

J_{ARI} R_{esearch} J_{ournal} 2022年度 特 集 号

特集：「カーボンニュートラル ～自動車分野への貢献～」



JARI Research Journal 2022 年度 特集号 目次

特集： 「カーボンニュートラル～自動車分野への貢献～」

目次	1
JARI Research Journal 掲載区分	4

特集

「カーボンニュートラル～自動車分野への貢献～」

◆巻頭言◆

特集 「カーボンニュートラル ～自動車分野への貢献～」にあたって	6
土屋 賢次	[原稿へ]

◆講演 * 原稿◆

* 「JARI シンポジウム 2021 カーボンニュートラルへの挑戦～自動車による貢献と実現に向けて～」より

【特別講演】 2050年カーボンニュートラルに向かう世界 現状と課題	7
------------------------------------	---

東京大学未来ビジョン研究センター 教授 高村 ゆかり [\[原稿へ\]](#)

【基調講演①】 自動車技術によるカーボンニュートラルの将来可能性について	20
--------------------------------------	----

早稲田大学 名誉教授 大聖 泰弘 [\[原稿へ\]](#)

【基調講演②】 2050年カーボンニュートラルと自動車の電動化推進について	30
---------------------------------------	----

経済産業省 製造産業局 自動車課長 (2022年10月現在*) 清水 淳太郎 [\[原稿へ\]](#)

* 経済産業省 大臣官房参事官 (自動車・再生可能エネルギー担当) (ご講演時)

◆JARI 投稿原稿◆

【解説】	重量車のカーボンニュートラル技術の動向と位置づけ	42
	森田 賢治 [原稿へ]	
【技術資料 (再掲)】	電動重量車の充電/給電システムに関する開発動向	51
	森田 賢治 [原稿へ]	
	* 初掲載 2021 年 3 月 ; 上記原稿の前報	
【解説】	中古 LIB の劣化診断方法	55
	安藤 慧佑 [原稿へ]	
【研究活動紹介】	自動車用燃料電池における不純物評価に対する JARI の取り組み	60
	松田 佳之 他 [原稿へ]	
【研究活動紹介】	透過電子顕微鏡 (HT7700) のご紹介	67
	清水 貴弘 [原稿へ]	
【解説】	水素・燃料電池自動車の世界統一技術基準 No. 13 (HFCV-GTR) の最新動向	72
	増田 竣亮 他 [原稿へ]	
【研究活動紹介】	大型 FCV 用液化水素技術に関するフィジビリティ調査	79
	富岡 純一 [原稿へ]	
【研究活動紹介】	大型車両用の液体水素容器内の現象解明に向けて	85
	山田 英助 他 [原稿へ]	
【研究速報】	ガソリン車の粒子状物質および固体粒子数、 温室効果ガスの排出量に対する低温影響	88
	柏倉 桐子 他 [原稿へ]	
【技術資料】	エンジン燃焼の数値解析における燃料噴霧モデル定数最適化手法の検討	96
	松岡 正紘 他 [原稿へ]	
【解説】	WLTC モード作成方法およびランダムサイクルジェネレータへの適用	103
	羽二生 隆宏 他 [原稿へ]	
【解説】	WLTP における電気自動車の一充電走行距離 および交流電力量消費率試験法	115
	羽二生 隆宏 他 [原稿へ]	
【研究活動紹介 (再掲)】	インドネシアにおける CNG 車普及に向けた インフラ構築を含む持続可能な環境整備・実証事業	123
	鈴木 徹也 [原稿へ]	
	* 初掲載 2022 年 6 月	

【研究速報】	7歳児の交通安全知識に関する保護者の認識*	131
	大谷 亮 [原稿へ]	
	* 初掲載 2022年5月	
【研究速報】	自動運転車の安全性評価シナリオにおける Unpreventable 領域の評価方法に関する検討*	141
	加藤 良祐 [原稿へ]	
	* 初掲載 2022年5月	
【調査資料】	JNCAPにおけるペダル踏み間違い時加速抑制装置の 対歩行者試験追加に向けたマクロ事故データ分析*	153
	本間 亮平 [原稿へ]	
	* 初掲載 2022年6月	
【解説】	自動運転安全性評価の国際協調に向けたドイツと日本の交通実態比較*	160
	長谷川 諒 [原稿へ]	
	* 初掲載 2022年6月	
【研究速報】	高速道路渋滞場面における自動運転車に対する受容性 —外部表示およびドライバの知識が不安感に及ぼす影響—*	166
	大谷 亮 [原稿へ]	
	* 初掲載 2022年7月	
【研究速報】	眼疾患（緑内障）における運転への補償行動に関する予備的検討*	176
	佐藤 健治 [原稿へ]	
	* 初掲載 2022年7月	
【研究活動紹介】	「ADAS 試験場新設工事」竣工に向け*	183
	櫻本 充広 [原稿へ]	
	* 初掲載 2022年6月	
【研究活動紹介】	インドネシアにおけるCNG車普及に向けた インフラ構築を含む持続可能な環境整備・実証事業*	(123)
	鈴木 徹也 [原稿へ]	
	* 初掲載 2022年6月。特集原稿として再掲。特集ページをご参照のこと。	
【調査資料】	国内大気質の最近の動向*	191
	伊藤 晃佳 [原稿へ]	
	* 初掲載 2022年9月	

JARI Research Journal 掲載区分

掲 載 区 分	記 載 概 要
研究速報 Research Report	<p>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。</p>
技術資料 Technical Report	<p>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〕</p>
調査資料 Survey Report	<p>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〕</p>
研究活動紹介 Research Activity	<p>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。</p>
解 説 Review	<p>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。</p>

特集 「カーボンニュートラル ～自動車分野への貢献～」

* 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，一部再掲もあります。

特集 「カーボンニュートラル ～自動車分野への貢献～」にあたって

業務執行理事 土屋 賢次



世界的にカーボンニュートラルに向けた動きが加速しており、現在、150カ国以上が年限付きのカーボンニュートラルを表明しています。日本では、2020年10月に「2050年カーボンニュートラル」の宣言が出されました。

このような中で、国際エネルギー機関（IEA）が2021年5月に公表した「鉱物資源の需要予測（The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions）」では、エネルギー移行に向けた再生可能エネルギー等の関連技術に重要な銅、リチウム、ニッケル、コバルト、レアアース等について、脱炭素社会の実現に向けた鉱物資源の安定供給確保の課題や政策的助言として、6つの提言をしております。この中では、バリューチェーンの全段階で技術革新を促進するべく研究開発の強化や、リサイクルを拡大する効率的な新しい技術の研究開発などが掲げられています。

日本におけるカーボンニュートラルの取り組みとして、2021年6月には、グリーン成長戦略が策定され、2050年に向けて成長が期待される14の重点分野が選定されました。2021年12月には、経済産業省からグリーンイノベーション基金事業が開始され、この重点分野から現在19のプロジェクトが進められています（16プロジェクトが実施者の採択決定済）。

自動車業界では、百年に一度の変革期と言われるCASEへの対応の中で、カーボンニュートラルに向けた技術革新も急加速に進める必要があります。

世界では、電気自動車（BEV）の販売台数が急速に伸びています。しかし、先述のIEA報告では、バッテリーに使用されるリチウムの需要は、2°Cシナリオ達成のために2040年には2020年の40倍に達するとしており、供給不足やそれに伴う価格高騰が懸念されるとの課題も示されています。

日本では、BEV、燃料電池自動車（FCV）に、プラグインハイブリット車（PHV）、ハイブリット車（HV）を加えた電動車で取組みを進めています。グリーンイノベーション基金事業では、自動車関連の研究開発項目が多数設定されています。また、エネルギー源のグリーン化として電気、水素、合成燃料の研究開発も進められています。このように、多種多様な技術革新を、限られたリソースで効率よく研究開発を進める必要があります。基礎・応用領域の研究開発での協調領域を広げて産学官連携での取り組みが重要であります。

JARIは、研究事業戦略での目指す姿のひとつとして「2050年カーボンニュートラル」を掲げて研究試験に取り組んでおり、特に産産学学連携での協調領域の研究開発では中核として推進していきます。

今回の特集号では、このカーボンニュートラルに関連した内容でまとめました。まず、昨年10月に開催した「JARI シンポジウム 2021 カーボンニュートラルへの挑戦 ～自動車による貢献と実現に向けて～」から、特別講演および基調講演の内容を講演者のご協力を得て掲載しました。また、電動技術、水素・電気安全、パワートレイン評価について研究速報、研究活動紹介、解説などを掲載しております。皆様方のお役に立てれば幸いです。

特別講演 *1

2050年カーボンニュートラルに向かう世界 現状と課題

高村 ゆかり*2
Yukari TAKAMURA

はじめに

今日、お話ししたいと思いますのは、2050年カーボンニュートラルという大きな目標を皆さんよく耳にされ、すでにご存知のことと思いますけれども、こうした脱炭素社会に向かう大きな世界の流れの現状と、なぜこうした方向で、社会が動いているのかということ、どのような動きがあるのかということ、そして最後にいくつか課題と想っていることを、大局的、俯瞰的な観点からお話をしたいと思っております。

2018年の自然災害

ここ数年、雨または台風による大きな被害が、私たちの生活あるいは経済活動に影響を及ぼしております。2018年7月の西日本豪雨（倉敷市真備町）は、200名以上の方がお亡くなりになった豪雨です（図1）。この年はその後に、非常に暑い夏、1週間でピーク時には、5万人の方が熱中症の疑いで搬送されたという記録が残っています。

その直後の台風21号により、関西圏に交通インフラにも大きな影響を与えました。関西国際空港が水没するといった大きな影響があり、また電力インフラにも影響がありました。

2019年の自然災害

2019年は、9月の台風15号のあとに、台風19号が首都圏だけでなく、長野県や東北域も含めて大きな、甚大な影響を生じさせます（図2）。交通網という視点では鉄道が、そしてもたらされた雨による洪水などにより、サプライチェーンの影響がありました。住宅だけでなく直接被害を被った工場、そしてその工場が、供給しているサプライチェーン側に組み込まれている場合、直接被害を被った外側の区域の企業の活動、あるいは経済にも影響がありました。そうした被害がここ数年起きております。

2018年の自然災害による経済損失
2018年の台風21号と西日本豪雨だけでおよそ2兆5000億円
2018年の損害保険支払額は史上最高。東日本大震災時を超える

日付	災害名	国	死者数	経済損失 (米ドル)	保険支払額 (米ドル)
10月10-12日	ハリケーンマイケル	米国	32	170億	100億
9月13-18日	ハリケーンフロレンス	米国	53	150億	53億
11月	山火事キャンブ・ファイア	米国	88	150億	120億
9月4-5日	台風21号	日本	17	130億	85億
7月2-8日	7月西日本豪雨	日本	246	100億	27億
春・夏	干ばつ	中欧、北欧	N/A	90億	3億
9月10-18日	台風マンクット	太平洋州、東アジア	161	60億	13億
7-9月	洪水	中国	89	58億	4億
11月	山火事ウールジー	米国	3	58億	45億
8月16-19日	熱帯暴風雨ランピア	中国	53	54億	3億
		その他		1230億	450億
出典：AON, 2019を基に高村作成	全体			2250億	900億

2019年の自然災害による経済損失
台風19号と台風15号が経済損失額で世界1位、3位。2兆7000億円超の損失

日付	災害名	国	死者数	経済損失 (米ドル)	保険支払額 (米ドル)
10月6-12日	台風19号	日本	99	150億	90億
6月-8月	モンsoon/豪雨	中国	300	150億	7億
9月7-9日	台風15号	日本	3	100億	60億
5月-7月	ミンジツピ川洪水	米国	0	100億	40億
8月25日-9月7日	ハリケーン・ドリアン	バハマ、カリブ海諸国、米国、カナダ	83	100億	35億
3月12-31日	ミズーリ川洪水	米国	10	100億	25億
6月-10月	モンsoon/豪雨	インド	1750	100億	2億
8月6-13日	台風9号	中国、フィリピン、日本	101	95億	8億
3月-4月	洪水	イラン	77	83億	2億
5月2-5日	サイクロン・フォニ	インド、バンラデシュ	81	81億	5億
		その他		1260億	440億
出典：AON, 2020を基に高村作成	全体			2320億	710億

*1 「JARIシンポジウム2021 カーボンニュートラルへの挑戦～自動車による貢献と実現に向けて～」(2021年10月8日)の講演より原稿化

*2 東京大学未来ビジョン研究センター 教授

* 2022年9月9日受理

自然災害による経済損失

2018年、2019年といわゆる気象に関わる災害の経済損失額が非常に大きくなっており、2018年の台風21号と7月の西日本豪雨だけで、およそ2兆5千億円、この年、損害保険会社は1兆円を超える支払を行いました。東日本大震災で損害保険会社が支払った額を超えております。地震保険はご存知の通り、一定の支払額を超えると国が保証する仕組みになっています。単純な比較はできませんが、しかし、それぐらい大きな損害保険会社の支払があったということです。2019年も台風15号、19号、これは世界で3番目、1番目の大きな経済損失をもたらす災害です。この二つだけで2兆7千億円です。この年も損害保険会社は、1兆円を超える支払を行っております。

もちろん、今の気象災害、気候変動によってすべての雨が降っているということではありません。しかし、ノーベル物理学賞を受賞されたばかりの気候科学、真鍋先生がつくられた気候予測のシミュレーション、気候を再現するモデルをつかった気候、気象の将来予測の研究が、かなり進んでまいりました。例えば西日本豪雨を例にとりまると、気象研究所などの研究者がグループで論文を書いて、IPCCなどに気候変動に関するコミュニティのレビューを経た上で、最近の科学的知見として紹介されております。私たちの過去の排出がなかった時の基準と比べ、私たちが排出したことにより、西日本豪雨に関して言うと、6~7%降水量が上乗せされていると評価をしております。6、7%程度ですと大したことないと感じますが、しかしこの西日本豪雨を例にとりまると48時間雨量、72時間雨量が、史上最高を記録した地点がそれぞれ100を超えております。もし上乗せされた6、7%がなかったらとしてみますと、史上最高記録した降雨の地点の数がいずれも100を下回り、だいたい70~75%まで縮減します。

つまり、私たちは色々な災害に対して準備をして防災、減衰の対応をしているわけですが、気候変動、我々の過去からの排出に起因して、押し上げられた結果、我々の想定を超える形での気候の変化が起こり、その結果、気象災害の頻度や規模が大きくなっていると考えられます。今こうした将来予測を織り込んだ、例えば治水ということ、あるいは防災ということ、政府も動いておりますけれども、私たちが気候変動の問題というのが、ある意味、遠い将来の次の世代、あるいはその次の世代の話ではなく、私たちのまきに生きている社会の経済に影響を与える問題になっているということがお分かりいただけるかと思えます。

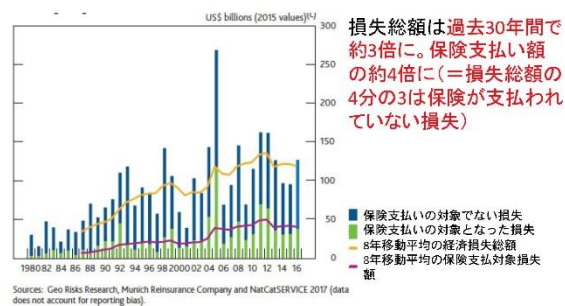
もちろんこれは日本だけではなく、世界的なトレンドとしてこの経年で見てもあります。直近35年を見て、気象関連の経済損失が大きくなっております。(図3)

IPCC第6次評価報告書

直近8月に、気候変動に関する政府間パネル、IPCCの最新の報告書の第1弾が出てまいりました(図4)。まさに気候の現状と将来予測に関する研究成果を取りまとめたものです。すでに1850年から1900年という工業化前と比較して、直近10年の平均でも、世界の平均で約1.1℃気温が上昇しております。陸域では約1.6℃上昇しているということでもあります。直観的にも私たちは分かりますけれども、気温の上昇とともに気候の変化はより大きくなるというのが気候科学の予測です。

さらに、将来の予測というのは、決め打ちで、ある一つ社会、ある一つの将来像を描くのは難しいので、気候科学ではいくつかの社会経済シナリオを作って、それに応じて

世界の気象関連損失額推移 (1980-2016)



出典：Bank of England, Quarterly Bulletin 2017 Q2, 2017

図 3

IPCC第6次評価報告書 (2021年8月)

- 人間活動が大気、海洋、陸域の温暖化を引き起こしていることに疑いはない(unequivocal)
 - 1850年-1900年と比較して、世界の気温は2000年-2020年に0.99℃上昇。2011年-2020年に1.09℃上昇。陸域では1.59℃上昇
 - 人間活動により2011年-2020年に1.07℃上昇
- 大気、海洋、雪氷圏、生物圏に広範で急速な変化が生じている。近年の気候系の変化は、過去数百年、数千年を見てもかつてないものである
- 熱波、大雨、干ばつ、台風といった異常気象にあらわれている変化、それらの人間の活動の影響によることについて科学的証拠が強固になった
- 気候感度(大気中CO2濃度が2倍となったときの気温上昇)の推計値の不確実性の改善。これまでの想定よりも高い3℃の気候感度
- 気温上昇とともに気候の変化はより大きくなる
- この数十年で(in the coming decades)温室効果ガスの大幅な排出削減がなければ、今世紀中に1.5℃、2℃を超える気温上昇となる
 - 排出を早期に下方に転じなければ、2021年-2040年の間に1.5℃を超える可能性が高い
- 多くの変化、特に海洋、海水、海面の変化は数百年から数千年間不可逆的な変化である

図 4

排出量がどのように推移するかと呼応して、予測を示しております。次のスライドで線の色を見てください（図 5）。この薄い青色、今から我々が急速に排出して 2050 年頃には排出実質ゼロを実現できるような、そのような場合です。あるいはそれまではいかないけれども、今足元から排出を減らしていくことができる、2070 年頃にはゼロになっていくような、そうした場合には、最初急速に減らして 50 年で 0 となりますと、1.5 度までの気温上昇の水準に抑えることができそうだという予測です。もし、徐々にではあるけど 70 年頃に減らしていける場合ですと、2 度を下回る水準に抑えることができそうだという予測です。そうでなく、今から 50 年ぐらいまで減らしてなく、それから減らしていく、あるいは減らすことができない、そのような経済社会のあり方に推移した場合は、気温上昇は 2 度を超え、さらには 3 度、4 度と大きく上がっていくという見通しです。

今回の第 6 次評価報告書の一つの大変興味深い点は、先ほどの気象研究所などを研究者、これは文部科学省のプロジェクトの成果でもあるのですが、気温の上昇とともにこうした異常な気象現象の頻度や強度がどのように変わっていくかという予測が、研究成果を取りまとめて示されていることです（図 6）。特に日本では立地もありまして、洪水、大雨というのが我々の生活に非常に大きな影響を及ぼすわけです。見て頂きますと現在気温が約 1℃上がった現在において、先ほどの 6%、7% ぐらい、排出によって雨の量が上乘せされているということです。異常な大雨の頻度も 1.3 倍になっているということです。これが 1.5℃、2℃、あるいはさらに上がってまいりますと、異常気象時に上乘せされる雨の量、それから頻度も大きくなってきます。その意味で 1.5℃か 2℃か、という気温の上昇の抑制もさることながら、できるだけ低い水準で気温上昇を抑えるということが、将来の気候変動リスクを抑えるという意味では、決定的に重要であります。

今、50 年カーボンニュートラルという方向に日本も含めて世界が大きく動いているわけですが、それはまさにこうした気候科学の知見を踏まえたものであります（図 7）。もし、1.5 度に気温上昇を抑えようとすると、2050 年頃には二酸化炭素排出実質ゼロにするような、全体として我々が増やした吸収量と相殺してゼロにするような、そうした社会の実現ということが必要になる、そのような規模での削減が必要ということになります。そのためには、エネルギーや建築物、交通を含む社会のインフラ、あるいは産業が大きく変わっていく、脱炭素、低炭素に変わっていくことが必要になります。2020 年コロナの影響で、人の移動が制限され、経済活動の需要も縮減したと言われていいますが、それでもエネルギー起源の CO₂ の排出量は、前年比で 6%削減したかどうかという水準です。これは、我々の経済活動、今の社会基盤をそのままにしても我々の経済活動の在り方によっても減らせると言うことを示唆するものでもあります。しかしながらゼロエミッション、排出実質ゼロ、カーボンニュートラルを目指して行こうという

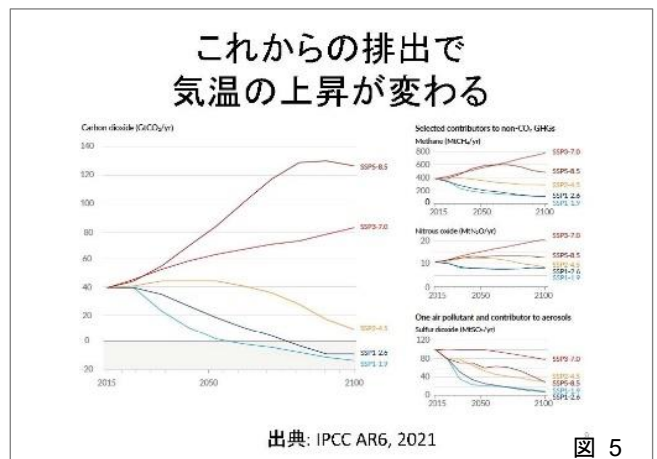


図 5

気温上昇で異常気象の頻度や強度が変わる

1850-1900年からの気温上昇		1°C(現在)	1.5°C	2°C	4°C
10年に1度の熱波などの極端な高温	高温の水準	+1.2°C	+1.9°C	+2.6°C	+5.1°C
	発生の頻度	2.8倍	4.1倍	5.6倍	9.4倍
50年に1度の極端な高温	高温の水準	+1.2°C	+2.0°C	+2.7°C	+5.3°C
	発生の頻度	4.8倍	8.6倍	13.9倍	39.2倍
10年に1度の大雨	雨量	+6.7%	+10.5%	+14.0%	+30.2%
	発生の頻度	1.3倍	1.5倍	1.7倍	2.7倍
10年に1度の農業や生態系に被害を及ぼす干ばつ	発生の頻度	1.7倍	2.0倍	2.4倍	4.1倍

出典: IPCC AR6, 2021

図 6

IPCC 1.5°C報告書(2018)が示すもの

- 人間活動に起因して工業化前と比してすでに約1°C上昇。現在のペースで排出すると早ければ2030年頃に1.5°Cに達する
- 気候変動関連リスクは、1.5°Cの上昇でも今よりも高い。2°Cよりは低い
- 1.5°Cに気温上昇を抑えるには、CO₂を、2010年比で2030年までに約45%削減、2050年頃に排出実質ゼロ。CO₂以外のガスは大幅削減
 - 2°Cの場合は、2030年に約20%削減、2070年頃に排出実質ゼロ
- エネルギー、建築物、交通を含むインフラ、産業などにおいて急速で広範囲なかつない規模の変革・移行が必要。あらゆる部門での排出削減、広範な削減策導入、そのための相当な投資の増大が必要
- 各国がパリ協定の下で提出している現在の目標では1.5°Cに気温上昇を抑制できない
- 2030年に十分に先駆けて世界のCO₂排出量が減少し始めることが、将来の影響リスクを低減し、対策のコストを下げる

図 7

こととなりますと、当然、我々の行動様式とともに、それが依存している社会基盤の変革ということが決定的に重要であります。また、先ほど示しましたように、気温上昇をできるだけ低い水準に抑えようとするとして、今からできる限りの排出削減というのが一つの重要な要素です。このような科学的知見に基づいて、今の50年カーボンニュートラルの政策が出されております。

カーボンニュートラルに向かう世界

50年カーボンニュートラルは昨年来の日本の国の長期目標にもなっております。また、今年に入りますとアメリカでバイデン政権ができたこともありまして、G7先進主要国、欧州連合も含めて先進主要国すべてが共有する目標です(図8)。中国も昨年の9月に、遅くとも2060年までのカーボンニュートラルを実現するという目標を表明をしております。最近ですとアジア諸国、例えばマレーシア、あるいはタイ、ベトナム、インドネシアなどでも、50年、60年などの年限の条件が付いていますけれども、排出を実質ゼロにするという長期目標を、検討し決めるアジアの途上国も増えてきております。

さて、カーボンニュートラル目標というのは、今申し上げました通り、決して簡単な目標ではございません。繰り返しますが、私たちの社会の延長線、あるいは積み上げの先には、私たちの目指す脱炭素社会には到達できない、そのような目標です。では、なぜそのような到達できない目標を立てたのかと、しばしばお尋ねいただきます。私たちがどういう社会を目指したいのか、特に私たちの今の社会の延長線上に到底到達できない目標だとすると、私たちが目指す社会の在り方、ゴールを明確にすることで、どこを変えなければならないのか、どこに課題があるのか、どこにイノベーションが必要なのか、これを共有してそのための政策のために明確な目標が必要となります。(図9)にお示しているのはエネルギー資源に限定したものです。50年カーボンニュートラルが表明される前ですが、どう予測しても、現状の対策の積み上げでは排出が50年経っても減らない。しかし、パリ協定が目指す、例えば2℃を十分に下回る目標との関係で見ますとこれだけ大きなギャップがあるわけです。このギャップが認識されてこそ初めてそこを埋めるためにどういう対策や技術が必要かということも議論ができる。課題を明確化がまさに社会が求めている変革とイノベーションを理解させてくれるという、そのためのゴール、目標があります。

さて今、世界は50年カーボンニュートラルという目標で共有するようになっておりますので、大きな焦点は、それに整合した30年の削減をどう実現するかというところにあります。先進国すべてが50年の目標に整合した30年の歳出削減ということ共有をしております、若干数字の立て方、基準年や目標年は異なりますが、ほぼ同様なスケールでの非常に意欲的な目標を設定しております(図10)。

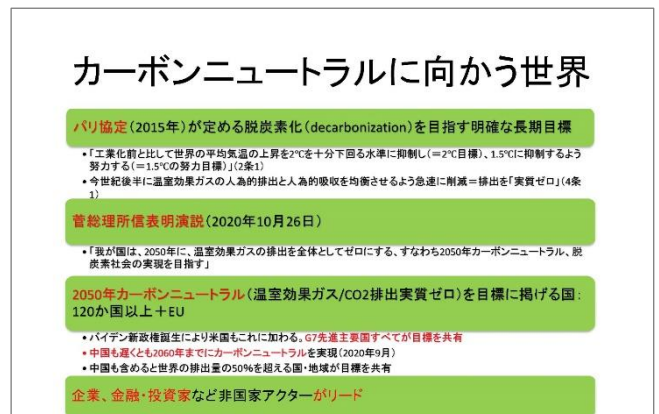


図 8

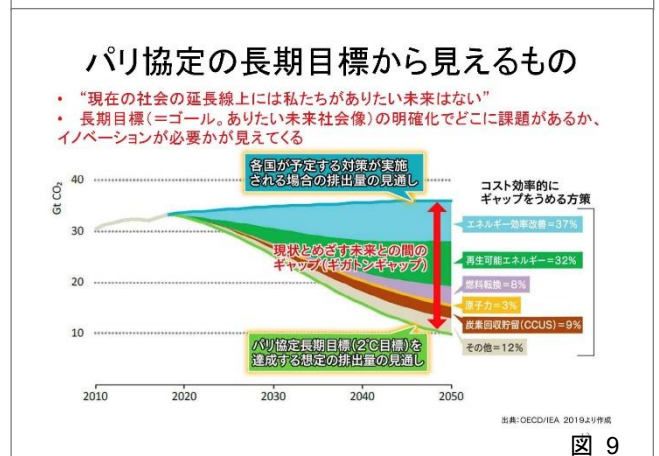


図 9

2030年目標の引き上げ

	新たな2030年目標	2015年提出の目標
日本	2013年比46-50%削減	2013年比26%削減
米国	2005年比50-52%削減	2025年までに2005年比26-28%削減
EU	1990年比少なくとも55%削減	1990年比少なくとも40%削減
ドイツ	1990年比少なくとも65%削減 2040年までに88%削減 2045年までにカーボンニュートラル	1990年比少なくとも55%削減
英国	1990年比68%削減 2035年までに78%削減	1990年比53%削減
カナダ	2005年比40-45%削減	2005年比30%削減
中国	少なくとも65%の排出原単位改善: 2030年頃までにCO2排出量頭打ち: 一次エネルギー消費の非化石燃料 比率約25%	60-65%の排出原単位改善:2030年頃までにCO2排出量頭打ち:一次エネルギー消費の非化石燃料比率約20%
インド	—	33-35%の排出原単位改善:総電力設備容量の40%を非化石燃料起源に

図 10

しかしこの目標を考慮しても、残念ながらまだ日本のものは正式に提出されていないので入っていないのですが、30年の目標は明らかに今のトレンドを変える効果があります。しかしながら50年カーボンニュートラルに向かう水準にはまだ足りないというのが現状です(図11)。間もなく今年10月31日からCOP26が始まりますけれども、一つの大きな焦点が50年カーボンニュートラルといった大きな目標と整合する30年の排出削減を世界的にどう実現するかというところです。

主要国の気候変動政策の特質

さて、主要国の気候変動政策をここに紹介をさせていただきますけれども、今この場で詳細をお話する時間がございませんので、図12でポイントをまとめております。

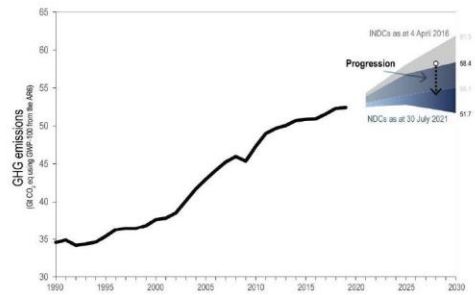
今の主要国の気候変動対策の特徴は大きく三つあります。一つ目はコロナの感染症の感染症対策で傷んだ経済社会の復興策の中に気候変動対策や環境対策を統合して、より持続可能な脱炭素の社会を作り、再設計していくという方法です。先進主要国の気候変動対策に共通した特徴です。その中でも特に重点を置いているのは、アメリカ、欧州を見ても、インフラの脱炭素化、低炭素化です。すなわち、2050年、あと30年のスケールで見ても、インフラ自身は、今作ったものでも50年を超えて存在をするとすると、今作る、更新をするインフラを脱炭素のものにしていく方向です。今日のテーマの議論でもある交通、モビリティも一つの非常に重要なインフラの脱炭素化の重点となっております。

二つ目は、今の点にも関わりますが、カーボンニュートラルは気候変動対策なのですけれども、その対策は大きく脱炭素に向けて転換をする市場への対応を含め、産業の脱炭素化次世代化、それによる次世代の産業競争力強化の戦略でも重要です。

これは1点目と2点目が密接に関わっていると申し上げましたけれども、ご存知の通りグリーン成長戦略に、将来この大きな流れの中で産業構造や経済社会を次世代型に変革する産業制作として位置づけられております(図13)。まさに、自動車はその筆頭であり、足元から重点を置くべき成長分野として位置づけられております。

国も今、グリーン成長政策を始め、大きく動いております。エネルギー、住宅建築物、乗用車に関しても新車販売で電動車100%を、35年までに実現するという目標が掲げられております(図14)。

2030年目標と排出予測 (2021年7月末時点で提出のもの)



出典：UNFCCC 2021

図 11

主要国の気候変動政策の特質

- 新型コロナウイルス感染症で傷んだ経済社会の復興策・復興計画の中に気候変動対策、環境対策を統合。より持続可能な経済社会の再設計
 - インフラ(エネルギー、住宅・建築物、交通など)の脱炭素化に重点
- 産業の脱炭素化、次世代化。それによる産業競争力強化
 - Ex. グリーン成長戦略(2020年12月、2021年6月改定)
- 気候変動に対する考慮を企業経営に統合
 - 企業の情報開示の強化、金融機関の情報開示とリスク評価
 - サプライチェーン管理: traceability, 社会配慮(人権、労働者の権利など)、Scope 3の排出量(サプライチェーン、バリューチェーンからの排出量)
 - 炭素国境調整メカニズム(Carbon Border Adjustment Mechanism; CBAM)

図 12

グリーン成長戦略・14の重点分野

気候変動対策を、産業構造や経済社会をより持続可能なものに
変革、移行する(次世代化する)産業政策と位置づけ



図 13

2030年・2035年にめざす目標

- 2030年に電源構成の36-38%を再生可能エネルギーに
- 2030年までに1,000万kW、2040年までに浮体式も含む3,000万kW~4,500万kWの洋上風力の案件を形成
- 2030年に、新築される住宅・建築物についてはZEH・ZEB基準の水準の省エネ性能が確保されるとともに、新築戸建住宅の6割において太陽光発電設備が導入
- 2030年に少なくとも100の脱炭素先行地域
- 2035年までに、乗用車新車販売で電動車*100%を実現

*電気自動車、燃料電池自動車、プラグインハイブリッド自動車、ハイブリッド自動車

図 14

日本企業による2050年カーボンニュートラル目標

さて、2050年カーボンニュートラルの政策動向についてお話ししてきましたけれども、日本の自治体も大きく動いています。9月末の時点で、464の自治体、40の都道府県、人口だと1億1000万を超える数です。

東京都では、30年までに2000年比で50%削減というカーボンハーフ目標を都知事が表明をされておりまして、制作しているところです。その中でも30年にはガソリンを使わない新車の販売にしていこうという目標が入ってます(図17)。

企業の動きが大変加速しておりまして、政府や自治体以上の速度で、取り組みが進んでおります。これはパリ協定で言われる気温を2℃下回る、あるいは1.5℃までに抑えるという自社の目標を立てられる企業を、応援、推奨、認定するというScience Based Targetという取り組みです(図18)。

これは日本企業も130を超える企業が参加しておりまして、今日聴講している企業さまも入っているのではないかと思います。

このような国際的取り組みの他にも、ガスや電力といったエネルギー供給事業者、あるいは交通や輸送を担う鉄道、あるいは航空会社も、50年カーボンニュートラル目標を経営方針や中期計画の中に盛り込んでいます(図19, 20)。そして、ENEOSさんを始め、いわゆる石油やガスを採掘し、我々に提供して下さってきたエネルギー事業者さんも、エネオスさんでは40年、他のところでも50年カーボンニュートラル目標を掲げております。これらの企業ではいずれも、中長期的な戦略の中で自身のポートフォリオ、事業の内容を脱炭素そのものに変えていこうというそういう戦略を組み込んで今動いていらっしゃいます。

東京都の2030年目標(2021年)

- 世界経済フォーラムでの小池東京都知事の表明(2021年1月27日)
 - 2050年排出実質ゼロ(2019年)
 - 都内の温室効果ガスの排出量を2030年までに00年比で50%削減(現在30%削減)
 - 都内の使用電力に占める再生可能エネルギーの割合を30年までに50%に高める
 - 新車販売における非ガソリン車の割合を100%

図 17

Science Based Target (SBT) 科学に基づく目標設定

- CDP、国連グローバル・コンパクト、WRI、WWFによる共同イニシアチブ(SBTi)。世界の平均気温の上昇を「2度を十分に下回る」水準に抑えるために、企業に対して、科学的な知見と整合した削減目標を設定することを推奨し、認定
- 1878社が参加。うち目標が科学と整合(2℃目標に整合)と認定されている企業は934社。そのうち1.5度目標を設定する企業は846社(2021年10月1日現在)

▶ <https://sciencebasedtargets.org>

図 18

日本企業による 2050年カーボンニュートラル目標(1)

- 東京ガスグループ経営ビジョン「Compass 2030」(2019年11月)
 - 「CO2ネットゼロ」をリード
 - 再エネ、水素・メタネーション、CO2回収技術などによる
- JERA(2020年10月)
 - 2050年に国内外の事業から排出されるCO2を実質ゼロ
 - 再エネとグリーンな燃料の導入による
- 大阪ガス「Daigasグループカーボンニュートラルビジョン」(2021年1月)
 - 再エネや水素を利用したメタネーションなどによる都市ガス原料の脱炭素化
 - 再エネ導入を軸とした電源の脱炭素化
- すべての大手電力会社も同様の目標
- JR東日本「ゼロカーボンチャレンジ2050」(2020年5月)
 - 環境長期目標「ゼロカーボン・チャレンジ2050」を策定し、2050年度の鉄道事業におけるCO2排出量「実質ゼロ」に挑戦
 - 再エネで、2030年度までに東北エリアにおけるCO2排出量ゼロ
 - 2030年度までに鉄道事業の全使用量の約20%に相当する電力を、風力や太陽光による自家発電に(2021年3月)
- JALグループ(2020年6月)
 - 2050年度までにCO2排出量実質ゼロを目指す
- ANAホールディングス(2021年4月)
 - 2050年度までにグループの航空機の運航におけるCO2排出量実質ゼロを目指す
 - 運航以外の排出も実質ゼロ

図 19

日本企業による 2050年カーボンニュートラル目標(2)

- ENEOS(2020年6月)
 - 2040年長期ビジョンを策定し、「アジアを代表するエネルギー・素材企業」への成長、「低炭素・循環型社会への貢献」を掲げている
 - 具体的には、2030年に約1000万トンのCO2削減、2040年には自社排出分のカーボンニュートラルを目指す
 - 再生可能エネルギー、水素、CO2-EORなど
- 国際石油開発帝石(INPEX)(2021年1月)
 - 事業活動で排出するCO2を2050年に実質ゼロにする目標
 - 2030年の排出原単位を2019年比で30%低減
 - CCUS、水素など
- 出光興産(2021年1月)
 - 2050年に自社の事業活動からのCO2排出を実質的にゼロにする「カーボンニュートラル」を目指す(日経、2021年1月14日)

図 20

意欲的な30年目標を掲げるSBT企業例

さて、企業でも50年カーボンニュートラルがデフォルトの目標になっておりまして、特に大企業での大きな関心は、30年目標になっています(図21)。一つ一つを説明する時間はありませんが、日立製作所さまの例をご紹介します。非常に典型的、リーディングなケースだと思えます(図22)。

今年2月に環境事業戦略を立てておりまして、柱が三つあります。一つは自社のカーボンニュートラルを30年度までに、工場を含めて達成するというものです。

二つ目の柱は、50年度までにバリューチェーン全体でカーボンニュートラルです。日立製作所さまでは自社は30年度まで、原材料調達からお客さまがお使いになって捨てるまでのサプライチェーン、バリューチェーンの排出量、すなわち、お取引先さまの排出量であり、お客さまの排出量について、どこまで対象にするかという議論はありますが、日立製作所さまのケースでは、ゼロ、カーボンニュートラルにします。

すべての企業がカーボンニュートラルというチャレンジングな課題を抱えています。日立製作所さまは自社の事業でお客さまにソリューションを提供するということが、カーボンニュートラルに対する三つ目の戦略です。非常に先進的で、明確な方法です。

多くの企業がこのような方法で動いています。その例を示しますが、この場では二つだけをご紹介します(図23, 24)。

30年目標が宣言された後に、目標を表明した企業、三井住友フィナンシャルグループさま、三菱UFJフィナンシャルグループさまの二つのメガバンクさまです。先ほど、日立製作所さまと同様に、30年までの自社の温室効果ガスの排出を実質ゼロ、カーボンニュートラル目標を掲げております。さらに、50年までに自社グループの投融资ポートフォリオの温室効果ガスの排出を実質ゼロにするということです。これは、金融にとっての最も大きな割合を占めるScope3の排出量ですが、まさに金融機関が自社のScope3対応として、投融资のポートフォリオについて50年までに排出実質ゼロにするというものです。すなわち、投資、融資をする先の企業は排出量を把握し、減らしていき、最後は全体としてゼロにするということについて、金融機関が自ら目標を持っているということです。

二つ目です。日本の自動車メーカーさまは世界に先駆けて非常に高い目標を、以前から掲げていました。トヨタ自動車さまを例に挙げると、パリ協定が締結される前の2015年に、カーボンニュートラル目標を環境チャレンジとして自ら発表されています。それを、6月に50年目標を35年目標に前倒しました。私は以前、名古屋大学におりましたの

意欲的な30年目標を掲げるSBT企業例

	2030年目標		2030年目標
コニカミノルタ	2005年比60%削減	味の素	2018年比50%削減
富士フイルムホールディングス	2013年比45%削減	富士通	2013年比71%削減
積水ハウス	2013年比50%削減	NTTデータ	2016年比60%削減
アスクル	2030年カーボンニュートラル(100%削減)	日立製作所	2030年カーボンニュートラル(100%削減)
野村総合研究所	2013年比72%削減	キリンホールディングス	2019年比50%削減
アサヒグループホールディングス	2019年比50%削減	YKK AP	2013年比50%削減
日立建機	2010年比45%削減	NTTドコモ	2018年比50%削減
小野薬品工業	2017年比55%削減	ソニー	(2035年目標) 2018年比72%削減
丸井グループ	2016年比80%削減	武田薬品工業	(2025年目標) 2016年比40%削減 2040年カーボンニュートラル
ソフトバンク	(2030/2031年目標) 2019/2020年比82.8%削減	YKK	2018年比50%削減
ジェネックス	2017年比55%削減	日本電気(NEC)	(2030/2031年目標) 2017/2018年比55%削減
リコー	2015年比63%削減	塩野義製薬	(2030/2031年目標) 2019/2020年比46.2%削減
コマニー	2018年比50%削減	東急不動産	2019年比46%削減

図 21

日立製作所の環境戦略

- 2021年2月25日:「環境」に関する事業戦略発表
http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2021/02/0225/20210225_01_env_presentation_ja.pdf
- 「CO2排出量削減が日立の追い風になる」
- 日立のコミットメント:2030年度カーボンニュートラル達成
- 日立は2030年度までに事業所(ファクトリー・オフィス)においてカーボンニュートラルを実現
- 2050年に向けた日立のCO2排出削減への貢献
- 2050年度までにバリューチェーン全体でカーボンニュートラル(2021年9月13日)
- 社会イノベーションを通じ、2050年カーボンニュートラルの実現に貢献
 - カーボンフリーインダストリーの実現
 - スコープ1, 2に対応する脱炭素ソリューションの提供により、お客さまはリソースを重要課題に集中できる

図 22

2030年目標宣言後の目標表明(1)

ファミリーマート(4月23日)	2030年の店舗運営における温室効果ガス(CO2)排出量を2013年比50%削減
TOTO(4月28日)	2040年までに全世界のTOTOグループで使用する電力100%再生可能エネルギー
京西日本グループ(4月30日)	2030年度にCO2排出量2013年度比46%削減
SCSK(4月28日)	2030年度までに2019年度比47%削減、2050年度までに排出量を100%削減 Scope3の排出量について2030年度までに2019年度比28%削減
オアシス(5月6日)	2030年までにオアシスグループの事業所から排出されるCO2排出量を実質ゼロ
エーザイ(5月11日)	2040年までにグループ全体のCO2の排出量「カーボンニュートラル」 2030年までに再生可能エネルギー使用率100%
ソフトバンク(5月11日)	2030年までに事業活動で使用する電力などに由来する温室効果ガスの排出量を実質ゼロ
三井住友フィナンシャルグループ(5月12日)	2030年までに自社の温室効果ガス(GHG)排出量を実質ゼロ 2050年までに投融资ポートフォリオのGHG排出量を実質ゼロ 2020-2040年までのグリーンファイナンス、サステナビリティを資するファイナンス実行額を30兆円に上方修正、石炭火力発電新設・拡張案件への支援を行わない
アズビル(5月14日)	事業活動に伴う温室効果ガス(GHG)排出量を2030年度に2013年度比60%削減
リクルートホールディングス(5月17日)	2021年度中にグループの事業活動においてカーボンニュートラル 2030年度までに、バリューチェーン全体で温室効果ガス排出量のカーボンニュートラル
三菱UFJフィナンシャルグループ(5月17日)	2030年までに自社の温室効果ガス(GHG)排出量を実質ゼロ 2050年までに投融资ポートフォリオのGHG排出量を実質ゼロ
花王(5月19日)	事業活動に伴い排出されるCO2を2040年度までにゼロ、2050年までにネットゼロ 2030年までにCO2排出量50%削減、使用電力を2018年までに100%再生エネルギー化
パナソニック(5月27日)	2030年に事業活動に伴う二酸化炭素(CO2)排出量を実質ゼロ
東京海上ホールディングス(5月28日)	2050年カーボンニュートラル、2030年度までに温室効果ガス(CO2)60%削減 グループ全体で再生可能エネルギー使用率を2030年度までに100%高水準
ダイキン(6月7日)	2019年を基準年として設定した対策のまま事業成長した場合の排出量と比べ(成り行き比)、GHG実質排出量を2025年に30%以上、2030年に50%以上の削減
トヨタ自動車(6月31日)	2035年二酸化炭素の排出量を実質ゼロにするカーボンニュートラルを実現

図 23

2030年目標宣言後の目標表明(2)

DIC(6月18日)	2030年度2013年度比50%削減
住友生命保険(6月28日)	2030年度資産ポートフォリオ排出量(保有資産あたりのGHG排出量)2019年度比42%削減
オカムラ(6月29日)	2030年度2020年度比50%削減
朝日生命保険相互会社(7月5日)	自社のCO2排出量を、2013年度比で、2030年度50%削減、2050年度に100%削減 Scope3のCO2排出量を、2013年度比で、2030年度40%削減、2050年度に100%削減 投資先のCO2排出量を、2019年度比で、2030年度に50%削減、2050年度に100%削減
豊田通商(7月8日)	2030年にGHG排出量を2018年比で50%削減
イオン(7月8日)	店舗で使用するCO2等を2040年を目途に削減でゼロにする、2030年までに、日本国内の店舗で使用する電力の90%を再生可能エネルギーに切り替える
参天製薬(7月9日)	2019年比で、2030年にCO2排出量50%削減
EY Japan(7月9日)	2025年までにネットゼロを実現、2025年までにサービス提供時の出張移動及び社内出張移動にCO2排出量を削減
セコムグループ(7月16日)	2045年までに排出ゼロ、2030年度までに2018年度比で45%削減
東邦銀行(7月16日)	2030年度のCO2排出量を50%削減
ヤマハ発動機(7月19日)	2030年に2010年比CO2排出量を50%削減、2050年までに事業活動を含む製品ライフサイクル全体のカーボンニュートラルを目指す
日本取引所グループ(JPXグループ)(7月28日)	2024年度までにグループ全体で消費する電力の100%を再生エネルギーに切り替え、カーボンニュートラル達成
横河電機グループ(7月30日)	グループ全体の温室効果ガス(GHG)について2040年カーボンニュートラルを目指す
東北電力グループ(7月30日)	2013年度比でCO2を50%削減
大和ハウス工業(8月2日)	温室効果ガス(GHG)排出量について、2030年度50%削減(2015年度比)、2050年度ネットゼロを目指す

図 24

で、中部の企業さまとお話しする機会が多かったのですが、協力してどのようにサプライチェーン、バリューチェーンの排出を下げていくかという取り組みを進めており、非常に熱心に、企業同士で協力して進めています。

なぜ秘境はカーボンニュートラルに動くのか

さて、こちらはラップアップでございます。なぜ、企業がカーボンニュートラルに動いているのか(図 25)。これは気候変動の影響もさることながら、今まさにどういふ企業に担ってもらおうかというときに、排出が削減できる、あるいは気候変動対応をしっかりとできるかどうか、企業のサプライチェーンの担い手としての企業価値を左右するという状況になってきているということです。

そして、もう一つは、先ほどメガバンクの話しましたが、メガバンクだけでなく、大きな投資家でもある保険会社さまなどです。いわゆる金融支援や融資において、企業に対して資金を提供するかどうかという判断において、気候変動対応ができていくかどうか、企業が企業価値を左右するということです。さらにもう一つ申し上げますと、サプライチェーンにおけるということなのですが、先ほど欧州の国境炭素税の話をしてきましたが、製品そのものの製造過程での排出を減らせるかどうかということが、まさに製品の市場での競争力を左右するようになっていきます。これはまさにサプライチェーンにおけるということに繋がってくる問題です。

先ほどいくつかの日本企業の話をしてきましたが、Microsoft では今年から、自社のサプライヤーに対して、Scope1, 2, すなわち、サプライヤー自身の排出量だけでなく、サプライヤーの Scope3 の排出量も報告してもらい、それを元に取り引き先を選定することを始めています(図 26)。

Apple さまは以前から有名ですが、自社の製品のサプライチェーンは再エネ 100%で作るようにサプライヤーにお願いをして、日本では 9 社が 30 年までに実現するということをコミットしています(図 27)。

実はものづくり企業さんからの日本のエネルギーの脱炭素化、低炭素化の声がこのような動きに伴って非常に大きくなっていると思います。こちらはファイナンシャルタイムズに取り上げられたソニーさまの例です(図 28)。

なぜ企業はカーボンニュートラルに動くのか

- 現実化する気候変動の悪影響とリスク
- 企業にとって、気候変動問題は、**金融市場における企業価値、サプライチェーンにおける企業価値を左右する本業の問題**となった
 - サプライチェーンの脱炭素化/再エネ利用の要請
 - Microsoft
 - Apple
 - 金融、資本市場での評価
- **需要家の選好(ニーズ)/市場の変化**
- **環境問題、エネルギー問題であるとともに、産業の競争力の問題に**

図 25

MicrosoftのClimate Moonshot (2020年1月)

- Carbon negative by 2030 (2030年までに炭素排出マイナス)
- Remove our historical carbon emission by 2050 (2050年までに、1975年の創業以来排出したすべての炭素を環境中から取り除く)
- \$1 billion climate innovation fund (10億米ドルの気候イノベーション基金)
- Scope 3 の排出量(サプライチェーン、バリューチェーンからの排出量)削減に焦点
 - 2030年までにScope 3の排出量を半分に削減
 - サプライヤーにScope 1, 2(自社事業からの排出量)だけでなくScope 3の排出量を提示を求め、それを基に取引先を決定



<https://blogs.microsoft.com/blog/2020/01/16/microsoft-will-be-carbon-negative-by-2030/>

図 26

Appleの2030年目標 (2020年7月)

- 2030年までに、そのすべての事業、製品のサプライチェーン、製品のライフサイクルからの排出量を正味ゼロにする目標と計画を発表
- すでに自社使用の電気はすべて再エネ100%を達成。日本企業を含む、24ヶ国110を超えるサプライヤーがApple製品製造を100%再エネで行うことを約束
- 2020年目標: サプライヤーで、新規で4GWのクリーンエネルギーを増やす。2019年までに8GWの新規導入/導入契約
- 日本企業では、デクセルアルズ、恵和、日本電産、日東電工、セイコーアドバンス、ソニーセミコンダクタソリューションズ、太陽ホールディングス、ツジテン、村田製作所(2021年3月時点)



<https://www.apple.com/newsroom/2020/07/apple-commits-to-be-100-percent-carbon-neutral-for-its-supply-chain-and-products-by-2030/>

図 27

“Sony warns it could move factories over Japanese energy policy”



- Sony warns it could move factories over Japanese energy policy (Financial Times, 27 Nov. 2020)
 - “So they told me either we do something about renewables or they have to move out of Japan.” (Minister Kono)

<https://www.ft.com/content/bbd59494-ac64-4dda-8da5-a2990d8936d3>
 ※規制改革推進会議第4回 再生可能エネルギー等に関する規制等の総点検タスクフォース (2021年2月3日)
 Sony 神戸専務の報告
https://www.youtube.com/channel/UC06V_R0thwIbHcmTicWfNLA 57分あたりから

図 28

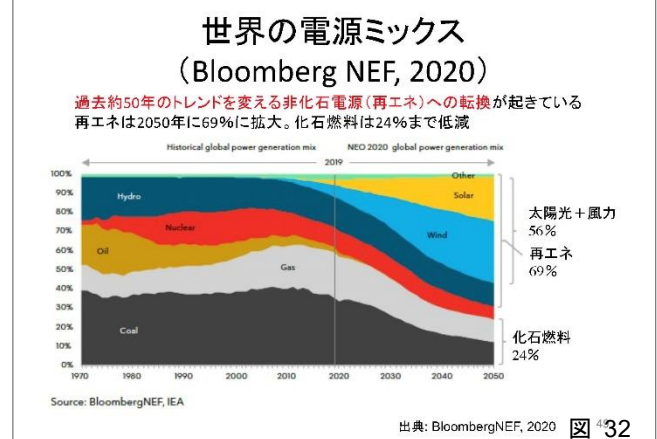
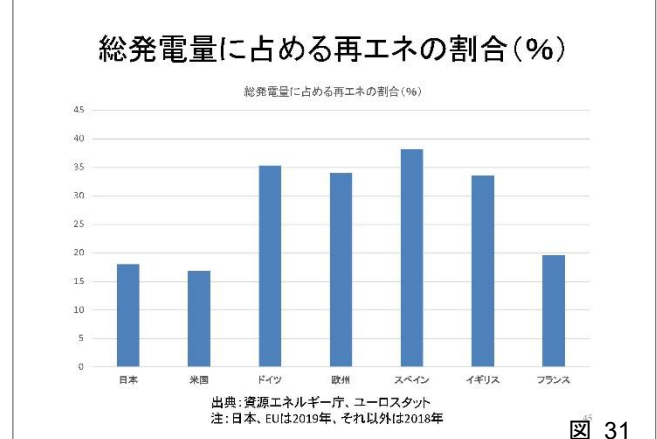
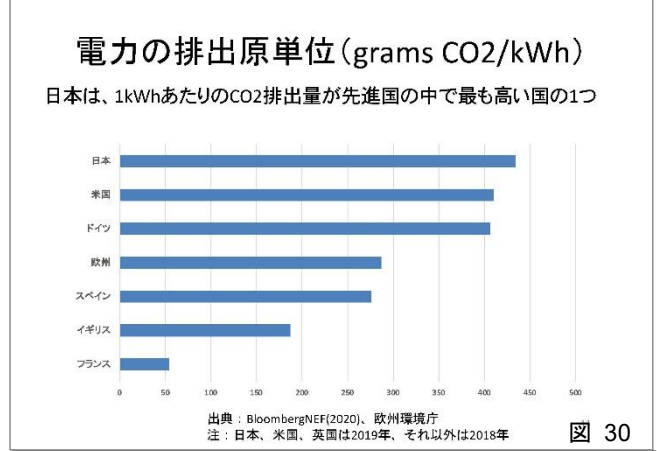
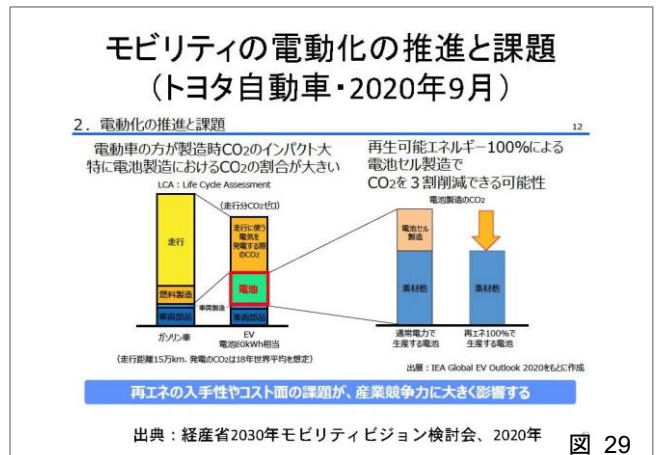
トヨタ自動車さまが、昨年の決算書の検討会でご報告されたときの資料をお借りしています(図29)。電動化の中で、走行時は排出は減るかもしれませんが、電動化対応において、製品の製造過程でのライフサイクルの使用率をいかに減らせるかという観点で、まさに日本の場合は、再エネの入手可能性やコストの課題、エネルギー政策やエネルギーシステムが対応しないと、産業競争力に大きく影響するというプレゼンテーションをしています。このような声が、今回の第6次エネルギー基本計画の脱炭素に政策をシフトする結果に導いていると思っております。

エネルギー大転換

このような懸念が当たっていると思うのは、日本の電力の排出原単位一つをとってみても、1 kWhあたりのCO₂排出量が先進申告の中で最も高い国の一つになっているからです(図30)。

あるいは再エネの供給量を見ても、他の先進国、特に欧州と比べると、まだかなり低い水準です。その意味ではエネルギーの脱炭素化、低炭素化が、日本のものづくり、製造業にとって非常に重要なものになっていると思えます(図31)。

これまでにお話をしてまりました政策の動きというのが一過性のものか、と聞かれることがあります。私はそうは思っていません。なぜなら、この政策の動きが技術に裏打ちされてるからです。例えば、皆さん耳にされると思いますが、電力分野では大きな再エネシフトが起きています。ここ4、50年、再生可能エネルギーが世界の電流発電量の2割、残りの8割が非再エネというように続いてきました(図32)。しかし、2010年を超える頃から急速に再エネ転換が起こりました。見通しでは、今後も再エネ転換は大きくなっていくという見通しです。これが技術によると申し上げたのは、普及をする政策とともにですけれども、再生可能エネルギーの技術のコストが下がってきているというのが最も大きな要因です。



こちらは太陽光モジュール、陸上風力、リチウムイオン電池がいかにか、ここ10年で下がってきたかというのを表しております。しかも、急速に起きているというのがひとつの特徴です(図33)。

発電コストひとつをとっても、14年の段階で新設の発電所では化石燃料が一番安かったのが、わずか4、5年の間に圧倒的な世界の地域で再生可能エネルギーの方が一番安い新設の発電源になっているということになります(図34)。

電力分野変革のイノベーション

さて、こうした動きの中で、再エネへの転換が電力分野で進んでいますが、一つ重要なのは、大きな目で最終的に私たちが使うエネルギー消費全体から見ると、世界で見ても電気は今の時点で2割です(図35)。日本に関していうと1/4、残りは例えば熱の需要であり、交通分野の需要です。もちろん電化は、再生可能エネルギーの価格が下がった中では非常に重要で有力なオプションですが、同時に、電気による対応が不可能なものに対してどのように脱炭素化を進めるのかが、世界共通の課題であります。水素も含めて、ここにソリューションを提供できるような技術を生み出すことができれば、非常に大きな市場機会を得ることになります。

モビリティ分野の変化については、みなさんにご説明するまでもないと思います。2013年あたりから自動車の電動化が進んでいます(図36)。

特にコロナの中で、新車販売を見ると、需要は落ちても欧州、中国、北米において電動者の販売量が拡大していることが分かっております。

再エネ機器コストの低下



図 33

エネルギーの大転換

■ 2014年は化石燃料の発電所が一番安い国が多かったが、2020年前半には、世界人口の少なくとも2/3を占める国にとっては太陽光と風力が最も安い。これらの国は、世界のGDPの71%、エネルギー生産の85%を占める。

2014年の世界：化石燃料の発電所が一番安い
2020年前半の世界：世界人口の少なくとも2/3を占める国では再エネが最も安い

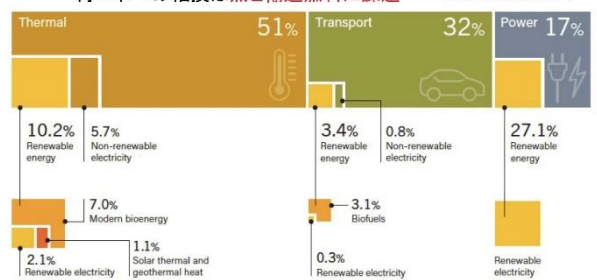


図 34

最終エネルギー消費に占める再生可能エネルギー(2018) Renewable Energy in TFC by Sector

電気は世界のエネルギー消費の約5分の1
再エネへの転換は熱と輸送燃料に課題

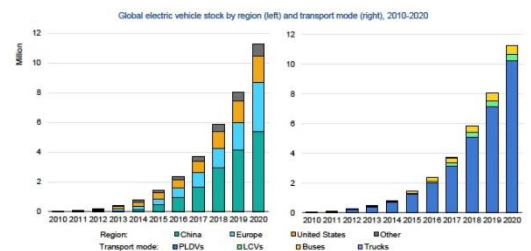
出典：REN21, 2021年



Note: Data should not be compared with previous years because of revisions due to improved or adjusted methodology. Source: Based on IEA data. See endnote 61 for this chapter.

図 35

電動自動車のストック



Notes: PLDVs = passenger light-duty vehicles, LCVs = light-commercial vehicles. Electric vehicles include battery electric and plug-in hybrid electric vehicles. Europe includes EU27, Norway, Iceland, Switzerland and United Kingdom. Other includes Australia, Brazil, Canada, Chile, India, Japan, Korea, Malaysia, Mexico, New Zealand, South Africa and Thailand. Sources: IEA analysis based on country submissions, complemented by ACEA (2021), CAAM (2021), EAFU (2021), EV Volumes (2021) and Maritime (2021).

出典：IEA, 2021

図 36

電力分野モビリティを越えて、このような分散型エネルギーリソースをうまく組み合わせたエネルギーシステムに変換していくことが、再エネのコスト低下の中で、脱炭素のニーズに対応する一つの電力システムの転換像として、考えられるわけですが、特にモビリティはこうした電力分野の中で自然に変動する電源が増えてくる中で、その調整をする役割として、調整ができるエネルギーリソースとしての期待も高くなっています（図 37）。

「変化」の中にいるという認識

本日、ご紹介したお話をあえてもう一度申し上げると、私たちはおそらく、ここ半世紀なかったかつてない変化の中にいるという認識が非常に重要だと思っています（図 38）。これは、気候変動の観点からもそうですが、カーボンニュートラルに向かう動きもそうです。しかし、これまで大きな役割を果たしていた技術が、例えば電力分野の技術、あるいはモビリティの技術が大きく転換をするタイミングになってきています。しかも、それが感染症の影響で社会の価値観がよりグリーンな方向に転換する後押しをしています。そのような方向で政策が打たれると、特に企業にとって脱炭素、カーボンニュートラルというものが、もはや環境問題の次元を超えた本業の経営の問題になってきています。

是非みなさまにお伝えをしたいことは、このような変化を見据えた戦略を持っていただきたいということです。大変僥越でございますが、予期しない変化に合わせて突然対応しなければいけないというのが、企業にとっても社会にとっても、色々な痛みを伴うからです。

企業に対することで一つご紹介しようと思います。これはキヤノンさまとコダックさまの株価の推移です（図 39）。縦軸が log ベースですから、申し訳ありませんが、いかにコダックさまの株価が落ちたかが分かるわけですが、これは金融機関 HSBC がつくったものです。社会の大きな変化であるデジタル化に対応できたキヤノンさまと、上手く対応できなかったコダックさま、したがって、金融機関はスムーズな企業の移行のために、脱炭素に向けての対応を働きます。まず、金融機関が立場を説明をするということを表す資料です。しかし、もう一つ重要な点は、クリステンセンというアメリカの経営学者が提唱したイノベーターのジレンマという仮説がございます。これまでの市場で、大きな技術力を持った企業が、新しいそれまでとは違う技術市場が出てきたときに、得てして対応が遅れる可能性があるというものです。つまり、その企業は市場に対して優位を持っていて稼げている企業です。しかし、新しい変化市場が出てきたときに、技術力があるが故に、その次の対応が遅れるという仮説を示すための例としても使われます。

電力分野変革のイノベーション

3つのD: Decarbonization, Decentralization and Digitalization
デジタル化、自動化など、セクターを超えたダイナミックな技術革新(イノベーション)の進行

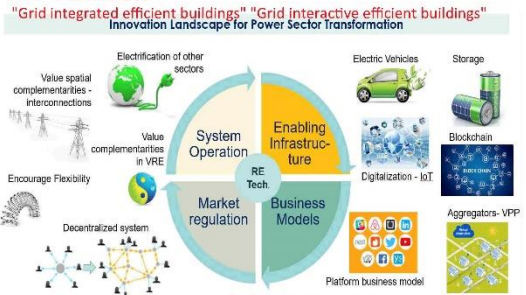


図 37

「変化」の中にいるという認識

- 私たちはかつてない「変化」の中にいる
 - 気候変動への(特に若者の)危機感
 - “現在の社会の延長線上に私たちがめざす未来はない”
 - これからの10年が決定的に重要。「Decisive Decade」
 - 2050年カーボンニュートラルに向かう世界
 - これまでにないエネルギーの大転換や技術の変化
 - 脱炭素社会、持続可能な社会への可能性を開く技術の革新。産業構造、社会構造の転換の喚動
 - 感染症の影響: 価値観の変化。「生命」「健康」「環境」の価値。「One health」「Planetary health」。より分散型の社会システムへの指向など
 - パリ協定後の気候変動問題はもはや単なる環境問題ではない。変わる企業、政府の認識
 - 企業にとって、金融市場における企業価値、サプライチェーンにおける企業価値を左右する本業の問題であり、取締役会の問題

図 38

キヤノン vs コダック

「イノベーターのジレンマ (The Innovator's Dilemma)」

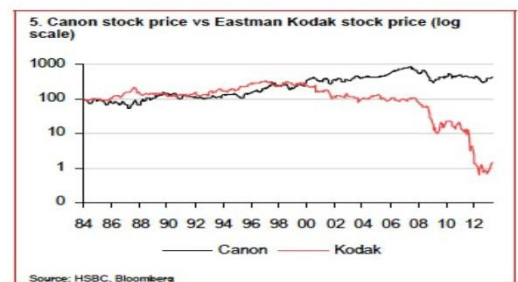


図 39

その意味で、気候変動を使って将来の社会像の変化を、上手く企業の経営事業の中に組み入れていただきたいと思います(図40)。本日お話ししてきたように、気候変動対策として単に脱炭素環境対策ということではなく、コストが安くなった再生可能エネルギーを上手く使うことでのエネルギーコストの低下、あるいは日本にとってはエネルギー自給率を上げるという点でもそうですが、モビリティ自動車メーカーさまからのメッセージを送って頂いているものとして、レジリエンスの強化という点もあります。

分散型のエネルギーリソースは災害時のエネルギーを自律的に供給し、サポートするエネルギーリソースとしてモビリティ、自動車が果たす役割も大きいと思っています(図41)。

おわりに

最後ですが、本日は大きなお話をいたしました。ぜひ、みなさまのところで、このような脱炭素の取り組みを進めていただきたいと思います。このような取り組み、特に日本の自動車の分野の取り組みを見たときに、脱炭素化の技術力がないわけではないということは、こちらは日経さまのデータですが、EV電動化に対する強い影響力のある特許を企業ごとに整理しても、日本の企業の技術力の強さが見て取れます(図42)。

しかし、おそらく課題の一つは、日本の場合、こうした技術力が実際のサービス化、製品化になかなか上手く結びついていないのではないかと問題意識です。こちらはADB UNIDOなどが協力して作ったものですが、特許数は非常に多いが、商業化に課題があると複数の分析で示されております(図43)。

商業化に繋げるためには、その技術力を実際に実証していくような政策をとっていくことが必要で、この点については是非みなさまと一緒に考えていければと思っています。

気候変動からの視角

- 「変化」を見据えた、意志をもった「変革(transformation)」と「移行(transition)」
 - スムーズな移行の重要性
 - 「イノベーターのデレンマ」(by Clayton M. Christensen)
 - "Climate change is the 'Tragedy of the Horizon.'" (by Mark Carney, September 2015)
 - ①ビジネスサイクル、②政策決定のサイクル、③専門家・実務家、の時間的視野の制約
 - 気候変動の考慮の統合は、企業の経営・事業に中長期的視角をもたらす
- 2つの時間軸で気候変動対策を考える
 - ①今ある技術を最大限利用した足下からの排出削減
 - ②2050年カーボンニュートラルと整合的な長期的な移行(トランジション)
 - 特に、2050年にも残るインフラ(例えば、発電所や住宅・建築物、交通インフラなど)については「今」の決定が将来を決める。 stranded assets(沈没資産)のリスク
 - 2030年のマイルストーン(中間目標)
- 気候変動対策は「コスト」か?—気候変動対策がもたらすベネフィット
 - エネルギーコスト、エネルギー安全保障、レジリエンス、雇用など
- 気候変動からいちと財産をまもる。お客様のビジネスを支え、企業価値を高める。地域のレジリエンスと価値を高める

図 40

レジリエンス強化：むつざわスマートウェルネスタウン

- 再エネと調整力(コシネ)を組み合わせたエネルギーの面的利用システムを構築することで、災害時の早期復旧に大きく貢献。
- 千葉県睦沢町では、防災拠点である道の駅を近隣住民に開放し、トイレや温水シャワーを提供、800人以上の住民が利用。

「再エネと調整力(コシネ)を組み合わせたエネルギーの面的利用システムを構築することで、災害時の早期復旧に大きく貢献。」

千葉県睦沢町の防災拠点

台風時の停電被害に役

温水シャワー無料提供も

「再エネと調整力(コシネ)を組み合わせたエネルギーの面的利用システムを構築することで、災害時の早期復旧に大きく貢献。」

出典：資源エネルギー庁、2020年

図 41

EVの特許競争力ランキング (日経・パテントリザルト共同調査)

EV技術で日本企業は優位。米国出願特許分析。特許の重要度をスコア化

順位	企業名	特許競争力 (ポイント)	順位	企業名	特許競争力 (ポイント)
1	トヨタ自動車(日)	8363	12	ポッシュ(独)	1285
2	フォード・モーター(米)	6564	13	ゼネラル・エレクトリック(米)	1253
3	ホンダ(日)	3849	14	パナソニック(日)	1250
4	ゼネラル・モーターズ(米)	3283	15	マサチューセッツ工科大学(米)	1192
5	デンソー(日)	2581	16	CP5テクノロジーホールディングス(米)	1184
6	日産自動車(日)	1950	17	日立製作所(日)	1095
7	ワイルディン(米)	1749	18	三菱電機(日)	1041
8	テスラ(米)	1741	19	エマーシングオートモティブ(米)	951
9	日立アステモ(日)	1709	20	起亜自動車(韓)	911
10	現代自動車(韓)	1694	21	村田製作所(日)	839
11	LG化学(韓)	1421	22	矢崎総業(日)	788

出典：2021年9月2日付日本経済新聞

図 42

国境を越えた商標出願と特許出願 (2002年-2013年)

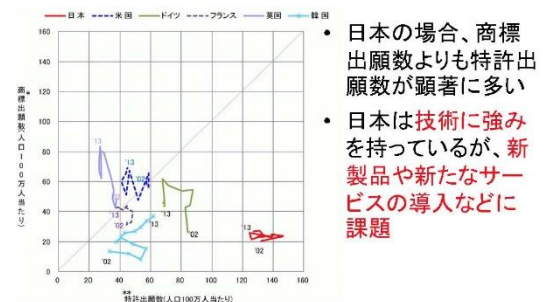


図 43

基調講演①^{*1}

自動車技術によるカーボンニュートラルの将来可能性について

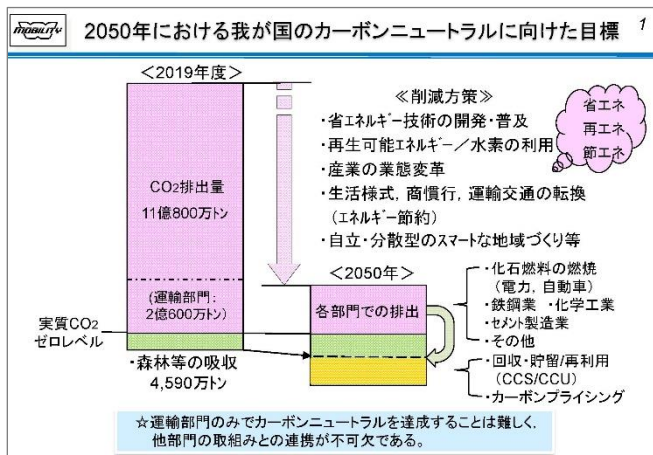
大聖 泰弘^{*2}

Yasuhiro DAISYOU

本講演では、運輸、とりわけ自動車技術の分野に焦点を当てて、カーボンニュートラルの達成の将来可能性についてお話ししたいと思います。

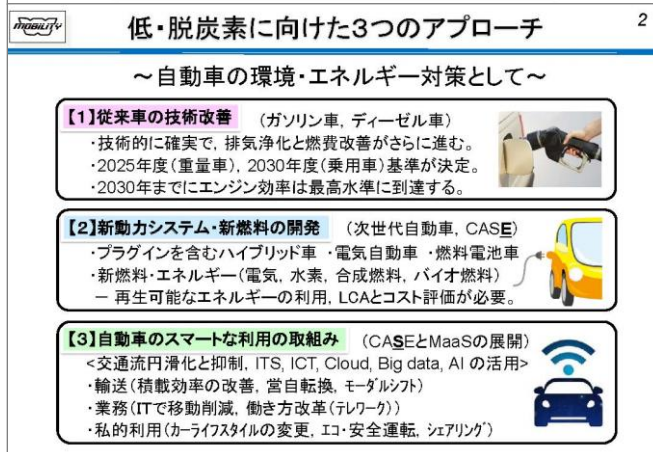
1. 2050年における我が国のカーボンニュートラルに向けた目標

カーボンニュートラルと言っておりますが、2050年に達成しようとしても、どうしても化石燃料の燃焼をゼロにすることはできませんし、分野によっては排出してしまい、どうしてもプラスの部分が残ってしまうので、ニュートラルにするためには同等のネガティブなCO₂によって、ゼロに持っていく必要があります。中身としてはCO₂の回収や貯留、再利用を行う、あるいはカーボンプライシングという手法もあると思います。そのようなことを同時に進めていかなければいけません。したがって、運輸部門だけでカーボンニュートラルを達成するという事は、非常に難しい状況なので、他の部門での取り組みとの連携が不可欠だと考えています。そのため、省エネや再生エネルギーに加えて節エネといったさまざまな方策を進めていく必要があります。



2. 低・脱炭素に向けた3つのアプローチ

自動車の環境エネルギー対策では、これまで従来車を中心に、さまざまな排出ガス対策や燃費の改善を行ってきましたが、2030年には既にエンジンの効率はほぼ最高レベルに達して飽和状態になると予測されます。そのため、どのようにエンジンを使うかが、一つの大きな課題になると思います。スライド中の2に示すように、新動力システムと新燃料の開発が同時に行われています。次世代自動車や新エネルギー、新燃料を活用しながら、従来車に勝る性能を引き出すということが求められています。次世代自動車としては、プラグインハイブリッド(PHEV)や電気自動



*1 「JARIシンポジウム2021 カーボンニュートラルへの挑戦～自動車による貢献と実現に向けて～」(2021年10月8日)の講演より原稿化

*2 早稲田大学 名誉教授

* 2022年9月9日受理

車（BEV），燃料電池自動車（FCV）も含まれます。エネルギーの面では、電気、水素、合成燃料、バイオ燃料などが挙げられます。さらに、これらの自動車単体、あるいは燃料単体の技術革新と同時に、車の利用のあり方も見直す必要があります。情報通信技術を活用しながら、スマートな利用の取り組みを進めていかなければなりません。物の運搬や、仕事での利用、プライベートユースもありますが、このような利用に対してもさまざまな取り組みが展開されると考えています。本日はこの順番でお話を進めます。

3. わが国における2019年の運輸部門のCO₂排出量

運輸部門では、日本全体の約19%のCO₂を排出しており、その内9割近くが自動車からの排出です。また、石油の半分は自動車に使われている状況です。

4. わが国のパリ協定への対応

そこで、パリ協定に対応したわが国の各部門における排出量の削減が示されていますが、今年4月に菅前首相の発言を受けて大幅に強化されています。運輸部門では2030年度に向けて28%削減から38%削減に強化されましたが、これは厳しい目標であると考えています。

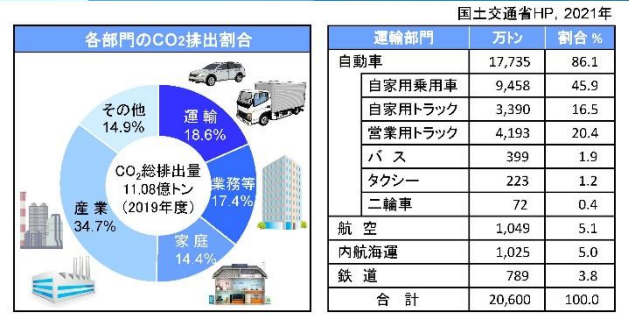
5. 運輸部門の2030年度におけるCO₂削減見込み量

スライド中の赤線に示すように、2050年に向けて大幅なCO₂の削減が求められています。次世代車の普及や、燃費の改善、交通流対策、モーダルシフトなどが挙げられますが、それらを組み合わせることで目標の達成を目指す必要があります。

6. 乗用車・軽量車の燃費基準の国別比較

そのため、各国では燃費基準の強化を進めています。スライドに示すように、日本をはじめEU、中国などでは年率4%から5%に相当する燃費基準の強化が行われようとしています。これらの数字を頭の隅に置いていただければと思います。

わが国における2019年度の運輸部門のCO₂排出量



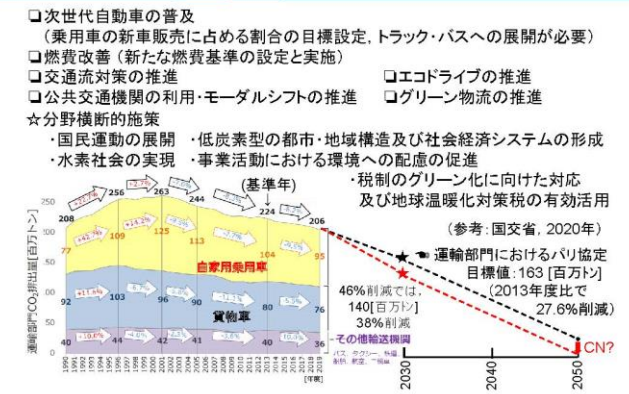
わが国の自動車から排出されるCO₂は全体の排出量の16.0%を占めている。
 自動車用燃料需要(原油比): ガソリン = 5,063万kl (28.8%), 軽油 = 4,391万kl (23.2%)
 石油の約50%が自動車で消費されている。(2019年) (資源・エネルギー統計)

わが国のパリ協定への対応

《2030年度におけるエネルギー起源二酸化炭素削減量》
 わが国の温室効果ガス排出量の9割を占めるエネルギー起源の排出削減量は、2013年度比25%削減(全体では26%削減)の水準(約9億2,700万t-CO₂)で、各部門における2030年度の排出量の目安は下表のとおり。(2016年5月「地球温暖化対策計画」として閣議決定された。)
 その後、2050年に温室効果ガスの排出量を実質ゼロにするとの2020年10月の首相の表明、さらに全体26%から46%に削減を強化する2021年4月の発言を受けて、すべての部門において大幅な削減強化案が提示された。

部門	2013年度	2030年度目標値 / 削減割合(⇒強化案)
産業	429	401 / 6.5 (⇒ 270 / 37)
業務・その他	279	168 / 39.8 (⇒ 140 / 50)
家庭	201	122 / 39.3 (⇒ 68 / 66)
運輸	225	163 / 27.6 (⇒ 140 / 38)
エネルギー転換	101	73 / 27.7 (⇒ 52 / 42)
合計	1,235	927 / 24.9 (⇒ 670 / 46)

わが国の運輸部門におけるCO₂の排出量と対策



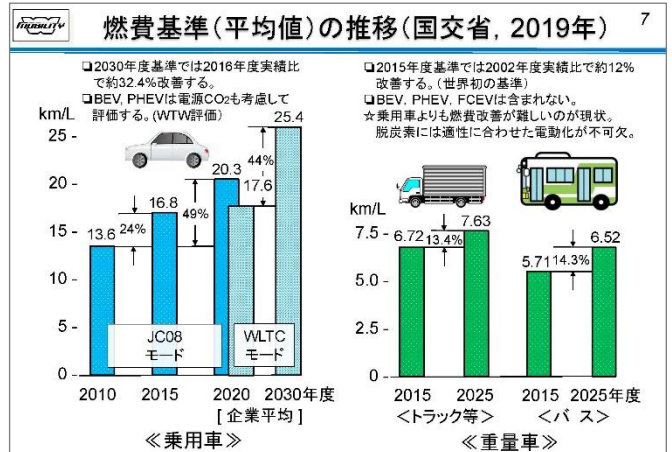
乗用車・軽量車の燃費基準の国別比較

国	実施年	km/L	L/100 km	CO ₂ g/km	燃費改善率 %/年
日本 ¹⁾	2020	21.1 (17.6)	4.74 (5.68)	106 (132)	4.4
	2030	30.4 (25.4)	3.29 (3.93)	73.5 (91.5)	
EU ²⁾	2021	24.2	4.13	95.0	4.8
	2025	27.4	3.65	81.0	
	2030	34.7	2.88	59.0	
米国	2019	17.8	5.62	128	2.0
	2026	20.3	4.92	157	
中国	2020	19.8	5.05	117	5.3
	2025	25.0	4.00	93.4	
インド	2018	19.6	5.05	122	1.8
	2022	21.0	4.76	113	

1) ()内の値は国際基準調和モードWLTCを採用した値
 2) 2030年に2021年比でCO₂を37.5%の大幅な低減(50%減の提案)
 ・NEDC: New European Driving Cycle
 ・ICCT: The International Council on Clean Transportation

7. 燃費基準（平均値）の推移（国交省、2019年）

温暖化対策や省エネの立場から、燃費基準の強化が進められています。とりわけ2020年度から2030年度に向けて燃費基準は大幅に強化されています。この10年の間に約44%の改善が行われるということで、先ほどの数字がそれに該当します。乗用車ではこのような改善は可能ですが、トラック、バスのように効率の良いディーゼルエンジンを使っている車に対しては、燃費改善が進まないという悩ましさがあります。また、電動化は技術とコストの両面で難しく、普及が遅れているというのが現状です。



8. 内閣府・JSTのSIP「革新的燃焼技術」

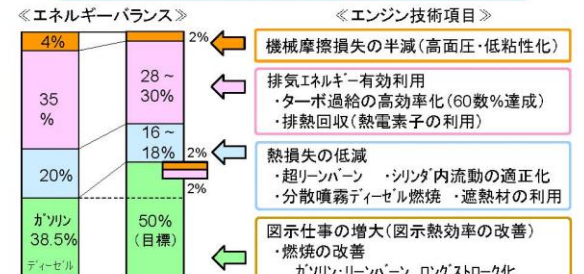
（2014～18年度）

そこで、2014年度から18年度の5年間で内閣府の大型予算を得て、革新的燃焼技術のプロジェクトが実施されました。これによって、企業との連携も図りながら、従来では約40%だったエンジンの正味熱効率を50%にまで高めることができました。この結果は一つの究極的な到達点だと考えており、この技術の実用化については、今後は企業の手任せられることになりました。このような高効率のエンジンをハイブリッドやPHEVで使うことで燃費が20%から30%改善すると期待されます。

内閣府・JSTのSIP「革新的燃焼技術」(2014～18年度)

～乗用車用エンジンにおける究極の目標、正味熱効率50%を達成～

★2020年から2030年における実用化を目指し、今後の従来車やHEV、PHEVの20～30%の燃費改善にも寄与する。



9. ゼロエミッション モビリティ パワースource 研究 コンソーシアム

そのような成果をもとに現在、ゼロエミッション モビリティ パワースource 研究 コンソーシアムが組織され、この中には企業や日本自動車研究所の研究者の方々にもご参画、ご協力をいただいています。将来の動力システムをゼロエミッションにすることが目標であり、大学からは130名の研究者が参加しています。将来の予算の獲得も含めて進めています。

ZEM Zero Emission Mobility Power Source Research Consortium

【ゼロエミッションモビリティパワースource研究コンソーシアム】

参加企業: TOYOTA, NISSAN, HONDA, MAZDA, SUBARU, SUZUKI, ISUZU, AIST, JARI, DAIHATSU

【目的・設立趣旨(2020年4月)】
 SIP「革新燃焼」の成果を受け、エンジンシステムを中心とするパワースourceの研究を通じて、モビリティのゼロエミッション化の実現を目指す。また、大学関係の会員（現在130名）とSIPで支援を得た“AICE”（自動車用内燃機関技術研究組合）を中心とする企業メンバーと緊密に連携して活動を推進する。

【活動内容】
 ・産学のニーズ・シーズマッチングによる研究の立案、公的予算の獲得・研究の実施
 ・安全な研究実施体制確立の支援や実験設備の有効活用に資する情報の提供
 ・モビリティパワースourceに関するデータベースの構築と運用
 ・学生・若手研究者等将来を担う人材の育成
 ・産学が双方の研究活動や技術情報を共有できる場としてのイベントの開催やデジタル環境の整備

10. 米国エネルギー省の”SuperTruck II Program”

こちらはアメリカの”SuperTruck II Program”です。大型のエンジンで55%の熱効率の達成を目標としたプログラムであり、2021年にフェイズ2が終わり、フェイズ3に入ります。このプログラムでもトラックの電動化を主要な議題に掲げており、このような大型車に対しても電動化の必要性は、ますます高まってくると考えています。

米国エネルギー省の”SuperTruck II Program”

□期間: 2016年～2021年 (Phase Iは2009年～2014年)

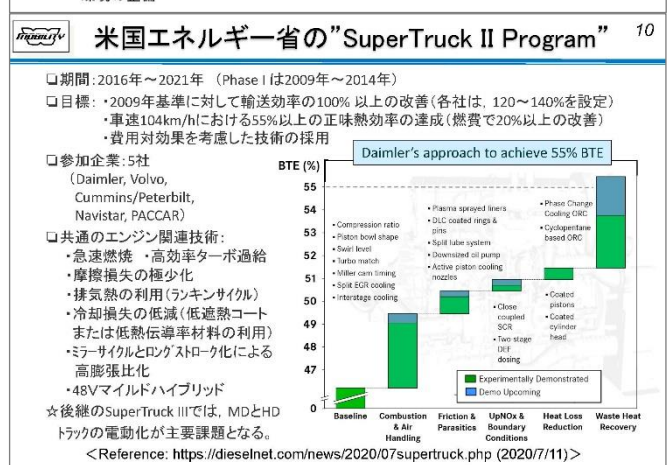
□目標: 2009年基準に対して輸送効率の100%以上の改善 (各社は、120～140%を設定)
 ・車速104km/hにおける55%以上の正味熱効率の達成 (燃費で20%以上の改善)
 ・費用対効果を考慮した技術の採用

□参加企業: 5社 (Daimler, Volvo, Cummins/Peterbilt, Navistar, PACCAR)

□共通のエンジン関連技術:
 ・急速燃焼・高効率ターボ過給
 ・摩擦損失の極小化
 ・排気熱の利用 (ランキンサイクル)
 ・冷却損失の低減 (低導熱コートまたは低熱伝導率材料の利用)
 ・マイルドマイルドとロングストローク化による高膨張比化
 ・48Vマイルドハイブリッド

★後継のSuperTruck IIIでは、MDとHDトラックの電動化が主要課題となる。

＜Reference: <https://dieselnet.com/news/2020/07/supertruck.php> (2020/7/11)＞



11. パリ協定に向けた各国の2030年のCO₂削減と電動化の目標

電動化の目標は、乗用車を中心に各国で唱えられています。スライドに示すように、中国から米国において、2030年代には、一部ハイブリッドが残ると国もありますが、BEVの方向に向かうという全体的な傾向が見て取れます。

パリ協定に向けた各国の2030年のCO₂削減と電動化の目標 11

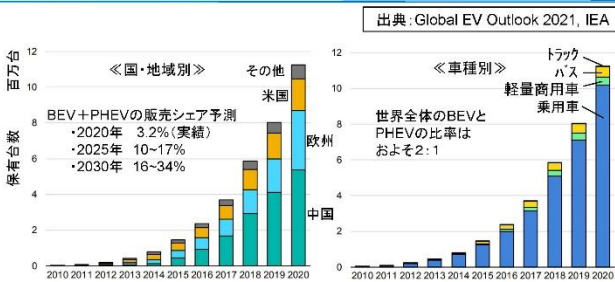
国名	2030年削減目標(⇒強化)	乗用車分野における電動化の目標
中国	60-65% 2005年比(GDP当たり)	2035年、NEV(New Energy Vehicles: BEV, PHEV, FCEV) 50%、HEV 50%を目指す。
EU	40%⇒55% 1990年比	欧州委員会は、2035年、エンジン車、HEV、PHEVの新車販売禁止とする。(各国、メーカーで独自案を提示)
日本	26% ⇒46% (2030年度)	グリーン成長戦略を策定(2020/12/25) 2035年、新車販売を電動車のみとする。(ホタテは2040年以降BEVとFCEVのみ販売)
米国	50-52% 2005年比	2030年以降、HEVを除く電動車の販売50%とを目指す。加州では2035年以降、ZEV(BEV, FCEV)のみとする表明。

- 2050年にカーボンニュートラルを達成することに123カ国・1地域がコミット。(2020/12現在)
- 2021年4月に開催された気候変動サミットで2030年に向けて目標が強化された。
- 欧州自動車工業会のトラックメーカーは、2040年までに欧州域内で化石燃料を使用するトラックの新車販売を停止すると発表。(2020年12月)
- わが国では、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(2021年6月18日)」で乗用車から商用車に至る電動化の目標について提示。

12. 世界のPHEVとBEVの保有状況の推移

こちらはIEAが発表しているBEVとPHEVの動向です。グラフに示すように保有数が年々伸びており、2020年は販売シェアが3.2%でしたが、2025年、30年の予測では、10%から30%に伸びていくという予想もあります。その中で乗用車の割合が大半を占めていますが、これから軽量の商用車やバス、トラックなどでも電動化の波がやってくると考えられます。しかしその一方で、急激なBEVの増加はレアアースやレアメタルなどの原材料のコスト高騰を招いており、そのような動向にも注意を払う必要があります。

世界のPHEVとBEVの保有状況の推移 12

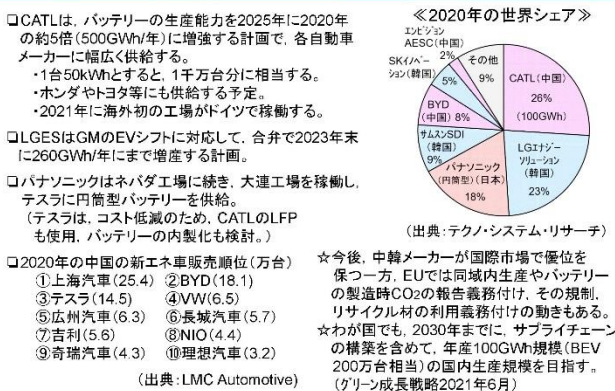


- 2020年のPHEVとBEVの世界販売が前年比41%増の約300万台に達し、欧州では、約140万台(新車販売の10%相当)となり、初めて約120万台(9%増)の中国を抜いた。米国は微増で約30万台。各国が購入補助を拡大したことも要因。商用車のEV化はわずかである。
- “Green Deal 政策”を掲げるEUでは、再エネ電力を利用するBEVの普及を促進し、エンジン車の製造・販売を禁止する動きが強まっている。
- 今後の急激なEVの増加は、レアアースやレアメタル等の材料のコスト増を招く懸念がある。

13. 車載バッテリーの国際出荷シェアと中国市場

このスライドは、車両用バッテリーの国際出荷の状況を示したものです。中国と韓国が大半を占めており、設備投資としても非常に旺盛なものがあります。そのような中で、わが国では2030年までに国内におけるサプライチェーンの構築を目指しており、そのような戦略も推進していく必要があると考えています。

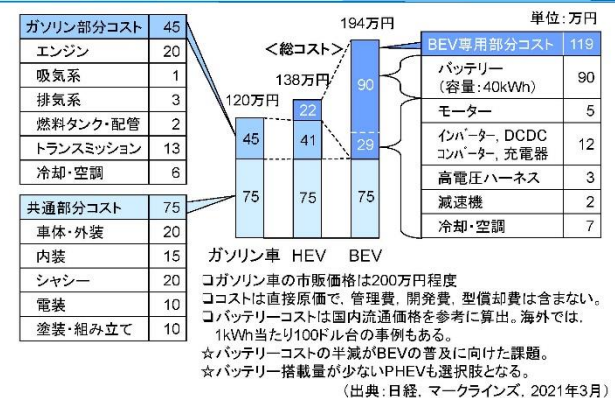
車載バッテリーの国際出荷シェアと中国市場 13



14. Cセグメントのガソリン車、HEV、BEVのコスト比較例

BEVはコストが高いため、売値も高くなります。そのため、購入補助が必要になります。このスライドは日経とマークラインズが試算したものです。ガソリン車に対してハイブリッド車は少し高価ですが、さらに高価なBEVでは、バッテリーが価格の非常に大きな割合を占めています。これをいかに低減するかが、BEVの普及の一つの鍵になるということが分かります。1kWhあたり1万円以下にすることが国の目標になっており、それにより販売促進を図ることが目標とされています。

Cセグメントのガソリン車、HEV、BEVのコスト比較例 14



15. 車載用バッテリーの技術目標

従来のリチウムイオン電池から全固体型、そして革新的なバッテリーへと進展していくと予想されます。全固体のバッテリーの期待は高いですが、一般に普及するのは2030年以降になると予想されます。

16. BEVとPHEV用の電力供給に関わる課題

もう一つの重要な課題として、バッテリーに充電するための電源の確保について、例えば、現在日本で採用されており、全世界での普及を目指している直流の急速充電のCHAdeMO規格があります。現在は50kWがリミットですが、200kWや400kWまで高めていくと、充電時間を大幅に短縮できます。しかし、電力業界の方に何うと、電力の需要に対してこのような配電をマネジメントすることは大変であるとのこと。自動車を利用する側と電力側との具体的な検討が必要だと思っています。とりわけトラックやバスなどの大容量のバッテリーを搭載する車種に関しては、このような大電力の充電が必ず必要になります。もう一つは、例えば家庭やビルなどでバッテリーを蓄電用として、あるいは再生可能な電力を受け入れるシステムとして、V2Xという形で使う動きもあります。

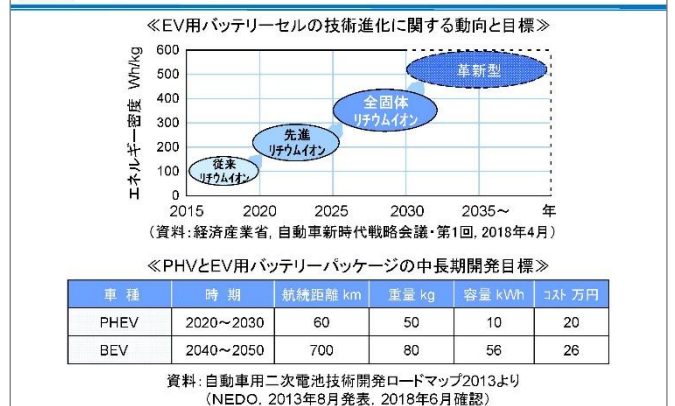
17. 目標とされる電源構成（経産省、2018、2021年）

パブリックコメントが2021年10月4日に終わり、スライドに示すような新しいエネルギー基本計画案が提示されています。36%から38%の再生可能なエネルギーによる電力を生み出し、そして20%から22%の原子力を利用します。これらによって電力の一層の低炭素化が図られます。これはBEVやPHEVにとって恩恵があるということになります。

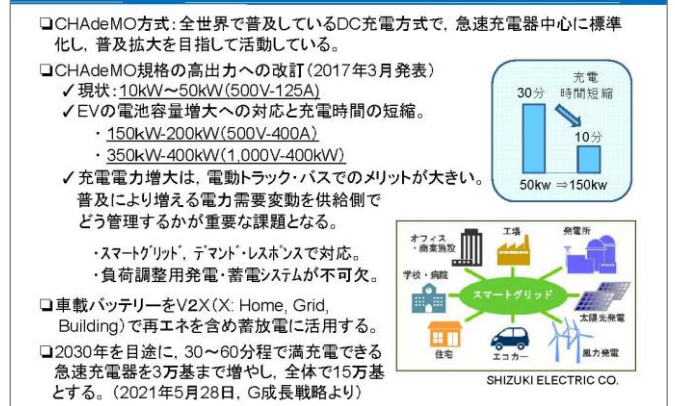
18. 中型乗用車のバッテリー容量、車両重量、燃費の比較

そこで、さまざまな車種で使われるバッテリーの容量を比較しました。ここでは、マーケットに出ているものを参考にしています。実は、BEVに対してHEVは数十分の一程度のバッテリー容量です。PHEVでは数分の一となり、バッテリー容量の差は非常に大きく、原材料の節約になる訳です。3年ほど前ですが、自動車技術会で研究会を開催してきました。結論としてPHEVはHEVとBEVの橋渡しの役割を長期的に担う可能性があるという予想しました。具体的にはバッテリーの搭載量の抑制ということが挙げられます。

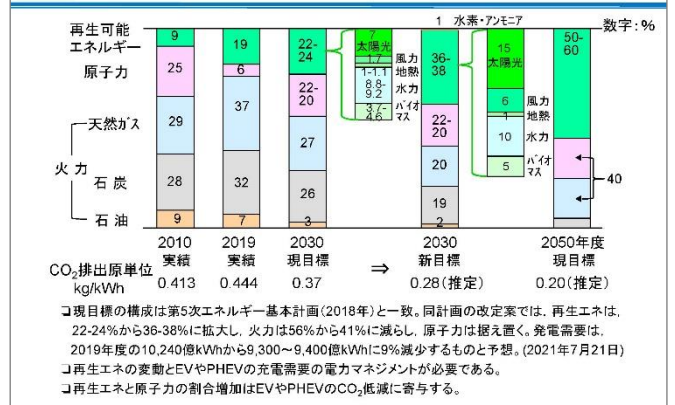
車載用バッテリーの技術目標 15



BEVとPHEV用の電力供給に関わる課題 16



目標とされる電源構成（経産省、2018、2021年） 17



中型乗用車のバッテリー容量、車両重量、燃費の比較 18

車種	バッテリー容量 kWh	車両重量比 (対ガソリン車)	燃費比 (対ガソリン車)
ガソリン車	(燃料:400~500)	—	—
ディーゼル車		1.06	1.15~1.20
HEV	1~2	1.05~1.15	1.20~2.0
PHEV	10~20	1.15~1.20	1.8
BEV	20~80	1.20~1.30	3~4*
FCEV	1~2 (水素:150~170)	1.30~1.40	1.8~2.5*

*: 走行時の消費エネルギー(Wh/km)からの概算値(TTW) 各社の公表データを元に試算(大型)

□BEVとFCEVでは、各々電池と水素系統が重たいことが車重増大の要因。

□急激なBEVの普及は、コバルト、ニッケル、ネオジム等の需要増に繋がり、価格高騰を招く恐れがある。HEVやPHEVのバッテリー容量は大幅に少量に抑えられる利点がある。

□PHEVは、従来車やHEVからBEVへの「橋渡し」の役割を長期的に担う可能性がある。

□電力の発電、燃料製造を含めた「LCA」と費用対効果の評価が必要である。

19. HEV, PHEV, BEVのCO₂排出特性

こちらのグラフは、HEVのプリウスとBEVのリーフを比較し、そのCO₂排出量の差を確認したものです。そして、それらの中に入るPHEVが、EV走行する距離に対して、どの程度CO₂を削減できるかを表したものです。もちろん電源のCO₂排出原単位によりますが、将来、再生可能な電力を大幅に使えることになれば、CO₂排出量がここまで下がることを示しています。PHEVではバッテリーの走行で約100kmを走行できます。Utility Factorと呼ばれるものでは、約85%はEV走行でまかなえます。そのため、PHEVがHEVとBEVの橋渡し、あるいは共存の役割を果たし得ると考えられます。

20. 水素・燃料電池戦略ロードマップ2020から(経産省)

こちらは水素、燃料電池戦略をNEDOが発表しているものです。これによると、ステーションは2030年で約1000箇所、そして設備費用、設置費用の大幅な削減も必要であり、水素自体の単価を下げることも重要な課題になってきます。これには大量の水素が必要となるので、海外調達も非常に重要な課題になると予想されます。

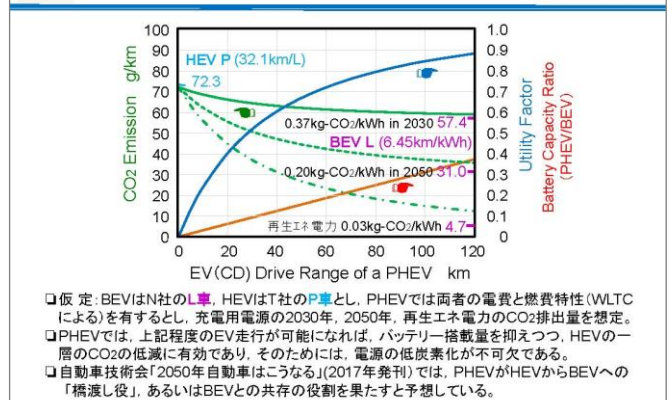
21. ライフサイクルCO₂排出量の車種別比較

こちらは、ライフサイクルCO₂排出量に関するものです。これを比較すると、BEVではグラフ中の緑のゾーンがバッテリーを製造する過程で排出されるCO₂です。そして、発電の過程でも排出されます。さらに、グレーのゾーンは航続距離を200km伸ばしたときに、バッテリーの増量によって増加するCO₂の排出量です。これらより、BEVに関してはバッテリー製造時のCO₂を減らす必要があります。燃料電池に関しては車両の部品、スタッフを中心として低炭素化を図る必要があります。現在は大幅な差はありませんが、各車種で低炭素化を全体で進める必要があることが分かります。ヨーロッパではバッテリー製造時のCO₂の申告義務を課したり、上限値を設定したり、さらにはリサイクル材料の使用を義務付けたりなどの措置が欧州委員会から提示されています。

22. 電力と水素による低炭素化の選択肢

将来の次世代車用の燃料・エネルギーとして、電動車は電力なのか水素なのか、あるいは合成燃料という選択肢もあります。これは水素とCO₂から作ることができ、まだ基礎研究の段階ではありますが、そのような選択肢もあります。その場合、再生可能なエネルギーを活用することが中心になります。

HEV, PHEV, BEVのCO₂排出特性 19



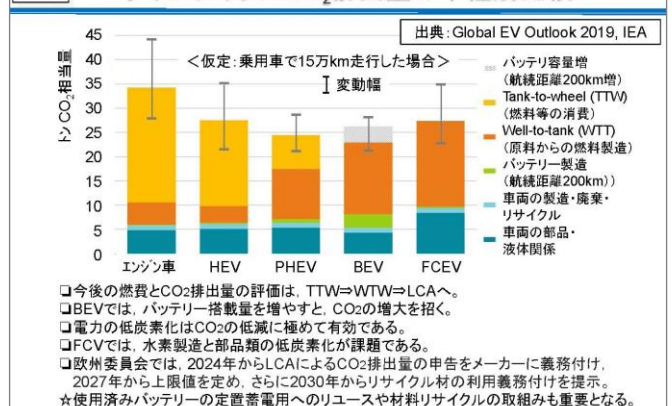
水素・燃料電池戦略ロードマップ2020から(経産省) 20

□水素価格の低減目標と調達
 ・現状: 100円/Nm³, 2030年頃: 30円/Nm³, 2050年: 20円/Nm³ (究極: 13.3円/Nm³) (発電単価換算では各々, 17円/kWh, 12円/kWh, 8.7円/kWh)
 ・2030年までに海外調達も含め年間30万t程度の確保を目指す。⇒300万tに改訂
 □2050年を見据えた水素関連の革新的技術の着実な開発が必要。
 ・高効率な水素分解・人工光合成, 水素高純度化透過膜などの新水素製造技術
 ・高効率水素液化機・長寿命液化水素保持材料
 ・低コストで高効率なエネルギーキャリア
 ・コンパクト・高効率・高信頼性・低コストな燃料電池
 ・水素と二酸化炭素を利用した新化学品合成方法
 □水素ステーションとFCVの普及目標(下表)
 ・商用トラック(国内市場保有台数320万台以上のうちの一部を占める)
 □ステーション事業: 2020年代後半に経営自立化。(設置費用: 4億円⇒2億円)

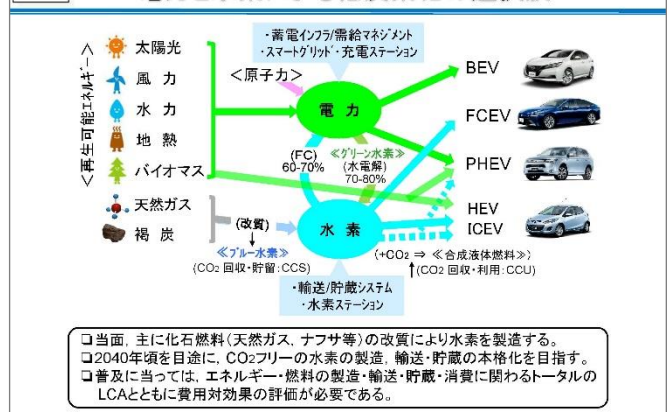
水素ステーションと台数	現状	~2020年	~2025年	~2030年
水素ステーション・箇所	162(2020/11)	160	320	900⇒1,000
FC乗用車・台数	3,433(2020/7)	40,000	200,000	800,000
FCバス・台数	84(2020/9)	100	—	1,200
FCフォークリフト・台数	250(2020/3)	500	—	10,000

□多品種展開, 複数メーカーの参入
 □国際基準調和の先導と貢献
 □国際的な技術連携体制の構築

ライフサイクルCO₂排出量の車種別比較 21



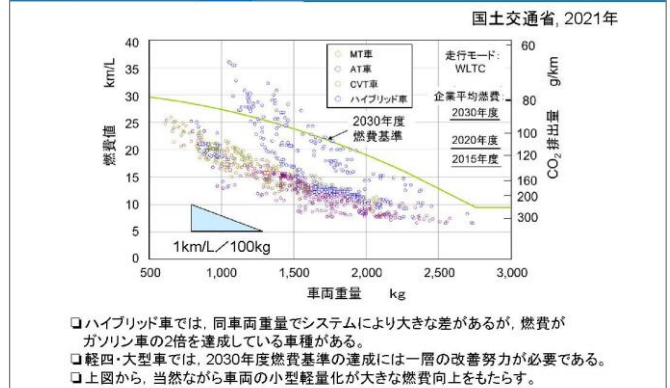
電力と水素による低炭素化の選択肢 22



23. わが国のガソリン乗用車の燃費動向 (2020年3月現在)

国土交通省が発表している新車の燃費の値を、2030年の車両重量別に示した基準値と比較しました。既に基準値を超えている車種もありますが、これらはすべてハイブリッド車です。ハイブリッド車の中には従来車の倍近い燃費を達成しているものもあります。したがって、このような動きが2030年度に向けてさらに加速していくと、乗用車全体のCO₂低減に大きく寄与します。

わが国のガソリン乗用車の燃費動向 (2020年3月現在) 23



24. 主要技術による乗用車の燃費改善とCO₂低減効果

2030年、あるいは2050年に向けて、どういう技術を用いるように使っていくと、どこまで燃費改善できるかをシミュレーションしました。表に示すように、

- 「①エンジンの高効率化」
- 「②電力が燃料の低炭素化」
- 「③バッテリー・電動技術の高性能化」

が重要な技術となります。

そして本日は言及しませんが

- 「④車両の軽量化」が非常に重要な課題です。

主要技術による乗用車の燃費改善とCO₂低減効果 24

技術項目	内容	燃費改善割合 [CO ₂ 低減割合] (所要年数・年率改善率)
① エンジンの高効率化	2030年までに正味熱効率50%を達成	15~25% [13~20%] (10年間: 1.5~2.5%/年)
② 電力・燃料の低炭素化	再生可能電力の利用 (BEV, PHEV) 水素・合成液体燃料等の利用	30~140% [23~58%] (20年間: 1.5~7%/年) * ? (2030年以降)
③ バッテリー・電動技術の高性能化	ハイブリッド化 (マイルド・ストロング) BEV化, PHEV化 (電力の低炭素化)	20~80% [17~44%] (15年間: 1.3~5.3%/年) 30~140% [23~58%] (20年間: 1.5~7%/年) *
④ 車両の軽量化	軽量材料の利用 (20~30%減少)	20~30% [17~23%] (20年間: 1.0~1.5%/年)

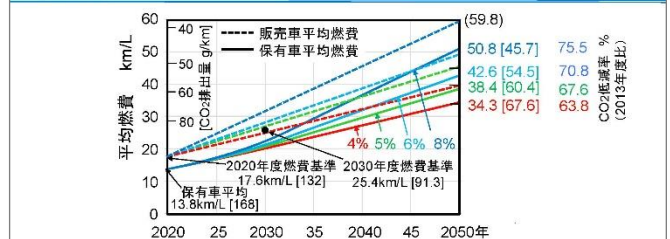
<仮定>: 2020年時点の技術を基準とする。* : 同一の効果

- ① エンジンの高効率化と燃料の低炭素化は、ICEV, HEV, PHEVの燃費改善に寄与。
- ③ バッテリー・電動化技術の高性能化は、ICEVを除くすべての車種の低炭素化に寄与。
- ④ 車両の軽量化は、すべての車種の燃費を改善する。

25. 乗用車燃費向上の保有車のCO₂低減への効果 (1/2)

これらを現実的な改善のパーセンテージと、それに要する期間を設定してシミュレーションすると、グラフでは、新車ベースで4%から8%までの改善の割合を示しております。2020年を基準として年率でこのように改善していくと、新車ベースは直線的に改善されていきますが、車は年間約8%しか新車に置き換わらないので、車種や台数を固定してシミュレーションを行うと、このような遅れが生じます。8%という大幅な改善が必要となりますが、2050年では約75%のCO₂削減が可能だと予測しています。

乗用車燃費向上の保有車平均燃費への効果 (1/2) 25

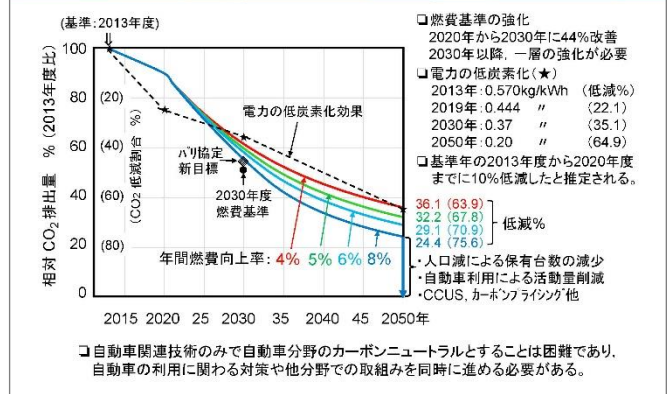


- <仮定>・2020年を起点として、販売される新車のWLTCモードガソリン乗用車燃費が年率で、4%、5%、6%、8%向上する。
・2020年以前に登録された車両は、2010年度、15年度の燃費基準に線形的にWLTC換算で適合し、車種構成と総台数は変わらないものとする。
・最も保有車平均燃費の改善効果がある場合として、平均車齢の13年に達した車両が新車に買い替えられ、各年式車の調和平均を算出する。
□総CO₂排出量を左右する保有車平均燃費は販売車平均燃費に対して遅れが生じるので持続的な燃費改善の取組みと燃費の悪い車の排除が必要である。

26. 乗用車燃費向上の保有車のCO₂低減への効果 (2/2)

2013年度の日本を基準としてこれを100とすると、先ほど申し上げた4%から8%まで改善をシミュレートすると、このようになります。これは乗用車を対象にしており重量車は除いていますが、残りの約2割をどのように減らしていくかを考えると、人口減による保有台数の減少もありますが、自動車利用の活動量を減らす取り組み、CCUSやカーボンプライスが必要だと思えます。

乗用車燃費向上の保有車のCO₂低減への効果 (2/2) 26



27. 自動車用の脱炭素合成燃料 "e-fuel" の開発

再生可能電力を使って水の電気分解で得た水素や工場などで出てくる CO₂ を回収して合成ガス化します。それらを使ってフィッシャートロプシュ法を適用すると、ガソリンや軽油に近い燃料を得ることができます。これは非常に期待されており、現在のエンジン技術やハイブリッド技術でそのままインフラが使えることは利点ですが、現状では収率が非常に低く、高コストであり、量的供給をどうするのか、どこに製造可能な場所があるのかという適地の問題もあります。

28. 各種合成燃料のWTW効率の比較

こちらはヨーロッパの石油業界が試算したものです。Well to Wheel は、電気エネルギーあるいは燃料から車輪の回転に至るまでの効率を計算したものです。バッテリーEVが最も高く、それに対して、水素利用の燃料電池では、水素の製造過程と動力システム効率がかかるため少し低くなります。内燃機関に水素を用いると、さらに下がってしまいます。最後に Liquid Fuel ですが、ここまで下がります。これは合成効率が低いことと、バッテリーやFCと比較してエンジンの効率が低いことが原因です。いずれにしてもハイブリッド化すれば、この程度まで効率が上がるのではないかと予想されます。

29. HEV, BEV, FCVの消費エネルギーの比較 (乗用車)

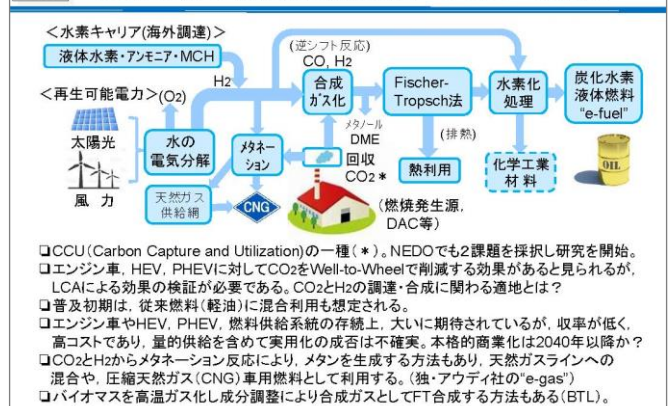
(乗用車)

HEV と BEV, FCV の消費エネルギー比較です。FCV では電力を使って電気分解して水素を作るために、BEV の倍程度の電力がかかってしまいます。1000 万台普及時電力消費割合では、BEV が約 1.4 %なのに対して、FCV は約 3 %の電力を要することになります。将来的に、どのように水素を国内で製造するのか、あるいは海外調達するかという戦略に課題があります。

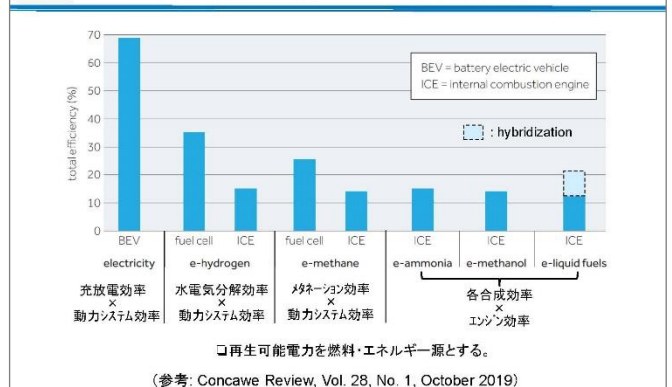
30. ディーゼル重量車用の将来燃料の利用可能性

最後に、重量車のお話をします。先ほど述べたように、重量車では電動化が難しいということですが、燃料の選択肢は豊富であり、バイオディーゼルとその水素化、あるいは水素、メタン、バイオエタノール、合成燃料があります。さらには、車載型システムで CO₂ を回収することも一部で行われています。しかし、回収率が非常に悪く、システムも重くなるので非現実的です。それぞれ一長一短がありインフラの問題もあるので、これらを軽油に代わって大量に導入することの課題は残っていると思います。

自動車用の脱炭素合成燃料 "e-fuel" の開発 27



各種合成燃料のWTW効率の比較 28



HEV, BEV, FCVの消費エネルギーの比較 (乗用車) 29

比較項目	HEV (P車)	BEV (L車)	FCEV (M車)
燃料・エネルギー消費 (WLTC)	32.1km/L (ガソリン)	6.45km/kWh	152km/kg-H ₂
CO ₂ 排出量 g/km	72.3	(現状, 全国平均)	-
・2019/30/50年での平均電力利用	-	68.8/57.5/31.0	141/118/64
・再エネ電力利用 (仮定 0.03kg/kWh)	-	4.65	9.60
燃料エネルギー単価 現在/将来	1L:150円	1kWh:25/12円	1kg:1,120/224円
年間燃料エネルギー消費量	266L	1,324kWh	56.2kg (630Nm ³)
年間燃料エネルギー経費	39,900円	33,100/15,900円	62,900/12,600円
100万/1千万台普及時総消費量	26.6/266万kL	1,324/13,240GWh	5.26万/56.2万t
100万/1千万台普及時電力消費割合	-	0.143/1.43%	0.295/2.95%

□乗用車の年間平均走行距離: 8,540km/年 (国土省資料)
 □日本の年間電力消費量: 9.278 × 10⁶ GWh (2019年度)
 □電力のCO₂排出量 (kg/kWh): 0.444 (2019年)/0.37 (2030年)/0.20 (2050年)
 □水の電気分解で水素1kg生成に必要な理論電力: 140MJ/kg-H₂ = 38.9kWh/kg-H₂
 □FCEV1台当りの年間必要電力: 2,186kWh, 電気分解効率80%とすると、2,733kWh
 ☆水素の大量利用には海外からの調達を推進する必要がある。

ディーゼル重量車用の将来燃料の利用可能性 30

各種燃料	出力性能	CO ₂ 低減効果	コスト/車両/燃料	航続距離	持続可能性	課題
バイオディーゼル (B5-B30, B100)	□	○	□/△	□	○	LCAが必要, 性状劣化対策
水素化BDF (HVO)	□	○	□/△	□	○	LCAが必要, コスト低減
水素 (圧縮)	ボート噴射 (SI)	△	○	□/△	△	DI化で燃効率改善, 水素インフラ
	燃料電池車 (FCEV)	□/△	◎	▲/△	△	コスト低減, 水素インフラ
メタン (圧縮, SI)	天然ガス	△	□	□/□	△	メタンの回収, LNGVの開発
	バイオメタン メタネーション	△	○	□/△	△	メタンの回収・量的確保 水素とCO ₂ 減の確保
バイオエタノール (SI)	△	○	□/△	□	○	セルロースエタノールの製造技術開発
合成液体燃料 (e-fuels)	□	○	□/▲	□	○	CO ₂ とH ₂ 供給, 合成収率の改善
車載CO ₂ 回収システム	△	○	▲/□	□	△	CO ₂ 貯留システムの構築, コスト低減

□: 従来ディーゼル車と同等レベル ・ SI: 火花点火燃焼, それ以外は圧縮着火燃焼
 ・ 水素: 再生可能エネルギーで生成し利用すると仮定する。
 ・ 航続距離の低下は積載量の減少と相関する。
 ・ 将来燃料の共通課題: 軽油相当の供給量の確保とコスト低減

31.トラック・バスの各種電動化に関わる特徴と課題

そのため電動化が重要となりますが、こちらの表に示すように、走行距離に応じて使われ方が変わってきます。例えば、BEVでは、近距離の輸送に向き、長距離ではバッテリーの容量が増えると、可載量が減るという課題があります。それに対して、燃料電池では長距離が走れるという点で勝っていますが、水素インフラや耐久性、コストなどの課題があります。

トラック・バスの各種電動化に関わる特徴と課題 31

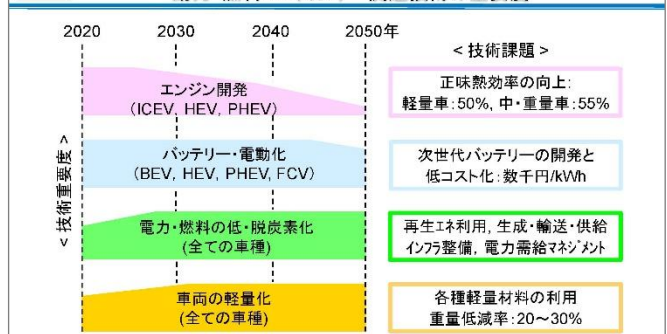
用途	HEV	BEV	FCEV
近距離(小型) 100~200km	○ ・20-30%の燃費改善 ・低エミッションは限定的	○ ・ゼロエミッション ・物流事業者から強い要望	○ ・ゼロエミッション ・外部への給電
中距離(中型) 300km以下	□ ・燃費改善は利用形態による?	□ ・積載量・航続距離の制約 ・バッテリーコストの制約	□ ・車両と燃料のコスト制約
長距離(大型) 300km以上	□ ・定速走行では燃費改善は限定的	△ ・積載量・航続距離の制約 ・バッテリー性能の制約	△~□ ・FCスタックの高負荷運転における信頼性の制約
共通課題	・車両コストの低減 ・エンジンの高効率化(正味熱効率率:~55%) ・パラルからフルシステム化 ・プラグイン化へ ・一層の低エミッション化 ・合成液体燃料の利用?	・バッテリーコスト低減 ・バッテリーの信頼耐久性確保 ・航続距離の延伸 ・重量/容積増大の抑制 ・充電時間の短縮 ・充電スタンドの整備・拡充 ・再生電力の利用	・大幅な車両/燃料コスト低減 ・FCスタックの性能向上 ・水素ステーションの整備・拡充 ・車種の多様化/部品共有 ・複数企業との連携と実証 ・水素製造の脱炭素化 ・水素の供給源と量の確保

(注)ディーゼル車(車再総重量3.5t超)と比べて △:劣っている □:同等である ○:優れている
★最大積載量8t以下の車種では、新車で2030年までに電動車20~30%、2040年までに電動車・脱炭素燃料車100%を目指す。8t超では、2020年代に5,000台の先行導入を目指し、2030年までに2040年の電動車の普及目標を設定する。

32. 自動車の動力・燃料・エネルギー関連技術の重要度の推移

そのため、私見ではありますが、2050年を目指した技術の重要度を概念的に表しました。冒頭で申し上げたように、エンジンの開発は効率が50%から55%に達した後は飽和状態となり重要度が下がっていくと考えています。ただし、ハイブリッドやPHEVがある限りは、それを活かすようなシステムは残ると思われま。バッテリーや電力の低炭素化、車両の軽量化の重要度は長期間継続すると予想されます。

2030年から2050年に向けた自動車の動力・燃料・エネルギー関連技術の重要度 32



上記すべての技術の開発・設計に際しては、燃料・エネルギー、動力システム、車両を包括した実走行での性能を評価する数値シミュレーションモデルの検証と活用が不可欠である。

33. 車両の電動化等に関わる将来目標と政策

電動化に関わる目標と政策として、カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略が2021年6月18日に内閣府から発表されました。乗用車の電動化100%は達成されるだろうと予想されますが、商用車に関しては、8t以下と8tを超える車種では異なると思います。特に、8tを超える車では、2020年代に約5000台の先行導入を推進し、水素や合成燃料のコストを低減する技術開発、普及の取り組みの進捗を踏まえながら、2030年度までに2040年度以降の電動車の普及目標を設定することが謳われています。

車両の電動化等に関わる将来目標と政策 33

「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」
~自動車・蓄電池分野から~(内閣府・関係省庁、2021年6月18日)

＜乗用車＞
□2035年までに新車で電動車100%実現のため、国が包括的措置を講じる。⇒

＜商用車＞
□8t以下の車種については、
・2030年までに、新車販売ベースで電動車:20~30%
・2040年までに、新車販売ベースですべてを電動車または合成液体燃料(e-fuel)等の脱炭素燃料を利用する車両とする。⇒

□8t超の車種については、
・商用に適する電動車の開発・利用促進に向けた技術実証を進めつつ、2020年代に5,000台の先行導入を目指す。
・水素や合成燃料等のコストを低減する技術開発・普及の取り組みの進捗を踏まえ、2030年までに2040年の電動車の普及目標を設定する。⇒

＜全体＞
□この10年間はBEVの導入を推進し、バッテリーをはじめ、世界をリードする産業サプライチェーンとそれを活用する「モビリティ社会の構築」を図る。
□特に軽自動車や商用車等のBEVやFCEVへの転換について、国として特段の対策を講じていく。
□部品サプライヤーや地域経済を支える自動車販売店、整備事業者、サービスステーション等の電動化対応を後押しするべく、「乗換転換・事業再構築」を積極的に支援していく。
□国内の車載用バッテリーの製造能力を100GWhまで高めるとともに、BEVとガソリン車の経済性が同等となる車載用バッテリーパック価格1万円/kWh以下にする。

34. 物流を担う商用車の高効率化と利用法の改善

最後に、物流のお話を簡単にします。先ほど、自動車単体でのこれ以上の低炭素化は困難であるとお話しました。国の目標達成のためには、低炭素化に向けた物流に関わる技術開発の取り組みも同時に加速する必要があります。

物流を担う商用車の高効率化と利用法の改善 34

□**域内輸送**:普通車・中量車、路線バス
・HEV、PHEV化やBEV、FCEVへの転換・ドローンの活用 大幅なCO2低減が難しい状況!

□**長距離輸送**:ディーゼル車、天然ガス車、HEV
・エンジンシステムの高効率化(正味熱効率率「55%」を目指す。)
・隊列走行、連結走行、自動走行:ドライバー不足・高齢化対策?
・電動化の遅れ。BEV、PHEV、走行中給電、FCEV、e-fuelの可能性は?
□輸配送の効率化を可能にするITS、ITC(テレマティクス)、IT、AIの活用 CO2の低減効果の評価が必要!

□ターミナルでの合理化(荷捌きの高効率化...)
□モーダルミックス(鉄道、貨物船と連携、容量に制約があるが、推進すべき。)
□テレワーク・会議やリニア新幹線で余剰となる旅客輸送量を貨物輸送へ!?
□荷主との協力/ネットショッピング⇒宅配便のあり方は?

Drone
 NEDO/JARI
 ヤマト&福山
21m⇒25m track-library.com

35. 自動運転, シェアリング, モビリティサービスの将来

これは物流の分野でもありますが、隊列走行や連結トラックの活用,あるいはCASE, MaaSと言われるようなサービスの分野でもリリースを予定していると思います。これらによってどの程度CO₂を減らせるかを考えていただきたいと思います。

自動運転, シェアリング, モビリティサービスの将来 35

“CASE”と“MaaS”の時代が到来!

- つながる, 自動運転, シェアリング/サービス, 電動化
 - ・交通需要全体がどのように変わるか?
 - ・公共交通機関の役割・利用の変容?
 - ・交通事故は減らせるか? ・クルマ離れが進む?
 - ・**どれだけCO₂を減らせるか?**
- ITS, IT, Cloud, Big Data, AIの活用/IT企業の参入
- クルマ・交通情報は「公共財」として活用すべき。
- 地域特性との相性は?
 - ・移動困難者や過疎地住民への恩恵
 - ・コンパクト・シティ, スマート・シティで活用
 - ・グリーンスローモビリティ(国交省)の導入

まずは特区で実証を進める。

無人運転の“e-Palette”(トヨタ)
ロボット・タクシー (DeNA, ZMP)
カーシェア(3社)
自動運転・ライドシェア (Uber, Volvo)
小型スローモビリティ (ヤマハ)
宅配ロボット (日本郵便, ZMP)

36. グリーン成長戦略で研究開発を支援するイノベーション基金

グリーン成長戦略のイノベーション基金にも提示されており, 18事業のテーマがスライドに示すように掲げられています。自動車関連のテーマが多ということになります。2030年を目指して2兆円の基金がこれに投入されることになり, 成果が期待されるようです。

グリーン成長戦略で研究開発を支援するイノベーション基金 36

□2021年4月9日, 経済産業省は脱炭素社会の実現に向けた「グリーン成長戦略」(2020年12月公表)の実行計画の一環として, 今後10年間企業の研究開発を支援する2兆円のイノベーション基金の配分対象となる18事業を公表。

□成長戦略で掲げた重点14分野を18事業に集約し, 「グリーン電力」「エネルギー構造転換」「産業構造転換」の3分野ごとのWGにおいて, 詳しい事業目標や配分額などの詳細を検討する。

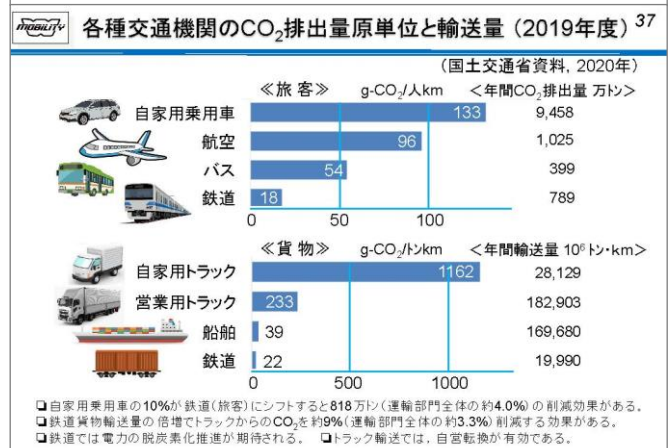
□4月28日に開いた産業構造審議会(経産相諮問機関)で了承された事業として, ③海外から大量に水素を運ぶ供給網の構築に向けた事業で最大3,000億円, ④国内で水から水素を製造する装置の大型化に向けた事業で最大700億円を配分し, NEDOを通じて公募する。

□その他の事業についても, 目標や配分額などの詳細を決めた上で公募を始め, 2021年度上半期にも事業に着手する。

分野	18事業のテーマ
グリーン電力の普及促進	① 洋上風力発電の低コスト化
	② 次世代太陽光発電の低コスト化
	③ 大規模水素サプライチェーンの構築
	④ 再生エネルギーを活用した水電車の水素活用
エネルギー構造転換	⑤ 燃料アモニアサプライチェーンの構築
	⑥ CO ₂ を用いたプラスチック原料製造技術開発
	⑦ CO ₂ を用いた燃料製造技術開発
	⑧ CO ₂ を吸収するシンプラス等製造技術開発
	⑨ CO ₂ の分離・回収等技術開発
	⑩ 焼却施設のCO ₂ 削減技術開発
産業構造転換	⑪ 次世代蓄電池・モーターの開発
	⑫ 車両電動化に伴う供給網変革技術の開発
	⑬ スマートビリティ社会の構築
	⑭ 次世代デジタルインフラの構築
	⑮ 水素・電動航空機の開発
	⑯ 水素・アモニアを用いた次世代船舶の開発
	⑰ 森林水産物のCO ₂ 削減・吸収技術の開発
	⑱ 自動車関連

37. 各種交通機関のCO₂排出量原単位と輸送量 (2019年度)

最後に, このような乗用車から公共交通機関, トラックから鉄道や船舶へのモーダルシフトも非常に重要だと申し上げておきます。



38. 2030年から2050年に向けた取組み

こちらがまとめです。本日申し上げたことの繰り返しになるので省略しますが, 今後は市場, 技術, 政策を見据えて取り組む必要があります。産官学の連携も必要になります。そのような中でJARIさまの役割は中立的,あるいは非競争領域での技術開発の取り組みが重要になってくると思います。進展を大いに期待しています。

2030年から2050年に向けた取組み 38

□2030年を超えて石油が利用可能な状況にあっては, エンジンの高効率化は, 従来車はじめ, HEVやPHEVの燃費改善にも有効であり, さらには, “e-fuel”の利用可能性を探る。

□2050年に向けた脱炭素化のためには, HEV, BEV, PHEV, さらにはFCEVを含む電動化, 再生可能な電力・エネルギーの活用, LCAによるCO₂排出量の算定が不可欠である。

□電動化において, バッテリーのエネルギー密度・出力密度の大幅な向上, コスト低減, リユース/リサイクルシステムの構築が重要である。

□BEVにおける再生可能な電力の活用に当たっては, 普及台数増加に伴う急速充電の需給変動に対応した電力マネジメントシステムの構築が必要である。

□FCEVの普及には, 長期的な計画に基づき, 社会受容性を醸成しつつ, 大幅なコスト低減, 水素の量的確保を図るべきである。

□2050年の温室効果ガス削減の目標を実現するには, これらの技術課題の解決のみでは不十分であり, 運輸交通システムや自動車の利用のあり方を抜本的に見直し, 他部門との連携を図る必要がある。(「モビリティ・イノベーション」の実現。)

□産官学の連携のもと, 人材育成を図り, 技術立国としての地位を確保すると同時に, これらの取組みを新興国への支援に役立てて国際貢献を果たすことが大いに期待される。

基調講演② *1

2050年カーボンニュートラルと自動車の電動化推進について

清水 淳太郎*2,*3
Jyuntaro SHIMIZU

はじめに

本講演では、カーボンニュートラルに向けた全体像、自動車技術の将来の可能性といった大きな話に対し、具体的な政策というフェーズでこれをどう推進していくのかという所のお話をさせていただきます。カーボンニュートラルという時代の中での自動車というものの位置づけと大きな戦略について、1つ目として考え方を説明いたします。その上でそれを踏まえて具体的な政府の戦略の全体像ということ、「自動車部門におけるグリーン成長戦略」として2つ目に、最後に、具体的な内容として「足下の政策動向」の3本構成でご説明いたします。

1. カーボンニュートラルと自動車

まず最初の塊として、カーボンニュートラルという大きな流れです。

私自身、今ご紹介いただきました大臣官房参事官の自動車と再エネ担当ですが、直前まで新エネルギー課長として再エネという関係でエネルギー政策に携わってきましたので、その時の経験なども踏まえながら、そのエネルギー政策と自動車というところでお話をさせていただきます。

まず一番大きな骨格ということで、菅総理が今年の10月26日の所信表明演説の中で、2050年カーボンニュートラルという宣言をされて、大きなゲームチェンジが日本においてもなされました(図1)。これを受けまして2021年4月に同じく総理の方から「中間的な部分として2030年に温室効果ガスを2013年度から46%削減するということを目指す」ということ、「さらに50%の高みに向けて挑戦する」ということを表明されております。大きな骨格の非常に重要なポイントとしまして、「今後は目標の達成に向け、経済と環境の好循環を生み出し力強い成長を作り出していく」とあります。これは「経済を犠牲にしながら実現するというものではない」とのある種の宣言ということで、このカーボンニュートラルと経済成長をしっかりと両立させてくというのが政府の大方針だということなのです。

2050年カーボンニュートラルと2030年の新たな排出削減目標の表明	
1. 菅内閣総理大臣による、2020年10月26日の所信表明演説	「我が国は、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、すなわち 2050年カーボンニュートラル 、 脱炭素社会の実現を目指す ことを、ここに宣言いたします。」
2. 菅内閣総理大臣による、2021年4月22日の地球温暖化対策推進本部	「集中豪雨、森林火災、大雪など、世界各地で異常気象が発生する中、脱炭素化は待ったなしの課題です。同時に、気候変動への対応は、我が国経済を力強く成長させる原動力になります。こうした思いで、私は 2050年カーボンニュートラルを宣言し、成長戦略の柱として、取組を進めてきました。 地球規模の課題の解決に向け、我が国は大きく踏み出します。 2050年目標と総合的で、野心的な目標として、2030年度に、温室効果ガスを2013年度から46パーセント削減することを目指します。 さらに、 50パーセントの高みに向けて、挑戦 を続けてまいります。この後、気候サミットにおいて、国際社会へも表明いたします。 46パーセント削減は、 これまでの目標を7割以上引き上げるもの であり、 決して容易なものではありません。 しかしながら、世界のものづくりを支える国として、次の成長戦略にふさわしい、トップレベルの野心的な目標を掲げることで、世界の議論をリードしていきたいと思っております。 今後は、 目標の達成に向け、具体的な施策を着実に実行していくことで、経済と環境の好循環を生み出し、力強い成長を作り出していくことが重要 であります。 再エネなど脱炭素電源の最大限の活用や、投資を促すための刺激策、地域の脱炭素化への支援、グリーン国際金融センターの創設、さらには、アジア諸国を始めとする世界の脱炭素移行への支援などあらゆる分野で、できる限りの取組を進め、経済・社会に変革をもたらしてまいります。 各関係には、 検討を加速 していただきますようお願いいたします。

図 1

*1 「JARIシンポジウム2021 カーボンニュートラルへの挑戦～自動車による貢献と実現に向けて～」(2021年10月8日)の講演より原稿化
*2 経済産業省 大臣官房参事官(自動車・再生可能エネルギー担当) 製造産業局自動車課 自動車戦略企画室長(ご講演時 現在)
*3 経済産業省 製造産業局 自動車課長(併)自動車部品・ソフトウェア産業室長(2022年10月 現在)
* 2022年9月9日受理

2050年カーボンニュートラルの実現

続きまして図 2 です。このカーボンニュートラルの実現という観点から見た時に、具体的な手段というものが実は非常に限られているところでもあります。一番左の今の現状で、電力部門と非電力とあります。一対一で少し非電力の方が多いいぐらいというところですが、運輸というのはこの非電力部分にあります。この非電力の中でカーボンニュートラルを実施してゆくというのは、かなりいろいろな技術革新が必要になってきます。一番右のバイオマスや合成燃料とか水素といった電力以外であるところのカーボンニュートラルのエネルギーというものをうまく活用していく必要があるということです。そういう意味でこの非電力のところをそういったものも活用しながら可能な限り電化をしてゆくという社会全体にとっても非常に重要なところでして、下の電力部門では、脱炭素の電源ということで再エネですとか原子力といったものも含めたものがあり、全体としては大きく電化をしていくということ、また残った非電力部門についてはバイオマス、合成燃料、水素といったものを使いながらうまくカーボンニュートラルを実現してゆくというのが全体のところであり、運輸部門もまさにこの流れが当てはまります。

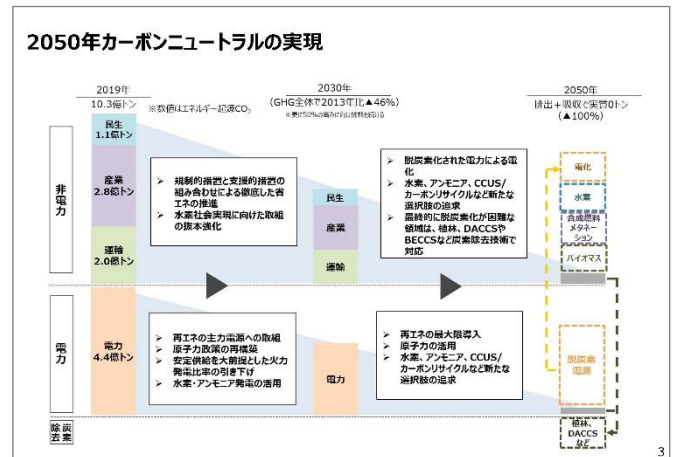


図 2

運輸部門における二酸化炭素排出量

運輸部門ですが、全体約 12 億トンのうちの 2 億トン、うち自動車は 1 億 8000 万トンということで、一部門と言う意味において非常に大きなポーションを占めています (図 3)。そういう意味では最もカーボンニュートラルに向けてチャレンジングなセクターでもあり、言い換えるとビジネスチャンスが非常にあるというところでもあります。

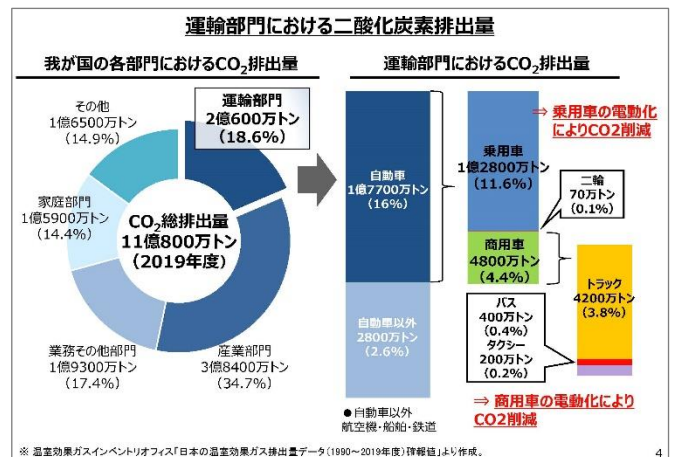


図 3

電動車のマッピング

ではこの運輸部門の脱炭素化、カーボンニュートラルをどう実現していくのか、いろいろなオプションがあります (図 4)。ご存知の通り電気自動車、プラグインハイブリッドそれからハイブリッドや燃料電池自動車などいろいろな次世代車がありますが、強みもあれば課題もあるというのが現実のところ。そうした中で 2050 年のカーボンニュートラルに向けて、まずは特定の技術に限定することなく多様な選択肢を追求していくということ、日本の強みや産業基盤というものをしっかり活かしながら、またそういった形で複数の技術を追求していく中で技術間のイノベーション競争ということを進めていくということが重要だというのが日本の大戦略です。これはやはり日本自身が、これまで科学技術立国としてイノベーションを武器に世界と戦ってきたという中で、イノベーションというのは特定のものだけに

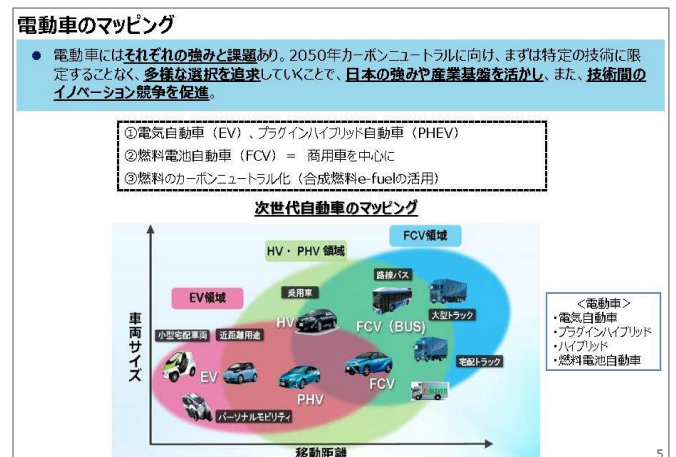


図 4

ある種フォーカスして競争を回避する一方、また複数の技術間での競争というものが出てきたところも非常に大きいのではとも考えておりましたが、この選択と集中ということと、この多様なところでの競争は難しいバランスであると我々も考えておりますが、こうした形の技術間での競争というのは重要かと思っています。具体的などころでは、電気自動車、プラグインハイブリッドそれから燃料電池車ということに加えて、燃料のカーボンニュートラル化といったことを加えた多様な選択肢を追求していくというところでは、

自動車分野のカーボンニュートラルについて

評価にあたっては図5にありますとおり、自動車のライフサイクル全体でのカーボンニュートラルを目指すということも成長戦略の中でしっかり位置づけております。全体を見ながら評価をしていくということが日本国内でもグローバルにも概念としてしっかりと位置づけていく必要があるかと思ひますし、そのためにも特にエネルギーの部分での脱炭素化ということで歩調を合わせるということが非常に重要になってくるというところでは、

新たな「エネルギーミックス」(案)における再エネ比率について

私の過去の新エネ課長の時の経験を踏まえ、少し再エネに特化した形で図6にてお話しさせていただきます。この左側に三つ棒がありますが、2030年が新しいエネルギーミックスの案の36~38%といったところをベースにした電源構成です。右側が、今のところFIT制度導入後非常に導入量が進んで来ていますが、今の新しいミックスの実現というものに向けた進捗率としては、電源ごとに違いがありますが、かなりまだチャレンジングなところもありますので、これをしっかりやってくる必要があるということでは、同時にやはり再エネ電源、脱炭素の電源というものが非常に貴重なものであるということも分かるかと思ひます。

グローバル産業である自動車産業

以上までが、日本の大きな戦略というところでは、同時に自動車産業というかグローバルな産業ということで世界の動向というものについて、これが不満か不満じゃないかに関わらずしっかり見ながら、事業戦略の構築をしていくということは当然重要なことだと思っております(図7)。

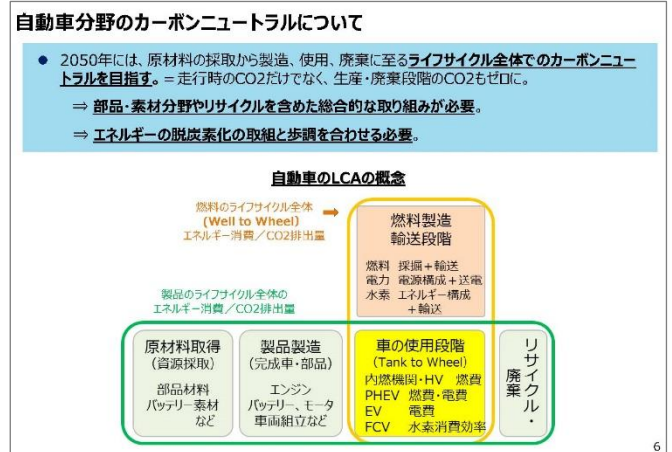


図 5

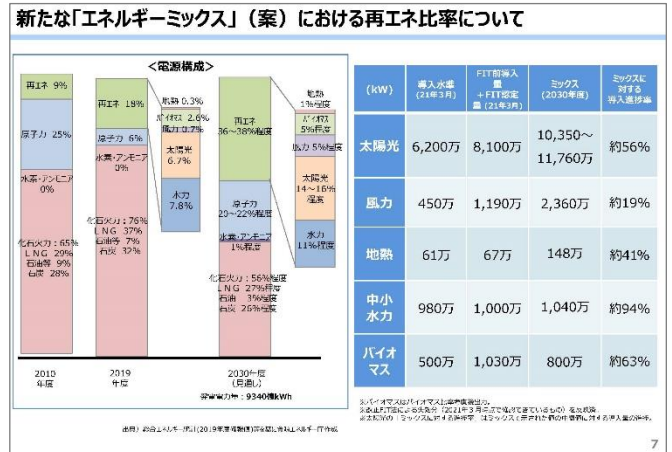


図 6

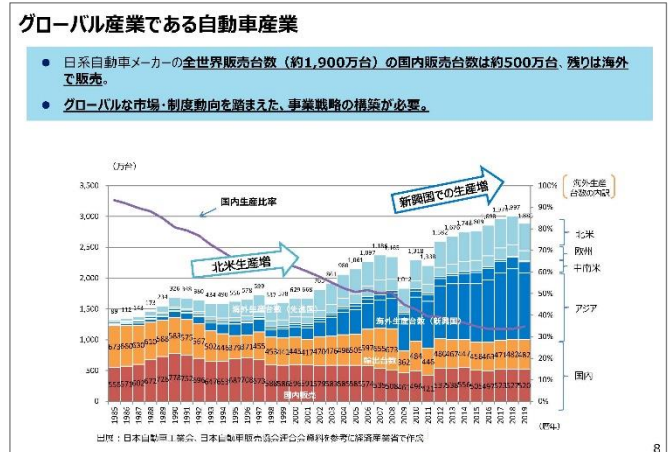


図 7

各国の電動化目標

そういう目で世界各国の目標というものを見ると、電動化というものについて各国まちまちです(図8)。特にヨーロッパなど中心に、EV・FCVに、よりフォーカスした形での目標設定となっているのが世界の今の状況です。例えば英国の場合、2030年にはガソリン車からフェーズアウトしていこうということ。EUの方は、欧州委員会の提言で、今後の議論としては2035年にはEVとFCVだけにしていこうとなっています。一方でアメリカなどは、2030年にEV・PHV・FCVで50%、残りの50%でのハイブリッドやガソリン車ということも、その時点では許容されていて、多様な選択肢が意識されたものになっていました。各国まちまちですが、やはり大きな電動化という波はグローバルにきているというような状況です。

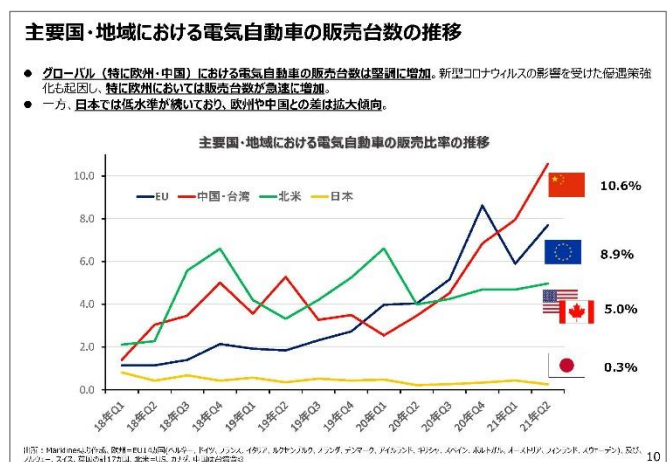


図 8

主要国・地域における電気自動車の販売台数の推移

電気自動車の販売台数を見ますと、これはやはり日本以外の国は、国によってかなり電気自動車の販売比率が増えているようなマーケットに現実になってきています(図9)。その中で日本のOEMを中心に、日本の産業がしっかりと世界で勝っていけるようなことを我々としても考えてかなければと思っています。

国・地域	市場規模	ガソリン車	EV・PHV・FCV
英国	270万台	2030年販売禁止 ※ハイブリッドは2035年販売禁止	2030年販売目標 EV:50~70%
フランス	280万台	2040年販売禁止	2028年ストック台数目標 EV:300万台 PHV:180万台
中国	2580万台	国の目標はなし ※自動車エンジン半衰: 2035年全車電動化(ハイブリッド50%、EV・PHV・FCV50%)発表	2025年販売目標 EV・PHV・FCV:20%
ドイツ	400万台	国の目標はなし ※連邦参議院: 2030年販売禁止を決議(法的拘束力無し)	2030年ストック台数目標 EV・FCV:700~1000万台
EU	1400万台	2035年販売禁止 ※乗用PHV/HV含む内燃機関廃止(欧州委員会提言)	2035年販売目標 EV:FCV:100% (欧州委員会提言)
米国	1750万台	国の目標はなし ※カリフォルニア州、ニューヨーク州知事: 2035年EV・FCV100%	2030年販売目標 EV・PHV・FCV:50%
日本	430万台	2035年 電動車100% (EV/PHV/FCV/HV)	2030年販売目標 EV・PHV: 20~30%、FCV:~3%

図 9

自動車産業のサプライチェーン、バリューチェーンの構造

成長戦略だという話も申し上げましたが、やはり今の自動車産業のこのサプライチェーン、バリューチェーンというものが、日本経済全体にとって非常に大きなボリューム、バリューを占めています(図10)。その中でこうした自動車産業に従事されている方々が、どういう形で今後も新しい形の産業、ビジネスに攻めの構造転換をしてくるのかというのは、もう一つの大きな考えねばいけないところ です。

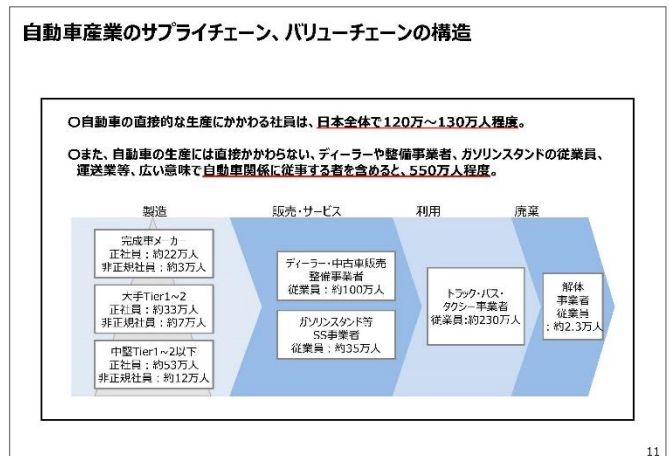


図 10

ここまでの整理

ここまでが、まず第1パートです。説明したことを簡単に整理させていただきます(図11)。まず2050年カーボンニュートラルについては、政府全体として科学の要請に基づいてしっかり実現するとの強いコミットが、まずベースにあります。その実現の手段として、電動車についてはそれぞれ強み弱みがあるという中で、イノベーションの競争を促進してくような形で多様な選択肢を追求していくということ。それから脱炭素のエネルギーというのは、やはり再エネの導入が簡単ではない日本にとっては、非常に貴重なものだと思います。そういう意味で、エネルギーはそもそも使わない省エネ、それから電源の非化石化といったようなことと一体的に推進をしていくというのが、日本全体のカーボンニュートラルに向けて重要だと考えています。

一方で自動車はグローバルな商品ということで世界の流れにしっかり対応していく国際的な競争力ということも重要で、現実にあるグローバルな電動化の大きな流れというものにしっかりどう対応していくのかということ。

それから、まだ車を持っていない、これから生活水準が上がって車をご購入されるというエントリーの方も、まだまだ世界で見ればむしろ大半であるという中で、新興国でのこの拡大する自動車需要と、このグローバルなカーボンニュートラルとをどう整合させていくのかということも重要な課題だと思っています。

最後に繰り返しになりますが、やはり成長戦略としてのカーボンニュートラルというこの大きな流れの中で、攻めの業態転換、事業再構築をしっかりやってもらいながら前に進んでいただくというところであり、我々からのメッセージを踏まえて各社の中における戦略を構築いただくことが、この大構造変革期において非常に重要になってきています。我々としては、その後押しを出来るような政策対応していきたいというのが大きな体系です。

ここまでの整理

- ・2050年カーボンニュートラルへのコミット。
- ・電動車にはそれぞれの強みと弱み。イノベーション競争の促進
- ・脱炭素エネルギーは貴重。省エネ、電源の非化石化と一体的推進。
- ・自動車はグローバル商品。世界の流れへの対応も必要。電動化の大きな流れ。新興国での拡大する自動車需要への対応。
- ・成長戦略としてのCN戦略。「攻めの業態転換・事業再構築」の重要性。大構造変革期における各社の戦略構築への期待。

12

図 11

2. 自動車部門におけるグリーン成長戦略

続いて、グリーン成長戦略で大きなフレームについて整理していますので、ご紹介させていただきます

グリーン成長戦略（概要）

グリーン成長戦略ということで、これは自動車を超えて、全部で14のカーボンニュートラルに向けた成長戦略と一緒に重点分野です（図12）。上の段の5つ目の自動車・蓄電池が明確にまず位置づけられています。その他、上の左から2番目のところで、水素社会の構築、その中の大きな需要の一つであるFCVといったような話です。それから下のカーボンリサイクルといったあたりの合成燃料や、半導体も非常に重要になってくる場所だと思います。

そういう意味で自動車関連産業については、このグリーン成長戦略の中で社会を担う重要な産業であるというのが我々の基本認識であり、この実現に向けた政策の総動員として、例えば①の予算のところにあります2兆円のグリーンイノベーション基金ですとか、税制ということでカーボンニュートラルの投資促進税制といったことも含めた様々な取り組みをしているところです。



図 12

グリーン成長戦略（自動車・蓄電池産業）概要（2021年6月改定）

その中で自動車の部分の概要です（図13）。この基本的な考え方は②です。先ほど申し上げましたように、特定の技術に限定することなく多様な道筋を目指すということです。③で同時に、やはり日本の産業での世界に自動車を供給する世界に冠たる基幹産業ということで、世界の動向にも着目しながらの取組をしていくことが重要ということ。最後に④ところでチャレンジというものについて前向きに取り組めるような産業構造を目指していくというようなことが大きな考え方です。電動化の目標として、ご存知の通り2035年までに乗用車の新車販売で電動車100%を実現していく。そして商用車についての目標の設定なり今後の目標設定のタイミングについての言及、それからインフラ整備、そして燃料のカーボンニュートラル化と言ったことを書いています。

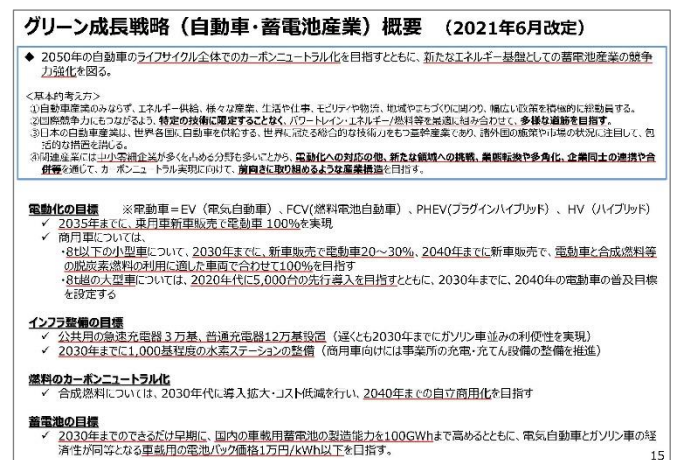


図 13

電動化目標実現に向けた主要な取組

本体を読んでもらえれば分かりますが、ボリュームもあり、いろいろなことが書いていますので、大きなポイントを少し簡単に図 14 で整理をし、大きく四つの塊にしています。

まず一つは、電動化という日本の中での大きな流れ、それから世界における電気自動車によりフォーカスをしたような世界の動きということも含めた中で、やはりこの電池というものをしっかりと産業として確立し、日本国内に基盤の確保をしていくというのは、競争力それから安定的なサプライチェーンと様々な面で重要だということです。これはまず①というところの塊です。コスト競争力を持って欧米に輸出可能な国内生産基盤であり、100 GWh といったところは少なくともこういった生産基盤をしっかりと作っていききたいということですし、コストも下げていく必要があるのではということ、まず電池自体の研究開発の支援、それから大規模生産拠点の立地の支援といったところ、さらにヨーロッパの方でもこの電池の巨大な需要拡大の中でどうやってこれを健全なサプライチェーンにしてくのかという欧州バッテリー規則みたいな動きもあります。日本国内での制度枠組みの検討ということも同時に進めながらグローバルな議論をリードしていく必要あると思っています。

それから②の電動車の普及促進というところは、燃費規制ですとか、CEV 補助金とか税とかの導入支援、それから国の方でも率先的な購入といった取り組みです。

さらに③のインフラ整備ということで、充電インフラと充填インフラというものが新しい電動化社会の基礎となるインフラと考えています。充電インフラについては、現状 3 万基というところ、急速充電 3 万基、普通充電 12 万基で合計 15 万基の規模で、それから水素についても 1000 か所といった規模を、2030 年までに目指していくということです。高速道路とか、特に集合住宅の部分といったことも含め、今欠けているところのニーズなども踏まえたインフラ整備を進めていくということです。

最後に④で、これら全体を支えるものということで構造転換の支援があり、こうした取り組みをしっかりとやるというのが大きな政策体系になっています。

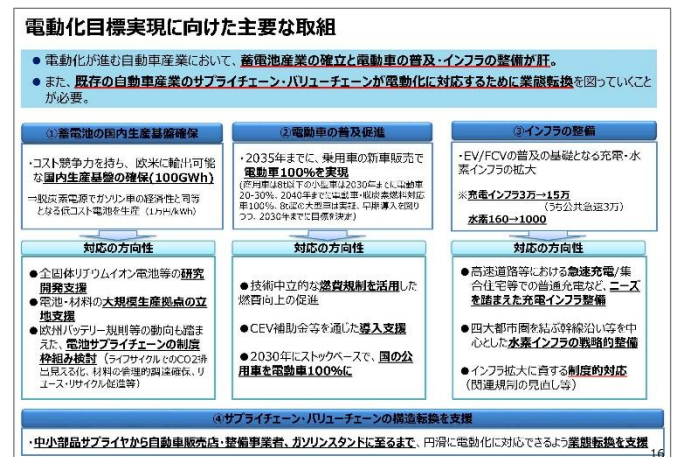


図 14

3. 足下の政策動向（基金，予算，再エネ調達）

これを踏まえて、これを絵に描いた餅ではなく、具体的に実施していくという事で足下の政策動向を簡単にご紹介したいと思います。

大きく三つありまして、一つはグリーンイノベーション基金の今の動き、それから令和4年度の予算というものに向けた今要求している予算の体系ラインナップの状況。それから今、車という所によりフォーカスした説明をいたしましたが、製造業者としてビジネスとして、各企業自身が再エネの調達をどうしていくのかということが、足下喫緊の課題になっていると認識しています。その部分について省庁の方の動きですと、PPAと呼ばれるような再エネを自ら投資することの支援といった事の仕組みについての政策動向のご紹介をしたいと思います。

リチウムイオン二次電池 –課題と対応（概要）–

まず機器のところですが、電池というものについて、先ほども申し上げた通り、やはりこれは新しい電動化社会における最重要の戦略のひとつだというのが、グローバルの共通認識になっていると思います。一方で電池について様々な可能性と同時に、今の時点ではまだ課題があります（図15）。コスト面、エネルギー密度をどう高めるか、経年劣化、安全性の問題、充電時間、そして資源制約といったところで、急激に需要が拡大する中でこの資源をちゃんと安定的に、それからサステナブルな形で確保できるのかということです。こうしたことについて制度もさることながら、やはりイノベーションがもう一段二段と必要になってくると考えております。

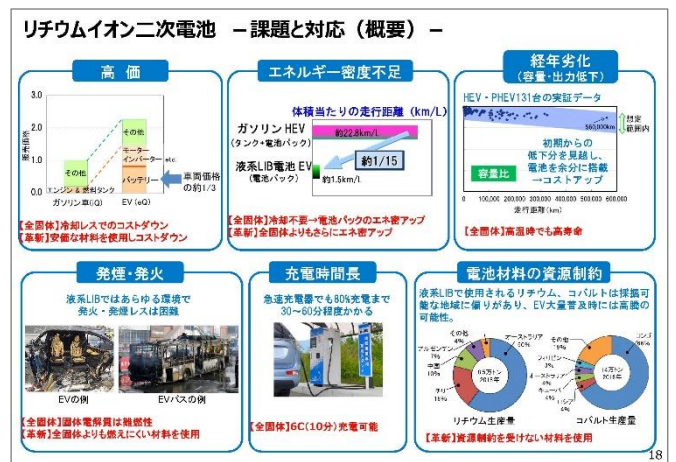


図 15

電池産業 –技術進化–

そういったイノベーションを進めていく中で、今の液体の電池、そこから全固体電池が早期に実用化へ、それから市場に投入して、さらにその先まで行った革新型的の電池の開発といったことを一体的に推進していく必要あるのと思います（図16）。

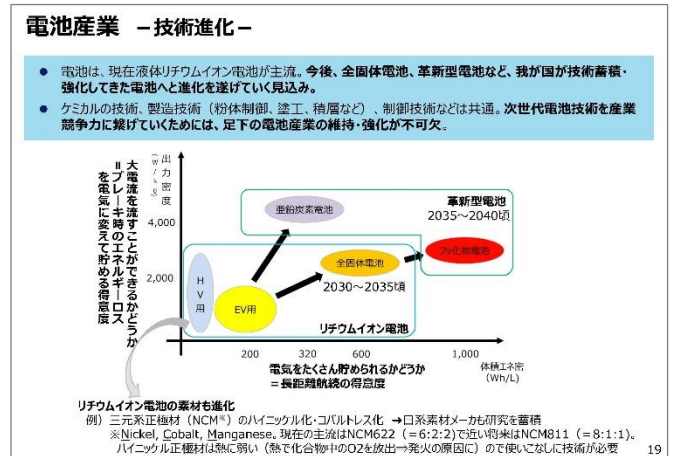


図 16

GI基金における「自動車・蓄電池関連PJ」の全体像

そうした中で、このグリーンイノベーション（GI）基金は、洋上風力とかペロブスカイト型太陽電池とか、他の水素とか他の分野もありますが、この自動車蓄電池関連のプロジェクトは一個明確に位置づけであります（図 17）。その中で高性能の電池の開発ということをしかりやっているということになります。本日のカーボンニュートラルと少しズレますが、このプロジェクトの全体像といたしましては、左の方にあります次世代電池それからモーターの開発という塊と、それから真ん中のところの塊にあります車載コンピューティングとかシミュレーション技術の開発といったところ、そして右に、もう少し地域面に見たときのこのスマートモビリティの社会の構築といったような取組というところを全体のプロジェクトという形でやっております。これは三位一体であり、それぞれがそれぞれ順に関わり合ってきますので、これを三位一体でありながら自動車単体それから交通量の最適化、様々な形で自動車それから自動車部門のカーボンニュートラル化を進めていく必要があるということです。技術面の観点についてはこうした形のしっかりした体系で、技術開発というものが一つの鍵になるという認識のもとでしっかり進めていきたいと思っております。

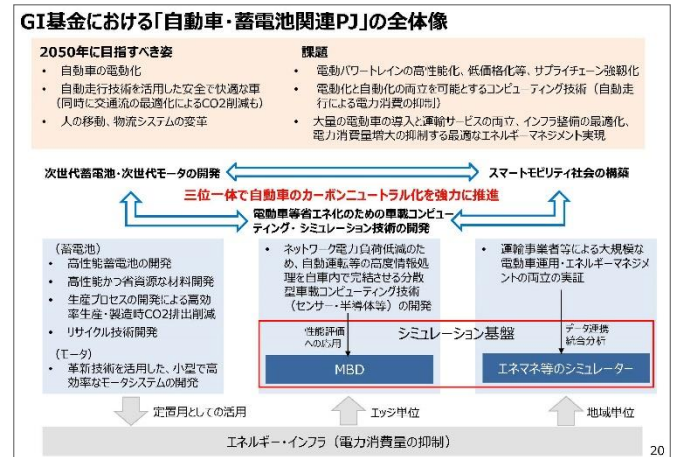


図 17

GI基金を活用した次世代蓄電池・次世代モーターの開発

その中で、電池について特化した形でお話すると、三つ大きな塊でこの議論をすでに一度、基金の方の審議会でもやって議論を進めておりますが、一番左にあります「高性能の蓄電池材料の研究開発」というようなこと、それから塊の二つ目になる「リサイクル関連の技術開発」、一番右にあります「モーターシステムの高効率化」といったような塊といった戦略的な研究開発の後押しとをやりたいところです（図 18）。



図 18

令和4年度概算要求（自動車関連予算）

図 19 が来年度¹ の予算要求です。 どのような形でこの政策支援をしていくのか、全体の要求の体系についてご説明いたします。

右上の 466 億円という今年度² の予算から、来年度の要求 712 億円となっており、これは省内の狭き門であり、うちの担当の者たちも必死に頑張ってくれて、METI 全体の中でも最重要課題のひとつだというようなことで、リソースを貼っていただくということをこの夏³ で達成しています。 もちろんこれから財務省との折衝でもありますので、最後の仕上がりはこのまま取れるわけではないと思いますが、我々の METI としての自動車部門のところの重要性ということのある種の決意の現れと思います。

大きく分けて黄色いところが研究開発実証、真ん中でサプライチェーンの業態転換再構築、そして右側で導入支援とカテゴリしています。一番左で先ほども申し上げた基金について、その全固体の開発自体はしつつ、合わせて令和 4 年度の予算でも、評価技術の開発といったようなこと、それからその先に行くような革新型の電池開発といったようなものについては引き続き当初予算の方でもしっかり支援をしていくということになります。それから燃料電池の開発とか水素供給のインフラ開発ということで研究開発のところは引き続きしっかり要求していくということになります。それから真ん中のところは先ほど申し上げたそのグリーン成長戦略の中の一つの大きな課題である「攻めの業態転換」、「事業再構築」をどう支援していくということで、サプライヤーの方々の転換支援ということ、新しく新規要求をしてゆくことです。一番右のところ、やはりさはさりながら、この初期需要に対しての導入支援が不可欠であるという認識のもとで、CEV 補助金についても 155 億円に対して 335 億円ということで、2 倍を超えるような規模の要求ということもしつつ、水素ステーションの整備ということも引き続き進めてくるところです。

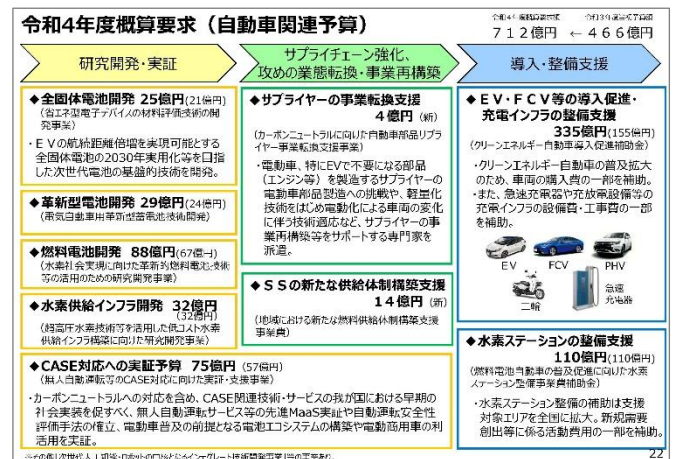


図 19

クリーンエネルギー自動車導入促進補助金

CEV 補助金ですが、335 億円ということで、いろいろなクリーンエネルギーの自動車が、入り口のところでお客さんに受け入れられてもらうようなものをしっかり作っていきたくと思います (図 20) 。 その初期需要の中で技術開発を進めてもらい、より安くより高品質の物とつなげてくるような好循環を作っていきたくと思っています。また充電インフラ整備ということについても、やはり 0.2 歩ぐらい前に進んで、インフラが先に入っていないと車が増えないところもあると思いますので、こういった部分についてもしっかりやっていきたいと思っています⁴。



図 20

¹ 「来年度」：令和 4 年度 / 2022 年度 (講演時；令和 3 年 / 2021 年 10 月現在より；以下同様)

² 「今年度」：令和 3 年度 / 2021 年度

³ 「この夏」：令和 3 年 / 2021 年 夏

⁴ 令和 4 年度当初予算 155 億円 (別途令和 3 年度補正予算を獲得)

カーボンニュートラルに向けた自動車部品サプライヤー事業転換支援事業

図 21 は事業転換の支援についてです。右下ですが、いろいろなサプライヤーのところからの相談窓口の設置や、専門家の派遣と言ったことを、通常の中小企業から、自動車に特化した形でしっかり支援してよくなる枠組みをとということで新しく要求しているところです。

最後の塊は、最後の調達というところの話を少しさせていただきます。カーボンニュートラルに関する企業を取り巻く環境について、これまでは作ったものを売っていく、製品の品質で勝負できたという時代でした。新しい世界のトレンドとして、非化石の電気で製造しないと調達しないと、製造段階での CO₂ を削減しないと販売できないといったことが、今新しく世界の大きな動きとして出てきているのではということ。もしくはそういうリスクを感じながら、各社において非化石電気の調達や自社排出量を減らすための投資やクレジットの購入といったようなニーズが、足下の経営ニーズとしてかなり出ているのではと思っております⁵。

図 21

新たな非化石価値取引市場のイメージ

そうした中で一つは、このクレジットという部分につきまして、これまで非化石市場というのは、図 22 の下の部分のところにあるような形で、発電事業者が作った再エネ指定に関する証書は、小売電気事業者のみが購入して高度化法というホルドの目標達成に使うという仕組みでした。今回この大きな流れの中で、これを二つに分けて、上の新規という所にありますように、需要家の方が直接市場から購入できるような仕組みと再エネ価値取引市場というものを新しく創設するとなっています。

図 22

再エネ価値取引市場における当初の最低価格について

最近、9月24日⁶に制度検討し、作業部会がエネルギー庁のホームページにありますのでまずは詳細な部分見ていただければと思います(図 23)。

一番の関心だった価格の部分につきまして、今現状 1.3 円/kWh が最低価格になっています。これは世界と戦う競争力が必要な企業にとって、十分海外と遜色のない形での購入ができるように、これらのアンケート等にも各社にもご協力いただきながらご検討した結果として、一番下のところがございますが取引と開始当初の暫定措置として最低価格を 0.3 円/kWh へという形で大幅に引き下げた市場として始めようとなっています。

図 23

⁵ 4.1 億円で獲得

⁶ 2021 年 9 月 24 日

再エネ価値取引市場に向けた今後のスケジュール

図 24 の通り、具体的なスケジュールとして⁷、9 月の下旬の議論を踏まえ、11 月 19 日から 26 日ということで、第 1 回のこの需要家の方々に向けたオークションというものが開始されるという状況です。10 月の中旬には需要家それから仲介事業者に向けた説明会もされるということです。資源エネルギー庁のホームページ等でもご確認いただければと思います。

需要家主導による太陽光発電導入加速化補助金

ここまでが証書の話です。最後に皆様方の工場において、太陽光発電の自家用消費の物を屋根の上に乗せてということもだいぶ増えてきているのではと思います。そうした PPA への取り組みということ、特に多分オフサイトの方と思いますが、今年度⁸ 新しく 80 億円新規の予算ということで、今のこの FIT の仕組みだけではなく、むしろ皆様から直接再エネ事業者などと提携しながら、案件の開発をしていくというような所の中で、非 FIT のものについて FIT の支援がないとなかなか難しいところもありますので、非 FIT の案件の支援ということでのこの補助金というものを作っています

(図 25) . 環境省の方でも、多分オンサイトの方だと思いますが、予算要求をしています、この FIT という形で大量に作って電気に流すところから、むしろ各事業所において戦略的に事業所の工場内もしくは近隣の自治体なり事業者と提携しながらでの再エネの調達といったようなことが恐らくこのメーカー、それから事業者のイニシアチブで作って行くということが、今後必要になってくる時代に徐々に入ってきていると思います。こうした動きも後押ししながら、なるべく各社がスムーズに、そういう意味では非化石の電源にアクセスしながら世界で戦っていけるような仕組みを作っているということも自動車政策として重要では思っております⁹。

おわりに

冒頭の方から申し上げました通り、世界で大きなメガトレンドとしてこの電動化が起きています。2050 年に向けて多様な道筋を描きながらイノベーションを足下で早急に進めて行くということと同時に、やはりグローバルな産業として世界でどう戦っていくのか、その中で再エネの調達なども含めて国際的な競争力をどう維持していくのかということの大きな経営戦略ということが、重要な時代になってきているかと思っています。経済産業省としても、しっかりそこを二人三脚で頑張っていきたいと思っていますので、ぜひ皆様方におかれましても、時代の変化の中での大きな戦略の構築をしていただければありがたいと思います。

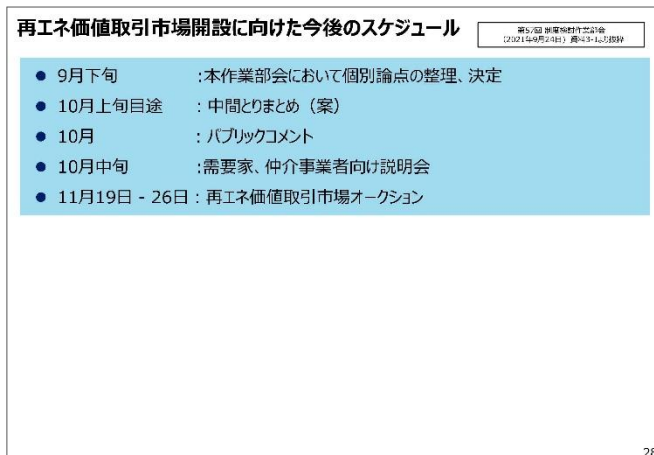


図 24



図 25

⁷ 以下、2021年

⁸ 「今年度」: 令和3年度/2021年度

⁹ 125.0億円で獲得

重量車のカーボンニュートラル技術の動向と位置づけ

Trends and Positioning of Carbon Neutralization Technologies for Heavy-Duty Vehicles

森田 賢治^{*1}

Kenji MORITA

自動車部門のカーボンニュートラル (CN) 達成のためにはバッテリー電気自動車 (BEV) の導入が選択肢の一つであるが、特に大型トラックには適用が難しく、バッテリーパックのエネルギー密度向上、急速充電の併用、電池交換式や Electric Road System (ERS) の採用などが必要となる。他に水素や合成燃料を用いる選択肢もある。これら CN 技術について文献等で調査した結果、再生可能エネルギーを由来とした場合の Well to Wheel 輸送効率は、低い側から順番に、合成燃料、水素、普通充電・急速充電・電池交換式の BEV、ERS となり、車載エネルギーの大きさは逆の順番となった。各 CN 技術毎に適する用途についても論じた。

1. はじめに

我が国は 2020 年 10 月に、「2050 年カーボンニュートラル (CN)」を目指す旨の宣言を行った。その達成のためには、運輸部門における二酸化炭素 (CO₂) 排出量の約 4 割を占める重量車分野の脱炭素化も推進して行く必要がある。バッテリー電気自動車 (BEV) の導入が選択肢の一つであるが、航続距離が短い、充電時間が長い、車両重量の増加といった課題があり、特に長距離輸送の大型トラックや都市間バスには極めて適用し難い¹⁾。この課題の解決策としてはバッテリーパックのエネルギー密度向上や急速充電の併用あるいは電池交換式の採用が考えられる。また、車両に大量のエネルギーを搭載するのではなく、走行中に道路側から車両に電気を供給する走行中給電すなわち Electric Road System (ERS) も有望と考えられる¹⁾。そこで本稿ではまず BEV の走行電気エネルギー確保のための各技術を抽出し整理する。次に大量のバッテリーが必要な大型トラックの BEV を対象として、バッテリーパックのエネルギー密度が変化した場合に、ERS による車両重量軽減効果や CO₂ 排出率がどう変化するかを述べる。さらに、BEV、ERS と水素や合成燃料等の CN 手段について、再生可能エネルギー (再エネ) を由来とした場合の Well to Wheel (WtW) 効率を述べる。最後に、[前報^{1\)}](#)で得た情報と合わせて重量車の CN 技術としてまとめる。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部

* 原稿受理 2022年5月10日

2. 重量車のCN技術

2.1 BEVの走行電気エネルギー確保技術の整理

BEVに十分な航続距離を持たせるための走行電気エネルギー確保技術は、図1に示すとおり、a) バッテリ等再充電可能エネルギー貯蔵装置 (RESS) 大容量化, b) 静止中急速エネルギー補給, c) 走行中給電, d) 太陽光パネル装着の4種に分類される。手動コネクタ式を除く静止中急速エネルギー補給と走行中給電は全て自動化対応が可能であるが、これは将来自動運転化を図る上でも大切な要素である。

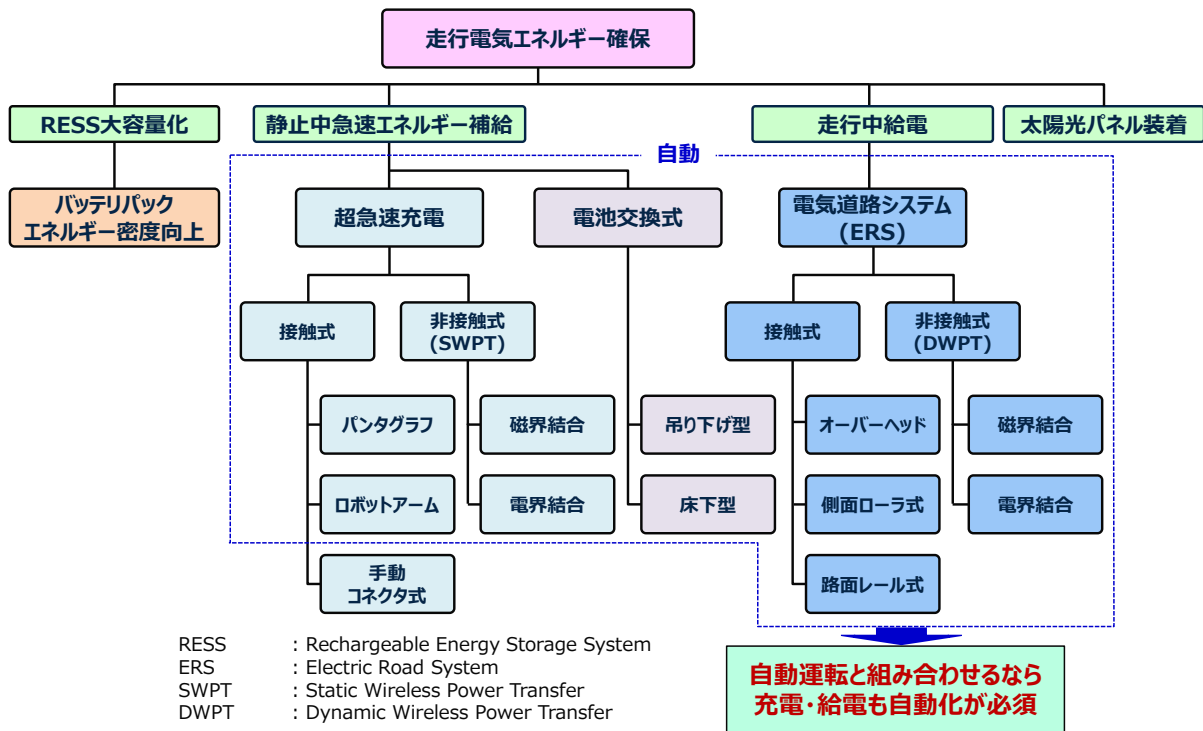


図1 BEVの走行電気エネルギー確保技術

2.2 バッテリーパックのエネルギー密度とERS効果との関係

車両総重量 (GVW) 25tクラスの大型トラックを対象に、従来の内燃機関自動車 (ICEV)、BEV、およびERSの3方式 (表1) について最大積載量、エネルギー消費率、CO₂排出率等を比較した。BEVの一充電走行距離は、一般社団法人日本自動車工業会の報告書「2020年度普通トラック市場動向調査」²⁾において、積載量10tクラス (GVW 22~25t) の1回の平均運行距離が498.5kmであることから、約3割の余裕を見て認証走行パターンで700kmに設定した。一般に実走行のエネルギー消費率は認証走行パターンよりも増大することから、ここではバッテリー劣化に大きく影響する急速充電を運行途中で行わずに済むよう、十分に長い一充電走行距離を想定した。ERSは、非接触給電 (Dynamic Wireless Power Transfer: DWPT) 方式とした。DWPTは一般道への設置も可能であることから、主要幹線道路 (高速自動車道および一般道) への設置を想定し、一充電走行距離を100kmに設定した。車両重量は公開データ等を基に各要素の重量を推定し設定した。

表1 計算対象車両

項目	計算条件
車両	大型トラック (GVW = 25 t クラス) ・ICEV : 現状最高性能のカatalog燃費を利用 ・BEV : 一充電走行距離 700 km を確保 ・ERS (DWPT) : 一充電走行距離 100 km を確保
重量	公開データ等を基に下記要素の重量を推定 ・エンジン ・変速機 ・燃料 + 燃料タンク ・モータ・インバータ ・減速機 ・DWPT システム ・バッテリーパック取付フレーム (バッテリーパック重量×0.2)
積載量	ICEV の最大積載量の 55 % (認証試験時の積載量) で固定 バッテリー搭載量により車両重量と最大積載量が大きく変化するが、積載量が等しい条件下でエネルギー消費率とCO ₂ 排出率を評価するため、固定値 (8,164kg) とした。

計算結果を図2に示す。バッテリーパックのエネルギー密度は現行レベルの 100 Wh/kg から革新型電池レベルの 500 Wh/kg³⁾ まで変化させた。BEV の場合、エネルギー密度 100 Wh/kg ではバッテリーパック重量が 7 t にも達し、その分車両重量も増加した。結果、GVW 25 t 以下の区分内に収めるために最大積載量が減少した。交流電力量（エネルギー）消費率も 16%増加した。一方 DWPT の場合、バッテリー搭載量が少ないためエネルギー密度の影響を受け難く、エネルギー密度 100 Wh/kg においてもバッテリーパック重量は 1 t 以下、エネルギー消費率の増加も小さく抑えられていることが分かる。また、バッテリーパックのエネルギー密度がおよそ 400 Wh/kg 以上になると、ICEV に比した車両重量の増加が抑えられ、通常の BEV でも大型トラックとして成立する可能性の高まることが分かった。

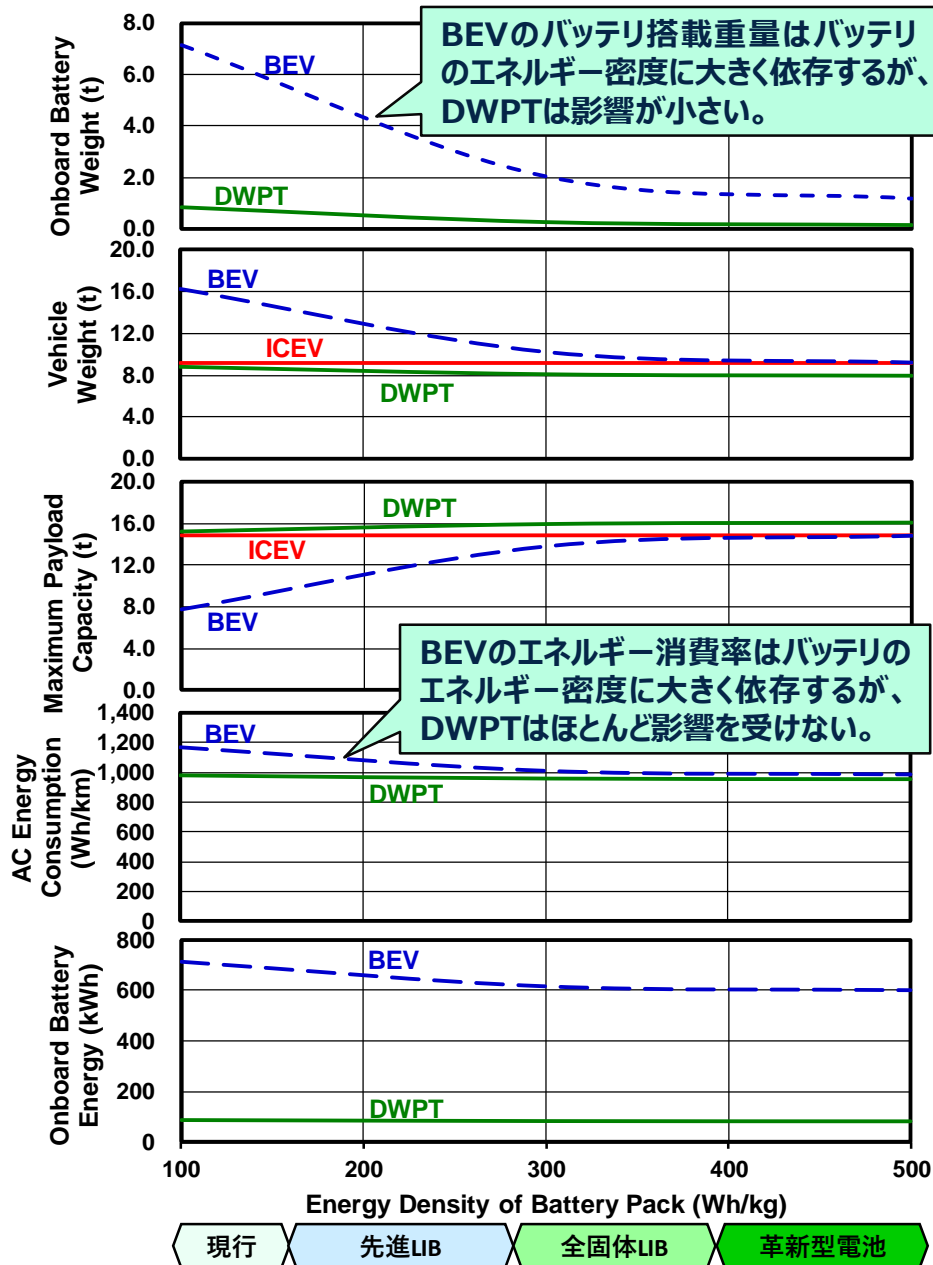


図2 バッテリーパックのエネルギー密度とDWPT効果との関係（大型トラック）

また、図3、図4には、BEVとDWPTのWell to Wheel (WtW) のエネルギー消費率とCO₂排出率を示す。図中の例えば「BEV-100」とは、エネルギー密度100 Wh/kgのバッテリーパックを搭載した大型トラックを示している。電動化によるエネルギー消費率とCO₂排出率の低減効果は発電原単位（発電所で一単位の電力量を製造する際のエネルギー消費量あるいはCO₂排出量）に大きく依存し、2014年の発電原単位⁴⁾では最大1割減程度、2030年の発電原単位（2015年度策定）⁴⁾でも最大4割程度の削減に止まることが分かった。2050年のCNに向けて、再生可能エネルギー（再エネ）の大量導入と電力供給の安定化の両立策が必要と思われる。

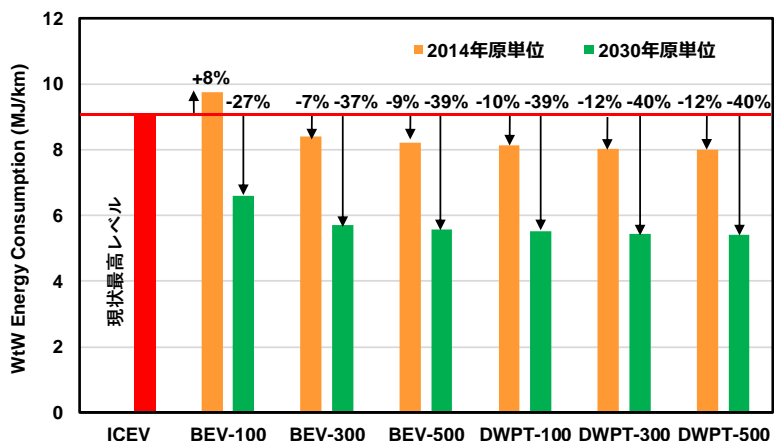


図3 WtWのエネルギー消費率（大型トラック）

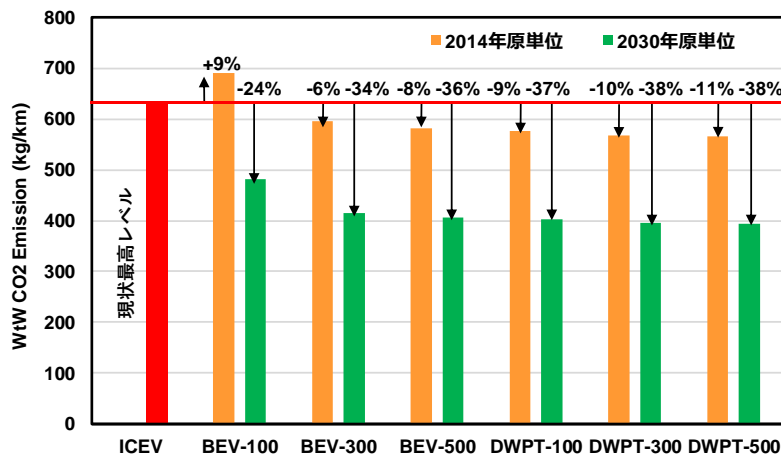


図4 WtWのCO₂排出率（大型トラック）

2.3 再エネ由来エネルギーを利用した場合の各種動力方式のWtW効率

ドイツ環境省が公表した ERS, BEV, 燃料電池自動車 (FCV), Power to Gas (PtG) を用いた ICEV の各大型トラックの WtW 効率⁵⁾を図5に示す。ERS・BEV の電力並びに水素・PtG 製造のための電力は再エネで供給した場合の想定である。ERS・BEV は再エネで発電した電力をそのまま使うため WtW 効率がそれぞれ 77%・62%と高いが、FCV・PtG は燃料製造時と車両走行時のエネルギー変換損失が大きいため、それぞれ 29%・20%と低くなる。

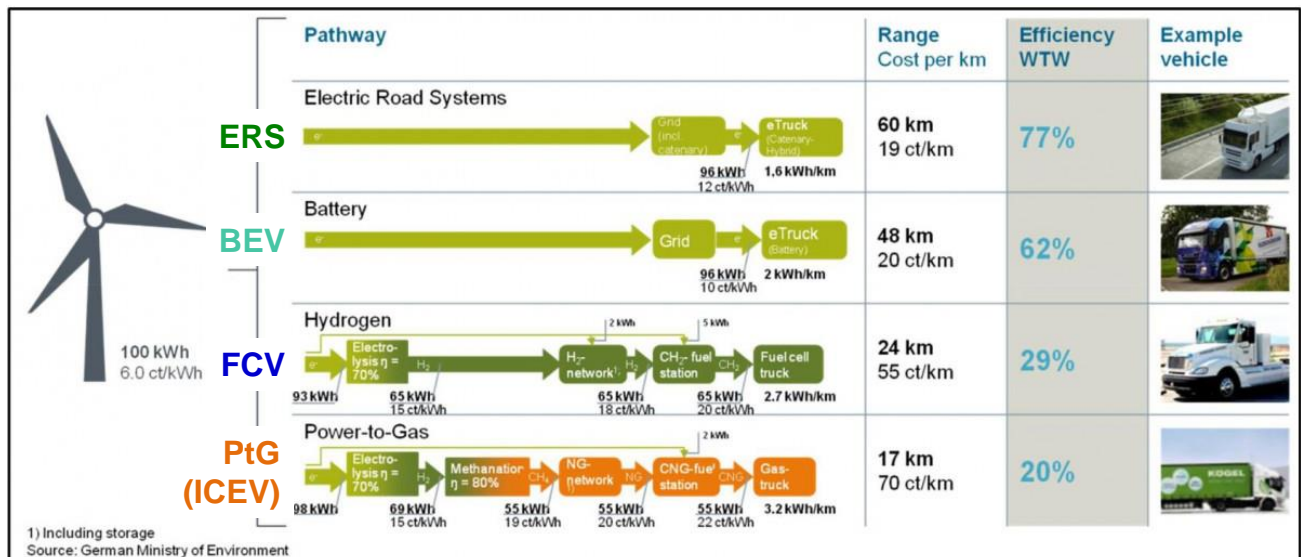


図5 再エネ由来エネルギーを利用した場合の各種動力方式のWtW効率 (大型トラック)⁵⁾

図6は、再エネによる電力・燃料製造から車両走行までの各段階の効率試算例であり、やはり Power to Liquid (PtL) や Power to Methane (PtM) は電気をそのまま利用する場合に比べ効率面では不利になることが示されている。なお、PtG, PtL, PtM は、いずれも再エネを用いて水電解した水素と、何らかの方法で回収した CO₂ とから合成した燃料であり、e-fuel とも呼ばれる（再エネ由来の水素自体を e-fuel に含める定義もある）⁶⁾。

図7には、社会実装の難しさと各種動力方式の WtW 効率との関係をまとめた。ERS は最もエネルギー効率が高いが、給電装置を「線で道路に設置する」ことが必要であり、公道、長距離用途への社会実装は困難を伴う。敷設・普及には産官学や業界横断的な取り組みが必要と思われる。BEV は、バッテリーのエネルギー密度が 400 Wh/kg 以上まで高まり、耐久性や資源枯渇の問題が生じなければ大型トラックでも成立する可能性がある。水素、PtG/PtL は、効率の観点から余剰電力を用いた燃料製造が有効である。

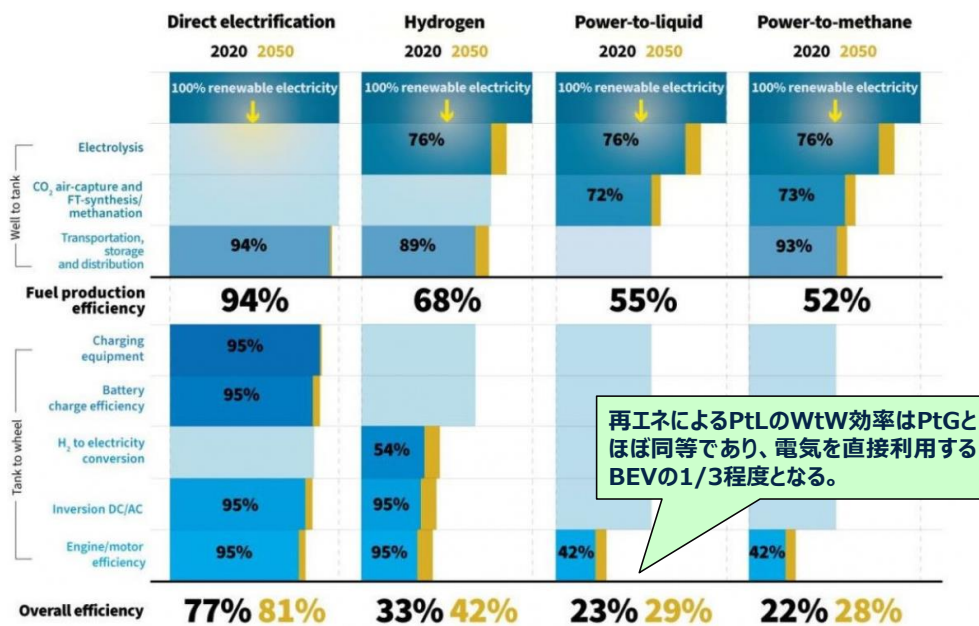


図6 再エネによる電力・燃料製造から車両走行までの各段階の効率（大型トラック）⁵⁾

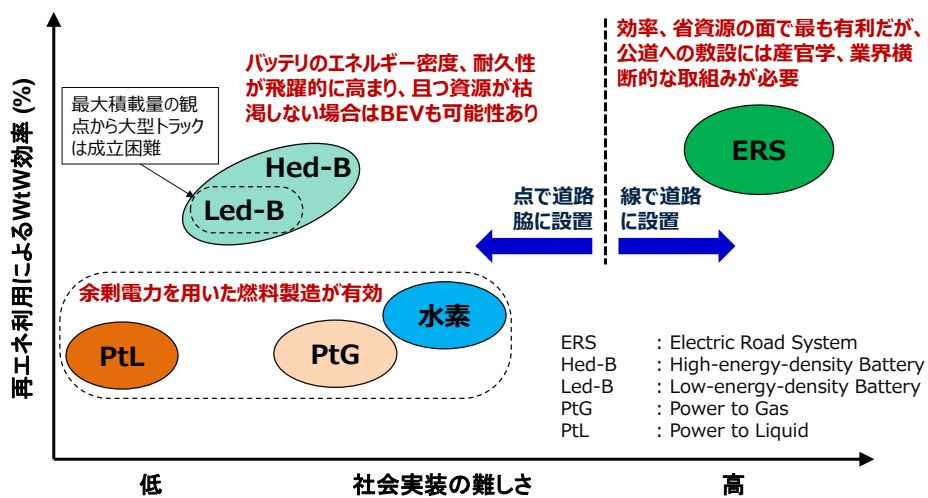


図7 社会実装の難しさと再エネ由来エネルギーのWtW効率

3. おわりに

本稿では重量車の CN 技術について解説した。各 CN 技術によって再エネ利用時の WtW 輸送効率や車両の自立性（インフラへの依存度）、特性が大きく異なることから、適した地域・ケースや用途も様々である。したがって、当面はどれか一つの方式だけが普及するのではなく、各技術がミックスされて使われて行くことになるかと予想される。また、電力や e-fuel をどのようにして確保して行くのか併せて検討を急ぐべきである。

参考文献

- 1) 森田：電動重量車の充電/給電システムに関する開発動向，JARI Research Journal, [JRJ20210301](#)（2021）
- 2) 一般社団法人日本自動車工業会：2020年度普通トラック市場動向調査（2021）
https://www.jama.or.jp/release/docs/release/2021/20210419_2020Trucks.pdf（参照 2022.05.10）
- 3) 経済産業省：自動車新時代戦略会議（第1回）資料（2018）
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/jidosha_shinjidai/pdf/001_01_00.pdf（参照 2022.05.10）
- 4) 電気事業低炭素社会協議会：電気事業における地球温暖化対策の取組み（2021）
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikvu_kankyo/shigen_wg/pdf/2021_001_05_01.pdf
（参照 2022.05.10）
- 5) CLEAN ENERGY WIRE：Electric highways offer the most efficient path to decarbonise trucks
<https://www.cleanenergywire.org/factsheets/electric-highways-offer-most-efficient-path-decarbonise-trucks>
（参照 2022.05.10）
- 6) 京都大学大学院 経済学研究科 再生可能エネルギー経済学講座，丸田，No.248 すれ違う日本と欧州のE-Fuel：日本のとるべき戦略
https://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/stage2/contents/column0248.html（参照 2022.05.10）

電動重量車の充電/給電システムに関する開発動向

Developing Trends of Charging/Electric Road Systems for Electrically Propelled Heavy-Duty Vehicles

森田 賢治*¹

Kenji MORITA

1. はじめに

2020年10月に菅首相から2050年カーボンニュートラルの達成を目指す旨の宣言がなされた。その達成のためには、運輸部門におけるCO₂排出量の約4割を占める重量車分野の低炭素化、脱炭素化も極めて重要であり、電動化を進めることが一つの方向性である。しかしながら、重量車に関しては、バッテリー等の車両側の技術的・経済的課題からインフラ側の対応、政府のエネルギー政策の方向性等、重量車メーカーだけでは解決困難な課題が多岐に渡り、電動化が進んでいない。そこで、重量車の電動化技術の動向およびその効果、導入に当たっての課題等を整理し、電動重量車の今後の方向性について見通しを得ることを目的に、国内重量車メーカーや改造車メーカー、電力業界、充電器団体、大学等研究機関へのヒアリングや文献情報の収集・整理を行った。本報ではその成果の一部として、静止中急速充電と走行中給電の動向について紹介する。

2. 重量車電動化の課題

ヒアリングの結果、重量車の電動車（ハイブリッド電気自動車（HEV）、プラグインハイブリッド電気自動車（PHEV）、バッテリー電気自動車（BEV）および燃料電池自動車（FCV））は、疲れにくい、運転し易い、振動・騒音が少ない等ドライバや乗客の評価が高い反面、下記課題のあることが分かった。

a) HEV：市販段階

- 燃費改善率、燃料費削減率が限られるため車両価格上昇分が中々回収できない。

b) BEV・PHEV：実証段階（一部市販段階）

- 大型ほど航続距離が不足
- 充電時間がかかるため稼働率低下、従来のディーゼル車と同じ運用が出来ない。
- 最大積載量がバッテリー搭載により減少（重量面、体積面）
- ユーザーがバッテリー・モータ等の耐久性に信頼をおけない（実績不足）。
- 乗用車用に作られた充電設備は、スペースの問題で商用車が入れない。
- 車両、充電器、電気基本料金共に高額であるため事業者のビジネスが成立しない。

c) FCV：一部で実証が始まった段階

- 水素充填プロトコルが現状は乗用車用のため充填途中で止まってしまう。
- 水素タンク容量が長距離用途では不足する。

d) 全般

- 海外とのパワーエレクトロニクス系電圧仕様の相違による部品調達先の制限、生産台数の少なさ（特にバス）により製造メーカーのビジネスが成立しない。

3. 課題解決に向けた開発動向

抽出された課題のうちBEV・PHEVの航続距離、充電時間、最大積載量に関わる解決策としては、バッテリーのエネルギー密度・出力密度の向上やモータ・回生ブレーキシステムの効率向上、各要素のコスト低減等車両側での対応が挙げられるが、一方でバッテリーの搭載量を出来るだけ減らし外部から電力を供給する

*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 2021年2月10日 / 初掲載 2021年3月

方法も考えられる。すなわち、静止中超急速充電と走行中給電である。それぞれの技術の開発動向について以下に述べる。

3.1 静止中超急速充電

静止中の超急速充電システムとしては、手動の急速充電の他、横方向挿抜式（ロボットアームの一種）、パンタグラフ式、静止中非接触式（SWPT）、そして電池交換式が考えられる。各方式の特徴を表1にまとめた。

- 横方向挿抜式: 充電出力と効率は高いが、位置決め自由度が低く乗用車との共用も困難である。また、挿抜機構を車両側に設けた場合はそのコスト上昇が大きい。法令上の制約としては、道路法、道路交通法、火災予防条例、景観法がある。実証事例は少ないが、仏PVI社のWATTシステム¹⁾が挙げられる。
- パンタグラフ式: 横方向挿抜式とほぼ同様の得失をもつが、前後方向の位置決め自由度はやや高い。パンタグラフ本体には独Schunk社や中CSR社のものが使われ、既に欧、米、中、日（黒部ダム）等各国で実運用中である²⁾。
- SWPT式: 一般に出力が200 kW程度までと低く、電力の伝送効率も接触式に比べて低い。また、地上と車両のコイル間に金属異物を挟んだ場合、温度が上昇し火災発生の危険があるため対策が必要である。法令上の制約としては、道路法、道路交通法、火災予防条例、景観法に加え、電波法の制約を受ける。海外では、中 ZTE社、英 IPT Technology社、独 Bombardier社、米 Wenatchee社等のSWPTシステムが実運用されているが、国内では実証試験運用で終了している²⁾。なお、ユタ州立大学が主宰するコンソーシアムSELECTでは、1 MWクラスのSWPTシステムの実証試験を計画しているとのことである。
- 電池交換式: ステーションにて充電済みの電池とパックごと交換するシステムであるため、充電の待ち時間が不要になるのが最大の利点。充電出力や伝送効率の問題もないが、電池交換機構を設ける必要があるため、車両側に構造上の制約が生じる。また、電池交換を自動化する場合はインフラ側のコスト上昇につながる。一般に乗用車との共用も不可能である。エネルギー貯蔵装置として現在一般的になっているリチウムイオン電池は消防法上危険物として扱われるが、JFEエンジニアリング社等で実証中のステーションは小規模（電池容量40 kWh×8個）であるため消防法の制約を受けない。コン

表1 静止中超急速充電

種類	横方向挿抜式 ロボットアームの一種 	パンタグラフ式 	SWPT式 	電池交換式 
技術的到達状況	実績少数	実績多数	試験運用例多数	中国で実績多数
性能	充電出力	高 (-600kW)	高 (-600kW)	低 (~200kW) ^{注)}
	効率	高	高	中
	位置決め自由度	低	中	低
	乗用車との共用	不可	不可	可
安全性	車両構造制約			交換機構制約
	健康影響	-	-	-
コスト	異物検知	-	-	必要
	車両側	高 (挿抜機構)	高 (パンタグラフ)	低
法令上の制約	インフラ整備	低	低	高
	道路法 ⁶⁾ 道路交通法 ⁶⁾ 火災予防条例 ⁶⁾ 景観法 ⁶⁾	道路法 ⁶⁾ 道路交通法 ⁶⁾ 火災予防条例 ⁶⁾ 景観法 ⁶⁾	電波法 ⁶⁾ 道路法 ⁶⁾ 道路交通法 ⁶⁾ 火災予防条例 ⁶⁾ 景観法 ⁶⁾	消防法 (1000L以上のLIBを保管する場合)
社会受容性			安全性実証必要	
重量車への適性	高	高	高	高
実現時期	試験運用中 ・仏 PVI WATT	実運用中 ・独 Schunk ・中 CSR ・日 Schunk	実運用中 ・中 ZTE ・英 IPT Technology ・独 Bombardier ・米 Wenatchee	実運用中 ・中 バス ・日 JFE/いすゞ

注) ユタ州立大SELECTにおいて1MWクラスのWireless Power Transfer (WPT) を研究中との情報あり。

ビニの配送トラック等24時間稼働して充電の待ち時間を取れない用途や、ごみ収集車等自ら発電した電力を自分たちで使いたいケース等で有効と考えられる³⁾。

3.2 走行中給電

走行中給電システム(ERS)としては、オーバーヘッド式、側面ローラ式、路面レール式、非接触(DWPT)式が考えられる。各方式の特徴をまとめた結果を表2に示す。

- **オーバーヘッド式**：Siemens社等で10年ほど前から研究開発がなされており、既に第3世代のシステムとなっている⁴⁾。給電出力は600 kW、伝送効率も最大97%と優れている。架線を重量車の全高よりも高い位置に張っているため、歩行者・二輪車への安全対策は特に不要である。パンタグラフを設けるために車両側のコストが高くなる。インフラ側のコストは、路上接触式や側面ローラ式より高い2.7-3.2億円/kmと試算されている。法令上の制約としては、道路法、道路交通法、火災予防条例、景観法に加え、鉄道事業法が適用される。国内ではデッドマン装置が義務付けられる。スウェーデンやドイツ等の公道で実証試験が進展しており、ERSとしては最も実用段階に近いシステムと言える。ただし、一般道への設置は美観の問題が生じる可能性もあり、また、乗用車との共用ができない課題が残る。
- **側面ローラ式**：ホンダが開発し試験路での実証試験が行われている^{4),5)}。給電出力は450 kWと高く、重量車の走行に必要な電力を十分に供給可能である。伝送効率は95%と報告されている。車両側面よりガードレールに向かって給電ロッドを出す形になるため、歩行者・二輪車への対策が必要になる。インフラ側はスイッチング動作が不要になるため他方式に比べてコストが最も安く、DWPT式の1/20程度と言われている。法令上の制約は路面レール式と同様である。また、乗用車との共用も可能である。
- **路面レール式**：路面への設置深さの異なるElways社、Alstom社、Elonroad社、等の方式について実証試験がなされている⁴⁾。給電出力は現状では240 kW、伝送効率は最大で97%である。地表に送電線を張り巡らすため、歩行者等が感電しないよう対策が必要であるが、この中では深い位置に設置されるElways社の方式が最も対策し易いと推察される。コストは、自動で送電線を探し出して接続する受電装置を持たせるために車両側が高くなる。インフラ側のコストは0.56-1.9億円/kmと試算されている。法令上の制約としては、道路法、道路交通法、火災予防条例、景観法が想定される。路上に設置されるため乗用車と共用可能である。

表2 走行中給電システム

種類	オーバーヘッド式 	側面ローラ式 	路面レール式 	DWPT式 	
技術的到達状況	鉄道も含め最も実績あり	新しい技術だが障害は少ないか	様々な環境下の実用性検証必要	基礎研究段階	
性能	給電出力	~600kW ⁴⁾	~450kW ⁵⁾	~240kW ⁴⁾	~200kW ⁴⁾
	効率(平均)%	~97(87) ⁴⁾	95~ ⁴⁾	~97(87) ⁴⁾	~91(73) ⁴⁾
安全性	健康影響	-	-	-	検証必要
	異物検知	-	-	-	必要
	歩行者・二輪車	-	対策必要	対策必要	対策必要
コスト	車両側	高 ⁵⁾	低 ⁵⁾	中 ⁵⁾	中 ⁵⁾
	インフラ整備	2.7-3.2億円/km ⁴⁾	非接触式の1/20 ⁴⁾	0.56-1.9億円/km ⁴⁾	0.62-6.2億円/km ⁴⁾
法令上の制約	鉄道事業法 道路法 ⁶⁾ 道路交通法 ⁶⁾ 火災予防条例 ⁶⁾ 景観法 ⁶⁾	道路法 ⁶⁾ 道路交通法 ⁶⁾ 火災予防条例 ⁶⁾ 景観法 ⁶⁾	道路法 ⁶⁾ 道路交通法 ⁶⁾ 火災予防条例 ⁶⁾ 景観法 ⁶⁾	電波法 ⁶⁾ 道路法 ⁶⁾ 道路交通法 ⁶⁾ 火災予防条例 ⁶⁾ 景観法 ⁶⁾	
社会受容性	一般道への設置は美観が問題か	自動車専用道路への設置が前提	歩行者等への感電防止が前提	健康影響が問題ないことが前提	
乗用車との共用	不可	可	可	可	
重量車への適性	高	高	高	高	
実現時期	公道で実証中	試験路で実証中	試験路で実証中	試験路で実証中	

- DWPT式：現状は基礎研究段階であり，給電出力200 kW以下，伝送効率91%以下程度とされる⁴⁾。健康影響については今後の検証が必要であり，歩行者・二輪車への安全対策も必要である。また，SWPTと同様，異物検知も必要になる。コスト面では，受電コイル装着だけで済む車両側は他方式に比べ最も低くなる利点がある。インフラ側のコストは0.62-6.2億円/kmとされており，かなり幅のある見積となっている。乗用車と共用可能である。

4. まとめ

BEV, PHEV, HEV および FCV それぞれの大型車への適性について，1日当たり走行距離と車両総重量(GVW)との関係に整理した結果を図1に示す。

- 走行距離の短い配送トラックと路線バスは超急速のオポチュニティ充電あるいは電池交換式によるBEVに適性がある。また，走行距離の長い都市間バスと長距離トラックはHEV, BEV (あるいはPHEVか) に適性があり，走行中給電の活用可能性がある。FCVについては本稿ではあまり触れなかったが，長距離トラック用途では航続距離の観点から適性に課題があるものの，多くの用途をカバーできるポテンシャルがある。
- 電池交換式は，コンビニの24時間配送トラックやごみ収集車等，稼働時間内に充電の待ち時間が取れない用途に有効である。PHEVは比較的汎用性が高いが，大容量電池に加えてエンジンを有するため車両コストが高い。

走行中給電システムはインフラに関わる課題であることから，自動車業界単独では技術開発・導入が困難である。産学官が共同で技術開発だけでなく経済成立性やビジネスモデル，規制緩和なども含め検討して行く必要がある。

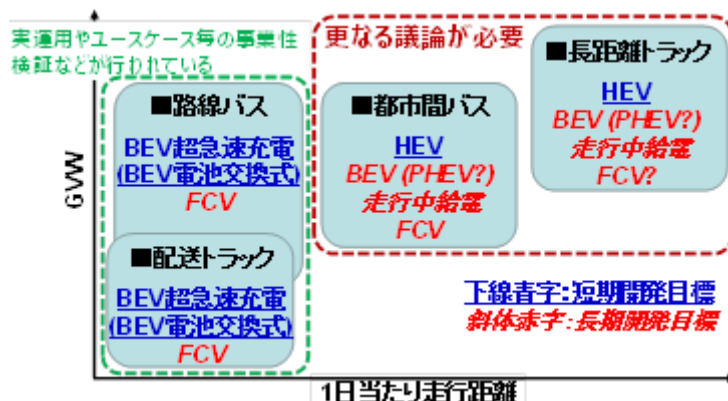


図1 各電動車両技術の重量車への適性

謝辞

本報告は，2019年度国土交通省/交通安全環境研究所委託業務で得られた成果の一部である。調査にご協力頂いた全ての方々に，ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) <https://btob.nice.aeroport.fr/Professionals/Latest-news2/A-world-first-the-first-electrical-bus-with-unlimited-range-and-no-heavy-infrastructure-runs-at-Nice-Cote-d-Azur-Airport>
- 2) 高橋俊輔，ワイヤレス給電の技術動向，CHAdEMO第28回整備部会資料
- 3) <http://www.jfe-eng.co.jp/news/2018/20180918084303.html>
- 4) TRL ACADEMY REPORT PPR875 "Electric Road Systems: a solution for the future"
- 5) Takamitsu Tajima, 450-kW Conductive Dynamic Charging System, Proceedings of CERV 2020
- 6) NEDO報告書「次世代大型商用車への接触式大電力急速充電技術の事業性調査」等

中古 LIB の劣化診断方法

SOH Diagnosis Methods for Secondhand Lithium-Ion Batteries

安藤 慧佑*1

Keisuke ANDO

中古電気自動車の査定や中古車載リチウムイオン電池の再利用に向けた電池の選定のために、リチウムイオン電池の健全度を精度よく診断する技術（劣化診断技術）の開発が国内外で進められている。本稿では、劣化診断技術である『充電法』、『部分充電法』、『過電圧法』、『交流インピーダンス法』について、それぞれの概要を紹介するとともに、我々が取り組んでいる新しい劣化診断法の開発についても紹介する。

1. はじめに

カーボンニュートラルや SDGs など、環境問題に対する意識の高まりや各国の政策等により、リチウムイオン電池（LIB）を搭載した電気自動車（EV）の普及が進められているが、課題の一つとして車載 LIB の劣化による航続距離の低下が挙げられる。LIB の性能（容量、出力）は充放電を繰り返すことによって劣化（サイクル劣化）する一方、電池を使用しなくても劣化（保存劣化）する¹⁾。車載 LIB は、ユーザーによって温度環境、走行負荷（加速時は出力／減速時は回生）、充電頻度と充電器出力が大きく異なることから、その劣化挙動は様々だと考えられる。

車載 LIB の劣化は航続距離を低下させるだけでなく、中古 EV の査定を難しくしてしまう。これは、同じ年式、同じ積算走行距離（オドメーター）であっても、中古 EV の電池温度や電池電圧等の履歴により生じる LIB の劣化具合の違い、つまり一充電航続距離の違いを簡単には把握できないためである。そのため経済産業省は、車載用 LIB の残存価値をユーザー自身が知るための標準的な手段を提供することを自動車会社に促すこと、EV の中古車両の価値評価適正化を進めることを目的とした「電池性能見える化ガイドライン」²⁾をまとめ、解決に向けて取り組んでいる。関連する技術的な取り組みとしては、車載モニターへの正確な航続可能距離の表示や、中古販売業者などが中古 EV の一充電航続距離を正確に把握できるように、一充電航続距離と相関関係にある LIB の健全度（SOH: State Of Health, 本稿では容量維持率を指す）を精度よく診断する技術（SOH 診断技術）の開発が国内外で進められている。この SOH 診断技術は、中古 EV の査定用途だけでなく、EV としての役目（1次利用）を終えた中古車載 LIB が、例えば定置用に再利用（2次利用）される際に、再利用に適した電池の選別にも使用することが期待される。（Fig. 1）

本稿では、国内外で開発されている各 SOH 診断技術の概要と、我々の取り組みについて紹介する。

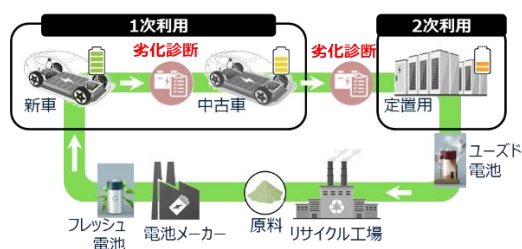


Fig. 1 LIBのリユース・リサイクルのイメージと劣化診断の活用

*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9月9日受理

2. SOH診断技術に関する調査

車載 LIB の SOH 診断技術には、大量の中古 EV を捌けるように一回の診断が短時間であること、診断するための LIB の状態（充電状態（SOC: State of Charge）や温度）が限定されないこと、中古 EV 取扱業者や LIB リユース業者が扱えるように高価な診断機を必要としないこと、車種ごとに異なる設計の LIB（電池材料構成）にも対応可能であることなどが求められる。SOH 診断技術として、『充電法』、『部分充電法』、『過電圧法』、『交流インピーダンス法』について、それぞれの原理と特徴を以下に簡単に紹介する。ただしそれぞれの診断精度については、同一の電池、同一の手順で比較したデータがないため、その絶対値は本稿では議論しない。

2.1. 充電法

充電法は、LIB を完全放電状態（SOC 0 %）から満充電状態（SOC 100 %）まで連続充電し、要した電気量を直接計測する最も正確な診断法である。Tesla ユーザーのコミュニティサイト (Tesla Battery Survey ³⁾) では、各ユーザーがこの充電法で測定した SOH を登録し共有されている。しかし EV の場合、通常使用では完全放電状態になる頻度が少ないことから診断のためにわざわざ完全に放電させる必要があること、一測定に数時間を必要とすることから大量の中古 EV を評価するには不向きな方法である。一方で、充電法で得られる充電曲線（電池電圧の変化）を解析する(株) 東芝が開発した充電曲線解析法 ⁴⁾ を組み合わせれば、電池容量の評価だけでなく、電池内部の劣化メカニズムや抵抗の変化を評価することが可能である。

2.2. 部分充電法

部分充電法は、LIB の充電方法である定電流一定電圧充電（または定電力一定電圧充電）のうち、定電圧充電部分に着目した方法である。一般的な LIB の充電は、充電初期は定電流（または定電力）で行われ、上限電圧に到達した後は、徐々に電流量を絞りながら定電圧で行われる。Z. Wang らの報告 ⁵⁾ によると、LIB が劣化すると定電圧充電時の電流が減衰する速度が遅くなる傾向や、一定の電流量まで絞られるまでの時間が長くなる傾向には SOH と相関がある。部分充電法では、こうした特徴（劣化速度、定電圧充電時間など）を事前にデータベース*2に登録し、測定対象の中古 LIB の定電圧充電挙動がデータベースのどの劣化状態に近いかにより SOH を診断する。この診断法は、2.1 の充電法とは異なり、充電開始時の SOC は限定されず、その分だけ診断時間は短くなる。しかし、診断精度はデータベースの拡充度*3により大きく依存すると考えられる。

2.3. 過電圧法

過電圧法は、LIB の通電負荷時の電圧 V が、無負荷状態の開回路電圧（OCV: Open Circuit Voltage）に対して、LIB の内部抵抗 R と負荷電流 I の積（ $I \times R$: 過電圧）だけ大きくなる関係を利用した方法である。LIB の SOH と内部抵抗 R の関係を事前にデータベース*2に登録し、測定対象の中古 LIB の過電圧（無負荷状態と負荷時の電圧差）から求めた内部抵抗 R がデータベースのどの劣化状態に近いかにより SOH を診断する。この診断法は、データベースにより決まる電圧範囲や温度範囲であれば、診断時の中古 LIB の状態は限定されない。また、LIB の通常使用時の電流と電圧変化をモニターするだけで、特別な診断装置が無くてもリアルタイムで診断可能であるが、過電圧は過渡応答を示すことから内部抵抗 R の算出にはどの時点の過電圧を用いるか注意が必要である。本手法は、東洋システム(株)⁶⁾は車載用電池向けに、新品 LIB と中古 LIB それぞれの電圧 V の割合から算出する内部抵抗増加率 ΔR を用いた診断技術を報告している。また東芝グループが電力系統用蓄電池システム向けに開発した電圧標準偏差法 ⁷⁾ は、過渡応答の影響を排除した過電圧法の応用系だと考えられる。

2.4. 交流インピーダンス法

交流インピーダンス法は、LIB のインピーダンスが測定する周波数によって異なる性質を利用した方法である。SOH 診断では、Fig. 2 に示すように LIB の SOH とインピーダンスに関するパラメータを事前にデータベース*2に登録し、測定対象の中古 LIB のインピーダンスがデータベースのどの劣化状態に近いかを判断する。この診断法は、データベースにより決まる電圧範囲や温度範囲であれば、診断時の中古 LIB の状態は限定されない。また、インピーダンス測定時間が数秒から数分程度の短時間で済み、測定周波数ごとに多数の情報（パラメータ）を持つことから診断精度の向上も期待できる。また、交流インピーダンスを直接測定するには高価な電気化学測定装置が必要であるが、逆ラプラス変換インピーダンス測定技術⁸⁾や矩形波インピーダンス測定技術⁹⁾を応用できれば通常の充電器等での交流インピーダンスの測定が可能になると期待できる。ただし、他の手法と同様に、その診断精度はデータベースの拡充度*3に依存すると考えられる。本手法は、エンネット(株)¹⁰⁾やヌヴォトンテクノロジージャパン(株)¹¹⁾などが報告している。

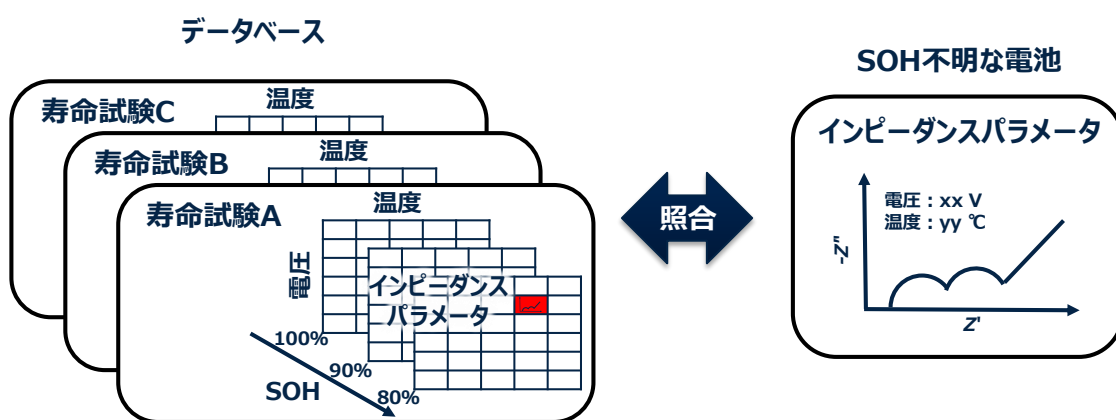


Fig. 2 データベースを用いたLIBのSOH診断方法のイメージ図（交流インピーダンス法）

*2 データベース： 2.2～2.4で紹介した診断方法は、類似のデータベースが必要となる。データベース作成には、まず対象のLIBごとに試験条件を変えた系統的な寿命試験を行い、劣化したLIBごとにSOHおよび特徴パラメータ（定電圧充電パラメータ、内部抵抗パラメータ、交流インピーダンスパラメータ等）を取得する。特徴パラメータは、1つのSOHに対して複数のLIBの状態（電圧、温度）で取得するのが望ましい。必要に応じて、診断を高速に行なえるよう、SOHに対して各パラメータを多項式補間し定式化する。

*3 データベースの拡充度： データベースを用いて中古LIBのSOH診断を精度よく行うためには、中古LIBの劣化条件がデータベースの寿命試験条件内であることが望ましい。これはデータベースの条件内での内挿補間では診断精度が高いことが報告されているが、条件外の外挿補間での診断精度については十分に示されていない。そのため、電池温度や電池電圧等の履歴が不明な、つまり劣化条件が不明な中古LIBに対応するためには、データベースの寿命試験条件をどれだけ拡充させられるかが重要になるが、その分だけ準備コスト（寿命試験からパラメータ取得までに要する時間・工数）がかかる。

3. 新しい劣化診断技術の開発

充電曲線解析法を除き、上述の SOH 診断手法はいずれも LIB の劣化メカニズムを考慮していない経験的な手法である。我々は、LIB の劣化メカニズムである電解液の分解・固体電解質界面層 (SEI: Solid Electrolyte Interphase) の形成、正極や負極の劣化により生じる正極と負極の反応領域がずれる現象¹²⁾(Fig. 3) に基づく、新しい劣化診断手法の開発に取り組んでいる¹³⁾。

具体的には、LIB の正極由来のインピーダンスは正極自身の SOC (正極 SOC) により変化することに着目し、負極 SOC 0%地点 (= 電池 SOC 0%) での正極 SOC をインピーダンス測定により推定することで正極と負極の反応領域のズレ量を評価する方法である。この方法は、LIB の劣化メカニズムに基づくため小さなデータベースでよいことが最大のメリットであるが、正極由来のインピーダンスが正極 SOC により変化する LIB 種に限定されること、EV での到達頻度が少ない電池 SOC 0%付近でのインピーダンス測定が必要なことがデメリットである。

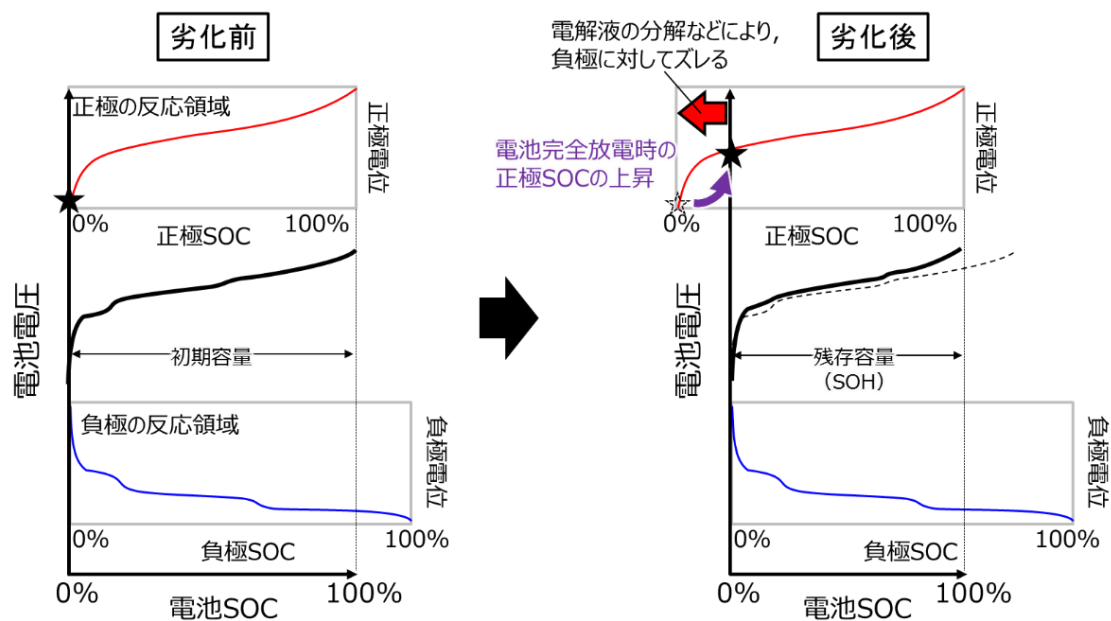


Fig. 3 LIBの劣化メカニズム（正極と負極の反応領域のズレ）と電池完全放電時の正極SOCの変化

謝辞

本調査および新しい劣化診断技術の開発は JSPS 科研費 JP20K14729 の助成を受けたものである。関係各位へ謝意を表す。

参考文献

- 1) J. Vetter, et al.: Ageing mechanisms in lithium-ion batteries, J. Power Sources, Vol.147, p.269-281 (2005)
[doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.01.006](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.01.006)
- 2) 電動車活用社会推進協議会: 電池性能見える化ガイドライン Ver 1.0
http://www.cev-pc.or.jp/xev_kyougikai/xev_pdf/xev_kyougikai_guideline_jp.pdf (参照 2022.9.9)
- 3) Tesla Battery Survey:
<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSfrteuONm9qy1Eh0lgLTu6FzP2qR8-3mHTt6e53849ombZ03w/viewform>
https://docs.google.com/spreadsheets/d/1c3m9wqlxPB08ziDYVm5cHRzNCHZbtI_2vVh1XksX9Jc/edit#gid=657708069
(参照 2022年9月9日)
- 4) 森田 朋和ら: 内部状態の推定により電池の健全性を可視化する充電曲線解析法, 東芝レビュー, Vol. 68, No. 10, p. 54-57 (2013)
https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2013/10/68_10pdf/f07.pdf (参照 2022年9月9日)
- 5) Z. Wang, et al.: State of health estimation of lithium-ion batteries based on the constant voltage charging curve, Energy, Vol. 167, p. 661-669 (2019) [doi: 10.1016/j.energy.2018.11.008](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.008)
- 6) 報告書: バッテリーリユースのグレーディング技術実証 (直流法による高速グレーディング (劣化診断) 技術検証) ,
https://www.mitsubishi-motors.com/jp/sustainability/environment/recyclelow/pdf/DC_Method_detail.pdf
(参照 2022.9.9)
- 7) 山本 幸洋ら: 電力系統用蓄電池システムの健全性評価手法, 東芝レビュー, Vol.73, No.6, p. 46-50 (2018)
https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2018/06/73_06pdf/f01.pdf (参照 2022年9月9日)
- 8) 岡田 修平ら: リチウムイオン電池の劣化診断技術の開発, 横河技報, Vol.56, No.2, p. 27-30 (2013)
<https://web-material3.yokogawa.com/19/13319/tabs/rd-tr-r05602-007.jp.pdf> (参照 2022.9.9)
- 9) 横島 時彦ら: 矩形波インピーダンス測定法の開発と電気化学デバイスへの応用, 表面技術, 72巻, 9号, p. 467-474 (2021)
[doi: 10.4139/sf.72.467](https://doi.org/10.4139/sf.72.467)
- 10) 小山 昇ら: 高速パルスおよび交流インピーダンス測定による市販電池の劣化状態診断法の開発, 電気化学, 89巻, 2号, p.107-118 (2021) [doi: 10.5796/denkikagaku.21-FE0012](https://doi.org/10.5796/denkikagaku.21-FE0012)
- 11) 報告書: バッテリーリユースのグレーディング技術実証 (交流インピーダンス法による高速グレーディング (劣化診断) 技術検証) ,
https://www.mitsubishi-motors.com/jp/sustainability/environment/recyclelow/pdf/AC_Method_detail.pdf
(参照 2022.9.9)
- 12) K. Ando, et al.: Degradation Diagnosis of Lithium-ion Batteries with a $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ and LiMn_2O_4 Blended Cathode Using dV/dQ Curve Analysis, J. Power Sources, Vol.390, p. 278-285 (2018)
[doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.04.043](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.043)
- 13) 安藤 慧佑 (100%) , 「二次電池の劣化診断方法」, 特願2022-088016, 2022年5月30日出願.

自動車用燃料電池における水素燃料および空気中の 微量成分評価に対する JARI の取り組み

JARI's approach for evaluation of contaminants derived from hydrogen fuel or air
in automotive fuel cells

松田 佳之*¹ 高橋 研人*¹ 沼田 智昭*²
Yoshiyuki MATSUDA Kento TAKAHASHI Tomoaki NUMATA
清水 貴弘*¹ 今村 大地*¹
Takahiro SHIMIZU Daichi IMAMURA

1. はじめに

二酸化炭素など温室効果ガス削減に向けた取り組みが全世界で進められる中、日本も 2050 年カーボンニュートラル・脱炭素化に向け、グリーン成長戦略が策定された¹⁾。この中で燃料電池は輸送関連産業において脱炭素化に向けた主要な技術として位置付けられている。中でも、燃料電池自動車 (FCV) は 2014 年から販売が開始されたほか、近年では商用車の市販化に向けた実証などが進められている。

一般財団法人日本自動車研究所 (JARI) では、1998 年から国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により、水素・燃料電池に係る研究開発や実証事業、基準・標準化等の普及基盤整備を進めてきた。その取り組みの一つである FCV 用水素品質規格は、JARI で取得した結果をもとに、国際標準化機構 (ISO) における国際規格 (水素燃料仕様: ISO 14687-2:2012, ISO 14687:2019) が審議され、欧州、米国などと協調しながら日本が審議を主導してきた²⁻⁴⁾。また、水素中不純物の評価技術をもとに、空気中の微量成分による燃料電池への影響度についても評価するとともに、被毒メカニズムを考慮した回復手法を提案してきた。本稿では、このような燃料電池における不純物の影響評価に関するこれまでの JARI における取り組みを紹介する。

2. 水素中不純物による影響評価への取り組み

2-1 水素燃料仕様 ISO14687-2: 2012年版策定までの取り組み

FCV に供給される水素は、低廉でかつ燃料電池の発電性能に影響を与えないような品質のものが求められる。もし水素純度が低い場合、成分によっては燃料電池の構成材料である白金触媒や電解質膜に吸着し、触媒活性やプロトン導電性を低下させることで発電性能を低下させる。その一方で、過度な品質要求は、水素品質管理の負担が増大する。自動車各社が FCV の実証試験を開始した 2000 年代前半において、水素中不純物が燃料電池の発電性能に及ぼす影響に関する研究は、一酸化炭素 (CO) や硫黄化合物などを中心に行われていたものの、FCV 用水素品質規格に関する検討は十分に行われていなかった。そのため、JARI では様々な原料から水素を作る工程で想定される不純物を選定し、その影響を網羅的に評価した⁵⁾。Fig. 1 に示すような JARI 標準セルを使用して燃料電池アノード側に不純物を含むガスを供給し、電圧低下への影響を調査した。その結果、当時存在していた水素品質規格では FCV への適用性に問題があることがわかったため、新たに FCV 用水素品質規格を策定することとなった²⁾。この規格策定は、日本が議長国を務め、日本がリードして海外と協調しながら進められた。とくに米国のハワイ大学やロスアラモス国立研究所とは、相互に燃料電池セルの性能測定に関するクロスチェックを実施し、各機関での燃料電池性能評価結果の妥当性を確認するなどして進められた^{6,7)}。

*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9月9日受理

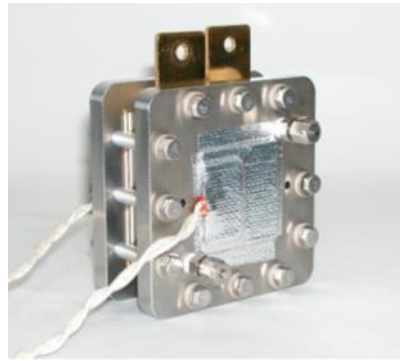


Fig. 1 JARI standard single cell

水素中不純物による影響の評価結果が蓄積する中で、とくにCO、硫化水素(H₂S)およびアンモニア(NH₃)の三成分が深刻な影響を及ぼす重要な成分と認識された。そのため、これらの成分については、白金担持量などMEA仕様や、燃料電池の運転条件による電圧低下への影響など詳細な検討を進めた⁸⁻¹²⁾。加えて、自動車における燃料電池システムを想定した水素循環系において、各種不純物の濃縮挙動についても評価した¹³⁾。これらの燃料電池への影響度に関する知見や、各不純物の分析下限などを考慮した上で、自動車会社および水素インフラ事業者などから構成される燃料標準化WGにおいて日本のスタンスが審議され、ISOでの議論を経て、2012年にISO 14687-2 (FCV用水素品質規格)として発行された。

2-2. 水素燃料仕様ISO14687:2019年版策定までの取り組み

ISO 14687-2は、導入期の限定された台数のFCVを水素品質に起因する性能低下から暫定的に守ることを主目的に策定されており、FCVや水素ステーションの普及拡大期に向け規格適正化させることを前提とされていた。そのため、2015年から規格改訂審議が開始された。この改訂審議は、欧州も積極的に議論に参加した。JARIでは主にCOおよびホルムアルデヒド(HCHO)、ギ酸(HCOOH)、有機ハイドライドに由来する炭化水素成分による影響を詳細に評価した。

COについては、水素製造の際に、天然ガス等の炭化水素を改質してから、圧力スイング吸着(Pressure Swing Adsorption: PSA)などにより精製した水素中に最も混入しやすい成分として知られている¹⁴⁾。一方でFCV側では、低コスト化に向けた白金担持量の低減や、高電流密度化、FCV起動時からの幅広い運転温度を考慮した場合、とくに60℃程度の比較的低い温度で、CO濃度が低濃度である0.2 ppmでも燃料電池性能を大きく低下させることがわかった¹⁵⁾。その一方で、COの規格を0.2 ppmよりも厳しくすることは、水素の品質管理上インフラ側への負担が大きく、その負担は水素コストに跳ね返ることになる。このことから、COの許容濃度の妥当性について水素製造側、自動車側の双方から活発に議論されていた。

そこでJARIでは、COが0.2 ppm程度の低濃度で水素中に混入した時の燃料電池電圧に及ぼす影響や、被毒軽減に係る現象を詳細に調査した。COが規格値程度に入った場合の吸着・酸化・脱離に係る反応挙動を、燃料電池運転中の排出ガス中のCO、CO₂を分析することで明らかにした¹⁵⁾。また、CO被毒は低負荷への負荷変動を伴った運転により軽減することも分かった^{16,17)}。さらに、Fig. 2に示すように、水素循環系による規格値付近における影響を評価した結果、一般的な燃料電池評価装置の構成である出口開放系に比べて、COによる電圧への影響が小さいこともわかった¹⁸⁾。これらの結果を自動車やインフラ事業者とも議論した上で、COの許容濃度は0.2 ppmを維持することとなった。

HCHOは、2012年時点のISO14687-2において0.01 ppmと定められていた。しかし、低濃度のHCHO分析への負担が大きいため、COと同等の0.2 ppmに緩和することが提案された。これと併せて、CO、HCHOおよびHCOOHの許容濃度の総和を合算して0.2 ppm以下とすることも提案された。JARIにおいて、HCHOを添加した水素を燃料として単セルを発電させ、その排出成分を分析した結果、燃料電池反応に影響を及ぼさないCH₄およびCO₂になることがわかった¹⁹⁾。また、Fig. 3に示すように、水素循環系で

は 2.0 A cm^{-2} までの高電流密度域までの範囲において、HCHO 濃度が 0.2 ppm でも、高純度水素の場合と電圧が同等であることを確認した¹⁹⁾。HCOOH による影響も評価した結果、 0.2 ppm ではほとんど影響を及ぼさないこと、また供給したギ酸は 0.6 V の電位印加時に燃料電池内でカソードに透過し、酸化されて CO_2 になることもわかった²⁰⁾。これらの結果や、海外における評価結果²¹⁾なども踏まえ、CO、HCHO および HCOOH の許容濃度の総和を 0.2 ppm 以下とすることに合意した。

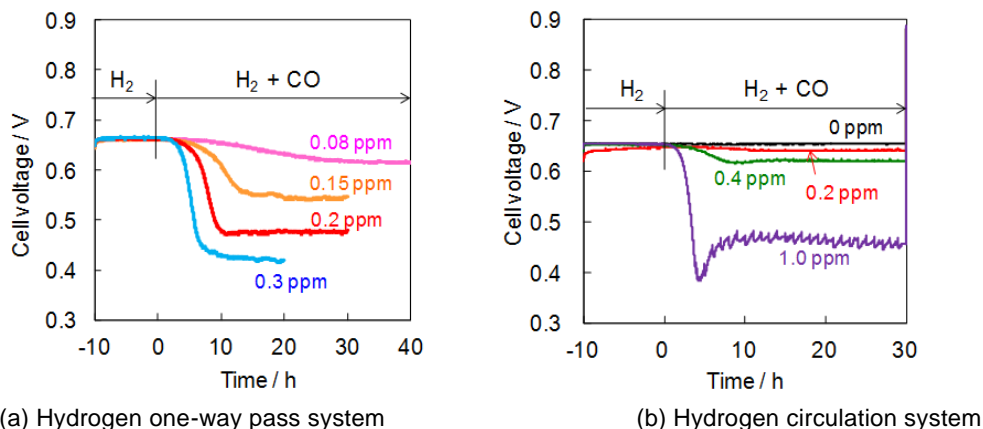


Fig. 2 Effect of CO in hydrogen fuel in hydrogen one-way pass system or hydrogen circulation system (60°C of cell temperature and 1.0 A cm^{-2} of current density): Open Access, CC-BY.¹⁸⁾

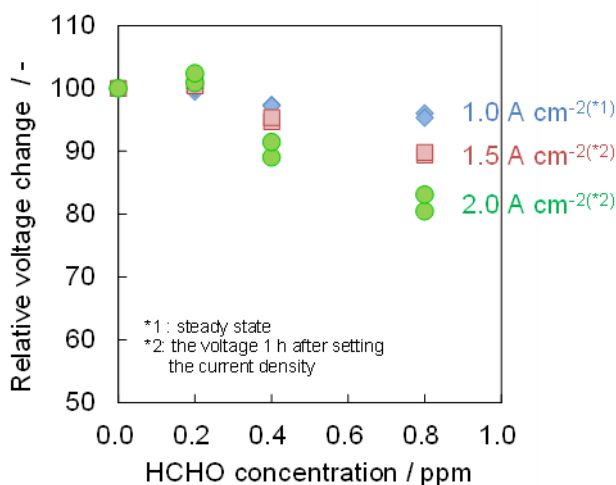


Fig. 3 Effect of formaldehyde on fuel cell performance in a hydrogen circulation system

また、将来の水素キャリアとして有望視される有機ハイドライド由来不純物による影響を評価した。有機ハイドライドは、トルエンなどの芳香族の水素化反応によってメチルシクロヘキサンなどの飽和環状化合物に転換させ、常温及び常圧で水素を貯蔵・輸送する媒体である²²⁾。これらの水素化・脱水素化反応および水素精製の過程で混入する恐れがある不純物の影響を評価した。結果の一例を Fig. 4 に示す²³⁾。いずれの成分においても 50 ppm の高濃度で供給しても電圧の低下は見られなかった。この結果や、水素循環系における影響度見極め結果から、有機ハイドライドに由来する不純物が現状の規格値 (C1 換算として 2 ppm) であっても燃料電池性能に影響を及ぼさないことが分かった。

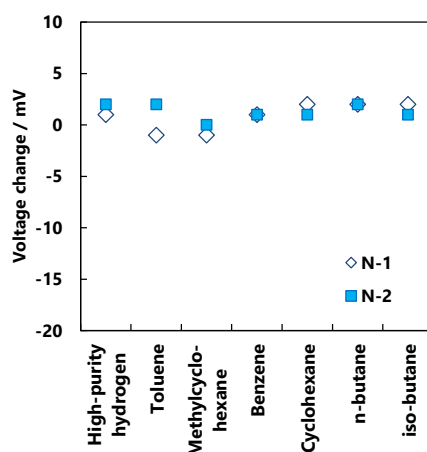


Fig. 4 Effect of impurities derived from organic chemical hydrides on fuel cell performance

3. 空気中の微量成分による影響評価への取り組み

燃料電池の酸化剤ガスとして使用される空気中には様々な微量成分が存在し、その成分によっては燃料電池反応を阻害させるものがある。具体的な例としては、火山ガスとしての硫黄化合物、人間の活動に伴い排出される NO_x や NH₃ などの窒素化合物、および海岸部における海塩粒子成分などがある。そこで空気中に含まれる微量成分を単セルに供給し、発電性能に及ぼす影響を明らかにするとともに、各成分による性能低下機構を解析した。

窒素化合物 (NO₂, NH₃) がカソードに入る場合電圧が低下するものの、精製空気の供給で可逆的に回復可能であり、かつ実環境条件に近い低濃度ではその影響は軽微であることがわかった^{24, 25)}。NO₂ の影響は濃度依存性が大きく、一方 NH₃ の影響は供給量に依存することがわかった。

これに対して、硫黄化合物 (SO₂ や H₂S) による性能低下は同条件の窒素化合物よりはるかに大きく、精製空気の供給のみでは完全には回復しなかった^{11, 24, 25)}。また硫黄化合物添加時の初期の性能低下は、化合物の総供給量により決まることもわかった。このことは、実環境下で想定される低い濃度でも、長時間の暴露により深刻な性能低下が引き起こされることを示している。さらに、硫黄化合物や窒素酸化物などの Pt 触媒の被毒成分は、電解質 (特にカソード触媒層中のアイオノマー) 劣化の加速因子としても働くことを明らかにした²⁵⁾。

海塩粒子成分である Na⁺は電解質のプロトン伝導性を低下させ不可逆的な性能低下を引き起こすが、電解質の劣化を抑制することがわかった。また Cl⁻は白金触媒を被毒すると共に Pt の溶解を促進して Pt 粒子の粗大化を加速させることを明らかにした^{24, 26)}。

4. 硫黄化合物による被毒回復手法の開発

これまでの章でも示したように、水素中及び空気中に含まれる硫黄化合物は燃料電池での反応を大きく低下させ、かつ被毒後に回復しにくい成分であることから、効率的な被毒回復手法が業界からニーズとして挙げられている。そこで、燃料電池単セルにおいて、補機に頼らずに車載上で実現可能な被毒を予防・回復する手法を検討した。

燃料電池セルにおいて硫黄被毒回復を実現するためには、①硫黄被毒後のアノードあるいはカソードを高電位の状態にして、硫黄を酸化させて硫酸イオンを形成し、その後、②低電位に切り替えることで吸着した硫酸イオンを脱離させる方法が考えられる²⁷⁾。これを車載上で実現させるためには、燃料電池の発電を停止する間のガス雰囲気制御することにより電位を変化させることが有効と考えられる。アノードにおける硫黄被毒回復手法（水素遮断法）による効果を、電圧回復への効果がある開回路電位保持（OCV）の場合と比較した結果を Fig. 5 に示す。(a) に示す被毒回復後の電圧はどちらの手法によっても同等であった。一方で、(b) に示すアノードの触媒表面積（ECSA）は、水素遮断法のほうが OCV の場合に比べ大幅に回復した^{28, 29)}。カソードにおける H₂S や SO₂ による被毒に対しては、燃料電池の運転停止中に空気遮断処理を行うことで、電圧が初期の値にまで回復することも明らかにした。このように、発電停止中のガス雰囲気制御による回復手法の適用により、硫黄被毒による燃料電池性能への影響を軽減できる見通しを得ることができた。

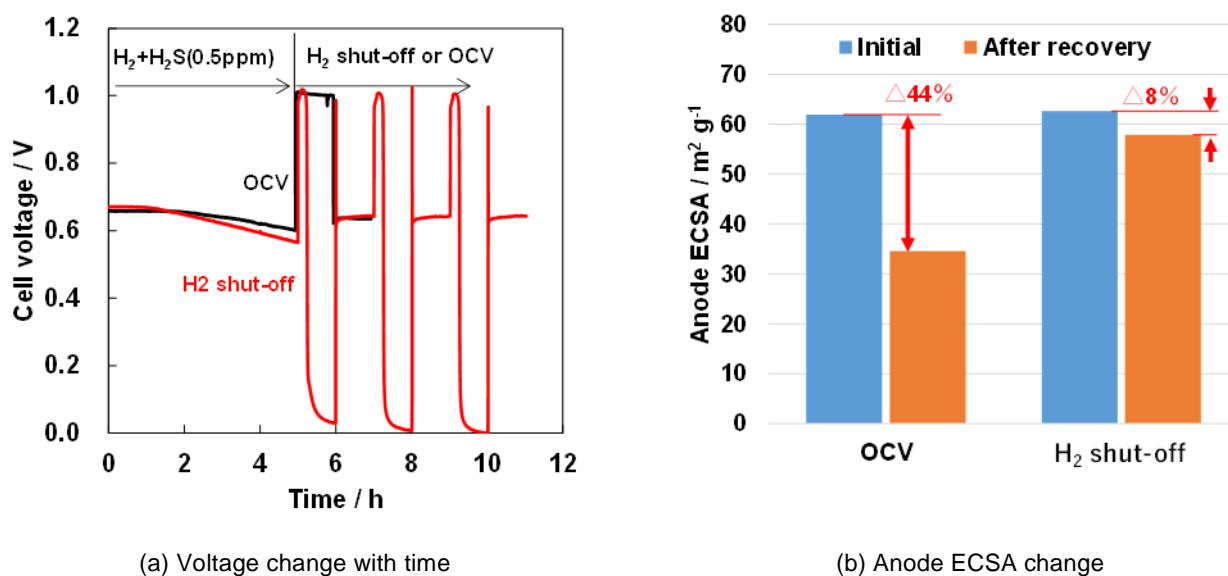


Fig. 5 Effect of voltage and anode ECSA recovery before and after H₂S contamination²⁹⁾

5. まとめ

以上に示したように、JARI では燃料電池における不純物評価技術・ノウハウを蓄積し発展させてきた。そのうえで、水素燃料仕様に係る国際標準化の推進や、被毒回復に係る効果的な手法の提案などの活動をおこなってきた。

不純物評価に係る今後の課題の一つとしては、自動車用燃料電池の低コスト化、高性能化・高耐久化を考慮した時の影響度把握がある。電極触媒や電解質膜などの燃料電池材料が見直される中で、使用される材料によって不純物による影響の現れ方は異なると考えられる。また、燃料電池が商用車やその他のモビリティなど多用途展開していくなかで、求められる耐久性や使用される環境条件、運転条件は用途によって異なると考えられる。それぞれの材料特性に合わせ、被毒による影響を評価するとともに被毒回復手法を最適化することで、開発された材料の性能が十分に発揮され、不純物による影響を抑制することが必要と考えられる。今後とも産業界のニーズに応え、貢献していきたい。

謝辞

これらの成果は、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（P00021, P05012, P05011, P10001, P13002, P18011, P20003）の結果得られたものです。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 経済産業省ホームページ, 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略, <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-2.pdf> (参照 2022.9.9)
- 2) 高木靖雄: 水素エネルギー技術に関するISO規格-燃料電池自動車用燃料水素燃料仕様標準化WG12の活動-, 水素エネルギーシステム, Vol. 33, No. 3, pp. 17-22 (2008) [doi: 10.50988/hess.33.3_17](https://doi.org/10.50988/hess.33.3_17)
- 3) 富岡秀徳: 燃料電池自動車用燃料水素燃料仕様に係る国際標準化の動向, 水素エネルギーシステム, Vol. 37, No. 1, pp. 25-28 (2012) [doi: 10.50988/hess.37.1_25](https://doi.org/10.50988/hess.37.1_25)
- 4) 富岡秀徳: 燃料電池自動車用燃料水素品質に係る国際標準化の取り組み, 第25回燃料電池シンポジウム講演予稿集, A-21, pp. 154-157 (2018)
- 5) 辰巳雅仁ほか: 燃料電池自動車用燃料水素品質規格, 水素エネルギーシステム, Vol. 30, No. 1, pp. 49-52 (2003) [doi: 10.50988/hess.30.1_49](https://doi.org/10.50988/hess.30.1_49)
- 6) Y. Hashimasa et al.: Study of Performance Reproducibility of JARI Standard Single Cell-Cell Performance Crosscheck between HNEI and JARI-, JARI research journal, Vol 29, No. 1, p. 43-48 (2007) <https://www.jari.or.jp/research-database/detail/?slug=33741> (参照 2022.9.9)
- 7) T. Rockward et al.: Hydrogen Fuel Quality, 2015 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program and Vehicle Technologies Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review15/scs007_rockward_2015_o.pdf (参照 2022.9.9)
- 8) Y. Hashimasa et al.: PEFC Power Generation Performance Degradation by Hydrogen Sulfide and Ammonia – Effects of Lowering Platinum Loading –, Vol. 79, No. 5, pp. 343-345 (2011) [doi: 10.5796/electrochemistry.79.343](https://doi.org/10.5796/electrochemistry.79.343)
- 9) 松田佳之ほか: 自動車用燃料電池における水素中のアンモニアの影響 –アノード/カソード白金担持量およびアノード露点の影響–, JARI Research Journal, 20131204 (2013) https://img.jari.or.jp/v=1641526803/files/user/pdf/JRJ20131204_q.pdf (参照 2022.9.9)
- 10) Y. Hashimasa et al.: Effects of platinum loading on PEFC power generation performance deterioration by carbon monoxide in hydrogen fuel, ECS Transactions, Vol. 26, No. 1, p. 131-142 (2010) [doi:10.1149/1.3428984](https://doi.org/10.1149/1.3428984)
- 11) D. Imamura et al.: Effect of Sulfur-Containing Compounds on Fuel Cell Performance, ECS Transactions, Vol. 11, No. 1, p. 853-862 (2007) [doi:10.1149/1.2780998](https://doi.org/10.1149/1.2780998)
- 12) D. Imamura et al.: Effect of ammonia contained in hydrogen fuel on PEMFC performance, ECS Transactions, Vol. 41 No. 1, p. 2083-2089 (2011) <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.3635738/pdf> (参照 2022.9.9)
- 13) 松田佳之ほか: 燃料電池の水素循環系における不純物の濃縮挙動, 自動車技術会論文集, Vol. 40, No. 1, p. 141-145 (2009)

-
- [doi: 10.11351/jsaeronbun.40.141](https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.40.141)
- 14) 小島菜々子ほか:「ENEOS水素」の新たな品質管理方法の開発, JXTG Technical Review, 第60巻, 第1号, 27-32 (2018)
https://www.eneos.co.jp/company/rd/technical_review/pdf/vol60_no01_08.pdf (参照 2022.9.9)
 - 15) Y. Matsuda et al.: Adsorption behavior of low concentration carbon monoxide on polymer electrolyte fuel cell anodes for automotive applications, J. Power Sources, Vol. 318, p. 1-8 (2016) [doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.03.104](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.03.104)
 - 16) 松田佳之ほか:自動車用燃料電池の負荷変動時における一酸化炭素の影響, JARI Research Journal., 20121005 (2012)
https://img.jari.or.jp/v=1641539255/files/user/pdf/JRJ20121005_q.pdf (参照 2022.9.9)
 - 17) Y. Matsuda et al.: Influence of Carbon Monoxide on PEFC Performance under Load Cycle Operation, 21st World Hydrogen Energy Conference 2016 Proceedings, p. 215-216 (2016)
 - 18) Y. Matsuda et al.: Effect of Carbon Monoxide on Polymer Electrolyte Fuel Cell Performance with a Hydrogen Circulation System, Journal of The Electrochemical Society., Vol. 167, No.4, 044509 (2020)
[doi:10.1149/1945-7111/ab732c](https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab732c)
 - 19) NEDO成果報告書: 水素ステーションにおける水素ガス品質管理方法の国際標準化に関する研究開発, pp. 128-134 (2018)
https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201808/20180000000703.html (参照 2022.9.9)
 - 20) 清水貴弘ほか: 水素中のギ酸が自動車用燃料電池の発電性能に及ぼす影響, JARI Research Journal., 20190201 (2019)
https://img.jari.or.jp/v=1641526913/files/user/pdf/JRJ20190201_q.pdf (参照 2022.9.9)
 - 21) J. Viitakangas et al.: Study of Formaldehyde and Formic Acid Contamination Effect on PEMFC, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 165, No. 9, p. F718-F727 (2018) [doi: 10.1149/2.1381809jes](https://doi.org/10.1149/2.1381809jes)
 - 22) Y. Okada et al.: Development of dehydrogenation catalyst for hydrogen generation in organic chemical hydride method, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 31, pp. 1348-1356 (2006) [doi: 10.1016/j.ijhydene.2005.11.014](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.11.014)
 - 23) 松田佳之ほか: 有機ヒドライド由来不純物が燃料電池性能に及ぼす影響, JARI Research Journal, 20170701 (2017)
https://img.jari.or.jp/v=1641526886/files/user/pdf/JRJ20170701_q.pdf (参照 2022.9.9)
 - 24) NEDO成果報告書: 固体高分子形燃料電池セルの劣化メカニズム解析と余寿命評価手法の開発, p. 18-132 (2010)
https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201008/20100000000936.html (参照 2022.9.9)
 - 25) D. Imamura et al.: Effect of air contaminants on electrolyte degradation in polymer electrolyte membrane fuel cells, ECS Transactions, Vol. 25, No. 1, p. 813-819 (2009) [doi:10.1149/1.3210634](https://doi.org/10.1149/1.3210634)
 - 26) 大野和之ほか: 空気中に含まれる海塩粒子成分によるPEFC劣化への影響, 社団法人自動車技術会学術講演会前刷集, No.111-10, p. 19-22 (2010) https://tech.isae.or.jp/paperinfo/ja/content/p2010111_04/ (参照 2022.9.9)
 - 27) B. D. Gould, et al.: Operational Performance Recovery of SO₂-Contaminated Proton Exchange Membrane Fuel Cells, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 157, No. 11, pp. B1569-B1577 (2010) [doi: 10.1149/1.3483108](https://doi.org/10.1149/1.3483108)
 - 28) NEDO成果報告書: 硫黄化合物等の吸着脱離メカニズム解明と被毒予防・回復技術開発, in preparation.
 - 29) 清水貴弘ほか: 水素中のH₂SがPEFC性能に及ぼす影響とガス遮断による被毒回復挙動, 電気化学会第89回大会講演要旨集, 2H06 (2022)

透過電子顕微鏡（HT7700）のご紹介

Introduction of a Transmission Electron Microscope, HT7700

清水 貴弘^{*1}

Takahiro SHIMIZU

1. はじめに

透過電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope: TEM）は観察試料に電子線を照射し、試料を透過した電子線から、試料の形状やサイズ、結晶性のような様々な情報を解析する装置である。自動車に関連する研究開発において、TEMは大気汚染物質である排気ガスを浄化する触媒の観察や排気ガスにより影響を受けた実験用動物の臓器の観察等の従来の用途に加え、近年では電気自動車に必要な蓄電池や燃料電池材料の微細構造の観察にも使われている。一般財団法人日本自動車研究所（JARI）では2000年代より水素・燃料電池に関わる研究開発に取り組んでおり、これまでに固体高分子形燃料電池（Polymer Electrolyte Fuel Cell: PEFC）の共通の評価方法であるセル評価解析プロトコル¹⁾の開発を進めてきた。プロトコル開発では、耐久劣化加速試験前後の燃料電池の電気化学的特性と燃料電池材料の構造変化の関係を明らかにすることが必要であり、電極触媒等のナノメートルサイズの燃料電池材料の微細構造を観察するためTEMを利用した。2010年代からは科研費等の支援を受けて所外のTEMを利用し、電極触媒の劣化機構解明を目的として、燃料電池の発電環境を模擬したガス雰囲気中で電極触媒の構造変化を動的にTEM観察する「その場観察技術」等の解析手法を開発してきた²⁻⁴⁾。本報では、自動車の環境・エネルギー分野におけるカーボンニュートラル実現に向けた研究を推進するため、2022年にJARIにTEMが導入されたことを受け、装置の概要と主な機能をPEFC用電極触媒の観察を例に紹介する。

2. 装置の概要

JARIに導入されたTEM（日立ハイテク製HT7700）の写真をFig. 1に、仕様をTable 1に示す。装置の特徴として、TEMの操作をモニター画面上で行うことから、蛍光板の直視は不要で明るい部屋でも観察が可能である。また、オプションとして制限視野可動絞りおよび外付けの試料反応装置を備えることから、試料の特定領域の電子線回折、熱処理前後の試料の同一視野観察にも応用できる。



Fig. 1 透過電子顕微鏡（日立HT7700）

Table 1 HT7700の仕様

電子銃	タングステン
加速電圧	40 - 120 kV (100 V/step 可変)
倍率	×4,000～×600,000
最大傾斜角度	±30°
メインカメラ	8 M pixel

*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 2022年9月14日

3. 装置の主な機能

3.1 ナノ材料の形状や粒径の把握

ナノ材料（ナノメートルサイズの材料）の微細構造を観察することが可能である。具体的な解析事例として、合成直後のPEFC用電極触媒（粉末試料）の分析が挙げられる。Pt等の触媒金属ナノ粒子が担体上で凝集しているか、分散しているか、粒径が均一か、ばらつきがあるか等、使用目的に応じた触媒構造を実現できているか確認することで、新規触媒の合成方法の改良につなげることができる。

また、耐久劣化加速試験前後のPEFC単セルあるいはスタックから膜電極接合体（Membrane Electrode Assembly: MEA）の一部を切り出し、ウルトラマイクロトームを用いて作製した超薄切片試料を観察することで、電極触媒層中の担体の形状変化やPtナノ粒子の凝集、粒径の粗大化、電解質膜中へのPtナノ粒子の析出、Ptバンドの形成等を確認することが可能である。得られた知見を活用することで、PEFCの性能変化と電極材料の構造変化を関連付けることができ、試験プロトコルの改良や新規材料の開発に向けた指針が得られるようになる。

TEMの分解能については、加速電圧100 kVでグラファイト化カーボンの格子縞を観察した結果から、現在の実力値として0.34 nmを確認済である（Fig. 2）。

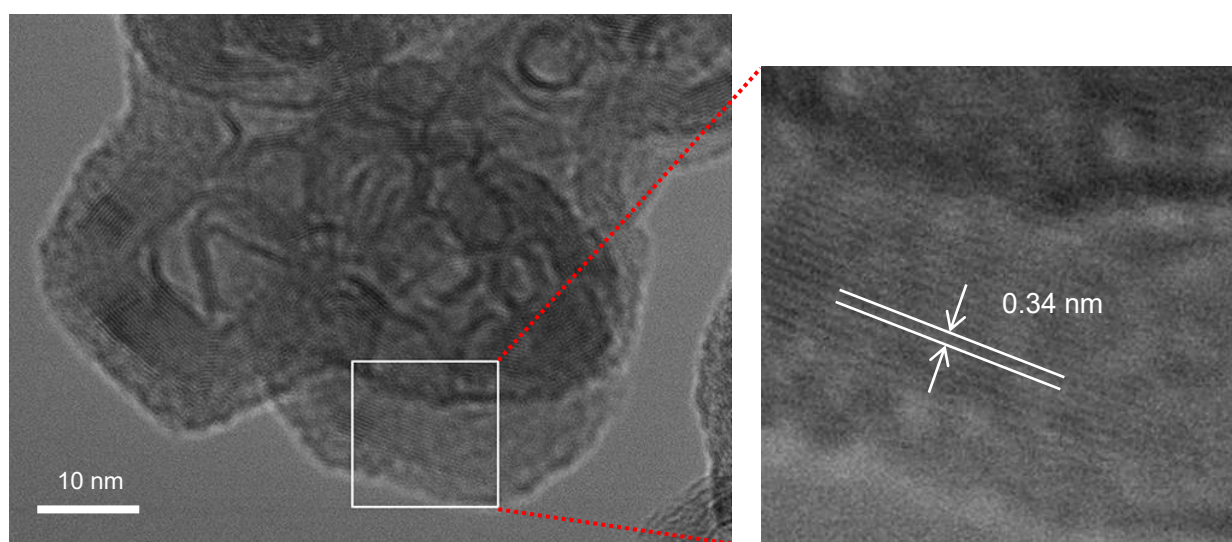


Fig. 2 グラファイト化カーボンのTEM像 (100 kV, x 500 k (左図))

3.2 ナノ材料の3次元構造の把握

スクリーン上に傾斜角を変化させて観察した画像を並べて両眼で立体視(ステレオ観察⁵⁻⁶⁾)することで、ナノ材料の3次元構造を観察することが可能である。Fig. 3 に市販の白金担持カーボン触媒(Pt/CB, 粉末)をステレオ観察した結果を示す(画面上でご覧いただく場合、紙面がA4サイズ程度となるよう表示倍率を調節すると立体視しやすい)。一例として、ステレオ観察を応用することで、PEFC用電極触媒のPtナノ粒子がカーボン担体の表面あるいは内部に存在するか判別することが可能となる。それによって、高性能や高耐久性といった目標とする特性を発揮するための担体の選定方法や触媒金属ナノ粒子の担持方法等、新規触媒の設計指針が得られるようになる。

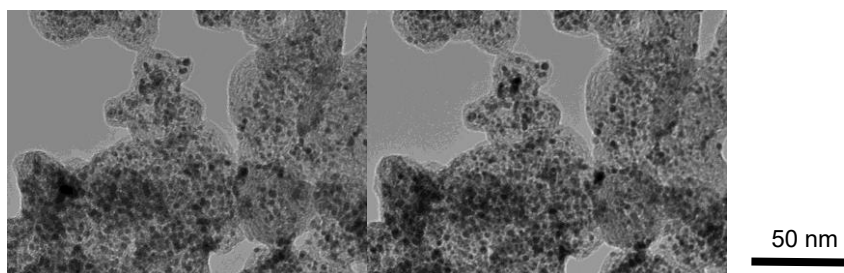


Fig. 3 Pt/CBの3Dステレオ観察像 (100 kV, x 200 k)

3.3 試料の結晶性に関する情報の把握

電子回折パターンを取得することで、試料の結晶性に関する情報を得ることが可能である(Fig. 4)。結晶構造の同定や格子定数の測定に活用が可能な点はX線回折法と同様だが、TEMの場合は制限視野可動絞りを併用することで試料の微小な特定領域の結晶構造を判定できる特徴を有する。

たとえば、未知試料の結晶について、ブラッグ回折の法則($2d\sin\theta = n\lambda$)を応用すると格子面間隔 d を求めることができる。ここで、電子回折の原点スポット(Fig. 4の場合、中心付近の一番明るい点)から電子回折した回折スポット(規則的に配列した周囲の点)までの距離を R 、入射電子の波長を λ 、カメラ長を L とすると、式(1)が成り立つ。

$$d = \frac{\lambda L}{R} \quad (1)$$

したがって、格子面間隔 d が既知のAu等の標準試料を使用してカメラ長 L を求め、未知試料を同一条件下(加速電圧、試料位置)で回折パターンを撮影し、 R を測定すれば d が求められる⁷⁾。

一般に、単結晶ではFig. 4のようなスポット状の回折パターン、多結晶ではリング状のパターンが得られる。電極触媒の場合、試料を熱処理して触媒金属ナノ粒子の凝集や粒径の粗大化が生じるとリング状のパターンの一部にスポット状の部分が出現することから結晶性の変化に関する情報が得られ、触媒合成時の熱処理条件を設定するための指針が得られる。なお、Fig. 4の観察試料(Au単結晶)は山梨大学・上野武夫先生のご厚意によりお借りしたものである。

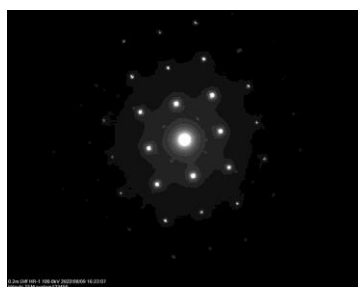


Fig. 4 Au単結晶(100)の電子回折パターン

3.4 熱処理前後の試料の構造変化観察

JARI が保有する外付け試料反応装置 (Fig. 5) を併用することで、水素、窒素、酸素等の高純度ガスや加湿空気雰囲気中で試料の熱処理が可能となる。試料反応装置には HT7700 用の試料ホルダをそのまま使用する。そのため、熱処理前後の試料の同一視野観察に対応しており、熱処理による試料の構造変化過程を間欠的に解析することが可能であることから、電極触媒の合成・焼成条件検討等に活用できる。観察手法の詳細および観察例については既報を参照いただきたい⁸⁾。

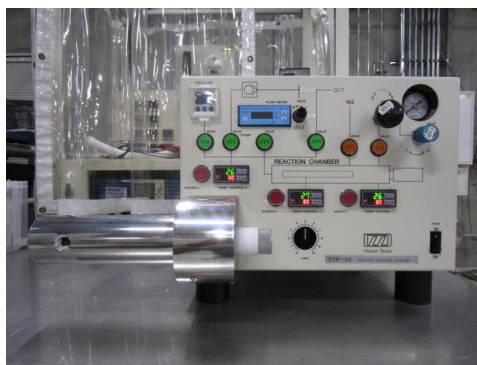


Fig. 5 試料反応装置⁸⁾

3.5 試料の構造変化の動画観察

HT7700 は試料を観察中の動画を電子データとして記録することが可能である。そのため、TEM 試料室内での加熱やガス導入時のナノ材料の構造変化を動的に観察する「その場観察」に向けて準備を進めている。その場観察を行うことにより、PEFC の発電環境を模擬する加熱環境下や試料近傍で 0.6 Pa 程度の微小圧力のガス存在下での電極触媒の構造変化メカニズムの解析が可能となる。単セルを用いた場合には、MEA 作製～セル組み立て～耐久試験～セルの解体～観察試料作製～TEM 観察といったプロセスを経て材料の構造変化解析に通常数日以上時間を要する。一方、その場観察では電極触媒のみをガス導入機構付き試料加熱ホルダ等の専用の試料ホルダに取り付け、単セル (80 °C 程度で試験を実施) では対応していない 300 °C 程度の高温環境下で構造変化を生じさせる加速劣化試験を実施することが可能である。それによって、電極触媒の同一視野の構造変化過程を 30 分程度のその場観察で解析できるようになり、開発材料のスクリーニングに要する時間やコストを大幅に削減できるメリットが見込める。

4. まとめと今後の展開

本報では、2022 年に JARI に導入された TEM の概要および主な機能を紹介した。今後の展開として、引き続き水素・燃料電池関連の材料解析によりカーボンニュートラルの実現につながる技術開発に貢献するほか、JARI が従来取り組んできた排ガス浄化触媒やリチウムイオン電池・全固体電池等の材料解析にも幅広く活用することを予定している。

謝辞

JARIにTEMを導入するにあたり、山梨大学水素・燃料電池ナノ材料研究センター・上野武夫客員教授に多大なご支援および関係各所との調整にご協力いただいた。

参考文献

- 1) 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> (参照 2022.9.9)
- 2) T. Yaguchi et al.: Development of a technique for in situ high temperature TEM observation of catalysts in a highly moisturized air atmosphere, *Journal of Electron. Microsc.*, Vol. 61, No. 4, p.199-206 (2012) [doi: 10.1093/jmicro/dfs041](https://doi.org/10.1093/jmicro/dfs041)
- 3) 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) https://img.jari.or.jp/v=1641526837/files/user/pdf/JRJ20150401_q.pdf (参照 2022.9.9)
- 4) 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.*, Vol.23, No.5, p.945-950 (2017) [doi: 10.1017/S143192761701248X](https://doi.org/10.1017/S143192761701248X)
- 5) 矢口紀恵ほか：多機能低加速TEMとその応用, 日本顕微鏡学会第77回学術講演会, 1pmE_M-5-07 (2021)
- 6) 矢口紀恵ほか：ナノ材料三次元その場観察技術, 日本顕微鏡学会第78回学術講演会, 3pmE_M-8-01 (2022)
- 7) 日立ハイテクノロジーズ：TEMと友だちになろう！, p.48-49 (2008)
- 8) 清水貴弘, 上野武夫：Ex situ TEM法によるPEFC触媒層の電気化学測定と構造解析, *JARI Research Journal*, JRJ20201001 (2020) https://img.jari.or.jp/v=1641526925/files/user/pdf/JRJ20201001_q.pdf (参照 2022.9.9)

水素・燃料電池自動車の世界統一技術基準 No.13 (HFCV-GTR) の最新動向

The recent trends of Global Technical Regulation No.13 (Hydrogen and fuel cell vehicles)

増田 竣亮*¹
Shunsuke MASUDA

富岡 純一*¹
Jun-ichi TOMIOKA

田村 浩明*¹
Hiroaki TAMURA

山崎 浩嗣*¹
Koji YAMAZAKI

田村 陽介*²
Yohsuke TAMURA

HFCV-GTR (GTR13) の Phase2 改定審議が 2022 年 5 月に完了し、国連 GRSP (Global Road Safety Partnership) に Informal Draft が提案された。2023 年 6 月に WP29 での承認・発効を目標としている。審議項目の内、日本からの提案やデータ提供した項目 (破裂圧適正化、火炎暴露試験の適正化等) を中心に、Phase2 での改定内容を紹介する。

1. はじめに

国際的な環境対策が求められている中で、カーボンニュートラルや大気環境保全に有効である、燃料電池自動車 (FCV) の普及拡大は不可欠である。今後の FCV の普及拡大に向けて、国際的な技術基準として 2013 年 6 月に国連で採択されたのが、水素・燃料電池自動車の世界統一技術基準 (HFCV-GTR, GTR13) である。GTR13 には、水素・燃料電池自動車の定義や、車両を構成する各システムに関する記述がなされており、安全に関する事項として圧縮水素容器、水素安全、電気安全に関する基準が記述されている。GTR13 は、国内規制への適用が必須となるため、国内法への円滑な反映を考慮した国際基準調和を進める必要がある。ただし GTR13 採択時点では残された課題があり、改定審議 (Phase2 審議) が 2017 年 10 月より行われている。JARI では、各分野の専門家を加えた国内審議体制を構築し、データに基づく技術審議を行った。そして安全性を確保しつつ、過剰な要求を抑制した合理的な基準となるよう、日本提案項目についての試験法案の提案やドラフトドキュメントの提示を行ってきた。これらの取り組みを経て、2022 年 5 月に国連 GRSP へ Informal Draft が提案された。2023 年 6 月に WP29 (自動車基準調和世界フォーラム) における GTR13 第 1 改訂版 (GTR13 Amendment1) の承認・発効を目標としている。また平行して UNR (UN ECE Regulation, 国連規則) 化を行い、2024 年に日本国内への採用を目指している。本稿では、GTR13 Phase2 改定審議により変更・追加された項目の内、主に日本が提案した圧縮水素貯蔵システム (圧縮水素容器) に関する試験法案を中心に紹介する。

*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)

* 2022年9月9日受理

2. GTR（世界統一技術基準）とは

自動車世界各国に流通するようになる中、1958年より前は国によって自動車の技術基準が異なっていた。したがって販売する国ごとに自動車の設計を変更する必要があり、コスト増や技術開発の負担となっていた。そこで、国ごとに異なる自動車技術基準の国際調和を推進し、その基準による認証を相互承認するための協定「国連の車両等の相互承認協定（1958年協定）」が締結された。日本は1958年協定に加盟しており、政府認証を実施している多くの国で認証の相互承認を受けることができ、認証手続きの簡素化につながっている。ただし、米国では自動車メーカーが製品の基準適合性を保証し、販売後に政府が基準適合性を確認する「自己認証制度」を採用しており、1958年協定には加盟していなかった。そこで米国は、認証の相互承認を含まない「技術基準の調和」を提案し、国連にて審議された後に1998年に採択されたのが「国連の車両等の世界的技術規則協定（1998年協定、グローバル協定）」である。日本は1999年にグローバル協定に加盟した。この協定の下で、WP29にて自動車の環境・安全に関わる技術基準を検討し、加盟国全会一致で承認・発効されたものが、GTRである。GTRは国連規則に反映されることが計画されている¹⁾。

GTRの中で水素・燃料電池自動車に関わる基準が2007年9月からPhase1として議論され、2013年6月に採択されたのがGTR13である。GTR13承認の時点では、残された課題（水素容器用材料試験方法、破裂圧適正化、火炎暴露試験の適正化等）があり、その課題の解決のため、2017年10月よりGTR13 Phase2改定審議が開始され、2022年5月に完了した。

3. GTR13 Phase2での改定審議内容

3.1 容器初期破裂圧適正化

GTR13 では、使用前の容器初期破裂圧を 225% NWP (Nominal Working Pressure, 公称使用圧力 = 70 MPa or 35 MPa) 以上、容器が寿命を迎えた時点での劣化後破裂圧を 180% NWP 以上と規定している。この内、容器初期破裂圧については従来基準の実績のある最小破裂圧力 225%を採用したが、劣化後破裂圧との関係を示す具体的なデータが示されていなかった。そこで、GTR13 Phase2 改定審議にあたり、劣化後破裂圧 180% NWP 以上を保証しつつ、より適正な容器初期破裂圧を規定するため、耐久劣化試験を行った容器の破裂圧の低下率とばらつきのデータを取得した。取得したデータを基に、適正な容器初期破裂圧を検討した結果を Fig. 1 に示す。新品容器での破裂圧力のばらつきは 10%程度であり、劣化試験後の破裂圧力は使用前の容器初期破裂圧から 5%程度低下した。さらに劣化試験後の破裂圧力のばらつきは平均値に対して+10%/-15%であった。これらの結果から、容器初期破裂圧の基準を 200% NWP 以上まで低下させても、劣化後破裂圧の基準 180% NWP 以上を満足することを実証した²⁾。この結果を基に、容器初期破裂圧を 200% NWP 以上とした基準案および Rationale (技術的根拠) 案を第 3 回 IWG (2018 年 6 月) にて日本から提案した。最終的には、一部の国で 35 MPa 容器への 200% NWP 適用反対の意見 (70 MPa 容器に比べ、35 MPa 容器の損傷許容マージンが小さいため) があり、35 MPa 容器のみ CP-Option で 225% NWP を選択可能となった。

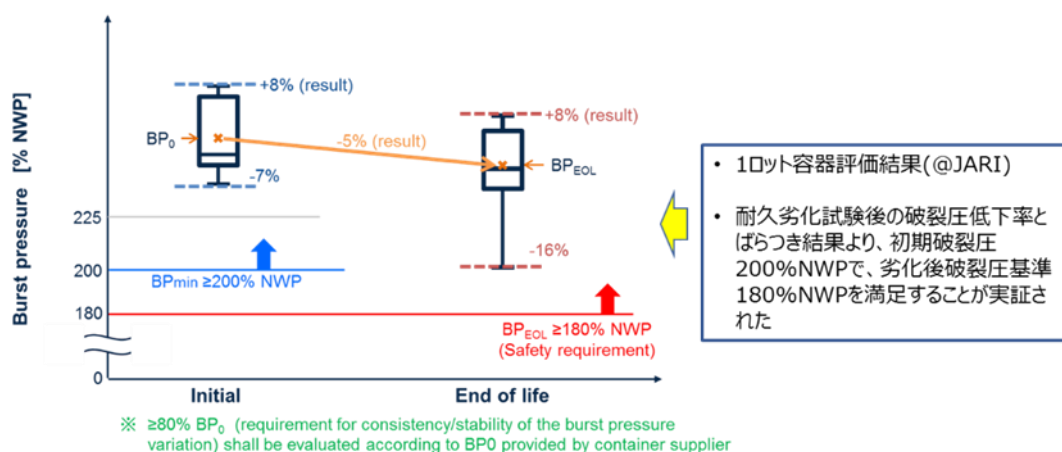


Fig. 1 劣化試験後のデータを踏まえた適正な容器初期破裂圧の検討結果

3.2 金属材料の水素適合性試験法の追加

FCV の構成部品では、高圧水素環境下に適した材料の使用が求められる。金属材料に関しては、SUS316L 材を中心に使用されているが、コスト削減等の目的から、SUS304 材等の使用材料種拡大が望まれている。しかし、現状では燃料電池自動車用途で材料の使用可否を判定する国際統一試験法が存在していない。従って GTR13 Phase2 改定審議に合わせ、FCV の性能要件に基づく材料試験法の導入および使用材料種拡大時の認定方法の統一化を目指した。水素適合性試験法案は米国・日本を中心に検討し、米国案の切欠き疲労試験と、日本案の SSRT 試験 (Slow Strain Rate Technique, 低ひずみ速度引張試験) + 平滑疲労試験のどちらかを選択する方式を採用した (Fig. 2)。最終的には一部の国からの反対意見 (自国内に自己認証の仕組みがある等) があったため、参照試験法として GTR13 Part 1 (Rationale パート) に記載した。なお、UNR134 (国連の水素燃料自動車の安全基準に係る協定規則) の次期改定では、法規要件として追加される見込みである。

一方日本国内では、この GTR13 Phase2 改定審議に提案した水素適合性試験法を先取りして活用し、現在高圧水素環境下での使用はできないとされている SUS304 市中材の評価として、日本案の SSRT 試験 + 平滑疲労試験を実施した。2つの試験のうち、平滑疲労試験の結果を Fig. 3 に示す。3種類の SUS304 市中材に対して試験を実施し、全ての市中材で 100 MPa 高圧水素雰囲気かつ、室温および低温環境下で $1/3 S_{UTS}$ (S_{UTS} = ミルシートに記載された材料引張強さ) の試験応力にて疲労試験を実施し、20 万回以上の繰り返し応力を負荷しても破断せず、試験法案の判定基準を満足することを確認した。また、SSRT 試験においても、3種類の市中材全てで試験法案の判定基準を満足する結果を得られた。これにより、SUS304 の市中材に対して、日本提案の水素適合性試験を実施し、判定基準を満足することを実証した。

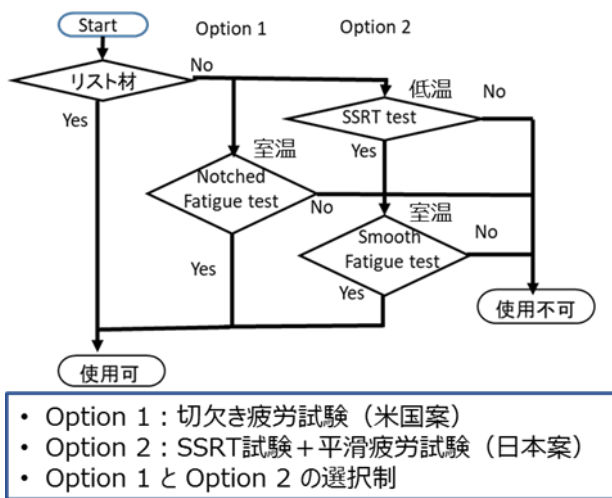
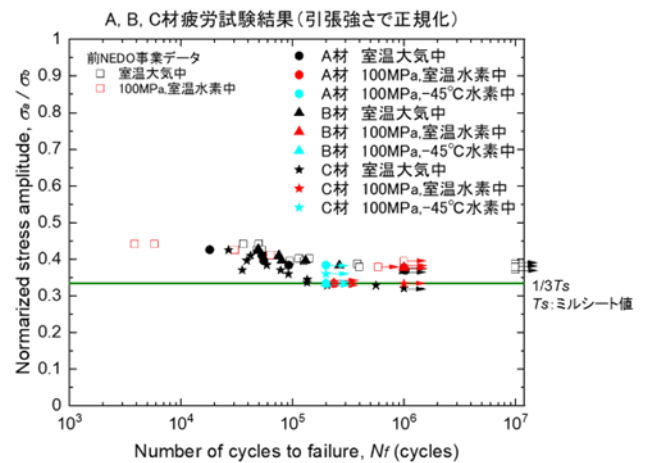


Fig. 2 金属材料の水素適合性試験法



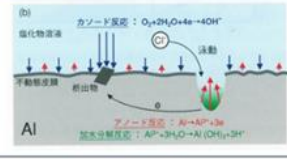
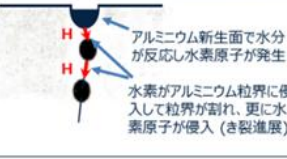

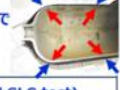
◆ 100MPa、室温 (25±5℃)、-45℃±5℃水素ガス中において、 $1/3 T_s$ の試験応力で $N_f > 2 \times 10^5$ 回まで破断しないことを確認

Fig. 3 SUS304市中材の疲労試験結果

3.3 アルミニウム合金の腐食 (HG-SCC: Humid Gas Stress Corrosion Cracking) 試験法の追加

FCV 使用環境下ではタンク内外が湿潤環境となる場合が想定され、タンクライナー材に使用されるアルミニウム合金の応力腐食割れの発生が懸念される³⁾ (Fig. 4)。現状では FCV 使用環境における応力腐食割れ耐性を適切に評価できる試験法が存在しないため、新たな試験法の導入を目指した。日本を中心にデータ取得や検討を行い、試験法 (85%湿潤大気中で 90 日荷重負荷時のき裂進展評価) を作成し、先行して国内規格化 (HPIS E 103: 2018⁴⁾) すると共に、試験法案を GTR13 Phase2 改定審議に提案した。

最終的には一部の国からの反対意見 (自国内に自己認証の仕組みがある等) があったため、参照試験法として GTR13 Part 1 に記載した。なお、UNR134 の次期改定では、法規要件として追加される見込みである。

Type	アノード溶解	湿潤環境中の応力腐食割れ
原理	塩水が影響する電気化学的腐食 	金属AlとH ₂ Oの反応に由来する応力腐食割れ 
反応式	アノード反応: $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^{-}$ カソード反応: $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$	$2Al + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 6H$
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 酸素と溶液がないと発生しない Cl⁻の存在が前提(不動態被膜の破壊) 高圧水素環境中で発生しない(酸素も溶液もない) ⇒ 容器外側のみ発生 	<ul style="list-style-type: none"> H₂Oがあれば反応が起こる 金属イオンの溶出でなく、水素原子がき裂先端(アルミニウム新生面)に集まることで亀裂が進展する ⇒ 容器外側および内側の両方で発生 
評価法	各自動車OEMの既存の評価法	HG-SCC試験法 (Improved SLC test) > GTR13に提案

- 2つの腐食形態のうち、水由来の水素原子の影響による粒界腐食割れが対象
- 既存のSLC評価法(ISO 7866 Annex B)は湿度コントロールがなされておらず不十分であり、改良してHG-SCC試験法を提案

Fig. 4 アルミニウム合金の腐食 (HG-SCC) 発生メカニズム⁵⁾

3.4 容器火炎暴露試験法の改定

GTR13の容器火炎暴露試験法では、各国試験機関での再現性が問題とされてきた。そこで、試験機関に依らず試験結果が極力同一となるよう、日本にて、再現性のある試験法を検討した。既存データ解析や、数値シミュレーション解析により、再現性向上には①火炎高さ、②火炎の幅、③火源の均一性、④風の影響が重要な項目であることがわかった。この結果を踏まえ、バーナー仕様や火源の燃料となるLPG流量規定、風防・風速の規定を盛り込んだ再現性向上案の作成・提案を行った結果、修正試験法として採用された (Fig. 5)。

GTR13 Phase2改定審議の過程で出てきた残課題 (各国間でのラウンドロビン結果の反映、TimeOut規定 (FCV 大型車両火災時に安全弁が作動しない場合でも、車両鎮火までの時間の火炎暴露に耐え、かつ焼損容器が一定の耐圧性能を有していれば安全性能を満足しているとみなす規定)、容器の垂直火炎暴露試験) について、GTR13 Phase3改定審議にて再度議論する予定である。



Fig. 5 容器火炎暴露試験法の改定内容検討

3.5 新構成容器（Conformable Tank）への各試験法の対応

現在のFCVは、大径かつ俵型の容器が数個設置されているが、より形状設計自由度が高い新構成容器の搭載が検討されている。新構成容器は、複数の小径容器を連結した構造であり、床下への搭載が検討されている（Fig. 6）。この構造では、車両の室内空間を広く取ることができ、さらに容器形状の共通化や、バッテリーを搭載するEV車とのプラットフォームを共通化することによるコスト削減等のメリットが考えられる。しかし、現行試験法ではこのような新構成容器に対する評価を想定しておらず、適切な試験方法と判定基準の設定が求められた。今回のGTR13 Phase2改定審議では、容器の定義、試験法（落下試験、火炎暴露試験等）について、新構成容器に合わせた改定を盛り込むことを提案した。提案後、現状ではGTR Phase3改定審議での追加議論の必要性については提案されていないが、日本国内では高圧水素容器の認証試験の抜本的な見直し（タンクと車両の検査一本化）が検討されており、新構成容器への対応も合わせて、議論を進めていく予定である。

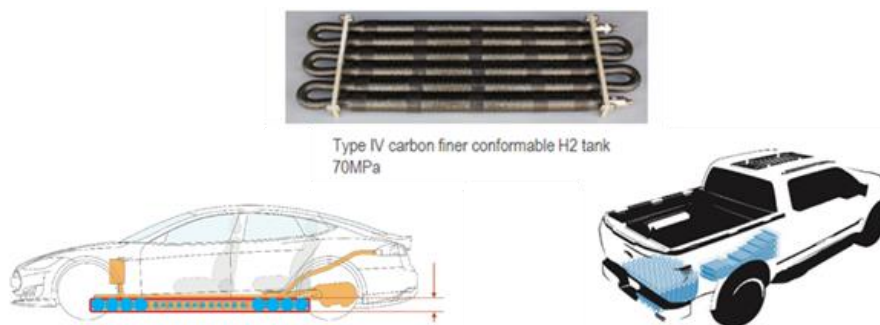


Fig. 6 新構成容器例^{6),7)}

4. 今後の課題

GTR13 Phase2改定審議はおおよそ終了したが、UNR化に向けた課題や、数年後のGTR13 Phase3改定審議開始に向けた日本提案に関する課題・審議項目を以下に示す。

(1) UNR134への対応

- ・ GTR ドラフト策定後の UNR134 の次期改定審議への参画と、国内法への落とし込み対応の検討
- ・ 材料試験法の強制化（使用可能材料のリスト化等の必要に応じた技術審議）

(2) GTR13 Phase3改定審議への課題、審議事項

- ・ 大型車安全に関する試験法審議（容器長尺化かつ多種搭載形態に対応した火災、衝突安全）
- ・ 容器連続負荷試験の更なる合理化（高温静圧試験の短縮化、廃止等）
- ・ 新構成容器の試験法確立（従来の圧縮水素容器の考え方ではなく、自動車構成部品として考慮した試験法の在り方を検討）
- ・ オーステナイト系ステンレス鋼から更なる鋼種拡大を想定した材料試験法の妥当性検討要否
- ・ 液化水素貯蔵技術の基準化検討

5. まとめ

GTR13 Phase2 改定審議における日本提案を中心とした主な改定内容をまとめた。GTR13 Phase2 改定審議はおおよそ終了したが、今後も UNR134 への対応が必要であり、さらに数年後に開始される予定の GTR13 Phase3 改定審議開始に向けて、残課題を整理し、新たな提案を行う必要がある。引き続き JARI では安全性を確保しつつ、過剰な要求を抑制した合理的な基準になるよう、国内の関係機関と連携しながら国際基準調和活動を継続していく。

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「超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業／国際展開，国際標準化に関する研究開発／燃料電池自動車の国際基準調和・国際標準化に関する研究開発」（P18011）の結果得られたものです。また，Fig. 4 の作成には茨城大学伊藤吾朗名誉教授にご協力いただきました。

参考文献

- 1) 国土交通省ほか：自動車の国際基準調和と認証の相互承認の拡充にむけて（2021）
https://www.jasic.org/j/08_publication/pamphlets/pdf/harm.pdf（参照 2022.9.9）
- 2) 富岡純一ほか：圧縮水素容器の破裂圧力に及ぼす液圧シリーズ試験の影響，自動車技術会論文集，Vol.49, No.2, p.296-300（2018）
[doi: 10.11351/jsaeronbun.49.296](https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.49.296)
- 3) Ogawa, T. et al: Effect of Chemical Composition and Relative Humidity on the Humid Gas Stress Corrosion Cracking of Aluminum Alloys, Journal of High Pressure Institute of Japan, Vol.57, No.1, p.24-33（2019）
[doi: 10.11181/hpi.57.24](https://doi.org/10.11181/hpi.57.24)
- 4) Standard Test Method for Humid Gas Stress Corrosion Cracking of Aluminium Alloys for Compressed Hydrogen Containers, HPIS E 103: 2018（2018）
<https://www.hpj.org/file/1343>（参照 2022.9.9）
- 5) UN ECE, GTR13-10-07 JAPAN #10 GTR13 IWG_Document of HG-SCC Rationale,
https://wiki.unece.org/display/trans/GTR13-2-10th+session?preview=%2F128419731%2F128420549%2FGTR13-10-07+JAPAN+%2310+GTR13+IWG_Document+of+HG-SCC+Rationale.pdf（参照 2022.9.9）
- 6) UN ECE, GTR13-6-03 Linamar - Protective shell proposal,
<https://wiki.unece.org/display/trans/GTR13-2-6th+session?preview=%2F81888831%2F86311232%2FGTR13-6-03+Linamar+-+Protective+shell+proposal.pdf>（参照 2022.9.9）
- 7) UN ECE, GTR13-3-06 Volute Linamar
<https://wiki.unece.org/display/trans/GTR13-2-3rd+session?preview=/58525915/62228222/GTR13-3-06%20Volute%20Linamar.pdf>（参照 2022.9.9）

大型 FCV 用液化水素技術に関するフィジビリティ調査

Research on Liquid Hydrogen Technologies for Heavy-duty FCVs

富岡 純一*1

Jun-ichi TOMIOKA

1. はじめに

2020 年度の日本の運輸部門からの CO₂ 排出量 (1 億 8,500 万トン) は、日本全体の 17.7% であり、うち大型・商用モビリティで 53.1% (貨物自動車 39.2%, バス 1.6%, 内航海運 5.3%, 鉄道 4.2%, 航空 2.8%) を占めている¹⁾。そのため、大型・商用モビリティの低炭素化を進めることは、2050 年カーボンニュートラルの実現に向けた我が国の地球温暖化ガス排出抑制目標達成のために重要な課題である。また、環境負荷低減、エネルギーセキュリティの確保、新規産業創出などの社会的課題の解決策である水素エネルギーを利活用する水素社会実現に向け、大型・商用モビリティの燃料電池 (FC) 化は重要な要素となる。海外では、欧米や中国を中心に大型・商用モビリティの FC 化に向けた開発が進みつつあり、我が国でも早急に検討を進める必要がある。

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) が策定した燃料電池自動車 (FCV) ・移動体用技術開発ロードマップ²⁾ では、FCV の航続距離の達成目標を 2030 年頃までに 800 km 以上、2040 年頃までに 1000 km 以上と設定している。大型トラック・バス等については、国内外で、先行する乗用車の燃料電池技術を応用した技術開発が進められているが、圧縮水素貯蔵では貯蔵密度の大幅向上が見込めないため、荷室容積を確保した上での航続距離の向上に限界が見えてきている。そこで、水素貯蔵密度の大幅向上が期待される液化水素貯蔵の可能性を調査するため、2020 年度～2021 年度に NEDO 委託調査「大型 FCV 燃料装置用液化水素技術に係るフィジビリティ調査」を一般財団法人日本自動車研究所 (JARI) と岩谷産業株式会社で実施した。以下、本調査で得られた結果の一部を紹介する。詳細については、調査報告書³⁾ を参照されたい。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部

* 2022年9月9日受理

2. 調査項目

大型 FCV 等への有効な水素燃料搭載方法の一つとして、液化水素貯蔵・充填技術等について、以下の 4 つの項目に分けて調査した。調査は、主に文献調査にて実施し、適宜、調査内容・調査結果等について乗用車・大型車メーカー関係者および鉄道・船舶関係者との意見交換を行った。本稿では、①-1 液化水素 FCV の容器・附属品等の技術課題調査から、「液化水素貯蔵システムについて」および「ボイルオフガスの処理方法について」、④-1 容器・附属品基準・標準から、「容器・附属品の基準について」の調査結果を紹介する。また、③-2 充填プロトコルの調査結果については、既に報告済みである⁴⁾。

調査項目① 燃料として液化水素を搭載する FCV の課題調査

①-1 液化水素 FCV の容器・附属品等の技術課題調査

①-2 液化水素 FCV の車両安全調査

①-3 液化水素と他の貯蔵技術のベンチマーク調査

調査項目② 車載容器への液化水素充填設備の実現性と課題抽出

②-1 液化水素の車載容器への充填モデルの検討

②-2 液化水素充填技術の実現性検討と構成機器の仕様明確化

調査項目③ 充填インターフェースの課題抽出

③-1 充填カップリング

③-2 充填プロトコル

調査項目④ 基準・標準の方向性検討

④-1 容器・附属品基準・標準

④-2 ステーション基準・標準

④-3 インターフェース基準・標準

3. 液化水素貯蔵システムについて

乗用車用の液化水素貯蔵システムは、2000 年代に BMW らによって開発されている⁵⁾。BMW は水素とガソリンを燃料とする Internal Combustion Engine (ICE) 搭載車を開発しており、その水素燃料搭載方法として、貯蔵密度等のポテンシャルが高いことから、液化水素貯蔵システムを採用した。この従来の液化水素貯蔵システムに使用される液化水素容器は、定置用や運搬用液化水素容器と同様の低圧設計 (1 MPa 未満) であり、それらの技術を流用できるというメリットがある。ただし、液化水素の沸点はマイナス 253°C という超低温であるため、断熱性の高い容器を用いても気化 (ボイルオフ) を完全に防ぐことは難しく、ボイルオフガス (Boil Off Gas: BOG) による水素損失が大きいという課題がある。また、BOG の安全な処理方法も課題となっている (4 章参照)。

この液化水素容器の利点である高密度貯蔵を維持しつつ、従来の BOG 損失のデメリットを改善する技術として、2010 年頃に BMW らによって Cryo-Compressed Hydrogen (CcH₂) 貯蔵システムが検討された⁶⁾。検討された CcH₂ 容器は、圧縮水素容器に用いられている Type-3 容器 (金属製ライナー全体を CFRP (炭素繊維強化プラスチック) で補強した容器) の外側を真空断熱処理した容器であり、低温 (液化水素温度~常温) かつ高圧 (~35 MPa) の超臨界領域を考慮した技術である。液化水素の密度 70 g/L (大気圧・20 K) に対し、CcH₂ の密度は 80 g/L (30 MPa・38 K) 程度まで高密度化が可能である。また、容器の耐圧性能が高いため、BOG 排出開始を遅らせることが可能となり、BOG 損失を削減できる。さらに、FC スタックへの水素ガスの供給時にもメリットがある。従来の低圧設計されている液化水素貯蔵システムにおいては、水素ガス供給圧力が一定以上になるように容器内圧力を制御する必要があるが、CcH₂ 貯蔵システムの場合、容器内圧力が高いことを利用して、差圧による供給が可能となる。デメリットとしては、低温かつ高圧に耐える容器性能が必要となり、また、充填も低温かつ高圧に対応した送液ポンプが必要となり、容器重量増と容器・ステーションコストの増加が懸念される。

2020年代に入り、大型FCV用の水素貯蔵技術として液化水素が注目される中、液化水素を使った新しい充填・貯蔵技術であるSubcooled Liquid Hydrogen (sLH₂)技術が、Daimler TruckとLindeから発表された。従来の低圧貯蔵容器よりも容器の許容圧力を高く設定(2MPa程度)しており、BOG保持時間を長くすることが可能である。また、CcH₂容器ほど圧力が高くないため、CFRP等の高価な補強材は必要なく、金属製容器が使用可能である。さらに、sLH₂技術の最大のメリットとなり得るのが、充填技術である。従来の低圧貯蔵容器への充填では、容器内圧力を下げるため、容器内に残っている気体水素や充填時に発生するフラッシュガス(充填時に蒸発した気体水素)を排気しながら液化水素を充填する必要がある。100kgの液化水素を充填する場合の排気量は、30kg程度と試算され、充填時の排気ロスが大きな課題である。一方、sLH₂充填では、詳細なメカニズムは報告されていないが、充填時に容器内の気相部に存在する気体水素を再液化することで、容器外に排気する水素を削減する技術と言われている。このsLH₂技術が確立されれば、液化水素充填の大きな課題のひとつを解決することに繋がる。このため、sLH₂技術を利用した大型・商用モビリティのFC化実現には、sLH₂技術のメカニズム解明を行ったうえでの技術開発を進める必要がある。

表1に液化水素容器の比較を示す。容器コスト、BOGロスの削減、充填時のロス削減等を考慮すると、sLH₂が最もメリットが多く、有用な技術になり得ると考えられる。

表1 液化水素貯蔵システムの比較(赤字:メリット)

	低圧充填・低圧貯蔵 Liquid hydrogen (LH ₂)	中圧充填・低～中圧貯蔵 Subcooled liquid hydrogen (sLH ₂)	高圧充填・高圧貯蔵 Cryo-compressed Hydrogen Storage (CcH ₂)
最高許容圧力	1 MPa 未満	2.0～ 2.5 MPa 程度	2 ～ 35 MPa 程度
容器	金属容器	金属容器	複合容器 (重量増・コスト増)
充填方法	1 MPa 未満の差圧充填 (または充填用ポンプ)	1.5 ～2.0 MPa 程度の 充填用ポンプ(圧縮機)	20 ～35 MPa 程度の 充填用ポンプ(圧縮機)
充填時の ガス回収	必要	不要(または大幅削減)	不要
通信	必要(満タン情報)	不要	不要
満タン検知	液面計等	圧力(液面計等)	圧力
使用時の圧力	0.4 ～ 0.6 MPa	0.4 ～ 2.0 MPa	2.0 ～ 35 MPa
FC への水素供給	圧力制御(昇圧・圧力 保持)が必要	圧力制御(昇圧・圧力 保持)が必要	差圧による水素供給が可能
その他	・短時間でBOG処理が必要になる	・最高許容圧力を超えるまで、BOG処理が不要	・ 最高許容圧力を超えるまで、BOG処理が不要

4. ボイルオフガスの処理方法について

液化水素は、断熱性が高い真空断熱容器に貯蔵されるが、容器周囲からの輻射熱や配管等からの熱伝達によるわずかな入熱でも、ボイルオフガス (BOG) が発生する。液化水素容器は、通常密閉されているため、BOG により容器内圧力が上昇する。圧力を容器の許容圧力以内に維持するためには、容器内水素ガスを排出する必要があり、水素ガス排出には水素ガス (エネルギー) のロス削減および安全な水素ガス放出方法という 2 つの課題がある。

同じ低温液化ガスである液化天然ガス (LNG) では、「天然ガスを燃料とする自動車に関する国連の協定規則 UN-R110」⁸⁾ の Annex 3B において、LNG 容器の基準が規定されている。その中で、BOG に関しては、満充填状態での設計保持時間を 5 日間以上としなければならないとされている。また、整備等で長期間閉鎖空間に置く場合は、タンクからの天然ガスの漏れおよび放出について、可燃性ガスを放出することによる危険を回避するために適正に対処するものとされている。

「水素ガスを燃料とする自動車に関する国連の世界統一技術基準 GTR13」⁹⁾ では、各国が採用の可否を判断できるオプション規定ではあるが、液化水素貯蔵システムの基準が規定されている。GTR13 では、LNG のような BOG の保持時間は規定されていない。代わりに、BOG を放出する場合の放出速度が規定されている。放出速度は、圧縮水素容器の許容排出量と同等であり、車両サイズを係数として車庫サイズを想定した許容排出量を算出する。例えば、30.4 m³ の車庫の場合、150 ml/分の許容排出量となり、非常に微量な排出速度を要求される。このため、BOG を水素ガスのままで車外へ排出するのは難しく、BOG の処理方法を用意する必要がある。

BOG について、まずは断熱性の向上等により、容器内での保持時間を長くすることが、水素ガスのロスがなくなり、最も重要である。ただし、保持時間を長くできても、保持できなくなった際の処理方法を用意する必要がある。BOG の処理方法については、FC での消費、水素吸蔵合金 (MH) 容器等による回収、触媒燃焼等が考えられる。

FC での消費については、車載機器での消費と、外部給電が考えられる。車載機器での消費は、停車時に車内空調や荷室の空調等を行うことで実現できるため、追加投資の必要がなく、有効な方法と考えられる。外部給電については、国土交通省が公表している「災害時における電動車の活用促進マニュアル」¹⁰⁾ にまとめられている。車両に備えられた 100 V 電源用コンセントの利用は、最も簡単であり、また、周囲の外部電源式アイドリングストップ給電システム車への給電にも活用可能である。ただし、消費電力が少なく、BOG を全て使うことができない可能性がある。車の給電端子に可搬型給電器を接続する電源供給であれば、消費電力を増やすことが可能である。さらに、V2H (充放電設備) との接続であれば、安定した電力消費が見込めるため、BOG をすべて使うことが可能と考えられる。電力の供給先としては、駐車場隣接の事務所や倉庫が考えられる。ただし、V2H に関しては、電気事業法上 10 kW 未満に制限されている。10 kW を超えると燃料電池発電所とみなされ、保安規定、電気主任技術者が必要となる¹¹⁾。

さらに、現在は実現していない外部給電の活用方法として、V2H を発展させた系統連携による売電が考えられる。売電ができれば、事務所等が休業中の場合や駐車場が事務所等から離れている場合でも電力供給が可能となり、使い勝手を向上させることができる。ただし、蓄電池等からの売電は規制されており、売電には規制緩和が必要である。他に、電気自動車への給電 (電気自動車の充電) が考えられる。この場合、交流電源への変換が必要ないことから、最もエネルギー効率の良い給電である。使われ方としては、夜間・休日等の非営業時間に、大型の液化水素トラックから BEV (バッテリー電気自動車) や PHEV (プラグインハイブリッド自動車) への給電等が想定される。また、非常時には電欠した BEV 等の充電にも活用できる。

FC での消費でも使い切れなかった BOG は、外部へ放出する必要がある。MH 容器による回収は、低温の BOG の回収に適していると考えられる¹²⁾。一方、搭載スペースや重量増等のデメリットが多く、液化水素搭載量とのトレードオフであり、車両の運用方法を考慮して採用を検討する必要がある。水素ガスの触媒燃焼は、安全に効率的に水素を燃焼できるため、車外に放出する場合の第一候補と考えられる。水素の触媒燃焼は研究されているが、FCV 搭載用の実績はほとんどなく、FCV 搭載に適した触媒燃焼システムの開発が

必要である¹³⁾。また、BOG処理システムは、容器内の液化水素がなくなるまで常に必要なシステムであり、車両システムダウン時にも稼働するシステムを用意する必要がある。

5. 容器・附属品の基準について

水素・燃料電池自動車の国際技術基準（GTR13）および米国 SAE 規格（J2578：FCV 安全，J2579：水素容器），その他関連国際規格への液化水素貯蔵試験法の反映を想定し，既存の水素・燃料電池自動車の基準・標準，LNG 車の基準・標準等を調査した。その結果，材料評価，振動試験，再検査，C₆H₂ 容器についての基準・規格に課題があることが分かった。また，過去に開発された乗用車用液化水素貯蔵システム¹⁴⁾については安全性評価試験が実施されているが，日本での試験実績がほとんどなく，基準作成および将来開発される液化水素貯蔵システムの安全性評価のためには評価設備を整備する必要がある。

安全性評価試験の比較結果から，断熱性能試験，振動試験，過充填防止システム確認試験，落下試験について，基準への採用可否も含めて，評価法を検討する必要がある。振動試験は，GTR13 には規定されていないが，液化天然ガス自動車燃料装置用容器の技術基準（JGA 指-NGV 06-01-99）には規定されている。振動によるスロッシング等が容器構造・容器強度・容器内温度等に影響を及ぼす可能性があるため，液化水素容器に対する自動車特有の振動の影響を把握したうえで，安全性を担保するための評価法を検討する必要がある。

6. まとめ

本調査結果より，液化水素を利用した大型・商用モビリティの FC 化実現には，sLH₂ 充填・貯蔵技術が有望であると考えられる。また，BOG の低減や BOG の活用方法の確立（外部給電等）のための技術開発が重要な課題である。その他，本調査で明確になった以下の技術課題について，実用化に向けた開発を効率的に行う必要がある。

実用化に向けた重点開発課題：

- ・気体と液体の熱交換（凝縮／蒸発）の物理的挙動の把握による，液化水素充填の効率化（容器内気体水素の再液化，sLH₂ 充填・貯蔵技術の実用化）
- ・液化水素容器内の気体／液体挙動把握による，FC への水素供給技術の開発促進
- ・車載用液化水素貯蔵システムの安全性評価法の確立：国際基準調和・国際標準化を前提とした，安全性の確保に必要な車載用液化水素貯蔵システムの評価法の開発
- ・車載機器の性能評価技術の確立：FC スタックへの水素ガス供給システム，BOG 低減システム等の車載機器ベースでの評価・実証
- ・液化水素充填技術の確立：液化水素充填時のロス等の低減が可能な充填技術および要素技術（ポンプ，カップリング等）の開発
- ・液化水素タンク搭載大型商用車固有の安全対応技術の確立：将来の液化水素タンク搭載大型車の普及拡大を見据えた，安全対応技術の確立とそれに基づくファーストレスポンスに対する事故処理マニュアル等の作成
- ・国内基準適正化・国際基準調和・国際標準化活動：大型 FC 商用車を国内・国際展開可能にするための国内基準適正化，国際基準調和活動（GTR13 等）および国際標準化活動（ISO 等）

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「大型FCV燃料装置用液化水素技術に関するフィジビリティ調査」（JPNP20003）の結果得られたものです。

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（2020年度）
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html（参照 2022.9.9）
- 2) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合研究所：【2017年公開】NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ（FCV・移動体）
https://www.nedo.go.jp/library/battery_hydrogen.html（参照 2022.9.9）
- 3) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合研究所（委託先：一般財団法人日本自動車研究所，岩谷産業株式会社）：燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業／大型FCV燃料装置用液化水素技術に関するフィジビリティ調査，2020年度～2021年度調査報告書（2022）
- 4) 山田英助：車両への液体水素の充填技術に関する調査，JARI Research Journal, 20211205（2021）
https://jari.g.kuroco-img.app/v=1641542267/files/user/pdf/JRJ20211205_q.pdf（参照 2022.9.9）
- 5) Franz Amasder, Guenter Kranz: Liquid Hydrogen Storage Systems Developed and Manufactured for the First Time for Customer Cars, 2006 SAE World Congress, 2006-01-0432（2006）[doi: 10.4271/2006-01-0432](https://doi.org/10.4271/2006-01-0432)
- 6) Oliver Kircher: Validation of Cryo-compressed Hydrogen Storage (CCH₂) – a Probabilistic Approach, The 4th International Conference on Hydrogen Safety (ICHS 2011), 258（2011）
<https://h2tools.org/file/7226/download?token=JSEnRUiW>（参照 2022.9.9）
- 7) S. Schäfer, et al.: Technology Pitch: Subcooled Liquid Hydrogen (sLH₂), NOW & CEP Heavy Duty Event（2021）
- 8) 圧縮天然ガス（CNG）を燃料とする自動車に係る協定規則（第110号）UNR110 Rev.6, 国際連合（2020）
- 9) 水素ガスを燃料とする自動車に関する世界統一技術基準GTR13, 国際連合（2013）
- 10) 災害時における電動車の活用促進マニュアル，経済産業省，国土交通省（2020）
<https://www.meti.go.jp/press/2020/07/20200710006/20200710006-1.pdf>（参照 2022.9.9）
- 11) 資料6 燃料電池自動車からの一般住宅等への給電（V2H）の実施に向けた法的環境整備について，経済産業省，第5回産業構造審議会 保安分科会 電力安全小委員会（2014）
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/pdf/005_06_00.pdf（参照 2022.9.9）
- 12) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合研究所（委託先：岩谷産業株式会社，日本重化学工業株式会社，一般財団法人日本自動車研究所）：水素安全利用等基盤技術開発／車両関連機器に関する研究開発／車載液体水素タンクのボイルオフ低減技術の開発，2003年度～2004年度調査報告書（2005）
- 13) Jongho Kim, etc.: Advances in catalytic hydrogen combustion research: Catalysts, mechanism, kinetics, and reactor designs, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 46, Issue 80, p.40073-40104（2021）
[doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.09.236](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.236)
- 14) H. Rybin, et al.: Safety demands for automotive hydrogen storage systems., International Conference of Hydrogen Safety 2005 (ICHS-2005), ID:220117（2005）
<http://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/220117.pdf>（参照 2022.9.9）

大型車両用の液体水素容器内の現象解明に向けて

Toward the Elucidation of Phenomena inside the Liquid Hydrogen Container for Heavy Duty Vehicles

山田 英助*1
Eisuke YAMADA

富岡 純一*2
Jun-ichi TOMIOKA

永島 浩樹*3
Hiroki NAGASHIMA

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が 2018 年 10 月に公表した「1.5 °C 特別報告書」では、工業化以前の水準から地球温暖化を 1.5 °C に抑えるには、二酸化炭素の排出量を 2030 年までに約 45 %削減 (2010 年比) し、2050 年頃までに正味ゼロにすることが必要と示された¹⁾。2020 年 10 月には、日本は 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 (CN) の実現を目指すことを宣言した²⁾。

近年、運輸部門では CN 燃料として、再エネ由来の水素、化石燃料を除く生物由来のバイオ燃料、再エネ由来の水素と二酸化炭素を合成した合成燃料などが注目されている。自動車レースのスーパー耐久では 2021 年シーズンから新設された ST-Q クラスにおいて、これらの CN 燃料を搭載した車両の参戦が可能となり、将来的な市販車としての実用化も視野に入れた車両開発が進められている。水素燃料に関しては、圧縮水素を搭載した水素燃焼エンジンの車両が参戦し、液体水素を利用したチャレンジも進められている³⁾。体積密度が圧縮水素 (70 MPa) の約 1.7 倍の液体水素は、航続距離が重要な耐久レースにおいて有利に働く可能性がある。

また、燃料電池 (FC) を駆動力とした大型トラックの研究開発が世界的に進められている⁴⁾。圧縮水素を搭載する車両の研究開発が先行しているが、燃料の搭載スペースが限定されるため、目標航続距離が長くなるにつれ液体水素の搭載が有利となる。水素貯蔵密度の大幅向上が期待される液体水素での貯蔵の可能性を調査するため、2020~2021 年度に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) 委託調査「大型 FCV 燃料装置用液化水素技術に係るフィジビリティ調査」を一般財団法人日本自動車研究所 (JARI) と岩谷産業株式会社で実施した⁵⁾。本調査から、同じ搭載スペースでは、圧縮水素での航続距離が 600 km 程度のところが、液体水素では 800~1,000 km が見込まれる利点があるものの、研究開発段階の車両の液体水素貯蔵システムには、以下のような課題があることも明らかになった。

- ・液体水素充填時の水素排気ロスの削減
- ・液体水素容器から FC スタックへの安定した水素供給制御方法の確立
- ・液体水素容器からのボイルオフガス (BOG) の処理方法の確立
- ・液体水素容器・車両の安全性評価基準の確立
- ・液体水素関連要素技術の開発 (容器、液面計、カップリング、充填ポンプ等)

液体水素容器への充填時と FC スタックへの供給時に関する最初の 2 つの課題の解決には、液体水素の物性値の把握が重要である。車両の容器内は液相と気相が混在し、充填時と供給時には凝縮と蒸発の物理現象が深く関係する。2021 年に Daimler Truck と Linde が発表した sLH2 (Subcooled Liquid Hydrogen)⁶⁾ は、液体水素の充填時に容器内の気体水素を再液化 (凝縮) することで気体水素の排出損失が少ない効率的な充填を行う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⁷⁾。FC スタックへの水素供給時には、昇圧を行い液体水素の蒸発を促進する必要があるが、昇圧による水素の蒸発化手法にも技術的課題がある。しかしながら、水素は三重点が 13.8 K と極低温であり、かつ凝縮・蒸発現象の実験的観察の

*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

*3 琉球大学

* 2022 年 9 月 9 日受理

難しさのため、水素の凝縮・蒸発に関する物性値は十分に解明されておらず、液体水素容器内の物理現象の理解の妨げとなっている。特に、水素の凝縮・蒸発速度が高精度で分かれば、充填時および供給時の液体水素容器内の相変化を伴う挙動が予測でき、物理現象の理解が進むと考えられる。そこで、JARI と琉球大学は共同で、水素の凝縮・蒸発に関する物理現象の理解を進める研究を NEDO 委託研究「大型 FCV 用液体水素貯蔵システム開発に向けた容器内液体水素挙動解明に関する研究開発」において実施する。

2. 水素の凝縮・蒸発現象

現在実験では、数時間から日単位で容器内に液体水素を放置し、その量の変化速度から長時間のマクロな凝縮・蒸発現象の観測が行われている⁸⁾。しかし、充填時の凝縮または供給時の蒸発のような短時間のミクロな凝縮・蒸発現象の理解には至っていない。その理由として、凝縮・蒸発の物理現象を実験的に観測する際に意図的に発生させる気液平衡状態からの「ずれ」の影響が大きいことが挙げられる。実験による測定では飽和状態の蒸気の圧力や溶液の濃度を飽和値以上の過飽和状態にし、その状態からの緩和を観測することで凝縮・蒸発の物理現象を把握する。しかし過飽和状態は熱力学的には準安定状態であるため、常に同じ状態を発生させることが難しく、過飽和状態の作成は凝縮・蒸発の物理現象に大きな摂動を与え、実験では高精度で凝縮・蒸発現象を観測することが極めて困難である⁹⁾。

さらに、水素の分子量は物質の中で一番小さいため、図 1 に示すように水素の位置の確率密度は窒素や酸素に比べて広がり、位置の不確定性による量子効果の影響が顕著に現れる。この影響により、他の液体とは異なる熱物性を示すことが知られている。図 2 は、各物質の飽和線を臨界点で無次元化したものであるが、酸素や窒素などは臨界点で無次元化することで同じような物性値を示すのに対し、水素は特に液体領域 ($\rho/\rho_c > 1.0$) で、他の物質とは異なる挙動を示している。この量子効果による水素の特異な熱物性のため、他の液体の熱物性の知見から水素の凝縮・蒸発現象を推測することは困難である。この水素の量子効果の影響については、近年の計算機の発展とともに、分子個々の状態を再現する分子シミュレーション技術により明らかにされてきた^{10)~12)}。

そこで、JARI と琉球大学のグループでは、水素の量子効果を考慮した分子動力学 (MD: Molecular Dynamics) 法を用いて、ミクロな分子レベルで気液界面を図 3 のように再現することで水素の凝縮・蒸発の現象の解析を行い、MD 法から得られる知見を活かして充填中の容器内のマクロな状態を再現できる 0 次元の充填シミュレーションの開発を行う。MD 法を使用することで、分子の軌跡から凝縮・蒸発流束を直接計算できるため、高精度に水素の凝縮・蒸発の現象を観測することができ、さらに流束より凝縮・蒸発係数などの物性値も特定することが可能となり、容器サイズのマクロな現象である水素充填時および供給時の凝縮・蒸発現象の解明が期待される。

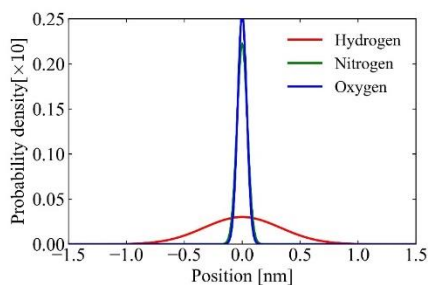


図1 三重点における水素・酸素・窒素の位置の確率密度

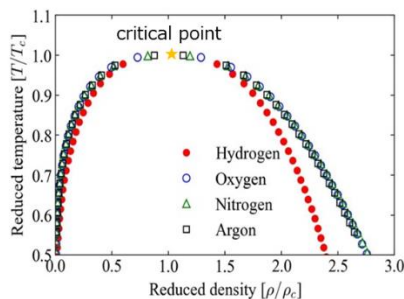


図2 臨界点で無次元化した飽和線

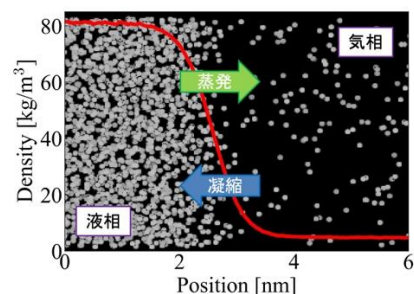


図3 MD法で再現した気液界面。赤線は密度分布（左軸）で白い粒子は水素分子。

3. まとめ

再エネ由来の水素を CN 燃料として車両に利用する研究開発が行われている。圧縮水素の利用が実用化で先行しているが、より高密度の液体水素は航続距離の観点で有利になるため、特に大型車への適用が検討されている。液体水素の車両への充填時と FC スタックへの供給時に重要となる物理現象は凝縮・蒸発であるが、これらに関する物理現象および水素の物性値は十分に解明されていない。実験では、高精度に短時間のミクロな凝縮・蒸発現象を観測することは困難であるため、水素の量子効果を考慮した MD 法による水素の凝縮・蒸発の現象の解明が期待されている。JARI と琉球大学は共同で、水素の凝縮・蒸発に関する物理現象の理解を進める研究を行っている。ミクロな凝縮・蒸発速度の解明が進めば、よりマクロな流体の数値シミュレーションによって液体水素容器内の相変化を伴う物理現象の理解が進み、研究開発の促進が期待される。

謝辞

この成果の一部は、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) 環境省：気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 「1.5°C 特別報告書 (*)」の公表 (第48回総会の結果) について、
<https://www.env.go.jp/press/106052.html> (参照 2022.9.9)
- 2) 首相官邸：第百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説、
https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyoumei.html (参照 2022.9.9)
- 3) TOYOTA GAZOO Racing：スーパー耐久、
<https://toyotagazooracing.com/jp/supertaikeyu/> (参照 2022.9.9)
- 4) María de las Nieves Camacho, et al. : Hydrogen fuel cell heavy-duty trucks: Review of main research topics, Vol.47, 68 (2022) [doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.271](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.271)
- 5) 大型FCV燃料装置用液化水素技術に係るフィジビリティ調査, NEDO 2020年度～2021年度調査報告書 (2022)
- 6) Daimler Truck : Linde link for truck refueling using liquid hydrogen, Fuel Cells Bulletin, Vol. 2021, 1, p.3-4 (2021)
[doi: 10.1016/S1464-2859\(21\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00007-9)
- 7) 山田英助：車両への液体水素の充填技術に関する調査, JARI Research Journal, 20211205 (2021)
https://img.jari.or.jp/v=1641542267/files/user/pdf/JRJ20211205_q.pdf (参照 2022.9.9)
- 8) Guillaume Petitpas: Simulation of boil-off losses during transfer at a LH2 based hydrogen refueling station, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 43, p.21451-21463 (2018) [doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.132](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.132)
- 9) 松本充弘：気液界面における蒸発凝縮の分子機構とその周辺, 高圧力の科学と技術, Vol. 6, No. 1, p.58-65 (1997)
[doi: 10.4131/jshpreview.6.58](https://doi.org/10.4131/jshpreview.6.58)
- 10) H. Nagashima, et al. : An analysis of quantum effects on the thermodynamic properties of cryogenic hydrogen using the path integral method, Journal of Chemical Physics, Vol. 140, 134506 (2014) [doi: 10.1063/1.4870036](https://doi.org/10.1063/1.4870036)
- 11) H. Nagashima, et al. : A molecular dynamics study of nuclear quantum effect on diffusivity of hydrogen molecule, Journal of Chemical Physics, Vol. 147, 024501 (2017) [doi: 10.1063/1.4991732](https://doi.org/10.1063/1.4991732)
- 12) 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)
[doi: 10.1016/j.chemphys.2020.110952](https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2020.110952)

ガソリン車の粒子状物質および固体粒子数、 温室効果ガスの排出量に対する低温影響

Influence of a Low Temperature Environment on the Particulate Matter, Solid Particles Number and Greenhouse Gas Emissions of Gasoline Vehicles

柏倉 桐子*¹ 浅野 幸子*²
Kiriko KASHIWAKURA Yukiko ASANO

Abstract

The effects of low temperatures on emissions from gasoline passenger vehicles were investigated. The measured substances were particulate matter (PM), the number of solid particulate matter (PN), and greenhouse gas (GHG) components (carbon dioxide (CO₂), nitrous oxide, and methane). PM and PN emissions were affected differently by low temperatures depending on the fuel injection control of the test vehicles. Emissions from a vehicle with a port fuel injection engine increased as the ambient temperature decreased. The effect of low temperatures on other vehicles with gasoline direct injection engines was not confirmed under hot start conditions, and emissions tended to increase as the temperature decreased under hot start conditions. GHG emissions increased at lower temperatures regardless of starting conditions, confirming the effect of low temperatures on emissions. The low temperature effect on GHG emissions reflects the low temperature effect on CO₂ emissions, which account for 98% of GHG.

1. はじめに

2021年、「気候変動に関する政府間パネル」は第6次評価報告書の第1作業部会報告書（自然科学的根拠）¹⁾を公表した。報告書では、大気中での滞在時間が数日から数十年と短く、かつ温室効果に寄与する物質である短寿命気候強制因子（SLCF: Short-Lived Climate Forcers）について一つの章が設けられており、主に地球規模から大陸規模での個々のSLCF排出量と存在量の変化、これらの変化が気候システムを通じて地球のエネルギーバランスにどのように影響するかを評価している。具体的なSLCFとしては、炭素質エアロゾル、対流圏オゾン、一部のハイドロフルオロカーボン、メタン（CH₄）等が挙げられている。自動車排出ガス中の粒子状物質（PM, Particulate Matter）は構成する成分として炭素が多く含まれているため、自動車も炭素質エアロゾルの発生源の一つとして挙げられる。温室効果ガス（GHG, Greenhouse Gas）排出量の算定においては、自動車の排出ガスからは、二酸化炭素（CO₂）、亜酸化窒素（N₂O）、CH₄の3物質が計上されており、近年の算定結果によると、燃費規制等の効果によって日本のGHG排出量全体への自動車寄与は減少している²⁾。しかし、地球温暖化への対応が国際的に広がり、日本でも「2050年カーボンニュートラル」³⁾や「グリーン成長戦略」⁴⁾が掲げられている昨今、SLCFの発生源や削減対策も必要とされ、調査・検討される際には自動車のPMも対象となる⁵⁾。

*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9月9日受理

自動車排出ガス中の PM は規制対象物質であり、国内および欧州等の諸外国において、ディーゼル車や筒内直接噴射式のガソリンエンジン搭載車 (DI 車) に対して排出ガス規制が行われている。欧州等の諸外国では、PM の他に、固体粒子数 (PN: Particle Number) 規制も導入されている。さらに、実際の走行環境を考慮して規制物質等の排出量が増加すると予想される低い環境温度 (-7℃) での低温試験が国際連合 (UN: United Nations) が規定する UN Global technical regulations No.15 (GTR 15) ⁶⁾ に取り入れられている。一方、国内では、PN 規制は 2023 年からディーゼル車について、2024 年から DI 車について、それぞれ開始される予定である ⁷⁾。排出ガス試験の環境温度については、重量車の排出ガス規制には規定がなく ⁸⁾、軽・中量車の排出ガス規制には 23℃のみが規定されている ⁹⁾。しかし、諸外国との規制動向の違いから、2020 年 8 月に発表された環境省中央環境審議会の「今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について (第十四次報告)」¹⁰⁾ では日本も低温および高温試験の国内導入の必要性を検討するべきと述べられた。

そこで、本研究では排出ガス試験の環境温度に着目し、排出量が増加すると予想される低温環境が自動車の排出量に及ぼす影響について調査した。調査対象物質は、SLCF や新たな規制導入で注目される PM および PN, GHG 排出量に計上される CO₂, N₂O, CH₄ である。供試車両については、GTR 15 の対象となる車種からガソリン乗用車を選択した。

2. 試験方法

2.1 供試車両と試験温度および燃料

供試車両であるガソリン乗用車と試験温度および供試燃料の概要を Table 1 に示す。試験には、DI 車 3 台とポート噴射式 (PFI: Port Fuel Injection) の車両 1 台を用いた。合計 4 台の供試車両の内、GD3 (2018) は 2018 年規制とその法定試験サイクルである世界統一試験サイクル (WLTC: Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle) に対応している。その他の供試車両は 2005 年規制とその法定試験サイクルである JC08 に対応している。また、すべての供試車両にはアイドリングストップ機能が付いており、いずれの試験においても機能をキャンセルせずに有効のまま走行させた。

供試車両を走行させるシャシ・ダイナモメーター (C/D: Chassis Dynamometer) には C/D 内の環境温度を -10℃から 40℃の範囲に設定できる密閉型の設備を用いた。GD1 (2005) の場合、C/D 内の環境温度は日本の冬季を想定した 0℃および関東地方の年平均気温を参考とした 14℃, WLTC の試験条件である 23℃の 3 条件とした。その他の供試車両では、調査の実施期間中に UN において -7℃の低温試験の導入が検討され始めたため、-7℃, 0℃, 23℃を試験温度とした。

供試燃料には国内認証試験用のレギュラーガソリン (夏季用) を用いた。一般に、低温の季節は冬季用の燃料が販売されるが、本研究は環境温度の影響を調査することが目的であるため、温度以外の影響要因を排除できるように各試験車両で夏季用の燃料 1 種とした。また、本調査は 2017~2020 年度に掛けて行っているため試験車両ごとに供試燃料が異なるが、同じ燃料製造会社の製品を購入することで性状が大きく変わらないように配慮した。その結果、PM 排出量と相関が高いとされる PM Index ¹¹⁾ については 1.17~1.23 (平均 1.20) の範囲となり、同程度の値の燃料を得ることが出来た。

Table 1 Specifications for the test vehicles and the test fuels

Vehicle abbreviation	Ambient temperature [°C]	Test vehicle				Test fuel		
		Fuel system	Displacement [L]	Conformed standards	Mileage [km]	PM Index	Aromatics [vol%]	Olefins [vol%]
GD1 (2005)	0, 14, 23	DI ^{※1}	1.3	2005 (75% reduction)	5,500	1.23	24.0	20.5
GD2 (2005)	-7, 0, 23		1.5	2005 (75% reduction)	8,160	1.19	22.9	19.2
GD3 (2018)	-7, 0, 23		1.2	2018	28,106	1.17	21.2	18.1
GP1 (2005)	-7, 0, 23	PFI ^{※2}	1.3	2005 (75% reduction)	12,555	1.21	23.2	19.5

※1 Direct Injection, ※2 Port Fuel Injection

2.2 試験設備と試験サイクル

供試車両は実験室内の C/D 設備に設置して C/D 設備を封鎖し、走行させた。希釈トンネルや試料の捕集装置および測定装置などは $23 \pm 5^\circ\text{C}$ の実験室内に設置した。排出ガスは排気導入管を通して全量を希釈トンネルに導入し、定容量希釈装置で希釈した。希釈に用いる空気は、触媒、中性能フィルター、活性炭フィルター、高性能フィルターを備えた希釈空気精製装置で浄化してから用いた。希釈トンネルや排気導入管は試験前に内壁を洗浄した。供試車両のテールパイプから希釈トンネルまでを繋ぐ排気導入管は 113°C に加熱し、排気導入管や希釈トンネル内壁での結露を防止した。また、低温条件で排出量が高くなると PM 等の測定物質の一部が自動車の排気管、排気導入管、希釈トンネル等の内壁に残留し、排出量の測定に影響を及ぼすことが予想された。そこで、環境温度条件は排出量がより少ないと予想される高い環境温度から順に試験を実施した。

試験サイクルは法定試験サイクルである JC08 と WLTC を用いた。JC08 の始動方法は暖機始動 (JC08 (hot)) と冷機始動 (JC08 (cold))、WLTC の始動方法は冷機始動である。試験サイクルの车速パターンを Fig. 1 に示す。各試験サイクルの繰り返し試験数は 1 回とした。なお、WLTC は Low, Medium, High の 3 区分で構成されているが、試験法通り、PM は区分せずに試料を捕集して WLTC 全体の排出量を、その他の物質は区分ごとに試料を捕集して各区分と WLTC 全体の排出量をそれぞれ算出した。

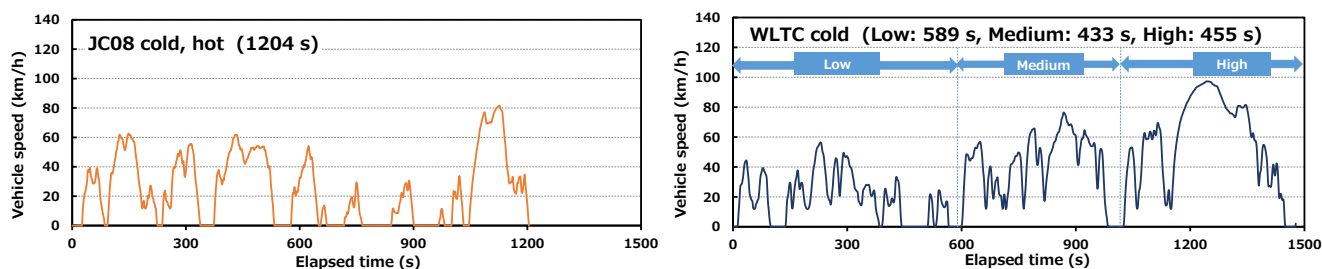


Fig. 1 Driving cycles for emission measurements

2.3 測定物質と捕集・測定方法

本研究の主な測定対象物質は、PM および PN, GHG 排出量の算定対象である CO_2 , CH_4 , N_2O である。PM, CO_2 , CH_4 , N_2O は希釈空気と希釈排出ガスを同時に捕集した。PM, CO_2 , CH_4 は国土交通省が定める公定法⁹⁾に準拠して排出量を算出した。 N_2O は電子捕捉検出器付きガスクロマトグラフを用いて分析し、公定法⁹⁾を参考に排出量を算出した。PN は GTR 15⁶⁾が規定する要件を満たした粒子個数計測装置を用いて希釈排出ガスを計測し、排出量を算出した。また、 CO_2 , CH_4 , N_2O についてはそれぞれの排出量に地球温暖化係数 ($\text{CO}_2=1$, $\text{CH}_4=25$, $\text{N}_2\text{O}=298$) を掛けて合算し、 CO_2 換算にして GHG 排出量を算出した。

なお、試験開始前には供試車両が正常に走行することを確認するために各供試車両が適合している規制の法定試験サイクルで規制物質 (非メタン炭化水素、窒素酸化物、一酸化炭素) の排出量を測定し、規制値を超えていないことを確認して車両状態が正常であることの担保とした。

3. 結果と考察

3.1 PMおよびPN

排出量の算出結果を Table 2 に示す。PM 排出量について、暖機始動条件である JC08 (hot) で、PFI 車である GP1 (2005) は 23°C では PM を捕集したフィルターの秤量値がマイナスとなって不検出扱いとなり、-7°C では 0.027 mg/km と僅かに排出された。DI 車には低温影響が見られず、23°C では 0.11~0.23 mg/km、-7°C では 0.14~0.18 mg/km であった。冷機始動条件である JC08 (cold) と WLTC の PM 排出量はいずれの供試車両でも低温になると増加し、低温影響が確認された。PN 排出量について、JC08 (hot) における GP1 (2005) は 23°C で 4.0×10^{10} #/km、-7°C で 1.5×10^{11} #/km となって増加した。他の DI 車は低温影響が見られず、23°C では 5.2×10^{11} ~ 5.8×10^{11} #/km、-7°C で 3.7×10^{11} ~ 6.5×10^{11} #/km であった。冷機始動条件である JC08 (cold) と WLTC では、いずれの供試車両でも低温影響が確認され、環境温度が低くなると PN 排出量が増加した。

Fig. 2 には環境温度による PM 排出量の変化を、Fig. 3 には PN 排出量の変化をそれぞれ示す。PM および PN 排出量はいずれの車両でも冷機始動の JC08 (cold) や WLTC の方が暖機始動の JC08 (hot) よりも高い値となった。また、供試車両の燃料噴射制御に着目すると、いずれの環境温度においても DI 車の排出量の方が PFI 車よりも高かった。この原因については、PFI 車が燃料を気化させてからシリンダー筒内に導入するのに対し、DI 車は燃料を直接筒内に噴射することが挙げられる。筒内に直接噴射された燃料は、気化しても空気と十分に混合し難い、あるいは気化せずに筒内壁面に付着して液膜となり、不完全燃焼しやすいために PM および PN 排出量が増加することが報告されている^{12)~14)}。

Table 2 PM and PN emissions at each ambient temperature

Test cycle	Ambient temp. (°C)	PM [mg/km]				PN [# /km]			
		GD1 (2005)	GD2 (2005)	GD3 (2018)	GP1 (2005)	GD1 (2005)	GD2 (2005)	GD3 (2018)	GP1 (2005)
JC08 (hot)	-7	n/a	0.18	0.14	0.027	n/a	3.7E+11	6.5E+11	1.5E+11
	0	0.22	0.38	0.11	0.031	4.6E+11	7.8E+11	6.2E+11	1.5E+11
	14	0.23	n/a	n/a	n/a	7.4E+11	n/a	n/a	n/a
	23	0.20	0.23	0.11	0.000	5.8E+11	5.2E+11	5.8E+11	4.0E+10
JC08 (cold)	-7	n/a	7.2	6.2	0.84	n/a	8.5E+12	4.5E+12	1.3E+12
	0	6.3	6.6	2.5	0.40	6.4E+12	7.7E+12	2.6E+12	7.2E+11
	14	3.2	n/a	n/a	n/a	4.6E+12	n/a	n/a	n/a
	23	1.1	2.2	0.15	0.031	2.6E+12	4.0E+12	5.6E+11	2.0E+11
WLTC	-7	n/a	6.0	5.2	2.5	n/a	4.5E+12	3.3E+12	1.4E+12
	0	5.0	4.3	2.7	1.0	4.4E+12	4.4E+12	2.0E+12	8.4E+11
	14	2.4	n/a	n/a	n/a	3.1E+12	n/a	n/a	n/a
	23	0.59	1.3	0.23	0.084	1.5E+12	1.9E+12	6.2E+11	2.4E+11

n/a : not applicable

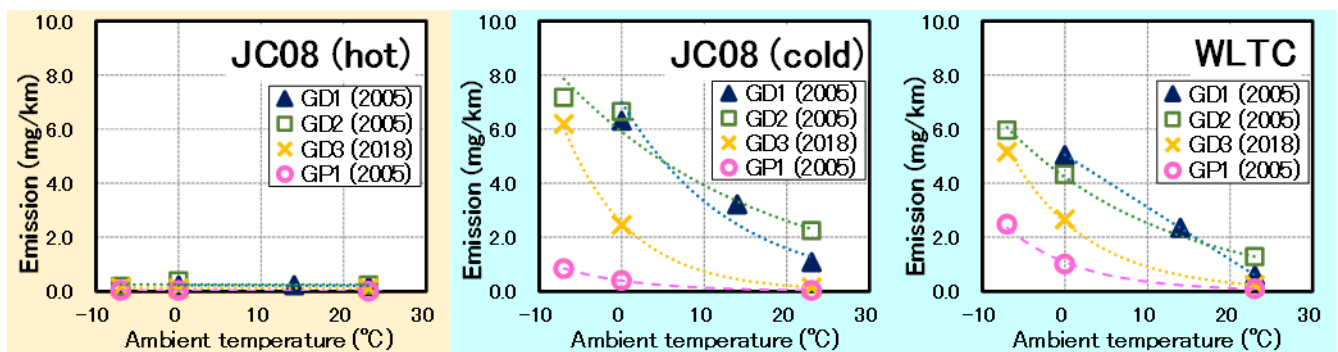


Fig. 2 Effect of ambient temperature on PM emissions

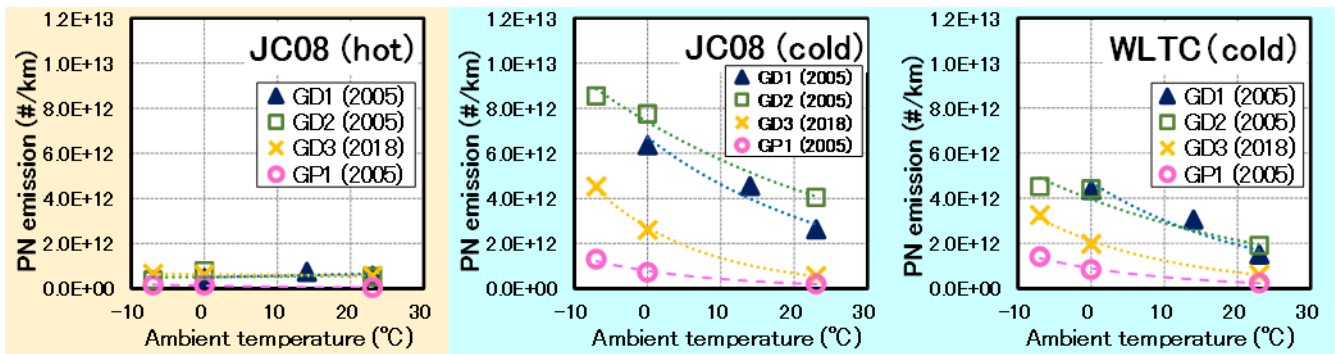


Fig. 3 Effect of ambient temperature on PN emissions

3.2 温室効果ガス

CO₂に換算した GHG 排出量と、CO₂、N₂O、CH₄の各排出量を Table 3 に示す。また Fig. 4 には环境温度による各物質の排出量の変化を示す。

GHG 排出量は始動条件に関わらず低温になるほど高くなり、排出量への低温影響が確認された。また、暖機始動の JC08 (hot) よりも冷機始動の JC08 (cold) や WLTC の方が排出量は高かった。GHG 排出量に対する各物質の寄与は、Fig. 5 に示す通りいずれの条件においても CO₂ 排出量が 98 % 以上を占めた。従って、GHG 排出量への低温影響は主に CO₂ 排出量への低温影響が反映されることが分かった。N₂O と CH₄ は GHG 排出量への寄与が低く、最も高い場合でも N₂O が 1.2 %、CH₄ が 0.4 % 程度であるため、GHG 排出量の低温影響に対して寄与が低いことが確認された。

CO₂ 排出量は始動条件に関わらず低温になるほど高くなり、排出量への低温影響が確認された。また、暖機始動の JC08 (hot) よりも冷機始動の JC08 (cold) や WLTC の方が排出量は高かった。暖機状態であっても低温になると CO₂ 排出量が増加する主な原因は、0°C (ただし、GP1 のみ) や -7°C ではアイドリングストップ機能が働かないことが挙げられる (Fig. 6)。また、低温時の空気密度上昇によって走行抵抗が大きくなることも原因であると推測された。冷機始動の JC08 (cold) と WLTC については、アイドリングストップ機能や走行抵抗の他、始動時に低温によって生じる燃料のガス化遅れや触媒温度の上昇を補助するためのリッチ噴射、潤滑油粘度増加等の駆動系の摩擦の影響が大きくなることも原因であると推測された¹⁵⁾。

N₂O 排出量への低温影響は、暖機始動の JC08 (hot) では見られず、冷機始動の JC08 (cold) と WLTC では車両によって異なった。N₂O は主に三元触媒で生成する物質であるため、各車種の触媒やエンジン制御によって排出傾向が異なると考えられた。CH₄ 排出量への低温影響は、暖機始動の JC08 (hot) では見られず、23°C で 0.87~3.3 mg/km、-7°C で 0.86~3.7 mg/km となった。冷機始動の JC08 (cold) と WLTC では低温になるほど増加した。

Table 3 GHG and components of GHG emissions at each ambient temperature (Global Warming Potential: CO₂=1, N₂O=298, CH₄=25)

Test cycle	Ambient temp. (°C)	GHG [g-CO ₂ /km]				CO ₂ [g/km]				N ₂ O [mg/km]				CH ₄ [mg/km]			
		GD1 (2005)	GD2 (2005)	GD3 (2018)	GP1 (2005)	GD1 (2005)	GD2 (2005)	GD3 (2018)	GP1 (2005)	GD1 (2005)	GD2 (2005)	GD3 (2018)	GP1 (2005)	GD1 (2005)	GD2 (2005)	GD3 (2018)	GP1 (2005)
JC08 (hot)	-7	n/a	132	131	126	n/a	132	131	126	n/a	0.20	0.51	0.25	n/a	3.7	0.86	2.6
	0	110	119	118	124	110	119	118	124	0.22	0.80	0.67	0.25	2.7	2.4	0.50	2.7
	14	103	n/a	n/a	n/a	103	n/a	n/a	n/a	0.17	n/a	n/a	n/a	3.1	n/a	n/a	n/a
	23	102	110	107	108	101	110	106	108	0.16	0.62	0.045	0.14	3.3	1.7	0.87	1.8
JC08 (cold)	-7	n/a	189	178	145	n/a	189	176	144	n/a	0.22	5.3	1.1	n/a	18	30	11
	0	129	158	157	139	127	157	155	138	2.4	0.76	6.1	1.6	19	11	15	8.8
	14	117	n/a	n/a	n/a	116	n/a	n/a	n/a	0.67	n/a	n/a	n/a	12	n/a	n/a	n/a
	23	114	134	127	118	114	133	127	118	0.59	0.66	1.8	0.74	7.8	5.9	5.5	4.2
WLTC	-7	n/a	164	169	137	n/a	163	167	137	n/a	0.82	2.5	0.71	n/a	16	19	11
	0	124	149	158	134	123	149	157	134	1.2	0.61	3.4	0.91	13	11	10	7.1
	14	115	n/a	n/a	n/a	114	n/a	n/a	n/a	0.73	n/a	n/a	n/a	8.5	n/a	n/a	n/a
	23	110	127	139	117	110	126	138	117	0.51	0.52	1.8	0.74	4.9	5.3	3.3	2.9

n/a : not applicable

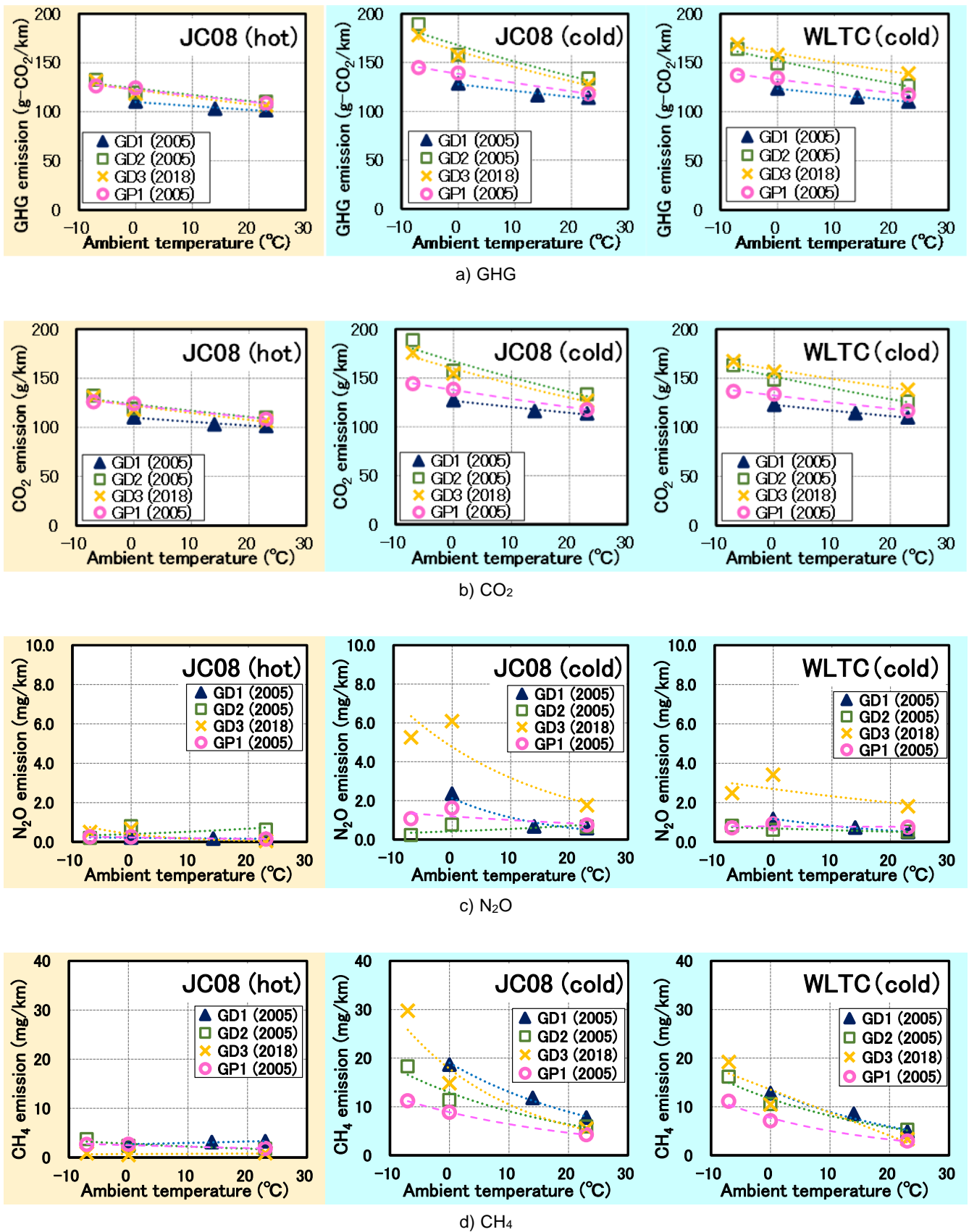


Fig. 4 Effect of ambient temperature on GHG emissions

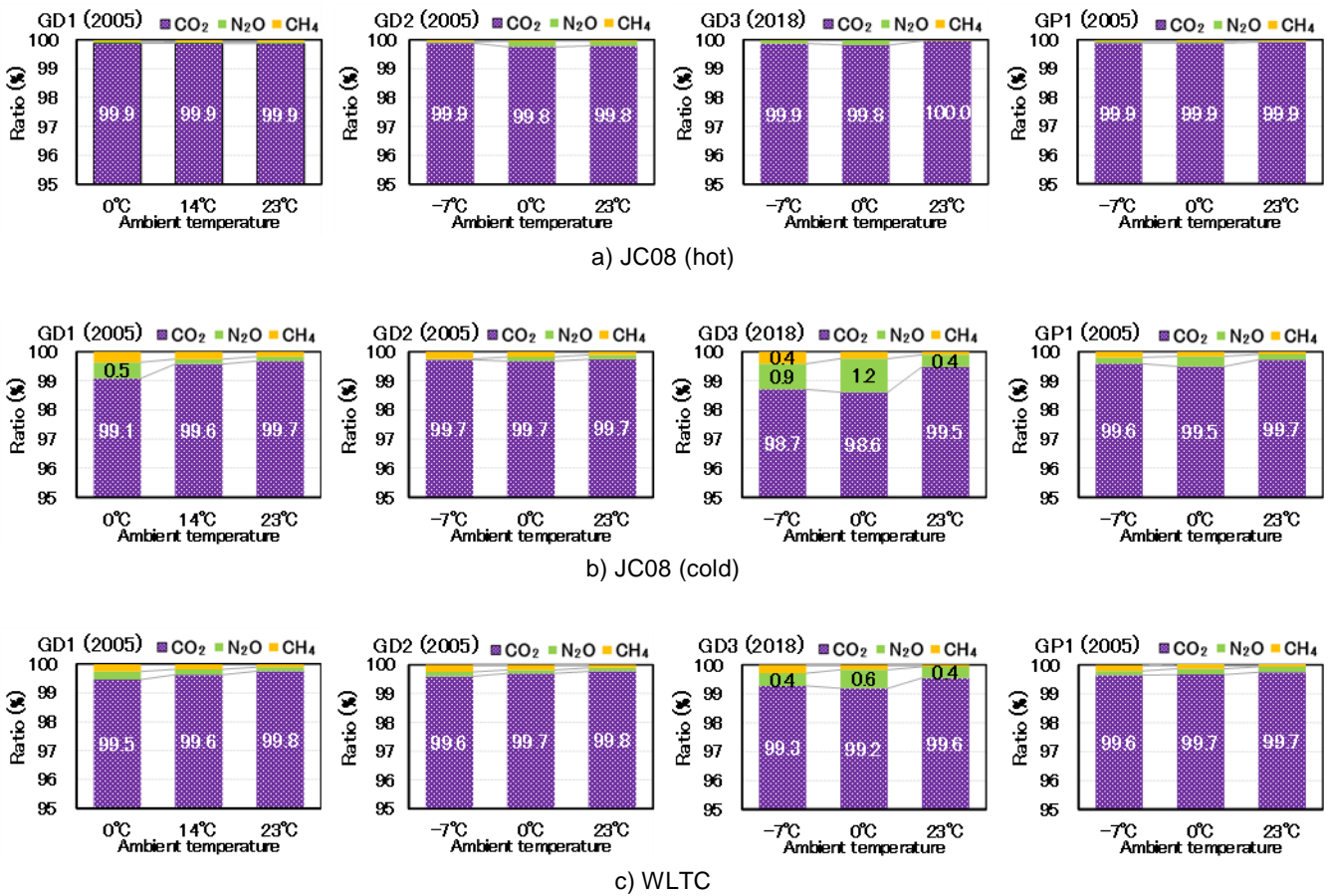


Fig. 5 Contribution ratio of each substance to GHG emissions (%)

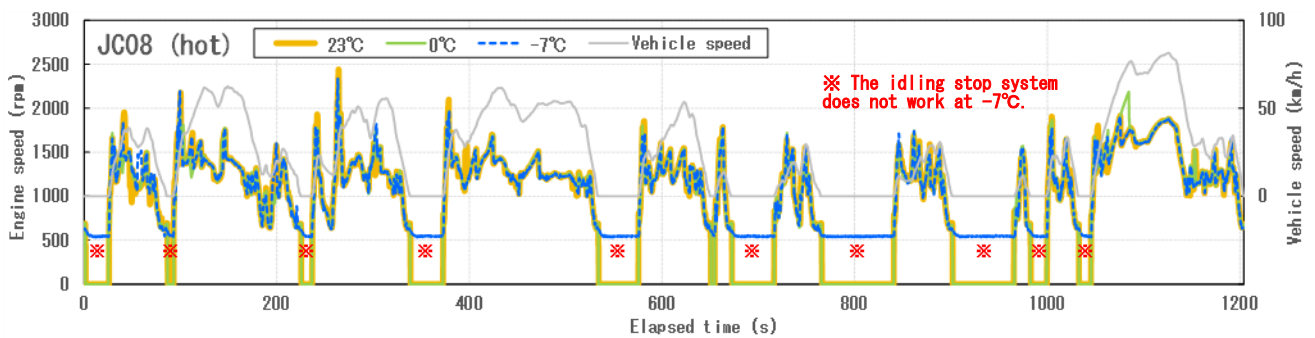


Fig. 6 Example of engine speed behavior (GD2 (2005))

4. まとめ

ガソリン乗用車から排出される PM, PN, 温室効果ガスの排出量について低温環境が及ぼす影響を調査し、以下の知見を得た。

- (1) PM 排出量への低温影響は供試車両の燃料噴射制御によって異なった。暖機始動条件において、PFI 車は 23°C で不検出扱いとなったが、0°C や -7°C の低温環境になると排出が確認された。一方、DI 車への低温影響は暖機始動条件では確認されなかった。冷機始動条件においては PFI 車と DI 車のどちらでも低温になるほど排出量が増加する傾向を示した。

- (2) PN 排出量への低温影響も供試車両の燃料噴射制御によって異なった。暖機始動条件において、PFI 車は低温になると排出量が増加したが、DI 車では大きな変化が見られず低温影響が確認されなかった。冷機始動条件ではいずれの供試車両でも低温影響が確認され、環境温度が低くなると排出量が増加した。
- (3) GHG 排出量は始動条件に関わらず低温になるほど高くなり、排出量への低温影響が確認された。
- (4) GHG 排出量への寄与は CO₂ 排出量が 98 % 以上で最も高いため、GHG 排出量への低温影響は CO₂ 排出量への低温影響が反映されていた。
- (5) CO₂ 排出量が低温影響を受ける主な原因は、暖機始動条件においてはアイドルリングストップ機能の停止と走行抵抗が高くなることの 2 つが挙げられた。また、冷機始動条件では、2 つの原因に加え、始動時のリッチ噴射や潤滑油粘度増加等の駆動系の摩擦影響が大きくなることであると推測された。

参考文献

- 1) IPCC Sixth Assessment Report Working Group 1: Climate Change 2021 The Physical Science Basis (2021)
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (参照 2022.9.9)
- 2) 国立研究開発法人国立環境研究所地球環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィス：日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2022年
https://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/jqjm10000017uzyw-att/NIR-JPN-2022-v3.0_J_GIOweb.pdf (参照 2022.9.9)
- 3) 首相官邸：第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説 (2020)
https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyme.html (参照 2022.9.9)
- 4) 内閣官房ほか：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (2021) ,
<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf> (参照 2022.9.9)
- 5) 花岡達也：短寿命気候汚染物質と地球温暖化対策 第4回 短寿命気候汚染物質 (SLCP) の発生源と削減対策, 隔月刊地球温暖化, 5 (2020)
<https://www.nies.go.jp/social/navi/colum/k3ighu0000004upc-att/slep04.pdf> (参照 2022.9.9)
- 6) United Nations Economic Commission for Europe: Addendum 15: United Nations Global Technical Regulation No. 15 Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures (WLTP) (2020)
<https://wiki.unece.org/display/trans/Latest+GTR+15> (参照 2022.9.9)
- 7) 環境省中央環境審議会, 今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について (第十四次答申) (2020)
<https://www.env.go.jp/content/900400275.pdf> (参照 2022.9.9)
- 8) 国土交通省: 別添41 重量車排出ガスの測定方法,
<https://www.mlit.go.jp/common/001184849.pdf> (参照 2022.9.9)
- 9) 国土交通省: 別添42 軽・中量車排出ガスの測定方法,
<https://www.mlit.go.jp/common/001184850.pdf> (参照 2022.9.9)
- 10) 環境省中央環境審議会 大気・騒音振動部会 自動車排出ガス専門委員会, 今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について (第十四次報告) (2020)
<https://www.env.go.jp/content/900400276.pdf> (参照 2022.9.9)
- 11) Koichiro Aikawa et al.: Development of a Predictive Model for Gasoline Vehicle Particulate Matter Emissions. SAE Int. J. Fuels Lubr. Vol. 3, No. 2, p.610-622 (2010) [doi: 10.4271/2010-01-2115](https://doi.org/10.4271/2010-01-2115)
- 12) Costanzo, V. and Heywood, J.: Effect of In-Cylinder Liquid Fuel Films on Engine-Out Unburned Hydrocarbon Emissions for an SI Engine, SAE Paper 2012-01-1712 (2012) [doi: 10.4271/2012-01-1712](https://doi.org/10.4271/2012-01-1712)
- 13) 藤間ほか: 筒内に直接噴射された燃焼噴霧の壁面衝突と燃焼特性,自動車技術会論文集, Vol.44, No.5, (2013)
[doi: 10.11351/jsaeronbun.44.1155](https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.44.1155)
- 14) Leach, F., et al.: A Review and Perspective on Particulate Matter Indices Linking Fuel Composition to Particulate Emissions from Gasoline Engines, SAE Int. J. Fuels Lubr. Vol. 15, No. 1, p3-28 (2022) [doi: 10.4271/04-15-01-0001](https://doi.org/10.4271/04-15-01-0001)
- 15) 鈴木ほか: 実走行燃費に影響する因子の定量的解析, 独立行政法人交通安全環境研究所研究所報告 (2015)
https://www.ntsel.go.jp/Portals/0/resources/report/files17/report17_02.pdf (参照 2022.9.9)

エンジン燃焼の数値解析における燃料噴霧モデル定数 最適化手法の検討

Study of optimization for a fuel spray model constant in a numerical analysis of engine combustion

松岡 正紘^{*1}
Masahiro MATSUOKA

伊藤 貴之^{*1}
Takayuki ITO

1. 背景と目的

エンジンの設計・開発において、CFD (Computational Fluid Dynamics) などの MBD (Model Based Development) が行われている。エンジン筒内における実現象を表現するモデルのひとつに燃料噴霧モデルがある。これは、混合気形成過程を再現する上で重要となり、インジェクタの特性や雰囲気条件等に応じたモデル定数の同定が必要とされる。一般的に、燃料噴霧モデル定数の同定は、定容容器等で取得された噴霧可視化実験等の結果を用いて行われるが、その手法は確立されておらず、試行錯誤を伴う多大な工数が必要とされる。

本稿では、流体計算ソルバ (HINOCA¹⁾) と最適化ソフト (mode FRONTER²⁾) を連成した効率的な噴霧モデル定数の同定方法を構築したので、その内容を紹介する。より精度の高い CFD 解析を効率的に行うことで、燃焼の高効率化、排出ガスの低減、低温始動性などのカーボンニュートラルに向けた課題解決への貢献が期待される。

2. 燃料噴霧モデルの最適化手法の検討

2.1 燃料噴霧モデル

燃料噴霧は、膨大な数の液滴群で構成されるが、個々の液滴を独立して扱うことは計算機資源の制約上困難である。そこで、エンジン燃焼の数値解析では、計算負荷低減のために、多くの液滴を内包する液滴パーセルを仮定し、このパーセルに対して保存式を解くことで噴霧全体の挙動を表現する離散液滴モデルが採用されている。液滴の分裂モデルには、液滴表面の不安定性を解く Wave Breakup model³⁾、KH-RT model⁴⁾や LISA model⁵⁾、液滴振動から分裂時間を計算する TAB model⁶⁾などがある。いずれのモデルも複数のモデル定数を調整することで、噴霧到達距離 (以降、ペネトレーション) や液滴径などの特性を再現することが可能となる。

本検討では、噴孔径と同サイズの液滴径のパーセルを噴射し、KH-RT model により液滴分裂が進む手法を対象に最適化手法を検討した。KH-RT model は、Kelvin-Helmholz (KH) 不安定と Rayleigh-Taylor (RT) 不安定を同時に解くモデルであり、表 1 に示すようにそれぞれに複数のモデル定数が存在する。中でも KH 分裂時間に関する定数である B1 と RT 分裂後の液滴径を調整する C3 を調整する機会が多い⁴⁾。

表 1 KH-RTモデルの主なモデル定数とその内容

モデル定数	モデル定数の内容
B0	分裂により生成する液滴径に関わる定数。一般的に0.61が使用される。
B1	液滴の分裂時間に関わる定数。使用するインジェクタ幾何や噴射条件の違いを調整する。
C3	RT分裂の波数に関わる定数。RT分裂の確率や分裂後の液滴径を調整する。
C_{RT}	KH分裂とRT分裂の切替えのタイミングを調整する。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士 (工学)

* 2022年9月9日受理

2.2 計算条件

計算コードには、HINOCA を用いた。HINOCA では、等間隔直交格子と境界埋込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という特徴を有する。インジェクタ諸元、噴射設定、燃料は同定対象とした実験データと同様とし、乱流モデルには LES (Large Eddy Simulation) を用いた。計算格子は図 1 に示すように格子サイズ 0.5 mm の等間隔直交格子である。なお、計算は MPI (Message Passing Interface) + OpenMP (Open Multiprocessing) のハイブリッド並列で実行し、880 コアを用いた並列計算とした。計算時間は 1 ケースあたりおよそ 1 時間である。

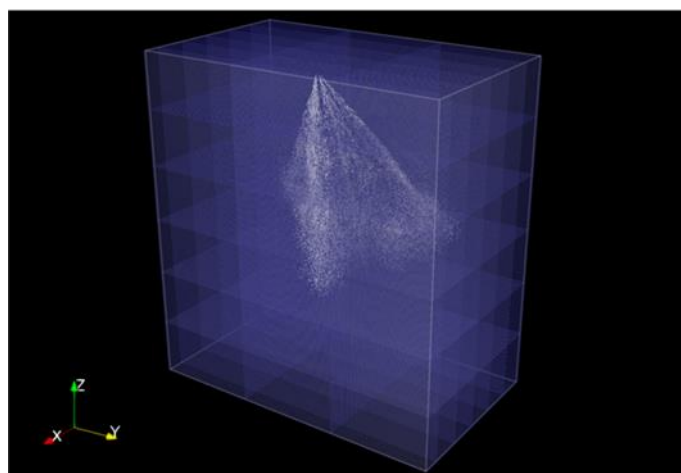


図1 計算格子

2.3 燃料噴霧モデル定数最適化のワークフロー

燃料噴霧モデル定数の最適化にあたっては、噴霧のペネトレーションとザウター平均粒径 (Sauter mean diameter: 以降, SMD) を目的関数とし、両者が同時に実験値と近くなるように KH-RT model の B1, C3 および C_{RT} 、ペネトレーションへの影響が大きい噴霧のコーン角の 4 つを入力変数として調整した。計算では、鉛直下向きの噴霧の 95 % の燃料質量を包含する噴霧到達距離からペネトレーション、ノズルから鉛直下向きに 5 mm, 8 mm, 10 mm における SMD を算出した。最適化のワークフローは、mode FRONTIER を用いて構築し、最適解の探索には遺伝的アルゴリズムを用いた。構築したワークフローを図 2 に示す。図 2 中の①~④を繰り返し行うことで、燃料噴霧モデル定数の最適化がなされる。

① 入力変数の決定

入力変数の B1, C3, C_{RT} およびコーン角の最適解の探索範囲は表 2 に示す範囲内とした。また、本検討で採用する遺伝的アルゴリズムは以下の設定とした。

- MOGA II (多目的遺伝的アルゴリズム; 世代交代式進化タイプ)
- 一様乱数シード: 1
- 指向性交叉の適用確率: 0.5
- 突然変異の適用確率: 0.1
- 突然変異による DNA 列の反転率: 0.05
- エリート戦略: 有効
- 試行回数: 256 回
- 世代数: 26

② 計算実施とポスト処理

①の入力変数を用いて HINOCA で噴霧計算を実行し、得られた計算結果のポスト処理により、ペネトレーションと SMD を取得する。

③ 実験結果の読み込み

②の計算で得られるペネトレーションと SMD の比較対象となる実験データを読み込む。

④ 計算と実験の評価

②で得られる計算のペネトレーションと SMD, ③で読み込む実験のペネトレーションと SMD について、比較を行う。本検討では、ペネトレーションと SMD について、計算と実験の差の自乗和がそれぞれ最小となる入力変数を探索する。

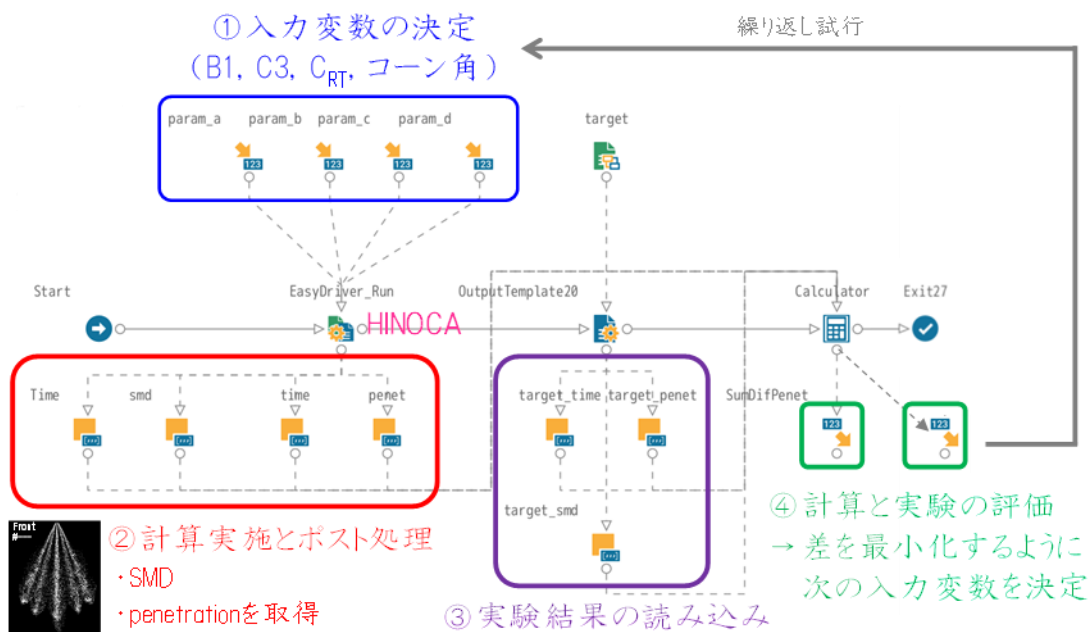


図 2 mode FRONTIERで構築した燃料噴霧モデル定数最適化のためのワークフロー

表 2 各入力変数の取り得る値の範囲

入力変数	入力変数の変動範囲
B1	10 - 80
C3	0.1 - 1.0
C_{RT}	0.5 - 5.0
Cone角	12 - 20

3. 最適化の結果

構築したモデル定数最適化のワークフローを実施した際の各モデル定数の推移を図 3 に示す。各入力変数は、設定した範囲内で幅広く変化していることがわかる。なお、コーン角については、B1、C3 および C_{RT} とは異なり、一定値に収束する傾向がみられることから、他の入力変数とは無関係に最適値が存在するものと考えられる。

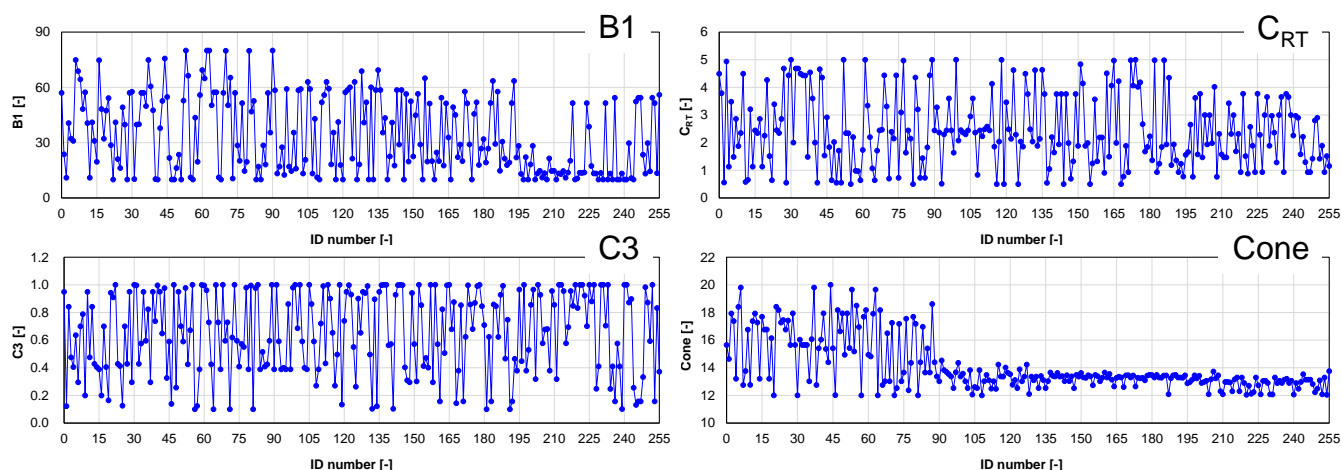


図 3 最適化を実施した際の各入力変数の推移

図 4 に施行した全 256 回の計算により得られたペネトレーション、SMD の結果を灰色線で、目標値となる実験結果の値を赤線で示す。モデル定数の組み合わせによって、実験結果に近いものから遠いものまで様々得られていることがわかる。なお、計算のペネトレーションが実験値に比べて低い傾向にあるが、計算速度を優先して設定した格子解像度 (0.5 mm) を高めることで改善される可能性がある。

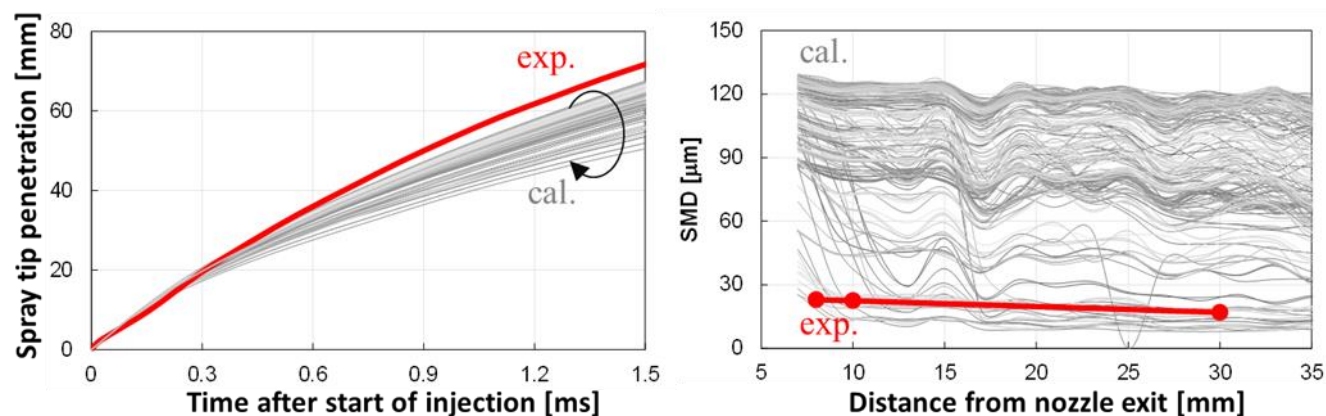


図 4 全256回の計算により得られたペネトレーション、SMDの結果

本検討は、ペネトレーションと SMD を対象として、それぞれの最小二乗和の最小化を目的とした多目的最適化問題であり、目標値に近い解を得られる異なる値の入力変数の組み合わせが複数個得られた。これらの解はパレート解と呼ばれ、この中から、目的に合った最適解を選択することになる。図 5 に各試行における目的関数の分布を示す。弓なりのパレートフロントが得られており、構築したワークフローにより最適解の探索が行われたことが確認できる。また、後半の世代ほど原点に近い (計算と実験の差が小さい) 結果になる傾向がみられ、遺伝的アルゴリズムにより効率よく最適化が行われたものと推察される。

得られたパレート解のうちどの解を採用するかは、その時々目的に応じて異なる。例として、以下の3つケースを想定した場合、それぞれ、ケース①では#254、ケース②では#81、ケース③では#116のモデル定数の組み合わせが最適解と成り得る。

ケース①：ペネトレーションの一致を重視し、SMDはおおむね一致することが求められる場合

ケース②：SMDの一致を重視し、ペネトレーションはおおむね一致することが求められる場合

ケース③：SMD、ペネトレーションに優先順位はつけず、それぞれのバランスを重視する場合

上記の各ケースにおける噴霧外観とペネトレーション、SMDの結果を図6に示す。3つのケースのうち、ケース①ではペネトレーションは最も実験に一致するもののSMDは最も乖離し、ケース②ではペネトレーションは最も実験と乖離するもののペネトレーションは最も一致する。本検討では、ペネトレーションとSMDのバランスを重視し、ケース③で得られたモデル定数を最適解とした。すなわち、 $B1 = 35.5$ 、 $C3 = 0.27$ 、 $CRT = 0.50$ 、 $Corn = 13.4$ を最適解とした。

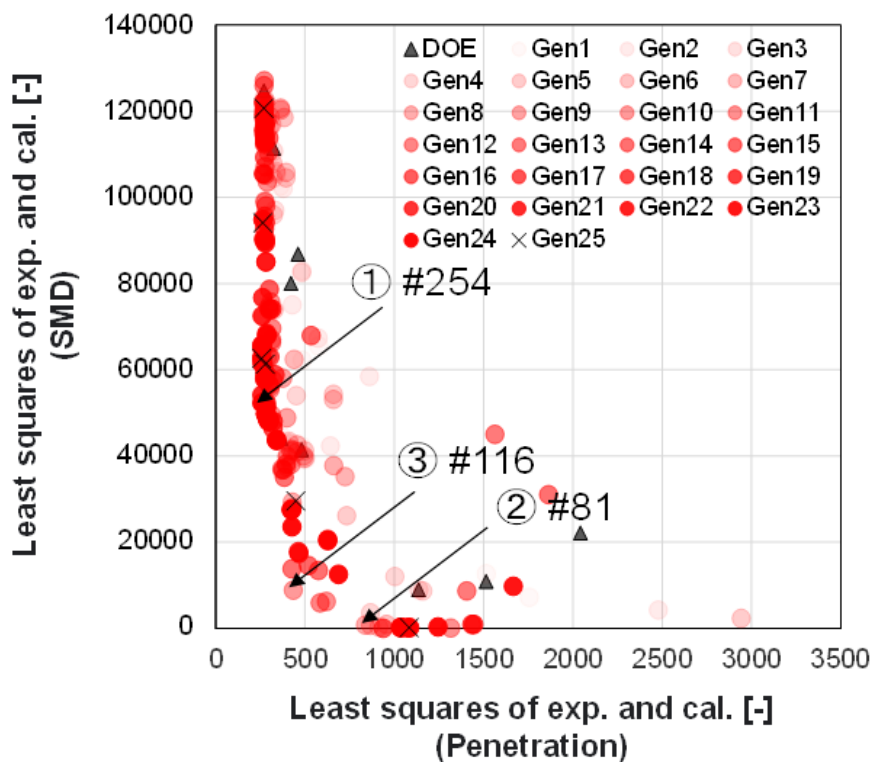


図 5 各試行における目的関数の分布

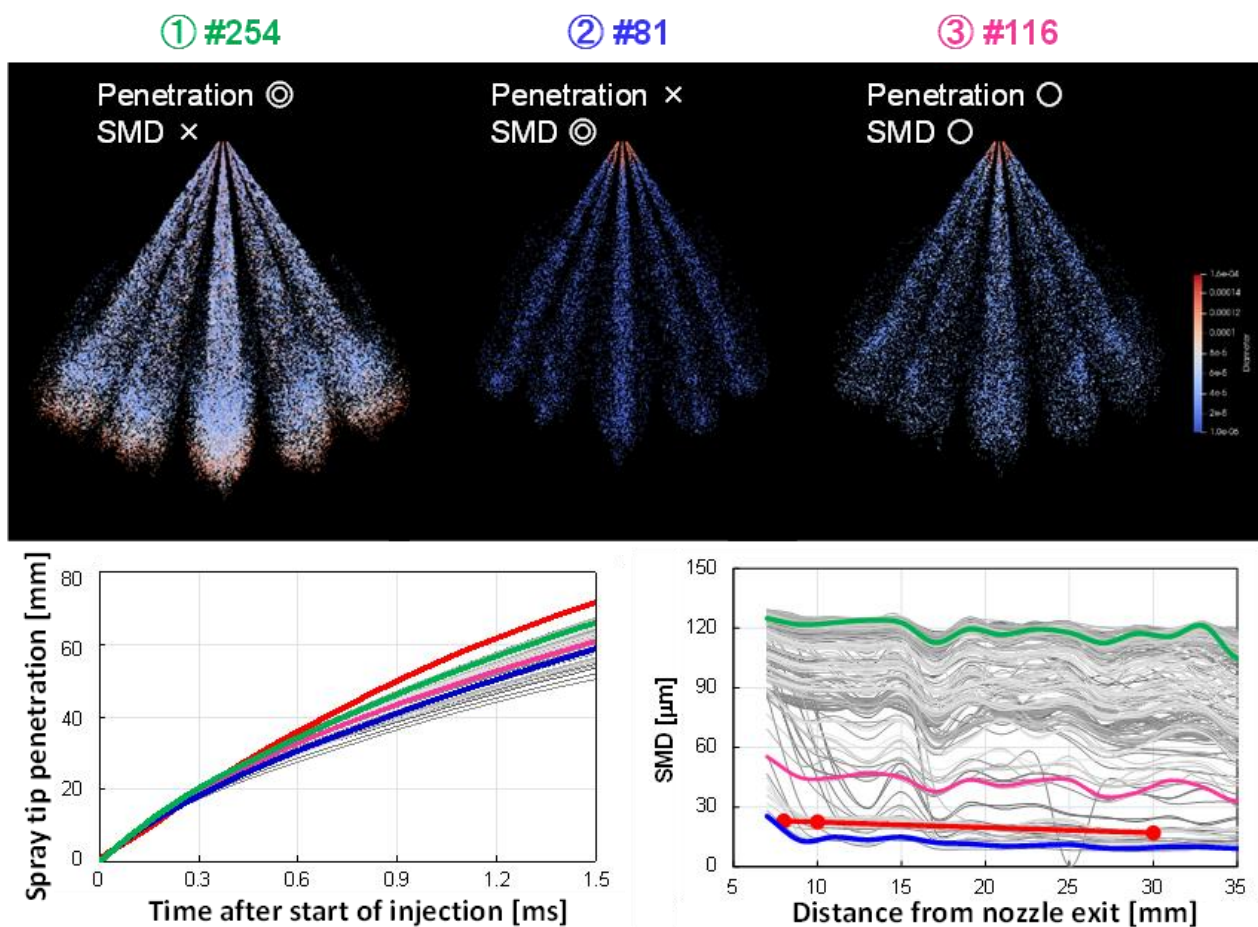


図 6 各ケースにおける噴霧外観とペネトレーション, SMD

4. まとめ

燃料噴霧モデルのモデル定数を効率的に最適化することを目的として、流体計算ソルバ (HINOCA) と最適化ソフト (mode FRONTER) を連成した多目的変数に対応した最適化ツールの構築について紹介した。構築した最適化ツールを用いることで、実験のペネトレーションと SMD に近い計算結果を得られ、定容容器で得られた噴霧特性を表現するためのモデル定数を効率的に取得可能なことを示した。

今後、本ツールを活用して様々な条件における噴霧の最適化を行うことでデータを積み上げ、各噴霧パラメータが噴霧特性に及ぼす影響を把握することで、より効率的な最適化を実現できる可能性がある。また、構築した最適化手法は、燃料噴霧モデル以外の最適化問題にも応用することが可能であり、他分野の最適化問題への応用も期待される。

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。また、噴霧の実験値については、岡山大学自然科学学域河原伸幸教授、群馬大学知能機械創製部門座間淑夫准教授より提供頂いた。ここに関係各位への感謝の意を表す。

参考文献

- 1) R. D. Reitz: Modeling atomization processes in high-pressure vaporizing sprays., Atomisation and Spray Technology, Vol. 3, No.4, p. 309-337 (1987) <https://uwmadison.app.box.com/v/AandS> (参照 2022.9.9)
- 2) M. A. Patterson, et. al.: Modeling the Effects of Fuel Spray Characteristics on Diesel Engine Combustion and Emission, SAE Paper, No. 980131 [doi: 10.4271/980131](https://doi.org/10.4271/980131)
- 3) D. P. Schmidt, et. al.: Pressure-Swirl Atomization in the Near Field, SAE Paper, No. 1999-01-0496 [doi: 10.4271/1999-01-0496](https://doi.org/10.4271/1999-01-0496)
- 4) P. J. O'Rourke, et. al. : The Tab Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup, SAE Paper, No. 872089 [doi: 10.4271/872089](https://doi.org/10.4271/872089)
- 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) [doi: 10.20619/jcombsj.58.186_191](https://doi.org/10.20619/jcombsj.58.186_191)
- 6) modeFRONTIER 多目的ロバスト設計最適化支援ツール <https://www.idaj.co.jp/product/modefrontier> (参照 2022.9.9)

WLTC モード作成方法および ランダムサイクルジェネレータへの適用

Overview of the Development of WLTC and Application for the Random Cycle Generator

[羽二生 隆宏](#)*1

Takahiro HANIU

松岡 正紘

Masahiro MATSUOKA

伊藤 貴之

Takayuki ITO

自動車の排出ガスおよび燃費を評価する試験サイクルは、2018年にJC08モードから国際的に調和されたWLTCモードに切り替わった。また、2022年10月より実走行における排出ガスを評価するRDE試験が導入される。本稿では、WLTCモードの成り立ちを解説するとともにRDE試験に対する車両や排出ガス後処理装置の開発に活用できるJARIで開発したランダムサイクルジェネレータについて紹介する。

1. はじめに

車好きの方や最近車を乗り換えた方であればお気づきだと思われるが、2017年夏頃より自動車のカatalogなどに表示される自動車の燃費は、日本独自の走行モードであるJC08モードに基づく燃費値から、国際的に調和された走行モードであるWLTCモードに基づく燃費値に順次切り替わっている¹⁾。WLTCモード燃費は、Fig. 1に示すように、走行モード全体の燃費に加え、市街地モード（Lowフェーズ）、郊外モード（Mediumフェーズ）、および高速道路モード（Highフェーズ）の走行モード毎の燃費が表示されていることから、自動車ユーザーの使用状況に応じて、自動車の省エネ性能を比較することができるようになった。例えば、通勤や買い物など街中での利用が多いユーザーは市街地モードの燃費を比較し、高速道路を頻繁に使うユーザーは高速道路モードの燃費を比較できるようになり、自分の生活スタイルに適した車両を選択しやすくなった。このように、私たちの身近になりつつあるWLTCモードであるが、その成り立ちについて良くは知られていないと思われる。WLTCモードは、国連の自動車基準調和世界フォーラム(WP29)における乗用車等の国際調和排出ガス燃費試験法(WLTP)について検討を進めるWLTPインフォーマルワーキング(WLTP-IWG)にて定められた。そこで、本稿では、一般財団法人日本自動車研究所(JARI)も活動に関わったWLTP-IWGが取りまとめたレポート^{2),3)}やWLTP-IWGの各種資料⁴⁾に基づき、WLTCモードの成り立ちについて解説する。

また、2022年10月よりリアルワールド(実走行時)の排出ガス低減を目的として、試験室内のシャシダイナモメータ上で実施する排出ガス試験に加え、実路走行中の排出ガスを車載型排出ガス分析計を用いて評価するReal Driving Emission(RDE)試験が始まる。RDE規制に向けた車両や排出ガス後処理装置の開発をシャシダイナモメータ設備を用いて効率的に行う手段として、実路における様々な交通状況を模擬した実路走行サイクルをランダムに生成するランダムサイクルジェネレータ(Random Cycle Generator: RCG)を活用した評価が進められている^{5),6)}。そこで本稿の後半では、WLTCモード作成方法を応用しJARIで開発したRCGについて紹介する。

*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

*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 博士(工学)

* 原稿受理 2022年8月5日

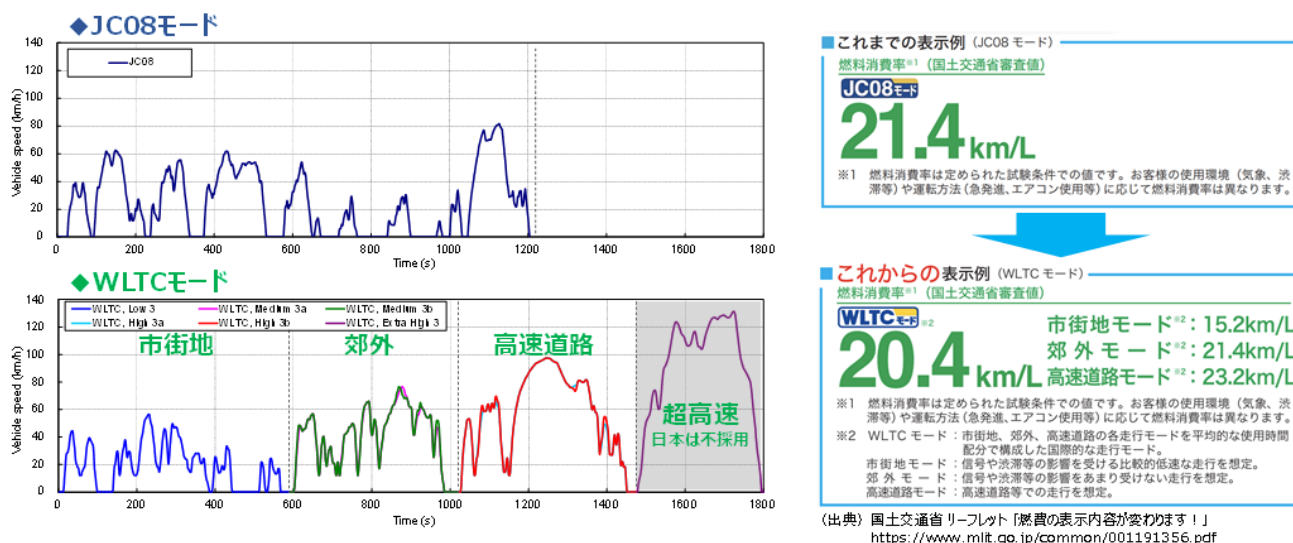


Fig. 1 Examples of the fuel efficiency under the JC08 mode and the WLTC mode¹⁾

2. WLTCモード作成方法

2.1 WLTCモード作成方法の概要

シャシダイナモメータ上で実施する排出ガス・燃費試験における試験サイクルは、路上での実走行時の排出ガスや燃費と同等となるような市場代表性が求められる。これを実現するために、排出ガス量や燃費に影響を及ぼす因子を特定し、それらの分布が、市場での走行実態と試験サイクルにおいて同等になるようにすることが重要である。Fig. 2 に排出ガスおよび燃費に影響を及ぼす代表的な因子を示す。自動車走行時の排出ガスや燃費は、エンジン負荷（駆動力あるいは出力）によって変化する。駆動力は主に加速度、出力は速度と加速度で表すことができるため、速度と加速度の分布は最も重要なパラメータの一つである。

上記の考えに基づき、WLTCモードは、試験サイクル走行時の速度・加速度分布が世界の走行動態を代表する速度・加速度分布と同等になるように設計された。Fig. 3 および以下に作成手順の概要を示し、2.2 以降に各手順の詳細を記す。

(1) 世界各国・地域の走行動態と統計情報の収集

世界各国・地域で使用される小型車の代表的な走行動態（走行データ）と自動車使用実態に関する統計情報を収集し、重み係数および走行動態参照データベースを作成した。走行動態参照データベースは、各条件別（国／車種／路線種／時間帯）に走行特性や排出ガス・燃費に対する影響因子について、走行特性の平均値や頻度分布などによって整理した。

(2) 世界統一参照データベースの作成

(1) で整理した走行動態参照データベースと重み係数を用いて、各国・各条件における交通量を加味した世界統一速度・加速度分布を作成した。また、同様に各種走行特性値や頻度分布についても、重み係数を用いて参照とする代表的な世界統一値を求めた。

(3) 候補サイクルの作成・比較・選定

(2) で作成した世界統一速度・加速度分布に最も近似する（カイ二乗値が小さい）ようなショートトリップ（発進から停止までの区間）の組合せを選択し、その組合せを WLTC モードの候補とした。WLTC モードの候補は、その他の排出ガス・燃費に影響を及ぼす因子（平均車速や加速強度など）について参照データベースと比較し、特性に大きな差異がないことを確認し、WLTC モードの1次案とした。

(4) WLTCモード1次案の検証および修正

WLTC モードの1次案は、WLTP-IWG において試験サイクルの運転性や試験再現性などが検証され、速度パターンの修正が行われた。

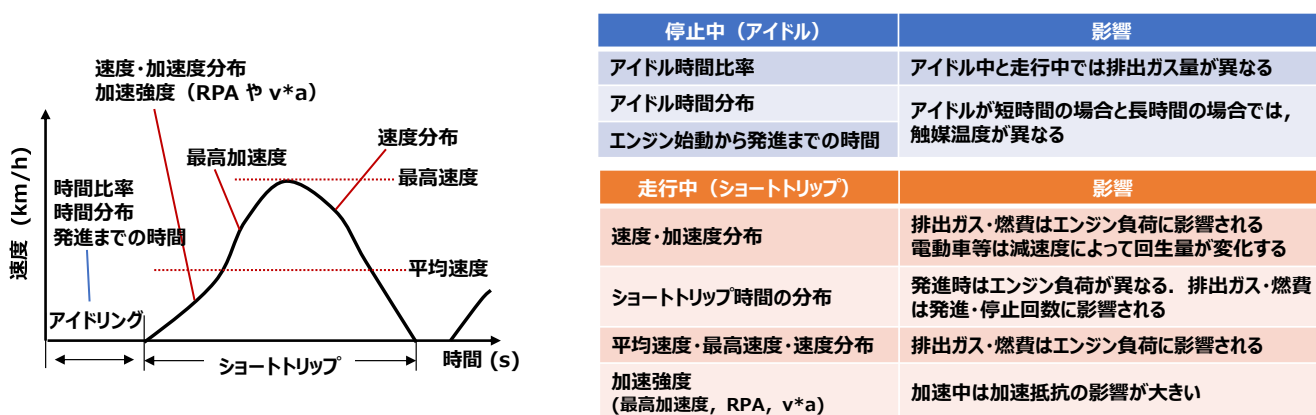


Fig. 2 Influencing factors on fuel consumption and emissions

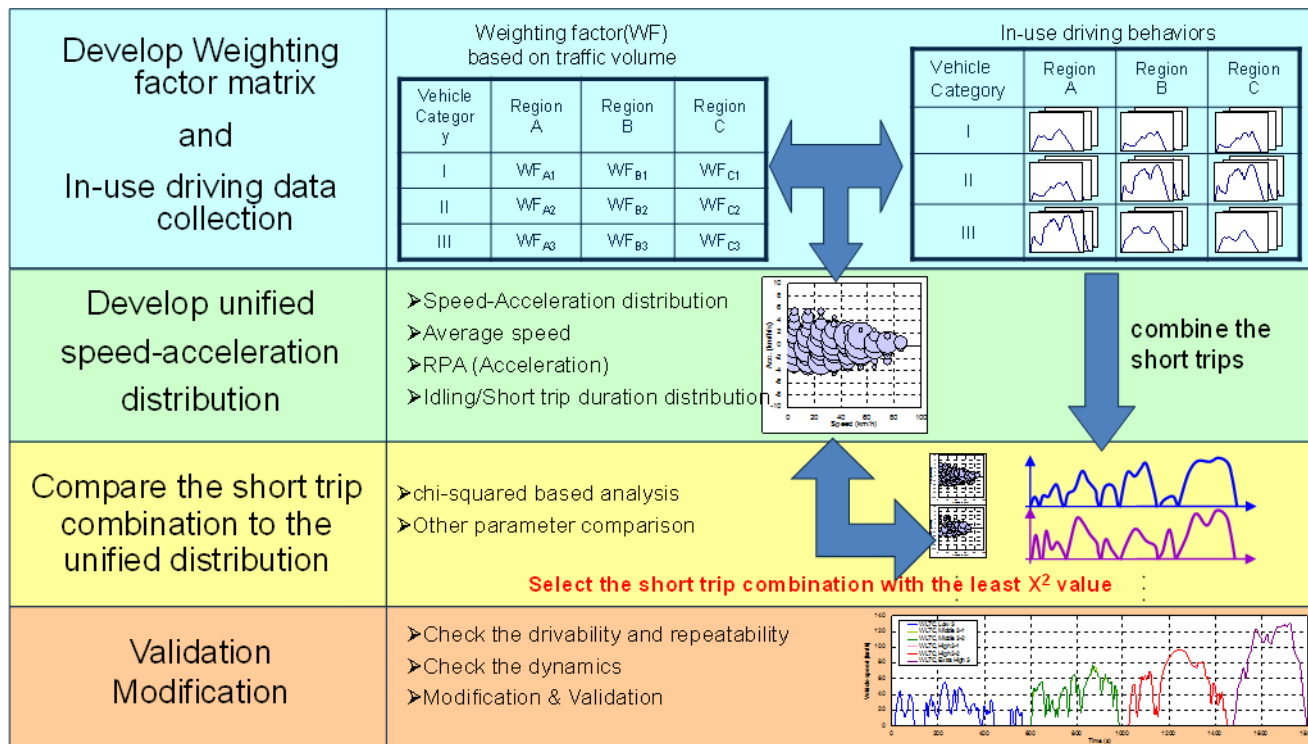


Fig. 3 Overview of the cycle development process

2.2 世界各国・地域の走行動態と統計情報の収集（Step 1）

世界各国の走行動態データは、日本、欧州（ドイツ、スペイン、イタリア、ポーランド、スロベニア、イギリス、ベルギー、フランス、スウェーデン、およびスイス）、米国、韓国、インドの5地域14カ国から合計76万km以上が集められた。走行データは、WLTP-IWGの下に設置されたWLTCモード作成のためのサブグループ（DHCグループ）において合意されたガイドライン⁷⁾に基づき、様々な車種、燃料種、排気量、質量対出力比の車両を用いて収集され、条件別（国別／路線別／速度域別／車種別／時間帯別）に分類し、データ処理が行われた。当初、日本から提案された試験サイクル作成方法では、路線別（市街／郊外／高速道路）にデータを分類する計画であったが、地域によって市街、郊外、高速道路の制限速度や走り方が大きく異なっていたことから、走行データは各国の走行動態がなるべく近くなる速度域別に分類された。最高速度が60 km/h以下の走行データ（ショートトリップと発進前のアイドルをひとつの走行データとした）は低速（Low）、60～80 km/hは中速（Middle/Medium）、80～110 km/hは高速（High）、110 km/h超は超高速（Extra high）に分類された。

世界各国の交通に関する統計情報として、条件別（国別／路線別／車種別／時間帯別）の交通量が各国より提出された。走行データに関するデータベースと区分を揃えるため、各国の交通量は各国より収集された走行データの速度域別のデータ量の比率などを用いて速度域別の交通量に換算され、地域別の重み係数が設定された。地域別の重み係数を Fig. 4 に示す。低速域においては、アジア圏の交通量比率が半分近くあるが、速度域が高くなるに従い、欧州および米国の交通比率が高くなることわかる。

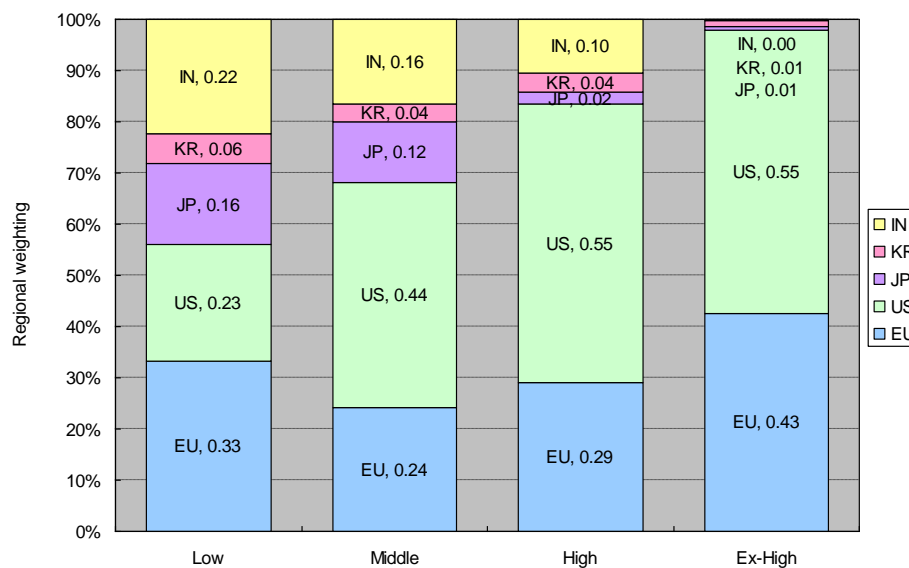


Fig. 4 Regional weighting factors

2.3 世界統一参照データベースの作成（Step 2）

各国地域で収集された走行動態データは、条件別（国別／路線別／車種別／時間帯別）にデータ処理が行われた。走行データは、適切なフィルタ処理が行われ、アイドルとショートトリップごとに分類されデータベース化された。ショートトリップのデータベースでは速度・加速度分布、時間頻度分布、平均ショートトリップ時間などが求められ、アイドルのデータベースでは時間分布や平均時間などが整理された。次に、条件別（国別／路線別／車種別／時間帯別）に作成した速度・加速度分布などが、交通量を基に設定された重み係数によって加重平均され、各種世界統一分布（Unified distribution）が作成された。Fig. 5 に、世界統一分布の一例として、速度・加速度分布、ショートトリップ時間分布およびアイドル時間分布を示す。

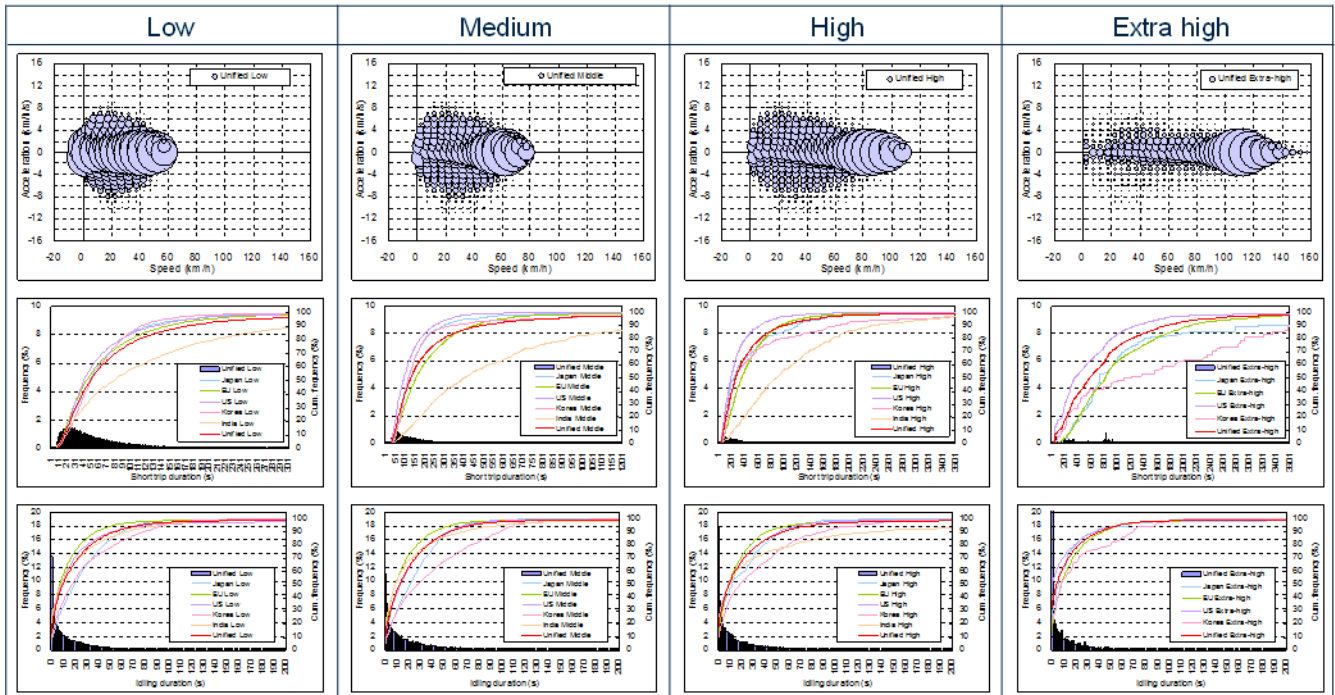


Fig. 5 Example of Unified distributions
(Speed-Acceleration distribution / Short trip duration distribution / Idling duration distribution)

2.4 候補サイクルの作成・比較・選定 (Step 3)

候補となる試験サイクルは、以下の手順で基本的な条件（サイクル時間、ショートトリップ数・時間、アイドリング時間等）が設定され、該当するショートトリップを組み合わせで作成された。

(1) サイクル時間および各フェーズ時間の設定

試験サイクル全体の時間は、実市場における車の使われ方を試験サイクルに反映させるための必要時間ならびにテストドライバーへの負担などを考慮し、これまでに策定されてきた大型車用試験サイクルである WHTC モードや二輪車用試験サイクルである WMTC モードと同じ 1800 秒とした。また、速度域毎のフェーズ時間は、Table 1 に示す交通量比をもとに低速フェーズは 589 秒、中速フェーズは 433 秒、高速フェーズは 455 秒、超高速フェーズは 323 秒に設定された。

Table 1 Cycle duration based on traffic volume

[Traffic volume in million vehicle-hour]

	Low	Middle	High	Ex-High	Total
EU	23,338	12,444	15,748	16,380	67,911
US	15,898	22,578	29,541	21,254	89,271
JP	11,126	6,157	1,164	328	18,775
KR	4,053	1,838	2,087	443	8,420
IN	15,629	8,466	5,641	64	29,800
World-wide	70,044	51,484	54,181	38,470	214,178
propotion	0.327	0.240	0.253	0.180	1.000

↓

Cycle duration	589	433	455	323	1800
----------------	-----	-----	-----	-----	------

(2) ショートトリップおよびアイドル数の設定

試験サイクル中におけるショートトリップ (ST) およびアイドル (IDLE) の出現頻度は、世界の走行動態を代表させる必要があることから、参照データベースから求められた平均ショートトリップ時間、平均アイドル時間および目標とする試験サイクル時間から求められた (式 1)。また、各試験サイクルは、アイドルから始まりアイドルで終了させるため、アイドル数はショートトリップ数に 1 を足した数とした。ここで、 $N_{ST,i}$ は各フェーズにおけるショートトリップ数、 T_i は各フェーズにおけるサイクル時間、 $T_{I,i}$ は平均アイドル時間、 $T_{ST,i}$ は平均ショートトリップ時間とする。Table 2 に各フェーズにおけるショートトリップ数およびアイドル数を示す。

$$\text{ショートトリップ数} \quad N_{ST,i} = \frac{T_i - T_{I,i}}{T_{ST,i} + T_{I,i}} \quad (\text{式1})$$

Table 2 Number of Short trips and Idling

	Target cycle duration	Average ST duration	Average IDLE duration	No. of ST	No. of IDLE
	s	s	s	#	#
Low	589	84	22	5	6
Middle	433	238	22	1	2
High	455	446	23	1	2
Extra-high	323	824	14	1	2

(3) ショートトリップおよびアイドル時間の設定

ショートトリップ時間の組み合わせについても、市場代表性を考慮する必要がある。そこで、参照データベースに基づくショートトリップ時間の累積頻度分布と同じ分布になるように試験サイクルのショートトリップ時間の組み合わせが求められた。ショートトリップの累積頻度をショートトリップ数 ($N_{ST,i+1}$) で分割し、各区間の平均時間を求める。そして、目標とするサイクル時間にするため、時間の過不足を各区間の平均時間に応じて比例配分して、ショートトリップ時間を調整した。試験サイクルは、このショートトリップ時間を持つショートトリップの組み合わせから構成されることとなる。また、アイドルについても、ショートトリップと同様の手法により適切なアイドル時間が選定された。Fig. 6 に、各ショートトリップ時間の求め方と Low フェーズにおけるショートトリップ時間の一例を示す。

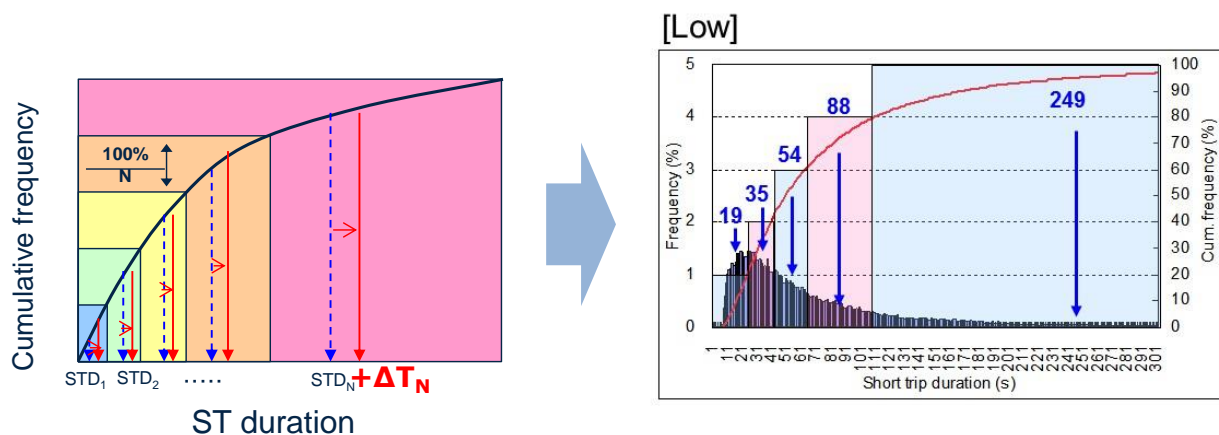


Fig. 6 Determination of Short trip duration

(4) 候補サイクルの作成・比較・選定

ショートトリップに関する参照データベースでは、ショートトリップは走行時間別に分類されている。前述の (3) で求められた各ショートトリップ時間を満足するショートトリップは、データベース中に多く存在しており、組み合わせも非常に多くなるため、各ショートトリップ時間のデータベースの平均速度、加速時間比率、減速時間比率、速度・加速度分布を考慮して、ショートトリップの組み合わせが、おおよそ $10^7 \sim 8$ 個程度に収まるようにスクリーニングされた。スクリーニングされたショートトリップの組み合わせについて、それぞれ速度・加速度分布を作成し、世界統一速度・加速度分布と比較し、カイ二乗値が最も小さくなる組み合わせ、すなわち、最も統一速度・加速度分布に近いショートトリップの組合せが、WLTC モードの候補として選定された (Fig. 7)。

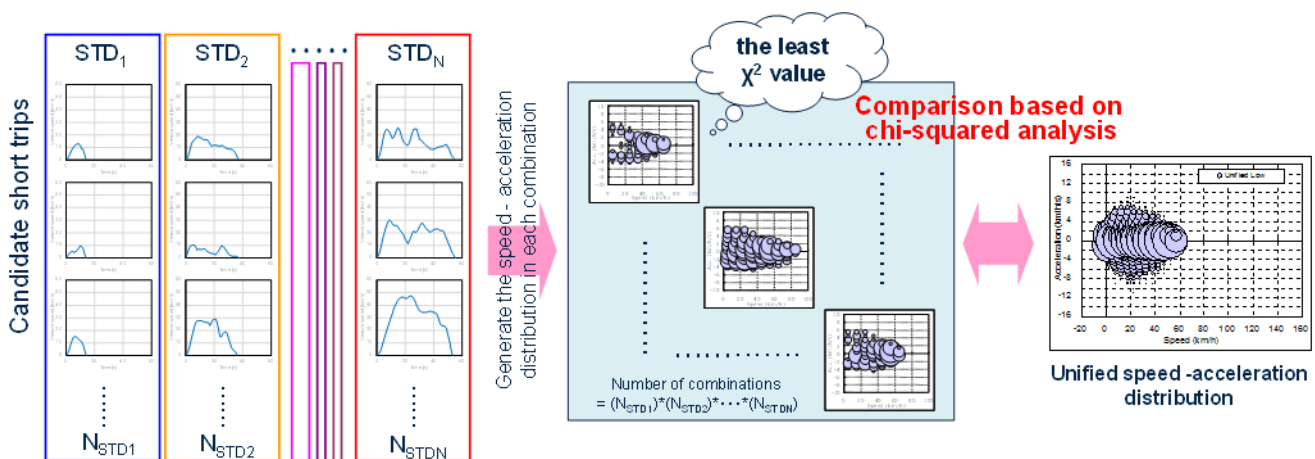


Fig. 7 Image of the Short trip combination

(5) 1stアイドル時間および1stショートトリップの選定

エンジン始動から発進までの時間や発進時の加速の強さは、触媒状態や排出ガス量に大きな影響を及ぼすため、市場実態を代表させる必要がある。そこで、一般ユーザーの車の使い方や収集した欧州および米国の走行データから、1日の最初のアイドル時間とショートトリップの傾向を解析して試験サイクルの最初のアイドル時間とショートトリップが設定された。WLTC モードの候補では、Low フェーズの最初のアイドル時間はデータベースの平均値である 28 秒が選択され、最初のショートトリップは平均速度などから選定された。

(6) WLTCモード1次案の選定

WLTC モードの候補は、速度・加速度分布の他、排出ガス・燃費に影響を及ぼす各種因子 (平均車速、加速強度など) について参照データベースと比較し、特性に大きな差異がないことが確認されてから、WLTC モード 1 次案として選定された。この WLTC モード 1 次案は、第 9 回 DHC 会議にて日本より提案された⁸⁾ (Fig. 8)。

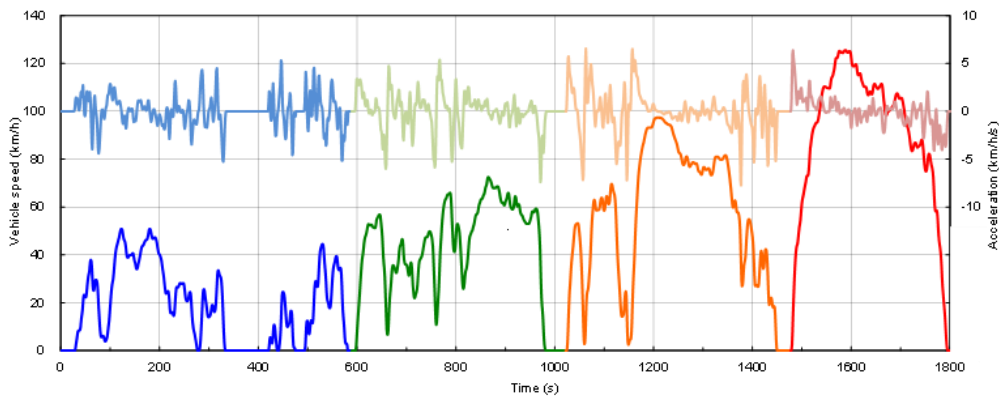


Fig. 8 WLTC driving cycle Version 1

2.5 WLTCモード1次案の検証および修正 (Step 4)

その後、WLTCモード1次案は各国によって検証が行われ、Table 3に示す修正が主に行われた。最終的に第15回DHC会議にて第5.3次案がWLTCモードの最終版として合意され、第16回DHC会議にて速度パターンが公開された⁹⁾。WLTCモードの速度パターンをFig. 9に示す。また、WLTCモードの速度・加速度分布や各種パラメータについてFig. 10およびTable 4に示す。

なお、WLTCモードは、世界の平均的な走行動態に合うように設計されて作成されたが、世界には軽貨物車や商用バンのように車両重量に対して出力が低い車両が普及している場合があり、WLTCモードの速度パターンに追従できない車両について考慮する必要があることが指摘された¹⁰⁾。これを受け、低出力車両においても適切に排出ガスや燃費が評価できるように車両クラスが分けられ、低出力車用の試験サイクルとして、Class1サイクル、Class2サイクルおよびClass3aサイクル(5.1次案)が並行して作成され⁹⁾、WLTCモード5.3次案はClass3bの車両に適用されることになった。

Table 3 Overview of the cycle modification for the Class 3 WLTC

項目	主な修正内容
1stアイドリング時間	データベースの中央値に近い11秒に変更
1stショートトリップ	データベースの加速強度に近いショートトリップに変更
Extra highフェーズ	走行実態に近いショートトリップへ変更
加速強度	データベースにより近づくため、加速強度を全体的に強化
最高減速度	シャシ上でのタイヤロックを避けるため、減速度は5.31km/h/s以下に制限
運転性・再現性	手動変速機車での試験を安定させるため最低速度は12km/hに設定
微細な速度変動	微細な速度変動を平滑化し、運転性と試験再現性を向上

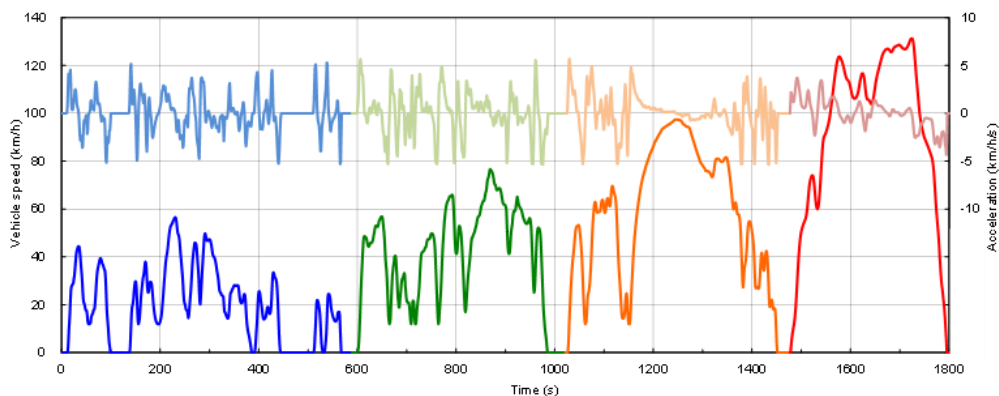


Fig. 9 WLTC driving cycle Version 5.3 (= WLTC Class 3b cycle)

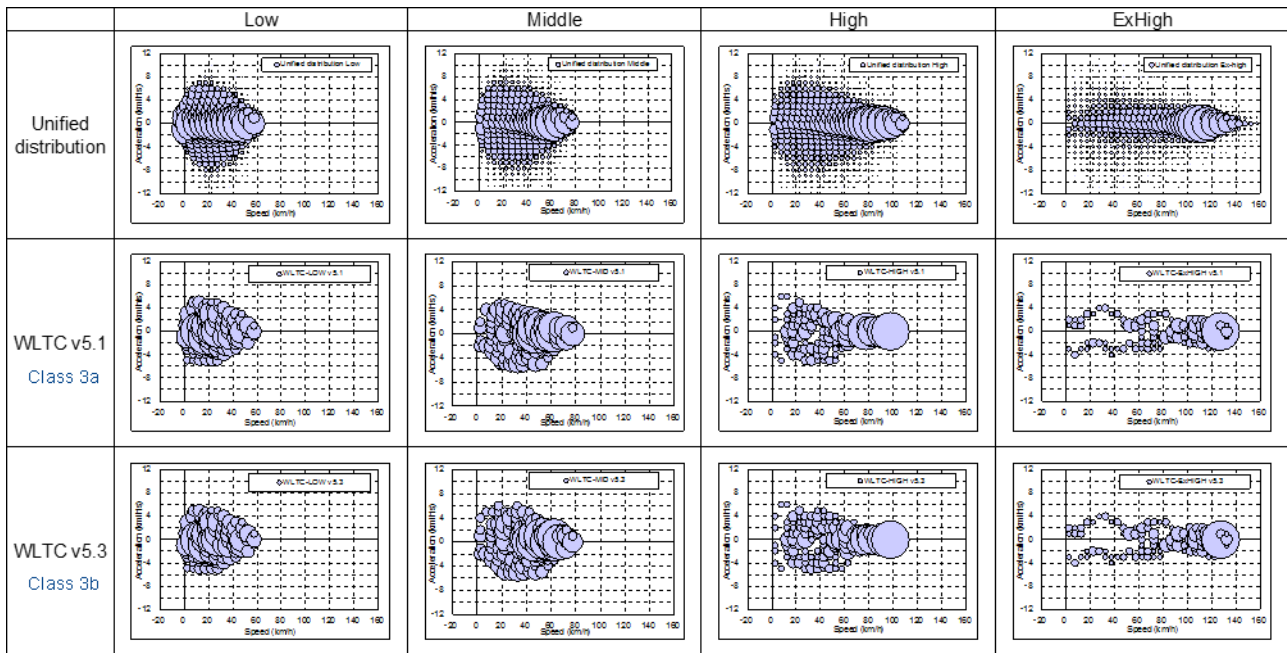


Fig. 10 Speed-Acceleration distribution

Table 4 Characteristics of the WLTC

Parameter		Cycle duration	Driving distance	Average speed	Max. speed	Max. acceleration	Max. Deceleration	RPA	Acceleration ratio	Deceleration ratio	Cruise ratio	Idling ratio	X ² value
		s	km	km/h	km/h	km/h/s	km/h/s	m/s ²	%	%	%	%	-
LOW	WWW database	-	-	19.8	60.0	-	-	0.192	27.5	25.4	22.7	24.5	-
	WLTC v5.1	589	3.09	18.9	56.5	5.3	-5.3	0.205	28.4	31.1	15.8	24.8	0.586
	WLTC v5.3	589	3.09	18.9	56.5	5.3	-5.3	0.205	28.4	31.1	15.8	24.8	0.586
MID	WWW database	-	-	38.4	80.0	-	-	0.188	31.4	27.5	28.8	12.2	-
	WLTC v5.1	433	4.72	39.3	76.6	4.6	-5.3	0.189	37.9	29.1	22.4	10.6	0.751
	WLTC v5.3	433	4.76	39.5	76.6	5.7	-5.4	0.196	36.0	30.3	23.1	10.6	0.650
HIGH	WWW database	-	-	58.0	110.0	-	-	0.156	31.3	27.2	35.5	6.0	-
	WLTC v5.1	455	7.12	56.4	97.4	5.7	-5.4	0.122	28.1	27.0	38.5	6.4	1.137
	WLTC v5.3	455	7.16	56.7	97.4	5.7	-5.4	0.132	29.0	27.7	36.9	6.4	1.008
Ex-HIGH	WWW database	-	-	86.8	194.7	-	-	0.108	25.7	23.4	48.9	2.0	-
	WLTC v5.1	323	8.25	92.0	131.3	3.7	-4.4	0.125	37.2	32.2	29.1	1.5	2.678
	WLTC v5.3	323	8.25	92.0	131.3	3.7	-4.4	0.125	37.2	32.2	29.1	1.5	2.678
Total (L-M-H-ExH)	WWW database	-	-	45.9	194.7	-	-	0.167	29.1	26.0	32.1	12.8	-
	WLTC v5.1	1800	23.19	46.4	131.3	5.7	-5.4	0.148	32.2	29.8	25.5	12.6	0.681
	WLTC v5.3	1800	23.27	46.5	131.3	5.7	-5.4	0.152	31.9	30.2	25.3	12.6	0.609

3. ランダムサイクルジェネレータへの適用

2022年10月よりリアルワールド（実走行時）の排出ガス低減を目的としたRDE試験が始まる。RDE試験では、一般道路および高速道路における実走行中に、排気管から排出される排出ガスを車載式排出ガス分析計を用いて評価する。RDE試験を実施する際の課題のひとつとして、再現性の問題が挙げられる。実路試験は周囲の交通状況、気温、天気などの影響を受けるため、同じような条件における評価がいつでも実施できるとは限らない。このため、RDE規制に向けた開発や評価を利便性の高いシャシダイナモメータ設備を用いて効率的に行う手段として、実路における様々な交通状況を模擬した実路走行サイクルをランダムに生成するRandom Cycle Generator (RCG)を活用した評価が進められている。JARIにおいてもWLTCモード作成方法を参考として、RCGの開発を行った⁵⁾ので、その概要について紹介する。

RCGの開発においては、WLTCモード作成方法の考え方を基本として、RDE試験に適用させるために主に以下の要件や機能が追加された。

- (1) 速度区分の変更（低速：40 km/h 以下，中速：40 km/h 超～70 km/h 以下，高速：70 km/h 超）
- (2) サイクル時間の長時間化対応（90分～120分）
- (3) ショートトリップ距離頻度分布の作成機能の追加
- (4) 各速度域の距離比率の調整機能の追加（低速：25±10%，中速：30±10%，高速：45±10%）
- (5) ランダム性の確保（ショートトリップ選択の範囲を拡大）
- (6) 加速強度を表す相対的正加速度（RPA）の調整機能の追加

RCGでは、実路走行データベースを低速（40 km/h 以下）、中速（40 km/h 超～70 km/h 以下）および高速（70 km/h 超）の3つの速度域に分類し、ショートトリップとアイドルの累積頻度分布を作成する。RDE試験では各速度域毎の距離比率が定められているため、距離に関する頻度分布を作成する。ショートトリップ数は目標とする走行距離を実路走行データベースの平均走行距離で除することで求める。試験サイクルは、WLTCモード作成方法と同様に各速度域における実路走行データベースから抽出したショートトリップを組み合わせて生成する。また、累積頻度分布から求めた目標となるショートトリップ距離から±5%の範囲のショートトリップを候補とすることで、選択されるショートトリップの組み合わせを増やし、ランダム性を有した実路走行サイクルとした（Fig. 11）。なお、RCGでは、実路走行で実際に出現したショートトリップをランダムに組み合わせることを目的としているため、WLTCモード作成時のように走行特性をデータベースの平均値に近づける操作（カイ二乗値の比較や最小化）は行っていない。

Fig. 12に開発したRCGを用いて生成した加速強度の異なる3種類の実路走行サイクル（RCG1、RCG2およびRCG3）を示す。生成したサイクルはいずれもRDE試験の成立要件として定められている加速強度（RPAと速度×加速度の95パーセンタイル（va95））の要件を満足していることが確認できる。

これらのサイクルをシャシダイナモメータ設備にて走行した際のNO_x排出量をFig. 13に示す。各試験は、WLTCモードの試験温度である23℃環境で暖機（ホット）条件にて実施した。RCG3については、より現実に近い使用条件を想定し、15℃の環境温度下で、冷間始動（コールド）、日射あり、エアコンONの条件においても試験を実施した（図中のRCG3（15℃））。各RCGサイクルを走行した際のNO_x排出量は、加速強度が大きいほど増加する傾向がみられることから、走り方によって大きく変化することがわかる。また、RCG3とRCG3（15℃）の比較から、環境温度や車両暖機状態、エアコン負荷などがNO_x排出量に影響を及ぼすことがわかる。

以上のことから、RCGを用いることで、実路を模擬した様々な走行条件における排出ガスをシャシダイナモメータ設備にて効率的に評価できる可能性があることが示された。

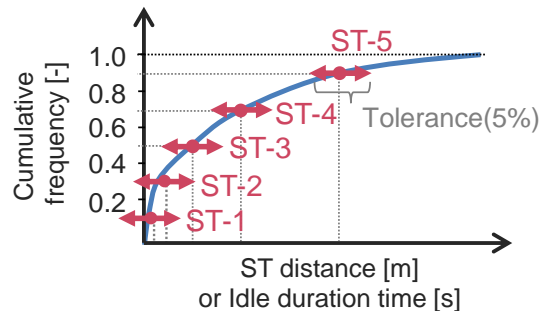


Fig. 11 Techniques for increasing the number of the short trip combinations

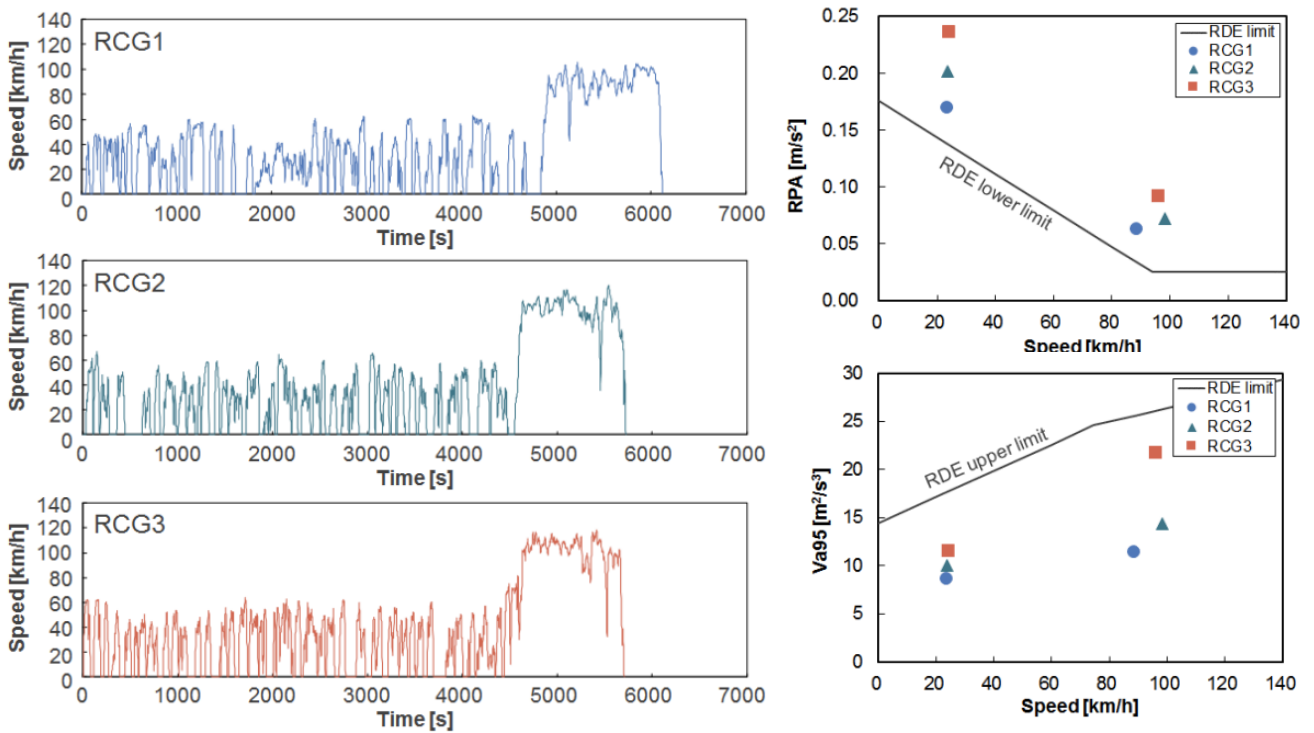


Fig. 12 Three types of RCG cycle generated by the RCG

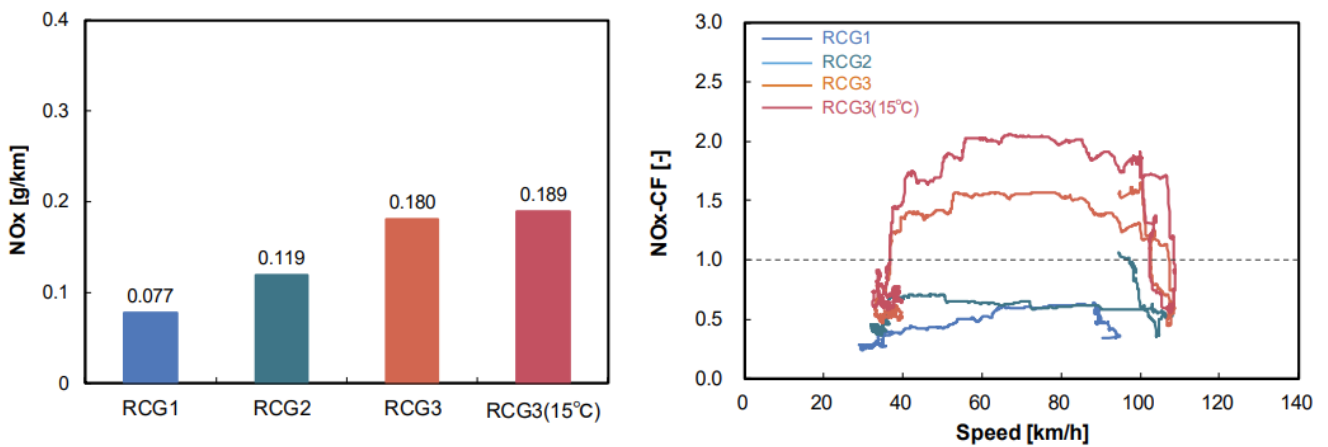


Fig. 13 Comparison of NOx emissions in each RCG cycle

4. まとめ

本稿では、自動車の排出ガスや燃費を評価するための国際的に調和された試験サイクルである WLTC モードの作成方法の概要と、それを活用したランダムサイクルジェネレータ (RCG) の考え方について紹介した。WLTC モードの作成方法を応用した JARI 独自の RCG は、様々な閾値の変更やパラメータの追加など柔軟に変更できる仕様となっている。また、環境型シャシダイナモメータと RCG を組み合わせることで、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なる。今後も JARI は、研究所内外の関係者と連携して、自動車からの排出ガスを評価するための手法について検討を重ね、Carbon Neutral や Well to Wheel Zero emission に向けて貢献していきたいと考える。

参考文献

- 1) 国土交通省リーフレット「燃費の表示内容が変わります！」
<https://www.mlit.go.jp/common/001191356.pdf> (参照 2022.8.5)
- 2) UNECE GRPE-68-03: Development of a World-wide Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC) ~ Technical Report ~,
<https://unece.org/DAM/trans/doc/2014/wp29grpe/GRPE-68-03e.pdf> (参照 2022.8.5)
- 3) Tutuianu M. et al.: Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation, Transportation Research Part D: Transport and Environment Vol. 40, p. 61-75 (2015) doi: 10.1016/j.trd.2015.07.011
- 4) UNECE documents of WLTP Sub-group on the Development of the Harmonized driving Cycle (DHC),
<https://wiki.unece.org/pages/viewpage.action?pageId=2523434> (参照 2022.8.5)
- 5) Dennis G. et al.: WLTP Random Cycle Generator, 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (2015)
- 6) 松岡正紘ら: 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, JARI Research Journal, JRJ20201002 (2020)
<https://www.jari.or.jp/research-database/detail/?slug=33284> (参照 2022.8.5)
- 7) UNECE WLTP-DHC-02-06e: Draft in-use data collection guidelines,
<https://unece.org/DAM/trans/doc/2010/wp29grpe/WLTP-DHC-02-06e.pdf> (参照 2022.8.5)
- 8) UNECE WLTP-DHC-09-02e: Development of World-wide Light-duty Test Cycle ~ Introduction of the WLTC 1st ver.~,
<https://unece.org/DAM/trans/doc/2011/wp29grpe/WLTP-DHC-09-02e.pdf> (参照 2022.8.5)
- 9) UNECE WLTP-DHC-16-06e: Finalized test cycle,
https://wiki.unece.org/download/attachments/5801079/WLTP-DHC-16-06e_rev.xlsx?api=v2 (参照 2022.8.5)
- 10) UNECE WLTP-DHC-10-19e: Minutes of 10th Meeting,
<https://unece.org/DAM/trans/doc/2011/wp29grpe/WLTP-DHC-10-19e.pdf> (参照 2022.8.5)

WLTP における電気自動車の一充電走行距離 および交流電力量消費率試験法

Electric Range and Electric Energy Consumption Test for Electric Vehicles under WLTP

羽二生 隆宏*1

Takahiro HANIU

矢野 勝*1

Masaru YANO

乗用車などの国際調和排出ガス燃費試験法 (WLTP) に関する国連の世界技術規則第 15 号 (GTR 15) の第 6 改訂が行われた。この改訂では、常温 (23 °C) 環境における電気自動車の一充電走行距離および交流電力量消費率試験法に加えて、低温 (-7 °C) 環境における試験法が策定された。本稿では、WLTP における電気自動車の試験法について解説する。

1. はじめに

国連における乗用車など小型車の国際調和排出ガス燃費試験法 (WLTP) では、従来の内燃機関自動車 (ICEV) に加えて、電気式ハイブリッド自動車 (HEV・PHEV)、電気自動車 (PEV) および燃料電池自動車 (FCV) を対象とした排出ガス、燃料消費率、CO₂ 排出量、一充電走行距離および電力量消費率に関する試験法が定められた。

WLTP は、国際的な車両認証制度 (IWVTA) の実現に向けて、国連の自動車基準調和世界フォーラム (WP29) にて開発が進められてきた。Fig. 1 に WLTP 活動の作業工程を示す。WLTP フェーズ 1a 活動 (2009~2013 年) では、小型車用国際調和サイクル (WLTC モード) および基本となる試験手順の検討が行われ、2014 年 3 月に世界技術規則第 15 号 (GTR 15) 1) が WP29 において採択された。その後、残課題の解決や試験の効率化を目的とした議論および WLTP の国連法規化、燃料蒸発ガス試験法、低温試験法、高温試験法、OBD 試験法、耐久性確認試験法の策定などについて 2020 年まで議論されてきた。電気自動車の一充電走行距離および交流電力量消費率試験法については、フェーズ 1a 活動、フェーズ 1b 活動ならびにフェーズ 2 活動において、連続サイクル法 (Consecutive Cycle Test Procedure (CCTP))、常温試験向けの短縮法 (Shortened Test Procedure (STP))、および低温試験向けの短縮法 (Type 6 Test Procedure (Type6 法)) の 3 つの試験法がそれぞれ策定されている。

本稿では、2020 年 11 月に成立した WLTP に関する GTR 15 の第 6 改訂 2) における電気自動車に関する上記 3 種類の一充電走行距離および交流電力量消費率試験法の概要を紹介するとともに試験法の違いによる結果への影響などについて解説する。

2. 一充電走行距離および交流電力量消費率試験法

我が国における乗用車等の排出ガス・燃費試験法は、道路運送車両の保安基準 別添 42 軽・中量車排出ガスの測定方法³⁾ならびに独立行政法人自動車技術総合機構が定める試験規程 (TRIAS)⁴⁾に規定されている。現在、軽・中量車に該当する電気自動車の一充電走行距離および交流電力量消費率試験試験は、国内専用の走行モードを用いた JC08 モード法と国際調和された走行モードを用いた WLTC モード法の 2 つの試験法が定められている。いずれもシャシダイナモメータ設備を用いた試験法である。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部

* 原稿受理 2022年8月5日

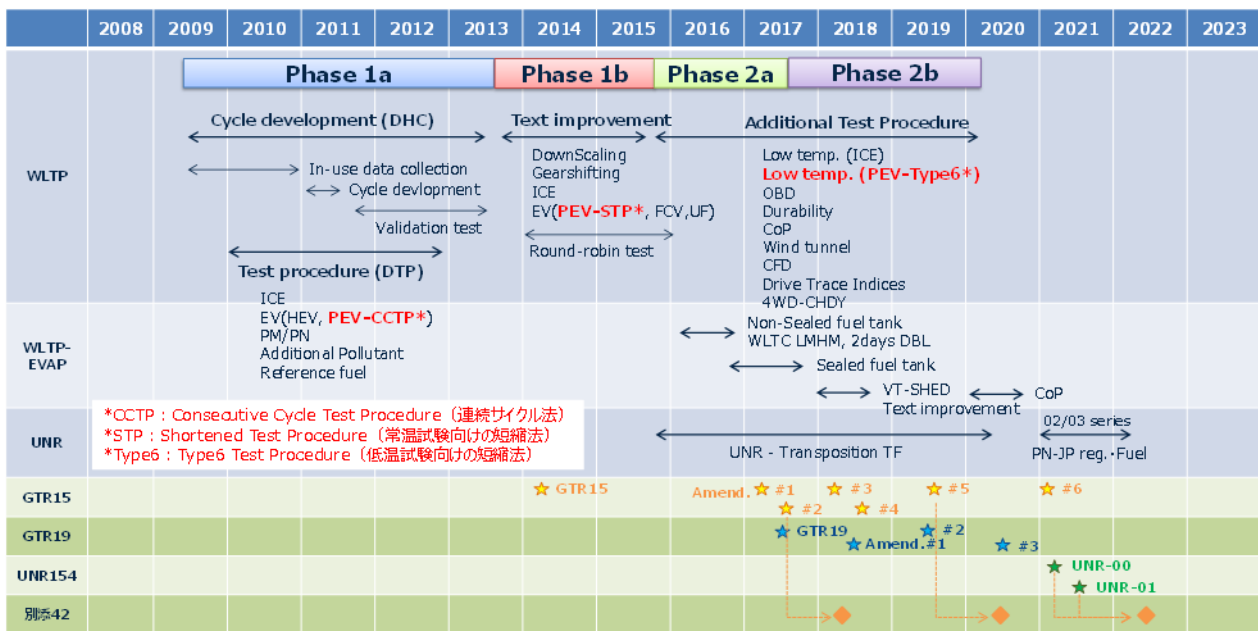


Fig. 1 Work schedule of WLTP activity

2.1 JC08モード法

JC08 モード法では、Fig. 2 に示すように、電気自動車を完全充電状態から JC08 モードを繰り返し走行させる。電池のエネルギーがなくなり、試験サイクルの速度パターンに追従できなくなった時（基準速度の速度許容誤差（車速±2 km/h、時間±1 秒）から逸脱して 4 秒以上経過した時）に運転を打ち切り、車両を停止させる。JC08 モード法における一充電走行距離は、試験開始時から運転打ち切りとなり停止するまで走行した距離（D）と定義されている。交流電力量消費率（EC）は走行終了後に、製造業者の指定する充電器・充電方法で充電した際の交流充電電力量（E_{AC}）を、一充電走行距離（D）で割ることで求める。

電気自動車の一充電走行距離はバッテリー容量の増加に伴い走行距離が年々延びており、車両開発および型式認証における試験時間の増大が問題になっている。JC08 モード 1 サイクルあたりの走行距離は 8.17 km、走行時間は 1204 秒であるため、例えば、一充電走行距離が 570 km の車両では、試験終了までに 70 サイクル、約 24 時間の走行が必要となる。また、試験サイクルを繰り返して走行する場合、規定された速度パターンの許容誤差範囲内で実験車両を運転するため、アクセルやブレーキの操作に多少の自由度が存在する。運転者やアクセルやブレーキの操作によって電力を使い切るタイミングが異なる場合があり、再現性の面について課題がある方法と指摘されている⁵⁾。

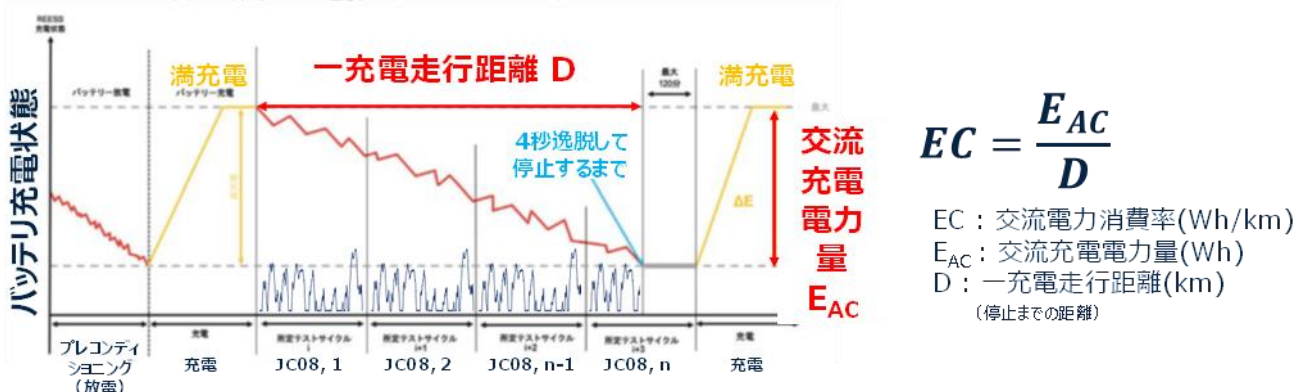


Fig. 2 Test procedure under the JC08 mode test for EVs

2.2 WLTCモード法

前述のように、JC08モード法における試験時間の長時間化や電欠のタイミングによる試験バラツキの問題を解消するため、WLTCモード試験では一充電走行距離および交流電力量消費率は計算によって求める方法に変更された。加えて、走行距離が長い車両については試験時間を短縮する試験手順を新規に策定するなど、より合理的な試験法に改訂されている。ここでは、従来の試験法からの変更点を中心としてWLTCモード試験法について解説する。

2.2.1 試験サイクルの選定

WLTPでは、車両の空車重量あたりの最高出力の比と最高速度に応じて4つの車両クラスに分かれており、それぞれ走行する試験サイクルが異なる。Fig. 3に車両クラスおよび適用試験サイクルを示す。WLTP導入当初は、国内においてはClass 1に該当するような低出力車両は存在せず、Class 2に該当する車両も極めて限定的であるため、すべての車両においてClass 3の試験サイクルが適用されていた。しかし、最近では、最高出力や最高速度を抑えた小型電気自動車や超小型モビリティ電気自動車の開発が進められていることから、このような低出力電気自動車についてはClass 1およびClass 2用の速度や加速度が緩和された試験サイクルが適用できることとなった。

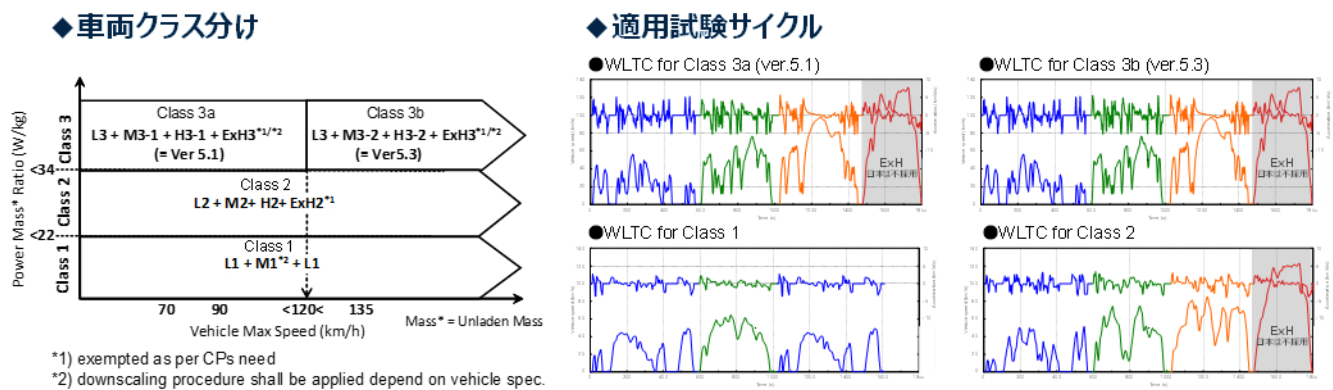


Fig. 3 Vehicle classification and applicable test cycle in Japan

2.2.2 試験手順の選定

常温（23℃）環境における WLTP 試験では、Table 1 に示すように、推定される一充電走行距離によって電気自動車の一充電走行距離の試験法が異なる。日本においては国内の走行実態に合わせ超高速（Extra high）フェーズを除く 3 フェーズでの試験が採用されている。推定される一充電走行距離が WLTC モード（3 フェーズ）4 回分の 60 km より短い車両は、連続サイクル法（CCTP）によって試験実施し、それより長い車両は短縮法（STP）によって試験が行われる。低温（-7℃）環境における試験では、後述する Type6 法を用いて試験実施する。それぞれの試験法の手順や成り立ちなどは 2.2.3 以降で説明する。

Table 1 Applicable test procedure for EVs

車両クラス	試験サイクル	推定される一充電走行距離（PER）の長さ	試験法
Class 3	超高速フェーズを含む試験サイクル（WLTC 4 phase）	3つのWLTCモードの長さより短い（PER < 69.8 km）	連続サイクル法（CCTP）
		3つのWLTCモードの長さに等しいか、より長い（PER ≥ 69.8 km）	短縮法（STP）
	超高速フェーズを除く試験サイクル（WLTC 3 phase）	4つのWLTCモードの長さより短い（PER < 60.0 km）	連続サイクル法（CCTP）
		4つのWLTCモードの長さに等しいか、より長い（PER ≥ 60.0 km）	短縮法（STP）
市街サイクル（WLTC City cycle）	WLTCモード（4 phase）より短い（PER < 23.3 km）	連続サイクル法（CCTP）	
Class 1・2*	クラス1・2用試験サイクル	-	連続サイクル法（CCTP）

※2021（令和3）年10月より、国内の電気自動車については、WLTC Class 1 および Class 2 を適用することが可能になった。試験手順は、走行距離にかかわらず、連続サイクル法を用いる。

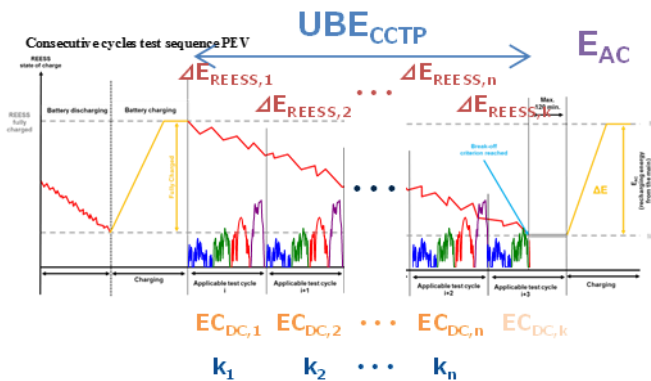
2.2.3 試験法

電気自動車の一充電走行距離および交流電力量消費率試験には、連続サイクル法（CCTP）、常温試験向け短縮法（STP）および低温試験向け短縮法（Type6 法）と 3 つの試験法が GTR 15 第 6 改訂版にて定められている。ここでは、それぞれの試験手順、設計コンセプトや試験法の違いによる結果への影響などについて説明する。

(1) 連続サイクル法

WLTC モード法における連続サイクル法（CCTP）は、Fig. 4 に示すように、JC08 モード法と同様に満充電状態から中止基準まで走行パターンを繰り返し走行する方法であるが、電力使い切り間際の運転方法の影響を極力抑えるため、充電した駆動バッテリーから実際に使用可能な電力量から一充電走行距離を算出する方法が採用されている（JC08 モード法の一充電走行距離は実測走行距離）。

一充電走行距離（Pure Electric Range（PER））は、試験開始から中止基準（Break off criterion）に達するまで測定した使用可能バッテリーエネルギー（Usable Battery Energy（UBE））を、重み係数 k によって重みづけした直流電力量消費率（ EC_{DC} ）で除することで算出する。また、交流電力量消費率は、交流充電電力量（ E_{AC} ）を PER で除することで求める。中止基準に達した走行サイクルの直流電費は試験結果に反映されないため、計算で求めた走行距離と実際に中止基準に到達するまでの走行距離実測値の間には多少の相違が生じる場合がある。本手法は走行距離が短い車両に適用される。走行距離が短い車両では、運転方法による結果のバラツキの影響が相対的に大きくなるため、試験再現性を優先した計算によって一充電走行距離を求める試験法が採用されている。



$$EC_{WLTC} = \frac{E_{AC}}{PER_{WLTC}} \quad PER_{WLTC} = \frac{UBE_{CCTP}}{EC_{DC,CCTP}}$$

$$EC_{DC,CCTP} = \sum_{j=1}^{n_{WLTC}} EC_{DC,WLTC,j} \times k_{WLTC,j}$$

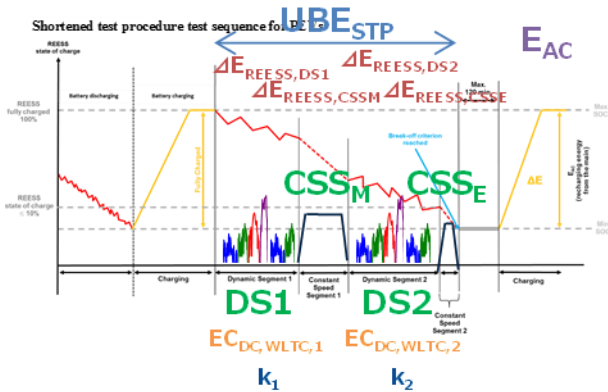
$$k_{WLTC,1} = \frac{\Delta E_{REESS,WLTC,1}}{UBE_{CCP}} \quad k_{WLTC,j} = \frac{1 - k_{WLTC,1}}{n_{WLTC} - 1}$$

$$UBE_{CCTP} = \sum_{j=1}^k \Delta E_{REESS,j}$$

Fig. 4 Sequence of the consecutive cycle test procedure for EVs

(2) 常温試験向け短縮法

常温試験向けの短縮法 (STP) については, CCTP と同様に, UBE と EC_{DC} から一充電走行距離を算出する方法が採用されている。試験時間を短くするためには, UBE と EC_{DC} を精度を保ったまま効率的に測定する手法を考える必要がある。このため, STP では, Fig.5 に示すように, 次の構成で試験が行われる。ダイナミックセグメント 1 (DS1) では, 冷間始動時およびバッテリー充電率 (SOC) が高い状態での消費電力量を測定する。また, Low フェーズと Medium フェーズについては, 冷機状態と暖機状態の消費電力量を反映させるため, WLTC モード走行後にもう一度繰り返す。ダイナミックセグメント 2 (DS2) では, SOC が低い状態にて消費電力量を測定する。始動直後の過渡状態と暖機完了後の安定状態における直流電力量消費率を加重平均することで連続サイクル法と同等の直流電力量消費率を算出する。DS1 と DS2 の中間にある定速セグメント (CSS_M) は, 一定速走行によって WLTC モードよりも早期に電力を消費させる。DS2 後の定速セグメント (CSS_E) は, 一定速において走行終了させることで試験のばらつきを抑えることを意図している。また, バッテリーが UBE の 10% 以下の状態で CSS_E が始まるように CSS_M の走行時間を調整する必要があるため, 試験が失敗しないように確実に試験実施するためには試験中に高度な判断が伴う。なお, 定速セグメントの速度は, WLTC 3 フェーズモードを使用する場合は 80 km/h 以上, WLTC 4 フェーズモードを使用する場合は 100 km/h 以上であることが定められている。国連 WLTP-IWG で実施された STP 検証試験の各機関から提出された結果を Fig. 6 に示す。一定速走行の速度が PER に及ぼす影響は 80~120km/h の間で概ね 1% 程度であり, STP と CCTP の差は, 120km/h の一定速度までの範囲では, 速度が高くなるに従い CCTP との差がやや大きくなる傾向にあった (いずれのデータも 2% 未満)。以上のことから, WLTP-IWG では, STP は CCTP と比較してほぼ同等, または, やや悪い結果 (一充電走行距離がやや短くなる) が得られる傾向にあるが, STP は再現性の向上と試験工数の削減という観点で大きな利点があると結論づけられている⁶⁾。



$$EC_{WLTC} = \frac{E_{AC}}{PER_{WLTC}} \quad PER_{WLTC} = \frac{UBE_{STP}}{EC_{DC,STP}}$$

$$EC_{DC,STP} = \sum_{j=1}^2 EC_{DC,WLTC,j} \times k_{WLTC,j}$$

$$k_{WLTC,1} = \frac{\Delta E_{REESS,WLTC,1}}{UBE_{STP}} \quad k_{WLTC,2} = 1 - k_{WLTC,1}$$

$$UBE_{STP} = \Delta E_{REESS,DS1} + \Delta E_{REESS,DS2} + \Delta E_{REESS,CSSM} + \Delta E_{REESS,CSSE}$$

Fig. 5 Sequence of the shortened test procedure for EVs

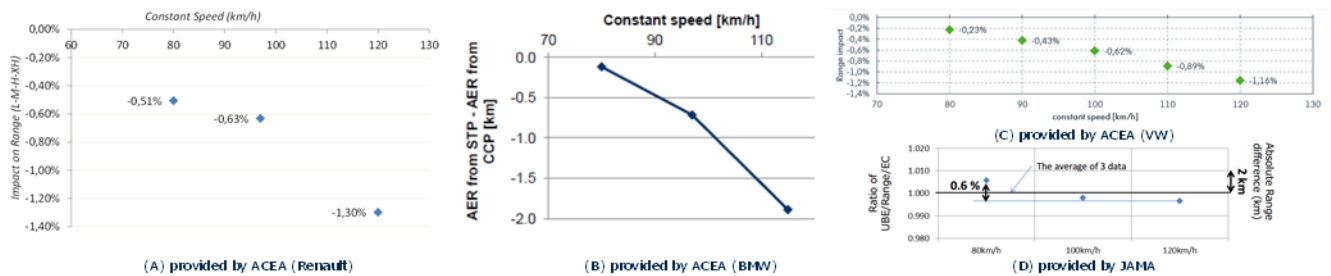


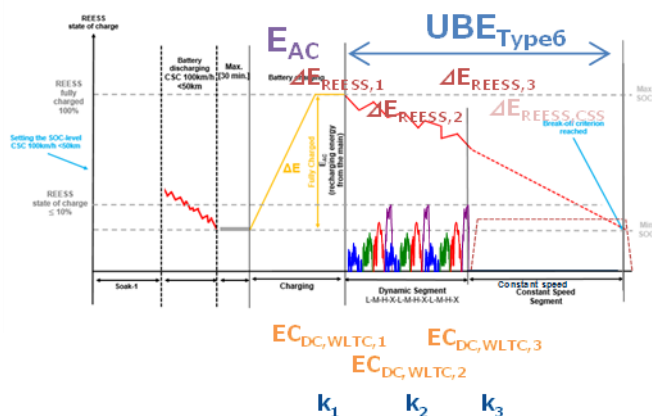
Fig. 6 Impact of the selected constant speed on the electric range

(3) 低温環境向け短縮法

低温環境向けの短縮法 (Type6 法) は, GTR 15 の第 6 改訂版において新たに追加された. 当該試験では, -7°C 環境下にて暖房を使用した条件で実施される. 低温環境・暖房使用条件下において試験を再現性を向上させるためには, 試験開始時の車両およびバッテリー状態を安定させる必要がある. このため, 試験前の車両条件設定を一定にするような工夫や規定が新たに導入されている. Fig.7 に Type6 法の試験手順を示す.

まず放電走行前に -7°C 環境下での車両ソーク (放置) を 9 時間以上行うことで車両やバッテリー温度を下げる. 次に, 放電走行中の走行距離を 50 km 以内に制限することで車両やバッテリーの温度上昇を抑制している. そして, 充電完了から試験開始までの時間を 1 時間以内に制限することで, 試験開始時のバッテリー温度が試験毎に変動しないようにしている. 試験サイクルは, 暖房やデフロスタの影響を始動直後から車室内温度が安定するまでの期間について適切に評価できるようにするため, WLTC モードを 3 回繰り返したのちに一定速走行を行う方法になっている. 加えて, 交流充電電力量は上記の 2 手法で採用されている試験後の充電量ではなく試験前の充電量を用いることに変更されている. 同じバッテリーを搭載する車両については, 同じ UBE の値を代用できるため, このような順番にすることで後半の定速セグメントの走行が省略可能になり, より一層の試験効率化が図れる.

本手法は国連 WLTP-IWG において検証が行われ, CCTP と比較してやや悪化する (一充電走行距離がやや短くなる) 傾向であることが日本ならびに欧米の自動車製造メーカーから報告されている 7), 8). その他, 充電中にバッテリーヒーターが作動する車両に対する規定が新たに定められるなど, 低温環境下において電気自動車の性能を評価するための工夫がされている.



$$EC_{WLTC} = \frac{E_{AC}}{PER_{WLTC}} \quad PER_{WLTC} = \frac{UBE_{type6}}{EC_{DC,Type6}}$$

$$EC_{DC,WLTC} = \sum_{j=1}^3 EC_{DC,WLTC,j} \times k_{WLTC,j}$$

$$k_{WLTC,1} = \frac{E_{DC,WLTC,1}}{UBE_{Type6}} \quad k_{WLTC,2} = \frac{E_{DC,WLTC,2}}{UBE_{Type6}}$$

$$k_{WLTC,3} = 1 - k_1 - k_2$$

$$UBE_{Type6} = \Delta E_{REESS,1} + \Delta E_{REESS,2} + \Delta E_{REESS,3} + \Delta E_{REESS,CSS}$$

Fig. 7 Sequence of the Type 6 test procedure for EVs

4. まとめ

WLTPに関するGTR 15の第6改訂において電気自動車の一充電走行距離および交流電力量消費率に関する3種類の試験法が定められた。本稿では、各試験法の考え方や試験法の違いによる影響について解説を行った。Type 6法に関しては、試験時間を短縮した上で車両の暖機過程を評価できるため、低温環境下のみならず、常温環境や高温環境下で冷房や各種電気デバイスを使用した試験へ適用でき、電気自動車の様々な条件における環境性能を評価する用途等に適用できると考えられる。また、今後、電気自動車の環境性能を評価するにあたっては、電費性能のみならず、ライフサイクル全体（原料調達・製造・使用・リサイクル・廃棄）での環境負荷を定量的に評価する手法も求められており、今後も検討すべき項目は多い。引き続き、研究所内外の関係者と連携して電気自動車の環境性能を評価する手法について検討を重ねていきたい。

最後に、電動車の電費性能を評価するためには、従来の排出ガス・燃費試験設備に加えて、様々な設備を取り揃える必要がある。一般財団法人日本自動車研究所（JARI）では、自動車の電動化に向けて、Fig. 8に示すように、電力測定装置、データ収録装置、充電設備などを導入しており、電動車の性能を精度と再現性の高い評価ができる環境にある。また、テストコース、日射装置付環境型シャシダイナモメータ設備、モータ・インバータ評価装置、バッテリー評価装置、充電器評価装置、ワイヤレス電力伝送機器評価装置など各種電動車（xEV）を評価するための設備・装置を取り揃えている。電動車の評価に関して何か困り事などあれば、ご相談いただくと幸甚である。



Fig. 8 JARI's efforts for EVs evaluation tests

参考文献

- 1) UNECE, UN Global Technical Regulation No.15 Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure, <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29r-1998agr-rules/ECE-TRANS-180a15e.pdf> (参照 2022.8.5)
- 2) UNECE, UN Global Technical Regulation No.15 Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure - Amendment 6, <https://unece.org/sites/default/files/2022-06/ECE-TRANS-180a15am6e.pdf> (参照 2022. 8.5)
- 3) 道路運送車両の保安基準, https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr7_000007.html (参照 2022. 8.5)
- 4) 独立行政法人自動車技術総合機構が定める試験規程, <https://www.naltec.go.jp/publication/regulation/shinsajimukitei.html> (参照 2022. 8.5)
- 5) UNECE, WLTP-SG-EV-05-10 Japan Shorten test procedure.ppt, https://wiki.unece.org/download/attachments/25264230/WLTP-SG-EV-05-10_Japan%20Shorten%20test%20procedure.ppt?api=v2 (参照 2022. 8.5)
- 6) UNECE, GRPE-72-02-Rev.1 Technical report on the development of GTR No. 15 on WLTP including phase 1b <https://unece.org/DAM/trans/doc/2015/wp29grpe/GRPE-72-02-Rev.1.pdf> (参照 2022. 8.5)
- 7) UNECE, WLTP-IMD-08e MINUTES of the intermediate WLTP IWG Meeting in conjunction with OBD and Low Temp. TF, https://wiki.unece.org/download/attachments/94046202/Draft_WLTP-IMD-08e_Minutes.docx?api=v2 (参照 2022. 8.5)
- 8) UNECE, WLTP-ITM-03e Proposals of PEV test procedures for Type VI, https://wiki.unece.org/download/attachments/94046202/WLTP-ITM-03e_PEV%20test%20procedures_JPN%20proposal.pdf?api=v2 (参照 2022. 8.5)

インドネシアにおける CNG 車普及に向けた インフラ構築を含む持続可能な環境整備・実証事業

Demonstration Project for the Spread of Compressed Natural Gas Vehicles
and Refueling Infrastructure, Including Support for the Development
of a Sustainable Environment in Indonesia

鈴木 徹也*¹

Tetsuya SUZUKI

Abstract

The following four key factors are essential and must be assured for achieving the widespread use of natural gas vehicles (NGVs, focusing on compressed natural gas vehicles (CNGVs) in this project): safety and reliability of NGVs, gas quality and a stable supply, economic benefits for users, and user convenience. This project aims to show the importance of these factors and consists of three pillars: (1) construction and operation of refueling stations (using Japanese technologies), (2) operation of CNG vehicles (10 passenger cars and 18 trucks made by original equipment manufacturers), and (3) institutional design support (providing policy recommendations based on the data and information obtained from the demonstration).

1. はじめに

インドネシア政府は、原油や石油製品（ガソリン・軽油）の輸入削減、省エネルギー・環境対策等の目的で、自国の天然ガスを輸送用燃料として代替することを国策として推進している（大統領令 2012 年第 64 号¹⁾）。しかしながら、「信頼性に劣る改造 CNG 車」、「不十分なガス品質」、「不十分なユーザー経済性（補助金付き燃料と CNG の価格差小）」、「不十分な利便性（CNG 充填所の未整備）」などの理由で、CNG 車の普及はあまり進んでいないのが現状である。

このような背景のもと、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）は、2014 年 2 月から 5 月に基礎調査²⁾を実施し（委託先：豊田通商株式会社、トヨタ自動車株式会社、東邦ガスエンジニアリング株式会社の 3 者、一般財団法人日本自動車研究所（JARI）は再委託先として参画）、日本の持つ CNG 車及び CNG 供給システムに係る技術・知見が、インドネシアでの CNG 利用に関わる安全性、信頼性、経済性、利便性の課題解決に有効であり、その検証において実証事業の実施が有効であるとの結論を得た。また、同調査の中で国有石油ガス会社プルタミナと共に、インドネシアにおける CNG 車普及に係るワークショップを 2 回開催し、情報交換および協議を通して当該事業への理解と協力を得た。

続いて 2014 年 10 月から 2016 年 12 月に実証前調査³⁾を実施し（委託先：先述の 3 者に日野自動車株式会社と JARI を加えた 5 者）、プルタミナ等との調整を重ねながら、実証事業が円滑かつ着実に進むための土台作りを行った。CNG 充填所については、立地条件や需要予測から建設場所を決定し、設備仕様、レイアウト、施工工程を検討し、建設・運用コストを積算した。CNG 車については、車両の仕様やモニターユーザーへの車両の配分、運行管理や走行データ収集方法等の検討を行った。ガス品質の分析については、エネルギー・鉱物資源省傘下の石油ガス研究機関 LEMIGAS との協力体制を構築し、品質確保の改善に向けた関係省庁への働きかけの道筋を付けた。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士（工学）

* 原稿受理 2022年5月10日 / 初掲載 2022年6月

基礎調査および実証前調査の結果を踏まえ、NEDO はエネルギー・鉱物資源省石油ガス総局（MIGAS）と共同で、日本の技術を導入した CNG 車両と CNG 充填所の設置、運用の実証を通じて、同国で CNG 車が持続的に普及する環境づくりを行うことに合意し、2017 年 12 月 11 日に基本協定書（MOU）を締結した⁴⁾。これを受け、JARI は先述の 4 者と改めてコンソーシアムを組織し、NEDO からの委託の下、プルタミナと共に 2017 年 12 月から 2021 年 6 月まで実証事業を実施した。

本実証事業は、CNG 車の普及に向け、CNG 車と CNG 充填所の導入だけでなく「制度設計の提案」も事業の柱の 1 つに据え、ハードおよびソフトの両面から包括的に取り組んだインドネシアで最初のプロジェクトであった。本稿では当該実証事業の活動内容を紹介する。実証項目が多岐に渡り 3 年を超える長期間の事業（実証前調査を含めると約 6 年半）であるが、紙面の制約上、それぞれの項目について簡素な説明に止めた。よって、技術情報や評価結果等を含む詳細については、これまでの成果報告書^{2),3),5)} や実証事業の事後評価委員会資料⁶⁾ を参照されたい。

2. 実証事業の全体概要

ジャカルタ首都圏や近郊工業団地に、日本の技術による CNG 充填所の建設・運営及び CNG 車両の導入・運行を行うと共に、国際基準に沿った品質の CNG 車用燃料を供給できるインフラ・システム導入の働きかけを行い、併せて省エネルギー化と温室効果ガス削減を目指した。さらに、CNG 車普及に係る環境整備、すなわち、安全性・信頼性・経済性・利便性の普及 4 条件を担保するための制度設計（仕組みづくり）を支援することにより、インドネシアの政策課題の解決に貢献し日本の自動車ビジネス基盤をより強固なものにすることを目的とした。このため、実証事業を下記の 3 本柱で構成した。

① CNG 充填所の建設と運用（CNG 供給システム）：

ジャカルタ首都圏および近郊の工業団地に最適な CNG 充填所を 3 か所（ジャカルタ首都圏は 2 か所で既存給油所に併設、工業団地は 1 か所で新設）設置し、実使用環境下で操業、実証を行う。

- ・ CNG 充填所から供給される燃料の品質（熱量・水分・オイル分等）の CNG 車用燃料規格への適合状況等を確認。車両の性能・信頼性に与える影響を評価。
- ・ CNG 充填所導入機器と設計システムについて、その妥当性を検証。

※ ジャカルタ首都圏に設置予定だった都市型用機器が大規模洪水により損傷し建設を断念したため、実証事業を補う代替活動（既存充填所を対象とした詳細調査・データ解析）を行うことで、工業団地の充填所 1 か所のみの実証に縮小した。

② CNG 車の導入と運行（車両 CNG 化）：

CNG 車（乗用車 10 台、貨物車 18 台（カーゴ車 10 台、トラクター 8 台））の運行基礎データ（燃費、給ガス時間等）を取得し、車種・用途への適合性と代替効果・環境改善効果を検証する。

③ 制度設計支援：

普及 4 条件と実証データに基づき、CNG 車普及のための実情に合った実効性のある提言を行う。

実証事業の実施体制を図 1 に、スケジュールを表 1 に示す。

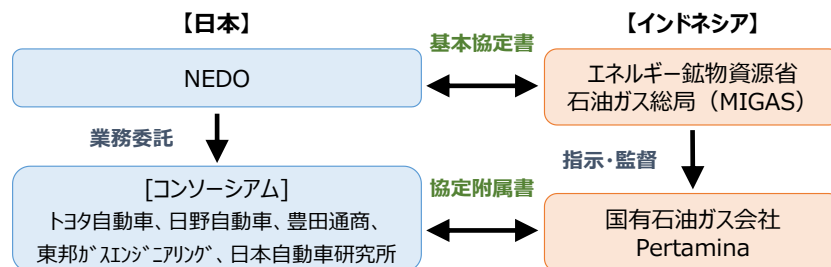


図1 実施体制

表1 スケジュール

実施項目		2017年度 (10月～)	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度 (～6月)
CNG 充填所	カラワン 充填所等の 実証	基本計画立案 基本設計	詳細設計・製作 国内工場検査	建設・運営 開所式 (12/17) 運営開始 (1/24)	運営 (4～3月) 都市型中止、代替 活動開始 (9月)	残務 (移管)
	既存充填所と 実証充填所の 比較分析	首都圏視察 (定点観測3)	ジャワ島視察 (定点観測1)	首都圏視察	首都圏ヒアリング6 (定点観測4) ※都市型中止に伴う代替活動	
	ガス品質の 分析		第1回 (2月) 首都圏8ヵ所	第2回 (11月) 首都圏内外8ヵ所	第3回 (10月) 首都圏内外8ヵ所	
CNG 車	CNG乗用車の 実証モニター	モニター計画立案	計測確認、 車両引渡 (3/28)	第1次運行 (4～3月)	第1次 (～6月) 第2次 (6～3月)	残務 (売却)
	CNG貨物車の 実証モニター	モニター計画立案	計測確認	計測確認、 車両引渡 (11/26)	運行 (4～3月)	残務 (売却)
制度設計の支援 (日会議)			キックオフ会 (7/19) 第1回°の°会議 (10/4)	ステアリング会議・ 第2回°の°会議 (9/11)	第1回制度設計会議 (7/28) 第2回 (11/12) 実証終了式 (3/29)	残務 (反映)

3. CNG充填所の建設と実証モニター

当初は、日本製システムを導入した 2 種類の充填所の建設・運営を計画した。1 つは乗用車向けとして CNG 導入の宣伝・政策効果の高いジャカルタ中心部の既存給油所に併設する都市型 (2 か所)、もう 1 つは CNG の大口利用が期待される大型貨物車向けとしてジャカルタ郊外のカラワン工業団地に新設する工業団地型 (1 か所) である。しかし都市型については、建設前の 2019 年 12 月に保管中の機器が大規模洪水により損傷したため、建設と実証を中止した。実証事業を補う代替活動 (既存充填所を対象とした詳細調査・データ解析) を行うことで、工業団地型 1 か所の実証に縮小した。

充填所の設計、機器製造・検査・輸出、現地建設・組立・試運転・検査は、2019 年 12 月上旬までに完了した (図 2)。12 月 17 日に NEDO および MIGAS 主催の開所式⁸⁾ (図 3) が開催された後、引渡検査を経て、2020 年 1 月 24 日に充填所の正式運営を開始した。カラワン充填所での実証モニターは、開業から 2021 年 3 月まで 1 年 2 か月に渡って行い、運用データ (充填情報、車両情報、日常点検・保守、CNG 成分、CNG 販売量、電力使用量、オイル使用量、運用費用) を収集・解析した。また、プラタミナと既存充填所からの情報及び実証モニター結果に基づき、実証事業終了後の 2025 年頃を想定した複数の需給シナリオにおいて、カラワン充填所の採算性を検討した。

実証期間中、停電により 1 日半だけ充填所の稼働停止が発生したが、それ以外に稼働停止はなく、ユーザーに CNG を安定供給できた。また、操作も可能な遠隔監視システムを導入し、メンテナンス及び不具合時の即時対応を行う体制を確立したことで、コロナ禍で渡航できなかった時期も含め、充填所の安定した運用を実現できた。



図2 カラワン充填所の全景



図3 カラワン充填所開所式の様子

4. 既存充填所の現状把握と実証充填所との比較分析

走行モニターおよび普及予測に有用な充填所マップの作成や、新設するカラワン充填所との比較分析のために、既存充填所の現地調査を実施した。2018年度から2019年度にかけて、首都圏だけでなくジャワ島全域における全62か所の充填所の配置と稼働状況を確認し、充填所マップをGoogle Maps上に作成した(図4)。そのうち首都圏の6か所の充填所及び都市型充填所建設予定の2か所の給油所を対象に、2018年度から2020年度にかけて1週間または3日間の定点観測を行い、撮影した動画から時間帯別の需要、充填待ち時間、充填時間、充填圧等のデータを収集・解析した(図5)。さらに、2020年度に首都圏の6か所の充填所において、管理者(需要、費用、保守等)およびユーザー(利用頻度、使い勝手等)へのヒアリングを実施した。この6か所の既存充填所とカラワンの実証充填所を、充填速度、コンプレッサーオイルのガスへの混入量、保守体制、経済性等の観点で比較分析し、カラワン充填所の優位性を示した。

都市型充填所2か所の建設断念により得られない情報やデータについては、プルタミナの協力を得て、ジャカルタ首都圏における既存充填所の運営状況や保守体制などの情報やデータを収集・分析することで補い、当初目標にできるだけ近づける詳細計画を策定した。この計画に基づいて実証事業を継続することにより、当初目指した制度設計支援の提案が実現できた。



※ Google Mapsに情報を追加。

図4 ジャワ島全域のCNG充填所マップ



図5 CNG充填所での定点観測の様子

5. ガスサンプリングと品質分析

日本・米国・欧州の自動車工業会が共同で、排出ガスや燃費規制レベルなどに応じて市場における自動車用燃料品質の推奨規格を提示したWorldwide Fuel Charter (WWFC) から、2019年10月に輸送用メタンガス燃料に関する適正品質のガイドラインが発行された⁹⁾。そこで、CNG自動車供給者の立場から、現実的な当面の規格として望ましい輸送用ガスの品質規格と最終的に目指すガス品質は、WWFCの推奨規格を参照することとした。

ガスサンプリングとガス成分分析は、2019年2月、2019年11月、2020年10月に3回、LEMIGASに外注し実施した。サンプリング候補地は、販売量が多いこと、ガス田やパイプラインとの位置関係等を考慮し、各回8か所の充填所を選定した。また、その中から、ガス成分の変動を把握する定点観測地点として、1か所の充填所を選定した。

6. CNG車の導入と実証モニター

CNG車の実証運転のため、CNG乗用車10台、CNG貨物車18台（トラクター8台、カーゴ10台）を導入した（図6）。乗用車にはデータロガーを、貨物車にはGPS機能付きデジタルタコメーター（うち2台にはデータロガーも合わせて）取り付け、日常運行の管理と運行データの取得を行った。この運行データを基に、各車両の石油代替効果と温室効果ガス削減効果、および経済性を評価した。

CNG乗用車は、2018年6月にタイのトヨタ自動車で生産、7月にインドネシア着、2019年3月に車両認証を取得し、リース会社へ販売・納車された。モニターユーザーへの車両引き渡しの翌日（2019年3月29日）からモニター運行を開始し、2021年3月19日まで2年間実施した。車両はガソリンとCNG両方のタンクを搭載しており、CNGを使い切っても燃料を切り替えることでガソリンでも走行できる。モニターユーザーとして、TMMIN（トヨタのインドネシアにおける車両生産会社）、MIGAS・ESDM（エネルギー・鉱物資源省）、プルタミナ、日系企業5社が参加した。実証期間前半は、CNG車の信頼性や有用性の理解を得るべく、CNG車及びCNG充填所等に係る法規制及び制度設計を担う関係省庁の公用車を中心に、実証期間後半は、利用状況の多様性等を踏まえ、日系民間社用車を中心に走行データを取得した。

CNG貨物車は、2018年4月にタイの日野自動車で生産、6月にインドネシア着、8月に現物検査、9月に車両認証取得、2019年3月にボデー架装開始、2019年5月より車両登録手続きを行った。CNG専焼（モノフューエル）により、CNGに適した圧縮比に調整され、さらにディーゼル排気よりも大気汚染物質（NO_x、微粒子PM）の排出が低減されている。モニターユーザーとして、物流業者8社が参加した。車両引き渡しの翌日（2019年11月27日）から準備が完了した車両からモニター運行を随時開始、2020年2月までに18台全ての運行を開始、実証モニターを2021年3月までの1年4か月間実施した。

運行データの取得のほかに、ユーザーへのヒアリングとアンケート調査を行い、使用状況や車両への満足度等を確認した。また、CNG車両の大口径ユーザーである最大手タクシー会社ブルーバードとバス会社トランスジャカルタへのヒアリングも行った。

点検・保守に関して、インドネシアでは乗用車の車検制度がないため、モニター車の点検・整備はディーラーの点検・整備予定（千km、1万km、2万km、以降1万km毎）に従った。貨物車は、6か月毎の車検に加え定期点検及び整備において、CNGエンジン固有の点検項目として、2万km毎に点火プラグのギャップ点検（ギャップ拡大に応じ交換）やCNG燃料フィルター（高圧・低圧）の点検・交換を実施した。



図6 実証車両（左：CNG乗用車、中：CNG貨物車（トラクター）、右：CNG貨物車（カーゴ））

7. 制度設計支援

制度設計については、安全性・信頼性・経済性・利便性の普及4条件に沿って、CNG車、CNG燃料品質、CNG充填所とも、国際基準調和を目指した規格・基準の導入を促すと同時に、安全性・信頼性を担保する仕組み及び実情に即した普及策を、費用対効果・費用便益を考慮して関係省庁に提案した。

ジャカルタにおいてMIGASおよびプルトミナと、2018年7月19日にキックオフ会議¹⁰⁾(図7)、10月4日に第1回プログレス会議を開催、2019年9月11日に第1回ステアリング会議及び第2回プログレス会議(図8)を同日開催し、日本-インドネシア間の進捗、課題、協力事項、制度設計支援の方向性を共有した。

2020年度は、NEDO-MIGAS主催の関係省庁やプルトミナ等の関係機関が参加する制度設計Web会議に出席した。テーマ別に2回開催され、第1回(7月28日)はCNG車の安全とユーザーの経済性、第2回(11月12日)はCNGの品質とユーザーの利便性を議題に、実証データや現地ヒアリングに基づいたインドネシアの現状と課題を報告し、改善策や普及策を提言した。また、適宜、フィードバック及びフォローアップのためのWeb会議を開催し、提言内容についてインドネシアへの浸透を図ると共に、提言内容を政策提言書としてまとめた(図9)。最終的に、MIGAS-NEDO主催のプロジェクト終了式(2021年3月29日にオンライン開催)において、MIGASおよび関係省庁、関係機関で活用いただくことを目的に、MIGAS総局長に制度設計提言書を贈呈した(図10)。インドネシア政府からは、できる限り既存の制度・インフラを活用することを前提にして現地の実情および実証データに基づきまとめた提言に対して、高い評価をいただくことができた。当該提言書は、国家エネルギー委員会(DEN)での検討において、すでに活用されている。



図7 キックオフ会議の様子



図8 第2回プログレス会議の様子



図9 提言書(左:インドネシア語版,右:英語版)



図10 MIGAS総局長への提言書の贈呈

8. まとめ

本実証事業は、CNG車の普及に向け、CNG車とCNG充填所の導入と制度設計といった、ハードおよびソフトの両面から包括的に取り組んだインドネシアで最初のプロジェクトであった。洪水被害により都市型充填所の実証を断念したものの、実証計画策定時と同様の前提条件に補正して評価した結果、石油代替効果と温室効果ガス削減効果について当初の目標を上回る改善効果を確認した。事業の開始前も開始後も思わぬ様々な問題が発生し、その都度、日本・インドネシア関係者の努力と知恵により壁を乗り越え、実証データに基づく实际的で有効な提言を示すことができた。特に佳境の2020年度以降、新型コロナウイルス感染症の世界的な拡大でインドネシアへの渡航ができない制約の下、現地側関係会社・協力会社の方々との連携を得て、計画通りのスケジュールで事業遂行できた。ここに、関係各位に感謝の意を表すとともに、インドネシアにおいて提言内容の実現に向けた取り組みが継続されることを期待したい。

参考文献

- 1) Penyediaan, Pendistribusian, dan Penetapan Harga Bahan Bakar Gas untuk Transportasi Jalan, Peraturan Presiden (PERPRES) No. 64 Tahun 2012 (2012)
<https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/41308/perpres-no-64-tahun-2012> (参照 2022.6.7)
- 2) 豊田通商株式会社, トヨタ自動車株式会社, 東邦ガスエンジニアリング株式会社: 平成25年度~26年度成果報告書 国際エネルギー消費効率化等技術・システム実証事業/フォローアップ事業「圧縮天然ガス(CNG)自動車普及に向けたガス供給インフラの構築可能性に係る現状分析(インドネシア)」に関する基礎調査報告書(2014)
https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201408/20140000000530.html (参照 2022.6.7)
- 3) 豊田通商株式会社, トヨタ自動車株式会社, 日野自動車株式会社, 東邦ガスエンジニアリング株式会社, 一般財団法人日本自動車研究所: 平成26年度~平成28年度成果報告書 国際エネルギー消費効率化等技術・システム実証事業/実証前調査「圧縮天然ガス(CNG)車普及に向けたインフラ構築を含む持続可能な環境整備・実証事業(インドネシア)」(2016)
https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201803/20180000000027.html (参照 2022.6.7)
- 4) NEDO: インドネシアで圧縮天然ガス車の普及に向け実証事業を開始(2017)
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100884.html (参照 2022.6.7)
- 5) トヨタ自動車株式会社, 日野自動車株式会社, 豊田通商株式会社, 東邦ガスエンジニアリング株式会社, 一般財団法人日本自動車研究所: 2017年度~2021年度成果報告書 エネルギー消費の効率化等に資する我が国技術の国際実証事業「圧縮天然ガス(CNG)車普及に向けたインフラ構築を含む持続可能な環境整備・実証事業(インドネシア)」(2021)
https://www.nedo.go.jp/library/database_index.html より (参照 2022.6.7)
- 6) NEDO: 「エネルギー消費の効率化等に資する我が国技術の国際実証事業/圧縮天然ガス(CNG)自動車普及に向けたインフラ構築を含む持続可能な環境整備・実証事業(インドネシア)」個別テーマ/事後評価委員会(2021)
https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/ZZAT09_100009.html (参照 2022.6.7)
- 7) NEDO: インドネシアで圧縮天然ガス(CNG)車の普及に向け本格実証運転を開始へ(2019)
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101252.html (参照 2022.6.7)
- 8) NEDO: インドネシアで圧縮天然ガス(CNG)車用CNG充填所の完成式典を開催(2019)
https://www.nedo.go.jp/ugoki/ZZ_100933.html (参照 2022.6.7)
- 9) ACEA, Auto Alliance, EMA, JAMA: Worldwide Fuel Charter for Methane-based Transportation Fuels(2019)
https://www.acea.auto/files/WWFC_19_methane.pdf (参照 2022.6.7)
- 10) NEDO: インドネシアで圧縮天然ガス(CNG)車の普及に向けた実証事業が始動(2018)
https://www.nedo.go.jp/ugoki/ZZ_100739.html (参照 2022.6.7)

2022 年度 上期 (4~9 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し、再掲いたしました。

原稿の集約にあたっては、以下の対応をしております。

- ・ JARI Research Journal として、2022 年 4 月から 2022 年 9 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。
- ・ ただし、特集原稿として再掲したもの 1 件を[こちら](#)をご覧ください。

7 歳児の交通安全理解に対する保護者の認識

Parents' Perception of their 7-year-olds' Understanding of Traffic Safety

大谷 亮^{*1}

Akira OHTANI

栗山 あずさ^{*2}

Azusa KURIYAMA

Abstract

Japanese statistics reveal that the age with highest number of pedestrian casualties per 100,000 population is 7-year-old children who are of an age of just before/after entering primary school. This study investigated parents' perceptions of their 7-year-olds' understanding of road safety. Eight hundred and sixty five parents with children between the ages of 3 to 10 completed an online questionnaire about their children's knowledge, attitudes and behaviors of road safety. For parents with children aged 5 years and over, the results showed no difference in the perceptions of their children's understanding of pedestrian signals and crosswalks. On the other hand, while parents tended to gradually perceive that their children understood priority, the law, and road crossing behavior, this perception declined among parents with 7-year-old children. The findings of this study will be valuable for promoting road safety education and supervision for 7-year-old children to prevent them from having road accidents.

1. はじめに

近年の道路交通事故（以下、「交通事故」という）の状況を概観すると、自動車乗車中よりも歩行中の状態別死者数が多く¹⁾、なお一層の交通事故低減に向けて、歩行者を対象にした交通安全諸策の充実が重要となっている。歩行中の交通事故についてみると、登下校中の子どもが交通事故に遭う事例が社会問題となり、日本の各所において、通学路の合同点検が実施されている²⁾。また、人口 10 万人あたりの死傷者数が最も多い年齢は 7 歳児であり³⁾、この点から、2021 年より開始された第 11 次交通安全基本計画⁴⁾の対策の視点にも掲げられているように「高齢者及び子供の安全確保」が急務となっている。

7 歳児の交通事故については、小学校の入学に伴い一人もしくは友人同士で歩行する機会が増加すること、および複雑な交通環境に幼少期の子どもが適応することが困難なこと⁵⁾などが起因して、死傷者数が増えていると考えられる。また、小学校入学前から小学 2 年生までの月別の統計をみると、新一年生となった 5 月以降に歩行中の死傷者数が増加しており、入学直後の 4 月まで行われていた集団登下校の機会が減少することや、学校生活などへの児童の慣れが、5 月以降の事故の増加に関係していると推察される³⁾。さらに、小学校入学当初までは、保護者と一緒に登下校することや、日常生活の中でも保護者とともに歩行する機会が多かったのに対し、子どもの年齢が増すとともに、親子関係から仲間関係へと生活環境が徐々に移行し、保護者が自身の子どもの監視する機会が減少することも、未熟な 7 歳児の歩行中の死傷者数が増加する原因と考えられる。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部 博士 (心理学)

*2 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部

* 原稿受理 2022年4月10日 / 初掲載 2022年5月

諸外国では、交通安全や防犯などの観点から、子どもに対する保護者の監視（Parental Supervision：以下、「PS」という）を対象にした検討が進められており、PSに影響を及ぼす要因などが広く研究されている⁶⁾。PSの影響要因については、子どもの能力や技能の発達に対する保護者の認識が関係すると推察され、自身の子どもが独力で安全を確保できると考える保護者はPSの遂行が低く、逆に独力で安全を確保できないと認識する保護者はPSを実行すると予想される。子どもの能力や技能に対する保護者の認識を検討した調査から、子どもが独力で歩道を歩行することができるという保護者が考える最低年齢が約8歳であったことや、7歳から10歳の子どもに比べて、5歳から6歳の子どもの保護者は、自身の子どもの道路横断の能力や技能を過大評価すること⁸⁾が報告されている。しかしながら、PSに影響を及ぼす子どもの能力や技能に対する保護者の認識を調べた研究は必ずしも多くはなく、特に、日本の場合、適切なPSの普及促進を目的として、交通安全に関する子どもの理解に対する保護者の認識を調査した研究は散見される程度である。

本研究では、インターネットを用いたアンケート調査（以下、「web調査」という）により、3歳以上10歳以下の子どもをもつ保護者を対象にして、交通安全に関する自身の子どもの理解に対する認識を調査し、死傷者数の多い7歳児の保護者の特徴を調べることを目的とした。また、歩行中に自身の子どもの見守りを行う人員の有無についても保護者に回答を求め、日本における見守りの現状を予備的に検討し、効果的かつ効率的な保護者の監視に資する今後の調査の参考資料を得ることにした。

2. 方法

2.1 調査協力者

3歳以上10歳以下の子どもをもち、週に1日以上頻度でその子ども（以下、「対象児」という）と歩行する保護者865名が本調査に参加した（以下、「協力者」という）。協力者の内、男性は343名（39.7%）、女性は522名（60.3%）であり、平均年齢は38.9歳（標準偏差4.4歳：21歳から45歳に分布）であった。また、協力者の職業は、会社員（正社員・教員）が最も多く（46.4%）、居住地は全国にわたったが関東在住が多くを占めていた（37.6%）。

対象児は、3歳以上10歳未満の子どもの中で最も幼少の子どもとした。対象児の内、男児は431名（49.8%）、女児は434名（50.2%）であり、平均年齢は6.5歳（標準偏差2.3歳：3歳から10歳に分布）であった。

2.2 アンケートの設問と回答方法

アンケートはPSに関連する71項目から構成されたが、本研究では、交通安全に関する自身の子どもの理解に対する保護者の認識などを調べることを目的としており、関連する設問のみを以下に記載する。

2.2.1 フェイスシート項目

協力者の性別、年齢、居住地区分（都市部、地方部、過疎部）、さらには対象児の性別や年齢などの基本情報を調べるため、合計12項目の質問を設けた。回答方法は、自由記述もしくは選択形式とした。

なお、居住地は、介護報酬の地区区分や総務省⁹⁾の資料を参考にして、各市町村を都市部、地方部、および過疎部に分類し、その分類を協力者に示し、3種類の区分から選択するように教示した。

2.2.2 保護者認識項目

交通安全に関する子どもの理解に対する保護者の認識を調べるため、合計15項目の質問を設けた。15項目の内訳は、交通安全に関する対象児の知識5項目、態度5項目、および行動5項目に対する保護者の認識についての設問とした（Table 1：以下、「保護者認識項目」という）。

以上の 15 項目の設問に対して、協力者は 7 件法のリッカートスケール (Fig. 1) を用いて、どの程度あてはまるかを回答するよう求められた。

Table 1 Questions for parents on their children's understanding of traffic safety

No.	Contents	Items
Knowledge1	Knowledge of pedestrian signals	Do you think that your child understands the implications of pedestrian signals ? 対象児は、歩行者信号の意味を知っていると思いますか。
Knowledge2	Knowledge of crosswalks	Do you think that your child understands the implications of crosswalks ? 対象児は、横断歩道の意味を知っていると思いますか。
Knowledge3	Knowledge of no-crossing signs	Do you think that your child understands the implications of no-crossing signs ? 対象児は、横断禁止の標識の意味を知っていると思いますか。
Knowledge4	Knowledge of both directions	Do you think that your child understands which is right or left ? 対象児は、右と左を理解していると思いますか。
Knowledge5	Knowledge of vehicle turning indicators	Do you think that your child understands the implications of vehicle turning indicators ? 対象児は、自動車のウィンカーの意味を知っていると思いますか。
Attitude1	Compliance with traffic law	Do you think that your child understands the importance of compliance with traffic laws ? 対象児は、交通法規を守ることの大切さを理解していると思いますか。
Attitude2	Consideration for others	Do you think that your child understands the importance of giving a way to others ? 対象児は、ドライバーや歩行者などに道を譲ることの大切さを理解していると思いますか。
Attitude3	Safety attitude	Do you think that your child understands the importance of safety while walking ? 対象児は、道路を歩くときは安全が第一であることを理解していると思いますか。
Attitude4	Priority consideration	Do you think that your child understands the importance of right of priority ? 対象児は、優先権の大切さを理解していると思いますか。
Attitude5	Risk perception	Do you think that your child understands the risk of playing while walking ? 対象児は、遊びながら歩くことの危険性を理解していると思いますか。
Behavior1	Stop behavior	Do you think that your child stops before crossing the road ? 対象児は、道路を横断する際に停止していますか。
Behavior2	Use of crosswalk	Do you think that your child uses a crosswalk while crossing the road ? 対象児は、横断歩道を横断していますか。
Behavior3	Looking behavior	Do you think that your child looks around before crossing the road ? 対象児は、道路を横断する際に周囲を確認していますか。
Behavior4	Raising a hand	Do you think that your child raises a hand when crossing the road ? 対象児は、手をあげて横断していますか。
Behavior5	Rushing out	Do you think that your child does not rush out impulsively ? 対象児は、道路に飛び出していませんか。

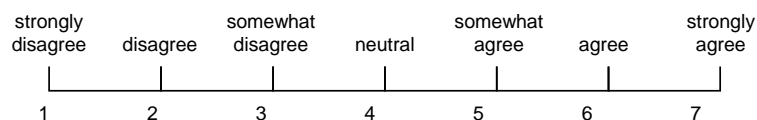


Fig. 1 Likert scale used in this study

2. 2. 3 見守り人員項目

自身の子どもの歩行中の見守りを遂行する人員について補足的に調べるため、合計 3 項目の設問 (以下、「見守り人員項目」という) に対して、協力者に回答を求めた。3 項目の設問の内容は、「対象児が道路を歩いている際の様子について知っている人が、自分以外にいると思いますか (以下、「見守り情報項目」という)」「対象児が道路を歩いている際の様子を自分に伝えてくれる人がいると思いますか (以下、「見守り伝達項目」という)」「対象児が道路を歩いている際に、事故に遭わないように見守りを行っている人は誰ですか (以下、「見守り人員項目」という)」であった。

見守り情報項目と見守り伝達項目については、7 件法のリッカートスケール (Fig. 1) を用いて、どの程度あてはまるかを回答するよう協力者に教示し、見守り人員項目は、配偶者、祖父母、対象児の兄姉、保

育士・幼稚園教諭・学校教員，同じ園・学校の年長児，地域のボランティア，警察，その他，および見守る人なしの中から選択するように求めた．また，見守り人員項目の回答は複数選択可とした．

2.3 手続き

アンケートは，本調査の目的や方法などに関する説明と調査協力についての同意書，フェイスシート項目やPSなどに関する71項目から構成された．実施手順として，対象とする年齢（3歳以上10歳以下）の子どもをもつか否かや，対象児と週に1日以上歩行するか否かといった点から協力者の選定を行った．

その後，設問数が多かったため，フェイスシート項目を1回目の調査として実施し，協力者の選定を行った後，保護者認識項目や見守り人員項目を2回目の調査として協力者に回答を求めた．1回目と2回目の調査は異なる日時に回答を求めたため，両調査の取得データ間で結果の分析ができるように，協力者の整合をとった．回答に際しては，コロナ影響が発生する前の状況を想起して回答するように協力者に求めた．

以上のアンケートはインターネットを介して協力者に展開され，web上で回答できるようにした．調査時期は2021年7月から8月であり，協力者には調査参加に対する謝礼が支払われた．

なお，本調査は，一般財団法人日本自動車研究所の倫理委員会の承認を得た上で（承認番号：21-006），協力者の人権尊重と福祉に配慮して実施した．

3. 結果

3.1 保護者認識項目の因子分析

本研究では標準化された質問紙を用いておらず，対象児の知識，態度，および行動に関する15通りの保護者認識項目を任意に設けた．そこで，7歳児の保護者の認識の特徴を調べる前段階として，探索的因子分析を行い，今回用いた設問の潜在因子を抽出した上で，保護者の認識の特徴を調べることにした．

因子分析の因子数は、スクリー基準とカイザー・ガットマン基準（固有値が1以上か否か）を用い、3因子を抽出した。また、繰り返しの因子分析の結果、因子間に相関が認められたこと、および最も単純な構造が示されたことから、promax回転の結果を採用して、解釈を行うことにした（Table 2）。

Table 2 Questions for parents on their children's understanding of traffic safety

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Communality
	name:priority and laws	name:road crossing	name:signal and crosswalk	
Do you think that your child understands the importance of right of priority?	.93	.08	-.26	.30
Do you think that your child understands the importance of giving a way to others?	.81	.06	.02	.25
Do you think that your child understands the implications of no crossing signs?	.74	-.18	.16	.46
Do you think that your child understands the implications of vehicle turning indicators?	.68	-.13	.21	.45
Do you think that your child understands the risk of walking while playing?	.53	.45	-.13	.33
Do you think that your child understands the importance of compliance with traffic laws?	.40	.20	.37	.26
Do you think that your child has stopped before crossing the road?	.00	.86	.03	.22
Do you think that your child looks around before crossing the road?	.01	.82	.07	.24
Do you think that your child does not rush out impulsively?	.01	.68	-.04	.56
Do you think that your child uses a crosswalk while crossing the road?	-.20	.66	.36	.35
Do you think that your child understands the importance of safety while walking?	.38	.45	.10	.29
Do you think that your child raises a hand when crossing the road?	.15	.44	-.11	.77
Do you think that your child understands the implications of crosswalks?	-.03	.04	.90	.18
Do you think that your child understands the implications of pedestrian signals?	-.07	.05	.85	.29
Do you think that your child understands which is right or left?	.20	.14	.52	.41
contribution ratio	.22	.20	.15	
cumulative contribution ratio	.22	.42	.57	
α coefficients	.89	.87	.86	
correlations among factors	Factor 1	-	-	
	Factor 2	.66	-	
	Factor 3	.69	.69	-

因子分析の結果、第一因子は、「対象児は、優先権の大切さを理解していると思いますか」などの項目が含まれたため、「優先権と法規」に関する子どもの理解に対する保護者の認識と命名した（以下、「優先権と法規」という）。また、第二因子は、「対象児は、道路を横断する際に停止していますか」などの項目が含まれたため、「道路横断」に関する子どもの理解に対する保護者の認識とした（同、「道路横断」）。さらに、第三因子は、「対象児は、横断歩道の意味を知っていると思いますか」などの項目が含まれたため、「信号と横断歩道」に関する子どもの理解に対する保護者の認識と命名した（同、「信号と横断歩道」）。

なお、第一因子の寄与率は21.60%、第二因子の寄与率は20.30%、さらに第三因子の寄与率は15.00%であり、累積寄与率は56.90%であった。また、各因子の内的整合性について、 α 係数はそれぞれ0.89、0.87、および0.86であった。

3.2 子どもの年齢および地域別の保護者認識項目

因子分析により抽出した3因子について、3歳以上10歳以下の対象児をもつ保護者別に認識の傾向を比較した。また、子どもが育つ地域の差により保護者の認識が変化することも予想されたため、都市部、地方部、および過疎部別に保護者の回答を集計し分析を行った。

各 3 因子別に、対象児の年齢および居住地を 2 要因とする対応のない分散分析を行った。分散分析の結果、「優先権と法規」の因子では、対象児の年齢にのみ主効果がみられ、効果量は大と判定された (Fig. 2 (a)と Table 3 (a))。優先権と法規については、3 歳と 4 歳の対象児をもつ協力者は、他の年齢の対象児をもつ協力者よりも、自身の子どもは優先権と法規を理解していないと回答した。また、5 歳の対象児をもつ協力者は、8 歳以上 10 歳以下の子どもをもつ協力者に比べると、自身の子どもは優先権と法規を理解していないと答えた。さらに、7 歳の対象児をもつ協力者は、9 歳や 10 歳の対象児をもつ協力者よりも、自身の子どもは優先権と法規を理解していないと回答した。なお、7 歳児とは異なり、6 歳の対象児をもつ協力者は、9 歳や 10 歳の対象児をもつ協力者と大きな差はみられなかった。

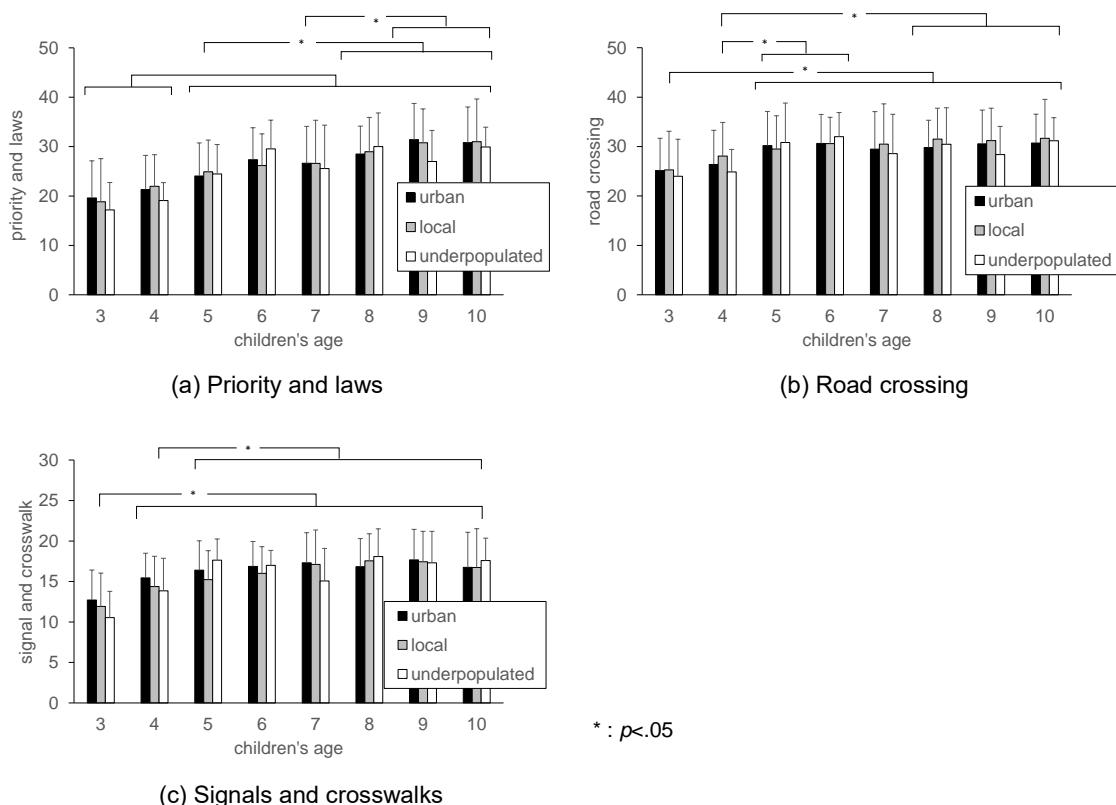


Fig. 2 Effects of children's age and residential area on their parents' perception in each factor

次に、「道路横断」の因子も、対象児の年齢にのみ主効果がみられ、効果量は中程度と判定された (Fig. 2 (b)と Table 3 (b))。3 歳の対象児をもつ協力者は、5 歳以上 10 歳以下の対象児をもつ保護者よりも、適切な道路の横断を遂行していないと回答した。また、4 歳の対象児をもつ保護者は、5 歳と 6 歳、および 8 歳以上 10 歳以下の対象児をもつ保護者よりも、適切な道路の横断を遂行していないと回答した。一方、4 歳と 7 歳の対象児をもつ保護者の回答に有意な差はみられなかった。

さらに、「信号と横断歩道」の因子も、対象児の年齢にのみ主効果がみられ、効果量は大と判定された (Fig. 2 (c)と Table 3 (c))。3 歳の対象児をもつ協力者は他の年齢の対象児をもつ協力者よりも、信号と横断歩道および左右を理解していないと回答した。また、4 歳の対象児をもつ協力者は、5 歳以上 10 歳以下の対象児をもつ協力者よりも、信号と横断歩道および左右を理解していないと回答した。

3.3 子どもの年齢および地域別の見守り人員項目

協力者以外の見守り人員について、見守り情報項目と見守り伝達項目の積率相関係数を求めたところ、強い相関がみられたため ($r = .74, n = 865, p < .001$)、両者の合計値を算出して、対象児の年齢および居住地が地域の見守りに関する保護者の認識に及ぼす影響を調査した。対象児の年齢および居住地を 2 要因とする対応のない分散分析を行った。分散分析の結果、見守り人員項目について、対象児の年齢や居住地の差はみられず、効果量もなしと判定された (Fig. 3 と Table 4)。なお、有意差はみられないものの、過疎地域の 6 歳の対象児の場合、自分以外に道路を歩いている際の対象児の様子を知っている人やその様子を伝えてくれる人がいると回答する協力者が多かった。

次に、見守り人員項目について、対象児の年齢 ($\chi^2(42) = 37.03, n.s. V = .08$) や居住地 ($\chi^2(12) = 6.18, n.s. V = .06$) による大きな差はみられなかった (Fig. 4)。ただし、対象児の年齢に有意差はみられないものの、自分以外に配偶者や祖父母が見守りを行っていると回答する協力者は 6 歳以下で多かったが、対象児の兄姉が見守りを行っているといった回答は 3 歳から 6 歳にかけて減少するものの、7 歳の対象児の場合に再度増加して再び減少する傾向がみられた。

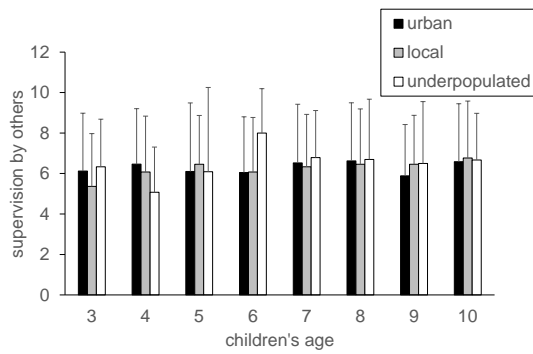
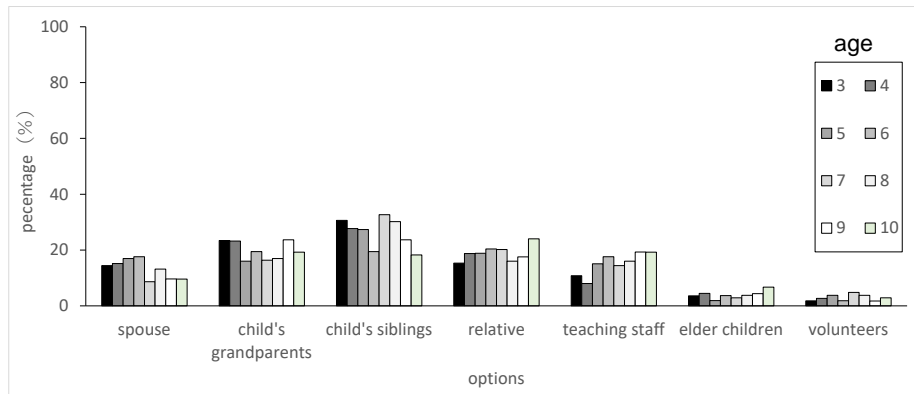


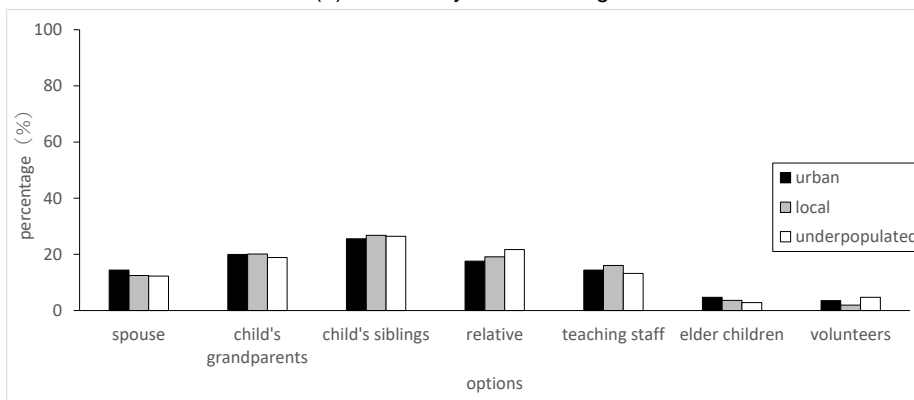
Fig. 3 Effects of children's age and residential area on supervision by others

Table 4 Two-way ANOVA table of supervision by others

Factors	SS	Df	MS	F	significance	η^2
residential	6.09	2	3.05	0.40	ns	0.00
children's age	57.08	7	8.15	1.08	ns	0.01
interaction	87.78	14	6.27	0.83	ns	0.01
error	6356.43	841	7.56			
total	6507.38	864	25.03			



(a) Results by children's age



(b) Results by residential area

Fig. 4 Supervising persons by children's age and residential areas

4. 考察

本研究では、3歳以上10歳以下の子どもをもつ保護者を対象にして、交通安全に関する子どもの理解に対する保護者の認識について調査し、人口10万人あたりの歩行中の死傷者数が最も多い7歳児の保護者の特徴について検討した。

web調査の結果、居住地によらず、3歳から5歳へと成長すると、保護者は自身の子どもが信号や横断歩道などを理解していると回答するようになり、5歳以降では保護者の認識に差がみられないことが示された。道路標識や標示などの子どもの理解については、抽象的なデザインで書かれた標識や標示に対する理解が困難であるとの結果が報告されているが⁹⁾、日本の子どもの場合、信号や横断歩道は日常生活の中で接する機会が多く、5歳までの間にその意味を理解していると保護者は認識していると推察される。

また、居住地によらず、優先権や法規、さらには道路横断について、自身の子どもが成長するとともに、これらの内容を子どもが理解していると認識する保護者が増加する傾向がみられたが、7歳児の保護者において一旦これらの認識が低下するようであった。具体的には、優先権と法規については、6歳と9歳以上の保護者に大きな差はみられなかったものの、7歳児の保護者は9歳以上の保護者に比べて、自身の子どもは優先権や法規を理解していないと認識した。また、道路横断については、4歳児の保護者と、5歳と6歳および8歳以上の保護者との間に差がみられ、子どもが成長すると、道路横断を理解していると回答する保護者が増加したが、7歳児の保護者と4歳児の保護者との間には差がみられなかった。

7歳児の保護者に特徴的な結果について、子どもが小学校に入学することによる生活環境の変化が影響している可能性がある。つまり、小学校に入学して、子どもが保護者の手から離れ、独力で広範囲を歩行する機会が増加するに際して、7歳児の子どもが独力で歩行する様子を意識的に確認すること、さらには、安全に歩行するための訓練を実施し、子どもの能力や技能に接する中で、自身の子どもが優先権や法規、および道路横断について理解していないと認識するようになったと推察される。または、小学校入学に際して、自身の子どもが独力で歩かなければならない状況において、保護者が子どもの能力や技能を不安視するため、優先権や法規、さらには道路横断に関する子どもの理解に対する保護者の認識が低下したと考えられる。

先述の通り、保護者が自身の子どもが独力で安全を確保できると認識するとPSの遂行は低下すると考えられるが、子どもの能力や技能が未熟な場合、適切なPSが遂行されないことになる。先行研究では、5歳から6歳の子どもの保護者は、7歳児の子どもよりも自身の子どもの道路横断技能を過大評価しているとの報告があるが、これは保護者の認識が変化した結果ではなく、子どもの発達にともない能力や技能が向上したために、保護者の認識との齟齬が小さくなったと考えられている⁸⁾。本研究では、優先権や交通法規、さらには道路横断に関する子どもの実際の能力や技能を測定していないため、7歳児の保護者が自身の子どもの能力や技能を過大もしくは過小評価しているかは定かではない。したがって、先行研究と同様に、子どもの能力や技能を測定した上で、保護者の認識の傾向を評価する必要がある。

一方で、子どもの実際の能力や技能にかかわらず、交通安全に関する自身の子どもの理解に関する認識から、7歳児の保護者は、独力で歩行する状況に対して不安を感じており、新型コロナウイルス感染症などの理由により、安全な歩行の学習が困難であった状況下では特に不安が大きくなると推察される¹⁰⁾。この点から、本研究で示された7歳児の子どもに対する保護者の認識の傾向に配慮して、保護者が期待する交通安全に関する能力や技能を子どもが習得するための交通安全教育を実施することで、保護者の不安を解消できると考えられる。この教育について、例えば、保護者が子どもの交通安全教育に参加し¹¹⁾、交通安全に関する自身の子どもの能力や技能を正しく評価し、その評価に応じた訓練が日常生活において実践されれば、保護者の期待と子どもの実際の能力や技能の齟齬が小さくなり、保護者の不安を解消できると推察される。

また、7歳児の保護者の不安を解消するために、子どもへの安全教育だけではなく、周囲の見守り活動の充実が望まれる。本研究では子どもの見守り活動の状況について補足的に検討し、有意差はみられなかったものの、子どもの兄弟が見守りを行っている割合が3歳から6歳にかけて減少する一方、7歳児で再度増

加する傾向が観察された。これは、小学校入学により、保護者の手から離れて7歳児が登下校するといった生活環境の変化に伴い、同じ学校に通う兄弟が歩行時の見守りを遂行する機会が増加することを示した結果と推察される。このため、兄弟が自身の弟妹（7歳児）を正しく見守るための訓練が有用となるかもしれないが¹²⁾、子どものみにこの役割を課すことは困難なため、保護者や地域のボランティアによる見守りが幅広く実施されることが期待される。なお、この点については、第11次交通安全基本計画⁴⁾に記されている「交通安全ボランティア等への幅広い年代の参画」にも関係する課題であり、今後、大人の人員が見守り活動に参加するための要件などを明らかにすることが重要である。この際、過疎地域において保護者以外の人員が6歳児を見守ることが多くなっているという本研究の結果を詳細に分析することで、見守りに関する要件が明らかになる可能性があり、今後、引き続き分析することが求められる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、人口10万人あたりの歩行中の交通事故死傷者数が最も多い7歳児の保護者に焦点をあて、交通安全に関する子どもの理解に対する保護者の認識について調査した。インターネットを用いたアンケート調査の結果、交通安全に関する子どもの理解に対する7歳児の保護者の認識の特徴が示された。また、歩行中の子どもの見守り活動についても補足的に資料を収集した。

今後、7歳児の保護者の認識の妥当性について、交通安全に関する子どもの実際の能力や技能を把握した上で検討を行い、効果的かつ効率的な子どもおよび保護者への安全教育、さらには見守り活動に資する資料を引き続き取得する必要がある。

謝辞

本研究は、一般社団法人日本損害保険協会2021年度自賠責運用益拠出事業の一部をまとめたものであり、ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 警察庁交通局: 令和3年における交通事故の発生状況等について,
<https://www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/jiko/R03bunseki.pdf> (参照 2022.3.15)
- 2) 文部科学省総合教育政策局: 通学路における合同点検の実施について (依頼),
https://www.mext.go.jp/a_menu/kenko/anzen/1417907_00001.htm (参照 2022.3.15)
- 3) 公益財団法人交通事故総合分析センター: 特集 小学一年生が登下校中に遭った死傷事故, イタルダインフォメーション, No.121 (2017)
- 4) 中央交通安全対策会議: 交通安全基本計画-交通事故のない社会を目指して- (2021)
- 5) Sandels S: Children in traffic. In J. Hartley(ed), Paul Elek, London (1975)
- 6) 大谷 亮: 歩行中の子どもによる手つなぎ拒否と保護者の愛着・養育態度との関係, 応用心理学研究, Vol.47, No.2, p.94-105 (2021)
- 7) MacGregor C. et al: Identifying gaps in child pedestrian safety - Comparing what children do with what parents teach -, Transportation Research Record, 1674, p.32-40 (1999)
- 8) Dunne, R. G. et al: Behavior and parental expectation of child pedestrians, Pediatrics, Vol.89, p.486-490 (1992)
- 9) 総務省自治行政局過疎対策室: 過疎関係市町村都道府県別分布図 (2016)
- 10) 三井ダイレクト損保: 6月は新1年生の事故に要注意! 学校再開を前に緊急調査,
<https://news.mitsui-direct.co.jp/topics/20200601/index.html?id=40499> (参照 2022.3.15)
- 11) 大谷 亮: 焦点化訓練が低学年児童の道路横断行動に及ぼす影響, 応用心理学研究, Vol.42, No.2, p.101-111 (2016)
- 12) 大谷 亮ほか: 集団登下校時の事故を想定した高学年児童向けの交通安全教育-小学校における交通安全リーダー育成の試み-, 日本安全教育学会第13回大阪大会, プログラム・予稿, p.37-38 (2012)

自動運転車の安全性評価シナリオにおける Unpreventable 領域の評価方法に関する検討

Study on Evaluation Methods for Unpreventable Areas in Safety Assurance for Automated Vehicles

加藤 良祐*¹
Ryousuke KATO

高山 晋一*²
Shinichi TAKAYAMA

今長 久*²
Hisashi IMANAGA

Abstract

In the ALKS regulations (UNR157), a Preventable boundary is proposed and "mitigation is the only option" in the Reasonably Foreseeable and Unpreventable areas. However, no specific methods or criteria for such mitigation have been proposed to date. In this study, the CARLA Auto Pilot system was used as an evaluation vehicle for automated vehicles, and the Preventable boundary was reproduced. In order to examine the mitigation of occupant injuries in the event of an accident, a crash simulation using LS-DYNA was conducted, and specific indicators of mitigation were examined.

1. 背景・目的

国土交通省の自動運転車の安全技術ガイドライン¹⁾では自動運転車が満たすべき車両安全の定義を「自動運転車の運行設計領域において、自動運転システムが引き起こす人身事故であって合理的に予見される防止可能な事故が生じないこと」としている。

また、日本自動車工業会の自動運転の安全性評価フレームワーク²⁾では、この合理的に予見される事故を Reasonably Foreseeable, 合理的に予見できない事故を Unforeseeable, 防止可能な事故を Preventable, 防止不可能な事故を Unpreventable と定義し、その組み合わせを 4 象限マトリクスで表現している (Fig. 1)。

国連法規 R157 の Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems³⁾ (以下、「ALKS 法規」という)では Reasonably Foreseeable において、Preventable / Unpreventable の境界 (以下、「Preventable 境界」という)が提案されており、文献²⁾ではその Reasonably Foreseeable かつ Unpreventable である領域 (以下、「Unpreventable 領域」という)において「緩和 (結果として生じる損傷を低減すること) が唯一の選択肢」とされている。しかしながら、この緩和については具体的な方法や指標は現在のところ、提案されていない。この合理的に予見される防止不可能な事故で緩和を検討するためには、ALKS 法規で示されているようなカットインシナリオにおいて、自車の速度、および他車の速度、車間距離、カットイン時の横速度などのパラメータが多岐にわたり、数千点の組み合わせになる。

そこで本研究では、ALKS 法規で提案されている数千点におよぶシナリオを効率良く実施するために車両挙動シミュレーションをおこなった。そのシミュレーションはオープンソースの自動運転シミュレーターである CARLA⁴⁾を用い、Auto Pilot システムを仮の自動運転車の評価車両とし、防止不可能な事故を再現した。さらに、事故時の乗員傷害の緩和を検討するために、LS-DYNA による衝突シミュレーションを実施し、その緩和の具体的な指標を検討した。

*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)

* 原稿受理 2022年4月10日 / 初掲載 2022年5月

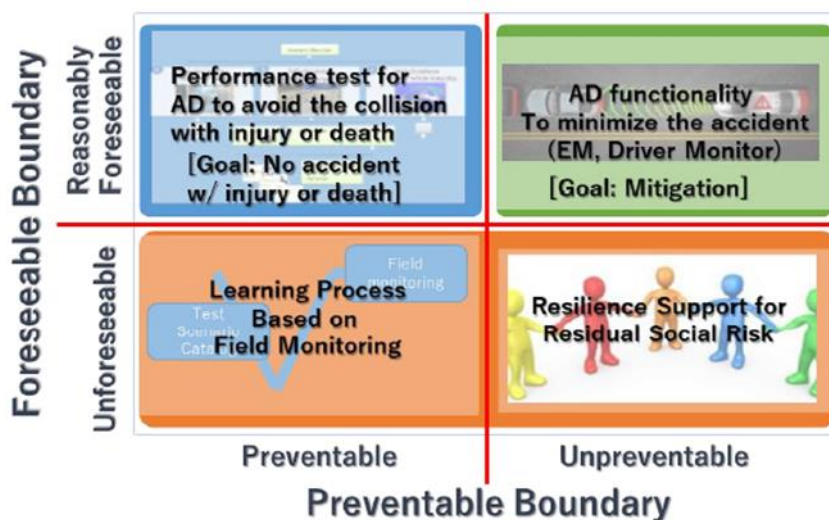


Fig.1 Reasonably Foreseeable and Preventable boundaries

2. ALKS法規でのPreventable / Unpreventable領域の決定方法

ALKS 法規では Fig. 2 のように Automated Lane Keeping Systems を搭載した車両（以下、「自車」という）の前方に隣のレーンから周辺車両（以下、「他車」という）が車線変更するシナリオをカットインシナリオとしている。このカットインシナリオは主に自車速度 V_{e0} 、他車速度 V_{o0} 、他車の車線変更開始時の車間距離（以下、「初期車間距離」） dx_0 、他車の横速度 V_y の4つのパラメータで自車、および他車の挙動を表現している。

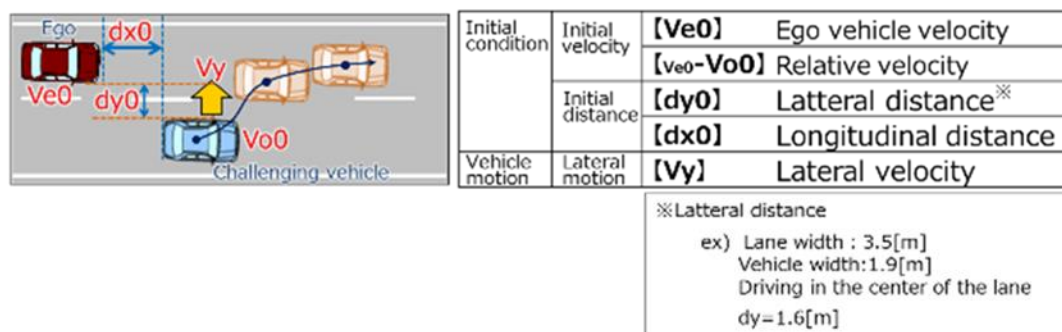
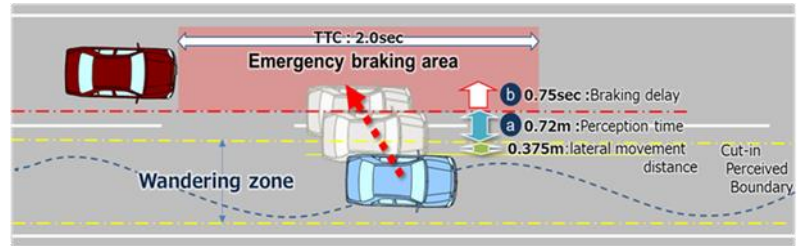
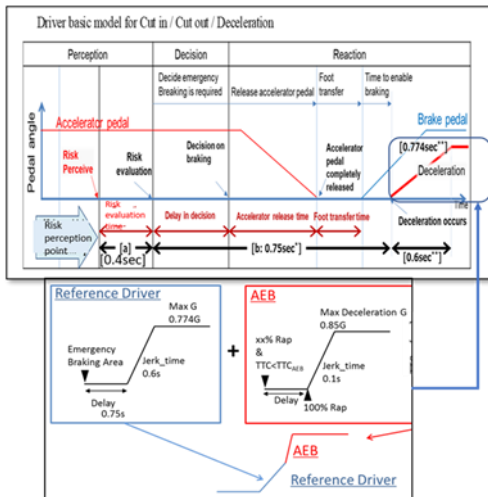


Fig. 2 Cut-in scenario³⁾

また、ドライバモデルについては Fig. 3 に示す、有能で注意深いドライバの挙動や反応を意味する、Competent and careful human driver（以下、「C&C ドライバ」という）を定義し、このドライバが衝突を回避できるか否かにより Preventable 境界を定めている。具体的には仮に自車速度 V_{e0} を 60 km/h、相対速度 $V_{e0}-V_{o0}$ を 40 km/h (V_{o0} を 20 km/h) とすると Fig. 4 に示すグラフが出来上がる³⁾。この Fig. 4 は横軸を初期車間距離 dx_0 、縦軸を他車横速度 V_y としており、緑色のプロットは回避、赤色は前突、または後突、橙色は側突、黄色は他車が自車の後ろにカットインし、衝突しない場合を表している。

まず、シミュレーションによって、C&C ドライバ、および自動運転システムの Preventable 境界を求め、合理的に予見される防止可能な事故を決定する。



a) Examples of a Skilled Human Performance model

b) Emergency braking area

Fig.3 Competent and careful human driver³⁾

4 Ego vehicle velocity $[V_{e0}]$: 60[kph]
Relative velocity $[V_{e0}-V_{o0}]$: 40[kph]

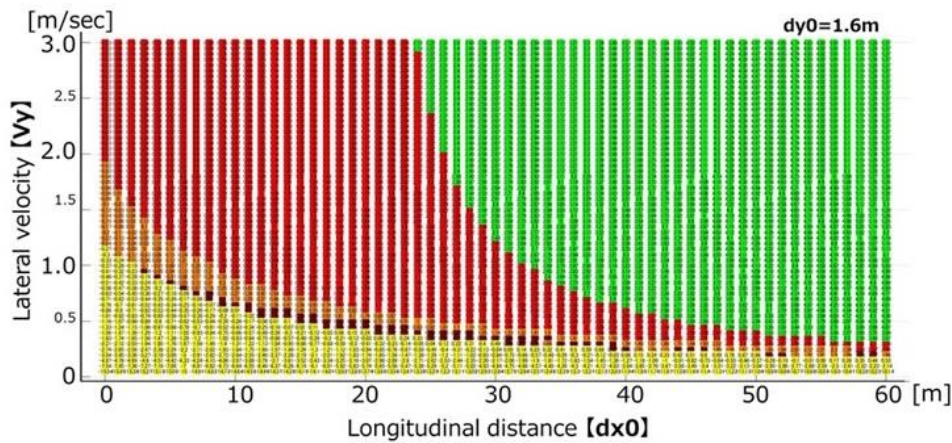


Fig. 47 Preventable area³⁾

3. シミュレーションによる検討の流れ

まず、緩和とは事故時の乗員傷害を自動運転車がどの程度緩和できるかとした。傷害を評価するためには衝突速度が必要になるが、衝突速度だけでは傷害との因果関係が示せないため、事故自動通報で用いられている重症度判定、頭部傷害程度を評価する指標である HIC (Head Injury Criterion) で検討することとした。本研究での緩和の具体的な指標の検討方法は次の順で実施する。

- ① ALKS法規と同様のC&CドライバによるPreventable境界作成
 - ② CALRA Auto PilotシステムによるPreventable境界作成
 - ③ 上記で作成した、それぞれのUnpreventable領域での衝突直前の状況抽出
 - ④ それぞれの衝突直前の状況から緩和の評価を相対速度、重症度判定、HICの3つの指標で比較
- ①については、ALKS 法規内の C&C ドライバモデルを用いて、ALKS 法規と同等の Preventable 境界の作成をおこなう。

②に関しては、評価対象の自動運転車として、その自動運転アルゴリズムが必要となるため、オープンソースである、自動運転シミュレータ CARLA の Auto Pilot システムを用いて Preventable 境界を作成する。

③については①、および②で Preventable 境界を作成した際に自車、および他車の時刻歴の車両挙動データを得ることができるので、そのデータから衝突直前の状況を抽出する。

最後に④では③で抽出した衝突直前の状況から、緩和の評価を 3 つの指標で計算し、その評価指標が乗員傷害をどの程度精度良く再現できるか、また計算コストの観点から比較する。

4. 緩和の評価指標の提案と評価方法

4.1 緩和の考え方

文献 2) では合理的に予見できる防止可能な事故を Reasonably Foreseeable and Preventable としており、その領域では評価する自動運転車の Preventable 境界が C&C ドライバによる Preventable 境界よりも安全な方へ存在することで、その安全性を論証している。そこで Unpreventable 領域に関しても Reasonably Foreseeable and Preventable 領域と同様に C&C ドライバとの比較により、自動運転車の安全性を論証することを考えた。具体的には Preventable 境界を計算した際の Unpreventable 領域での衝突直前の状況を用いて緩和の評価指標を計算する。

4.2 Preventable境界作成

4.2.1 C&C ドライバによる Preventable 境界

2 章で示した、ALKS 法規内の C&C ドライバに倣い、オイラー法⁵⁾によるシミュレーション (タイムステップ: 0.01 s) を実施し、Fig. 5 を作成した。この Fig. 5 を Fig. 4 と比較すると数点異なる箇所は存在するがおおむね同様の結果である。

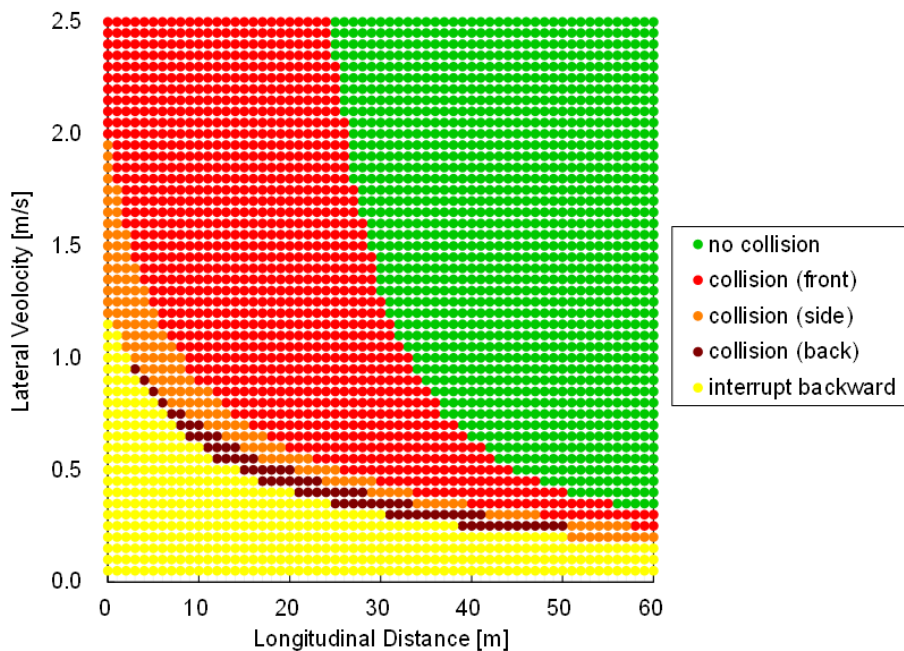


Fig. 58 Calculation of the Preventable area

4. 2. 2 CARLA Auto PilotによるPreventable境界

先述の通り、評価対象の自動運転車として、自動運転シミュレータ CARLA を用いることとする。なお、CARLA のバージョンは 0.9.11⁶⁾ を使用し、OpenSCENARIO⁷⁾ の入力によりシナリオを実行するために Scenario Runner⁸⁾ も導入する。入力となる OpenSCENARIO ファイルは Scenario Runner のサンプルファイル⁹⁾ をベースに ALKS 法規に沿うよう修正し、自動運転アルゴリズムは CARLA 内の Auto Pilot を使用する。Fig. 6 はその Auto Pilot でのカットインシナリオの衝突有無を表したグラフである。

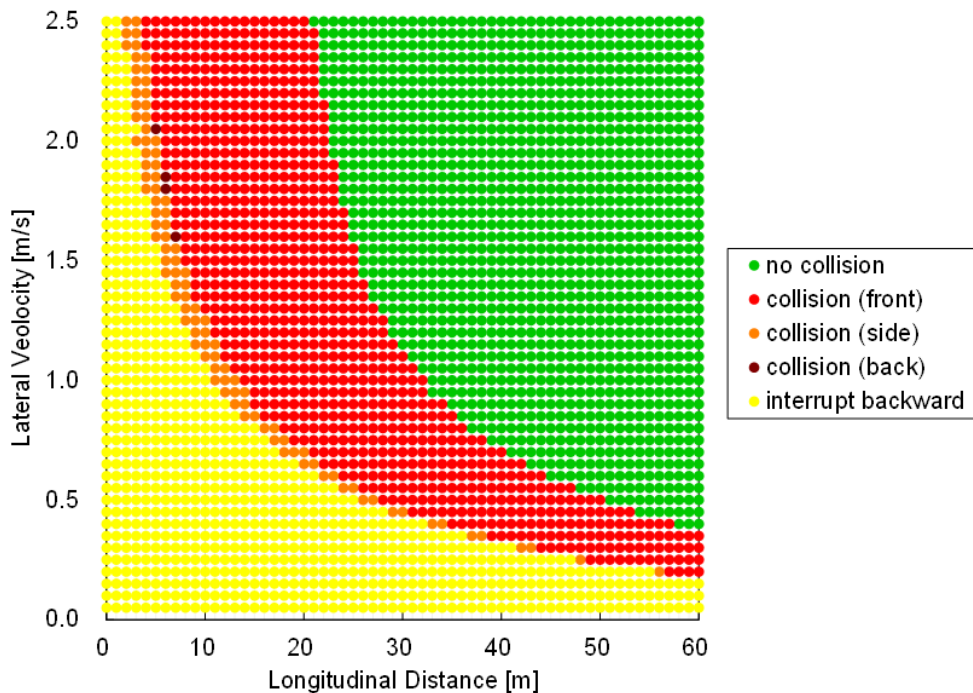


Fig.6 Preventable area in the CARLA simulator

4. 3 緩和の評価指標と導出のためのシミュレーション環境

緩和の評価指標に関して、次の3つを考える。

- (1) 衝突直前の相対速度
- (2) 事故自動通報に用いられている重症度判定
- (3) 頭部傷害指標 HIC 等の人身傷害程度を表す指標

1 つ目の衝突直前の相対速度については Preventable 境界を作成する過程で得られる結果として一番容易に得られる評価指標である。2 つ目、および 3 つ目は国土交通省のガイドライン¹¹⁾において「自動運転システムが引き起こす人身事故」という文言があるため、人体の傷害を表す指標として考えた。

4. 3. 1 Unpreventable領域での衝突直前の相対速度

衝突直前の相対速度については、4. 2. 1 項で計算した C&C ドライバによる Unpreventable 領域での両車の衝突直前の相対速度、および前節でシミュレーションした自動運転車の Unpreventable 領域における、衝突直前の相対速度を用いることとする。

4.3.2 D-Call Netでの死亡重症確率推定アルゴリズムを用いた死亡重症確率

先進事故自動通報システムである D-Call Net では、死亡重症確率推定アルゴリズム¹⁰⁾を用いて死亡重症確率を算出し、救命救急医療に活用している。本検討でもそのアルゴリズムを用いた重症度判定を評価指標として検討する。この死亡重症確率推定アルゴリズムでは Table 1 に示すパラメータを用いて、死亡重症確率を算出する。ただし、先述の C&C ドライバによるシミュレーション、および CALRA による自動運動シミュレーションでは衝突前後の速度差を表す、 ΔV を計算することはできない。そこで、衝突現象をシミュレーションするために、所内で開発した自動車事故解析用剛体シミュレーションである CARS3D¹¹⁾を用いて ΔV を計算する。具体的には、C&C ドライバによるシミュレーション、および CARLA によるシミュレーションから衝突直前の状態である、自車および他車の位置、速度、ヨー角を算出し、その値を入力条件として CARS3D によるシミュレーションを実施する。この CARS3D シミュレーションでの自車速度の時刻歴データに対して、最大値、および最小値を算出し、その差分を ΔV とした。

ちなみに重症度判定アルゴリズムを導出する際は、交通事故総合分析センターの交通事故マクロデータを用いているため、疑似 ΔV となっているが、D-Call Net の実運用では疑似 ΔV ではなく自動通報を発報した車両から計測される ΔV が用いられている。

Table 1 Accident factors for vehicle occupants¹⁰⁾

事故要因の項目	
疑似 ΔV	30 km/h 以下
	31~40 km/h
	41~50 km/h
	51~60 km/h
	61 km/h 以上
衝突方向	前面衝突
	側面衝突 (Near-side)
	側面衝突 (Far-side)
	後面衝突
シートベルト	着用
	非着用
多重衝突	あり
	なし
乗員年齢	54歳以下
	55歳~64歳
	65歳以上

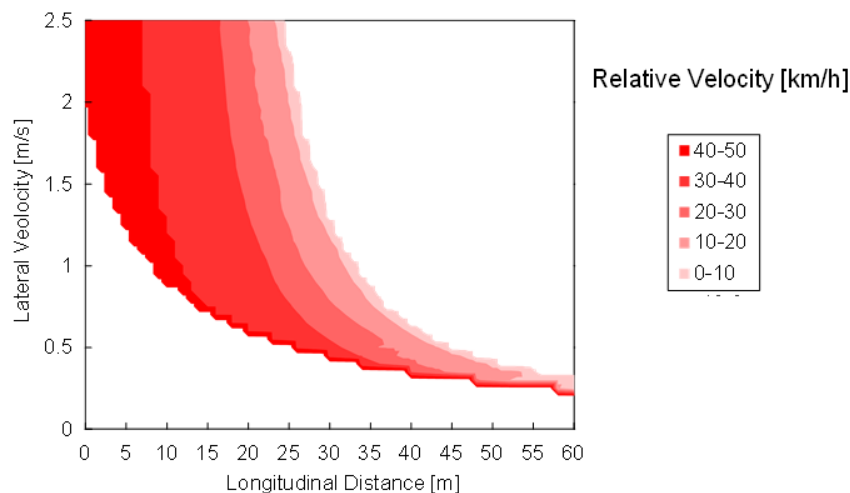
4.3.3 衝突FEシミュレーションによる人身傷害程度

人身傷害程度については、汎用非線形構造解析ソフトである LS-DYNA で利用可能な衝突 FE モデル (NHTSA より公開)¹²⁾を用いて衝突 FE シミュレーションを実施し推定を行う。具体的には前項の CARS3D シミュレーションを実施する際に使用した、C&C ドライバ、および CARLA によるシミュレーションでの衝突直前の状況 (各車両の位置、速度等) から衝突 FE モデル内の車両の境界条件を設定しシミュレーションを実行する。この車両モデルには運転席、助手席共に衝突実験用ダミー「THOR (Test device for Human Occupant Restraint)」の FE モデルが搭載されており、詳細な人身傷害程度の予測が可能となる。

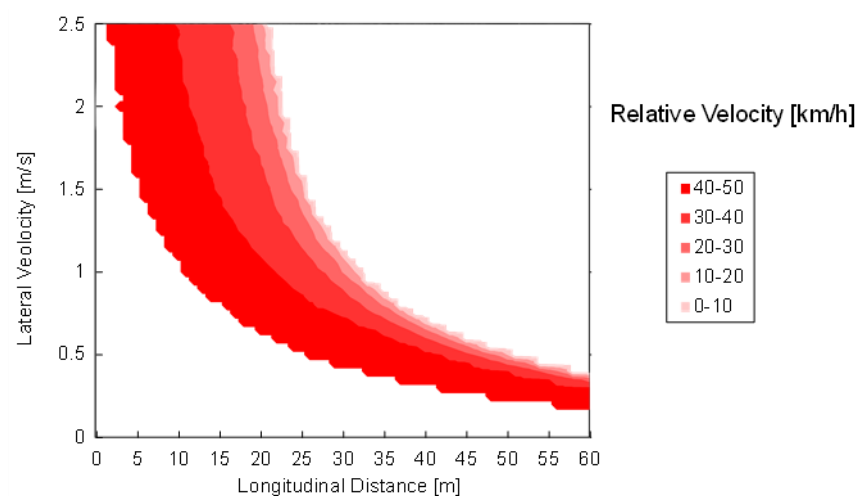
5. シミュレーションによる緩和の評価結果

5.1 衝突直前の相対速度

4.2.1項で計算した、自転車速度 60 km/h、相対速度 40 km/h（他車速度 20 km/h）、初期車間距離を横軸の値、他車横速度を縦軸の値でカットインシナリオを開始した場合の C&C ドライバによる Unpreventable 領域での両車の衝突直前の相対速度、および前節で同様の初期状態でシミュレーションした自動運転車の Unpreventable 領域における、衝突直前の相対速度を Fig. 7 に示す。この Fig. 7 では濃い赤色になるほど衝突直前の相対速度が大きいことを示し、両者とも横軸の車間距離が小さくなると衝突直前の相対速度が大きくなるのがわかる。この 2 つのグラフの差分、つまり、C&C ドライバでの衝突直前の相対速度から自動運転車で衝突直前の相対速度を引いた場合のグラフを Fig. 8 に示す。この図において、赤領域は C&C ドライバの方が衝突直前の相対速度が小さく、青領域は自動運転車の方が衝突直前の相対速度が小さい領域を表している。この図より、多くの領域が赤領域なので C&C ドライバの方が衝突直前の相対速度が小さい場合が多いと考えられる。この衝突直前の相対速度が小さいということをリスクが小さいと考える、つまり、衝突直前の相対速度を Unpreventable 領域での緩和の評価指標とした場合、自動運転車は多くの領域で緩和できていない結果となる。



a) C&C driver



b) CALRA Auto Pilot

Fig.7 Relative velocity

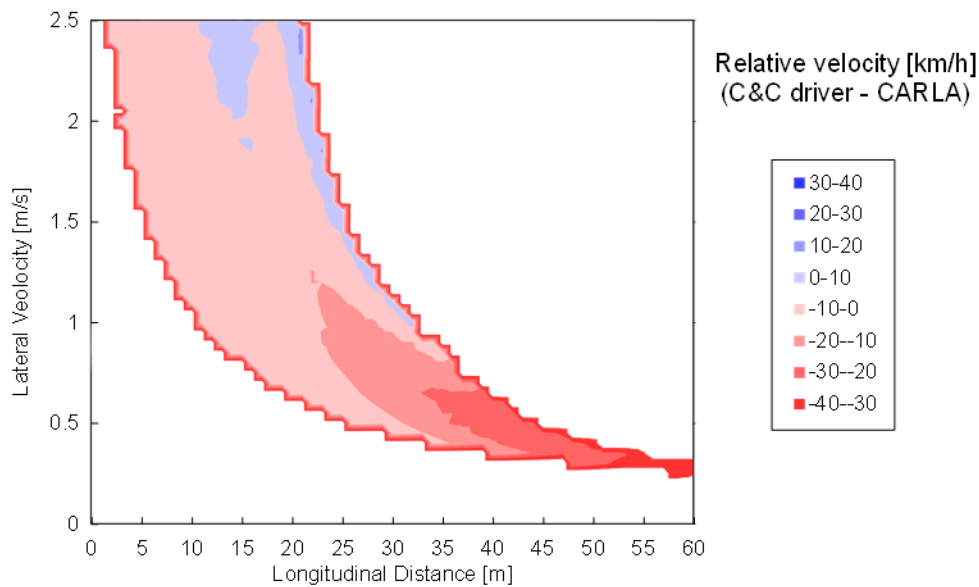
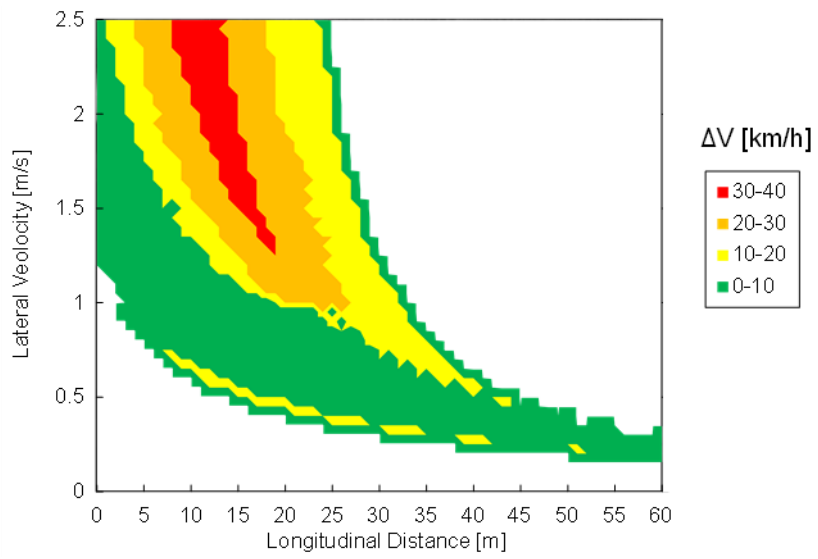


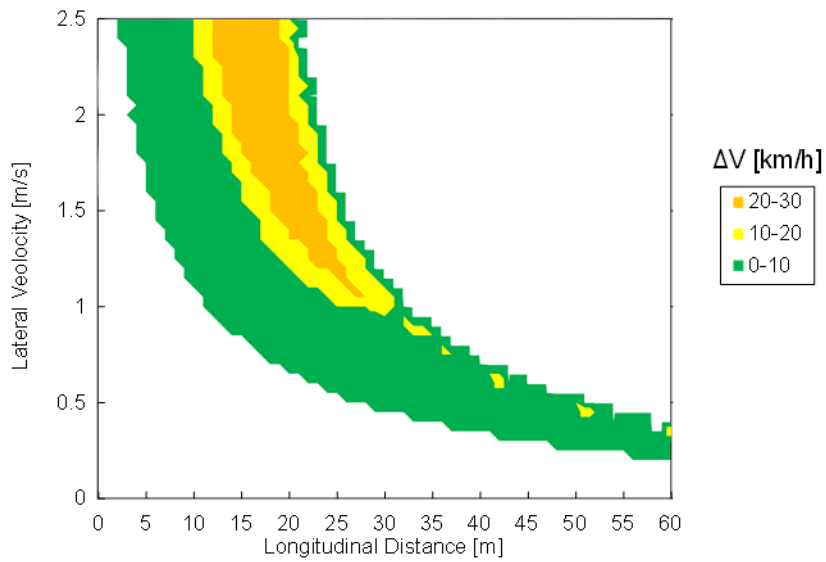
Fig.8 C&C driver v.s. CARLA Auto Pilot

5.2 D-Call Netでの死亡重症確率推定アルゴリズムを用いた死亡重症確率

CARS3D シミュレーションで推定した C&C ドライバ、および CARLA Auto Pilot の衝突前後の速度差を表す、 ΔV を Fig.9 に示す。この ΔV から自車の運転席乗員の死亡重症確率を推定する。この時、シートベルトは着用、多重衝突なし、乗員年齢 54 歳以下とし、C&C ドライバ、および CARLA でのシミュレーションにおいて側面衝突の場合は Near-side として計算する。計算した結果を Fig. 10 に示す。Fig.7 では横軸の初期車間距離が小さくなるにつれて、衝突直前の相対速度が高くなる傾向であったが、この Fig. 10 の特に C&C ドライバの方に関しては初期車間距離が 7~16 m、他車の横速度が 1.7~3.0 m/s の領域で死亡重症確率が高くなる傾向になり、両者の分布が異なる傾向になることがわかる。Auto Pilot による自動運転によって、C&C ドライバで見られた重症度判定が 3.0%~4.0%の領域が見られなくなり、自動運転によって、緩和されていることになる。ちなみに、重症度判定 5%以上は事故現場に救命医の派遣を依頼するレベルである。

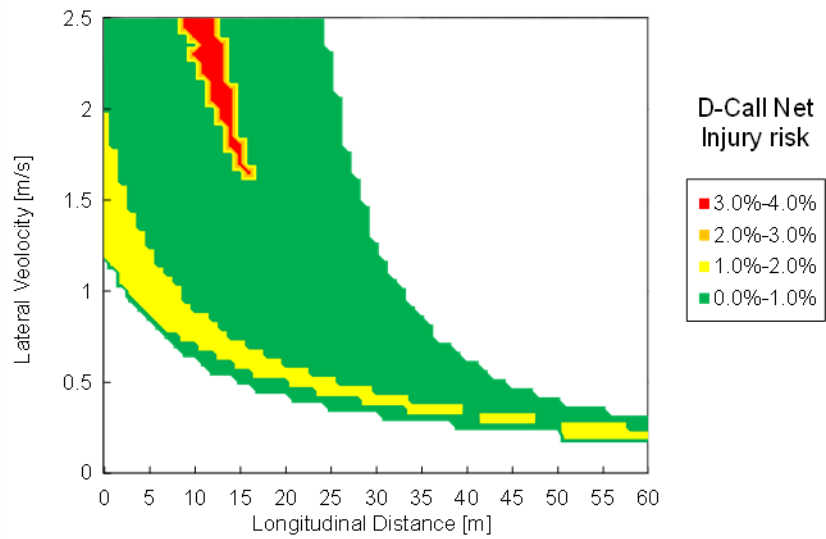


a) C&C driver

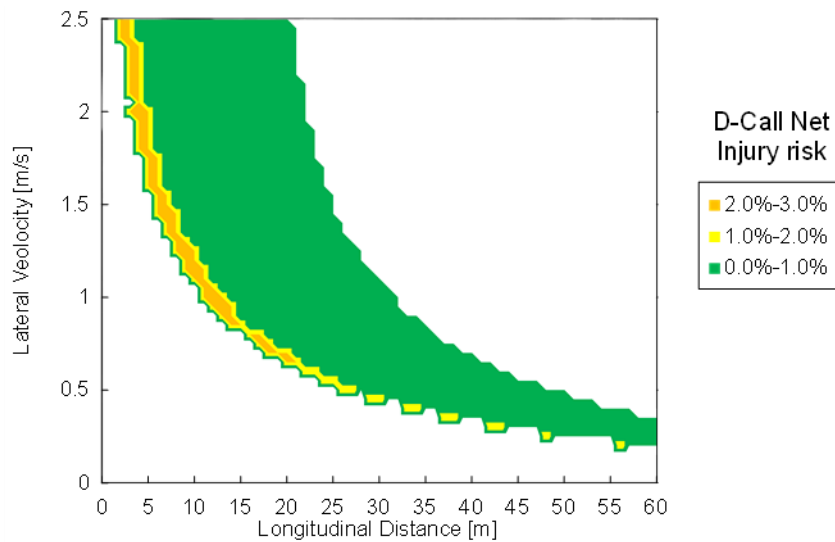


b) CARLA Auto Pilot

Fig.9 ΔV (Velocity difference pre-post crash in ego vehicle)



a) C&C driver



b) CARLA Auto Pilot

Fig.10 D-Call Net injury risk in ego vehicle driver

5.3 衝突 FE シミュレーションによる人身傷害程度

LS-DYNA による衝突 FE シミュレーションは計算時間が長く、Unpreventable 領域のすべての点での計算はできないため、今回は前節で死亡重症確率が高い結果となった、自車速度 60 km/h、相対速度 40 km/h（他車速度 20 km/h）、初期車間距離 14 m、カットインする他車の横速度 2.5 m/s の条件で C&C ドライバ、および CARLA、各々のシミュレーションを実施した場合の衝突直前の状況を使用する。Fig. 11 は C&C ドライバ、および CARLA でのシミュレーションでの衝突直前の状況より作成した両車の境界条件である。

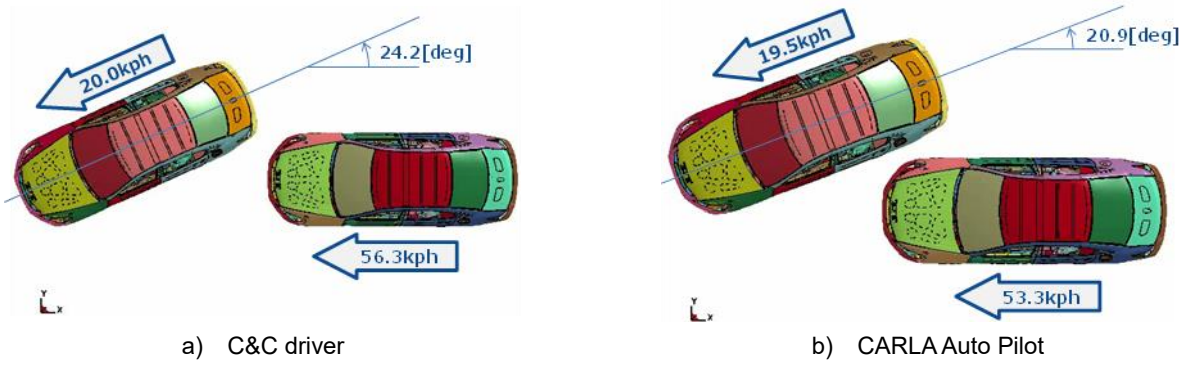


Fig.11 FE simulation

衝突 FE シミュレーションで推定された、自車の運転席に搭載された THOR FE モデルの頭部傷害値 HIC を Fig. 12 に示す。C&C ドライバ、および Auto Pilot、それぞれの自車運転席乗員の HIC は 13、および 10 となった。HIC が 1000 を超えると頭部に重大な傷害を受ける確率が 20% を超える¹³⁾ため、本シミュレーションにおいて、頭部に大きな傷害が発生するような衝突ではないことがわかる。これは 5.2 節で示した、重症度判定アルゴリズムでの結果と同様の傾向である。つまり、今回のカットインシナリオにおける Unpreventable 領域では自車側の運転席乗員の頭部に大きな傷害が発生する確率は低いと考えられる。しかしながら、Auto Pilot によって、HIC が低減しているため、自動運転によって、緩和されていることを示すことはできると考えられる。ただし、本検討は高速道路上を対象とした 1 次衝突のみでの検討であるため、実際には 2 次、3 次の衝突が発生する可能性がある。そのため一概には人身傷害が発生しないとは言えない。また、自車の助手席乗員や他車側の乗員については、まだ傷害値を算出できていないため、今後検証する必要がある。さらに乗員モデルも THOR を用いており、頭部以外にも頸部や胸部の評価も可能であるため、この点についても詳細に検証する必要がある。

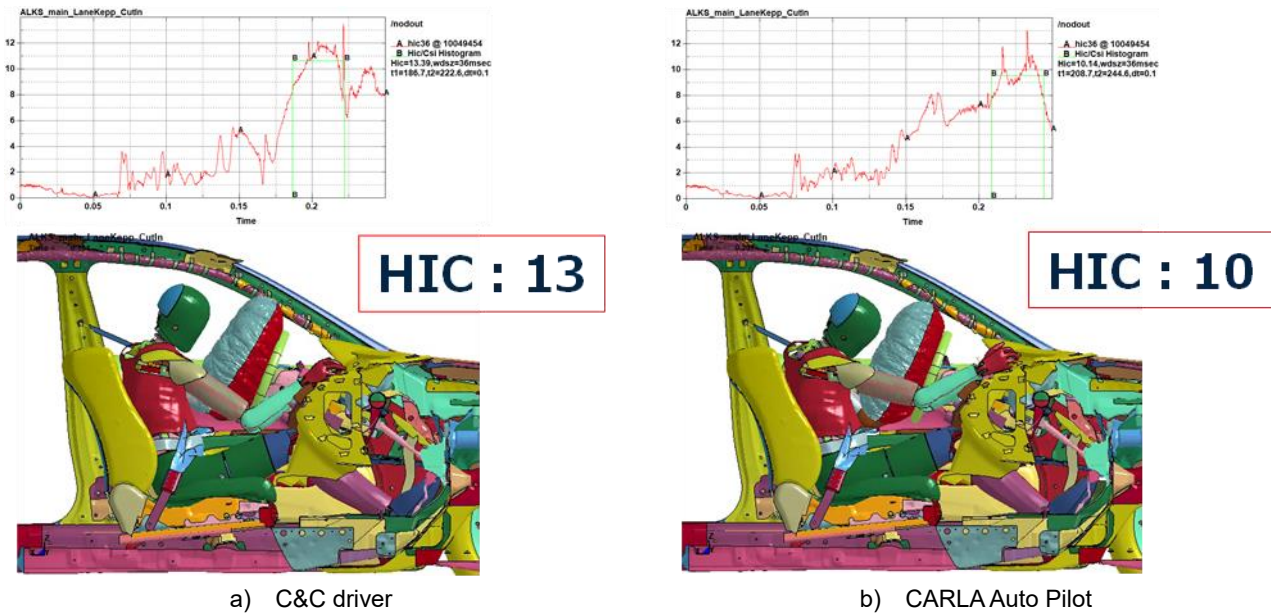


Fig.12 HIC

5.4 3つの評価指標の比較

前節までに衝突直前の相対速度、重症度判定、人身傷害程度の3つの評価指標を計算したが、この3つの評価指標はこの順でより後のものほど詳細に人体の傷害を予測できると考えられる (Table 2)。しかし、実際にはこの順で計算コストが増大するので、瞬時に評価結果が必要な場合は重症度判定を用い、詳細に人体傷害メカニズムを調べる必要がある場合は衝突 FE シミュレーションまで実施する必要があると考えられる。

Table 2 Comparison of criteria

	Relative velocity just before collision	D-Call Net Injury risk	Human Injury Level (HIC)
Personal injury measurement accuracy	Low		High
Calculation cost	Low		High

6. まとめ

本研究では、自動運転の安全性論証に関するカットインシナリオにおいて、これまで具体的な指標が検討されていない Unpreventable 領域について、緩和の評価指標として3つを想定し、それぞれに合わせた計算方法で指標を推定し比較を行った。今後、自動運転車の評価シナリオとして、他の高速道路でのシナリオや一般道でのシナリオが提案された場合でも、本検討と同様に Unpreventable 領域での人身傷害程度を予測するツールとして使用できる可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省: 自動運転車の安全技術ガイドライン (2018)
<https://www.mlit.go.jp/common/001253665.pdf> (参照 2022.4.6)
- 2) 日本自動車工業会: 自動運転の安全性評価フレームワーク Ver2.0 (2021)
https://www.jama.or.jp/operation/safety/automated_driving/pdf/framework_ver_2_0.pdf (参照 2022.4.11)
- 3) Informal document GRVA-06-02-Rev.4
<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2020/wp29grva/GRVA-06-02r4e.docx> (accessed 2022.4.6)
- 4) CARLA simulator
<https://carla.org/> (accessed 2022.4.6)
- 5) 微分方程式の数値解法
http://www.den.t.u-tokyo.ac.jp/ad_prog/ode/ (accessed 2022.5.10)
- 6) CARLA 0.9.11 Release
<https://carla.org/2020/12/22/release-0.9.11/> (accessed 2022.4.6)
- 7) ASAM OpenSCENARIO®
<https://www.asam.net/standards/detail/openscenario/> (accessed 2022.4.6)
- 8) calra-simulator/scenario_runner
https://github.com/carla-simulator/scenario_runner (accessed 2022.4.6)
- 9) calra-simulator/scenario_runner/srunner/examples/LaneChangeSimple.xosc
https://github.com/carla-simulator/scenario_runner/blob/master/srunner/examples/LaneChangeSimple.xosc (accessed 2022.4.6)
- 10) JIS D 0889:2020, 先進事故自動通報—救急自動通報システム (D-Call Net) —傷害リスク曲線の作成方法及び評価方法
- 11) 山崎邦夫: 自動車事故解析用剛体シミュレーションプログラムの作成, 自動車研究, Vol.24, No.11, p.483-486 (2002)
- 12) NHTSA: Crash Simulation Vehicle Models, Vehicle Interior and Restraint Modeling, Oblique THOR Accord Model
<https://www.nhtsa.gov/node/98956> (accessed 2022.4.6)
- 13) 独立行政法人自動車事故対策機構, 歩行者頭部保護性能試験の概要
https://www.nasva.go.jp/mamoru/assessment_car/head_protection_test.html#02 (参照 2022.4.27)

JNCAPにおけるペダル踏み間違い時加速抑制装置の 対歩行者試験追加に向けたマクロ事故データ分析

Traffic Accident Data Analysis for a Revision of the Method for Checking Equipment Designed to Curb Acceleration in the Event of Pedal Misapplication in JNCAP

[本間 亮平](#)*1
Ryohei HOMMA

[若杉 貴志](#)*2
Takashi WAKASUGI

[菊地 一範](#)*2
Kazunori KIKUCHI

Abstract

The Japan New Car Assessment Program (JNCAP) plans to add an evaluation for collisions with pedestrians in the equipment designed to curb acceleration in the event of pedal misapplication, from April 2023. In this survey, in order to determine the test conditions of the assessment, the actual situation of accidents with pedestrians was investigated using Japanese traffic accident statistics. As a result of the investigation, it became clear that a typical accident is when the center of the front end of the vehicle collides with a stationary adult pedestrian. On the other hand, since the actual situation of accidents regarding the orientation of pedestrians has not been clarified, a method of the vehicle approaching from the back side, which is difficult for the pedestrian to notice, can be considered.

1. はじめに

2021年3月の交通政策審議会陸上交通分科会自動車部会で決定された目標「2030年までに、車両安全対策により、2020年比で、30日以内交通事故死者数を1,200人削減および重傷者数を11,000人削減する」¹⁾に対して、事故を起きにくくするための予防安全技術は重要な位置づけとなっている。当該技術の普及を図るため、日本では国土交通省と独立行政法人自動車事故対策機構が一体となって実施している自動車アセスメント事業（JNCAP：Japan New Car Assessment Program）において、2014年度から予防安全性評価が導入され、多くの先進運転支援システム（ADAS：Advanced Driver-Assistance Systems）に関する評価が行われている。「ペダル踏み間違い時加速抑制装置」については、2018年度から発進シナリオ（停止状態からの前進）および後退シナリオ（停止状態からの後退）における、車両および工作物との衝突を回避または軽減する機能の評価がJNCAPに導入されている²⁾。その後、2019年頃からアクセルとブレーキの踏み間違いに起因した高齢者による事故が社会に広く周知されたことなどを受けて、当該評価のさらなる拡充が求められていた。こうした背景の中、2021年度の第1回自動車アセスメント評価検討会において、2023年度からは発進シナリオおよび後退シナリオにおける歩行者との衝突を回避または軽減する機能を評価対象に追加し、直進シナリオ（走行中）における踏み間違いの事故の評価に関しては、導入時期を含めて今後継続検討する方針が示された³⁾。上記方針の、歩行者との事故に対応する装置の評価追加に際しては、試験における歩行者を模擬するターゲット（以下、「歩行者ターゲット」という）の条件（種類、動き、向き、位置など）が課題となっている。そこで、本調査では上記課題を検討するために、公益財団法人交通事故総合分析センターの交通事故統計データ（以下、「マクロ事故データ」という）の集計結果を分析し、日本における当該事故の実態を調査した。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部 博士（人間科学）

*2 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部

* 原稿受理 2022年5月10日 / 初掲載 2022年6月

2. 調査方法

ペダル踏み間違い時加速抑制装置の対歩行者試験においてどのように歩行者を模擬するのか、その条件を検討するために、ペダル踏み間違いに起因した事故の第2当事者である歩行者（以下「歩行者（2当）」という）の年齢および進行方向、また事故の第1当事者（以下、「1当」という）が運転する車両の衝突部位を調べた。なお、「1当」とは、最初に交通事故に関与した車両等の運転者または歩行者のうち、当該事故における過失が重い者をいい、過失が同程度の場合には人身損傷程度が軽い者をいう。マクロ事故データの集計条件を、表1に示す。また、図1に、当事者の進行方向に関する分析項目のイメージ図⁴⁾を示す。

表1 集計条件表

集計項目名	集計項目内容
事故類型	・ 人対車両（小区分の限定なし） ・ 人対車両の小区分：横断中、対面通行中、背面通行中、路上作業中、路上停止中、路上遊戯中、その他
事故要因区分	アクセルとブレーキの踏み違い（操作上の誤りの中の操作不適の細項目）
行動類型（1当）	発進、直進（小区分の限定なし）、後退
進行方向（1当）	路上（①-②、①-③、①-④）、路外から（②-①、②-③、②-④）
進行方向（2当）	・ 1当路上： 右から（⑧-⑤、⑦-⑥）、左から（⑤-⑧、⑥-⑦）、奥から（⑥-⑤、⑦-⑧）、手前から（⑤-⑥、⑧-⑦） ・ 1当路外から： 右から（⑤-⑥、⑧-⑦）、左から（⑥-⑤、⑦-⑧）、奥から（⑧-⑤、⑦-⑥）、手前から（⑤-⑧、⑥-⑦） ・ 1当路上、1当路外から共通： 斜め方向（⑤-⑦、⑥-⑧、⑦-⑤、⑧-⑥）、停止中（⑤-⑤、⑥-⑥、⑦-⑦、⑧-⑧）
当事者種別（1当）	乗用（普通車と軽自動車）および貨物（車両総重量2.8t未満と軽自動車）
歩行者（2当）の年齢	未就学児、小学生、高齢者、非高齢者（「限定なし」から左記項目を減じて算出）
車両の衝突部位	⑧（前方左角）、①（前方中央）、⑤（前方右角）、⑦（後方左角）、③（後方中央）、⑥（後方右角）
死傷者数	死者数、重傷者数、軽傷者数

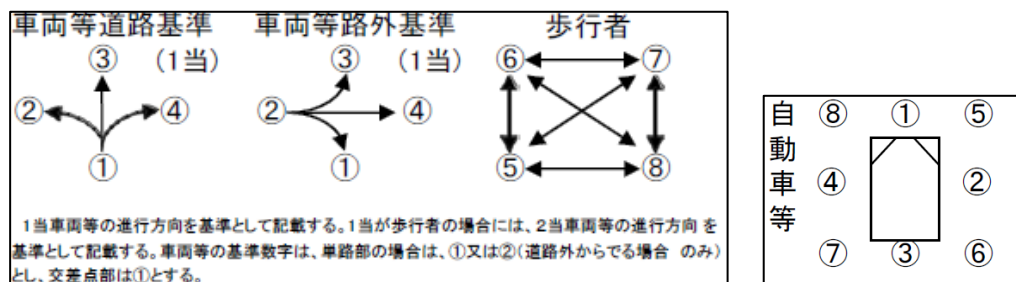


図1 当事者の進行方向（左）および車両の衝突部位（右）のイメージ⁴⁾

本調査は、JNCAPへの導入を見据えた検討であることから、JNCAP得点（2020年度から適用された新算定基準）によって、事故実態を調べることにした。JNCAP得点の計算は、まず対象装置の支援機能によって救える被害人数（死者数と重傷者数）の期待値を集計する。次に、内閣府の調査結果⁵⁾に基づき「被害者1名当たりの社会損失額（死亡：244.52百万円、重傷：18.25百万円）」を乗じて、装置の支援効果を社会損失額に換算する。予防安全装置の場合は、歩行者（2当）の年齢区分などによらず、すべて1点=4,807百万円として、装置の評価得点を算出する。予防安全装置の評価基準年は平成21年（2009年）であるが、ペダル踏み間違い事故はデータ数が少なく、単年のデータでは精度が低くなることが懸念されたため、2009年の前後それぞれ10年間の平均の被害人数から評価得点を算出し、基準年の前後の傾向を含めて調べた。なお、参考値として2009年単年での算出結果も併記した。

3. 結果

3.1 ペダル踏み間違いにおける人対車両事故の実態

ペダル踏み間違い（事故要因区分の小区分「アクセルとブレーキの踏み間違い」）に起因した人対車両の事故の実態を把握するために、当該事故によるシナリオごとの死者数、重傷者数、軽傷者数およびJNCAP得点を集計した結果を表2に示す。また、表3には2009年の全事故の状況および、全事故において当該事故が占める割合を示す。

発進シナリオおよび後退シナリオでは、それぞれ年間の死者数は2人程度、重傷者数が20人程度となっており、死者数および重傷者数から算出されたJNCAP得点では0.2点程度であった。一方、直進シナリオでは、年間の死者数が4人程度、重傷者数が30人程度で、JNCAP得点が0.3点程度であった。さらに、年間の軽傷者数についても、各シナリオで50人から100人程度であった。自動車に関連する交通事故の総数(JNCAP得点)に対して、ペダル踏み間違いに起因した人対車両事故が占める割合は0.14%程度であり、概して多い事故形態ではないことが伺える。

表2 ペダル踏み間違いに起因した人対車両事故の死傷者数およびJNCAP得点

シナリオ	集計対象年	死者数(人)	重傷者数(人)	軽傷者数(人)	JNCAP得点
発進シナリオ	2009年	2	17	75	0.17
	1999年～2008年の平均(単年換算)	1.8	24.3	109.6	0.18
	2009年～2018年の平均(単年換算)	1.9	19.2	76.1	0.17
後退シナリオ	2009年	1	24	64	0.14
	1999年～2008年の平均(単年換算)	2.0	17.1	72.4	0.17
	2009年～2018年の平均(単年換算)	3.2	17.0	54.8	0.23
直進シナリオ	2009年	4	28	124	0.31
	1999年～2008年の平均(単年換算)	3.7	29.4	103.3	0.30
	2009年～2018年の平均(単年換算)	3.8	33.5	105.7	0.32

表3 2009年の全事故に対するペダル踏み間違いに起因した人対車両事故の占める割合

事故	死者数(人)	重傷者数(人)	軽傷者数(人)	JNCAP得点
踏み間違い事故 (発進+後退+直進シナリオ)	7 (0.14%)	69 (0.13%)	263 (0.03%)	0.62 (0.14%)
全事故	4968	53710	857505	456.53

3.2 歩行者（2当）の年齢

各種 ADAS 試験に用いる歩行者ターゲットには、ISO 19206-2 に規定される「大人」タイプや「子供」タイプなど複数の種類がある。JNCAP のペダル踏み間違い時加速抑制装置の試験における、対歩行者試験に用いる歩行者ターゲットの種類を検討するために、マクロ事故データから歩行者（2当）の年齢の内訳を調べた。図 2 に、(a) 発進シナリオ、(b) 後退シナリオおよび (c) 直進シナリオにおける、歩行者（2当）の年齢層の内訳を示す。年齢区分としては、未就学児は 0 歳から 6 歳まで、小学生は 7 歳から 12 歳まで、非高齢者は 13 歳から 64 歳まで、高齢者は 65 歳以上の 4 区分とした。

すべてのシナリオにおいて、事故要因区分がペダル踏み間違いの事故では、歩行者の年齢は非高齢者と高齢者がほとんどを占めており、未就学児や小学生はほとんどいないことが示された。

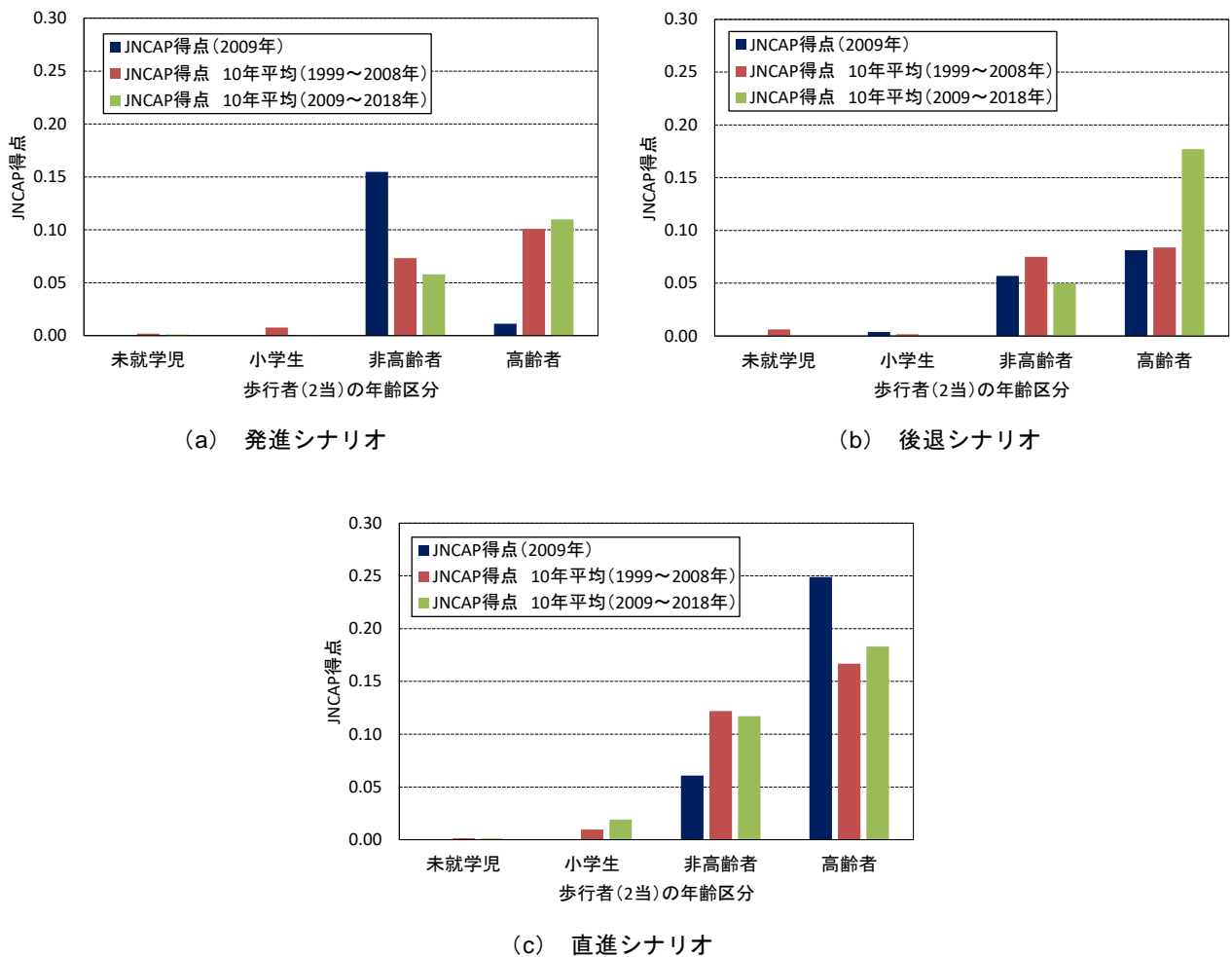


図2 各シナリオにおける歩行者（2当）の年齢の内訳

3.3 歩行者（2当）の進行方向

対歩行者試験時の歩行者ターゲットの設置向きを検討するために、マクロ事故データから歩行者（2当）の進行方向の内訳を調べた。図3に、(a) 発進シナリオ、(b) 後退シナリオおよび(c) 直進シナリオにおける、歩行者（2当）の進行方向の内訳を示す。車両から見た歩行者（2当）の進行方向として、右から、左から、斜めから、奥から（対面）、手前から（背面）および停止中に分類した。

すべてのシナリオにおいて、事故要因区分がペダル踏み間違いの事故では、歩行者の進行方向は「停止中」が最も多くを占めていた。また、発進シナリオの1999年から2008年では、横方向（「右から」および「左から」）の方が、前後方向（「奥から」および「手前から」）と比べてやや多いものの、その他では横方向と前後方向でほとんど同程度であることが示された。

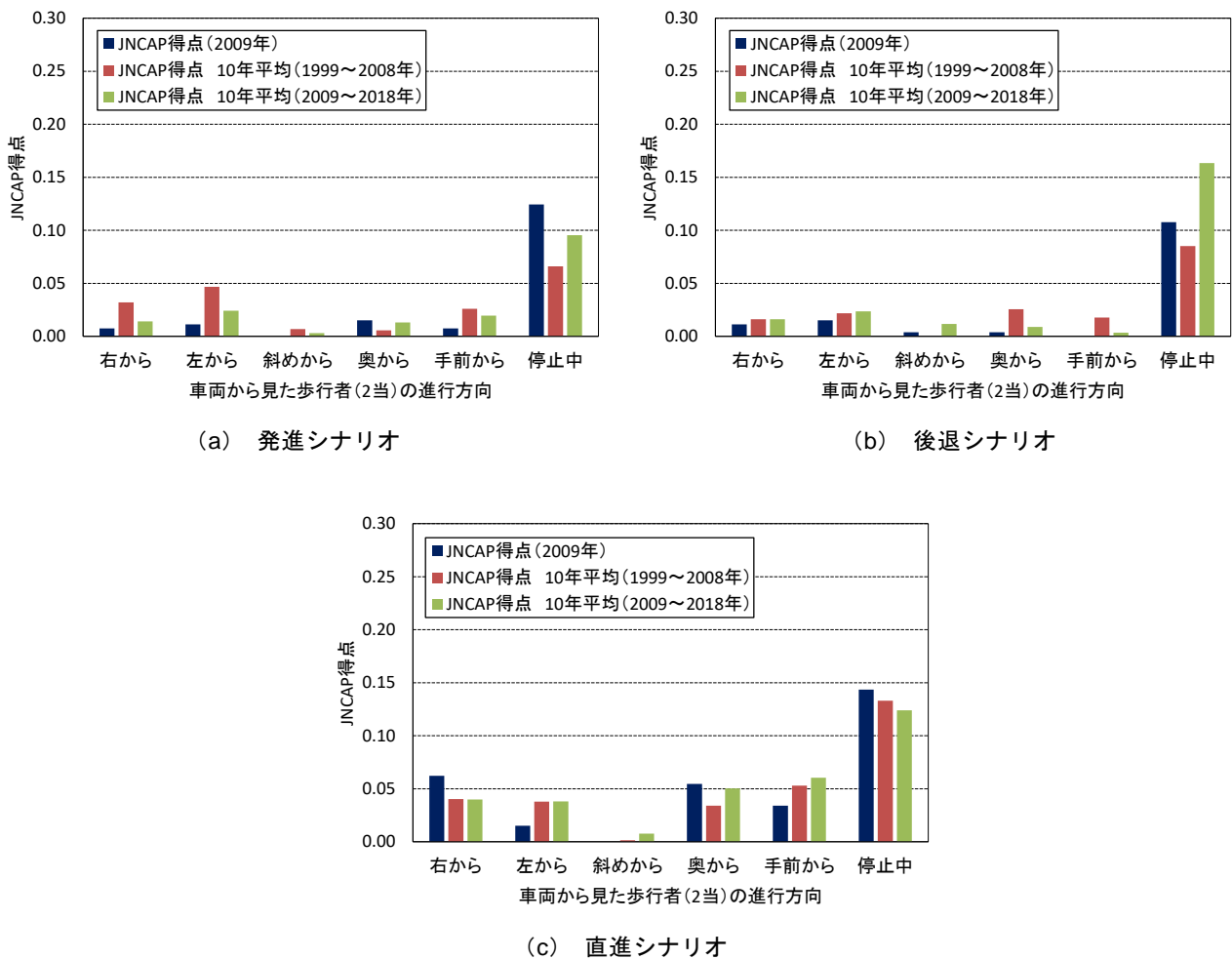


図3 各シナリオにおける歩行者（2当）の進行方向の内訳

3.4 車両の衝突部位

対歩行者試験に用いる歩行者ターゲットのオフセット，すなわち試験車両に対する歩行者ターゲットの横方向の設置位置を検討するために，マクロ事故データから車両の衝突部位の内訳を調べた．図4に，(a) 発進シナリオ，(b) 後退シナリオおよび(c) 直進シナリオにおける，車両の衝突部位の内訳を示す．

すべてのシナリオで，事故要因区分がペダル踏み間違いの事故では，車両の先端中央（「前方中央」あるいは「後方中央」）が最も多くを占めていた．なお，2009年の参考値では，後退シナリオにおいて「後方左角」が，また直進シナリオにおいて「前方左角」が多いものの，図中の吹き出しに示すように，データ数が少ないことの精度の影響であると推察される．

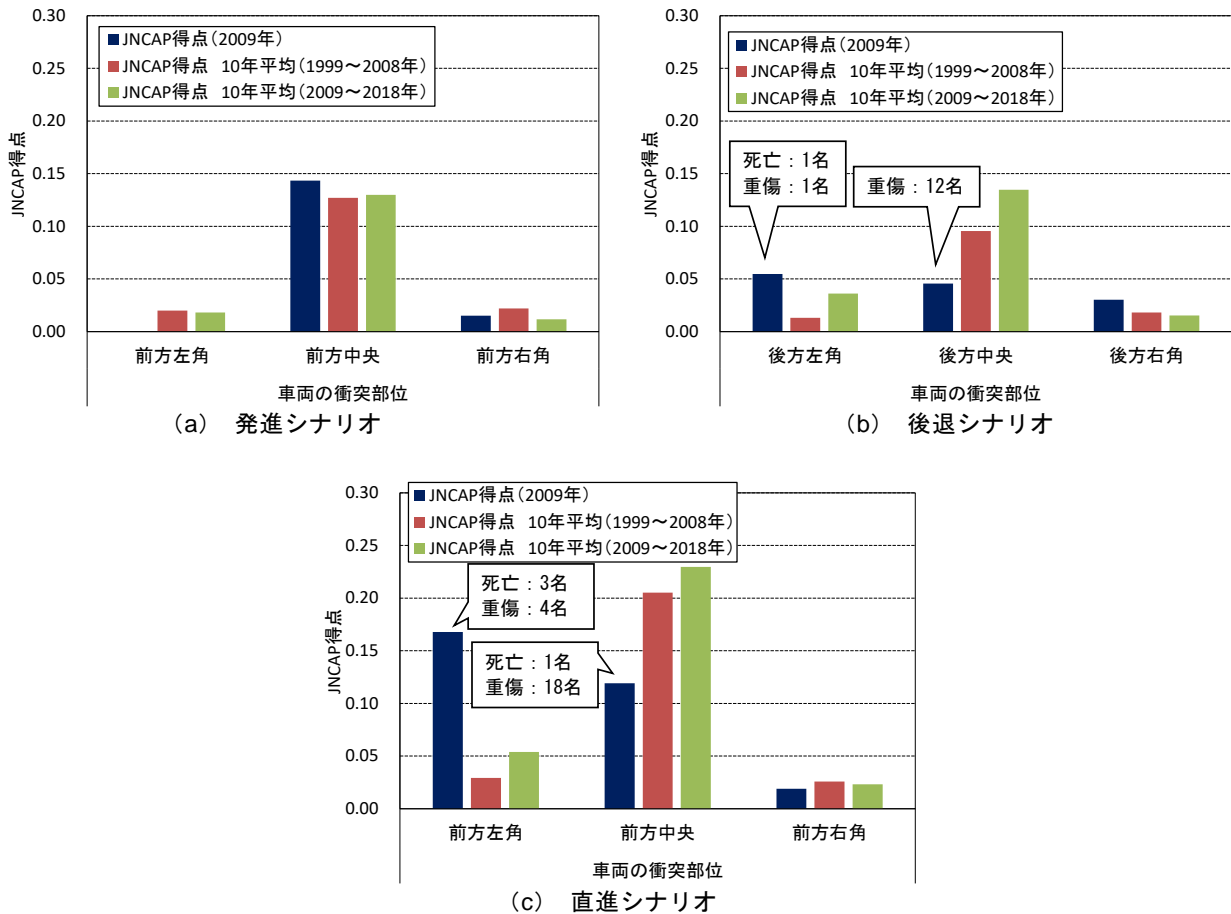


図4 各シナリオにおける車両の衝突部位の内訳

4. まとめ

ペダル踏み間違い時加速抑制装置の対歩行者事故への機能の評価追加に向けて、試験における歩行者の設置条件を検討するために、国内における事故実態を調べた。さらに、試験における歩行者ターゲットの条件の検討を行った。マクロ事故データ分析で得られた結果は、以下の通りである。

- ・自動車に関連する交通事故の総数に対して、ペダル踏み間違いに起因した人対車両事故が占める割合は0.14%程度であり、概して多い事故形態ではないことが伺える。
- ・歩行者（2当）の年齢は、未就学児および小学生がほとんど存在せず、大人が大半を占めることが示された。
- ・歩行者（2当）の進行方向は、「停止中」が多くを占めており、方向には明確な傾向がみられないことが示された。
- ・車両の衝突部位は、前方（後方）中央が多くを占めていることが示された。

以上の調査結果に基づく事故実態から、ペダル踏み間違い時加速抑制装置の対歩行者試験における歩行者ターゲットの条件を検討すると、「大人」ターゲットを用いて、試験車両に対して中央に静止状態で設置して試験を実施する方法が考えられる。なお、歩行者ターゲットの向きに関しては、事故実態に明確な傾向がみられなかったことから、歩行者が気づきにくいと予想される、車両から見て背面方向に設置するのが一案として挙げられる。すなわち、背面方向では歩行者が車両の接近に気づきにくく、歩行者側での回避行動が困難と推測されることから、車両側での安全対策の重要性が高いと考えられるためである。

今後は、継続検討となっている直進シナリオ（走行中）における試験・評価法に関する検討も行っていく予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省交通政策審議会陸上交通分科会自動車部会：交通事故のない社会を目指した今後の車両安全のあり方について
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001411236.pdf> (参照_2022.5.10)
- 2) 独立行政法人自動車事故対策機構：ペダル踏み間違い時加速抑制装置性能試験方法
<https://www.nasva.go.jp/mamoru/download/H31-13.pdf> (参照_2022.5.10)
- 3) 国土交通省：ペダル踏み間違い時加速抑制装置試験方法の見直しについて、令和3年度第1回自動車アセスメント評価検討会・資料4
https://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/02assessment/data/r3_1_4.pdf (参照_2022.5.10)
- 4) 公益財団法人交通事故総合分析センター：交通事故統計用語解説集
<https://www.itarda.or.jp/service/term> (参照_2022.5.10)
- 5) 内閣府政策統括官（共生社会政策担当）：交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査報告書
<https://www8.cao.go.jp/koutu/chou-ken/h23/houkoku.htmlhttps://www8.cao.go.jp/koutu/chou-ken/h23/houkoku.html>
(参照_2022.5.10)

自動運転安全性評価の国際協調に向けた ドイツと日本の交通実態比較

Comparison of Japanese and German data for internationally harmonized
automated driving safety assessment

— Discussion for cut-in situations on expressways —

[長谷川 諒](#)*1

Ryo HASEGAWA

Silvia THAL*2

Abstract

Active discussion is being conducted for the harmonization of international safety assessment for automated driving, however, it is predicted that traffic characteristics are different in each country. Thus, it is necessary to clarify which standards, or parts of standards, should be the same all over the world and which need to be considered for each country. In this article, we focus on those for each country. We analyzed and compared German and Japanese cut-in scenarios using traffic data which measurement vehicles collected on German and Japanese expressways to grasp country-specific traffic characteristics. Results revealed that the relative velocity and distance between the measurement vehicles and cut-in vehicles in each country are different. Therefore, in order to harmonize international standards of safety assessment for automated driving, the importance of considering country-specific traffic characteristics is shown.

1. はじめに

自動運転を含めた自動車の安全について国際基準調和を行う国連 WP29 では、自動運転の安全原則として、自動運転車両は受容不可能な危険を生じさせてはならないと記載されている。具体的には自動運転車両の運転領域において、合理的に予見可能かつ防止可能な交通事故を発生させてはならないと記載されている¹⁾。この原則に基づいた自動運転システムの安全性評価手法構築に関しては、国際的に活発な議論が続いている。中でも最も国際的に受け入れられているのが、独 PEGASUS において提唱されたシナリオベース・アプローチである²⁾。シナリオベース・アプローチとは、自動運転車の経路・走行計画の評価を行うために、自車の挙動（車線維持・車線変更）と他車の挙動（加減速・カットイン・カットアウト）、道路線形の組み合わせで表されるシナリオを作成し、そのシナリオを活用して自動運転システムの安全性評価を行う方法を指す³⁾。

一般財団法人日本自動車研究所（JARI）では、2018 年度より経済産業省の自動運転安全性評価手法開発事業である SAKURA Project⁴⁾において、自動運転車の安全性評価に必要な交通外乱シナリオの開発を独 PEGASUS、及びその後継プロジェクトなど国際連携のもとで推進している。当該事業では、自動車専用道路を対象としたシナリオの開発を実施しており、開発で得られた知見から、安全性評価に関する基準・標準の国際的な議論をリードする知見を提供している。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部

*2 Institute of Automotive Engineering, Braunschweig University of Technology

* 原稿受理 2022年5月10日 / 初掲載 2022年7月

シナリオの開発にあたっては、計測機器を計装した自動車の走行や、事故データベースなどから得られる実際の交通データを収集、分析することで交通実態を把握し、分析結果をもとに各々のシナリオを開発する手法が主流である。しかし、国際基準調和の議論を行うためには、複数の国の交通実態について調査、比較し、安全性評価の基準を国際的に調和させるべき部分と、国別で検討すべき部分について明確化することが必要であり、このことが合理的な基準作成に貢献すると考えられる。

そこで本稿では、合理的に予見可能なリスクの一例として、自動運転車が本線を車線維持走行中に他車にカットインされる場面に着目する。さらに日本国外の交通実態把握の一環として、著者らが FAST-zero'21 にて報告した、日独の自動車専用道におけるカットインの実態の違い⁵⁾について解説する。なお、ここでのカットインとは、自車（自動運転車）前方で発生した他車の車線変更のうち、隣接車線から自車が走行する車線に車線変更し、かつ走行速度が自車よりも遅いことと定義する。

2. 交通データの収集

交通実態を把握するためのデータ収集にはいくつかの手法がある。1つは、自動車に LiDAR やレーダ、カメラ等を計装して計測車両を開発し、この車両を走行させることで、自車周辺の交通参加者の挙動を取得する手法である^{6),7)}。その他、ドローンによる空中からの計測⁸⁾や、事故データベース⁹⁾からのデータ収集も可能である。ここでは、ドイツおよび日本において計測車の走行によってデータを収集し、周辺車両の挙動を抽出した例を取り上げる。ドイツと日本のデータ比較を行うにあたっては、両国のデータ計測車の仕様に違いがあるため、両国共通で記録しているパラメータとして、Fig. 1 に記載した自車の速度 V_e 、カットイン車両（以下、相手車）の速度 V_o 、自車と相手車の車間距離 d_x 、相手車の横速度 V_y に加え、自車に対する相手車の相対速度 V_{orel} と相手車の横加速度 a_y を用いることとした。なおカットインの方向は、低速車線から高速車線への車線変更、即ちドイツでは右から左、日本では左から右への車線変更とした。

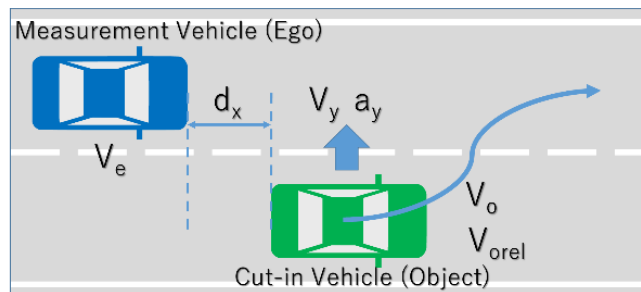


Fig. 1 Parameters in the cut-in scenario in Germany

2.1 ドイツの自動車専用道におけるカットインデータ

計測車には、周辺環境認識用センサとして標準搭載の ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) 用レーダとカメラに加えて、交通状況を記録するための機器を搭載した。ここでは、自動車専用道路を対象として、ドライバーが本計測車両を走行させることによって走行データを取集した。その結果、123,225 km の走行データの中から、右側（低速車線）からのカットインシナリオとして 2,878 件を抽出した。

2.2 日本の自動車専用道におけるカットインデータ

運転行動データベース¹⁰⁾、及び SAKURA Project¹¹⁾ で開発した計測車から抽出したデータを利用した。計測車には物体および白線検出用の Mobileye カメラおよびカメラからの情報を記録する機器を搭載した。ここでは、走行データのから、左側（低速車線）からのカットインシナリオとして 790 件を検出した。

3. 日独のカットイン比較・考察

日独のデータを比較するにあたり、ドイツの高速道路には制限速度がないため、相手車の縦方向の速度が130 km/h までのデータを分析対象とした。

カットインにおける分析対象の各パラメータの平均値 (μ) と、各パラメータについて衝突危険度の高いパーセンタイル値 (crit) の比較を Table 1 に示す。なお crit は、パラメータ毎に衝突危険度の高い値の範囲が異なる。 v_{xrel} の絶対値, ego v_x , obj v_y , obj a_x は値が大きいと衝突危険度は高くなるが, d_x , obj v_x , TTC は値が小さいと衝突危険度は高くなる。そのため, v_{xrel} の絶対値, ego v_x , obj v_y , obj a_x については 95 パーセンタイルを, d_x , obj v_x , TTC については 5 パーセンタイルを採用している。

縦方向の相対速度の絶対値 ($|v_{xrel}|$) を見ると、日本のカットイン時は、ドイツと比較してその値が大きいことが見て取れる。一方、縦方向の車間距離 (d_x) を見ると、ドイツのカットイン時は、日本と比較してその値が短いことが見て取れる。これらの違いは、日独で推奨される自動車専用道走行時の車間距離が異なることに起因すると考えられる。つまり、日本では 100 km/h で走行している際は 100 m の車間距離が推奨されているのに対して、ドイツでは車間時間 2 s、すなわち 100 km/h 走行時の車間距離は約 55 m が推奨されていることから、日本ではドイツよりも先行車に対して比較的長い距離を取っている可能性がある。

しかしながら、相手車が自車線へ入る際の TTC については日独で大きな差はなく、また相手車の縦方向の加速度 (obj a_x) は日独とも値が非常に小さい。

Table 1 Comparison of relevant statistical values

Parameter	Description	GER (μ)	JP (μ)	GER (crit.)	JP (crit.)
v_{xrel} [km/h]	Relative velocity	-6.99	-10.24	-23.55	-28.48
d_x [m]	Distance between Ego and Object	38.41	47.16	11.39	16.56
ego v_x [km/h]	Ego velocity	104.75	99.78	127.98	121.04
obj v_x [km/h]	Object velocity	96.69	89.56	125.07	114.95
obj v_y [m/s]	Object lateral velocity	0.87	0.90	1.44	1.34
obj a_x [m/s ²]	Object acceleration	0.18	0.13	-0.03	-0.20
TTC (TTC < 10s) [s]	Time To Collision when Object into Ego lane	7.32	7.71	4.17	4.87

次に、全分析対象データについて、 d_x を横軸、 v_{xrel} を縦軸とした分布を Fig. 2 に示す。今回は TTC が 5 s 未満の状況を衝突への切迫度が比較的高い危険な状況と定義し、これに着目する。、図中における濃い灰色のプロットと濃い橙色のプロットが、それぞれドイツと日本におけるカットインの内、TTC が 5 s 未満のデータである。ドイツにおいては、TTC が 5 s 未満のカットインは、 $|v_{xrel}|$ 、 d_x が小さい、即ち相手車が自車に近づいてくる速度は比較的遅いものの、自車に近い状況においてで多く発生している。一方、日本では、 $|v_{xrel}|$ 、 d_x が大きい、即ち自車から見て相手車は遠いものの、車間距離が早く縮まる状況において多く発生している。

これらの結果から、自動運転システムの安全性評価のためのカットインシナリオについて、相手車との相対速度や車間距離など、交通外乱テストシナリオが取りうるパラメータの範囲を規定するロジカルシナリオ³⁾を規定するためには、各国におけるパラメータの分布をそれぞれ考慮する必要性が示唆される。

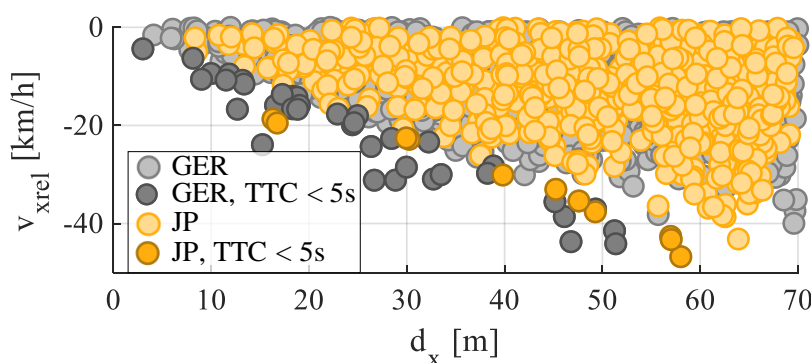


Fig. 2 Cut-in data samples with negative relative velocity of Germany and Japan in the dimensions d_x and v_{xrel}

Table 2 は、Table 1 におけるパラメータ $ego v_x$ 、 $obj v_y$ 、 $obj a_x$ 、 d_x 、 v_{xrel} について、先行研究⁷⁾で提案されたカットインシナリオにおける 2 つのパラメータの相関関係を算出する手法に基づき、2 つのパラメータ間のピアソン相関係数 r を日独別に算出したものである。 r の算出手法は以下の通りである。

まず各パラメータを等間隔の「クラス」に分割する。クラスは、あるパラメータの値域をどの程度分割するかを示す。例えばあるパラメータ x の値域を $0 \leq x \leq 6$ として、これを等間隔の 2 つのクラスに分割するならば $0 \leq x \leq 3$ がクラス 1、 $3 \leq x \leq 6$ がクラス 2 となる。そしてこの時、各クラスのクラス幅は 3 と定義される。次に、あるパラメータ x の各クラスにおいて、第二のパラメータ y の $crit$ を計算する。最後に、 x のクラス値と y のクラス毎の $crit$ で r を計算する。なお Table 2 で用いた各パラメータの値域、クラス幅、 $crit$ は Table 3 を参照されたい。

さらに r について、先行研究⁷⁾で提案された相関の有意水準 d を用いて相関の有意性を評価した。橙色のセルは、 $r > 0.95$ と有意水準 $d > 0.1$ という強い相関があることを示す。

結果として、日独ともに、衝突への切迫度が比較的高い危険な領域ではパラメータ d_x と v_{xrel} 、および $ego v_x$ と d_x の間に強い相関があることが分かった。ただし後者は、 $ego v_x$ の各クラスと d_x の $crit$ のみに強い相関が見られ、 d_x の各クラスと $ego v_x$ の $crit$ の相関は弱い。

この結果から、ロジカルシナリオの範囲内から各パラメータ値を選び出し、それらを組み合わせることで生成されるコンクリートシナリオ³⁾、すなわち自動運転システムの安全性を評価する際の試験条件において車間距離を設定する際には、自車速度との相関、及び相手車との相対速度との相関を考慮する必要性が示唆される。

Table 2 Correlation coefficients for German and Japanese cut-in scenarios

a) German cut-in scenarios

crit	ego v_x	-	0.72	0.59	-0.45	0.19
	obj v_y	-0.83	-	0.87	-0.06	0.13
	obj a_x	-0.18	0.67	-	0.63	0.08
	d_x	0.97	-0.87	-0.29	-	-0.96
	V_{xrel}	-0.80	0.22	-0.92	-0.98	-
		ego v_x	obj v_y	obj a_x	d_x	V_{xrel}
Classes						

b) Japanese cut-in scenarios

crit	ego v_x	-	-0.90	-0.82	-0.92	0.49
	obj v_y	-0.59	-	0.76	0.47	-0.64
	obj a_x	0.43	0.76	-	-0.55	-0.73
	d_x	0.98	0.87	0.54	-	-0.98
	V_{xrel}	-0.95	0.15	-0.79	-0.99	-
		ego v_x	obj v_y	obj a_x	d_x	V_{xrel}
Classes						

Table 3 Used value ranges, classes and percentile values to calculate the correlation coefficients

	ego v_x [km/h]	obj v_y [m/s]	obj a_x [m/s ²]	d_x [m]	V_{xrel} [km/h]
Min	80	0	-2	10	-60
Max	130	3	2	70	0
Class width	10	0.5	0.5	10	5
Crit	95th	95th	5th	5th	5th

4. おわりに

日本とドイツの自動車専用道におけるカットインシナリオを比較した結果、安全性評価シナリオを生成するには各国におけるパラメータ分布の違いを考慮することの重要性を示した。なお、今回は触れていないが、著者らによる FAST-zero'21 における報告⁹⁾ではドイツにおいて計測車によって収集したデータを対象に、カットインシナリオを高精度で抽出する手法が提案されている。2.1 において 2,878 件のカットインシナリオを抽出した手法については同報告⁹⁾を参照されたい。

参考文献

- 1) UN/ECE: WP.29-177-19 Proposal for a framework document on automated/autonomous vehicles (2019)
<https://unece.org/DAM/trans/doc/2019/wp29/WP29-177-19e.pdf> (accessed 2022.6.7)
- 2) T. Menzel, G. Bagschik and M. Maurer: Scenarios for Development, Test and Validation of Automated Vehicles, 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), p. 1821-1827 (2018)
- 3) 経済産業省: 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 (2019), https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H30FY/000351.pdf (参照 2022.6.7)
- 4) 経済産業省: SAKURA Project, <https://www.sakura-prj.go.jp/> (参照 2022.6.7)
- 5) S. Thal, J. Iatropoulos, A. Sonka, R. Henze, R. Hasegawa, H. Nakamura, J. Antona-Makoshi, S. Taniguchi: Series Sensor Data Processing International Data Comparison in Automated Driving Safety Assessment, FAST-zero'21 (2021)
- 6) S. Thal, H. Znamiec, R. Henze, H. Nakamura, H. Imanaga, J. Antona-Makoshi, N. Uchida, S. Taniguchi: Incorporating safety relevance and realistic parameter combinations in test-case generation for automated driving safety assessment, 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), p. 1-6 (2020)
- 7) T. Liu, Selpi: Comparison of Car-Following Behavior in Terms of Safety Indicators Between China and Sweden, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 21, No.9, p. 3696-3705 (2020)
- 8) R. Krajewski, J. Bock, L. Kloeker, L. Eckstein: The highD Dataset: A Drone Dataset of Naturalistic Vehicle Trajectories on German Highways for Validation of Highly Automated Driving Systems, 2018 21st IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), p. 2118-2125 (2018)
- 9) D. Otte, C. Krettek, H. Brunner, H. Zwipp: Scientific approach and methodology of a new in-depth investigation study in germany called gidas, International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) (2003)
- 10) 一般財団法人日本自動車研究所: 平成29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: 自動パーキングの実証及び高度な自動走行システムの実現に必要な研究開発 成果報告書, (2018)
- 11) 一般財団法人日本自動車研究所: 令和2年度 高度な自動走行・MaaS 等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, (2021)
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2020FY/000631.pdf (参照 2022.6.7)

高速道路渋滞場面における自動運転車に対する受容性

— 外部表示およびドライバの知識が不安感に及ぼす影響 —

Acceptance of an Automated Vehicle by the Following Drivers in Traffic Congestion on Motorways

— Effects of External Displays and Knowledge of Following Drivers on Anxiety about Automated Vehicles —

大谷 亮*¹
Akira OHTANI

江上 嘉典*²
Yoshinori EGAMI

栗山 あずさ*²
Azusa KURIYAMA

佐藤 健治*²
Kenji SATO

石井 啓介*³
Keisuke ISHII

Abstract

In recent years, automated vehicles have gradually become more common on motorways in Japan. It is important that surrounding drivers accept the automated vehicles in order to promote such vehicles more in the future. This research investigated the effects of an external display and drivers' knowledge and acceptance of automated driving. A driving simulator experiment was conducted to investigate this aim. Drivers were asked to follow an automated vehicle equipped with the external display at low speeds in traffic congestion, and after completing the drive, they were asked to answer their concerns about the vehicle. The results showed that drivers with no knowledge of automated driving tended to feel anxious when the external display noted the state of automated driving, but on average, the degree of anxiety was acceptable. More investigation is necessary to determine the validity of the results obtained in this study.

1. はじめに

ドライバが従来行っていた運転操作の一部または全てをシステムが担う自動運転の実用化に向けた検討が進められており、交通事故の低減、ドライバの負担の軽減、および交通渋滞の緩和などの諸問題の解決が期待されている。

日本では、SAE (Society of Automobile Engineers International) で定めた J3016 で定義されるレベル 3 の自動運転システム¹⁾ を搭載する自動車の走行環境の整備を図るため、道路運送車両法や道路交通法の一部が 2019 年に改正され、2020 年度の施行に至った。また、諸外国においても、国連基準 UN-R157 における ALKS (Automated Lane-Keeping Systems) や、市街地を低速で走行するレベル 4 の自動運転移動サービスなどのプロジェクト²⁾ などが推進されている。

自動運転システムの普及促進に向けた検討の中では、システム利用者だけではなく、周辺のドライバ、歩行者、さらには自転車乗用者などの交通参加者（以下、「周辺交通主体」という）の自動運転車に対する受容性が議論されている。自動運転に対する周辺交通主体の受容性は、自動運転車に対する概念的な安心感（人以外のシステムが運転を担うことへの安心感）と、自動運転車に実際に遭遇した際に感じる一時的な安心感（自動運転車と遭遇した際に評価される安心感）^{例えは 3)} が関係すると考えられる。一時的な安心感の内、一般道市街地において、歩行者が自動運転車と遭遇する際の安心感（不安感）や反応については広く検討されており、周辺交通主体に対する外部表示を対象にした研究がみられる^{例えは 4)}。一方、自家用車への自動運転システム導入が先行している日本の高速道路を想定して、走行する自動運転車に対して抱く周辺のドライバ（以下、「周辺ドライバ」という）の不安感や反応については、ほとんど検討されていない。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部 博士（心理学）

*2 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部

*3 一般社団法人日本自動車工業会

* 原稿受理 2022年6月10日 / 初掲載 2022年7月

本研究では、運転シミュレータ（以下、「DS (Driving Simulator)」という）実験により、高速道路において渋滞が生じる場面を対象にして、外部表示や周辺ドライバの知識が、自動運転車に追従する際の不安感に及ぼす影響を調査した。

2. 方法

自動運転車に対する周辺ドライバ、すなわち高速道路で自動運転車に追従するドライバ（以下、「参加者」という）の不安感を調査するため、一般財団法人日本自動車研究所（以下、「JARI」という）が所有する全方位視野 DS を用いて、以下の実験を行った。

2.1 参加者

日常的に自動車を運転するドライバ 18 名（男性 15 名、女性 3 名）が本実験に参加した。参加者の平均年齢は 38.6 歳（標準偏差 (SD) 11.3 歳、19 歳から 62 歳に分布）、免許取得後平均経過年数は 20.1 歳 (SD 11.5 歳) であった。また、一週間の平均運転日数は 6.6 日 (SD 0.9 日)、平均年間走行距離は 11,600 km (SD 7,000 km) であった。

ここで、周辺ドライバの知識が自動運転車に対する不安感に影響を及ぼすか否かを検討するため、18 名の参加者を 2 群に分けた (2.3.2 項参照)。

なお、新型コロナウイルス感染症流行下での実験となったため、参加者は全て JARI 職員となった。

2.2 模擬した交通状況と自動運転車

SAE のレベル 3 相当の自動運転システムを搭載した先行車（以下、「先行自動運転車」という）、10 台の側方車、および後続車が存在する片側 2 車線の高速道路を DS に模擬した。DS に設定した高速道路は 1 車線分の道路幅が 3.5 m であり、制限速度は 80 km/h であった。模擬した交通状況の詳細は、以下の通りである (Fig. 1 : 同図は、4 つの走行を左から右への時間遷移として示している)。

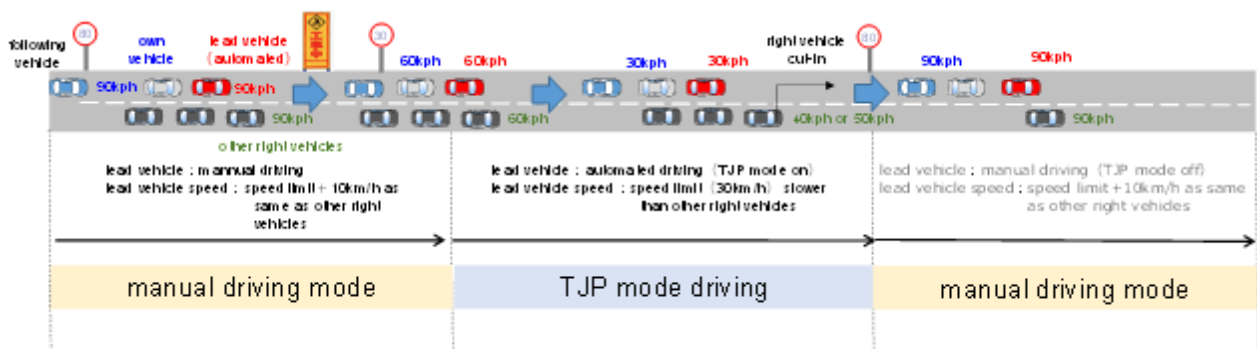


Fig. 1 Simulated scene in this study

- ・片側 2 車線の高速道路において、参加者が先行自動運転車に追従する状況を模擬した。
- ・先行自動運転車、側方車、および後続車は、DS システムの起動時には高速道路上に停車しており、先行自動運転車は参加者の運転する車両（以下、「自車」という）の 150 m 前方、後続車は 15 m 後方に位置した。また、側方車は片側 2 車線道路の追い越し車線上に配置し、側方車間の距離は全て 20 m とした。
- ・ドライバの操作により自車が走行して、先行自動運転車との車間距離が 75 m になった時点で、当該先行車、および 10 台の側方車が 90 km/h まで加速するようにした。また、交通状況によらず、後続車は

自車の走行に合わせて 15 m の車間距離を維持するようにした。なお、側方車間の距離 20 m や後続車との距離を 15 m にしたのは、参加者が側方や後方に移動して交通状況が変化しないようにする実験統制のためであった。

- 先行自動運転車および側方車の速度が 90 km/h に到達後の約 40 秒の間、これらの車両は 90 km/h で定常走行するようにした。
- 約 40 秒間の定常走行後に、高速道路の工事場面を設定した。また、工事により道路の制限速度が 30 km/h となる交通規制があり、渋滞が発生する場面を模擬した（以下、「渋滞イベント」という）。この際、第一走行車線の左側の路肩に、「工事中」および「30 km/h の速度制限」を示す看板を配置した。
- 渋滞イベントが発生した後、先行自動運転車は、速度規制を遵守するために徐々に減速し、走行速度が 60 km/h となった時点で渋滞時の自動走行を行うモード（Traffic Jam Pilot モード：以下、「TJP モード」という）になるようにした。
- TJP モードに入り、先行自動運転車の速度が 30 km/h に到達した後、約 1.5 分の間、当該先行車が定常走行するようにした。
- 先行自動運転車が 30 km/h に到達した 5 秒後に、並走する側方車は、40 km/h もしくは 50 km/h の速度で走行し、左ウインカーを提示しながら、先行自動運転車の前へ車線変更するようにした。なお、側方車は 10 台設置したが、先行自動運転車を追い越した後、ドライバの視界から消失した段階で、側方車群の最後尾に移動させ、繰り返し追い越しが生じる状況を設定した。
- 先行自動運転車が約 1.5 分の間 30 km/h で定常走行した後、渋滞が緩和されるようにした。渋滞の緩和に伴い、先行自動運転車は加速を開始し、60 km/h に到達した時点で、TJP モードが解除され、再び 90 km/h で定常走行するようにした。また、側方車も渋滞の緩和により 90 km/h の速度で定常走行した。
- 先行自動運転車および側方車の速度が 90 km/h になった時点で、750 m 先に目的地を設けた。目的地を自車が通過した後、参加者に停止を求め、1 走行を終了した。

DS 実験で模擬した先行自動運転車は SAE のレベル 3 相当のシステムを搭載しており、自動運転中（TJP モード中）は、ドライバがアクセル、ブレーキ、およびハンドル操作を行わなくても、一定の速度で自車線上を直進走行し、自動運転が解除されている場合には、先行車ドライバが手動で運転する想定とした。また、自動運転中は制限速度を遵守する設定とした。

2.3 検討した要因

片側 2 車線の高速道路直線部において、自動運転車に遭遇した際の参加者の不安感に影響を及ぼす要因を調査するため、以下の条件を設定した。

2.3.1 外部表示の種類

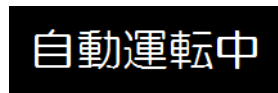
外部表示の種類が、追従時の参加者の不安感に及ぼす影響を調査するため、以下の 3 条件を設定した（Fig. 2：以下、「外部表示条件」という）。

(1) 自動運転車/マーカーあり

先行自動運転車が自動運転システムを搭載しており、「自動運転中」を示すマーカー（Fig.2(a)）を参加者から見える箇所に表示している条件。参加者には、マーカーの意味として「自動運転車であり、現在、自動運転している」という説明を行った。

(2) 自動運転車/ステッカーあり

先行自動運転車が自動運転システムを搭載しており、「自動運転車」を示すステッカー (Fig.2(b) : 国土交通省令和2年3月31日報道発表資料⁵⁾) を参加者から見える箇所に貼付している条件. 参加者には, ステッカーの意味として「自動運転車をあらわすが, 必ずしも自動運転中とは限らない」という説明を行った.



(a) marker

(b) sticker

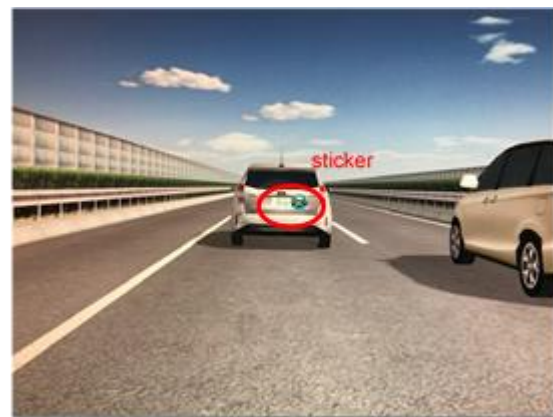
Fig. 2 External displays in this study

(3) 自動運転車/無表示

先行自動運転車が自動運転システムを搭載しており, マーカーやステッカーが表示もしくは貼付されていない条件 (以下, 「無表示」と記す).

外部表示について, マーカーは渋滞イベントが発生し, 先行自動運転車が TJP モードにセットされ, 速度が 60 km/h 以下になったら点灯するようにした. また, 渋滞が解消し, 先行自動運転車の速度が 60 km/h よりも高くなったら消灯した. マーカーの設置位置は, 先行自動運転車のリアウィンド内であり, 大きさは縦約 300 mm × 横約 1,000 mm 以内に「自動運転中」の文字が収まるようにした (Fig.3(a)).

また, ステッカーはナンバープレートの右横に設定した. なお, ステッカーの大きさは, 最低サイズ縦 95 mm × 横 100 mm とされているが, 本研究の調査では DS を用いたため, 映像の解像度による可読性の問題などから, 縦および横とも 3 倍の大きさにして実験を行った (Fig.3(b)).



(a) marker

(b) sticker

Fig. 3 Positions of external displays

2.3.2 事前知識

自動運転システムに関する事前の知識（以下、「教示の有無」という）が、先行自動運転車追従時の参加者の不安感に及ぼす影響を調べるため、以下の2通りの群を設けた。

(1) 教示あり群

参加者18名の内半数の9名に対して、DSでの走行を求める前に、「自動運転車は、必ず周囲の車両を認識し、法令を遵守して走行・停止します」を紙面と口頭で教示された群（以下、「教示あり群」という）。教示あり群の属性は、下記の通りであった。

- ・性別：男性7名，女性2名。
- ・年齢：平均38.8歳（26–62歳に分布），SD 10.2歳。
- ・免許取得後経過年数：平均18.7年，SD 0.7年。
- ・一週間の運転頻度：平均6.2日，SD 1.3日。
- ・年間走行距離：平均13,000 km，SD 8,500 km。

(2) 教示なし群

参加者18名の内半数の9名に対して、DSでの走行を求める前に、教示あり群に提示した教示を与えなかった群（以下、「教示なし群」という）。教示なし群の属性は、下記の通りであった。

- ・性別：男性8名，女性1名。
- ・年齢：平均38.3歳（19–57歳に分布），SD 13.4歳。
- ・免許取得後経過年数：平均18.2年，SD 0.7年。
- ・一週間の運転頻度：平均6.9日，SD 0.3日。
- ・年間走行距離：平均10,000 km，SD 5,200 km。

2.3.3 交通状況（側方車の速度）

交通状況が追従時の参加者の不安感に及ぼす影響を調査するため、渋滞イベント発生時の側方車の速度について、以下の2条件を設定した（以下、「側方車速度条件」という）。

(1) 側方車速度40 km/h

渋滞イベント発生により、先行自動運転車が30 km/hで定常走行している際に、側方車が40 km/hで走行し先行自動運転車の前へ車線変更する状況を模擬した。

(2) 側方車速度50 km/h

渋滞イベント発生により、先行自動運転車が30 km/hで定常走行している際に、側方車が50 km/hで走行し先行自動運転車の前へ車線変更する状況を模擬した。

以上の3通りの検討要因（外部表示の種類，事前知識，交通状況）の内，外部表示の種類3条件と交通状況の2条件を被験者内計画，教示の有無の2条件を被験者間計画とした。したがって，一人の参加者が体験する条件数は，外部表示の3条件と交通状況の2条件との組み合わせによる計6条件であり，1走行中に1条件を実施した（以下，「走行セッション」という）。

2.4 測定指標

先行自動運転車に追従する後続車ドライバーの不安感や対応行動などを調べるため、参加者の主観評価と内省報告、渋滞イベント発生によって先行自動運転車が TJP モードとなり 30 km/h で定常走行している際の運転行動や車両挙動の指標（以下、まとめて「運転行動指標」という）を測定した。

測定した指標は以下の通りである。

(1) 主観評価指標

各走行セッション終了後に、不安感に関する主観評価を参加者から聴取した。すなわち、30 km/h で走行する先行自動運転車に追従している際に、どの程度当該車両に対して不安を感じていたかを、0%から 100%で評価するよう参加者に求めた (Fig.4)。なお、許容できる限界の不安感を、50%として回答するよう参加者に教示した。

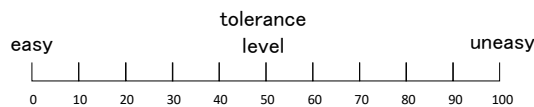


Fig. 4 Subjective scale of feeling of anxiety

(2) 運転行動指標

渋滞イベント発生によって先行自動運転車が TJP モードとなり、約 1.5 分の間 30 km/h で走行している際の運転行動として、参加者の前後方向（例、ブレーキ操作回数や先行自動運転車との平均車間時間）および横方向（例、ステアリング最大操作角度や車両の横変位置）の操作や挙動を 120 Hz サンプリング周期で測定した。

また、参加者の視認行動として、側方車を確認した回数を調べた。側方車を確認した回数は、道路右側、車室内および右サイドミラーの視認回数から求めた（以下、「視認回数」という）。視認回数は運転中の参加者の顔面を撮影し、30 Hz サンプリング周期で DV レコーダに記録した。

2.5 実験手順

本研究は、以下の実験手順で検討を行った。

- 参加者に実験の主旨、プライバシー保護、DS の特徴（例えば、DS 酔い）などについて説明し、インフォームド・コンセントを得た上で実験を実施した。
- 本研究の目的を参加者に明示した後に、片側 2 車線の高速道路直線部を模擬した DS について説明した。また、日常と同様の走行を心がけて、車線逸脱や他の車両と衝突しないようにステアリングやブレーキペダルを操作するよう参加者に求め、事故の回避はドライバ責任であることを明示した。
- 先行自動運転車について、本研究で想定している自動運転システムの特徴について説明した。この際、外部表示として、マーカーやステッカーの意味についても参加者に教示した。
- 上記の説明の終了後、各走行セッションについて、目的地に時間通りに到着するように教示した。また、目的地までに時間通りに走行できているか否かについて、時間通り走行している際には、参加者が運転する自車のメータークラスター内部に青丸印、遅延している場合には赤丸印が提示されることも参加者に説明した。この目的地に時間通りに到達する課題を参加者に課したのは、先行自動運転車に 30 km/h で追従している際に焦燥感を与えるためであった。なお、遅延を知らせる赤丸印は、先行の自動運転車両が 30 km/h で定常走行した 5 秒後に点灯するようにした。
- 本実験の目的、内容、先行自動運転車のシステムの特徴、ならび外部表示について、参加者が了解したことを確認した後、DS の操作に慣れるための練習走行を行った。

-
- ・練習走行において、参加者が DS の運転に慣れたことを確認した後、順序効果を相殺するため、本研究で設定した走行セッションをランダム順に実施した。なお、各走行セッションで提示される外部表示については、運転開始前に参加者へ明示した。
 - ・走行セッション終了ごとに、主観評価への回答と内省報告を参加者に求めた。
 - ・全ての走行セッションが終了した後、外部表示の好み（複数回答可）の順位などについて聴取し、実験を終了した。

実験の所要時間は休憩を含め各参加者とも合計 1.5 時間程度 (DS 搭乗時間は約 1 時間 10 分) であった。なお、本実験は、JARI の倫理委員会の承認を得た上で実施した (承認番号: 20-007)。

3. 結果

本研究で設定した検討要因の影響を把握するため、2.3 節の検討要因別に主観評価や運転行動の各指標の平均値と SD、もしくは百分率を求めた。平均値の差の検定には、対応のある t 検定、もしくは混合型の二元配置の分散分析を用い、効果量 (d もしくは η^2) を併せて算出した。

なお、参加者 18 名中 2 名は、先行自動運転車を追い越すために車線変更を行ったことより、運転行動指標と視認回数に関するデータについては、この 2 名を除外して集計した。また、分析の結果、交通状況 (側方車の速度) の要因は主観評価や運転行動に大きな影響を及ぼさないことがわかったため、これ以降の結果は、交通状況の条件を合算したものを分析している。

3.1 外部表示と教示の有無の影響

(1) 主観評価指標の結果

混合型の二元配置分散分析の結果、不安感について、外部表示、教示の有無、および交互作用に有意差はみられなかった。なお、有意差はみられなかったものの、教示なし群では、マーカーの不安感が最も高く、次にステッカー、無表示の順に不安感が高かったが、教示あり群ではその逆の結果が示された。ただし、いずれも平均値が許容限界 (50%) を下回っていた (Fig. 5(a), Table 1(a))。

(2) 運転行動指標の結果

混合型の二元配置分散分析の結果、本研究で測定した前後方向 (例、平均車間時間 (Time headway: THW): Fig. 5(b), Table 1(b)) および横方向 (例、車両横変位量: Fig. 5(c), Table 1(c)) の全ての指標において、外部表示、教示の有無、および交互作用に有意差はみられなかった。

次に、側方車を確認した回数 (Fig. 5(d), Table 1(d)) については、教示の有無に主効果がみられ、教示なしに比べて、教示ありの視認回数が小さく、効果量も大きいと判定された ($\eta^2=0.23$)。

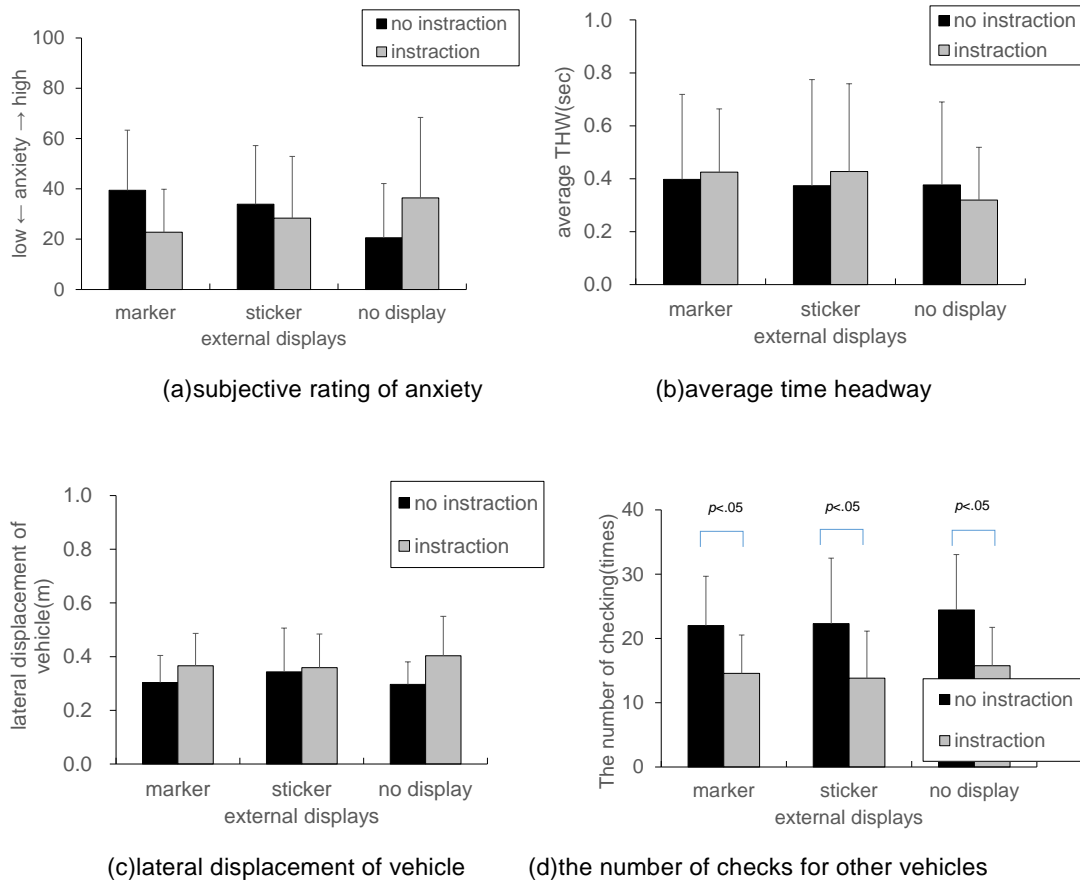


Fig. 5 Impacts of external displays and instruction to the surrounding drivers on their subjective ratings and driving behaviours

Table 1 Two-way ANOVA table of external HMI and instruction

(a) subjective rating of anxiety							(b) average time headway						
Factors	SS	df	MS	F	significant	η^2	Factors	SS	df	MS	F	significant	η^2
instruction	122.45	1	122.45	0.06	ns	0.00	instruction	0.00	1	0.00	0.00	ns	0.00
sxinstruction	32046.76	16	2002.92				sxinstruction	7.38	14	0.53			
external displays	167.13	2	83.56	0.10	ns	0.00	external displays	0.07	1.94	0.04	0.89	ns	0.01
interaction	4911.57	2	2455.79	2.87		0.08	interaction	0.05	1.94	0.03	0.64	ns	0.01
sxinstructionxexternal displays	27371.30	32	855.35				sxinstructionxexternal displays	1.15	27.16	0.04			
Total	64619.21	53	5520.08				Total	8.66	46	0.64			

(c)lateral displacement of vehicle							(d)the number of checks for other vehicles						
Factors	SS	df	MS	F	significant	η^2	Factors	SS	df	MS	F	significant	η^2
instruction	0.09	1	0.09	1.38	ns	0.06	instruction	1617.04	1	1617.04	5.95	*	0.23
sxinstruction	0.93	14	0.07				sxinstruction	3804.92	14	271.78			
external displays	0.01	1.83	0.00	0.14	ns	0.00	external displays	79.56	2	39.78	0.69	ns	0.01
interaction	0.03	1.83	0.02	0.92	ns	0.02	interaction	7.27	2	3.64	0.06	ns	0.00
sxinstructionxexternal displays	0.51	25.61	0.02				sxinstructionxexternal displays	1625.83	28	58.07			
Total	1.56	44	0.20				Total	7134.63	47	1990.30			

3.2 内省報告の結果

マーカーやステッカー、および無表示が好まれる理由として、教示あり群（2名は無回答）では、「作動状況がわかる」という理由でマーカー（9名中3名）、「自動運転車が低速の理由がわかる」という理由でステッカー（9名中2名）、さらに、「手動運転と同じ」という理由で無表示が好まれる傾向が高かった（9名中2名）。また、教示なし群では、「作動状況がわかる」という理由でマーカーが好まれ（9名中4名）、「手動運転と同じ」や「自動運転車とわかる」という理由でステッカーが好まれる傾向が高かった（9名中3名）。さらに、「手動運転と同じ」という理由で無表示が好まれる傾向がみられた（9名中5名）。

次に、マーカーやステッカー、および無表示が好まれない理由として、教示あり群では、「作動状況がわからない」といった理由で、無表示が好まれない傾向がみられた（9名中3名）。また、教示なし群では、「先行車が自動運転中とわかると緊張する」といった理由からマーカーは好まれない場合があった（9名中3名）。

4. 考察

本章では、SAEのレベル3相当の自動運転システムを対象にして、DSに片側2車線の高速道路直線部に渋滞が生じる場面を模擬し、先行する自動運転車に手動運転で追従する状況を想定して、外部表示やドライバの知識などが、走行中の周辺ドライバの安心感などに及ぼす影響を調査した。

DS実験の結果、本研究で設定した範囲内では、外部表示の違いによる不安感や運転行動への影響は平均値的に見ると大きくはなく、マーカーもステッカーも不安感の許容限界値を下回ることが示された。この点から、高速道路の渋滞状況下で自動運転車に追従する場合には、マーカーの有用性はステッカーと同程度と考えられる。

また、内省報告の結果から、ステッカーについて、自動運転車に関する事前知識がないと、自動運転車とわかり好ましいといった意見が見られ、さらに、事前知識があると、自動運転車が低速した理由もわかるようになり、好ましいという意見が聴かれた。この結果から、周辺交通主体（ドライバ）に自動運転車に対するより深い知識をもって運転してもらうには、ステッカーの場合、自動運転に関する知識が重要になると考えられる。

さらに、マーカーについては、自動運転に関する知識の有無にかかわらず、作動状況がわかるという点で好まれており、作動状況を伝える必要のある状況下では、マーカーの利用が有用と推察される。一方で、本研究の結果の範囲では、事前知識がないと、自動運転中とわかると緊張するため、マーカーが好ましくないといった意見も聴かれており、この結果は、自動運転システムに対する周辺ドライバの適切な理解が浸透していない過渡期以前に、自動運転システムと周辺交通主体とのインタラクションをはじめて行う際の結果と解釈できる。この点から、自動運転中表示する際には、システム全体として安全が確保されていることを周辺交通主体が知っておくことが安心感の向上にとって重要と考えられる。

なお、外部表示の種類にかかわらず、自動運転に関する知識がないと、右側方車を確認する回数が増えており、この結果は、自動運転車と遭遇した際の周辺交通主体の対応が知識により異なる可能性を示唆していると推察される。

以上の考察は、18名の実験参加者からなるDS実験の結果から導き出されたものであり、今後、実験参加者の属性を考慮した上でデータ数を増やして、結果の妥当性や信頼性を検証する必要がある。また、本研究では、高速道路を先行車に追従し渋滞が発生する状況を対象に検討を行ったが、今後、異なる交通状況や場面を対象にして、本研究の結果の解釈を行うことが重要である。

謝辞

本研究は一般社団法人日本自動車工業会自動運転ヒューマンファクタ分科会からの委託研究として、一般財団法人日本自動車研究所が 2020 年度に実施した内容の一部をまとめたものであり、ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) SAE International: SAE J3016 (R) Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. Surface vehicle recommended practice(2016)
- 2) Merat, M. et al: What externally presented information do VRUs require when interacting with fully Automated Road Transport Systems in shared space ? Accident Analysis and Prevention, Vol. 118, p.244-252(2018)
- 3) Deb S. et al: Development and validation of a questionnaire to assess pedestrian receptivity toward fully autonomous vehicles. Transportation Research Part C, Vol. 84, p.178-195(2017)
- 4) De Clercq, K. et al.: External human-machine interfaces on automated vehicles: Effects on pedestrian crossing decisions. Human Factors, 61, p.1353-1370(2019)
- 5) 国土交通省 : 報道・広報 自動運転車に関する安全基準を策定しました！~自動運転車のステッカーのデザインも決定~.
https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha07_hh_000338.html (参照 2022.06.01)

眼疾患（緑内障）における運転への 補償行動に関する予備的検討

Preliminary study on compensatory behavior for driving with eye disease (glaucoma)

佐藤 健治*¹
Kenji SATO

安部 原也*²
Genya ABE

植田 俊彦*³
Toshihiko UEDA

鈴木 弘隆*⁴
Hirotaka SUZUMURA

Abstract

Japanese statistics show that one in twenty people over the age of 40 (estimated about 3.6 million) have glaucoma in Japan. Previous studies suggested that glaucoma patients compensate for visual field impairment by eye movements. However, there are only a few studies on such compensatory behavior. In this study, a driving simulator experiment was conducted to understand the compensatory behavior of glaucoma drivers, especially their eye-gaze behavior. Eight healthy elderly drivers and five glaucoma patients participated in the experiment. Gaze behavior while driving was measured under various traffic conditions. The results showed that glaucoma patients had a higher rate of gazing to the left side in addition to the front, in several driving situations compared to normal elderly drivers. Compensatory behaviors of glaucoma patients are discussed in terms of their eye-gaze behavior.

1. はじめに

自動車の運転では認知、判断、操作という一連の過程が一般的に仮定されている¹⁾。認知はある対象を知覚し、その対象の特徴などを理解する重要な過程であり、運転における認知は視覚情報によるところが多いとされている²⁾。視覚的な知覚とは、眼が捉えた光刺激を脳へ伝送し情報処理されることである。したがって、眼疾患によって視覚に何らかの障害が生じると、認知へ悪影響を及ぼすばかりではなく、判断、操作へも影響を及ぼし、交通事故に至る危険性が懸念される。

視野障害が生じる疾患の一つに緑内障があるが、多治見疫学調査によると、40歳以上の20人に1人（推定約360万人）が緑内障に罹患し、加齢とともに罹患率が上昇していることが報告されており³⁾、高齢化が進む国内においてさらに患者の増加が想定される。緑内障の症状には、視神経の異変により視野が狭くなる視野狭窄や、部分的に見えない範囲（暗点）が生じるなどの視野障害がある。緑内障の特徴として、症状の進行が緩徐であること、固視点周囲の視野が比較的後期まで保たれるために視力低下が初期では現れにくいこと、左右眼で視野障害の進行に差があるために両眼視で視野障害を補えることによって日常生活において視野障害を自覚しにくいことなどがあげられる。

緑内障に起因する視野障害と自動車の運転に関する先行研究では、緑内障が重症であるほど交通事故率が高いことが報告されている^{4),5)}。シミュレータ実験において、視野全体の障害がより進行している後期緑内障と正常高齢者の事故件数を調べた研究では、視野障害度が高いほど事故リスクが高かった⁶⁾。一方、緑

*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 Ph.D

*3 二本松眼科病院 博士（医学）

*4 すずむら眼科 博士（医学）

* 原稿受理 2022年6月10日 / 初掲載 2022年7月

内障に罹患しているドライバは、罹患していない高齢ドライバに比べて、交通事故への遭遇率が低いことも報告されている⁷⁾。これについては、人間は加齢などに伴う機能低下に応じて、適応的に行動する「補償行動」を行い、結果的に問題（交通事故）が生じないように行動していることが報告されており^{8),9),10)}、緑内障に罹患しているドライバにおいても、夜間、霧、雨、通勤時間帯、高速道路などの状況に応じて運転機会を避ける補償行動を行うことで、交通事故への遭遇率が低かったと考えられた⁷⁾。

ここで、補償行動について、Michon¹¹⁾は、悪天候時に運転を避けるといった運転習慣に関する補償を「戦略的補償」、負荷が高い運転状況において、運転速度の調整を行うといった運転行動に関する補償を「戦術的補償」とした。前述の、夜間、霧、雨、通勤時間帯、高速道路などの状況に応じて運転機会を避けるといった補償は戦略的補償と言える。一方、戦術的補償の一つとして、運転速度の調整の他に、視線移動があると考えられる。緑内障では、視線移動を行わず一点を見続けた場合には、その間、見えにくい範囲が留まり続ける。そのため、視線移動を行い、見えにくい範囲が留まり続けないようにすることで、運転時における見落としなどを低減できる可能性があると考えられる。このような視線行動による補償行動について、緑内障患者は、健常者よりも運転映像視認中のサッケードが多いことが報告されている¹²⁾。サッケードとは、ある固視点から次の固視点への眼球運動のことであり、この眼球運動すなわち視線移動により、視野障害を補償していることが示唆された¹²⁾。このように、緑内障に罹患したドライバの運転における補償行動についての研究結果が報告され始めているものの、運転における認知の大部分を占める視覚、すなわち視線行動に関して十分に明らかになっていない。

自動車の運転は、時々刻々に道路の交通状況が変化し、歩行者の飛び出しや先行車の急停止等を予測し、交通状況の変化に備えることが重要と考えられる。このような交通状況の変化に対し、緑内障に罹患しているドライバがどのように戦術的補償をしているかを明らかにすることで、緑内障と診断された患者に対し、運転へのアドバイスや高度運転支援システムの設計に貢献できると考えられる。そこで本研究では、戦術的補償の一つである視線行動に関する予備的に検討するため、緑内障に罹患したドライバと健常高齢ドライバとの自動車運転時の視線行動を比較した。

2. 実験方法

2.1 実験参加者

実験参加者は、日常的に車を運転しているドライバとし、緑内障に関する治療を行っていない健常高齢者8名と緑内障に罹患している患者5名が実験に参加した（Table 1）。健常高齢者の正常視野を確認するために、松本¹³⁾が開発したスクリーニング検査を実施した。健常高齢者8名のうち1名において、視野障害の疑いが確認されたため、分析から除外した。緑内障患者の視野障害度を調べるために、Humphrey 静的視野検査計（Carl Zeiss Meditec, Dublin, CA）の30-2プログラムを用い、左右片眼ずつ中心30°の範囲の光に対する感度を測定した。測定結果より算出されるMD（Mean deviation）は、視野全体の平均的な感度低下の程度を示したものであり、MDが負の値になるほど視野全体の障害が進行していることを表した。MDを用いた緑内障の症状の簡易評価として、Anderson分類がある。この分類では、MDが両眼ともに-6 dB以上を初期、MDが両眼ともに-12 dB以下を後期、どちらも満たさない場合を中期と判定される。この分類を用いて緑内障患者の症状を初期・中期・後期に簡易評価すると、本実験に参加した緑内障患者は全て中期緑内障であった。

Table 1 Information of experimental participants

	N	Age (year)	Driving record (year)	MD (dB)	
				Better	Worse
Healthy elderly person	8	68.9±4.2	48.8±5.7	—	—
Glaucoma patient	5	61.6±11.9	42.0±11.0	-4.65±3.12	-13.13±7.46

2.2 実験装置

走行環境の模擬および運転行動の計測には、JARI 所有の実験装置、全方位視野ドライビングシミュレータ (DS) を用いた。当該装置は、360° のスクリーンに 6 軸動揺装置機構と実車ボディを搭載していた (Fig.1)。ドライバへの視覚情報が全方位から提供されるため、実験環境への没入感が得られる装置であった。

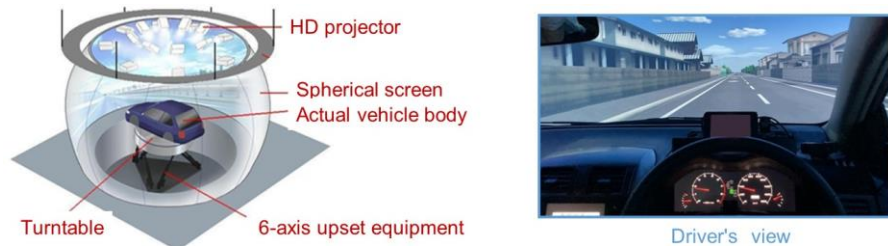


Fig.1 Configuration diagram of DS

ドライバの視線行動の計測には、アイマークレコーダ (Fig.2(a) : NAC 製 EMR-9) を用いた。当該装置により、ドライバ前方の外界映像 (画角 62°) に注視点を重ねた画像 (Fig.2(b)) を取得し、後述するドライバの注視割合の評価を行った。



(a) EMR mounting on the driver



(b) Image with overlapping gaze points










Fig.2 Gaze measurement

2.3 実験条件

実験条件は異なる 9 パターンの走行環境とし、1 名の参加者がすべての走行環境を体験する参加者内計画にて実験を実施した。実験条件となる走行環境の設定にあたっては、一般ドライバの交通事故実態を参考に、事故が発生し易い状況を対象とした。具体的には、交通死亡事故件数の中で、人対車両事故の割合が比較的高いことから¹⁴⁾、市街地を対象とした。人対車両の交通死亡事故については、これまでの研究から、四輪車直進時に多い¹⁵⁾ため、直線部を対象とした。また、ヒヤリハットは、駐車車両や対向車、建物、樹木等の影から歩行者の飛び出しが多く¹⁶⁾、都市部における歩行者の横断歩道外の道路横断の特徴は、横断防止柵の開口部で多い¹⁷⁾。これらの知見から、実験で再現する交通場面は、片側 1 車線の直線路とし、道路形状 (単路、交差点) および道路の附属施設 (横断歩道、信号機、ガードレール、植樹帯) の有無を組み合わせた 9 場面とした (Table 2)。9 場面を一人あたり 2 回走行し、実施順序は実験参加者ごとにランダムにした。

9 条件すべてにおいて、前方に先行車を配置し、参加者には 40 km/h で走行するように要請した。自車が 40 km/h で走行した場合の自車と先行車との車間時間は 6.0 秒であった。参加者間で走行速度が大きく異なると、分析区間内の走行時間が統制できないため、自車の速度が 40 km/h を超える場合には、エンジン出力を制限し、速度が高くないようにした。ただし、参加者には「普段通り事故を起こさないように安全運転をする」ように要請したため、自車の速度が 40 km/h に満たないケースについては、参加者が安全運転のために必要と判断したもののみなし、速度の調整 (強制的な速度増加) は行わなかった。

Table 2 Experimental conditions

No.	Experiment condition		Image of driving environment
	Road shape	Road facilities	
1	Non-intersection	—	
2		Pedestrian crossing	
3		Pedestrian crossing + Traffic signal	
4		Guard rail	
5		Tree-lined zone	
6	Crossroads	Pedestrian crossing	
7		Pedestrian crossing + Traffic signal	
8	T-junction (R) ※Connection with a road to the right	Pedestrian crossing	
9	T-junction (L) ※Connection with a road to the left	Pedestrian crossing	

2.4 実験手順

実験当日は、実験に関する説明およびインフォームドコンセント取得の後に、練習走行と本番走行を実施した。実験参加者1名あたりの練習走行時間は約10分、本番走行時間は9条件合わせて約35分であった。

運転課題として、片側1車線の市街地道路を、先行する車両に追従して直進するように教示した。ドライバーには現実に起こり得る交通場面での運転行動を調べるため、普段通り安全運転を行うように教示した。走行中に気分や体調の変化が見られた場合や実験参加者からの申し出があった場合には、その時点で実験を終了した。

2.5 評価方法

ドライバーの視線行動を調査するため、便宜的に設定した Fig.3 に示す4つのエリアおよびルームミラー、その他のエリアを対象に、注視点の累積停留時間を計測して注視割合を求めた。なお、瞬きや計測ノイズは分析から除外した。分析区間は、各実験条件の交差点や道路の附属施設に到達する111 m前(40 km/hで走行した場合、約10秒前)から、交差点や道路の附属施設に到達するまでの間とした。ただし、単路の道路の附属施設がない条件1と、連続的に道路の附属施設が設置されている条件4、5では、交差点や道路の附属施設をもとに分析区間を特定することができないため、条件1、4、5以外の条件の分析区間に相当する位置を街並みから抽出し、その区間のデータを分析に用いた。すなわち、実験要因である交差点の有無や道路の附属施設以外の走行環境(道路や街並みなど)は、すべての条件で同一の環境であった。

算出した注視割合から、参加者ごとに注視割合の最も高いエリアを抽出した。なお、注視割合の最も高いエリアとの差が10%以内のエリアがある場合には、それらのエリアも注視割合の高いエリアとして分析に用いた。

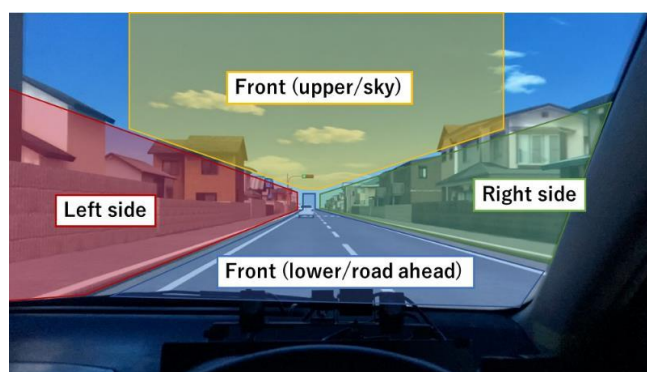


Fig.3 Area in front of the driver

3. 結果と考察

3.1 緑内障患者と健常高齢者の注視割合の分析結果

各実験条件における、エリアごとの注視割合の平均値と注視割合の高いエリアを緑内障患者および健常高齢者別に Table 3 にまとめた。

緑内障患者の注視割合の高いエリアについて、単路条件(Table 2 中の No.1)、単路-横断歩道条件(No.2)、単路-横断歩道+信号機条件(No.3)では、正面と左側の注視割合が高かった。一方、単路-ガードレール条件(No.4)と単路-植樹帯条件(No.5)では、正面の注視割合が高かった。また、十字路-横断歩道条件(No.6)と十字路-横断歩道+信号機条件(No.7)では、正面と左側の注視割合が高かった。丁字路(右)-横断歩道条件(No.8)では、正面の注視割合が高く、丁字路(左)-横断歩道条件(No.9)では、左側の注視割合が高かった。

健常高齢者においては、丁字路(左)-横断歩道条件(No.9)を除く全ての実験条件で正面の注視割合が高かった。丁字路(左)-横断歩道条件(No.9)では、左側と正面の注視割合が高かった。

Table 3 Average percentage of gazing per area and areas with the highest percentage of gazing

(a) Glaucoma patient (N=5)

Experiment conditions			Gaze ratio [%]						⇒Areas with a high gaze rate
No.	Road shape	Road facilities	Left side	Front side	Right side	Upside	Rearview mirror	Other	
1	Non-intersection	—	36.5 ± 26.4	42.8 ± 28.1	10.9 ± 8.1	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.3	9.7 ± 4.6	Left side, Front (lower/road ahead)
2		Pedestrian crossing	34.5 ± 10.6	39.7 ± 9.3	19.9 ± 4.5	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	5.9 ± 5.4	
3		Pedestrian crossing · Traffic signal	26.9 ± 15.8	32.9 ± 15.7	17.6 ± 10.5	12.7 ± 17.2	0.4 ± 1.0	9.4 ± 6.6	
4		Guard rail	26.9 ± 25.4	55.9 ± 29.8	7.9 ± 7.4	0.0 ± 0.0	2.2 ± 2.6	7.1 ± 1.8	Front (lower/road ahead)
5		Tree-lined zone	28.1 ± 21.3	44.0 ± 19.3	15.5 ± 9.1	0.0 ± 0.0	3.5 ± 4.2	8.9 ± 1.9	
6	Crossroads	Pedestrian crossing	37.7 ± 14.7	36.7 ± 15.9	21.0 ± 8.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	4.7 ± 4.7	Left side, Front (lower/road ahead)
7		Pedestrian crossing · Traffic signal	31.0 ± 19.1	30.7 ± 14.8	16.9 ± 8.3	17.7 ± 12.0	0.6 ± 1.4	3.1 ± 3.6	
8	T-junction (R) ※Connection with a road to the right	Pedestrian crossing	26.0 ± 15.2	41.3 ± 19.7	27.1 ± 8.3	0.0 ± 0.0	0.6 ± 1.2	5.1 ± 3.8	Front (lower/road ahead)
9	T-junction (L) ※Connection with a road to the right	Pedestrian crossing	46.7 ± 10.7	33.3 ± 13.7	14.9 ± 3.6	0.0 ± 0.0	0.8 ± 1.7	4.3 ± 2.2	Left side

(b) Healthy elderly person (N=7)

Experiment conditions			Gaze ratio [%]						⇒Areas with a high gaze rate
No.	Road shape	Road facilities	Left side	Front side	Right side	Upside	Rearview mirror	Other	
1	Non-intersection	—	12.4 ± 4.7	69.8 ± 10.2	10.5 ± 7.0	0.2 ± 0.5	0.4 ± 1.0	6.8 ± 5.4	Front (lower/road ahead)
2		Pedestrian crossing	28.8 ± 13.0	46.9 ± 16.8	22.1 ± 5.8	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	2.3 ± 2.3	
3		Pedestrian crossing · Traffic signal	17.0 ± 14.6	49.7 ± 19.2	13.5 ± 12.6	17.6 ± 13.5	0.0 ± 0.0	2.4 ± 3.7	
4		Guard rail	21.9 ± 16.1	56.3 ± 17.9	14.3 ± 8.9	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	7.5 ± 7.0	
5		Tree-lined zone	24.7 ± 15.1	56.9 ± 20.6	14.1 ± 7.5	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	4.3 ± 4.9	
6	Crossroads	Pedestrian crossing	33.3 ± 11.0	46.4 ± 14.0	17.6 ± 7.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	2.8 ± 1.9	Left side, Front (lower/road ahead)
7		Pedestrian crossing · Traffic signal	16.5 ± 7.1	47.2 ± 16.5	13.4 ± 8.7	21.4 ± 12.0	0.0 ± 0.0	1.7 ± 2.4	
8	T-junction (R) ※Connection with a road to the right	Pedestrian crossing	31.6 ± 12.8	41.7 ± 21.1	24.9 ± 10.2	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	1.9 ± 1.6	
9	T-junction (L) ※Connection with a road to the right	Pedestrian crossing	35.8 ± 12.9	42.3 ± 17.5	19.4 ± 7.1	0.0 ± 0.0	0.6 ± 1.6	2.0 ± 1.7	

以上の結果をまとめると、ガードレールや植樹帯によって歩道と車道が分離されている場合には、緑内障患者および健常高齢者ともに、正面への注視割合が高かった。一方、これらの道路付属施設がない場合には、緑内障患者は健常高齢者に比べて、正面に加えて左側の注視割合も高い特徴が見られた。このことから、緑内障患者と健常高齢者の運転時における視線行動の特徴には、違いがある可能性が示唆された。このような視線行動の特徴の違いが生じた理由の一つに、緑内障患者は補償行動として正面以外にも視線移動を行った可能性があると考えられる。特に左方向は飛び出しなどが発生した際に、右側に比して自車との物理的な距離が近く、衝突までの余裕時間が短いため、左方向への視線移動が多かった可能性があると考えられる。他方、左側の視野欠損を補うための視線行動であった可能性も考えられるため、視野障害部位と視線行動について、詳細な検証が必要であると考えられる。

以上のように、緑内障患者と健常高齢者の視線行動の特徴に違いが見られたものの、本研究の参加者の平均年齢は、緑内障患者の方が健常高齢者よりも約 7 歳高く、年齢の違いが視線行動に影響した可能性もあると考えられる。さらに、各参加者のリスク感受性、すなわちどの程度危険に対して敏感であるかについても統制ができていないため、緑内障患者のリスク感受性が高く、視線移動を活発に行った可能性も考えられる。したがって、本研究で見られた視線行動の特徴が、緑内障患者特有の視線行動であるかや、補償行動であるか否かについては、さらなる調査が必要であると考えられる。

4. 今後の課題

本研究では、緑内障患者と健常高齢者との視線行動の特徴の違いが見られる可能性が示された。しかしながら、年齢やリスク感受性の統制が取れておらず、データ数も少ないため、今後はさらなる知見の拡充に向けて実験データ数を増やすとともに年齢やリスク感受性の影響を統制した検討を行う必要があると考えられる。また、実験の走行場面は、先行車を除いて他の交通参加者が存在しない状況であったことから、他の交通場面（歩道上の歩行者や駐車車両など）での視線行動も調べる必要があると考えられる。さらに、積極的に視線を移動させることで、飛び出し歩行者の発見遅れを低減できる可能性がある¹⁸⁾ことから、緑内障患者の視線行動の特徴を調査するとともに、事故リスクについても更なる知見を深めることで、医師による具体的なアドバイスや、運転支援などの発展に寄与することが出来ると考えられる。

参考文献

- 1) 柳瀬徹夫: 自動車の人間工学技術, 朝倉書店, p.137-145 (1998)
- 2) Hartman E: Driver vision requirements, Society of Automotive Engineers, Technical Paper Series, 700392, p.629-630 (1970)
- 3) 日本緑内障学会: 日本緑内障学会多治見疫学調査報告書 (2012)
- 4) C. Owsley, et al.: Visual processing impairment and risk of motor vehicle crash among older adults, Journal of the American Medical Association, Vol.279, No.14, p.1083-1088 (1998)
- 5) 青木由紀ほか: 緑内障患者における自動車運転実態調査, あたらしい眼科, Vol.29, No.7, p.1013-1017 (2012)
- 6) 国松志保: 視野狭窄が運転へ与える影響, 自動車技術, Vol.70, No.3, p.25-29 (2016)
- 7) McGwin G, et al.: Is Glaucoma Associated with Motor Vehicle Collision Involvement and Driving Avoidance?, Investigative Ophthalmology & Visual Science, Vol.45, No.11, p.3934-3939 (2004)
- 8) 佐藤稔久ほか: 認知的・身体的機能の変化に適応した高齢ドライバーの対処行動の分析, 自動車技術会論文集, Vol.38, No.4, p.209-214 (2007)
- 9) Marottoli R A, Richardson E D: Confidence in, and self-rating of, driving ability among older drivers, Accident Analysis and Prevention, Vol.30, p.331-336 (1998)
- 10) Zur A, Shinar D: Older people's driving habits, visual abilities, and subjective assessment of daily visual functioning, Work, Vol.11, No.3, p.339-348 (1998)
- 11) Michon J A: Modellen van bestuurdersgedrag. In Van Knippenberg CWF, Rothengatter JA, Michon JA eds. Handbook Sociale Verkeerskunde. Assen/Maastricht: Van Gorcum, p.207-231 (1989)
- 12) David P C: Exploring Eye Movements in Patients with Glaucoma When Viewing a Driving Scene, PLOS ONE, Vol.5, No.3, p.1-9 (2010)
- 13) Chota Matsumoto, et al.: CLOCK CHART®: a novel multi-stimulus self-check visual field screener, Japanese Journal of Ophthalmology, Vol.59, p.187-193 (2015)
- 14) 警察庁: 令和3年中の交通死亡事故の発生状況及び道路交通法違反取締り状況等について (2022)
- 15) (公財) 交通事故総合分析センター: イタルダ・インフォメーション, No.94 (2012)
- 16) 国土交通省: 平成28年度第3回車両安全対策検討会, 安全-資料8 (2016)
- 17) 竹平誠治: 都市部における横断歩行者行動特性を考慮した街路交通機能の設計に関する研究, 東京大学工学系研究科社会基盤学専攻博士論文 (2014)
- 18) 佐藤健治ほか: 眼疾患(緑内障)による視野障害と視線行動に関する研究 自動車技術会学術講演会前刷集, No.129-17, p.491-496, (2017)

「ADAS 試験場新設工事」竣工に向けて

Construction of ADAS Test Field

櫻本 充広 *1

Mitsuhiro SAKURAMOTO

城里テストセンターでは 2014 年度に第 2 総合試験路を建設し、予防安全性能アセスメントの実施場所を提供してきた。今後、前方対象物に対する認識試験だけでなく、交差点での横断方向の車両を認識する試験項目が追加される見込みである。第 2 総合試験路では幅員が大きいため、前述の交差点試験の実施が困難である。また海外のテストセンターにおいては幅員を拡張する動きがある。国内において交差点試験の実施場所を提供していくために、2019 年度に走路幅の大きい試験路を新たに整備することとした。2022 年度 7 月より ADAS 試験場の名称にて運用を開始する。本稿ではこの ADAS 試験場の造成舗装工事において特に留意した点について土木工学の観点で述べる。

1. 基本計画

一般財団法人日本自動車研究所 (JARI) の城里テストセンター敷地内にある旧悪路試験場を新たに造成舗装することで交差点評価が可能な扇形形状の「ADAS (Advanced Driver-Assistance Systems) 試験場」を建設する。図 1 に中間層工施工中の ADAS 試験場の外観を示す。縦断方向 500 m, 横断方向 300 m の規模で、最高 80 km/h 対 60 km/h の速度域での交差点評価が可能となる。海外では同規模もしくはそれ以上の規模での同様な扇形の試験路は建設されつつあるが、国内では見られない。今後国内においても高い速度域での交差点評価試験に備え、2022 年度の ADAS 試験場完成を目指し、2019 年度に設計含め 3 か年の造成・舗装工事に着手した。

これまで城里テストセンターでの試験路拡張工事では、当センターにおいて構想図を作成し、これをもとに設計・施工一括での工事として施工業者に依頼するという発注方式が主であった。設計と施工を一括とすることで発注手続きが簡略化でき施工品質の責任が明確になるという利点があるためである。規模がより大きく、土木関連工事が主となる本工事においては、見込みによる過剰な施工見積によって工事価格が肥大化するのを防ぐために、設計を工事から分離し、設計・施工分離方式で推進することが決まった。この方針のもと設計業者が調査及び詳細設計を行い、その結果をもとに工事施工の公募・競争入札により施工業者を決定し工事発注することになった。設計業務を分離することは、発注側の手続きが増え、多くの時間を要するという点で難はあるが、工事施工公募前の十分な精査の実施により正確な工事規模を把握し、これを図面・数量化することで、より多くの入札参入を促すことができる。また、施工品質等十分に考慮された工事仕様書の作成が可能となるため、工事依頼する事業者選定が入札価格のみで判断できるという利点がある。結果として設計業務に多少時間は要したが、品質を担保しながらの工事費用抑制が可能となった。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 城里テストセンター

* 原稿受理 2022年5月10日 / 初掲載 2022年6月

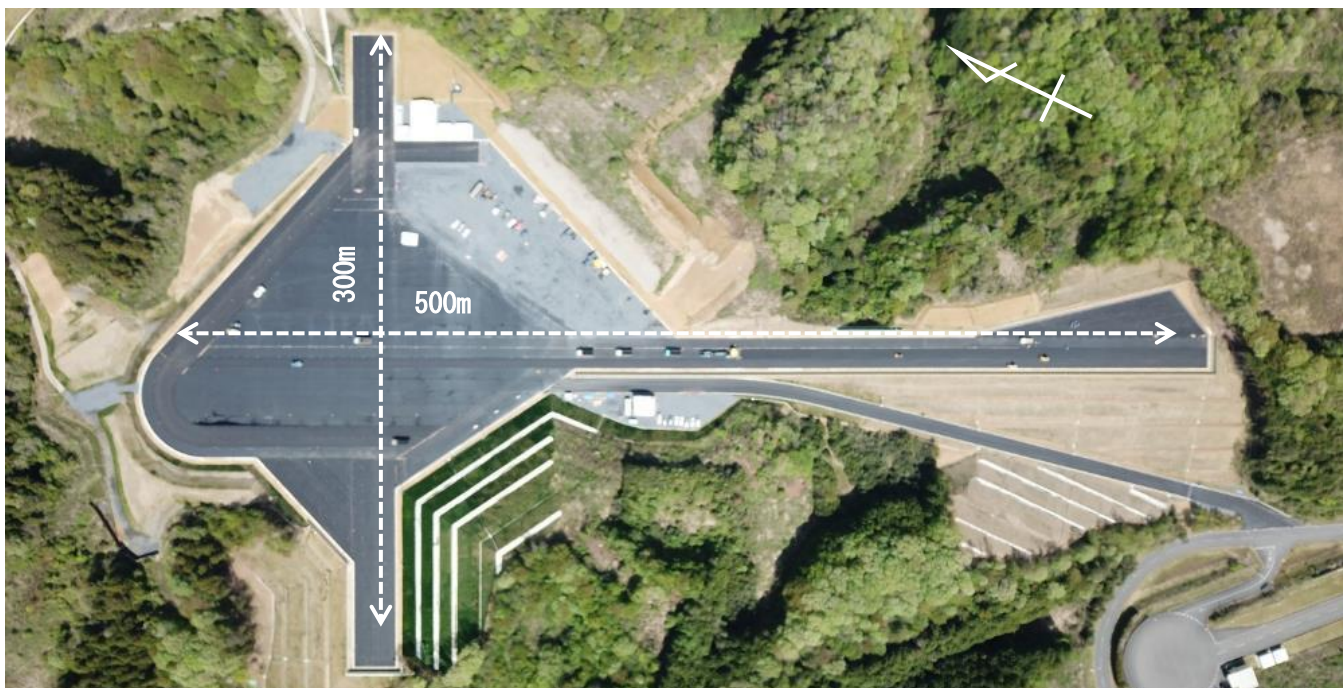


図1 ADAS試験場全景（2022年4月時点）（ドローン撮影動画は、当該ページ内「コンテンツ」にて御覧いただけます）

2. 調査・設計

城里テストセンター用地は少し掘削すれば岩盤に到達する、切土施工には不利な土地である。その反面、切土発生土は良質な礫（れき）混り土となるため、盛土利用に適している。設計ではこれらを考慮した、切り盛りが均衡する施工範囲、最適高さの設定による発生土の有効活用が重要となる。また、自動車用テストコースとしての設計では、テスト時の背景、周辺他走路との秘匿管理等にも配慮したレイアウトが求められた。基本設計においておおよそのレイアウトを設定し、それに合わせた現地測量を実施した。切り盛り土量の均衡がとれる最適レイアウトを見つけ出すために現況測量では UAV（ドローン）を活用し、人が立ち入るのが困難な箇所までの細かな測量を実施した。図2に UAV 測量状況、図3に測量結果の一例として地形測量 3D 測量データを示す。



図2 UAV測量状況

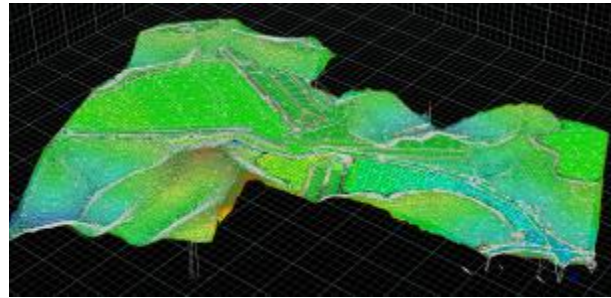


図3 地形測量3Dデータ

現地ではボーリング調査も実施した。この調査は地山の土質・岩種を判定するだけでなく、地下水位の確認や盛土が地山に与える沈下等の影響を判断するためのものであるため、岩盤到着後さらに3 m以上を掘削の基準として実施した。採取したボーリングコアは試料として各種土質試験を実施し、盛土材としての適性も評価した。ボーリング調査は未開発の山林での実施となるため、運搬用モノレールを設置し、資材を持ち込み作業実施、完了後は機材・試料の撤収という作業を繰り返した。図4に作業状況を示す。現地での地道な作業実施により詳細な地盤状況が把握でき、最適な工事仕様の設定が可能となった。



図4 ボーリング調査状況

以上のような地形測量、土質調査により対象エリアの施工条件を詳細に把握し詳細設計に着手した。詳細設計では最適な法面勾配を調査データに基づいて設定し、開発範囲を確定した。法面等施工範囲が調整池等既存の重要施設に及ぶ箇所については補強土壁工法を採用した。複数回のレイアウト見直しにより最適レイアウトが決定し図面化、施工数量等確定させ施工業者公募の準備が整った。図5にADAS試験場のレイアウトを示す。

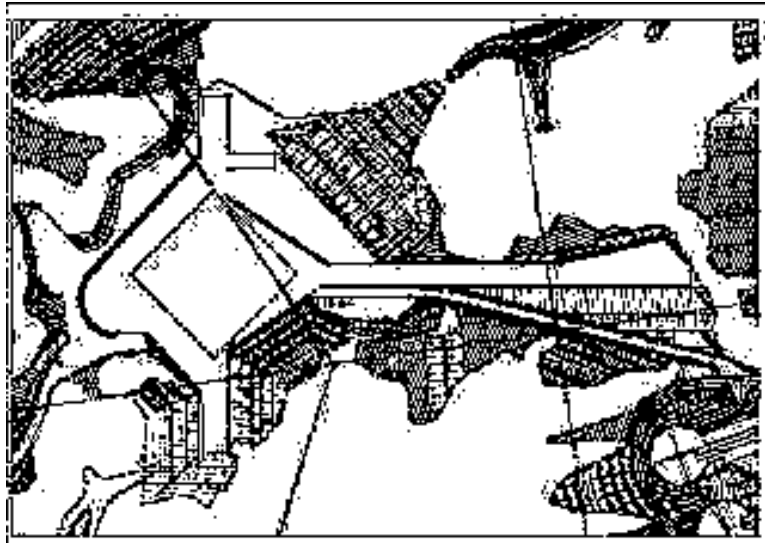


図5 ADAS試験場のレイアウト

3. 施工

設計により詳細な施工数量が確定し、これをもとに実施された競争入札によって施工依頼事業者が決定した。出来形および品質管理に採用する規格値は谷田部から城里へのテストコース移転事業で採用された規格を参考に設定した。この規格は一般的な土木工事で採用される規格に加えて、より高い平坦性要求など、テストコースならではの基準が加味されている。ADAS 試験場は予防安全性能アセスメントに利用されることを想定しているため、一般道の工事では採用されることのない滑り摩擦係数の規格も設けることとした。

4. 伐採工事

施工初期段階では起工測量を実施し設計図書との差異が無いことを確認した。これに続いて既存山林の伐採が実施された。伐採にあたっては安定した地山を不必要に乱すことを防止するため、切り出し部分を詳細に測量し、伐採しすぎることのないよう留意して施工した。発生した伐採材は図 6 で示す専用機械でチップ化し、数年の雑草繁茂抑制効果を期待し既存法面に敷き均した。



図6 伐採材粉碎状況

5. 土工事

伐採完了後はいよいよ本格的な土工事の開始である。図 7 に示すように施工にはアーティキュレートダンプと呼ばれる、通常の大形ダンプの 3 倍もの容量のダンプトラックが使用された。掘削には、こちらも通常の 3 倍程度ある 2.0 m³ クラスの油圧ショベルが使用された。採石場で活躍するような超大型重機である。これら土工事では ICT 建機が投入された。複雑な地形の土工事の場合、通常、“丁張”と呼ばれる施工目安を設置するが、ICT 建機の場合にはそれは必要なく高精度な施工が可能となる。



図7 掘削運搬状況

掘削による発生土で盛土工事を施工する場合、地山の土質によって有効な盛土量が大きく変化する。本工事では「盛土土量/地山土量」で表される締固め土量換算係数を施工初期段階でそれまでの実績値 0.89 とした。切盛土量合計 30 万 m³ にも及ぶ本工事において、この土量換算率の設定は非常に重要となる。切土の土質が想定外であった場合、土量換算係数は大きく異なり、結果として「残土」または「不足土」という事態が想定される。この状況を確認するために土工事の進捗にあわせて全域 3D レーザー測量を複数回実施し、実施土量の綿密な管理施工が進められた。想定外の土量変化があった場合には、設定した計画仕上がり高さ変更による調整を予定していた。この高さ変更が大きくなるとコースレイアウト、排水系統等に大きな影響を及ぼすことになる。結果としては当初計画より 0.1 m 低く仕上げることで、切り盛り土量の均衡が実現した。

当初より切土工事では掘削初期の段階での岩盤到達を予想していた。岩盤は性質上「目」と呼ばれる方向性があり、不利な方向での仕上がりとなる場合、安定地山の均衡が崩れ、崩壊につながってしまう恐れがある。これを防止するために切土施工前に複数の測定点を設け、動態観測を実施しながら施工が進められた。この観測は現在も継続して実施されている。

最も重要となるのが盛土の品質管理である。切盛エリアが混在する本工事でも最も懸念されたのは沈下量の不均等による不等沈下の発生であった。最大盛土高 15.7 m にもなる本工事でも沈下の原因として考えられるのは、基盤面への盛土载荷による沈下及び盛土の圧密進行である。沈下状況の確認は盛土完了箇所の変位観測で可能であるが、沈下の要因をより詳細により迅速に特定するためには、盛土基盤面への沈下板設置が不可欠である。沈下板の変位を観測し、盛土完了前から動態観測を実施し続けた。また、地山と盛土の一体化対策、湧水処理対策、切り盛り境すり付け対策等適切に実施し、施工中及び施工後の土砂災害の防止を図った。

盛土自体の施工品質確保のために、締固め密度も厳重に管理した。締固め密度管理には RI 密度計を使用し、総測定点 1785 点にも及ぶ密度管理の結果、路体盛土 90%、路床盛土 95% という規格を設ける中で、それぞれ 104.8%、108.0% という締固め率を実現した。施工前に十分な試験盛土施工を実施し、現場における最適な転圧方法、転圧回数の設定をしたうえで実施工（図 8）に臨んだことが大きいと思われる。これら厳重な管理のもと施工された結果、盛土の沈下は最小限に抑えられ、推定残留沈下率は図 9 に示すとおり盛土完了後約 300 日時点で 0.02% となり、規格値 0.2% 以下を十分に満足する結果となっている。



図8 盛土敷き均し転圧状況

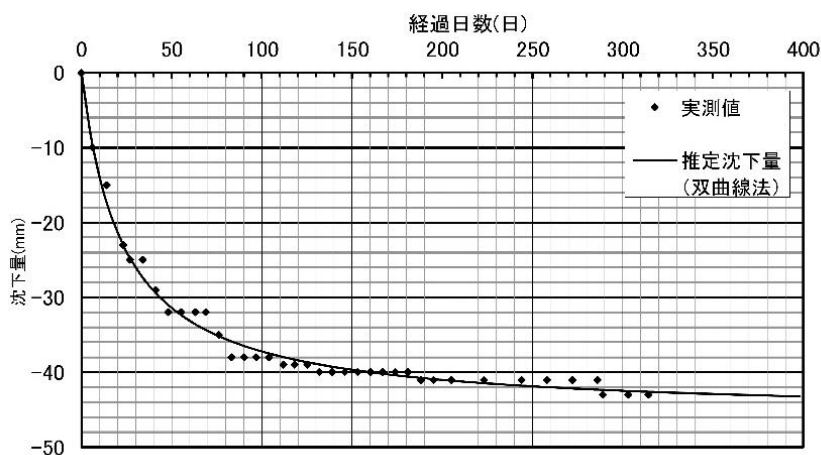


図9 盛土完了面の沈下推計

6. 舗装工事

ADAS 試験場では一般道と異なり仕上がり路面の滑り摩擦係数を規定した。この規定を満足するためにモデルとなる路面の調査及び材料の試験施工を繰り返し実施された。この結果 3 つの配合に絞られ、この材料を用いての試験施工が実施工方法に準じて実施した。試験施工路面は 1 か月ほどの養生期間を経て、JARI 路上タイヤ試験車による摩擦係数測定が実施され、最も良い結果の得られた配合が選定された。

土工事が完了後、砕石層、アスファルト層からなる舗装工事が始まった。本試験場は進行方向の平坦性 0.7 mm 以内という厳しい基準を以て規定されている。この実現に向けて様々な施工法が取り入れられた。

砕石層からなる 2 層の路盤工（下層路盤工，上層路盤工）では、図 10 に示す MG ナビと呼ばれる GNSS（Global Navigation Satellite System）・トータルステーションで制御された特殊な敷き均し機械を使用することで、オペレータの技能差による施工ムラを無くし高品質な路盤を施工する工法が採用された。



図10 砕石路盤整正状況

土工事と同様に路盤工でも締固め密度の管理は重要である。施工範囲が広大であるため通常一般道で行われる注砂法や突砂法の現場密度試験では試験孔の数が非常に多くなり、この試験が路盤を破壊するという矛盾が生じる。そのため本工事では最新鋭の電磁波による非破壊密度測定器 SDG-200 が採用された。

路盤の上に施工される 3 層のアスファルト層のうち基層施工では AF ナビと呼ばれる大型のアスファルト舗設機械が使用された。この AF ナビも路盤で使用された MG ナビと同様に GNSS・トータルステーションで緻密に制御されている。中間層・表層の施工ではこの AF ナビにビックスキーという舗装高さを平均化する特殊なセンサーを取り付け、舗設前の基盤・アスファルト合材排出部・舗設完了部の状況を複合的にモニタリングすることで舗設作業を面的に管理・均一化し平坦性がより向上する仕組みを構築している。アスファルト層の施工で平坦性確保の障害となるのは、供給されるアスファルト合材の温度・供給速度にばらつきがあることにより舗設機械にかかる負荷が安定しないことによるものが大きい。これを解消するために本施工では図 11 に示すベルトローダーと呼ばれる舗設機械にアスファルト合材を継続的・安定的に供給することを目的とした専用機械が導入された。また図 12 に示す 3 軸ローラと呼ばれる路面の平坦性確保に特化した専用転圧機械を使用し、施工が進められた。



図11 アスファルト舗設状況



図12 3軸ローラ転圧状況

アスファルト層の施工においても締固め密度の管理は重要となり、これを怠ると試験時の同箇所連続走行によるわだちの発生が懸念される。これにも路盤工の密度管理で採用した SDG-200 と同様にアスファルトの密度管理に特化した非破壊密度測定器 PQI-301 が採用された。

表層工完了時の平坦性出来形規格値 0.7 mm 以内という高規格実現のために、現場では 0.4 mm 以内という施工目標値を定め施工が進められている。平坦性施工管理は表層だけでなく基層・中間層においても実施されている。4/28 現在の測定結果は、基層完了時 0.82 mm、中間層完了時 0.49 mm の値が出ている。この値は基層・中間層で使用された材料特性を考慮すると非常に優れた結果である。平坦性は層を重ねるごとに低下していくため、0.4 mm 以内という高い目標達成が現実味を帯びてきた。

7. 最後に

現場は竣工に向けて順調に施工が進められており、本執筆時点で表層工と周辺碎石舗装の仕上げを残すのみとなっている。この先に実施する表層工では、滑り摩擦係数の規格実現という大きな課題も残っているが、これについても十分な検討のもと実施されており、実現は可能と思われる。本工事が完成し 7/1 より ADAS 試験場として共用が開始されることにより、これまで城里テストセンターで不可能であったより高い速度域での交差点評価試験が実施可能となる。ぜひ多くの方々にご活用いただきたい。今後、この ADAS 試験場が新たなフェーズでの予防安全性能評価に寄与することを期待している。

私自身、一般的な土木工事についての知識経験は持ち合わせている自負があったが、テストコースとなると仕様・留意すべき点など、全く別物であった。多くの難問解決を経て無事竣工の目処がついてきたことに安堵している。多大なるご協力ご助言いただいた方々に心より感謝を伝えたい。

国内大気質の最近の動向

Air Quality Trends in Japan

伊藤 晃佳*¹

Akiyoshi ITO

1. はじめに

大気質（Air Quality）の悪化は、人間の健康、気候変動、生態系に影響を与える主要な環境リスク要因の一つであるため、大気汚染物質の濃度をある一定レベル以下に低減することが求められる。日本では、1950年代以降、さまざまな固定発生源や移動排出源からの大気汚染物質の排出を抑制する対策がとられてきた。若松ら(2013)¹⁾は、国内の大気汚染動向と大気汚染防止対策との関係について考察し、様々な発生源対策の効果により、大気汚染物質の濃度は着実に減少していることを明らかにした。一方で、主に大気中の光化学反応により生成される大気汚染物質である粒子状物質（PM_{2.5}など）や光化学オキシダント（オゾンなど）については、大気環境基準を十分満たしているとはいえず、さらなる対策が求められている。

本稿では、国内の大気質と関連して、大気汚染常時監視局の設置状況や大気環境基準および大気環境基準達成率の推移についてまとめて示し、最新の大気汚染状況について紹介する。なお、本稿で対象としている主な大気汚染物質については、Table 1 を参照のこと。

Table 1 主な大気汚染物質について

名称	略称	発生源や特徴など
微小粒子状物質	PM _{2.5}	粒径（空気力学径）が2.5μm以下の粒子。大きさだけの規定なので、様々な粒子が含まれる。循環器系疾患、呼吸器系疾患との関連がある。
浮遊粒子状物質	SPM	大気中に浮遊する粒子状物質のうち、粒径10μm以下のもの。呼吸器系疾患、温暖化/寒冷化との関連。
光化学オキシダント	光化学Ox	光化学Oxの主成分はオゾン。光化学Oxのほとんどが大気中での反応で生成される（≒直接の発生源は無い）。目や鼻に対する刺激、呼吸器影響。植物の収量減少。強力な温室効果気体。
窒素酸化物	NOx	エンジンなどから一酸化窒素（NO）として排出される。NO ₂ は、NOとオゾンの反応や酸化触媒内でのNO酸化で発生する。NO ₂ は呼吸器疾患（喘息）と関連。また、光化学スモッグやPM _{2.5} 中の硝酸塩の原因物質。
二酸化窒素	NO ₂	
一酸化炭素	CO	燃料の不完全燃焼で発生。高濃度で一酸化炭素中毒症状。OHラジカルの消失に寄与。
非メタン炭化水素	NMHC	塗料、燃料、印刷などから発生。様々な種類の化合物からなり、有害性・悪臭・シックハウス症候群などに関連。また、光化学スモッグやPM _{2.5} 中の有機炭素の原因物質。
二酸化硫黄	SO ₂	火山などの自然発生や硫黄を含む燃料の燃焼により発生。水に溶けやすいため、目・皮膚・粘膜刺激がある。PM _{2.5} 中の硫酸塩の原因物質。

*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 2022年8月10日 / 初掲載 2022年9月

2. 調査結果

2.1 大気汚染常時監視局について

国内では、大気汚染防止法²⁾により、都道府県および政令指定都市に対し、大気汚染状況の常時監視が義務付けられており、2021年3月時点で、全国でおよそ1,800ヶ所の大気汚染常時監視局（以下、常監局とする）において、大気汚染物質濃度の連続測定が行われている。常監局のうち、一般大気環境測定局（以下、一般局とし、英語表記では、AAQMS（Ambient Air Quality Monitoring Station）とする）は、特定の発生源の影響を受けない住宅地等の一般的な生活空間における大気の汚染の状況を把握するために設置されている局であり、自動車排出ガス測定局（以下、自排局とし、英語表記では、RsAQMS（Roadside Air Quality Monitoring Station）とする）は、自動車排出ガスの影響を見るために、道路沿道に設置されている局である。Fig. 1は、国内の一般局および自排局の設置場所の分布を示しており、Table 2は、2020年度における各大気汚染物質ごとの有効測定局数を示している。これらに示す通り、日本においては、常監局がきめ細かく配置されていることが分かる。

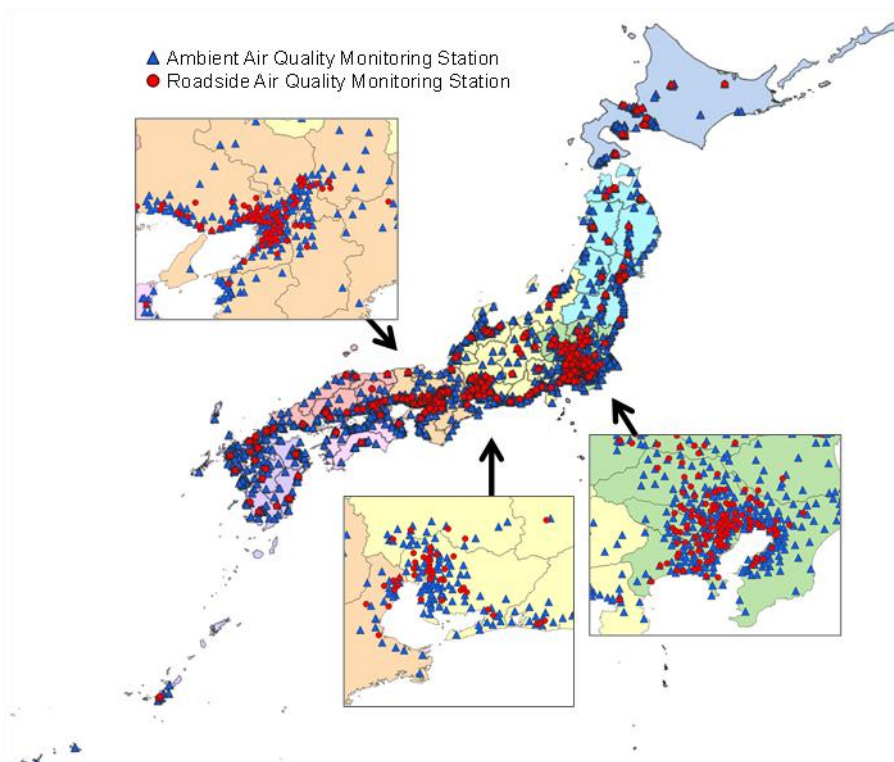


Fig. 2 Distribution of ambient air quality monitoring stations (AAQMS) and roadside air quality monitoring stations (RsAQMS) in Japan

Table 2 Air pollutants and the number of stations as of 2020

Species	測定局数	
	一般局	自排局
PM _{2.5}	1,081	237
SPM	1,639	367
光化学Ox	1,186	31
NO _x , NO ₂	1,582	374
NMHC	482	140
SO ₂	958	45
CO	275	220

2.2 国内の大気環境基準について

Table 3 は、主要な大気汚染物質についての日本の大気環境基準の一覧を示している。大気環境基準は、物質により、年間値、日平均値、時間値と異なる平均化時間で設定されているが、環境基準の達成・非達成の判定は、主として、日平均濃度の年間 98%値に相当する濃度と、Table 3 の日平均の基準値と比較して行われる。例外として、PM_{2.5}については、日平均濃度の年間 98%値のほか、年平均濃度を用いた判定も行われており、光化学オキシダント (Ox) については、1 時間濃度を用いた判定が行われている。大気環境基準の告示日は、PM_{2.5}が比較的新しく、2009 年となっているが、それ以外の物質の告示日は、NO₂が 1978 年であり、その他の物質は 1973 年となっている。この告示日以降、これまでに大気環境基準の改定は行われていない。ただし、最近では、大気環境基準の改定に向けた動向も見受けられる（例えば、環境省の光化学オキシダント対策ワーキングプラン³⁾などが挙げられる）。

Table 3 Limit values and notification dates of air quality standards in Japan

Species	単位	大気環境基準			告示日
		年平均	日平均	時間平均	
PM _{2.5}	μg/m ³	15	35		2009年9月9日
SPM	mg/m ³		0.10	0.20	1973年5月8日
光化学Ox	ppm			0.06	1973年5月8日
NO ₂	ppm		0.06		1978年7月11日
SO ₂	ppm		0.04	0.1	1973年5月16日
CO	ppm		10	20	1973年5月8日

Fig.2 は、日本の一般局および自排局における大気環境基準達成率の 1975 年度から 2020 年度の推移を示している。ここで、大気環境基準達成率とは、測定を行っている常監局数に対する大気環境基準を達成している局数の割合のことであり、例えば、すべての常監局で大気環境基準を達成している場合、大気環境基準達成率は 100%となる。大気環境基準達成率は、全般的に、右肩上がりの傾向がみられることから、経年的に大気汚染状況が着実に改善していることが分かり、かつ、最近では、ほとんどの物質で、大気環境基準達成率がおよそ 100%に到達していることが分かる。一方で、光化学 Ox については、環境基準達成率が極めて低い数値で推移しており、大きな課題となっている。

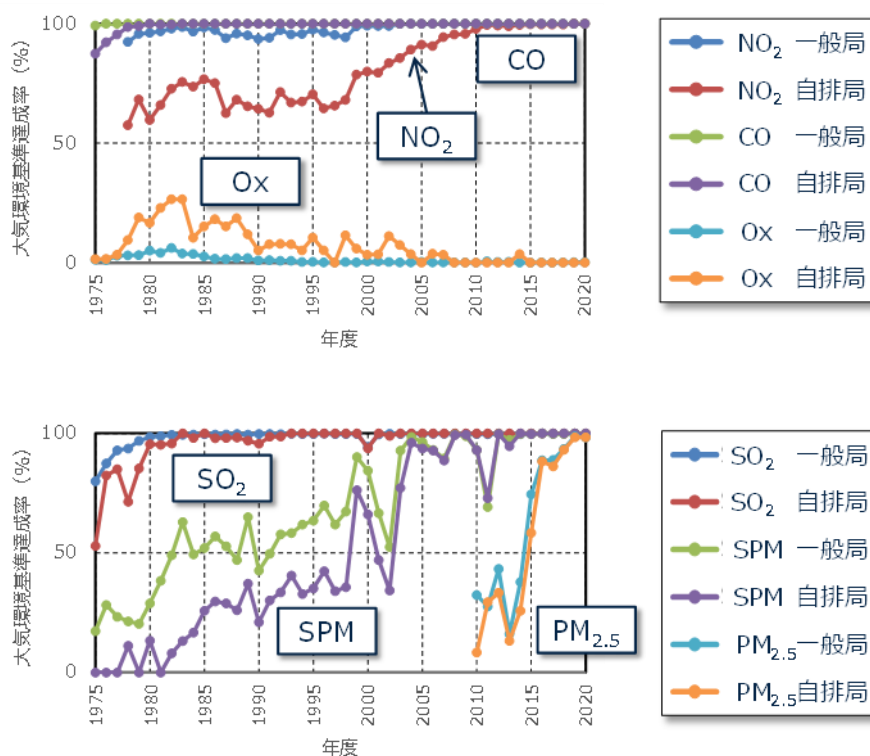


Fig.2 The compliance ratio of the Japanese air quality standards from 1975 to 2020

2.3 海外の大気環境基準について

2021年9月に、世界保健機関（WHO）は、大気質ガイドライン（AQG : Air Quality Guideline）を、前回（2005年）以来、16年ぶりに改定した⁴⁾。WHOのAQGは、規制値に相当するものではないが、膨大な科学的知見に基いた推奨値が設定されているなどの理由で、各国の規制当局者が参考とする値という位置づけとなっている。今回（2021年）の改定では、前回（2005年）のガイドライン値と比べて、PM_{2.5}の推奨値は、年平均濃度が、10 µg/m³から5 µg/m³に引き下げられ、日平均値も25 µg/m³から15 µg/m³に引き下げられた。また、NO₂の推奨値も従来の40 µg/m³から10 µg/m³に大幅に引き下げられた。このWHOのAQGを含め、Table 4は、主な大気汚染物質の大気環境基準について、日本、米国、欧州の大気環境基準とWHOの推奨値を比較している。なお、海外の大気環境基準では、光化学Oxの主要成分であるオゾンが扱われており、以降では、光化学Oxとオゾンは同等とみなしている。

Table 4 Comparison of air quality standards among Japan, the United States and Europe, and WHO guideline

Species		Japan		US		Europe		WHO (2021)	
PM _{2.5}	annual	15 µg/m ³	mean	12 µg/m ³	mean	25 µg/m ³	mean	5 µg/m ³	mean
	daily	35 µg/m ³	98%	35 µg/m ³	98%	--	--	15 µg/m ³	99%
PM ₁₀ , SPM	annual	--	--	--	--	40 µg/m ³	mean	15 µg/m ³	mean
	daily	100 µg/m ³	98%	150 µg/m ³	99.7%	50 µg/m ³	90%	45 µg/m ³	99%
O ₃	hourly	0.06 ppm	n.a.	--	--	--	--	--	--
	8-hour	--	--	0.07 ppm	99%	0.06 ppm (120 µg/m ³)	93%	0.05 ppm (100 µg/m ³)	99%
NO ₂	annual	--	--	0.053 ppm	mean	0.021 ppm (40 µg/m ³)	mean	0.005 ppm (10 µg/m ³)	mean
	daily	0.06 ppm	98%	--	--	--	--	0.013 ppm (25 µg/m ³)	99%

この表から、PM_{2.5}の年平均値については、いずれの値も、年平均濃度で定義が共通となっているため、横並びで数値を比較することができる。しかし、光化学Oxの大気環境基準値は、日本では1時間値で定義されているが、他の地域では8時間値で定義されており、NO₂も、日本では日平均の年間98%値で定義されているが、他の地域では年平均値で定義されているなど、各国により平均化時間が異なるので、単純に数値を比較することができない。そこで、光化学OxとNO₂の大気環境基準について、日本と他の地域の基準を直接比較できるように、過去の日本国内の大気汚染物質濃度データベースを使って、日本と他の地域の大気環境基準値をそれぞれ算出し、数値の換算ができるよう関係を調査した。Fig. 3の左図は、1990年度から2017年度までの日本の一般局と自排局における大気汚染物質濃度データから、局ごとの光化学Oxの1時間濃度の年最大値（横軸、日本の環境基準に相当）と8時間濃度の日最大値の年間99%値（縦軸、他の地域の環境基準に相当。以下、A4MDA8と称す）をプロットしたものである（n=26,882）。また、Fig. 3の右図は、NO₂の日平均濃度の年間98%値（横軸、日本の環境基準に相当）とNO₂の年平均値（縦軸、他の地域の環境基準に相当）との関係を示している（n=51,398）。なお、図中の赤い四角は、横軸が55 ppbから65 ppbの範囲を示しており、これはオゾンとNO₂の日本の大気質基準にほぼ相当する範囲である。

これらの結果から、光化学 Ox の日本の環境基準値である「1 時間値で 60 ppb」は、A4MDA8 に換算すると、 50 ± 5 ppb 程度に相当することが分かる。このことから、光化学 Ox の日本の環境基準値は、WHO の AQG と同等の値となっていることが分かった。また、NO₂ の日本の環境基準値である「年平均濃度で 60 ppb」は、年平均濃度に換算すると 34 ± 4 ppb 程度に相当することが分かった。このことから、欧州の NO₂ 大気環境基準値や WHO の AQG は、日本の NO₂ 大気環境基準よりも厳しいということが言える。

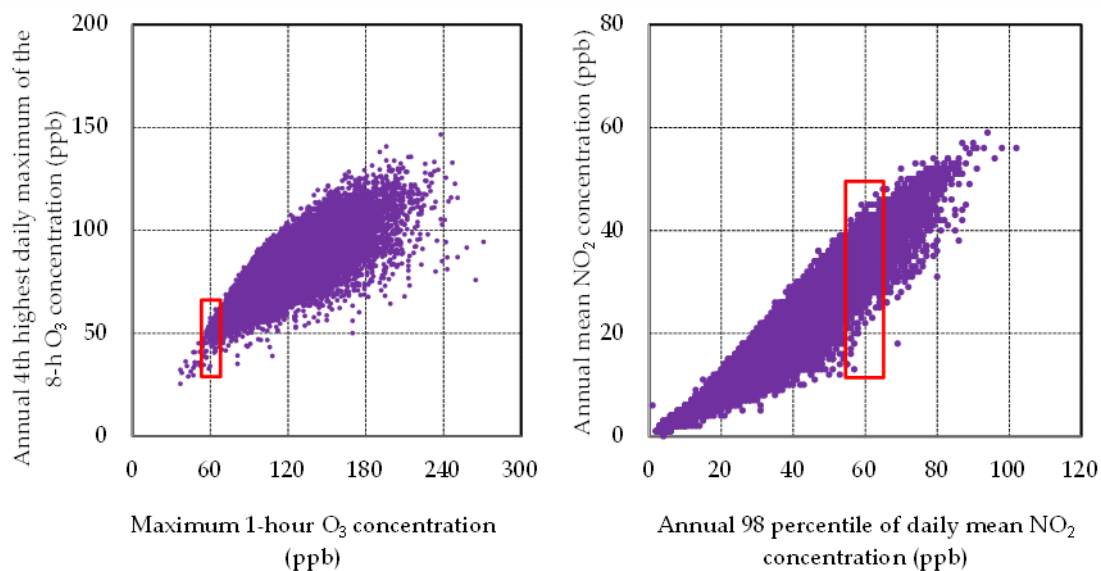


Fig. 3 Conversion of air quality standards for O₃ (left figure) and NO₂ (right figure) (horizontal axis: air quality standards of Japan, vertical axis: air quality standards of Europe and U. S. and WHO air quality guidelines)

2.4 大気観測データについて

2.4.1 全般的な大気汚染濃度の傾向

Fig. 4 は、1990 年度から 2018 年度までの全国の一般局（黒線）と自排局（橙色線）における大気汚染物質の年平均濃度の経年変化を示している。なお、PM_{2.5}については、全国的な測定が開始された 2010 年度からの濃度の経年変化を示しており、光化学 Ox については、昼間（ここでは 5 時～20 時と定義）に測定したデータから年平均濃度を算出している。これらの結果から、光化学 Ox 以外の大気汚染濃度は年々減少しており、また、一般局濃度と自排局濃度の濃度差が、経年的に縮まっていることから、この間、自動車排出ガス対策による自動車排出量の低減が着実に進んだということがわかる。

次節以降では、PM_{2.5}成分濃度、光化学 Ox、および、最近の大気汚染トピックについて示す。

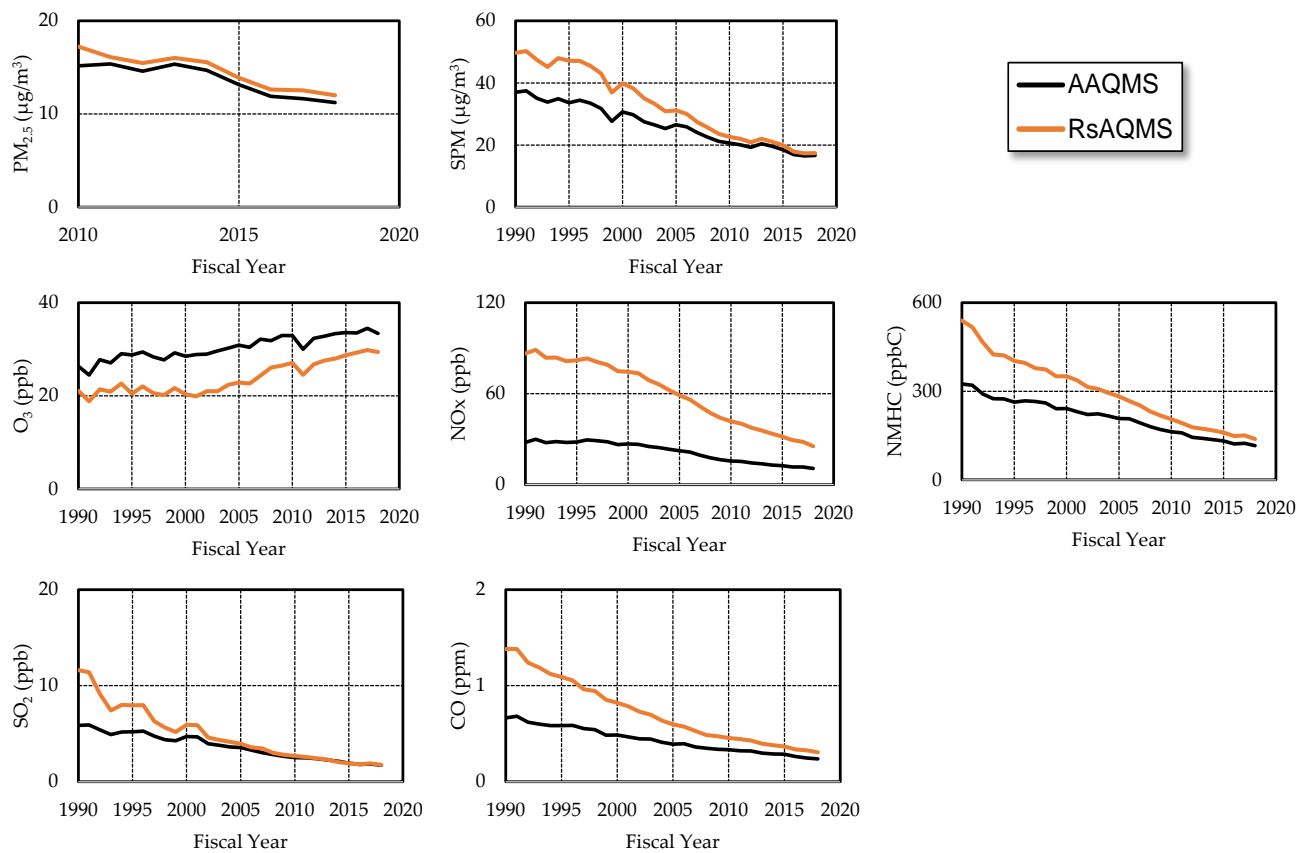


Fig. 4 Annual average concentrations of air pollutants at AAQMS and RsAQMS in Japan from 1990 to 2018 (Top: PM_{2.5} and SPM, Middle: O₃, NO_x and NMHC, Bottom: SO₂ and CO).

2.4.2 PM_{2.5}成分濃度

PM_{2.5}は、単一の物質ではなく、粒径が2.5 μm以下で空気中を漂う物質を総じてPM_{2.5}と称しており、そのため、性質の異なる様々な成分から構成されている。典型的な都市大気において、PM_{2.5}を構成する主要成分としては、炭素成分として、元素状炭素 (Elemental Carbon, EC)、有機炭素 (Organic Carbon, OC)があり、無機イオン成分として、硫酸イオン(SO₄²⁻)、硝酸イオン(NO₃⁻)、アンモニウムイオン(NH₄⁺)などが挙げられる。Fig. 5は、2012年度から2018年度の、国内の遠隔地、一般局、自排局におけるPM_{2.5}の主要成分の平均濃度の推移を表している。これらの結果から、年度ごとのばらつきはあるものの、全体的に濃度は低減傾向にあり、成分ごとにみると、ECの低減率が最も大きく、2012年度と2018年度を比較すると、一般局で43%減、自排局で50%減となっている。ECは、自動車や固定発生源など、主に燃料の燃焼に伴い発生するPM_{2.5}成分であることから、ECの低減が進んでいることは、これらの発生源からの排出量が低減していることを表している。また、硫酸イオンや硝酸イオン、アンモニウムイオンも、およそ30~40%の低減となっており、このことは、これらのPM_{2.5}成分の前駆物質の排出量が低減していることを表している。一方で、OCについては、低減率が数%程度にとどまっている。

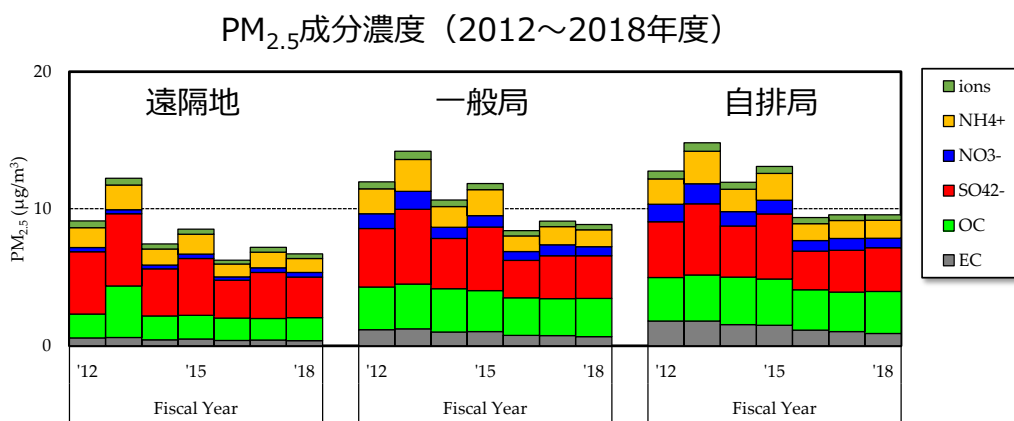


Fig. 5 Annual average concentration of main components in PM_{2.5} (rural, AAQMS, RsAQMS) for 2012-2018

2.4.3 光化学Oxの平均化時間

光化学Oxについては、様々な平均化時間の取り方があり、平均化時間の取り方により、経年傾向が異なっている。

Fig.6は、光化学Oxについての主な平均化時間について、説明のためにごく一部の期間を取り出した光化学Oxの時系列を元に5つの平均化時間の例を示しており、それぞれ、年最大濃度、A4MDA8、日最大濃度の年平均濃度、昼間濃度の年平均濃度、年平均濃度を表している。年最大濃度は、1年間の中で最も高かった1時間濃度を表す。A4MDA8は、8時間平均濃度の日最大値の年間99%値を表す。日最大濃度の年平均濃度は、1年間の日最大濃度（通常、n=365）の平均値である。昼間濃度の年平均は、国内では年平均濃度として行政などで活用されている値であり、昼間（5時～20時と定義）の濃度を年間にわたって平均した濃度であり、年平均濃度は、時間帯にかかわらず、年間にわたって平均した濃度を表す。このように、光化学Oxについては、様々な平均化時間があることが分かる。

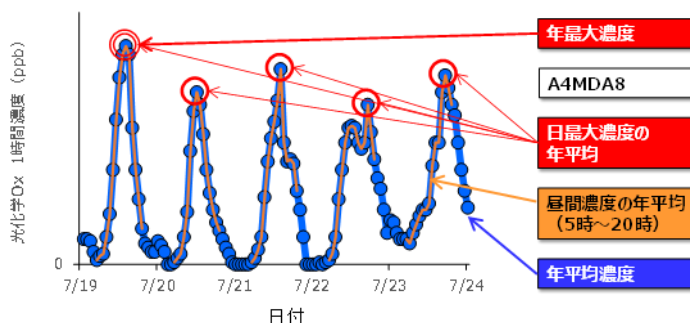


Fig. 6 An example of the definition of averaging time of oxidant concentrations

Fig. 7は、2009年度から2021年度の1都3県（東京、埼玉、千葉、神奈川）の一般局の中で、この期間中継続して観測が行われた局を対象に算出した光化学Oxの濃度であり、左から、年平均濃度、昼間濃度の年平均濃度、日最大濃度の年平均濃度、A4MDA8、年最大濃度の推移を示している。これらの結果から、年平均濃度や昼間濃度の年平均濃度については、経年的な増加傾向（2010年度に対する2020年度の濃度比が、1.11と1.08）が見られる一方で、A4MDA8や年最大濃度については、経年的な減少傾向が見られる（2010年度に対する2020年度の濃度比が、0.92と0.94）。なお、日最大濃度の年平均濃度については、経年的にはほぼ一定の濃度で推移していることが分かる。

このことから、光化学Ox濃度については、平均的な濃度は上昇しているものの、最大濃度にあたるようなピークの濃度は低減しているという傾向があることが分かった。

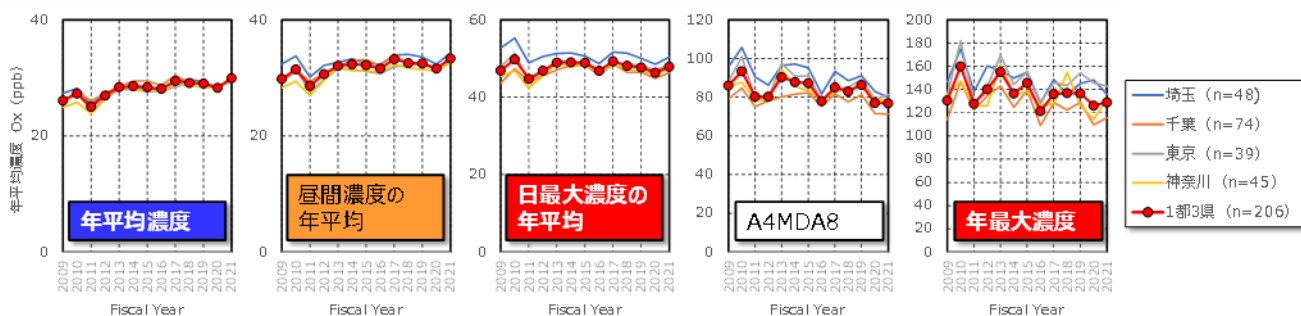


Fig. 7 Ozone concentrations at different averaging times at AAQMS in Tokyo, Saitama, Chiba, and Kanagawa from 2009 to 2021

2.4.4 最近の大気汚染に関するトピック

2019年12月に、中国武漢市で発生が報告された新型コロナウイルス感染症（COVID-19）は、その後、世界的に感染が拡大した。この間、各国では様々な感染拡大防止対策がとられ、一部の国では都市封鎖（ロックダウン）と言った厳しい外出制限を含む対策が取られた。日本国内においても、2020年4月から5月にかけて最初の緊急事態宣言が発出され、外出自粛の要請などの対策が取られた。これらの対策は、人の移動や経済活動を抑制するものであったため、感染拡大防止対策が、大気汚染物質の排出量低減につながり環境改善が進んだ⁵⁾。

Fig. 8は、2017年から2021年の1月から12月の東京23区内の一般局と自排局における、NOx、光化学Ox、PM_{2.5}、SO₂の月平均濃度の推移を、年度ごとに示している。NOx濃度は、2020年4月と5月に、前年に比べ濃度が大きく下がっており、特に、自排局の方が大きく低下している傾向が見える。ただし、それ以前から、NOx濃度は年々低下している傾向があるため、必ずしも感染拡大防止対策だけで、濃度が低減したわけではないといえる。光化学Ox濃度については、年ごとの濃度に大きな変化は見られないが、2020年4月～5月については、前年などと比較すると、濃度が低下しているように見える。諸外国では、ロックダウンなどの行動制限に伴い、オゾン濃度が増加したという報告⁶⁾が多くみられるが、東京でのデータを見る限り、諸外国とは異なる傾向となっていることが分かった。PM_{2.5}濃度についても、NOx濃度と同様に経年的に濃度が下がっているが、一般局も自排局も似たような濃度低減の傾向が見られる。このことから、自動車だけでなく他の発生源も含め、活動低下による排出低下により、PM_{2.5}濃度が低下していると推測される。SO₂は、緊急事態宣言より前の2020年1月から濃度の低下が見られ、2019年以前と2020年以降で明確に傾向が分かれている。この濃度低減は、例えば、船舶の運航数が減ったという理由もあり得るが、最も大きい要因は、2020年1月に導入された船舶燃料規制の強化による船舶燃料中の硫黄濃度低下による効果と考えられる。

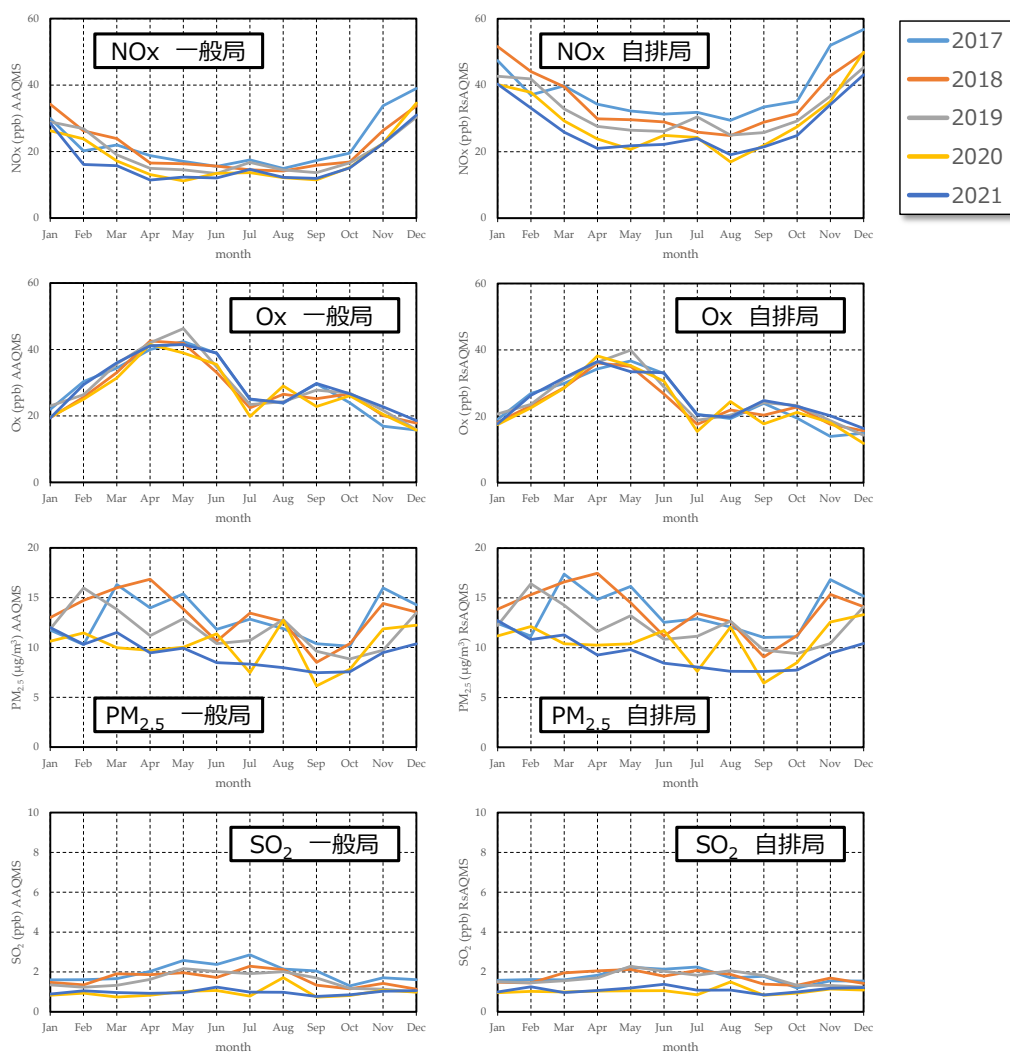


Fig.8 Average concentrations of NOx, Ox, PM_{2.5}, and SO₂ at AAQMS and RsAQMS in the 23 wards of Tokyo from January to December 2017-2021

3. まとめ

本稿では、国内の大気質と関連して、大気汚染常時監視局の設置状況や大気環境基準および大気環境基準達成率の推移についてまとめて示し、最新の大気汚染状況について紹介した。

- (1) 大気汚染の常時監視については、現在、全国約 1,800 ヶ所に常監局がきめ細かく配置されており、これらの常監局で、大気汚染物質濃度の連続測定が行われている。
- (2) 常監局における大気環境基準達成率は、おおむね 100%程度となっているが、光化学 O_x については、環境基準達成局がほとんどなく、大きな課題である。また、大気環境基準については、告示されて以降、改定が行われていないが、最近では、大気環境基準の改定に向けた動向も見受けられる。
- (3) 国内の大気汚染物質濃度の推移について、光化学 O_x 以外の大気汚染濃度は年々減少しており、また、一般局濃度と自排局濃度の濃度差が経年的に小さくなっているため、この間、自動車排出ガス対策による自動車排出量の低減が着実に進んだということがわかる。
- (4) $PM_{2.5}$ 成分濃度は低減傾向にあり、成分別では、EC の低減率が最も大きく、次いで、無機イオン成分（硫酸イオン、硝酸イオン、アンモニウムイオン）の低減率が大きい。一方で、OC については、低減率がせいぜい数%程度となっている。
- (5) 光化学 O_x 濃度については、平均化時間の取り方により、経年的な濃度傾向が異なり、平均的な濃度は上昇しているものの、最大濃度にあたるようなピークの濃度は低減しているという傾向がある。
- (6) 最近の大気汚染のトピックとして、COVID-19 感染拡大防止にともなう大気質への影響について、考察した。

参考文献

- 1) Wakamatsu, S.; Morikawa, T.; Ito, A., Air Pollution Trends in Japan between 1970 and 2012 and Impact of Urban Air Pollution Countermeasures. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2013, Vol. 7, 4, .177-190 (2013)
<https://doi.org/10.5572/ajae.2013.7.4.177> (参照 2022.8.10)
- 2) e-Gov法令検索, https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=343AC0000000097_20220401_502AC0000000039
(参照 2022.8.10)
- 3) 環境省：気候変動対策・大気環境改善のための光化学オキシダント総合対策について（光化学オキシダント対策ワーキングプラン（水・大気環境局））, <https://www.env.go.jp/content/900403667.pdf> (参照 2022.8.10)
- 4) World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.
<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (参照 2022.8.10)
- 5) Center for Research on Energy and Clean Air (CREA), BRIEFING: China's air pollution overshoots pre-crisis levels for the first time, Available online
<https://energyandcleanair.org/china-air-pollution-rebound-briefing/> (参照 2022.8.10)
- 6) Li Li, et al.: Air quality changes during the COVID-19 lockdown over the Yangtze River Delta Region: An insight into the impact of human activity pattern changes on air pollution variation, *Science of The Total Environment*, Vo. 732 (2020)
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139282> (参照 2022.8.10)

【編集後記】

所報編集委員歴が最も長いという理由で、今回の特集号における編集後記の執筆担当になりました。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「特集号」(デジタル冊子)が2022年3月に発行され約半年で第二号の発行に至りました。今回の特集号では、カーボンニュートラルを題材にJARIの現在の取り組みを紹介しました。皆様にタイムリーな情報を届けたい、JARIの取り組みを知ってもらいたい想いで、編集委員一同試行錯誤しながら編集を進めてきました。少しでも皆様のお役に立ちましたら幸いです。

(O.Y)

JARI Research Journal 2022年度 特集号

発行日： 2022年10月11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 安藤 慧佑 石井 充 一色 孝廣

発行人： 川岸 浩

大谷 亮 面田 雄一 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

