it is vital to compare drivers' reaction time under each system to further understand the drivers' ability to perform a safe lane change within the available space and their behavior towards the system.

The driver reaction time was calculated as the time elapsed from the system triggered HMI-3 to the driver's first reaction (hands on the wheel, foot on the pedal, or push the decision button) in response to the change in the vehicle speed. Fig. 2 compares drivers' reaction time among groups and subgroups under each system. Statistically significant effects were identified for ADS design ($F(3, 156) = 4.32, p < 0.01$), gender ($F(1, 38) = 32.46, p < 0.01$), age ($F(1, 38) = 27.03, p < 0.01$), and experience groups ($F(1, 38) = 36.10, p < 0.01$). The analysis also indicated that significant interactions occurred between ADS design and gender groups ($F(3, 144) = 7.33, p < 0.05$), ADS design and age groups ($F(3, 144) = 9.18, p < 0.01$), and ADS design and drivers experience ($F(3, 144) = 11.12, p < 0.01$).

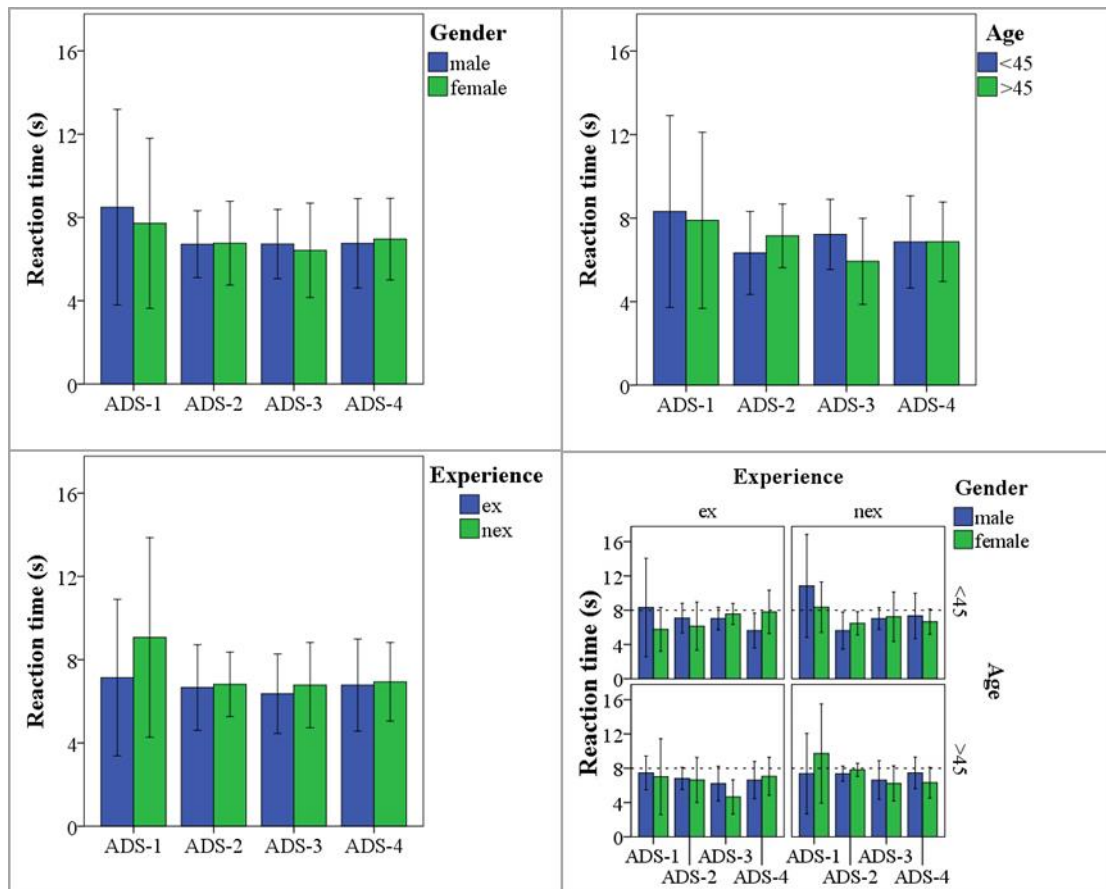


Fig. 2 Drivers reaction time in response to the HMI and traffic changes (error bars represent the standard deviation). Top-left: participants are divided into 20 male and 20 female drivers. Top-right: participants are divided into 20 older and 20 younger drivers. Bottom-left: participants are divided into 20 experienced and 20 non-experienced drivers based on their previous experience with automated driving. Bottom-right: participants are divided into eight subgroups (5 drivers each) based on gender, age, and previous experience of ADS

Multiple comparisons with Tukey HSD indicated that drivers' reaction time was comparable between male and female, younger and older, and experienced and non-experienced groups. Overall, the highest mean level was recorded under ADS-1 ($M = 10.83$) in the non-experienced younger male group, while the smallest mean level was recorded under ADS-3 ($M = 4.66$) in the experienced older female group. For ADS-1, the experienced younger female drivers reacted faster than non-experienced younger male

drivers ($p < 0.05$). For ADS-2, the non-experienced younger male drivers reacted faster than the non-experienced older female drivers ($p < 0.05$). For ADS-3, there was a significant difference between experienced younger female drivers and experienced older female drivers ($p < 0.05$). For ADS-4, there was a significant difference between males and females in the experienced younger subgroup ($p < 0.01$). These results indicate that while the effect of demographic human factors may not be significant when considered separately, the combined effects of drivers' gender, age, and experience can be recognizable.

Drivers' acceptance of each ADS was evaluated based on their willingness to use the system in the real world. The question was administrated to the participants after completing all driving tests. Fig. 3 compares drivers' rating of their acceptance of each ADS design between groups and subgroups. In general, ADS-1 and ADS-2 were more accepted than ADS-3 and ADS-4. Each demographic factor resulted in differences between groups for each ADS design. These differences become significant when all factors, i.e., gender, age, experience, are considered collectively. The experienced older male drivers recorded the highest acceptance rate under ADS-1, and the non-experienced older male drivers recorded the lowest acceptance rate under ADS-4.

Wilcoxon Rank Sum test was applied to examine the differences between groups and subgroups within and between systems. The experienced older male drivers significantly more accepted ADS-1 than the non-experienced older female drivers ($Z = -2.03$, $p < 0.05$). However, comparisons of the acceptance of ADS-2 and ADS-3 did not reveal any significant difference between groups and subgroups. ADS-4 was significantly less accepted by the experienced younger male drivers and non-experienced older male drivers compared to the experienced younger female drivers ($Z = -3.57$, $p < 0.01$) and experienced older female drivers ($Z = -2.89$, $p < 0.05$), respectively.

4. Conclusions

This driving simulator study investigated the effect of drivers' gender, age, and experience on their decision-making and control during low-speed conditional automated driving on a highway. The interaction between these three demographic factors and different ADS designs and capabilities resulted in significant differences in drivers' decision-making, reaction time, and system acceptance. When the drivers encountered traffic congestions during automated driving, they preferred to change lanes instead of continuing automated driving behind the congestion. Depending on ADS capabilities, the drivers resumed the vehicle control and changed lanes manually or let the system change lanes automatically.

Results of the type of the first control input by the drivers showed that the younger drivers were less likely to interrupt the automated driving than the older drivers. There was no significant difference associated with gender in terms of driver's reaction time, but drivers who practiced the AD before reacted faster to the HMI and traffic changes than the first-time-practicing drivers. The results showed that the standard deviation of the drivers' reaction time under ADS-1 is larger than ADS-2, and the latter is larger than ADS-3 and ADS-4. With ADS-1, the drivers had to perceive the traffic change and decide without system support. With ADS-2 supports driver's decision-making reduced the time spent by the drivers to reach a decision and act. Further reduction in the standard deviation of drivers' reaction time was achieved when the system supported drivers control with a time limitation to decide.

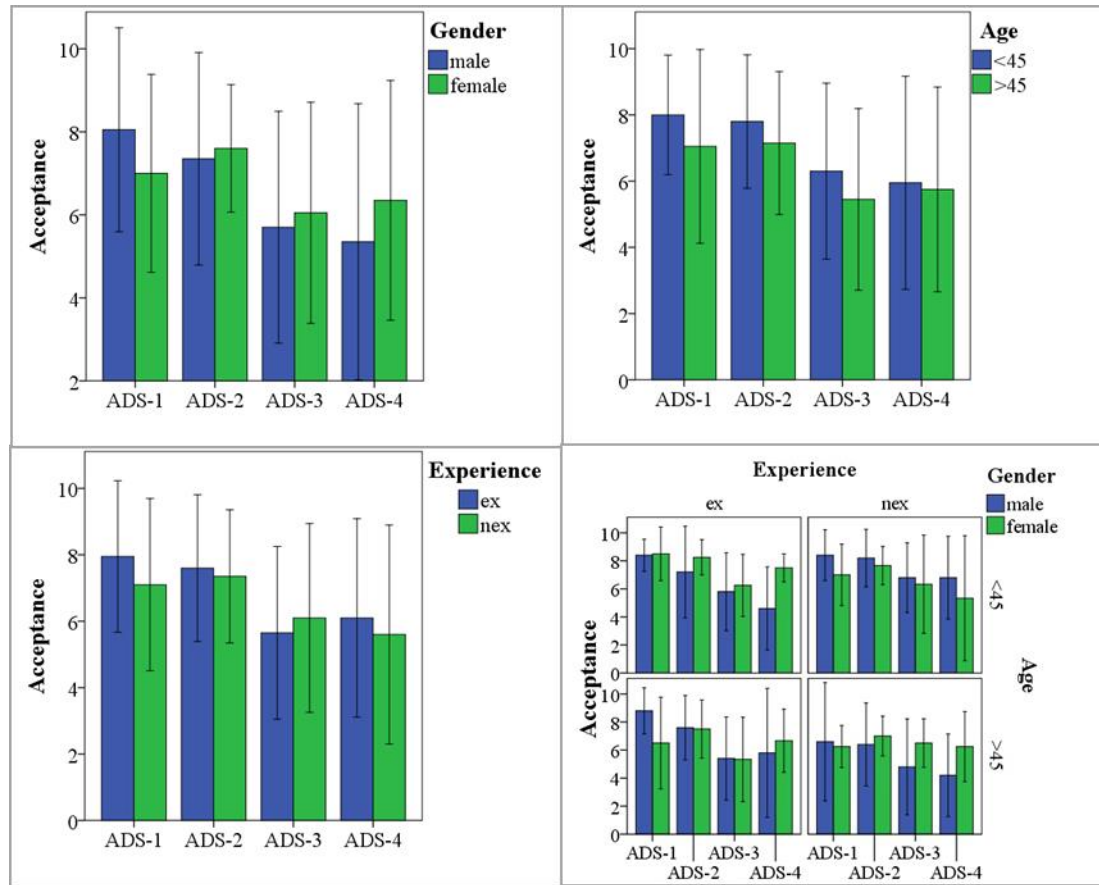


Fig. 3 Subjective assessment of drivers' acceptance of ADS designs (error bars represent the standard deviation). Top-left: participants are divided into 20 male and 20 female drivers. Top-right: participants are divided into 20 older and 20 younger drivers. Bottom-left: participants are divided into 20 experienced and 20 non-experienced drivers based on their previous experience with automated driving. Bottom-right: participants are divided into eight subgroups (5 drivers each) based on gender, age, and previous experience of ADS

The overall drivers' subjective assessment of their acceptance of the systems was good. While the demographic human factors revealed significant differences under ADS-1 and ADS-4, they did not reveal significant differences under ADS-2 and ADS-3. The likely reason for such differences can be related to the extent to which the design of each system is compatible with the concept of human-centered automation (see ⁸⁾ for more details). ADS-1 and ADS-4 did not support human decision-making when the automated process changed in response to an external change in the surrounding environment. The drivers may not understand the automated process, which may lead to unexpected system behavior and reduce human trust and acceptance. Although ADS-2 and ADS-3 differed in systems capabilities, both systems are designed to support human decision-making and drivers' understanding of the automated process and the surrounding environment.

This study has gone some way toward enhancing our understanding of how driver gender, age, experience, and practice will influence the potential effects of automated vehicles on traffic flow and safety. The investigation of the interaction between demographic factors and system design in such time-critical conditions has shown that the drivers tend to accept and trust systems with less intervention

than those requiring driver intervention. It also shows that cooperative ADS designs (e.g., ADS-2 and ADS-3) would compromise the influence of demographic factors. Though limited in terms of the small sample size and the investigated scenarios, these findings can be used to develop ADS interventions, particularly during the penetration of automated vehicles in real traffic and the potential conflict with the manually (human) controlled vehicles. They also warrant future research on the influence of individual characteristics on user-ADS interaction and the HMI design for automated vehicles.

References

- 1) SAE International: [Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles \(J3016\)](#), Society for Automotive Engineers (2018)
- 2) Zhou, H., Itoh, M., Kitazaki, S.: [Effect of instructing system limitations on the intervening behavior of drivers in partial driving automation](#), Cognition, Technology & Work, Vol.22, No.2, p.321-334 (2020)
- 3) Banks, V. A., Eriksson, A., O'Donoghue, J., Stanton, N. A.: [Is partially automated driving a bad idea? Observations from an on-road study](#), Applied ergonomics, Vol.68, p. 38-145 (2018)
- 4) Cabrall, C. D., Eriksson, A., Dreger, F., Happee, R., de Winter, J.: [How to keep drivers engaged while supervising driving automation? A literature survey and categorisation of six solution areas](#), Theoretical issues in ergonomics science, Vol.20, No.3, p.332-365 (2019)
- 5) Kraft, A.-K., Naujoks, F., Wörle, J., Neukum, A.: [The impact of an in-vehicle display on glance distribution in partially automated driving in an on-road experiment](#), Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, Vol.52, p.40-50 (2018)
- 6) Louw, T., Kountouriotis, G., Carsten, O., Merat, N.: In Driver inattention during vehicle automation: How does driver engagement affect resumption of control?, 4th International Conference on Driver Distraction and Inattention (DDI2015), Sydney: proceedings, ARRB Group (2015)
- 7) Wu, Y., Kihara, K., Takeda, Y., Sato, T., Akamatsu, M., Kitazaki, S.: [Effects of scheduled manual driving on drowsiness and response to take over request: A simulator study towards understanding drivers in automated driving](#), Accident Analysis & Prevention, Vol.124, p.202-209 (2019)
- 8) Inagaki, T., Sheridan, T. B.: [A critique of the SAE conditional driving automation definition, and analyses of options for improvement](#), Cognition, technology & work, Vol.21, No.4, p.569-578 (2019)
- 9) Zeeb, K., Buchner, A., Schrauf, M.: [Is take-over time all that matters? The impact of visual-cognitive load on driver take-over quality after conditionally automated driving](#), Accident Analysis & Prevention, Vol.92, p.230-239, (2016)
- 10) Rauffet, P., Botzer, A., Chauvin, C., Saïd, F., Tordet, C.: [The relationship between level of engagement in a non-driving task and driver response time when taking control of an automated vehicle](#), Cognition, Technology & Work, Vol.22, No.4, p.721-731 (2020)
- 11) Kyriakidis, M., de Winter, J. C., Stanton, N., Bellet, T., van Arem, B., Brookhuis, K., Martens, M. H., Bengler, K., Andersson, J., Merat, N.: [A human factors perspective on automated driving](#), Theoretical Issues in Ergonomics Science, Vol.20, No.3, p.223-249 (2019)
- 12) Chialastri, A.: [Automation in aviation](#), INTECH Open Access Publisher (2012)
- 13) Cohen, J., Nuckolls, L., Mourant, R. R.: [Endoscopy simulators: lessons from the aviation and automobile industries](#), Gastrointestinal Endoscopy Clinics, Vol.16, No.3, p.407-423 (2006)
- 14) Cummings, M. L., Guerlain, S.: [Developing operator capacity estimates for supervisory control of autonomous vehicles](#), Human factors, Vol.49 No.1, p.1-15 (2007)
- 15) Barnhart, R. K., Marshall, D. M., Shappee, E.: Introduction to unmanned aircraft systems, Crc Press (2020)
- 16) Cantin, V., Lavallière, M., Simoneau, M., Teasdale, N.: [Mental workload when driving in a simulator: Effects of](#)

-
- [age and driving complexity](#), Accident Analysis & Prevention, Vol.41,No.4, p.763-771 (2009)
- 17) Getzmann, S., Arnau, S., Karthaus, M., Reiser, J. E., Wascher, E.: [Age-related differences in pro-active driving behavior revealed by EEG measures](#), Frontiers in human neuroscience, Vol.12, No.321, (2018)
- 18) Körber, M., Gold, C., Lechner, D., Bengler, K.: [The influence of age on the take-over of vehicle control in highly automated driving](#), Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, Vol.39, p.9-32 (2016)
- 19) Skrypchuk, L., Mouzakitis, A., Langdon, P., Clarkson, P.: [In The Effect of Age and Gender on Task Performance in the Automobile](#), Cambridge Workshop on Universal Access and Assistive Technology, Springer, p.7-27 (2018)

視野障害者における 高度運転支援システムの事故低減効果算出

Calculation of the Accident Reduction Effectiveness of Advanced Driving Support Systems
for People with Visual Field loss

大田 浩之*1	安達 章人*1	内田 信行*2	北島 創*2
Hiroyuki OHTA	Akito ADCHI	Nobuyuki UCHIDA	Sou KITAJIMA
青木 宏文*3	稲上 誠*4	田島 淳*5	
Hirofumi AOKI	Makoto Inagami	Jyun Tajima	

Abstract

In the second phase of the SIP "Advanced Driving Support for Drivers with Visual Field Loss" project, the effectiveness of driving support systems for drivers with visual field loss was estimated. As a part of this project, we compared the frequency of accidents between drivers with normal vision and those with visual field loss, and calculated the reduction rate of traffic accidents by using the multi-agent traffic environment simulation technology developed by the Japan Automobile Research Institute in the first phase of the SIP. The results can be used to examine the effectiveness of the system for this issue.

1. はじめに

本報告では、2020年度SIP第2期「視野障害を有する者に対する高度運転支援」¹⁾事業で名古屋大学 未来社会創造機構が担当された「ドライビングシミュレーターの利用による運転支援機を対象とした視野障害特有の事故の削減効果の検証」において一般財団法人日本自動車研究所（JARI）がSIP第1期にて開発したシミュレーション²⁾を活用した事故低減効果算出について述べる。

同事業では、視野障害者の運転に対し支援システム利用による安全性確保を担保するための方法論を確立し、それを周知啓発することを目標とし実施された。その一環として、まず、医療機関においてドライビングシミュレーター（以下、DSという）を用いた視覚障害（緑内障、色素変性による）のうち視野障害（視野角欠損）のデータ収集およびデータベース構築を行い、視野障害特有の事故要因を明確化し、次に事故リスクに対して自動ブレーキや音声支援をはじめとする運転支援システムの支援条件を検討した。これらの結果を用いて、運転支援システムの有用性・有効性について、視野障害を例として社会や関係各所に広く情報発信し、高度運転支援システムの普及と安全意識の向上を目指し実施した。今回、JARIは支援条件の検討の一環としてシミュレーションを用いた事故低減効果を算出した。このシミュレーションは、JARIが経済産業省より受託したSIP第1期「戦略的イノベーション創造プログラム（自動走行システム）：交通事故低減詳細効果見積もりのためのシミュレーション技術の開発及び実証」²⁾事業にて開発したものである。本シミュレーションは、シミュレーションに登場する各交通参加者（ドライバ、歩行者、自転車）のエラーなどの事故要因も含めた行動モデルを可能な限り忠実に織り込むことにより実際の交通環境において偶発的に発生する事故を模擬できるものであり、各交通参加者が、知覚・認知、判断及び操作を自律的に行う主体

*1 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部

*2 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部 博士（工学）

*3 名古屋大学 未来社会創造機構 博士（工学）

*4 名古屋大学 未来社会創造機構

*5 三咲デザイン合同会社 博士（工学）

* 原稿受理 2021年11月10日

(エージェント) となり、相互の行動に影響し合うマルチエージェント方式を採用したものである。このシミュレーションを用い算出された健常者と視野障害者の事故発生頻度の比較と運転支援システムを搭載した場合の定量的な事故低減効果を「ドライビングシミュレーターの利用による運転支援機を対象とした視野障害特有の事故の削減効果の検証」における視野障害者に対する運転支援システムの有効性検証に活用いただいた。

2. 交通環境モデルの構築

ここでは、ドライバによる運転挙動をシミュレーション上で再現し、ドライバの視野特性の差異により、事故の発生率や運転支援システムの効果がどのように表れるかを模擬するための交通環境モデル構築について述べる。

2.1 シミュレーションで模擬する交通環境

Fig. 1 に示したシミュレーション実行道路環境をベースに、Fig. 2 のように、単路部では、歩行者は可視領域での道路横断と遮蔽物からの飛び出しを行う。また、信号無し交差点部では、ドライバの左右安全確認行動終了に合わせて交差点部に自動車や自転車が進入する状況を模擬した。さらに、信号交差点部では、信号の現示情報を設定し、ドライバの認識ミス（視野障害による）による信号無視を模擬した仮想道路を作成した。

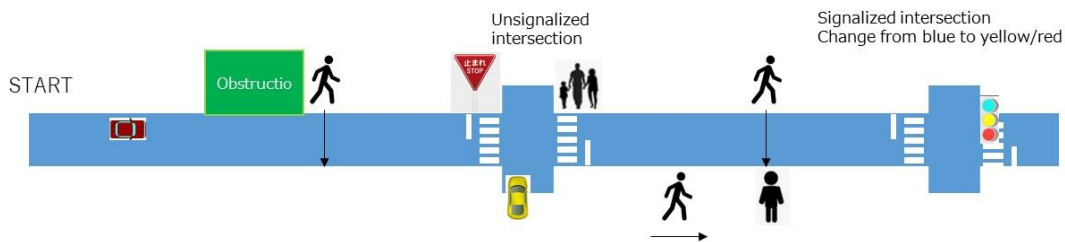


Fig. 1 Road environment assumed in the simulation

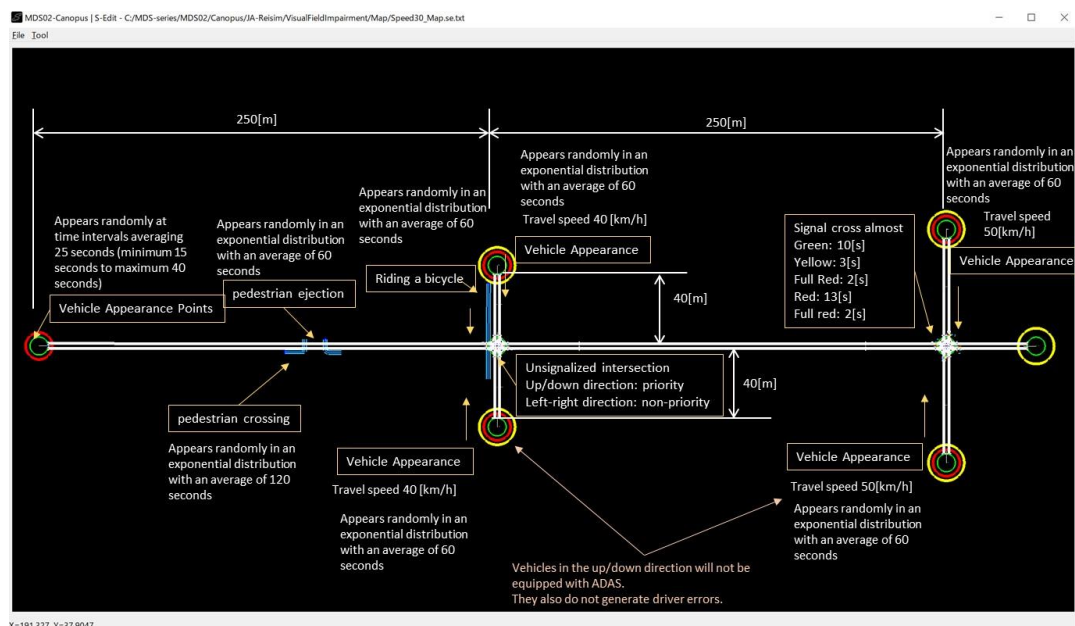


Fig. 2 Road data for simulation

2.2 交通量設定

交通量については、実際の交通環境を模擬しているものではない。2.1 節にて示した Fig. 2 で発生する事故の発生率になるべく同程度となるように交通参加者の出現率とエラー発生確率を調整した。

事故類型は以下の 5 つとした。

- ・歩行者横断
- ・歩行者飛び出し
- ・自転車出会い頭
- ・信号無し交差点車両出会い頭
- ・信号有り交差点車両出会い頭

車両交通量の設定は、走行経路を指定し、その経路を走行する車両交通量を[台/時]で設定した。また、直線車両、信号なし交差車両、信号待ち交差車両について、以下の発生間隔を設定した。

直進車両発生時間間隔： $25\text{ s} + 15\text{ s} \times [-1, 1)$ の一様乱数

交差車両発生時間間隔： 平均 60 s の指数分布に従うランダムな時間間隔

信号交差点については、信号待ちする交差車両を 1 台のみとするようにし、出会い頭事故が起こるのが信号の切り替わり直後となるようにした。

歩行者（横断・飛び出し）、自転車については、それぞれ以下の発生間隔とした。

横断歩行者発生時間間隔： 平均 120 s の指数分布に従うランダムな時間間隔

飛び出し歩行者発生時間間隔： 平均 60 s の指数分布に従うランダムな時間間隔

自転車発生時間間隔： 平均 60 s の指数分布に従うランダムな時間間隔

車両の交通量の設定は、走行経路を指定し、その経路を走行する車両交通量を[台/時]で設定した。車両の交通量は、車種ごとに設定可能である。歩行者・自転車の交通量の設定については、歩行経路ごとに交通量を[人/時]で指定する（自転車は移動速度の速い歩行者として扱う）。歩行者については、年齢層別に交通量を設定できるが、今回は、シミュレーション・プログラム側で年齢層別の比率を設定した。（Table 1 参照）

Table 1 Occurrence rate by age group

Driver		Pedestrian	
Age group	Percentage [%].	Age group	Percentage [%].
Non-elderly	76.63	Children	6.38
elderly person	26.37	Non-elderly	67.25
		elderly person	26.37

Non-elderly: 64 years old or younger, Children: 6 to 12 years old

2.3 交通参加者の移動速度設定

車両については、下記に示すシミュレーション条件を使用する。歩行者、自転車は 2020 年度「戦略的イ

ノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期／自動運転 (システムとサービスの拡張)／自動運転及び運転支援による交通事故削減効果の見える化」中間報告書 [2](#)を参照した。

直進車両：30 km/h (8.33 m/s) , 50 km/h (13.89 m/s)

交差車両：信号無し交差点 40 km/h (11.11 m/s) , 信号交差点 50 km/h (13.89 m/s)

歩行者, 自転車：Table 2 および Table 3 に示す平均値, 標準偏差の正規分布に従い設定した。

Table 2 Travel speed of pedestrians

Age group	Walking speed [m/s]	Standard deviation [m/s]
Children	1.339	0.107
Non-elderly	1.358	0.093
elderly person	1.337	0.104

Non-elderly:64 years old or younger,Children:6 to 12 years old

Table 3 Travel speed of bicycles

Age group	Traveling speed [m/s]	Standard deviation [m/s]
10-14 years old	3.17	0.663
15 to 64 years old	5.62	0.861
Over 65 years old	3.17	0.663

2.4 ドライバの視野設定

直進車両のドライバには, 名古屋大学 未来社会創造機構からシミュレーション条件として指定された以下の視野パラメータを設定し, 視野範囲内にある他車両, 歩行者・自転車などの交通参加者のみを知覚できるようにした。視野は, 視距離と視野角の 2 つのパラメータにより定義した。視距離は全て 100 m とし, 視野角を 3 段階で正常眼 140°, 中等度障害 40°, 重度障害 20° とした。

3. ドライバモデルの構築

本章では, 健常者と視野障害者ドライバによる運転挙動をシミュレーション上で再現し, 視野特性の差異による事故の発生率と運転支援システムの効果による事故の発生率差を調査するためのシミュレーションモデルを示す。ドライバの認識行動について 3.1 節にて述べる。

3.1 ドライバの認識行動モデル

本節では, 健常者ドライバと視野障害者ドライバが同一の条件にて, 単路での歩行者横断行動, 信号無し交差点での自転車横断, 車両飛び出し, および信号交差点での信号現示情報確認による交差点進入に対応できるかを模擬するためのシミュレーションで使用するドライバモデルの構築に関して述べる。

3.1.1 車両運転中の視線移動モデル

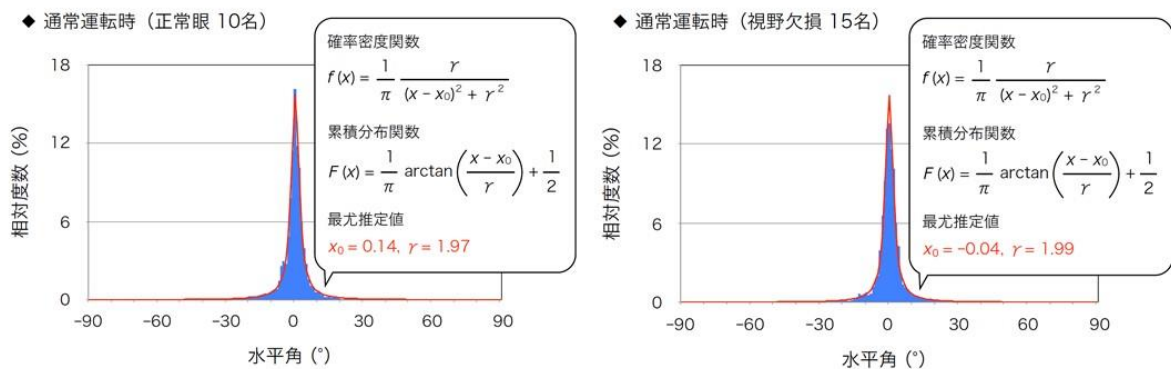
直線車線を運転中のドライバは, 周辺状況を確認するため前方方向から周辺へ視線移動を行う。この時の健常者と視野障害者では, 視線の移動方法 (移動角度など) が異なる。これは, 視野障害者は, 無意識に周辺認識の補償行動を行っているためと考えられる。

プログラムでは, 名古屋大学 未来社会創造機構で実施した DS 実験 (Fig. 3 参照) の結果に基づき注視方向を確率的に決定する。例えば, 単路部での視線移動は 1 s ごとに乱数を振り, 視線方向を Fig. 4 の確率密度関数に従い決定する。

通常視野のドライバは-73° から 67°, 視野障害のドライバは-58° から 60° の範囲で, 1° ごとに割合を指定することとし, 各 x に対する累積分布関数の値を求め, コーシー分布において $F(x-1) < r < F(x)$ となる x を決定する。



Fig. 3 DS experiment conducted at the Institute of Innovation for Future Society, Nagoya University



名古屋大学未来社会創造機構提供シミュレーション仕様

Fig. 4 Eye movement while driving in a straight lane

3.1.2 直線道路運転中の視線移動による認識行動モデル

前項では、直線道路運転中の視線移動を定義した、本項では、直線道路走行中に他の交通参加者を認識した場合のドライバモデルに関して述べる。

なお同一車道上に存在する先行車の認識に関しては、先行車との相対速度、車間距離に基づいて加減速を行う追従モデルの一種であるヴィーダーマンモデル⁴⁾を使用し、車両間の前後距離、先行車の速度により自車両の速度決定を行っている。今回ここで述べるドライバモデルは、車両が直線道路走行中に他の交通参加者（歩行者を想定）を認識した時にどのような行動を行うかを定義したものである。Fig. 5 に飛び出し歩行者に対するドライバモデルの例を示す。

1) ドライバは歩行者を確認するまでは、3.1.1 項で定義された車両運転中の視線移動を行う。

2) ドライバは歩行者 A を 100 m 前方で認知するがこの距離では視線移動に変化はない。

重度視野障害者においても、視野角 20° であれば、今回シミュレーションで定義する、

車線幅：片側 4 m、横断歩道幅：2 m の道路構造上にいる歩行者を 100 m 手前の地点で認知できる。

3) 車両と歩行者 A との距離が 30 m になった段階で、ドライバの視線移動が歩行者に対する注視行動へ変化する。Fig. 6 に名古屋大学 未来社会創造機構の DS 実験にて取得したドライバの歩行者注視時間を示す。シミュレーションではドライバが歩行者を認識してから歩行者に視線を固定する歩行者注視時間（平均 1.23 s、分散 0.33 s² の正規分布に従う）を決定し、視線を歩行者 A へ向くように変化する。

- 4) 車両と歩行者の交錯点において、車両が歩行者より早く交錯点を通過する場合は、名古屋大学 未来社会創造機構の DS 実験にて取得した Fig. 7 に示す歩行者注視行動終了時間に基づき、通過の 4.7 m 前で、歩行者から前方方向に視線を移動する。

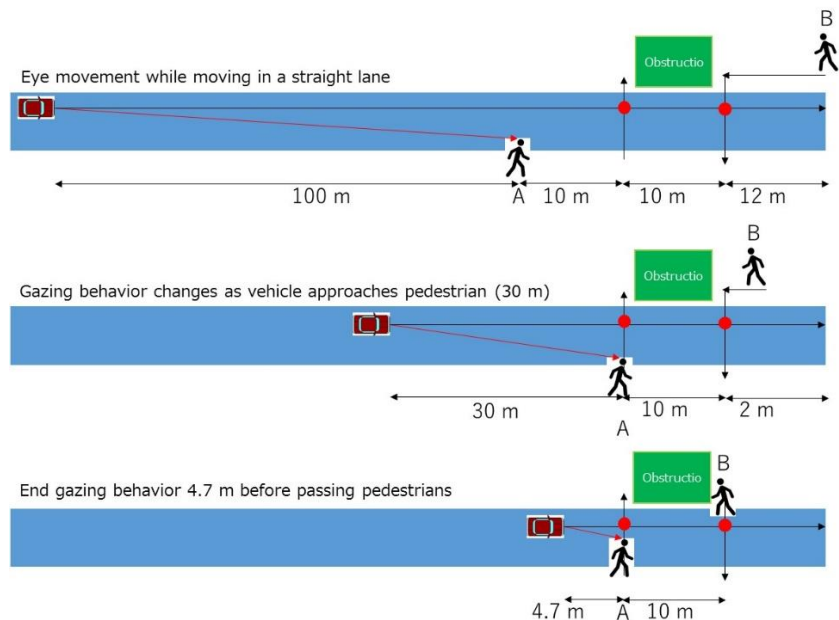
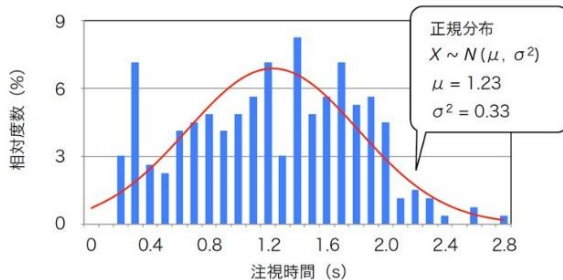


Fig. 5 Driver model for appearing pedestrians

HMDを用いて収集したデータ（延べ229名）を利用
 - 2.8sの間に歩行者を注視した回数
 - 合計の注視時間の平均と一回の注視時間の平均

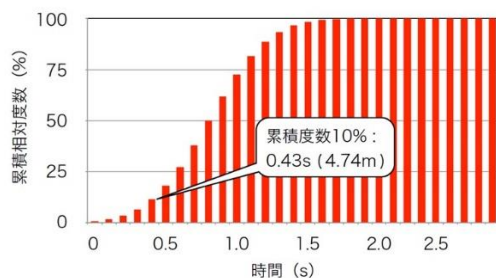
注視回数（回）	0	1	2	3
人数（名）	6	183	37	3
割合（%）	2.6	79.9	16.2	1.3
合計の注視時間の平均（s）	-	1.45	1.56	1.40
一回の注視時間の平均（s）	-	1.45	0.78	0.47

- 一回の注視時間の分布を正規分布によりモデル化
 - シミュレーションでは、このモデルに基づき注視時間を選択



名古屋大学未来社会創造機構提供シミュレーション仕様

Fig. 6 Driver gazing time at pedestrians



名古屋大学未来社会創造機構提供シミュレーション仕様

Fig. 7 End time of driver's gazing behavior

3.1.3 信号無し交差点での認識行動モデル

信号無し交差点に非優先道路から進入しようとするときに、ドライバは、停止線で停車し、交差点の安全確認を行った後車両を発進させる。（Fig. 8 参照）

今回、一時停止標識を認識しないドライバエラーはシミュレーションの対象としない。

以下に、信号無し交差点でのドライバの認識行動を示す。

- 1) ドライバは、一時停止標識を認識し停止線で停車する。（停止標識の見落としは無い）
- 2) ドライバは、信号無し交差点で 3) に示す確認行動を行う。

安全確認を行うための視線移動に関しては、名古屋大学 未来社会創造機構の DS 実験にて得られた結果を Fig. 9 に示すように、正弦波にて近似する。

- 3) 正面からはじめて右、左、右と視線を向けて、他の交通参加者を視認しなかった場合には、安全だと判断して、交差点に進入する。

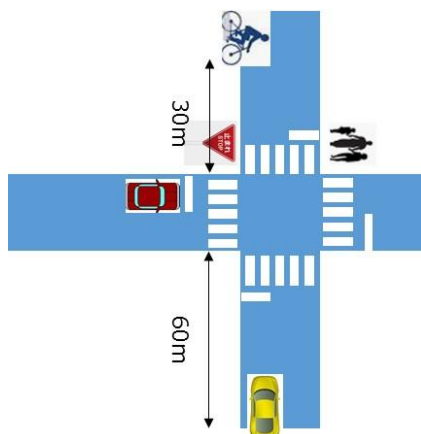
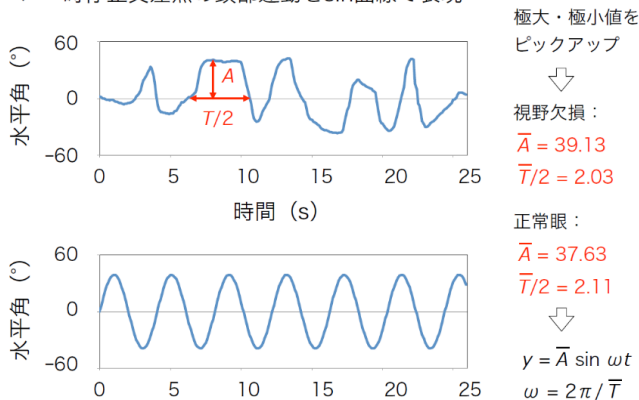


Fig. 8 Driver's cognitive behavior at unsignalized intersections

◆ 一時停止交差点の頭部運動をsin曲線で表現



特性	健常者	障害者
視線移動	$y = 37.63 \sin \omega t$	$y = 39.13 \sin \omega t$
周期	$\omega = 2\pi / 4.22$	$\omega = 2\pi / 4.06$

注：視野障害の程度による差は設けない。

名古屋大学未来社会創造機構提供シミュレーション仕様

Fig.9 Head motion model of a driver at a stop intersection

3.1.4 信号有り交差点での認識行動モデル

信号有り交差点でドライバが信号機の現示情報を正確に認識することが出来ないことにより生じる事象

を模擬するための認識行動を定義する．（ドライバは青色現示であると認識しているが、実際には黄色現示から赤色現示に移行しており、法規無視して信号有り交差点に進入する状況）

Fig. 10 に道路交通法にて定められている信号機の設置条件と視野障害者の信号確認距離を示す．通常の信号機の設置位置を地上 5.6 m とし、車両のドライバ視線位置を 1 m とすると上図のように視野障害者が正面を向いているときに信号機を確認できる距離は、軽度障害者は約 12 m 以上、重度障害者で約 25 m 以上となる．

また、ドライバの横方向の視線移動により軽度障害者は左右に 20° 以上、重度障害者は左右に 10° 以上、視線を移動した状態では信号機を確認できなくなる．

信号交差点では、信号機の見落としによる信号無視を実装した．具体的には、信号無視の確率を設定して、停止線から 30 m 手前の位置に来たときに、 $[0, 1)$ の一様乱数をランダムサンプリングし、その値が信号無視の発生確率より小さい場合に、信号無視させる．信号無視の確率として、名古屋大学 未来社会創造機構の DS 実験によるドライバの信号見落とし確率 (Fig. 11 参照) を使用した．軽度視野障害者は 26.92 %、重度視野障害者は 47.86 % である．なお、信号無視はするが、交差車両の知覚・認識は行っており、衝突しそうであると判断した場合は、衝突を回避すべく、制動動作を行う．

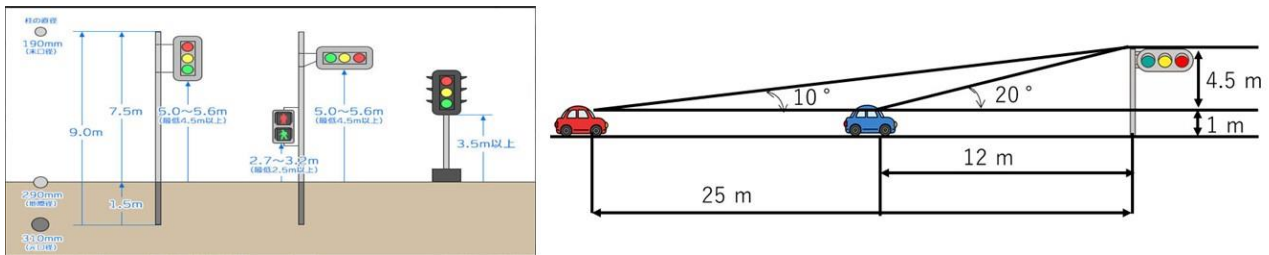
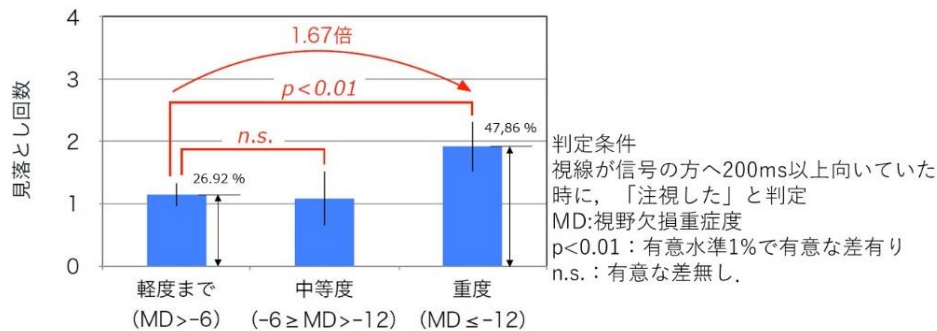


Fig.10 Distance at which a person with vision loss can see a traffic light



名古屋大学未来社会創造機構提供シミュレーション仕様

Fig. 11 Probability of missing a signal by DS experiment

4. 運転支援システム

今回のシミュレーションでは運転支援システムとして警報システムと衝突被害軽減ブレーキシステムによる支援を行う．実装するシステムの概要を以下に示す．

① センサ

センサのパラメータとして、検出角度と検出距離を設定した．

また、ドライバの視野処理と同様に、交差点付近では、周囲の建物により遮蔽されることを考慮した．

②対象抽出

センサで検出された対象が、自車と衝突するかどうかを以下のロジックにより決定した。 Fig. 12 参照

(1) 対象が自車延長上に来る時刻 $T2$ を算出

$$T2 = R_y / V_y$$

(2) V_{rel} を対象との相対速度として、自車が対象の地点に到達する時刻 $T1$ を算出

$$T1 = R_x / V_{rel}$$

(3) $|T1 - T2| < 2.0$ のとき、衝突すると判定

③警報

抽出された対象との Time To Collision(以下 TTC という) ($= T1$)が、警報の閾値以下であれば、警報が発報される。

④衝突被害軽減ブレーキ

抽出された対象との TTC が、衝突被害軽減ブレーキ作動の閾値以下であれば、自動ブレーキを掛ける。自動ブレーキの特性は、減速度勾配と最大減速度の2つのパラメータで設定できるようにした。

シミュレーションでは、これらの組み合わせにより、Table 4 の4つのシステムの効果評価を行った。

(1)警報システム (普及車版センサ)

(2)警報システム (高級車版センサ)

(3)警報システム+衝突被害軽減ブレーキシステム (普及車版センサ)

(4)警報システム+衝突被害軽減ブレーキシステム (高級車版センサ)

⑤ドライバの反応

警報発報時に、ドライバが知覚・認識エラー状態にあるときには、時間遅れ分の時間経過後にエラー状態から復帰する。時間遅れは、名古屋大学 未来社会創造機構の DS 実験にて得られた実験結果に基づいて、Fig. 13 の分布に従う確率変数とした。

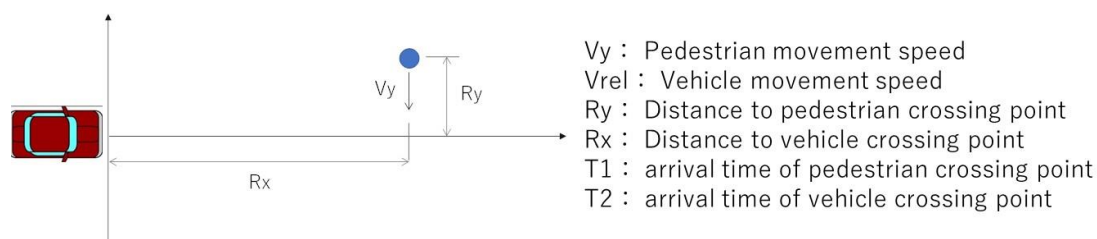
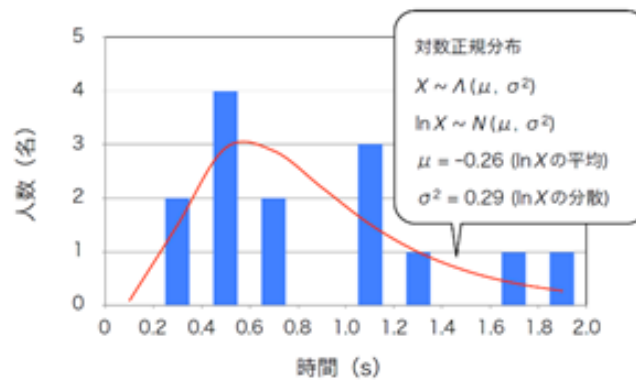


Fig. 12 Pedestrian and vehicle collision detection

Table 4 Parameters of the driver assistance system

	System 1	System 2	System 3	System 4
Detection angle	40°	140°	40 °	140 °
Detecting distance	50 m	50 m	50 m	50 m
Alarm TTC	1.8 s	1.8 s	1.8 s	1.8 s
Automatic brake TTC			0.6 s	0.6 s
Deceleration gradient			35 m/s ³	35 m/s ³
Maximum deceleration			7.8 m/s ²	7.8 m/s ²



名古屋大学未来社会創造機構提供シミュレーション仕様

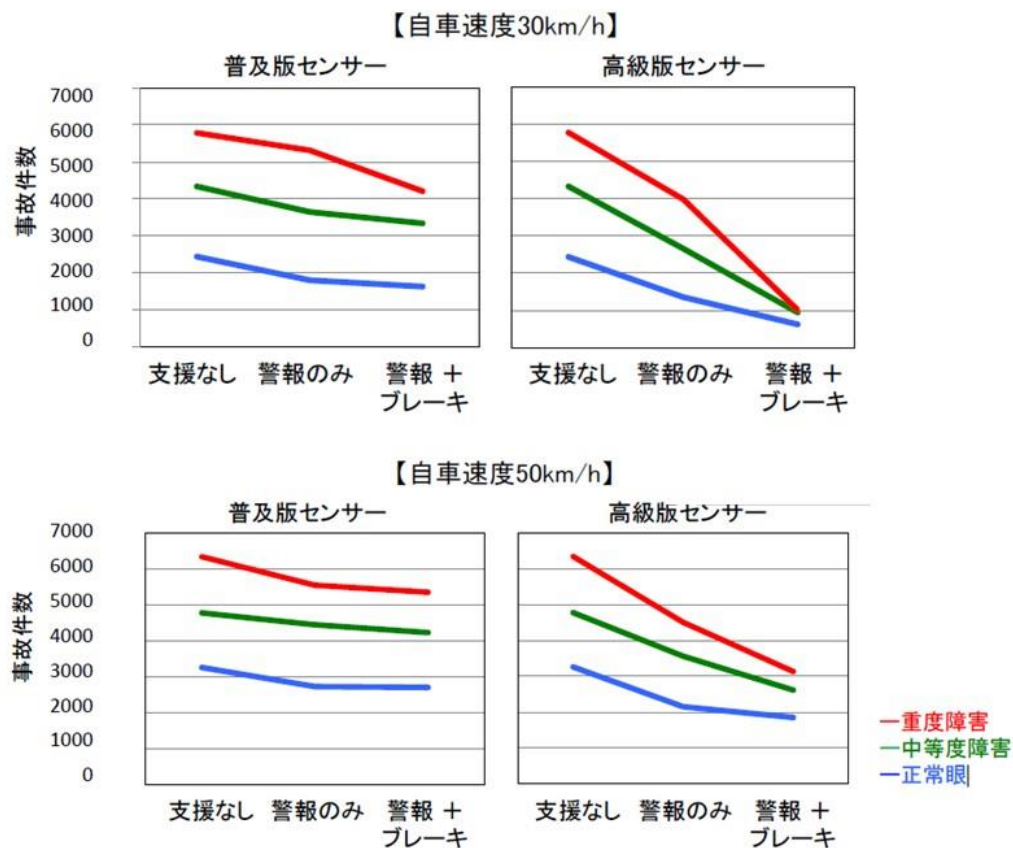
Fig.13 Time delay distribution for recovery from perceptual and cognitive errors

5. シミュレーション結果と考察

3章で定義した名古屋大学 未来社会創造機構の DS 実験で得られたドライバの行動モデルを反映しマルチエージェント交通環境再現型シミュレーションを実行，それぞれの条件において十分な回数（20 万回以上）の走行を繰り返し，事故の発生を模擬した．歩行者横断事故のシミュレーション結果を例として Table 5 に示す．これらのシミュレーション結果をもとに名古屋大学 未来社会創造機構で行われた歩行者横断，歩行者飛び出し，自転車出会い頭，信号無し交差点車両出会い頭，および，信号有り交差点車両出会い頭事故の集計解析において警報＋ブレーキと高級版センサを組み合わせることにより，視野障害を有するドライバによる事故が，正常眼・支援なしの条件と同程度以下まで低減すると報告されている（Fig. 14 参照）．

Table 5 Pedestrian crossing accidents

A healthy person Traveling speed 30 [km/h]	Number of vehicles generated [units]	Number of accidents [units]	Accident rate	relative accident rate	Average speed at conflict [km/h]	Standard deviation of speed at collision [km/h]	A healthy person Traveling speed 50 [km/h]	Number of vehicles generated [units]	Number of accidents [units]	Accident rate	relative accident rate	Average speed at conflict [km/h]	Standard deviation of speed at collision [km/h]
No driver assistance system	202,189	497	0.00246	1.00	26.82	4.95	No driver assistance system	202350	744	0.00368	1	41.72	11.84
System1	201,828	94	0.00047	0.19	16.53	8.13	System1	203580	503	0.00247	0.67	22.31	11.4
System2	202,170	114	0.00056	0.23	9.33	5.52	System2	203086	515	0.00254	0.69	19.03	7.21
System3	200,945	28	0.00014	0.06	16.71	9.08	System3	202041	511	0.00253	1.03	22.32	11.86
System4	201,380	0	0.00000	0.00	0.00	0.00	System4	202815	499	0.00246	1	19.5	7.08
Mild visual field impairment Traveling speed 30 [km/h]	Number of vehicles generated [units]	Number of accidents [units]	Accident rate	relative accident rate	Average speed at conflict [km/h]	Standard deviation of speed at collision [km/h]	Mild visual field impairment Traveling speed 50 [km/h]	Number of vehicles generated [units]	Number of accidents [units]	Accident rate	relative accident rate	Average speed at conflict [km/h]	Standard deviation of speed at collision [km/h]
No driver assistance system	200,688	698	0.00348	1.41	23.77	8.15	No driver assistance system	202875	772	0.00381	1.03	38.98	14.38
System1	200,224	194	0.00097	0.39	12.57	8.33	System1	202818	635	0.00313	0.85	20.27	12.35
System2	200,638	228	0.00114	0.46	11.52	8.02	System2	202798	671	0.00331	0.9	16.95	8.21
System3	201,401	115	0.00057	0.23	12.53	8.76	System3	203096	631	0.00311	1.26	20.66	11.99
System4	201,236	2	0.00001	0.00	7.06	0.00	System4	202592	662	0.00327	1.33	15.52	7.58
Severe vision impairment Traveling speed 30 [km/h]	Number of vehicles generated [units]	Number of accidents [units]	Accident rate	relative accident rate	Average speed at conflict [km/h]	Standard deviation of speed at collision [km/h]	Severe vision impairment Traveling speed 50 [km/h]	Number of vehicles generated [units]	Number of accidents [units]	Accident rate	relative accident rate	Average speed at conflict [km/h]	Standard deviation of speed at collision [km/h]
No driver assistance system	200,830	909	0.00453	1.84	25.00	7.49	No driver assistance system	202350	744	0.00368	1	41.72	11.84
System1	201,174	590	0.00293	1.19	15.18	6.64	System1	203580	503	0.00247	0.67	22.31	11.4
System2	201,587	621	0.00308	1.25	14.20	6.10	System2	203086	515	0.00254	0.69	19.03	7.21
System3	201,019	375	0.00187	0.76	14.20	6.95	System3	202041	511	0.00253	1.03	22.32	11.86
System4	200,440	3	0.00001	0.01	5.11	2.64	System4	202815	499	0.00246	1	19.5	7.08



名古屋大学未来社会創造機構集計結果

Fig.14 Aggregate results of simulations including driver behavior models

6. まとめ

事故リスクに対する運転支援システムの支援条件の検討の一環として、シミュレーションを用いた事故低減効果を算出した。

今回使用したシミュレーションは、各交通参加者が、知覚・認知、判断及び操作を自律的に行う主体（エージェント）となり、相互の行動に影響し合うマルチエージェント方式のシミュレーションであり、以下の手順により実施した。

- ①シミュレーションエリアを選定する。
- ②エリア内の道路交通量を調査し地図情報を作成する。
- ③ドライバエージェント、歩行者エージェントに、交通事故の要因となるエラー行動を織り込む。
- ④シミュレーション結果とエリア内の交通量と交通事故派生状況を比較し、シミュレーションで現状が再現できていることを確認する。
- ⑤作成したシミュレーション環境に自動運転（運転支援）システムを導入した場合の交通事故削減効果を算出するために使用されてきた。

この SIP 第 1 期に開発した技術を活用し、SIP 第 2 期の「視野障害を有する者に対する高度運転支援」事業において名古屋大学 未来社会創造機構が DS 実験にて取得した、健常者ドライバと視野障害者ドライバの認識行動をモデル化したパラメータを取り込んで、シミュレーション実行した。警報+ブレーキと高級版センサを組み合わせた運転支援システムにより、視野障害を有するドライバによる事故が、正常眼・支援なしの条件と同程度以下まで低減することが分かり、「視野障害を有する者に対する高度運転支援」事業で

活用し、有効性を検証することができた。

これからは、今回の実施内容を踏まえ、シミュレーションの精度向上に向け、行動モデルをより実態に合わせた形で構築できるように研究を進めていく。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：2020年度「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期／自動運転（システムとサービスの拡張）／視野障害を有する者に対する高度運転支援システムに関する研究」 成果報告書, 2021, <https://www.sip-adus.go.jp/rd/rddata/rd04/301.pdf>（参照 2021.12.1）
- 2) 経済産業省：平成30年度「戦略的イノベーション創造プログラム（自動走行システム）：交通事故低減詳細効果見積もりのためのシミュレーション技術の開発及び実証」 調査報告書, 2021, https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H30FY/000354.pdf（参照 2021.12.1）
- 3) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：2020年度「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期／自動運転（システムとサービスの拡張）／自動運転及び運転支援による交通事故削減効果の見える化」 中間報告書, pp152-158, 2021, https://www.sip-adus.go.jp/file/rd03/rd-result_all.pdf（参照 2021.12.1）
- 4) Saifuzzaman, M., et al. : [Incorporating human-factors in car-following models: A review of recent developments and research needs](#), Transportation Research Part C Emerging Technologies, Vol. 48, (2014), pp. 379-40

使用実態を考慮した 業務用車両における電動車普及可能性の検討

Study on the Possibility of Penetration of Electric Vehicles in Commercial Vehicles Considering the Actual Use Conditions

金成 修一^{*1}
Shuichi KANARI

森川 多津子^{*2}
Tazuko MORIKAWA

田宮 日奈^{*1}
Hina TAMIYA

富田 幸佳^{*2}
Yukika TODA

伊藤 晃佳^{*2}
Akiyoshi ITO

Abstract

The Japanese government has announced CO₂ emission reduction targets of 26% by 2030. The CO₂ reduction target for the automobile sector will be set based on these targets. One of the measures to reduce CO₂ emissions in the automotive sector is to promote the use of electric vehicles. However, most previous studies have considered passenger cars, and there are few studies that have considered commercial vehicles. This study first surveyed the actual use of commercial vehicles then an estimation method that can consider actual use based on estimating next generation vehicle models was developed. Finally, the model was used to estimate the effect of the diffusion of electric vehicles in commercial vehicles.

1. まえがき

2015年にフランス・パリで開催されたCOP21(国連気候変動枠組条約第21回締約国会議)にて、日本政府は地球温暖化対策の中期的な目標として、2030年までに温室効果ガス排出量を2013年比で26%削減することを表明した。この削減目標は5年毎に見直し、国際目標として提出することが求められている。さらに、菅義偉首相は2020年の第203回臨時国会の所信表明演説にて、2050年までに国内の温室効果ガス排出量を実質ゼロまで削減することを表明した。日本の総CO₂排出量のうち運輸部門からの排出は約2割であるが、このうち自動車部門が9割を占めており¹⁾、2030年、2050年の目標達成には自動車部門の早期の対策実施が必要である。自動車部門の主要なCO₂排出量対策の一つとして、走行時にCO₂を排出しない電気自動車(BEV)等の次世代自動車の導入が挙げられる。しかし、既往の検討^{2),3)}では、次世代自動車導入によるCO₂排出量削減のターゲットは乗用車が中心であり、貨物車などの業務用車両では物流の効率化などの対策に重点が置かれており、検討がほとんど行われていない。物流の効率化は貨物車のCO₂削減に対し、プライオリティの高い提案の1つではあるが、貨物車から排出されるCO₂排出量は運輸部門の約4割を占めているため、乗用車と同様に次世代自動車導入もより積極的に進めていくべきであると考えられる。これまでの貨物車への次世代自動車導入の議論の多くは、貨物車の幅広い用途に加え、顧客のニーズが第一義的に存在するため、事例解析による効果検証にとどまってきた。しかし、積載量や移動距離、使用実態などの点を精査することにより、次世代自動車の導入を無理なく進められる車種・分野を見出す検討が必要であると考えられる。

本報では、業務用車両としての貨物車の電動化を図るため、貨物車の使用実態に関する情報(走行距離、停止時間、駐車情報など)の収集・分析を行った。次に、調査結果に基づき、電動車の中で普及の制約があるBEVを中心に電動車の性能、価格などのユーザ選好、および充電インフラのスペックを考慮した電動車

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部

*2 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士(工学)

*本速報はJSAE著作権規則に基づくJSAE2021196の転載である

* 原稿受理 2021年11月10日

導入の最適な適用範囲を検討し、筆者らが開発を進めている技術選択モデルにて、中期である 2030 年を対象に電動車の普及可能性を検討した。

2. 業務用車両の使用実態

2.1 業務用車両の状況

2020 年 12 月末現在のわが国の自動車保有台数は 7,800 万台あまりであり、貨物車は 1400 万台あまり、約 18 %を占めている。車種は軽貨物車、小型貨物車、普通貨物車に分けられ、さらに業態として自家用と営業用に区分される。走行台キロで見た場合、貨物車は約 23 %を占め、台数比より走行比の方が大きい⁴⁾ (Fig. 1)。物流の観点からみると、貨物の流動を詳細に把握する全国貨物純流動調査（物流センサス）の 3 日間調査では、貨物の輸送量を重量ベースで見た場合、貨物車による輸送量の比率は 79.4 %であった。このように貨物車はわが国の物流を担い、長時間稼働している状況が見てとれる。

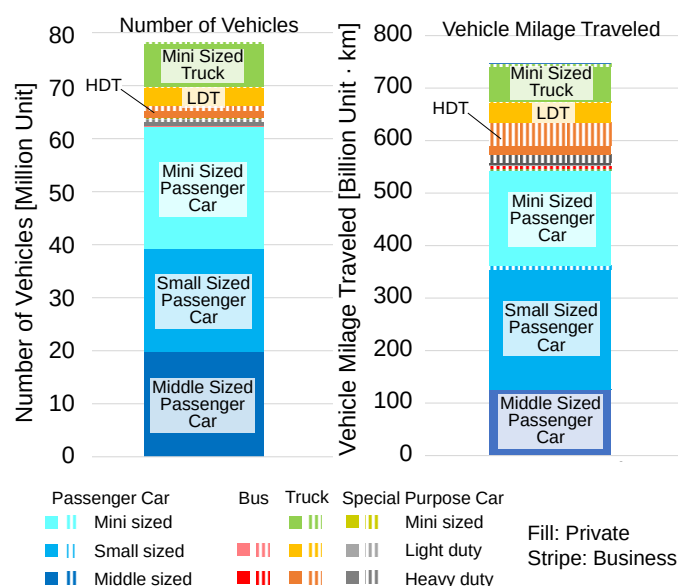


Fig. 1 The number of vehicles in use and vehicle mileage traveled

2.2 業務用車両の使用実態

貨物車の使用実態は、国土交通省が 2015 年に調査した道路交通センサス自動車起終点調査 (OD 調査)⁵⁾ をベースに検討した。OD 調査は平日・休日のそれぞれ 1 日を対象に、起点から終点への移動（トリップ）単位で記録したものであり、調査目的に応じデータが整理されている。本節ではこのうち、自動車利用特性の把握に必要な、詳細調査票の全調査項目を収録している自動車利用特性マスターデータを利用した。収録されているデータは軽貨物車 95,991 例、小型貨物車 111,194 例、普通貨物車 519,221 例である。それぞれ業態別となっており、自家用車両にのみ貨客兼用車（貨客車）7,623 例というカテゴリも含まれている。貨客車は道路交通法上では明確な定義はないため、統計上では通常、小型貨物車に含まれているが、ここでは貨客車として独立して扱われている。また、軽貨物車は営業用車両が少ないため本節以降は自家用軽貨物車について述べる。

2.2.1 貨物車の基本的な運行状況

本項では貨物車の基本的な運行状況を走行距離等の観点で整理した。

はじめに業態別車種別の 1 日当たりの平均走行距離、稼働率について整理した。その結果、車格が大きく

なる程、平均走行距離が長くなる傾向が見られる（Fig. 2）。また、業態別に見ると、営業用車両の方が自家用車両と比較して、平均走行距離が長く、稼働率が高い傾向が見られる。平日と休日の別では、トリップ長はいずれの車種も大きな差異は見られないが、稼働率は営業用・自家用ともにいずれの車種も休日が大幅に低い傾向が見られた。そのため以降のデータは稼働率の高い平日に絞り、電動車の普及可能性を検討した。

また、全国平均の平均トリップ長について、車種別に整理した結果を Fig. 3 に示す。1 回あたりのトリップについても自家用軽貨物車は短いトリップの頻度が多く 100 km を超すトリップはほとんどないのに対し、営業用普通貨物車は長めのトリップが多く 1 割以上が 100 km を超えていた。

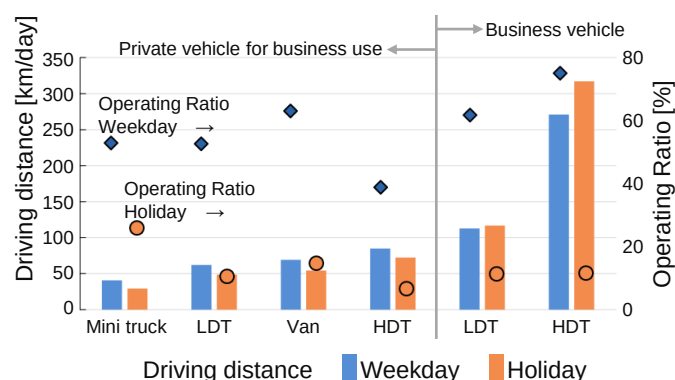


Fig. 2 Average driving distance and operating ratio (LDT: Light duty trucks, HDT: Heavy duty trucks)

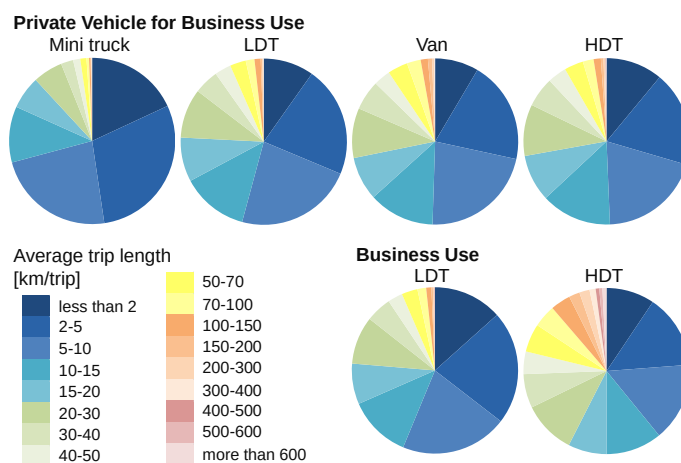


Fig. 3 Average trip length (LDT: Light duty trucks, HDT: Heavy duty trucks)

2.2.2 都市の違いによる使用実態の違い

本項では都市の違いによる貨物車の使用実態を検討した。規模、人口、都市化の状況が貨物車の使用実態に反映されると考え、車籍地をベースに日本の 1,718 市町村（2021 年 1 月 1 日現在）を、東京特別区、政令指定都市、中核市、施行時特例市（以降、ここでは特例市と呼ぶ）、その他の市、町村、の 6 つの行政区分^{6), 7)}に分けて走行距離に着目した検討をおこなった。Fig. 4 に代表的な業種・車種として、自家用軽貨物車、自家用普通貨物車、および営業用普通貨物車の 1 日あたりのトリップ長とトリップ数の関係を示す。いずれの業態・車種でも 1 日あたりのトリップ数が多いほど、1 回のトリップ長が短いという特徴が確認で

きた。行政区分別に見ると自家用軽貨物車は値のばらつきも大きい。東京特別区や政令指定都市の1回のトリップ長がその他の市、町村に比較して長い傾向にあった。自家用普通貨物車は逆の傾向にあり、東京特別区や政令指定都市の1回のトリップ長がその他の市、町村に比較して短い傾向であった。これは、自家用軽貨物車は小回りが利くため、都市内部の狭い道での利用に適しており物流の担い手としての比率が高く、自家用普通貨物車は同じ理由で逆の傾向を示しているものと推察される。一方、営業用普通貨物車はFig. 2に示すように総走行距離が非常に長く、車籍地にとらわれない使用実態があるものと考えられる。

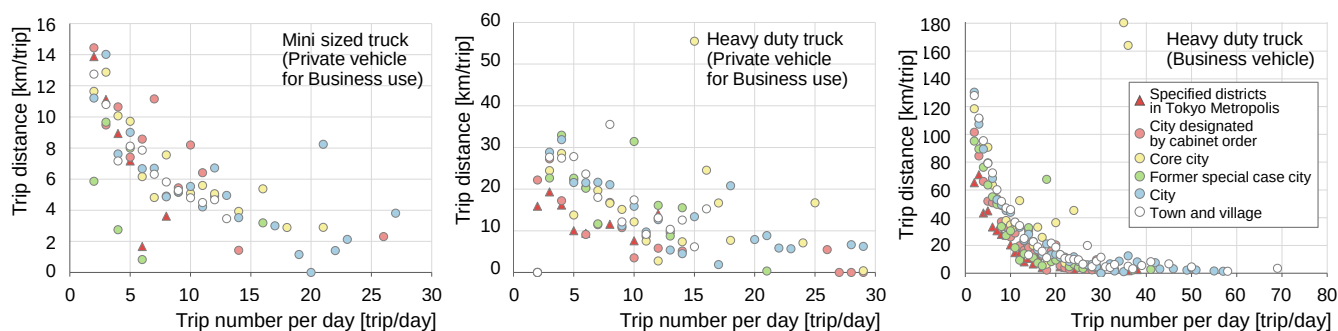


Fig. 4 Relationship between trip number and trip distance of each vehicle

(Left: Business heavy duty trucks, Middle: Private heavy duty trucks, Right: Private mini trucks)

2.2.3 都市の違いによる使用実態の違い

本項では車種別の日中、夜間の駐車場所について整理した。業務が行われない夜間の駐車場所と、日中の勤務時間中の駐車場所について、車種・業態別の比率をFig. 5に示す。運休中の車両は含んでいない。勤務終了後の駐車場所については、自家用貨物車に限り運行目的のデータがあったため、帰社を自社の車庫、帰宅を自宅の車庫と判断して分けた。

夜間の駐車場は車種・業態によらず自宅または自社の車庫がほとんどを占めた。一方、日中の勤務中の駐車場は自家用・営業用共に目的とする施設の駐車場が多く、自家用では自宅または自社の車庫がそれに続く結果となった。

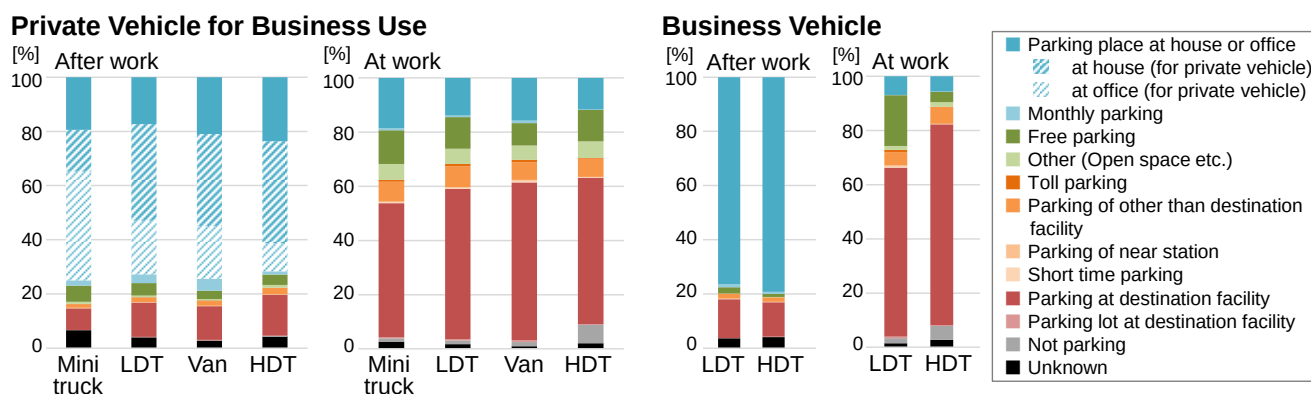


Fig.5 Ratio of parking area of each vehicle (LDT: Light duty trucks, HDT: Heavy duty trucks)

2.2.4 電動化普及に向けた使用実態データ整理

前述の2.2.1項～2.2.3項を電動化の視点でFig. 6に整理した。ここでは、一例として、自家用小型貨物車のものを示す。1日あたりのトリップ回数別では1日2回の車両が最も多く、トリップ回数が増すにつ

れ、車両数は減少する．ここでは勤務開始時刻と勤務終了時刻が定常的なものとして夜間の駐車時間を算出しているが、それによると夜間の駐車時間はほぼ 16 時間程度あり、これを充電時間とすると十分な時間が確保できるのではないかと考えられる．また、総走行距離が 100 km 以下程度の車両では 場合によっては日中の駐車時間も充電時間として確保できる可能性が示唆された．

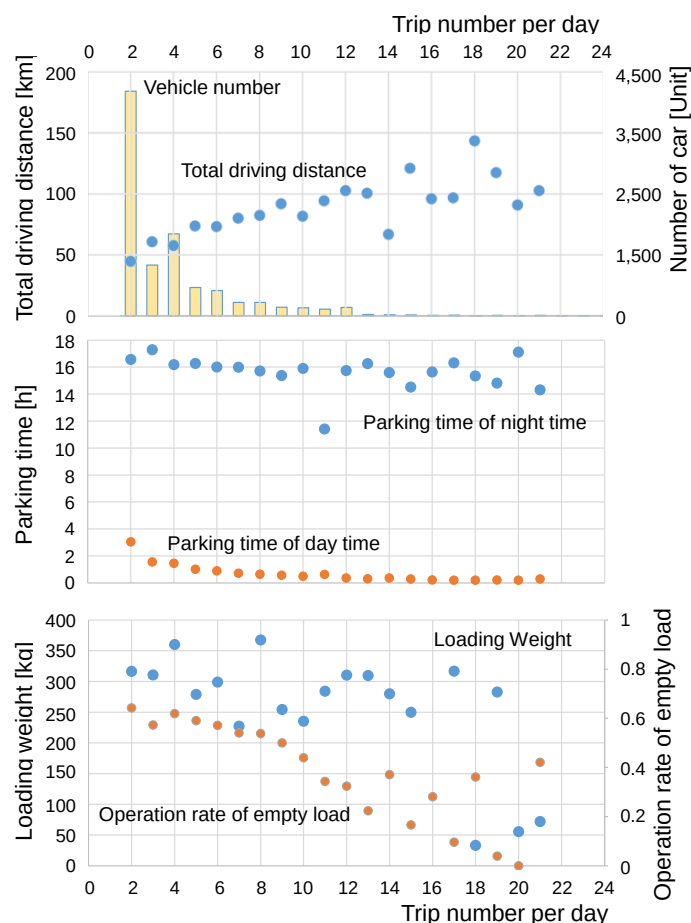


Fig. 6 Actual driving condition of each trip number (Private light duty trucks)

2.3 その他統計データの解析

2.2 節では主に OD 調査の結果を整理したが、他にも物流センサス⁸⁾からの状況把握および営業用貨物車のプローブ情報による調査も確認した．物流センサスは総合的な観点からみた貨物輸送の状況に適しているが、末端の貨物輸送の状況まで把握することはできなかった．本調査の目的である電動車に関して考察するためには、より解像度の細かい情報が必要であると考えられた．営業用貨物車のプローブ情報では東京都と岡山県の2カ所を対象に2019年10月、12月の通常期と繁忙期の2期間を対象に調査したが、稼働率等や貨物車の走行構成等はOD調査と大きな差異が無いことが確認できた．このことは2.2.2項で述べたように都市や地域性よりも業態・車種の影響が大きいことも整合している．以上のことから、今後の検討ではOD調査の整理結果をベースにするものとした．

3. 業務車における次世代選択意欲

本章では自家用貨物車を運転するユーザを対象に Web アンケートを実施し、次世代車を選択する際の要素および将来における次世代車普及の定量化に必要なデータを取得し、満足度の形として整理した．

3.1 業務用車両ユーザの次世代車選好要素の検討

はじめに自家用貨物車ユーザの次世代車を購入する上での購入阻害要因を調査した。その結果、車両購入価格が高いことが最も多く、続いて充電時間の長さ、インフラ数、航続距離の長さとなった。ガソリン、ディーゼル車も加味して、購入選択要因を調査した結果、車両の買い替えの際には車両価格が最も重視されるが、インフラ等については大きな不満がないため、積載量、運転のしやすさなど車両の使い勝手などの主観的な面が重視される傾向が見られた。既往の技術選択モデル⁹⁾である式(1)、式(2)は、費用、ラインナップ数、一充電航続距離、インフラ数、充電時間を用いている。ただし、既往の推計式は自動車価格、性能に基づいたものであり、ユーザの使用実態は年間走行距離しか反映できないものであったため、次項にてこれらを考慮できるようにした。

$$P_i = \frac{U_i}{\sum_{i=1}^I U_i} \cdot \dots (1)$$

P：選択確率，i：車種，U：効用

$$U_i = \alpha \times Sc_i + \beta \times Sl_i + \gamma \times Sd_i + \delta \times Si_i + \varepsilon \times St_i \cdot \dots (2)$$

U：効用，i：車種，Sc：価格満足度

Sl：ラインナップ数満足度，Sd：一充電航続距離満足度

Si：インフラ整備間距離満足度，St：充電時間満足度

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ ：重みづけ係数

3.2 業務用車両ユーザの次世代車選好要素の定量化

前述の5つの要素を満足度として定量化するために、各要素で次世代車をどのレベルまで改善されれば選択するかをWebアンケート調査によりモデル化した。その結果、次世代車の車両価格が現状のガソリン車、ディーゼル車価格と同等となれば、5割のユーザが購入意欲を示し、車両価格が現状よりも2割安価となれば、8割のユーザが選択する結果となった。これをロジスティック曲線にて近似することとした(Fig. 7)。次に一充電航続距離は、使用実態を反映するため1日の走行距離をパラメータとして、ユーザ選択を表現するものとした。定量化には車両価格と同様にWebアンケート調査の結果を引用した。航続距離は現状販売されている電気自動車を参考に実走行を想定し、最大で300kmとし、1日の走行距離が長いほど、一充電航続距離の満足度が低下するようにした(Fig. 8)。

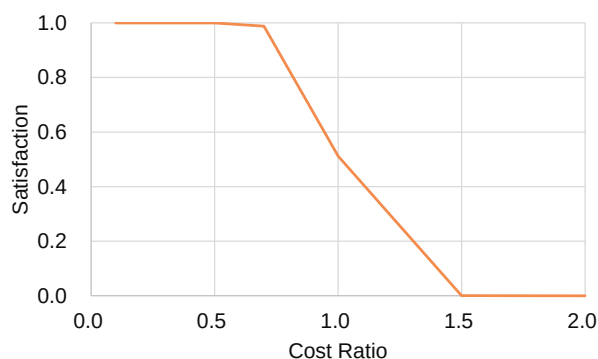


Fig. 7 Relationship between total cost and satisfaction

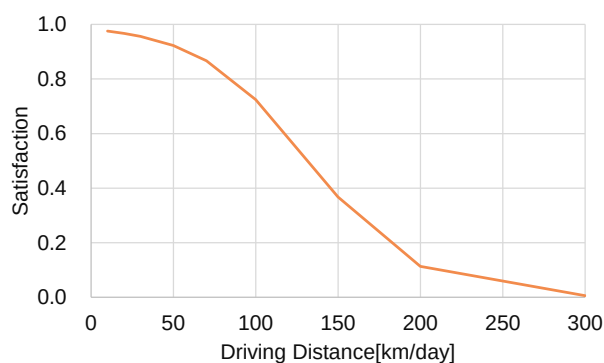


Fig. 8 Relationship between daily driving distance and satisfaction

インフラ数は基本的には既往の推計式と同様に主要道路延長をインフラ数で除することで、算出したインフラ間整備距離からインフラ数の満足度を与えるものとした (Fig. 9)。使用実態を考慮するため、自宅、自社利用は普通充電使用と移動先利用は急速充電使用を想定し、急速充電使用は自宅や自社利用以外の2割と想定した。この急速充電使用は長距離利用時を想定し、自動車工業会が毎年公表している市場動向調査の乗用車の長距離走行比率を参考にした。基本的な充電は貨物車が長時間駐車する自宅、職場で充電できると想定する。一方で、急速充電使用は、業務、輸送中の平均駐車時間が1時間未満の場合、急速充電器を利用できないことを想定し、業務、輸送中のインフラ数満足度が低減する形とした。充電時間は既往モデルでは自動車側の満充電時間をパラメータとしているが、この考え方に基づく駐車時間などの使用実態を把握することができない。そこで、ここでは既往手法⁷⁾における充電時間のパラメータを駐車時間に変更した。ここではWebアンケート結果と併せて、日産Leafの普通充電による満充電までの給電時間16時間を参考にし、駐車時間が16時間以上であれば、満足度を最大とし、駐車時間が短いと満足度が低下するロジックとした (Fig. 10)。なお、普通貨物車に関しては、バッテリー容量が乗用車と比較すると大きくなる可能性があるが、現状では既存車両が無いため、ここでは低めに見積もって乗用車バッテリーの3倍搭載されるものとし、普通充電で充電する場合、48時間かかると想定し、充電時間満足度を設定した。

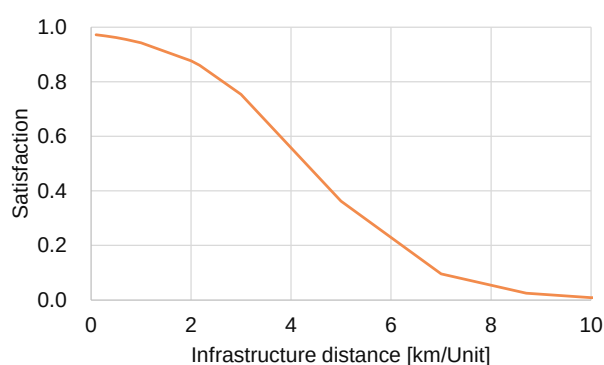


Fig. 9 Relationship between infrastructure distance and satisfaction

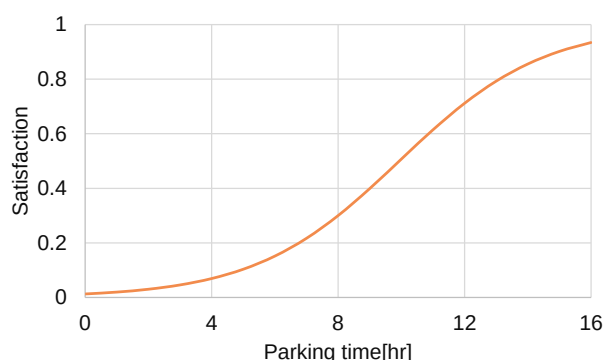


Fig. 10 Relationship between parking time of night and satisfaction

4. 中期における業務車の次世代車普及可能性の検討

本章では 2 章で整理した貨物車の使用実態と 3 章で作成した使用実態を考慮できる技術選択モデルを用いて、車種別の電動車普及可能性を検討した。なお、現状では貨物車の電動車は普及が限定されていることから、ここでは 2030 年時点の電動車普及可能性を検討することとし、車両性能、価格、インフラ整備状況も 2030 年を想定した。これらの想定は、各種既往研究、NEDO ロードマップ等を参考に設定した。電動車は HEV、BEV とした。長期（2050 年など）を想定する場合は、燃料電池車なども対象となるが、2030 年時点では車両価格、インフラなどの面から対象外とした。

車種別の新車における技術別の選択確率を推計した結果を Fig. 11 に示す。BEV が最も多く普及するのは自家用小型貨物車となり 26 % となった。次に普及するのは自家用軽貨物車となり 21 % となった。この 2 車種は使用実態の面で、1 日の走行距離や駐車時間などの観点から実際に使用する上で大きな問題は無く、BEV の総コストも電気自動車の燃費効率の良さにより一定の水準に達していると考えられる。また、他の車種の BEV 普及率は、営業用小型貨物車が 11 %、自家用普通貨物車は 8 %、営業用普通貨物車は 3 % と限定される結果となった。これは、営業用車両の場合は積載率が高くなることで、電力消費量が悪化すること、それに伴い、一充電航続距離やインフラ、駐車時間が十分に実用化する上で課題が残ると推測される。一方で、HEV を見ると、電気自動車の普及が限定される営業用小型貨物車、自家用普通貨物車、営業用普通貨物車は 24 ~ 33 % と一定水準まで普及する可能性がある。この理由として、1 つ目は HEV の場合はインフラや一充電航続距離、充電時間等の制約がないためである。2 つ目は、ディーゼル HEV はガソリン HEV と比較して、ポンプ損失等の改善による燃費改善効果は少ないが、1 トリップあたりの走行距離が長く、2030 年時点の中期的な視点では電動車の中では HEV が選択される可能性が高いことが分かった。

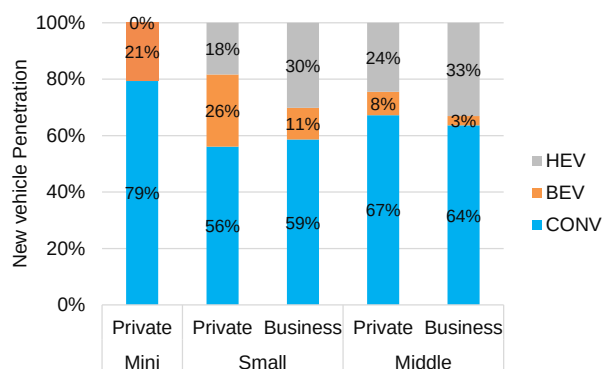


Fig. 11 Electrical vehicle penetration of each technology

最後に、一例として、最も電気自動車の普及率が高かった小型自家用貨物車を対象にトリップ数別の電動車普及率を推計した結果を Fig. 12 に示す。

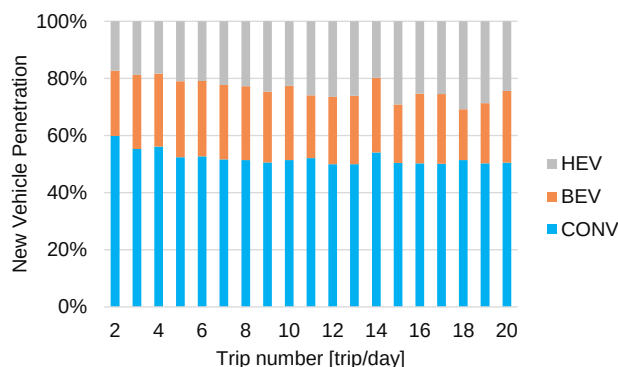


Fig. 12 Electrical vehicle penetration of private light duty trucks

その結果、ほとんどのトリップ 20 %以上の車両にて電気自動車が選択される可能性がある。その中で、1 日の平均が 5 トリップの場合が 27 %となり、最も普及率が高くなった。これは 1 トリップあたりの距離が電気自動車の航続距離が現状のスペックで満足することができる中で、比較的長いため、最も経済面でメリットがある。さらに駐車時間も一定時間確保できるため、電気自動車が普及しやすい状況が整っていると考えられる。その一方で、トリップ数が 18 トリップのケースで 20 %未満と最も少なくなった。これは 18 トリップのケースは 1 日の走行距離が 140 km と長いため、一充電走行距離の面でデメリットがあることが要因であると推測される。このように使用実態を考慮した検討ができるようになると、地域性を考慮した最適な電動車の普及施策を検討することができる。

4. まとめ

貨物自動車をはじめとする業務用車両はわが国の物流の中核的な役割を担い、稼働時間も長いこと、電動車の燃費改善効果が少ないことから、これまで電動化については積極的に進められてこなかった。本調査では積載量や移動距離、使用実態などのデータを精査し、電動化導入で考慮すべき項目について定量的なデータとして整理することにより、使用実態をふまえた電動車普及可能な領域を検討した。

以上の結果をふまえ電動化普及可能性を検討するために、貨物車の次世代車選択モデルに必要な基礎データを、Web アンケートによる購入動向調査により整備し、使用実態を考慮できるよう次世代車選択モデルのロジックを更新した。今回の検討結果では、比較的走行距離が短く、駐車時間が長い自家用軽貨物車、自家用小型貨物車にて、電気自動車の選択可能性が 20%以上となる可能性があることが推計された。一方で、営業用小型貨物車、営業用普通貨物車の電気自動車選択可能性は、10%未満と推計された。これは高積載率により航続距離が短くなることや駐車時間が短いことによる性能面での課題による影響と考えられた。一方で、性能面での課題が少ないハイブリッド車は、営業用小型貨物車や営業用普通貨物車でも、一定の普及可能性があることが分かった。

本報では、貨物車をはじめとする業務用車両使用実態に焦点を当ててデータ整備、電動車の普及可能性を検討したが、電動車の普及に必要なインフラ情報、電動車の将来的な性能向上、大量生産による価格低下など付帯情報についてもさらなる整備が必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省：運輸部門における二酸化炭素排出量, 2021,
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html (参照 2021.4.19))
- 2) 近久武美：将来の各種自動車構成と低炭素社会に向けた最適化, 自動車技術会春季大会フォーラム日本の将来自動車用パワートレインと燃料前刷集, 公益社団法人自動車技術会, No. 09FORUM-11 (2009), 20094304
- 3) 紀伊雅敦ほか：乗用車燃費改善技術の導入効果の一考察, エネルギー・資源, Vol. 28, No. 3, p.168-174 (2007)
- 4) 一般財団法人自動車検査登録協会：最新の自動車保有台数令和 2 年 12 月末現在, 2020,
<https://www.airia.or.jp/publish/statistics/number.html> (参照 2021.2.4)
- 5) 国土交通省：平成 27 年度 全国道路・街路交通情勢調査 自動車起終点調査, 2018,
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000031927545&fileKind=2> (参照 2021.2.12)
- 6) 総務省：本日の市町村数, 2021, <https://www.soumu.go.jp/kouiki/kouiki.html> (参照 2021.2.5))
- 7) 総務省：地方公共団体の区分, 2021
https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/jichi_gyousei/bunken/chihou-koukyoudantai_kubun.html (参照 2021.2.17)
- 8) 国土交通省：第 10 回全国貨物純流動調査, 2017, https://www.mlit.go.jp/report/press/sogo12_hh_000112.html (参照 2021.3.2)
- 9) 金成修一, 平井洋：貨物車を対象とした消費者選好を考慮した CO₂ 排出量推計手法の開発, 2019 年秋季大会 学術講演会 講演予稿集, 公益社団法人自動車技術会, No.136-19 (2019), 20196216

ソフトウェアアップデート国際標準化活動について

International Standardization Activities for Software Updates

渡辺 秀侑*1

長谷川 信*2

Hideyuki WATANABE

Makoto HASEGAWA

概要

2019年3月に車載 ECU のソフトウェアアップデートに関する NP (New work item Proposal) が ISO (International Standard Organization) に承認された。日本がプロジェクトリーダーとして標準化を積極的にリードし、2021年11月に DIS (Draft International Standard) が登録された。本稿ではソフトウェアアップデート国際標準化活動の立ち上げから今日に至るまでの国内外の活動を紹介する。

1. はじめに

今日、ADAS (Advanced Driver Assistance System) の高度化や自動運転化にともない、車載ソフトウェアの数や複雑さが増し続けている。そのため車両のライフサイクル全体を通じてソフトウェアを効率的かつ安全に管理するために、ソフトウェアアップデートを適切に実施する必要性が高まっている。また、OTA (Over The Air) に代表されるようなアップデート手法の進歩により、ソフトウェアアップデートが従来よりも容易に実施できるようになってきている。

このような状況の中、ソフトウェアアップデートを安心・安全に実施することが不可欠であることが認識され、国際標準化の必要性が高まっていった。ISO (International Standard Organization) での標準化が期待される中、日本が活動をリードし現在 DIS (Draft International Standard) 登録の段階に進展することができた。

並行し法規も 2016 年より自動運転に向けた法整備が始まり、UNECE (国際連合欧州経済委員会) の WP29 (自動車基準調和フォーラム) / GRVA (自動運転専門分科会) の傘下に CS (Cyber Security) / OTA インフォーマルグループが組織され、車両登録後の市場でのソフトウェアアップデートが一定の基準に基づいて実施されるべく、OTA を含むソフトウェアアップデートのレギュレーションづくりが進められてきた。ソフトウェアアップデートに関する UN レギュレーションは 2020 年 6 月に採択され、UN-R156 として発行され、欧州では新型車が 2022 年 7 月、継続生産車は 2024 年 7 月より適用される。なお、日本においては OTA 対応有無で適用開始時期が異なっており、自動運転車 / OTA 対応の新型車が 2022 年 7 月、継続生産車が 2024 年 7 月、OTA 非対応新型車が 2024 年 1 月、継続生産車が 2026 年 5 月より適用される¹⁾。

2. 新規標準化への取り組み

2.1 新規標準化の提案、プロジェクトリーダー国獲得

日本がソフトウェアアップデートの標準化をリードするにあたり、ISO 標準化の提案および新規 WG (Working Group) を設立することが必要であった。自動車分野における ISO 標準化は TC (Technical Committee) 22 に割り当てられる委員会にて進められており、その傘下の内、電子・電装部品・システムに関する委員会は SC (Sub Committee) 32 である。

2018 年 6 月末に釜山で開催された SC32 総会 (図 1 参照) にて、日本よりソフトウェアアップデート標準化に関する NP (New work item Proposal) を出すことを宣言した。その後提案した NP は各国の投票の結果、2019 年 3 月末に承認され、SC32 の傘下に WG12 を新しく設立し、当 WG にてソフトウェアアップ

*1 一般財団法人日本自動車研究所 新モビリティ研究部

*2 一般財団法人日本自動車研究所 新モビリティ研究部 / ISO / TC22 / SC32 / WG12 (ソフトウェアアップデート) コンビーナ

* 原稿受理 2021 年 11 月 10 日

デートの議論を行うこととなった。一般財団法人日本自動車研究所（JARI）は一般社団法人日本自動車工業会（JAMA）からの委託を受け、WG12のコンビーナ、およびISO / AWI (Approved Work item) 24089 "Road vehicles - Software update engineering"として登録された本プロジェクトのプロジェクトリーダーを長谷川 信が務め、積極的に策定活動を推進している。



図 1 SC32 総会での様子

2.2 ソフトウェアアップデート標準化における国内の取り組み

国内の活動においては 2.1 で述べた NP 提案に向け、公益社団法人自動車技術会の第一回ソフトウェア更新分科会が 2018 年 10 月に分科会長、幹事および委員総勢 19 社 21 名が出席の上、開催された。2019 年 1 月以降、以前より JAMA 及び一般社団法人 JASPAR の関係者で検討してきたソフトウェアアップデートに関する分析書や UN レギュレーション案を基に、分科会にて WD (Working Draft) の検討および作成を開始した。国際会議の結果をフィードバックし、分科会および章ごとに分担したサブ Gr 等で議論を重ねてきた。サブ Gr には JARI より渡辺 秀侑が参画し、上記活動に貢献した。

ソフトウェア更新分科会は毎月開催され、関連する電子電装部会会議および臨時会議等を含め年間数十回の会議を重ねて今日に至る。

2.3 国外標準化活動の取り組み

国外の活動においては 2.1 で述べた NP 提案に向け、各国の賛同を得るとともに標準化活動への協力を要請するための活動を実施した。2018 年 8 月にはドイツ自動車工業会である VDA、同年 9 月にはイタリア自動車工業会である CUNA や国際自動車工業会である OICA への説明を実施し、2019 年 1 月に投票開始、同年 3 月に賛成 14 カ国、反対 0 カ国、棄権 13 カ国という結果で NP 承認に至り、WG12 が設立された。

2019 年 8 月 WD 登録後はドイツ、US 等の協力の下、標準案のブラッシュアップを行ない、主要国との二国間会議やリモートでの会議を重ねた。その中で Terminology (用語定義) や Structure (章構成)、Editorial (文書編集) 等のタスクフォースを設置し、WG12 での会議運営の円滑化を図る活動を定期的の実施してきた。

WD は 3 版まで議論を重ね、2021 年 1 月に CD (Committee Draft) を登録した。CD に対する各国からのコメント数は 650 件以上に上り、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) による影響もあり臨時会議を含めた WG12 国際会議を、16 回という計画を大きく上回る回数を開催の上、全件合意に至った。このコメント処理結果を反映した文書が DIS として 2021 年 11 月に登録された。

3. ISO 24089 - Software update engineeringの概観

ISO 24089 - Software update engineering は WD, CD を経て、2021 年 11 月に DIS が登録された。本標準は車載 ECU のソフトウェアアップデート実施の際の組織レベルにおけるプロセス要件、プロジェクト

レベルにおけるプロセス要件，インフラ／車両に要求される機能やソフトウェアパッケージの内容および開発，アップデートを実行するキャンペーンにおけるプロセス等が定義されている。

WD 時点ではソフトウェアアップデートに関連する技術的な内容もスコープとして含める提案がなされたが，技術的な手段は各社の判断によって決定されるべきという意見が多数を占め，機能のみを定義する要件となっている。

今後の活動として FDIS (Final Draft International Standard) ， IS (International Standard) の作成，登録があり，その計画とこれまでの実績をまとめると，表 1 の通りとなる。

表 1 ISO 24089 - Software update engineering 策定実績および予定

年	月	国内	国外	実績補足情報
2019	1	NP登録	-	主要国への協力要請実施
	3	-	NP承認 ISO/TC22/SC38/WG12 設立	(ISO/AWI 24089) 承認14ヵ国，反対0ヵ国，棄権13ヵ国で承認。
	8	WD第1版登録	-	WG12会議，二国間会議等でCD登録に向けた議論実施
2020	3	WD第2版登録		コメント数は約750件。
	12	WD第3版登録		
2021	1	CD登録	-	-
	3	-	CD承認	(ISO/CD 24089) 承認7ヵ国，コメント付き承認10ヵ国，否認0ヵ国で承認 コメント数は650件。 国際会議16回実施の上，全件合意。
	11	DIS登録	-	-
2022	3	-	DIS投票完了予定	(ISO/DIS 24089)
	9	FDIS登録予定	-	(ISO/FDIS 24089)
	12	-	IS承認 →正式リリース予定	(ISO 24089)

4. 運営上の課題と対応

2020 年より COVID-19 における影響を受け，国内および国外の会議は全面オンラインでの開催となった。リモート会議の場合は意思疎通が非常に難しいことに加えて，地理的な制約がなくなったためか参加人数が増加し，議論が長引く一方で一回あたりの会議時間が制限される等，運営の課題が多々発生した。また各国審議の作業に遅延が生じ，CD 発行時点で当初の予定より 5 ヶ月の発行遅れとなった。

当初の 36 か月間で IS を発行する計画に対し，COVID-19 の影響を考慮し最大 9 ヶ月の作業延長が承認されたため，それを適用した計画の組み直し(表 1)を実施した。これ以上の延長が許されない中で WG 会議での議論が分散しないようタスクフォースを設置し，役割を明確にするなどの対策を講じた。また，会議時間が長引かないよう各議題に 10 分までという時間を設けて，時間内に完了しない議題は宿題として各国持ち帰る等のルールを設け，DIS 完成に向けた議論を計画通りに完了することができた。

5. おわりに

ソフトウェアアップデート標準化を国内外で実施する中で，様々な課題を抱え，活動の難しさを痛感しつつ，日本としてソフトウェアの分野をリードしていくという強い意志を示せたと思う。

現在も IS に向けた活動が続いており，今後 ISO 24089 の第二版に向けた活動も考えられる．継続して日本がリードしていくためにも，より国内の議論の活性化が必要である．

参考文献

- 1) 国土交通省：道路運送車両の保安基準等の一部を改正する省令および道路運送車両の保安基準の細目を定める告示等の一部を改正する告示について， <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001379922.pdf> （参照 2020.12.25）

「エコドライブ 10 のすすめ」の改訂と 広報用リーフレットの作成

Revision of "10 Recommendations for Eco-Driving" and Publication of a Leaflet for Public Relations

鈴木 徹也*1

Tetsuya SUZUKI

平井 洋*2

Hiroshi HIRAI

沖山 清美*2

Kiyomi OKIYAMA

Abstract

The Liaison Council on Promoting Eco-Driving, consisting of the National Police Agency (NPA), the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), and the Ministry of the Environment (MOE), formulated the "10 Recommendations for Eco-Driving" in 2003. Since then, the Council has raised public awareness of eco-driving after two partial revisions of the compilation in 2006 and 2012. Considering that a certain period had passed since the last revision in 2012, the Council and related organizations jointly examined the necessity of modifying the compilation, and revised it in January 2020. At the same time, the Council published a leaflet on the compilation to raise public awareness. The new leaflet is not only for drivers but also for their children. Moreover, it also explains the use of eco-friendly vehicles and tips on eco-driving of hybrid and electric vehicles.

1. はじめに

2050 年カーボンニュートラルに向け、温室効果ガスの削減は喫緊の課題である。我が国の温室効果ガス排出量の 18.6% は運輸部門が占め、その 86.1% が自動車由来である¹⁾。地球温暖化対策計画では、運輸部門での削減のために、自動車の燃費向上等の単体対策に加えて、交通流対策等を含めた総合的な対策を推進するとあり、取り組みの 1 つとしてエコドライブを挙げている²⁾。また、国民運動及び環境教育の推進のための取り組みとして、エコドライブ等の低炭素なライフスタイルの選択のため、幅広い層を対象にニーズに応じた教材やコンテンツ等を効果的に提供するとある。

警察庁、経済産業省、国土交通省、環境省で構成するエコドライブ普及連絡会は、エコドライブとして推奨される行動をまとめた「エコドライブ 10 のすすめ」を、エコドライブの普及・推進において統一的に用いるためのものとして 2003 年に策定し、2006 年、2012 年の改訂を経て広報啓発を行ってきた。前回の改訂から一定期間経過していることから、普及連絡会は改訂の必要性について関係団体等と点検を行い、2020 年 1 月に「エコドライブ 10 のすすめ」を改訂した³⁾。また、その周知を図るため「エコドライブ 10 のすすめ」リーフレットを作成した⁴⁾。

本稿では、「エコドライブ 10 のすすめ」のこれまでの見直しの経緯と今回の改訂のポイント、および改訂と同時に発行されたリーフレットの概要について述べる。

2. 「エコドライブ10のすすめ」見直しの経緯

2.1 「エコドライブ10のすすめ」の変遷とその背景

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士（工学）

*2 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部

* 原稿受理 2021 年 11 月 10 日

1996年9月に運輸省は、運輸政策審議会総合部会に地球環境問題小委員会を設置し、地球温暖化問題に対応した環境に優しくエネルギー効率の良い交通のあり方について審議を行った⁵⁾。その結果、1997年4月に「運輸部門における地球温暖化問題への対応方策について」が取りまとめられた。その中で、エコドライブを国民全体の取り組みの下に推進することは極めて大きなCO₂削減効果があり、エコドライブ啓発活動の継続的な実施が重要であると提唱された⁶⁾。これを受け、交通関係団体からなる「エコドライブ普及推進協議会」が設立され（事務局：交通エコロジー・モビリティ財団）、同年にエコドライブの具体的行動として10項目が示された。

2002年3月に決定された地球温暖化対策推進大綱において、エコドライブは「国民各界各層の更なる地球温暖化防止活動の推進」の施策として位置付けられた⁷⁾。2003年5月、エコドライブの実践について、政府全体として効果的な普及・推進を図るため、警察庁、経済産業省、国土交通省及び環境省をメンバーとする「エコドライブ普及連絡会」を設置し、同年に先の10項目を一部見直して「エコドライブ10のすすめ」を策定した⁸⁾。

2005年4月に閣議決定された京都議定書目標達成計画（2008年3月全部改定）において、エコドライブは「環境に配慮した自動車使用の促進」の施策として位置付けられ、エコドライブ普及連絡会を中心とした広報活動等により国民の意識向上を図り、エコドライブ普及のための環境整備を行うこととされた⁹⁾。これを受けて2006年6月、エコドライブを普及・推進するために関係省庁その他関係機関が重点的に推進すべき事業を、「エコドライブ普及・推進アクションプラン」として取りまとめた¹⁰⁾。アクションプランにおけるエコドライブ普及のための積極的な取り組みの一環として、エコドライブの定義と効果指標等を見直し、同年10月に「エコドライブ10のすすめ」を改訂した¹¹⁾。例えば、自動車技術の変化が反映され（マニュアル車に係る項目の廃止、エアコン普及率の増加によりエアコンに係る項目の順位上昇）、交通流の観点（渋滞を引き起こす違法駐車を抑止）が新設された。

2012年10月の改訂では、一部の表現が若干変わったものの前回の項目と順位がほぼ踏襲された¹²⁾。大きな変更点は、「暖機運転は適切に」と「アイドリングストップ」を「ムダなアイドリングはやめよう」に統合したこと、および「自分の燃費を把握しよう」を空いた第10項目へ追加したことである。後者は、エコドライブの実施状況を示す数値である燃費を把握することで、10のすすめ全体の実効性を高める狙いで新設された。

その後7年以上が経過していることから、エコドライブのさらなる効果的な認知度向上を図るため、エコドライブ普及連絡会は、自動車技術の進展やそれに伴う環境変化等を踏まえつつ、10のすすめの見直しの必要性について関係団体等と点検を行い、2020年1月に改訂版を策定した³⁾。

2.2 今回の改訂のポイント

今回改訂された「エコドライブ10のすすめ」の序文と全10項目を図1に示す。項目内容は前回から基本的に変わっていないが、これまで第10項目だった「自分の燃費を把握しよう」の第1項目への移動が大きな変更である（これまでの第1項目を第2項目に繰り下げ、以下順に1つずつ繰り下げ）。これは、エコドライブに取り組もうとすること、もしくはエコドライブを継続的に実施することのきっかけになるとして、自分の燃費を把握することが重要であるとエコドライブ普及連絡会が判断したことによる。

その他の変更点は、内容は基本的に変わらないものの、より分かりやすく表現するために、第5項目「エアコンの使用は適切に」と第7項目「渋滞を避け、余裕をもって出発しよう」の説明文を、文章の前後を入れ替えるなど一部修正した。また、第8項目「タイヤの空気圧から始める点検・整備」の説明文の一部を注釈に移動し、更に別の注釈を追加した。

また、エコドライブの使命が表現されている序文の締めの一文において、エコドライブの認知・実施をさらに訴求するため、「あなたの運転が良くなることで周りの運転が良くなり社会全体が良くなる、意識して1つでもやってみませんか」というニュアンスを込めた表現に修正した。

エコドライブとは、燃料消費量や CO₂ 排出量を減らし、地球温暖化防止につなげる“運転技術”や“心がけ”です。また、エコドライブは、交通事故の削減につながります。燃料消費量が少ない運転は、お財布にやさしいだけでなく、同乗者が安心できる安全な運転でもあります。心にゆとりをもって走ること、時間にゆとりをもって走ること、これもまた大切なエコドライブの心がけです。エコドライブは、誰にでも今すぐに始めることができるアクションです。小さな意識を習慣にすることで、あなたの運転がよくなって、きっと社会もよくなります。できることから、はじめてみましょう、エコドライブ。

- ① 自分の燃費を把握しよう
- ② ふんわりアクセル「e スタート」
- ③ 車間距離にゆとりをもって、加速・減速の少ない運転
- ④ 減速時は早めにアクセルを離そう
- ⑤ エアコンの使用は適切に
- ⑥ ムダなアイドリングはやめよう
- ⑦ 渋滞を避け、余裕をもって出発しよう
- ⑧ タイヤの空気圧から始める点検・整備
- ⑨ 不要な荷物はおろそう
- ⑩ 走行の妨げとなる駐車はやめよう

図 1 改訂「エコドライブ 10 のすすめ」

3. リーフレットによる広報活動

3.1 リーフレットのデザイン

普及連絡会は、新しい「エコドライブ 10 のすすめ」の周知を図るため、4 ページで構成されるリーフレットを作成した⁴⁾(図 2)。ドライバーに新しい 10 のすすめを知ってもらうだけでなく、「ドライバーが子供と一緒にエコドライブについて学ぶ」をコンセプトとした。ドライバーに対しては、燃料削減等の経済的効果および次世代自動車のエコドライブに係る技術情報を含み、子供に対しては、教育的観点からエコドライブへの関心を持たせるため、遊び感覚で理解を促し興味を喚起するデザインとした。

第 1 ページ(表紙:図 1 上段左)では、これまでの文字だけで 10 項目を説明したリーフレットの表紙とは異なり、街と車をテーマにしたイラストを加え、明るい色調にして、手に取ってもらいやすいデザインとした。また、エコドライブ普及推進協議会の Web サイトにリンクした QR コードを掲載し、更に詳細なエコドライブ情報へのアクセスを容易にした。

第 2-3 ページ(見開きページ:図 1 下段)では、街と車のイラストの中に、子供でも理解可能なエコドライブに関するクイズを配置し、子供を含めた家族でエコドライブへの関心を高めて理解を助ける内容とした。

第 4 ページ(裏表紙:図 1 上段右)では、情報量の制限のため 10 項目の中に入れることができなかった、エコドライブに関する有益な情報 3 点を掲載した。

- ① 「エコカーや、燃費の良い車に乗りましょう。」: 普及の進んでいる電気自動車、ハイブリッド車などの次世代車の購入を進めることにより燃料消費量の削減を狙った。また、次世代車のエコドライブのコツを記載し、次世代車ならではの効果的なエコドライブの実践を狙った。
- ② 「エコドライブ支援ツールを使いましょう。」: エコドライブを支援するために車両に装備されたツールを紹介し、エコドライブの実践を狙った。
- ③ 「エコドライブで交通事故が減るんです。」: エコドライブが交通事故の低減にもつながることを解説し、安全の観点からもエコドライブの普及促進を狙った。

3.2 リーフレットの活用

リーフレットは、エコドライブ普及連絡会の構成省庁や関係機関の Web サイトに掲載するとともに、エコドライブ啓発イベント等で配布もできるように再生紙に 10 万部を印刷し、地方自治体を含むエコドライブ推進に関係する諸機関に送付した。

4. まとめ

本稿では、警察庁、経済産業省、国土交通省、環境省で構成するエコドライブ普及連絡会が、エコドライブの普及・推進で統一的に用いている「エコドライブ 10 のすすめ」を 8 年ぶりに見直したことを受け、これまでの見直しの経緯と今回の改訂のポイント、および改訂と同時に発行されたリーフレットの概要について述べた。今回の改訂では、エコドライブに取り組もうとする、もしくは継続的に実施するきっかけとして「燃費を把握する」ことが重要であると判断し、第 10 項目「自分の燃費を把握しよう」を第 1 項目に移したことが大きな変更である。また、周知のために作成されたリーフレットは、「ドライバーが子供と一緒に学ぶ」をコンセプトに作られており、10 のすすめの中に盛り込めなかったエコカーの利用や、ハイブリッド車、電気自動車ならではのエコドライブのコツなどについても紹介されている。今後、リーフレットも活用されて、エコドライブの普及がさらに進むことを期待したい。

参考文献

- 1) 環境省：2019 年度（令和元年度）の温室効果ガス排出量（確報値）について，2021，
<https://www.env.go.jp/press/files/jp/116118.pdf>（参照 2021.10.21）
- 2) 地球温暖化対策推進本部：地球温暖化対策計画，2016，
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai35/pdf/honbun.pdf>（参照 2021.10.21）
- 3) エコドライブ普及連絡会：「エコドライブ 10 のすすめ」を改訂しました，2020，
<https://www.meti.go.jp/press/2019/01/20200127004/20200127004.html>（参照 2021.10.21）
- 4) エコドライブ普及連絡会：エコドライブ 10 のすすめ（閲覧用／印刷用），2020，
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/media/（参照 2021.10.21）
- 5) 運輸省：地球温暖化問題への対応，平成 9 年度運輸白書，1997，
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/transport/heisei09/index222/frame.html>（参照 2021.10.21）
- 6) エコドライブ普及推進協議会：エコドライブ普及推進協議会の取組，
http://www.ecodrive.jp/fukyu_torikumi.html（参照 2021.10.21 閲覧）
- 7) 地球温暖化対策推進本部：地球温暖化対策推進大綱，2002，
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/2002/0319ondantaikou.pdf>（参照 2021.10.21）
- 8) 最高速度違反による交通事故対策検討会：エコドライブの普及・促進にむけた対策，最高速度違反による交通事故対策検討会中間報告書，2010，
<https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/max-speed/chukan/pdf/s6-2.pdf>（参照 2021.10.21）
- 9) 地球温暖化対策推進本部：京都議定書目標達成計画，2005，
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kakugi/050428keikaku.pdf>（参照 2021.10.21）
- 10) エコドライブ普及連絡会：エコドライブ普及・推進アクションプランの策定について，2006，
<https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/01/010609.html>（参照 2021.10.21）
- 11) エコドライブ普及連絡会：エコドライブ 10 のすすめ，2006，
<http://www.env.go.jp/press/files/jp/8667.pdf>（参照 2021.10.21）
- 12) エコドライブ普及連絡会：エコドライブ 10 のすすめ，2012，
<https://www.env.go.jp/air/car/ecodrive/susume.pdf>（参照 2021.10.21）

図2 「エコドライブ10のすすめ」リーフレット (1ページ：上段左、2-3ページ：下段、4ページ：上段右)

エコドライブ10のすすめ

エコドライブとは、燃料消費量やCO₂排出量を減らし、地球温暖化防止につなげる「運転技術」や「心がけ」です。また、エコドライブは、交通事故の削減につながります。燃料消費量が少ない運転は、お財布にやさしいだけでなく、同乗者が安心できる安全な運転でもあります。心にゆとりをもって走ること、時間にゆとりをもって走ること、これもまた大切なエコドライブの心がけです。エコドライブは、誰にでも今すぐ始められることができるアクションです。小さな意識を習慣にすることで、あなたの運転がよくなって、きっと社会もよくなります。できることから、はじめてみましょう、エコドライブ。

- 1 自分の燃費を把握しよう**
自分の車の燃費を把握することを習慣にしましょう。日々の燃費を把握すると、自分のエコドライブ効果が実感できます。車に装備されている燃費計・エコドライブアシストインジケータ・ネットワークでの燃費管理などのエコドライブ支援機能を使うと便利です。
- 2 ふんわりアクセル「eスタート」**
発進するときは、軽やかにアクセルを踏んで発進しましょう(最初の5秒で、時速20km程度が目安です)。日々の運転に慣れて、やさしい発進を心がけるだけで、10%程度燃費が改善します。発進する、思わぬ発進は、安全運転にもつながります。
- 3 車間距離にゆとりをもって、加速・減速の少ない運転**
走行中は、一定の速度で走るとを心がけましょう。車間距離が短くなると、ムダな加速・減速の機会が多くなり、市街地では2%程度、郊外では6%程度燃費が悪化します。交通状況に応じて速度変化の少ない運転を心がけましょう。
- 4 減速時は早めにアクセルを離そう**
信号が変わるなど停止することになったら、早めにアクセルから足を離しましょう。そうするとエンジンブレーキが作動し、2%程度燃費が改善します。また、減速するときや坂道を下るときにもエンジンブレーキを活用しましょう。
- 5 エアコンの使用は適切に**
車のエアコン(A/C)は車内を冷却・除湿する機能です。暖房のみ必要なときは、エアコンスイッチをOFFにしましょう。たとえば、車内の温度設定が外気温と同じ程度であっても、エアコンスイッチをONにしたまま走ると12%程度燃費が悪化します。また、大雨が必要ときでも、車内を冷やさないようにしましょう。
- 6 ムダなアイドリングはやめよう**
待ち合わせや荷物の積み下ろしなどによる駐車時のアイドリングはやめましょう。10分間のアイドリング(エアコンOFFの場合)で、1300cc程度の燃料を消費します。また、現在の乗用車では基本的に燃費燃費は不要です。エンジンをかけたらすぐに発進しましょう。
- 7 渋滞を避け、余裕をもって出発しよう**
出発の前に、渋滞・交通規制などの道路交通情報や、地図・カーナビなどを活用して、行き先ルートをおおむね確認しましょう。たとえば、1時間のドライブで遅い10分間遅延に起因する17%程度燃費消費が増加します。さらに、出発後も道路交通情報をチェックして渋滞を避ければ燃費と時間の節約になります。
- 8 タイヤの空気圧から始める点検・整備**
タイヤの空気圧チェックを習慣づけましょう。タイヤの空気圧が適正値より不足すると、市街地で2%程度、郊外で4%程度燃費が悪化します。また、エンジンオイル・オイルフィルター・エアクリーナーエレメントなどの定期的な交換によっても燃費が改善します。
- 9 不要な荷物はおろそう**
運ぶ必要のない荷物は車からおろしましょう。車の燃費は、荷物の重さに大きく影響されます。たとえば、100kgの荷物を載せて走ると、3%程度燃費が悪化します。また、車の燃費は、空気抵抗にも敏感です。スクリーンやリアドアの外装は、使用しないときに外はしましょう。
- 10 走行の妨げとなる駐車はやめよう**
迷惑駐車をやめましょう。交差点付近などの交通の妨げになる場所での駐車は、渋滞をもたらします。迷惑駐車は、他の車の燃費を悪化させるばかりか、交通事故の原因にもなります。迷惑駐車は少ない道路では、平均速度が同じでも燃費が悪化します。

エコドライブ普及連絡会
(警察庁、経済産業省、国土交通省、環境省)
エコドライブ普及推進協議会HP

エコドライブのあれこれ

エコカーや、燃費の良い車に乗りましょう。

電気自動車、ハイブリッド車、プラグインハイブリッド車、燃料電池自動車といった次世代のエコカーは、もちろん、従来のエンジン車でハイブリッド車並みの低燃費を実現したエコカーもあります。環境にやさしいエコカーでエコドライブしてみませんか。

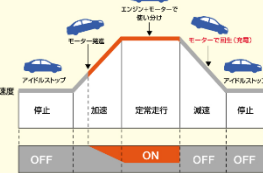


ハイブリッド車・電気自動車のエコドライブ運転方法のコツは？

答え：モーターをできるだけ活用しましょう。

■発進と加速はモーターの得意分野(ハイブリッド車のみ)
モーターの力でゆっくり発進し、エンジンが作動したら目的速度までモーターの力も活かしてゆっくり加速。その後はアクセルを緩めてできるだけモーターのみで走行することで燃費が良くなります。

■ブレーキは発電のチャンス
減速時に早めにアクセルを離してやさしくブレーキを踏み、長い距離をかけてゆっくり停止しましょう。やさしくブレーキを踏むとモーターで発電した電力がバッテリーに充電されます。次の発進・加速時に再利用することで燃費が良くなります。



ハイブリッド車のエンジンの稼働図
(できるだけエンジンがからまない運転をしましょう)

エコドライブ支援ツールを使いましょう。

様々なエコドライブ支援ツールを利用することで簡単にエコドライブに取り組みます。

①エコドライブランプ*を点灯するように運転しましょう。アクセルをふんわり踏んで運転することになり、燃費が良くなります。

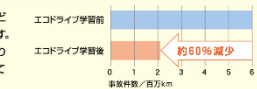
②エコドライブスイッチ*をONにしましょう。車の制動が変わって、ゆっくり加速しやすくなり、燃費が良くなります。

エコドライブランプの例

エコドライブスイッチの例

エコドライブで交通事故が減ります。

ゆっくり発進、ゆっくり停止、十分に車間距離をとるなどエコドライブを心がけることで運転にゆとりが生まれます。これにより交通事故が約60%減少したという報告もあります。エコドライブでエコだけでなく安全運転にもなって一石二鳥ですね。



エコドライブってどんなことかな。下の絵からさがしてみよう。

- 1 自分の車はリットルのガソリンで何キロ走る？**
ガソリンを入れたら チェックしよう。
- 2 アクセルは ゆっくりとふみましよう**
青信号になったら「eスタート」。
- 3 安定したそくで走りましよう**
しゃんかきょくに ゆとりをもって。
- 4 早めにアクセルから足をなましよう**
急ブレーキは だめ！
- 5 エアコンの温度は てきおんにしましよう**
エアコンは じょうずに つかいましよう。
- 6 ていしゃしている時は エンジン を止めましよう**
アイドリングは 不要です。
- 7 道路 交通 じょうほう を かつようしましよう**
ナビを使うことも エコドライブになります。
- 8 タイヤの空気圧を チェックしましよう**
タイヤの空気圧は 1ヶ月で 5パーセントほど 低くなります。
- 9 ふようなにもつは おろしましよう**
トランクに入ればなしの にもつはある？
- 10 ちゅうしゃばしょに 注意しましよう**
めいわくちゅうしゃは ほかの 車がまわり道しないといけなくなる。

エコドライブをするために 気をつけたほうがよいことは 何でしょうか。
← **エコドライブ10のポイントです。**
ヒント：文章の顔と、絵の顔をあわせてみてね。



車両への液体水素の充填技術に関する調査

Research on Liquid Hydrogen Fueling Technologies for Vehicles

山田 英助^{*1}

Eisuke YAMADA

1. はじめに

地球温暖化の防止は人類共通の喫緊の課題であり、日本政府は 2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルを目指し、運輸部門では 2035 年までに乗用車の新車販売で純粋なガソリン車をゼロにすることを掲げている。カーボンニュートラルの実現に向けて、再生可能エネルギーと組み合わせた水素の利用が注目されている。運輸部門での水素の利用としては、水素と酸素の電気化学反応を利用する燃料電池車 (FCV: Fuel Cell Vehicle) が研究開発されており、2014 年に市販化されている¹⁾。これまでに乗用車 (LDV: Light Duty Vehicle)、バス、フォークリフトなどが FCV として実用化されて普及が期待されている。FCV の燃料である水素は、単位体積あたりのエネルギー密度が著しく低いため、最大 70 MPa (15 °C 基準) に圧縮して専用の圧縮水素容器に充填する。水素の充填を行うための圧縮水素スタンド (水素ステーション) も設置が進められている²⁾。現状では概ね LDV で 5 kg、バスで 25 kg、フォークリフトで 1 kg (35 MPa) の圧縮水素を搭載している。

近年では、大型車 (HDV: Heavy Duty Vehicle) への燃料電池の応用が世界的に注目されている^{3)~8)}。HDV では、最大 100 kg の水素搭載量が想定されている^{9), 10)}。さらに、HDV 以上に水素搭載量が多い鉄道、船舶、航空機等のモビリティへの燃料電池 (または水素燃焼エンジン) の応用も研究開発が進められている^{11)~13)}。このような大量の水素を搭載するモビリティでは、現在利用されている圧縮水素ではなく、液体水素での利用形態も検討されている。70 MPa の圧縮水素より液体水素の方が、密度が高くより小さいスペースで車両に搭載できるため有利とされる。

水素の液化が初めて達成されたのは 1898 年のことで、Dewar により 20 cc の液体水素が得られた¹⁴⁾。その後、水素の液化手法の研究が進み、現在は数十トン/日程度の大規模な液化水素プラントも世界各地で稼働している¹⁵⁾。

モビリティの燃料として液体水素の応用が検討され始めたのが 1950 年頃である。その頃から燃料として液体水素を搭載した飛行機やロケットの研究開発が盛んになり、1963 年には液体水素を燃料としたエンジンがロケットに初めて使用された¹⁶⁾。現在でも、ロケットエンジンの燃料として利用されている。

一方、地上を走行する車両への液体水素の利用は、少し遅れて 1966 年に General Motors (GM) からプロトタイプ車両が発表された¹⁷⁾。現在、市販の FCV で利用されている圧縮水素よりも早い段階で液体水素の利用が検討されている。また、ロケットと同様に液体酸素も搭載しており、ロケットは燃焼としての利用であるが、このプロトタイプ車両は燃料電池としての利用である。2000 年頃には水素ステーションでの車両への液体水素の充填試験や公道での走行試験が実施されている¹⁸⁾。

2010 年前後から、純粋な液体水素ではなく超臨界領域も考慮した Cryo-Compressed Hydrogen (CcH₂) に関する研究が多くなっている^{19), 20)}。米国の Lawrence Livermore 国立研究所 (LLNL)、BMW、Linde などによって車両への充填試験などが行われている。近年では、Daimler Truck と Linde による Subcooled Liquid Hydrogen (sLH₂) も注目されている²¹⁾。

本稿では、従来の液体水素 (LH₂: Liquid Hydrogen)、CcH₂、sLH₂ の各利用形態に対して充填技術の特徴と開発の歴史をまとめる。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士 (工学)

* 原稿受理 2021 年 11 月 10 日

2. 低温水素の密度

液体水素の充填技術を理解するためには、低温水素の物性を把握しておく必要がある。圧縮水素の充填技術では高圧領域の物性が重要であるが、液体水素では低温領域の物性が重要である。また、基本的に車両の容器内は液相と気相が混在するため、液体水素の充填では相変化の考慮も必要となり、より複雑な物理現象を扱わなければならない。ここでは、充填を考える上で特に重要な物性である密度についてまとめる²²⁾。

水素が液体として存在する温度範囲は 13.957~33.145 K である。図 1 に固相を除いた状態図を示す。蒸気圧曲線 (vapor pressure curve) の上側が液相 (liquid)，下側が気相 (vapor) である。臨界点 (critical point) を超えた領域が超臨界 (supercritical) であり、CcH2 ではこの超臨界領域も考慮される。

蒸気圧曲線上、すなわち飽和状態の水素の密度と温度、圧力の関係を図 2 と図 3 にそれぞれ示す。液体としての密度は低温、低圧で高く、13.957 K で 7.36 kPa の状態で約 77 kg/m³ に達する。低温低圧側から臨界点に近づくにつれ、液体の密度は減少する。一方、気体の密度は上昇し、臨界点 (33.145 K, 1.2964 MPa) で一致する。臨界点の密度は約 31 kg/m³ である。70 MPa (15 °C) の圧縮水素の密度が約 40 kg/m³ のため、27 K 以下の飽和状態の液体水素では密度が約 61 kg/m³ 以上となり、1.5 倍以上の密度となる。

超臨界の例として図 4 に 35 MPa と 20 MPa における温度と密度の関係を示す。臨界温度の 33.145 K が液体と超臨界の分岐点であるが、温度上昇とともに密度は単調に減少する。35 MPa であれば 60 K でも 70 kg/m³ 以上の密度となり、低圧の LH2 と同等の密度が得られる。

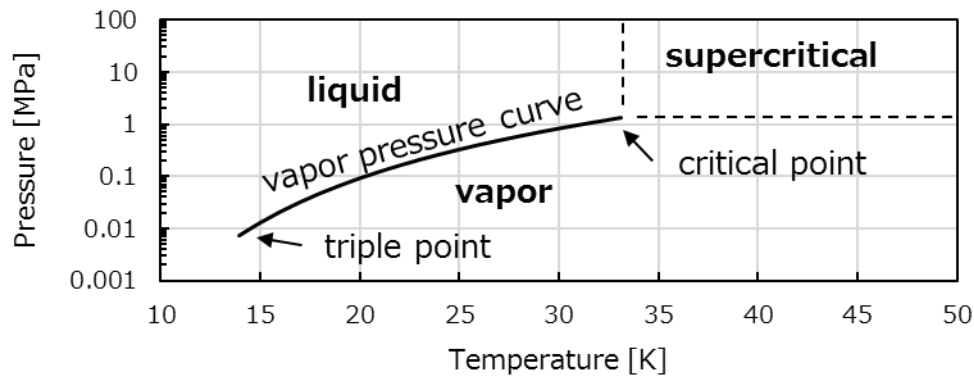


図 1 状態図 (蒸気圧曲線)

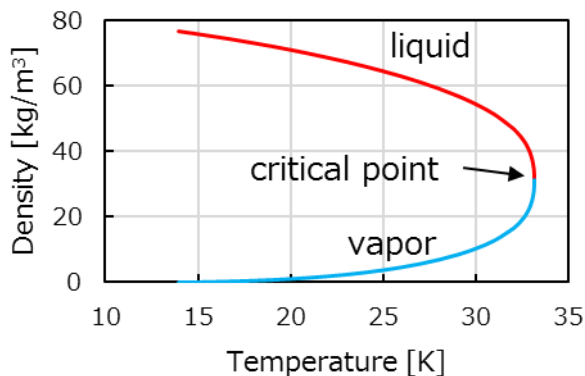


図 2 飽和状態の温度と密度の関係

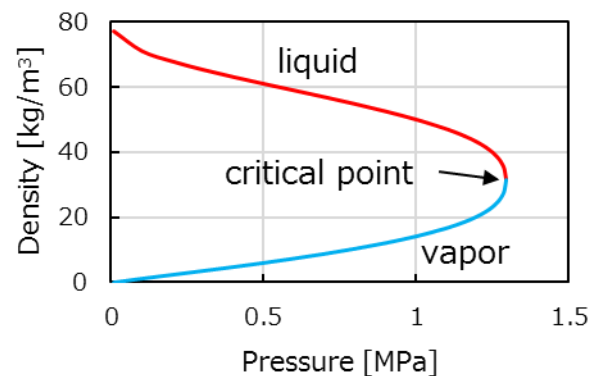


図 3 飽和状態の圧力と密度の関係

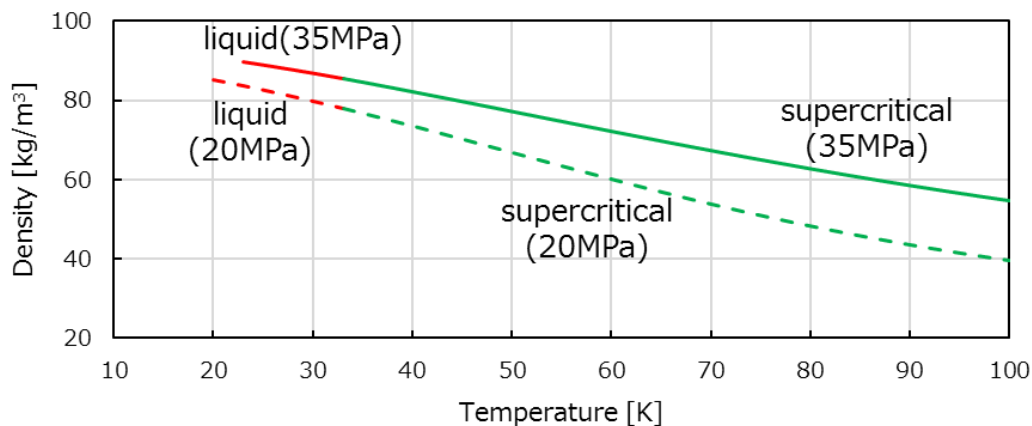


図4 35 MPa と 20 MPa における温度と密度の関係

なるべく高密度の状態で格納する方が有利であるため、車両に搭載される容器や配管は真空断熱構造にして外部からの熱を極力遮断し、低温を維持する必要がある。しかしながら、完全に断熱することは不可能であるため、水素の温度上昇は避けられず、時間とともに気化して圧力は上昇する(図1)。安全上、容器の圧力を一定以下に保持するため、一部の気体を排出しなければならない。車両を放置すると燃料の水素が徐々に失われることになる。このように外部からの入熱によって低温の液体から気化するガスのことをボイルオフガス(BOG: Boil Off Gas)と呼ぶ。BOGの車外への排出は少ないほど良いので、充填終了後に速やかに使用するような利用形態が液体水素には向いている。運行経路や時間が決まっている商用のHDVやバスなどが、一般のLDVよりも相性が良いといえる。

なお、水素には核スピン異性体としてパラ水素とオルト水素が存在し、物性値が異なる^{23), 24)}。特に、比熱や熱伝導率は大きく異なる。室温では平衡状態のパラ水素とオルト水素の割合は1:3であり、その割合は温度に依存する。低温になるにつれてパラ水素の割合が増加し、80 Kで1:1、液体水素ではほぼパラ水素となる。水素の物性値としては、パラ水素とオルト水素の混合割合による値が基本となるため、液体水素はほぼパラ水素の物性値である。

3. LH2 (従来の液体水素)

1966年にGMからLH2を搭載したプロトタイプ車両のElectrovanが発表されているが、充填方法についての言及は特に見当たらない。その後、GMは2002年にHydroGen3を発表する。後部座席下部に配置された容器にはLH2を4.6 kg搭載可能で、圧力は大気圧で沸点は20 Kと報告されている。図1より、液体の密度は約71 kg/m³である。許容圧力は0.7 MPaで、入熱による温度上昇によってBOGが許容圧力に達すると車外に水素が排出される。運転しなければ一日あたり2~4%の損失がある¹⁸⁾。

充填は次のようにして行われる¹⁸⁾。専用のノズルを車両のレセプタクルに接続し、ヘリウムガス(沸点が水素より低い)で接続部をパージして、空気を除去する。空気が冷却されて水分などが凍結するのを防ぐためである。このヘリウムガス雰囲気となった接続されたノズル内で、さらにステーション側の内管(真空断熱の二重管でcold fingerと呼ぶ)が車側の配管に伸びて接続される。車載容器が十分冷えた状態であれば、液体水素の充填は5分以下で終了する。

BMWは1970年代から水素を燃料とする内燃機関の研究開発を進めている^{25)~27)}。2002年までに5世代のLH2を搭載したプロトタイプ車両が製造されている。初期のLH2容器は、充填に5時間ほど要したと報告されている。その後、BMW 760Liをベース車両として開発されたHydrogen 7が2006年に発表さ

れた。これは LH2 とガソリンを燃料として搭載するバイ・フューエルの内燃機関の車両である。後席背後に設置された LH2 の容器は 170 L で約 8 kg の水素が搭載可能で、最大圧力は 0.51 MPa である。充填は HydroGen3 と同様に cold finger によって接続される。

一方、1999 年にミュンヘン空港にて初の公共水素ステーションにより LH2 車両への充填が開始された^{18), 25), 28)}。図 5 にミュンヘン空港の充填ノズルを示す。図 6 に車両の LH2 の充填レセプタクルを示す。接続は cold finger 方式で、充填口の開閉も含めて全自動で充填が行われている。120 L 容器に約 1.5 分で充填でき、従来のガソリン車と同等の燃料補給時間である。



図 5 液体水素の充填ノズル



図 6 液体水素の充填レセプタクル

4. CcH2 (Cryo-Compressed Hydrogen)

CcH2 は、LH2 より高温（～常温）かつ高圧（～35 MPa）の超臨界領域も考慮した技術である。気化が進行して内圧が増加しても、低圧の LH2 容器よりも耐圧が高いため、BOG を車外に排出し始める時期を遅らせることが可能となり、水素の損失が大きく改善される²⁰⁾。容器自体は低温かつ高圧に耐える性能が必要となるが、放置して最終的に常温になったとしても圧縮水素が残り、低圧の LH2 容器と違って車両を動かすだけの十分な水素量が保たれる。長期保存の観点では、大きなメリットである。

1998 年に LLNL で 24.8 MPa 容器の検討が行われており、80 K の状態で LH2 と同程度の密度を得られることが示されている²⁹⁾。充填時の損失、駐車時の BOG による損失なども LH2 より少ないことが示されている。2010 年には、35 MPa の CcH2 容器が LLNL と BMW から報告されている³⁰⁾。圧縮水素用の 35 MPa のタイプ 3 容器（アルミライナー、CFRP の複合容器）を真空断熱構造で覆った容器である。従って、圧縮水素と LH2 のレセプタクルを車両側に設置すれば両方の充填が可能である。

2010 年代に LLNL で充填に関する包括的な研究が行われている³¹⁾。LH2 に対応した高圧ポンプを備えた設備を構築し、CcH2 容器（151 L, 34.5 MPa, 水素搭載量 11 kg）への充填試験が行われている。常温の容器への充填では容器内温度が十分に下がらず低密度となるが、十分冷えた容器への充填では 70 kg/m³ 程度の高密度が達成されている。充填時間は概ね 5~7 分程度である。ほとんどの充填試験で、最大流量は 1.67 kg/min (100 kg/h) を超えており、平均は 1.1~1.4 kg/min である。

2015 年には、CcH2 に対応した充填設備がミュンヘンのサービスステーションに付加され、BMW のデモ車両も開発されている^{32), 33)}。最近では、ドイツのスタートアップ企業の CRYOMOTIVE が HDV 用の CcH2 の容器と充填技術を開発中である^{34), 35)}。2023 年までを研究開発フェーズとして、ディーゼル車に匹敵する航続距離 1,000 km 以上、充填時間 10 分以下の性能を持った HDV が CcH2 の技術により開発可能とされている。

5. sLH2 (Subcooled Liquid Hydrogen)

Daimler Truck と Linde が、液体水素を使った新しい sLH2 技術の開発を 2021 年に発表した²¹⁾。大気圧より高い圧力を使うことで、充填量を増加させ、BOG の損失も少なくする技術とされるが、詳細なメカニズムは十分に説明されていない。2023 年には、ドイツの試験ステーションでプロトタイプ車両への最初の充填が計画されている。

液化天然ガス (LNG) に対して、容器内の気体を再液化する subcooled LNG と呼ばれる手法がある³⁶⁾。充填時に過冷却した LNG を容器の上部から容器内に噴霧することで再液化を促進する考えである。容器内に増えた BOG を再液化で減少させるとともに、容器内圧力を低下させる効果がある。しかしながら、容器内の再液化に関する研究例は少なく、再液化の詳細なメカニズムの解明は十分ではない。

sLH2 は、この subcooled LNG と同様の概念と考えられる。同様の現象が、LH2 の水素ステーションにおいて 2000 年頃から認識されている²⁸⁾。しかしながら、sLH2 についても再液化の詳細なメカニズムは十分に解明されていない。

再液化のメカニズムの解明には、液体と気体の熱交換の物理的挙動を把握する必要があり、液体水素の物性が重要である。限定的ではあるが、熱伝導率や状態方程式などの物性が実験的に調査されている^{37), 38)}。また、液体水素で顕著に現れる量子効果を数値シミュレーションで評価することで、理論的に物性値を高精度で予測可能である³⁹⁾。

6. まとめ

車両への液体水素の充填技術として、LH2 (従来の液体水素)、CcH2 (Cryo-Compressed Hydrogen) および sLH2 (Subcooled Liquid Hydrogen) について概要をまとめた。それぞれの特徴を表 1 にまとめる。

表 1 充填技術のまとめ

	温度範囲 [K]	上限圧力 [MPa]	最高密度 [kg/m ³]	特徴
LH2	14～33	～0.7	70以上	研究開発が長く、走行試験など実績も多い。 BOG の損失が多く、密度もやや低い。
CcH2	14～常温	35	80以上	常温の圧縮水素にも対応し、長期保存可能。 BOG の損失が少なく、密度も高い。 低温高压対応の容器のため、コストが高い。
sLH2	14～33*	～2*	70以上*	LH2 より BOG の損失が少ない。 容器は数 MPa で、CcH2 より安価。 詳細が不明な点が多い。

*sLH2 は、参考資料が少ないため、想定される数値

LH2 は 60 年以上前から開発が始まり、公道での走行試験などの実績も多く、技術的には最も発達している。他と比較すると、低圧のため原理上 BOG の損失が多くなり密度もやや低めである。CcH2 は、温度は常温までカバーしており、上限圧力も 35 MPa まで対応しているため高密度で優秀な技術である。高密度の LH2 と、実用化されている圧縮水素のメリットを活かした技術と言える。ただし、CcH2 の実現には、低温に対応した圧縮水素容器が必要となり、コスト面が大きな課題である。sLH2 は、LH2 に対して上限圧力をやや高め（数 MPa 程度とみられる）に設定することで BOG の損失を改善した技術である。CcH2 容器よりも sLH2 容器は安価になると推測されるため、HDV など大量の水素を搭載するモビリティの普及にはメリットと考えられる。また、sLH2 は容器内の気体を再液化することで BOG を減少させる技術と考えられるが、再液化の物理現象は十分に解明されていない。sLH2 技術を高度に発展させるためには、高精度

な物性値の把握と再液化の物理現象の解明が必要である。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20003）の結果得られたものです。

参考文献

- 1) [Toyota, Honda get ready to launch their FCVs](#), Fuel Cells Bulletin, Vol.2014, Issue 11, p.1 (2014)
- 2) 一般社団法人 次世代自動車振興センター：水素ステーション整備状況, http://www.cev-pc.or.jp/suiso_station/index.html (参照 2021.10)
- 3) Philipp K. Rose, and Fabian Neumann : [Hydrogen refueling station networks for heavy-duty vehicles in future power systems](#), Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol.83, 102358 (2020)
- 4) Kate Forrest, et al. : [Estimating the technical feasibility of fuel cell and battery electric vehicles for the medium and heavy duty sectors in California](#), Applied Energy, Vol.276, 115439 (2020)
- 5) Emir Cabukoglu, et al. : [Fuel cell electric vehicles: An option to decarbonize heavy-duty transport? Results from a Swiss case-study](#), Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol.70, p.35-48 (2019)
- 6) [Volvo, Daimler Truck in heavy-duty vehicle JV](#), Fuel Cells Bulletin, Vol.2020, Issue 4, p.1 (2020)
- 7) Dong-Yeon Lee, et al. : [Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium- and heavy-duty trucks](#), Journal of Power Sources, Vol.393, p.217-229 (2018)
- 8) Toyota, Hino to jointly develop heavy-duty fuel cell electric truck, Fuel Cells Bulletin, Vol.2020, Issue 4, p.4 (2020)
- 9) PRHYDE (Protocol for Heavy-Duty Hydrogen Refuelling) : <https://prhyde.eu/> (accessed 2021.10)
- 10) Amgad Elgowainy and Krishna Reddi : [Hydrogen Refueling Analysis of Heavy-Duty Fuel Cell Vehicle Fleet](#), 2017 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program, Annual Merit Review (2017)
- 11) Yvonne Ruf, et al. : [Study on the use of fuel cells & hydrogen in the railway environment](#). Report 1: state of the art & businesscase and market potential (2019)
- 12) HyShip, <https://hyship.eu/> (accessed 2021.10)
- 13) ENABLEH2, <https://www.enableh2.eu/%20>(accessed 2021.10)
- 14) James Dewar : Liquid Hydrogen, Science, Vol.8, No.183, p.3-6 (1898)
- 15) Songwut Krasae-in, et al. : [Development of large-scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009](#), International Journal of Hydrogen Energy, Vol.46, Issue 62, p.31699-31726, (2010)
- 16) D. Cecere, E. et al. : [A review on hydrogen industrial aerospace applications](#), International Journal of Hydrogen Energy, Vol.39, Issue 20, p.10731-10747 (2014)
- 17) GM Heritage Center, GM Hydrogen Fuel Cell Vehicles : https://www.gmheritagecenter.com/featured/Fuel_Cell_Vehicles.html (accessed 2021.10)
- 18) Gerd Arnold, and Joachim Wolf : [Liquid Hydrogen for Automotive Application Next Generation Fuel for FC and ICE Vehicles](#), 低温工学, 40 巻, 6 号, p.221-230 (2005)
- 19) Salvador M. Aceves, et al. : [Safe, long range, inexpensive and rapidly refuelable hydrogen vehicles with cryogenic pressure vessels](#), International Journal of Hydrogen Energy, Vol.38, Issue 5, p.2480-2489 (2013)
- 20) Salvador M. Aceves, et al. : [Vehicular storage of hydrogen in insulated pressure vessels](#), International Journal of Hydrogen Energy, Vol.31, Issue 15, p.2274-2283 (2006)
- 21) Daimler Truck : Linde link for truck refueling using liquid hydrogen, Fuel Cells Bulletin, Vol.2021, Issue 1, p.3-4 (2021)
- 22) Eric W. Lemmon, et al. : Thermophysical Properties of Fluid Systems in NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, Eds. P.J. Linstrom and W.G. Mallard, National Institute of Standards and Technology,

-
- Gaithersburg MD, 20899, doi. 10.18434/T4D303
- 23) Zhao Yanxing, et al. : [Thermodynamics analysis of hydrogen storage based on compressed gaseous hydrogen](#), liquid hydrogen and cryo-compressed hydrogen, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.44, Issue 31, p.16833-16840 (2019)
- 24) Jacob W. Leachman, et al. : [Fundamental Equations of State for Parahydrogen, Normal Hydrogen, and Orthohydrogen](#), Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol.38, No.3, p.721-748 (2009)
- 25) 山根健, 納家弘樹 : [BMW Hydrogen 7 -液体水素を主燃料とした内燃式水素自動車-](#), 低温工学, 42 巻, 10 号, p.334-337 (2007)
- 26) Franz Amaseder, and Guenter Krainz : [Liquid Hydrogen Storage Systems Developed and Manufactured for the First Time for Customer Cars](#), SAE Technical Paper, 2006-01-0432 (2006)
- 27) Thomas Wallner, et al. : [Fuel economy and emissions evaluation of BMW Hydrogen 7 Mono-Fuel demonstration vehicles](#), International Journal of Hydrogen Energy, Vol.33, No.24, p.7607-7618 (2008)
- 28) K.Pehr, et al. : [Liquid hydrogen for motor vehicles - the world's first public LH2 filling station](#), International Journal of Hydrogen Energy, Vol.26, Issue 7, p.777-782 (2001)
- 29) S.M.Aceves, et al. : [Insulated pressure vessels for hydrogen storage on vehicles](#), International Journal of Hydrogen Energy, Vol.23, Issue 7, p.583-591 (1998)
- 30) Salvador M. Aceves, et al. : [High-density automotive hydrogen storage with cryogenic capable pressure vessels](#), International Journal of Hydrogen Energy, Vol.35, Issue 3, p.1219-1226 (2010)
- 31) Guillaume Petitpas, et al. : [Rapid high density cryogenic pressure vessel filling to 345 bar with a liquid hydrogen pump](#), International Journal of Hydrogen Energy, Vol.43, Issue 42, p.19547-19558 (2018)
- 32) Hydrogen fuel cell system shows future of BMW eDrive technology, Fuel Cells Bulletin, Vol.2015, Issue 8, p.2 (2015)
- 33) [Total opens Munich hydrogen station for CEP with BMW](#), Linde, Fuel Cells Bulletin, Vol.2015, Issue 8, p.7-8 (2015)
- 34) Cryomotive startup for LH2 storage, refueling, Fuel Cells Bulletin, vol.2020, Issue 12, p.11 (2020)
- 35) CRYOMOTIVE : <https://www.cryomotive.com/> (accessed 2021.10)
- 36) Liang Yin, and Yonglin Ju : [Design and analysis of a process for directly Re-liquefying BOG using subcooled LNG for LNG carrier](#), Energy, Vol.199, 117445 (2020)
- 37) T. Charignon, et al. : [Dielectric coefficient and density of subcooled liquid hydrogen](#), Cryogenics, Vol.47, Issue 4, p.252-256 (2007)
- 38) T. Charignon, et al. : [Thermal Conductivity of Subcooled Liquid Hydrogen](#), AIP Conference Proceedings, 985, p.765-772 (2008)
- 39) H. Nagashima, et al. : [An evaluation of the self-diffusion coefficient of liquid hydrogen via the generic van der Waals equation of state and modified free volume theory](#), Chemical Physics, Vol.539, 110952 (2020)

【編集後記】

当研究所の事業活動を知っていただくために、1979年に「自動車研究」が創刊されました。2011年まで「自動車研究」が続き、原稿の執筆はもちろん、特定の研究分野の活動をまとめた「特集号」の企画などにも苦勞した記憶があります。この「自動車研究」は関係業界のみならず、広く社会一般にも理解しやすい技術資料として利用していただいたのではないかと認識しています。2012年からは、「JARI Research Journal (JRJ)」に名称を変更し、紙媒体ではなく JARI ホームページに掲載する形で活動内容を発信してきました。今回は、以前の「自動車研究」の良かったところと、デジタルコンテンツとしての良いところを組み合わせ、JRJの「特集号」(デジタル冊子)として発行することとなりました。今後もさらに内容を充実させて、当研究所の事業活動を多くの方に知っていただけるデジタル冊子を発信していきたいと思います。この場をお借りして、ご執筆ならびにご協力いただいた方々に御礼申し上げます。

(A.M)

JARI Research Journal 2021 年度 特集号

発行日： 2022 年 3 月 10 日

[所報編集委員会]

発行所： 一般財団法人日本自動車研究所

委員長 赤井 泉明

[URL: https://www.jari.or.jp/](https://www.jari.or.jp/)

委員 石井 充 入江 博之 岩城 亮

発行人： 川岸 浩

内田 里沙 大谷 亮 面田 雄一

清水 貴弘 津田 裕之 富岡 純一

細谷 純一

[編集事務担当] 一般財団法人日本自動車研究所

企画・管理部 小針 弘之

E-mail : jrj@jari.or.jp

- 本誌の記事内容に関するお問い合わせ、ご意見は、E-mail にて jrj@jari.or.jp までお送りください。
- 本誌に掲載されたすべての記事内容は、一般財団法人日本自動車研究所の許可なく転載・複写することはできません。
- 転載・複写を希望される方は編集事務担当までご連絡ください。

