

令和5年度
交通安全環境研究所フォーラム 2023
講演概要

2023. 11. 1, 2
東京大学 伊藤国際学術研究センター

独立行政法人自動車技術総合機構



交通安全環境研究所

はじめに

自動車や鉄道は、世界各国において経済活動や国民生活を支える重要な役割を担っています。国際的課題であるカーボンニュートラルへの取り組みについては、自動車及び鉄道等の陸上交通に係る国民の安全・安心の確保及び環境の保全に不可欠なものとなっております。さらに、近年急速に発展している自動運転に関する技術、生産性の向上、インフラ保守の効率化等にも取り組む必要があります。

また、日本企業は、自動車や鉄道といった製品を、日本から世界各国に輸出するのみならず、海外において生産しているため、日本企業の国際競争力を確保する観点から、自動車及び鉄道に関する基準・規格の国際化も重要となっております。

交通安全環境研究所は、これらの社会的課題の解決に向け、自動車及び鉄道の安全・環境に関する基準・規格の策定のための研究、さらに、自動車の型式指定に関する審査・リコールに関する技術的検証、鉄道製品に関する国際規格の認証業務などを実施しています。

本年の交通安全環境研究所フォーラムは、二日間の日程で「社会の変化と交通の変容に向けた対応」というテーマを掲げ、当研究所が行っている様々な取組をご紹介します。また、外部の専門家をお招きしてご講演を頂くことにしております。ポスターセッションにおいては、最新の研究成果などについて幅広くご紹介いたします。

本年のフォーラムも、対面形式とオンライン形式を組み合わせたハイブリッドの形式で開催させていただきましたが、双方の形式を問わずご参加いただく皆様から忌憚のないご意見をいただくことにより、交通安全環境研究所の活動をさらに充実・発展させ、社会的な期待と信頼に応えていく所存でございます。

今後とも、皆様のご理解、ご支援を賜りますようお願い申し上げます。

令和5年11月
独立行政法人 自動車技術総合機構
交通安全環境研究所長 松田 敦

講演タイムテーブル

2023年11月1日(水)／[開場] 12:30 [講演会場] 伊藤謝恩ホール

13:00 ▶ 13:05	事務局 連絡		
13:05 ▶ 13:10	開会の挨拶	交通安全環境研究所長 松田 敦	
13:10 ▶ 13:25	環境研究部における研究の概要と方向性	環境研究部長 新国 哲也	
13:25 ▶ 14:10	招待講演①	物流課題解決を目指す、 NLJ活動の現状と将来	NEXT Logistics Japan 株式会社 代表取締役社長 梅村 幸生 氏
14:10 ▶ 14:35	講演①	商用車のバッテリー劣化に関するフィールド調査に向けた取組	主席研究員 小鹿 健一郎
当研究所では、2022年7月にNEDOのグリーンイノベーション基金事業「スマートモビリティ社会の構築」の研究開発委託事業者に採択された。本事業では、2025年以降、商用車のバッテリー劣化に関するフィールド調査を行うことになっており、バッテリーのSOH(State of Health)を含む走行データを解析し、実使用環境下におけるSOHの変化の程度について明らかにする。本報告では、フィールド調査に先立ち行ったバッテリーのセル試験について報告する。			
14:35 ▶ 15:00	講演②	産学官連携による 高効率次世代大型車両開発促進事業の現況について	上席研究員 鈴木 央一
2019年度より5ヶ年の計画で始まった本事業において、前年度新たにカーボンニュートラル化の動きに対応した3つの新規テーマを追加している一方で、他の多くのテーマは今年度でとりまとめる。そこで既存テーマの一部について、とりまとめに向けた成果や進捗について報告するとともに、新たに実施している重量水素燃料電池車における燃費評価についての現況として、これまで試験調査を行った結果について述べる。			
15:00 ▶ 15:30	ポスターセッション		
15:30 ▶ 15:55	講演③	自動車認証審査部における審査の概要について	自動車認証審査部長 鈴木 延昌
高い技術力による厳正な審査と、申請者にとって利便性・合理性の高い審査を両立することが、従来にも増して強く求められている中で、自動車認証審査部は業務実施体制の強化を図るべく、様々な措置を講じている。ここでは、審査業務の現状と、今後ますます高度化する自動車技術に係る認証業務への対応等の自動車認証審査部における取組について概説する。			
15:55 ▶ 16:20	講演④	リコール技術検証部における業務の概要について	リコール技術検証部長 真下 一則
リコール技術検証部では、リコール制度が適切に運用されるよう、国土交通省と連携して、設計・製造に起因した保安基準不適合等やそのおそれがないか、リコールが既に行われていればそれが適切かについて技術的な検証を行っている。具体的には、不具合情報の分析、事故・火災車両の調査、メーカーヒアリング、実験及び排出ガスサーベイランス等を行っている。これらの現状について紹介する。			
16:20 ▶ 16:25	事務局 連絡		

講演タイムテーブル

2023年11月2日(木)／

[開場] 9:30 [講演会場] 伊藤謝恩ホール

10:00 ▶ 10:05	事務連絡		
10:05 ▶ 10:20	交通システム研究部における研究の概要と方向性		交通システム研究部長 佐藤 安弘
10:20 ▶ 11:05	招待講演②	スローモビリティの 地域実装と課題	群馬大学 次世代モビリティ社会実装研究センター 副センター長 天谷 賢児 氏
11:05 ▶ 11:30	講演⑤	スローモビリティの有効性評価手法の開発	主任研究員 小林 貴
中山間地等の日常の移動が困難な地域における端末交通手段として小型で低速なモビリティの導入を検討する際に、モビリティの導入の有効性に関する評価が必要となる。このほど、容易に入手可能な情報である人口分布のほか、日常移動が必要と想定される施設の位置情報を用いて需要規模面、運行距離面、コスト面で低速モビリティが有効な地域の評価を行うことが可能な手法を開発した。本発表では、開発した評価手法について報告する。			
11:30 ▶ 11:55	講演⑥	LiDARセンサを利用した列車の位置検知手法の検討	研究員 望月 駿登
当研究所では衛星測位を用いた車上主体の列車位置検知について検討し、衛星の電波を受信しやすい地点では一定の精度が得られた。一方、受信が困難な地点では他の手法を用いて列車位置検知を行う必要があると考える。そこで、レーザ光を照射して物体位置を検知するLiDARセンサを車上に設置し、軌道内に設置した検知対象物の配置を検出して列車位置検知を行う手法を考案した。実験を通じて本手法の実現可能性を検討したので報告する。			
11:55 ▶ 12:20	講演⑦	営業列車を用いた車輪／レール接触力の モニタリング技術の活用に関する検討	研究員 一柳 洋輔
走行安全性に直結する車輪／レール間の接触力を営業列車で常時観測することができるようになってきた。これらのデータをもとにして、車輪／レール間潤滑条件の時間変化等も捉えられるようになることから、適切な潤滑条件の管理を可能とするソールの開発に取り組んできた。脱線に対する走行安全性には、車輪／レール間の接触力のほか、摩耗進展に伴い変化する車輪／レール形状と、潤滑条件に伴い変化する摩擦係数とが関係することから、営業列車による車輪／レール接触力のモニタリングデータを活用し、摩耗進展に注視が必要な曲線区間を把握する方法について検討したので報告する。			
12:20 ▶ 13:20	昼休み／ポスターセッション		
13:20 ▶ 13:35	鉄道認証室における最近の活動概要		鉄道認証室長 平石 正嗣
13:35 ▶ 14:00	講演⑧	鉄道と自動車技術を融合した新しいモビリティと認証	主席研究員 森 崇
運転支援装置の実装、電動化など、自動車技術の進展に伴い、鉄道信号保安装置や電気車運転などの鉄道の技術と自動車の技術分野が近似してきており、鉄道に自動車の安全に対する考え方や汎用技術を導入することも考えられる。本講演では、新しいモビリティの一例を示し、そのシステムについて国際規格との整合性を論じつつ、新技術を取り入れる際の国際規格への適合の方向性について述べる。			
14:00 ▶ 14:15	自動車安全研究部における研究の概要と方向性		自動運転研究統括監 自動車安全研究部長 河合 英直
14:15 ▶ 15:00	招待講演③	自動運転バスサービスの実用化、 横展開へ	BOLDLY株式会社 代表取締役社長 兼 CEO 佐治 友基 氏
15:00 ▶ 15:20	ポスターセッション		
15:20 ▶ 15:45	講演⑨	自動運転車が車線変更する際に備えるべき 危険回避能力に関する研究	研究員 真鍋 裕輝
自動運行装置に関する国連協定規則(UN-R157)において、自動運転車の衝突回避能力は定量的な指標がない場合にはCompetent and Careful human driverと同程度以上でなければならないとされている。本報告では、車線変更時に危険事象に遭遇する一般ドライバの運転行動を調査し、一般ドライバが危険事象を回避する際の運転行動の定量的な評価をおこなった。その結果より、自動運転車が車線変更中に備えるべき危険回避能力に関する考察をおこなった。			
15:45 ▶ 16:10	講演⑩	自動運転から手動運転への引継ぎ要請に用いる 警告音の断続周期が運転引継ぎ行動に与える影響	研究員 阿部 晃大
レベル3自動運転では、ドライバが運転以外の作業(二次タスク)を行う場面が想定される。本研究は、安全な運転引継ぎにつながる警告音の性質を明らかにするため、二次タスク中のドライバに引継ぎ要請として提示する断続音のパターンを変化させ、運転を引継ぐ様子を解析した。音に対する印象の変化や、反応時間、引継ぎ後の運転操作について報告する。			
16:10 ▶ 16:35	講演⑪	前面ガラス部を対象とした歩行者頭部保護試験に関する調査	主席研究員 田中 良知
昨年度のフォーラムで新品の前面ガラスを対象とした歩行者頭部保護試験に関する調査として、頭部傷害値の高くなる非典型状態が頻繁に発生する事例があることを紹介した。本年度はその続報として、前面ガラスに加工を施して歩行者頭部保護試験を実施した場合に、その加工が傷害値の高くなる非典型状態の発生に与える影響について調査した結果を報告する。			
16:35 ▶ 16:40	閉会挨拶		理事 坂本 一朗

ポスターセッション

2023年11月1日(水)／15:00～15:30
2023年11月2日(木)／12:20～13:20、15:00～15:20

[ポスターセッション会場]
多目的スペース

ポスターNo.	講演題目	所属	発表者(※は筆頭発表者)
①	内燃機関搭載車のカーボンニュートラル化にむけた代替燃料の検討	環境研究部	川原田 光典[※]
②	深層学習による異常検知を利用した走行音に基づく違法車両検出	環境研究部	尾崎 信利[※]、宝渦 寛之
③	重量車RDE評価に向けたModel Based Testing手法の検討	環境研究部	奥井 伸宜[※]
④	国連WP.29における自動車ライフサイクルアセスメントの議論の動向	環境研究部	新国 哲也[※]
⑤	ディーゼル貨物車の路上走行時における夏季と冬季での排出ガス挙動の比較	環境研究部	山本 敏朗[※]
⑥	鉄道等陸上交通における衛星測位の健全性判定手法の検討	交通システム研究部	山口 大助[※]、工藤 希、望月 駿登
⑦	運転シミュレータを用いた鉄道運転士の運転動作把握に関する検討	交通システム研究部	工藤 希[※]、望月 駿登
⑧	鉄道の自動運転GOA3,GOA4に使用する車上カメラ・センサ類の安全水準に関する考察	交通システム研究部	工藤 希[※]、押立 貴志(客員研究員)
⑨	第4種踏切に対する安全性向上支援装置に関する検討状況について	交通システム研究部	長谷川 智紀[※]、三好 正太、八木 誠(客員研究員)
⑩	索道の安全確保に関する取組	交通システム研究部	千島 美智男[※]、一柳 洋輔、小野 寛典、山口 大助、八木 誠(客員研究員)
⑪	車両前方ソナーにおける人検知の可能性調査	自動車安全研究部	松井 靖浩[※]、細川 成之、及川 昌子(東京都立大学)
⑫	ペダル踏み間違い時加速抑制装置の実車性能調査について	自動車安全研究部	児島 亨[※]、真鍋 祐輝、北田 幸一
⑬	自動運転の規範となる人間ドライバの過失認定に係る考え方の整理	自動車安全研究部	中川 正夫[※]
⑭	電動キックボード最高速度表示灯の見え方に関するモニタ評価実験	自動車安全研究部	関根 道昭[※]、加藤 洋子、阿部 晃大
⑮	薄暮・夜間の交通死者数削減に向けた道路照明の明暗が起因した交通事故の分析	自動車安全研究部	加藤 洋子[※]、阿部 晃大、関根 道昭
⑯	車線変更時の信号灯路面描画の有効性に関する評価解析	自動車安全研究部	青木 義郎[※]、加藤 洋子、関根 道昭、北澤 由希子(小糸製作所)、須藤 佑基(小糸製作所)
⑰	前面衝突における前席と後席の乗員傷害比較	自動車安全研究部	細川 成之[※]、田中 良知、松井 靖浩
11/1 講演①	商用車のバッテリー劣化に関するフィールド調査に向けた取組	環境研究部	小鹿 健一郎[※]
11/1 講演②	産学官連携による高効率次世代大型車両開発促進事業の現況について	環境研究部	鈴木 央一[※]、奥井 伸宜、川原田 光典、田中 信壽、新国 哲也
11/2 講演③	スローモビリティの有効性評価手法の開発	交通システム研究部	小林 貴[※]、大野 寛之
11/2 講演④	LiDARセンサを利用した列車の位置検知手法の検討	交通システム研究部	望月 駿登[※]、工藤 希、山口 大助
11/2 講演⑤	営業列車を用いた車輪／レール接触力のモニタリング技術の活用に関する検討	交通システム研究部	一柳 洋輔[※]、佐藤 安弘、緒方 正剛、大野 寛之、道辻 洋平(茨城大学)、松本 陽(日本大学)、谷本 益久(メトロ車両)、伊藤 淳矢(東京地下鉄)、品川 大輔(日本製鉄)
11/2 講演⑥	鉄道と自動車技術を融合した新しいモビリティと認証	鉄道認証室	森 崇[※]、山口 大助、望月 駿登
11/2 講演⑦	自動運転車が車線変更する際に備えるべき危険回避能力に関する研究	自動車安全研究部	真鍋 祐輝[※]、児島 亨、北田 幸一
11/2 講演⑧	自動運転から手動運転への引継ぎ要請に用いる警告音の断続周期が運転引継ぎ行動に与える影響	自動車安全研究部	阿部 晃大[※]、加藤 洋子、関根 道昭、戸井 武司(中央大学)
11/2 講演⑨	前面ガラス部を対象とした歩行者頭部保護試験に関する調査	自動車安全研究部	田中 良知[※]、細川 成之、松井 靖浩

社会の変化と交通の変容に向けた対応

11月1日の講演(伊藤謝恩ホール)

題目	所属	講演者	頁
■環境研究部の取組			
環境研究部における研究の概要と方向性	環境研究部長	新国 哲也	1
講演1 商用車のバッテリー劣化に関するフィールド調査に向けた取組	主席研究員	小鹿 健一郎	3
講演2 産学官連携による高効率次世代大型車両開発促進事業の現況について	上席研究員	鈴木 央一	9
■自動車認証審査部・リコール技術検証部の取組			
講演3 自動車認証審査部における審査の概要について	自動車認証審査部長	鈴木 延昌	13
講演4 リコール技術検証部における業務の概要について	リコール技術検証部長	真下 一則	15

11月2日の講演(伊藤謝恩ホール)

題目	所属	講演者	頁
■交通システム研究部の取組			
交通システム研究部における研究の概要と方向性	交通システム研究部長	佐藤 安弘	19
講演5 スローモビリティの有効性評価手法の開発	主任研究員	小林 貴	21
講演6 LiDAR センサを利用した列車の位置検知手法の検討	研究員	望月 駿登	25
講演7 営業列車を用いた車輪／レール接触力のモニタリング技術の活用に関する検討	研究員	一柳 洋輔	29
■鉄道認証室の取組			
鉄道認証室における最近の活動概要	鉄道認証室長	平石 正嗣	33
講演8 鉄道と自動車技術を融合した新しいモビリティと認証	主席研究員	森 崇	35
■自動車安全研究部の取組			
自動車安全研究部における研究の概要と方向性	自動運転研究統括監 自動車安全研究部長	河合 英直	41
講演9 自動運転車が車線変更する際に備えるべき危険回避能力に関する研究	研究員	真鍋 裕輝	43
講演10 自動運転から手動運転への引継ぎ要請に用いる警告音の断続周期が運転引継ぎ行動に与える影響	研究員	阿部 晃大	47
講演11 前面ガラス部を対象とした歩行者頭部保護試験に関する調査	主席研究員	田中 良知	51

ポスターセッション

(多目的スペース)

題目	所属	発表者※主発表者	頁
①内燃機関搭載車のカーボンニュートラル化にむけた代替燃料の検討	環境研究部	※ 川原田 光典	55
②深層学習による異常検知を利用した走行音に基づく違法車両検出	環境研究部	※ 尾崎 信利 宝渦 寛之	57
③重量車 RDE 評価に向けた Model Based Testing 手法の検討	環境研究部	※ 奥井 伸宜	59
④国連 WP.29 における自動車ライフサイクルアセスメントの議論の動向	環境研究部	※ 新国 哲也	61
⑤ディーゼル貨物車の路上走行時における夏季と冬季での排出ガス挙動の比較	交通システム研究部	※ 山本 敏朗	63
⑥鉄道等陸上交通における衛星測位の健全性判定手法の検討	交通システム研究部 客員研究員	※ 山口 大助 工藤 希 望月 駿登	65
⑦運転シミュレータを用いた鉄道運転士の運転動作把握に関する検討	交通システム研究部	※ 工藤 希 望月 駿登	67
⑧鉄道の自動運転 GOA3,GOA4 に使用する車上カメラ・センサ類の安全水準に関する考察	交通システム研究部 客員研究員	※ 工藤 希 押立 貴志	69
⑨第 4 種踏切に対する安全性向上支援装置に関する検討状況について	自動車安全研究部 客員研究員	※ 長谷川 智紀 三好 正太 八木 誠	71
⑩索道の安全確保に関する取組	交通システム研究部 客員研究員	※ 千島 美智男 小野 寛典 一柳 洋輔 山口 大助 八木 誠	73
⑪車両前方ソナーにおける人検知の可能性調査	自動車安全研究部 東京都立大学	※ 松井 靖浩 細川 成之 及川 昌子 氏	75
⑫ペダル踏み間違い時加速抑制装置の実車性能調査について	自動車安全研究部	※ 児島 亨 真鍋 裕輝 北田 幸一	77
⑬自動運転の規範となる人間ドライバの過失認定に係る考え方の整理	自動車安全研究部	※ 中川 正夫	79
⑭電動キックボード最高速度表示灯の見え方に関するモニタ評価実験	自動車安全研究部	※ 関根 道昭 加藤 洋子 阿部 晃大	81
⑮薄暮・夜間の交通死者数削減に向けた道路照明の明暗が起因した交通事故の分析	自動車安全研究部	※ 加藤 洋子 阿部 晃大 関根 道昭	83
⑯車線変更時の信号灯路面描画の有効性に関する評価解析	自動車安全研究部 小松製作所	※ 青木 義郎 加藤 洋子 関根 道昭 北澤由希子氏 須藤 佑基 氏	85

⑰前面衝突における前席と後席の乗員傷害比較	自動車安全研究部	※	細川 成之 田中 良知 松井 靖浩	87
-----------------------	----------	---	-------------------------	----

口頭発表 11.1

環境研究部における研究の概要と方向性

環境研究部

新国 哲也

1. はじめに

令和3年度の日本のCO₂排出量は10億6400万トンで、自動車全体においては日本の排出量の15.1%（運輸部門の86.8%）を占めている¹⁾。自動車によるCO₂排出量の削減は依然として大きな課題である。令和5年6月に開催されたG7交通大臣会合では「持続可能な交通」のテーマが取り上げられ、陸上交通・鉄道においては「2050年までに道路部門でネットゼロ排出を達成する目標」のため、具体策として「ライフサイクルCO₂排出量の評価手法確立などWP.29での取組みを強化」することが表明された²⁾。

また自動車から排出される大気汚染物質は、これまでの厳しい排出ガス規制によって大幅に低減し、令和3年度の二酸化窒素（NO₂）の環境基準達成状況は自排局、一般局ともに、昨年度に引き続き100%達成であった³⁾。微小粒子状物質（PM_{2.5}）についても環境基準達成率は自排局、一般局ともに100%となっており、この状況を継続していく必要がある。

騒音に目を向けると、令和3年度の自動車交通騒音状況では、全国で昼夜間とも環境基準を超過していたのは全体の2.7%であり⁴⁾、令和元年度からこの状況は改善されていない。

上記のような背景のもと、交通安全環境研究所環境研究部は、陸上交通に係る温室効果ガスの排出削減及び環境保全を図るため、国が実施する関連行政施策の立案や技術基準の策定等に資する研究を行うことをミッションとして、以下の課題について重点的に取り組んでいる。

- ・電気自動車の環境性能評価法の検討
- ・大型車両の高効率化に関する取組み
- ・走行実態に即した騒音の評価

本稿では、当部で行っているこれらの研究課題についての状況と国際基準調和活動の概要について述べる。

2. 研究の概要

2. 1. 電気自動車の環境性能評価法の検討

自動車におけるCO₂排出量の削減を目指し電気自動車、燃料電池自動車、ハイブリッド自動車等の次世代車両が開発されている。この技術の進歩に対応して環境性能評価方法を高度化するための研究を行っている。大型の電気自動車について、バッテリーの性能劣化を評価するための方法が国際連合欧州経済委員会自動車基準調和世界フォーラム（WP.29）において議論となっている。バッテリーの性能劣化はバッテリーが供給できる電気エネルギーの総量（UBE: Usable Battery Energy）により評価する。環境研究部では大型充放電装置を使用した手法やシャシーダイナモを使用した手法それぞれについて、UBEを適切に評価するための技術要件に関する研究を行っている。

2. 2. 大型車両の高効率化に関する取組み

大型車の実路走行時における排出ガスを計測するため、環境研究部ではNO_xセンサ等の排気管直挿センサを用いたオンボード計測システムの開発と、その結果を基に路上走行時の排出ガスを高精度に把握する手法を検討している。本手法により、実路走行時における排出実態の把握及び尿素SCRシステム等の排出ガス後処理装置の性能推移の把握が可能となると期待される。

また、国土交通省は自動車の中でも特にCO₂排出量の多い大型車に関し、電動化技術や内燃機関分野等の開発促進を図る「産学官連携による高効率次世代大型車両開発促進事業」を、産学官連携のもと5か年計画（令和元年～5年度）で実施してきた。令和5年度も当研究所が中核的研究機関となって、事業を進めている。大型車の電動化について、車両の積載量を減らさずにバッテリー搭載スペースを確保するため、モータと変速機を一体化した電動アクスル（e-axle）の開発を行った。本事業では、試作により大型車の機械的な耐久要件への適合性が確認でき、大型車へのe-axle技術展開の可能性を高めた。

本開発は大型電動車両の評価にも有用となっている。重量車における燃費試験法は、従来からのシミュレーションを主体とする燃費評価に加え、複雑なシス

テムである燃料電池自動車（FCV）等においては実際のシステムを用いたパワートレイン法の適用が考えられている。また、軽・中量車におけるリアルドライブレミッション試験のような、実走行を高度に反映した評価法が必要となる可能性もある。このため燃費評価法の精緻化や道路データを活用した新たな重量車評価手法の検討を進めている。

一方で電動化が難しい用途（長距離輸送など）では内燃機関を引き続き活用することが考えられる。その場合においてもカーボンニュートラル化を考慮する必要がある。次世代燃料として大気中の CO₂ を原料とする合成燃料（e-fuel）が注目されている。このような合成燃料を燃やしても大気中の CO₂ は増加しないため、化石由来の燃料から切り替えることでカーボンニュートラルに貢献できる。なお、このような合成燃料の性状には保安基準上の要件がなく、環境研究部では普及ポテンシャルのある合成燃料種の調査や車両に用いた際の排出ガス浄化性能への影響などを調査・研究している。

2. 3. 走行実態に即した騒音の評価

マフラーを交換する等により公道走行で突出した騒音を発生する車両が存在するため、苦情の原因となっている。そのため走行時の騒音から、街頭検査時の騒音試験法である近接排気騒音試験法の規制値を超過する車両を判別すべく、走行騒音の周波数特性に着目した AI モデルの作成を行っている。AI モデルの検証を行うため、警察機関等と連携して街頭検査に同行し、走行騒音と近接排気騒音のデータを収集し、車両騒音を判別するシステムの精度向上を行っている。これまでは、不正改造車と適法車のデータがほぼ同数必要であったが、不正改造車のデータを大量に用意することは困難であることから、少量の不正改造車のデータから、より精度の高い AI モデルを作成可能なアルゴリズムを検討している。また街頭検査の効率化を図るため、単独走行をしている車両を対象として、近接排気騒音の規制値を超えた騒音を発生している車両を短時間で判別できるシステムの構築を行っている。

3. 国際基準調和活動

環境研究部では、WP.29 傘下の環境に関する専門家会合及びインフォーマル会議等において、基準策定に必要なデータの提供等を積極的に行っている。

3. 1. 排出ガス・エネルギー専門家会合 (GRPE)

EVE (Electric Vehicles and the Environment) インフォーマル会議は環境研究部の職員が副議長を担当している。先に述べた通り、大型電気自動車のバッテリーの性能劣化を評価するための方法が検討されており、2023 年 5 月に開催された第 62 回 EVE 会議では、環境研究部にて実施した研究成果を報告し、議論を主導した。また自動車の LCA (Life Cycle Assessment) に関するインフォーマル会議が 2022 年 10 月より活動を行っている。環境研究部の職員が共同議長を務め、自動車のライフサイクルの（製造、使用、廃棄などの）フェーズごとに設置された専門家によるサブグループが計算手法の開発を開始した。

3. 2. 騒音・タイヤ専門家会合 (GRBP)

GRBP では、二輪車及び四輪車の加速走行騒音の国連規則 R41 及び R51 に規定されている追加騒音規定に関する RD-ASEP (Real Driving Additional Sound Emission Provision) インフォーマル会議において、環境研究部の職員が共同議長として参画している。現在小型四輪車のデータ収集及び二輪車の試験法策定を行っており、議論をリードしている。

4. まとめ

以上に述べたように、環境研究部ではカーボンニュートラルの実現に向けた取り組みとして、電気自動車の環境性能評価法の検討や大型車両の高効率化に関する取り組みを行っている。また、排出ガスや騒音といった課題については実路走行での実態把握を進めると共に、国際基準調和活動等を通じて研究の成果を発信している。

参考文献

- 1) 国土交通省, "運輸部門における二酸化炭素排出量", https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html
- 2) 国土交通省, プレスリリース"G7 三重・伊勢志摩交通大臣会合の結果について", <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001615280.pdf>
- 3) 環境省, 「令和 3 年度 大気汚染物質（有害大気汚染物質等を除く）に係る常時監視測定結果」
<https://www.env.go.jp/content/000125784.pdf>
- 4) 環境省, 令和 3 年度自動車交通騒音の状況, 環境省ホームページ,
<https://www.env.go.jp/content/000119085.pdf>

講演 1. 商用車のバッテリー劣化に関するフィールド調査に向けた取組

環境研究部

※小鹿 健一郎

1. はじめに

交通研は、2022 年 7 月に NEDO のグリーンイノベーション基金事業「スマートモビリティ社会の構築」の研究開発委託事業者に採択された。交通研は、本事業において 2025 年以降、商用車のバッテリー劣化に関するフィールド調査を行うことになっている。調査では、バッテリーの SOH (State of Health) を含む走行データを解析し、実使用環境下における SOH の変化の程度について明らかにする。また、問題となるレベルの SOH の低下が確認された場合、収集されたデータをもとに、SOH の低下を抑制するような車両の使い方について提案を行う予定である。本報告では、フィールド調査に先立ち行ったバッテリーのセル試験について述べる。

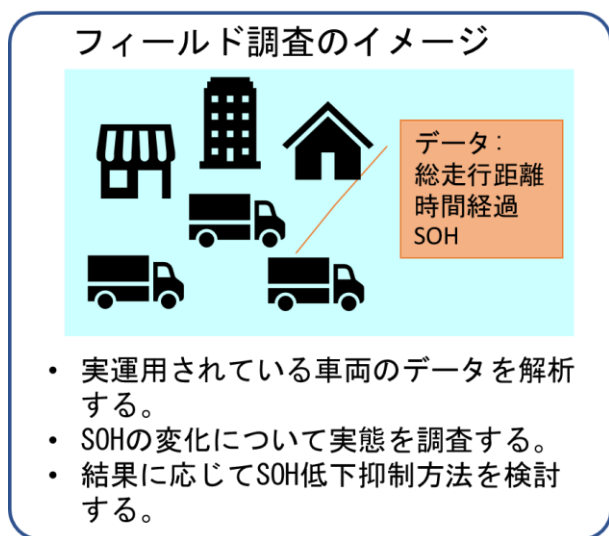


図 1. フィールド調査のイメージ

2. EV におけるバッテリー劣化とその影響

EV におけるバッテリー劣化とその影響の関係においては、(1)バッテリー容量 (SOH) の低下に由来する一充電走行距離の低下、(2)バッテリーの内部抵抗増加に由来する交流電力量消費率の上昇が知られている。また、本研究では、上記 SOH に加え、将来の EV 用バッテリーの劣化評価の指標となりうる SOS (State of Safety) の観点からも評価を行う。SOS の概念は SOH に比べ

ると新しいものであり、近年、米国アイダホ国立研究所などがバッテリーの管理・診断に関する論文で言及している。^[1] SOS 低下の一例には、バッテリーセルの劣化に由来するバッテリーセルの熱暴走リスクの上昇が挙げられる。^[2]

3. バッテリーセルを対象とした試験

3. 1. 試験の概要

本節では、試験の概要として、目的、スコープ、試験の工程について説明する。本試験は、フィールド調査実施時の劣化要因解析を行うにあたり、注目すべきパラメータを整理することを目的として行った。本試験のスコープは、試験対象をバッテリーセルとし、評価対象を SOH および SOS とした。セル試験、車両単体試験、フィールド調査の特徴を含めた比較を図 2 に示す。本試験の工程は、①繰り返し充放電の実施、②放電容量 (SOH) の評価、③熱暴走試験、④セルの分解調査・化学分析の順で行った。

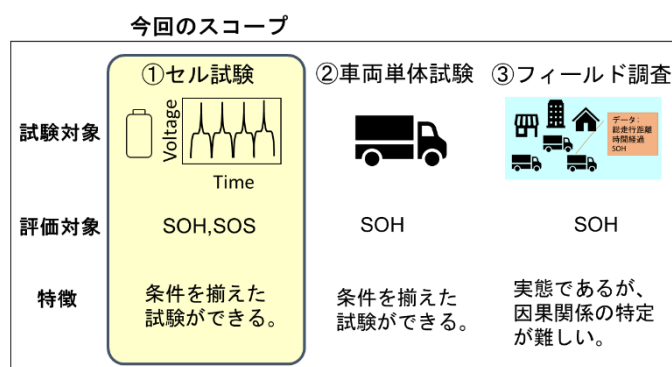


図 2. 本試験のスコープと位置づけ

3. 2. 充放電サイクルの設定

3. 2. 1. 環境温度、充電方法、使用 SOC 範囲の設定

劣化への影響が想定される 3 つのパラメータである環境温度、充電方法、使用 SOC (State of Charge) 範囲に関して表 1 に示す通り設定した。環境温度は、高温と低温の 2 種類とし、夏期を想定した 35℃、冬期を想定した 10℃とした。充電方法は、急速充電と普通充電の 2 種類とし、夏期急速充電は 1 C、冬期急速

充電は0.7C、夏期普通充電は0.5C、冬期普通充電は0.4Cとした。使用SOC範囲に関しては、運用方法を以下の通り3つ設定することとした。i) 高SOC運用：短距離走行後、継ぎ足し充電にて満充電にて使用する運用。ii) 広範囲SOC運用：走行を継続し、十分に放電してから満充電にして使用する運用。iii) 中間SOC運用：SOCに充電上限/放電下限を設定して使用する運用。

繰り返し充放電試験では、この3つのパラメータを組み合わせ、計12通りの条件で充放電を行った(表2)。

表1. 充放電試験のための設定パラメータ

環境温度	×	充電方法	×	使用SOC範囲
高温(夏期) 35℃		急速充電 (劣化大を想定)		i) 高SOC 100-70%
低温(冬期) 10℃		普通充電 (劣化小を想定)		ii) 広範囲SOC 100-35%
				iii) 中間SOC 70-35%

表2. 充放電条件12通りの内容

環境温度	充電方式	SOC範囲	条件番号
夏期	急速充電	高SOC	1
		広範囲SOC	2
		中間SOC	3
	普通充電	高SOC	4
		広範囲SOC	5
		中間SOC	6
冬期	急速充電	高SOC	7
		広範囲SOC	8
		中間SOC	9
	普通充電	高SOC	10
		広範囲SOC	11
		中間SOC	12

3. 2. 2. 対象電池と結果比較のための積算放電容量の整理

本実験では、3種類のSOC範囲での繰り返し充放電結果を比較するため、劣化評価でよく行われる繰り返し充放電回数を基準とした比較は適当ではないと

考え、積算放電容量を基準に、各セルの劣化の状態を比較することとした。具体的な積算放電容量値は、795 Ahであり、本試験対象電池(三元系正極・小型円筒形リチウムイオン電池:NCR18650BM、電圧3.6V、容量3180mAh)では、250回の放電(SOC100→0%)に相当する。参考までにテスラModelSを想定して距離換算すると、テスラModelSの一充電走行距離は約500kmであるため、250回の放電は、125km走行に相当する。

3. 3. 試験結果

3. 3. 1. 放電容量維持率(SOH)

環境温度、充電方法、使用SOC範囲がパラメータとしてどの程度SOHの変化に影響を与えるのか明らかにするために、異なる条件で充放電を行い、SOH評価を行った。SOHは、繰り返し充放電を行い、積算放電容量が795Ahに到達したところで行った容量測定の結果を初期の容量測定の結果で除した値として算出した。条件ごとのSOHを図3に示す。本実験系において、最もSOHを高く維持した条件は、夏期(35℃)、普通充電、中間SOC運用であった。一方、

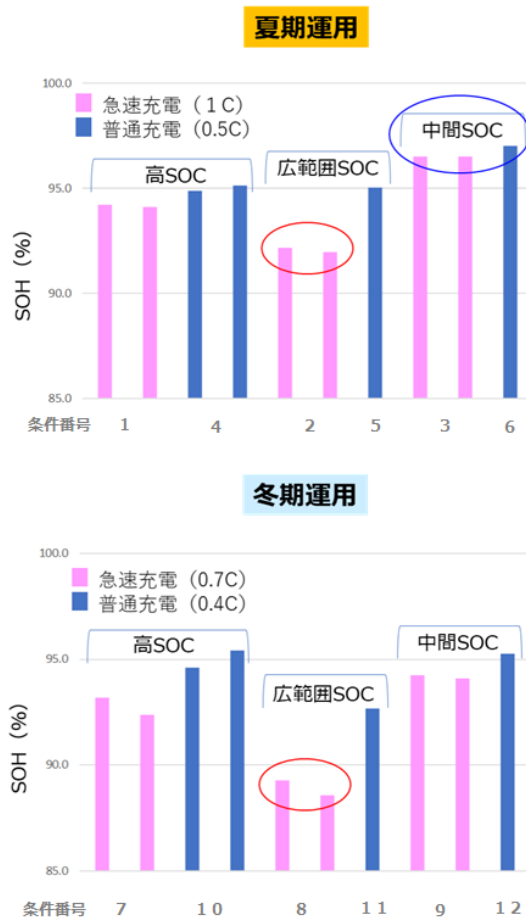


図3. 各条件における放電容量維持率

最も SOH が低くなった条件は冬期（10℃）、急速充電、広範囲 SOC 運用であった。夏期・冬期共に最も SOH の低下が進んだのは、急速充電で広範囲 SOC 運用するケースであった（図中赤で丸囲み）。夏期は中間 SOC 運用により SOH 低下が抑制されたが（図中青で丸囲み）、冬期にはその効果は少なかった。また、環境温度、使用 SOC 範囲に関わらず、急速充電は普通充電に比べて SOH 低下が大きかった。

3. 3. 2. 熱暴走試験

繰り返し充放電によってセルの熱暴走の起こしやすさに変化がないか確認するためにレーザ照射を用いた熱暴走試験を実施した。熱暴走の起こしやすさは、熱暴走に至るまでにレーザが投与したエネルギーを指標として評価することとした。熱暴走発生までにレーザが投与したエネルギーは、レーザの平均出力と照射時間の積により算出した。条件ごとの投与エネルギーを図 4 に示す。（この時、試験可能なサンプル数の関係で、冬期、普通充電、中間 SOC 運用のサンプル（条件番号 12）は試験しなかった。）

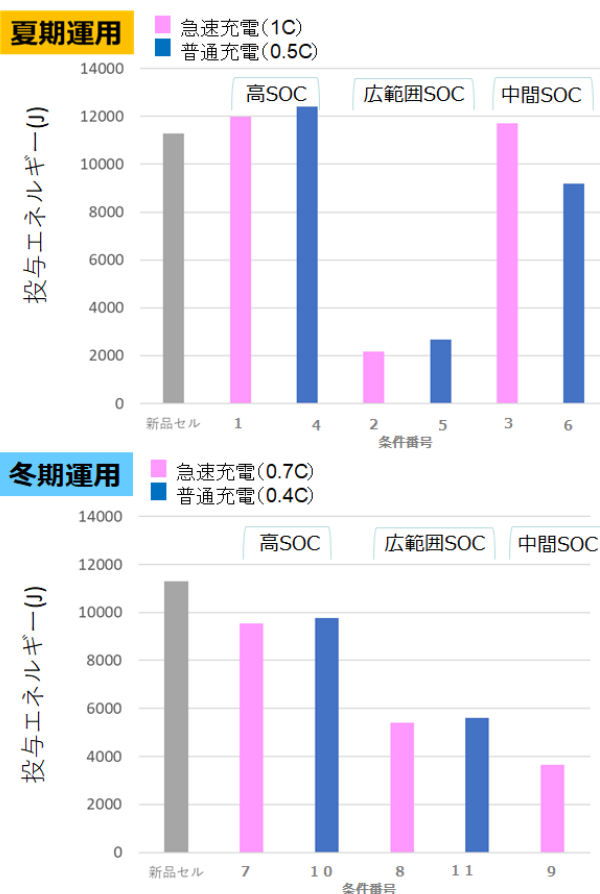


図 4. レーザ照射による投与エネルギーの比較

新品の熱暴走に至るために投与されたエネルギーはおおよそ 11000 J であった。広範囲 SOC 運用では、夏期・冬期、急速充電・普通充電いずれも少ない投与エネルギーで熱暴走した（新品に比べて半分程度以下）。また、冬期、急速充電、中間 SOC の運用の組み合わせケースでも少ない投与エネルギー（新品に比べて半分程度以下）で熱暴走に至った。これは負極に析出したリチウムと電解液が反応するなどして、新品にはない自己発熱反応が起こることで、新品に比べて少ない投与エネルギーで熱暴走が起こったものと考えられる。^[2,3]

3. 3. 3. セルの分解調査・化学分析

繰り返し充放電によっておきたセル内部の変化について確認するために、セルの分解調査・化学分析を行った。分解調査は、レーザ照射を行えなかった条件番号 12 に加えて、急速充電を行ったサンプルである条件番号 2、3、7、8、9 の計 6 サンプルで実施した。化学分析では、SOH 低下が大きい、急速充電-広範囲 SOC 運用のサンプルである条件番号 2、8 の 2 サンプルに対して、SEM-EDX(走査型電子顕微鏡エネルギー分散型 X 線分光法)分析、NMR(核磁気共鳴)分析を実施した。

負極上のリチウム析出を確認するために、満充電したセルを分解して負極を取り出し、観察した。リチウム金属を含むと考えられる灰色の析出の有無について結果を表 3 に示す。また析出物がある例として、冬期、急速充電、広範囲 SOC 運用の負極画像を図 5 に、析出物が無い例として、冬期、普通充電、中間 SOC 運用の負極画像を図 6 に示す。

表 3. 分解調査によるリチウム金属を含むと考えられる灰色の析出の有無

夏期運用	充電レート	高SOC	広範囲SOC	中間SOC
	急速充電	—	有	無
	普通充電	—	—	—
冬期運用	充電レート	高SOC	広範囲SOC	中間SOC
	急速充電	有	有	有
	普通充電	—	—	無

有：析出有り、無：析出無し、—：分解調査実施無し

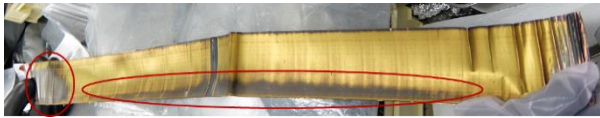


図 5. セルを分解して観察した負極材（条件番号 8）



図 6. セルを分解して観察した負極材（条件番号 12）

図 5 では、負極表面の上下端部および最外層・最中心部に金属リチウムとみられる灰色の析出物が観察された。一方、図 6 では、負極全体が均一の金色を呈しており、負極表面に析出物等は観察されなかった。

化学分析の結果として、条件番号 8 の SEM-EDX の画像を図 7 に示す。図 7 より、炭素(赤のマッピング)のうえに微細分散した析出物(黒く抜けた部分)を含む酸化物層(緑のマッピング)が存在することが示された。さらに固体 Li-NMR 分析により、リチウムは金属状態で存在することが示された。以上 2 つの結果より、図 5 で見られた灰色の析出物は、金属リチウムを含んでいることが示された。同様に条件番号 2 においても、SEM-EDX および固体 Li-NMR 分析により、灰色の析出物は、金属リチウムを含んでいることが示された。

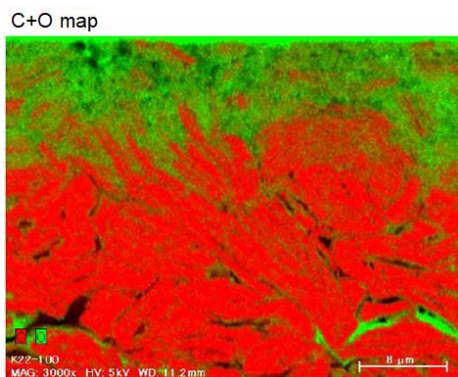


図 7. 負極断面の SEM-EDX 分析の様子

4. 総合評価

本章では、3 章 3 節の結果をもとに、セル試験の結果について SOH および SOS の観点から整理したうえで総合的に評価する。

4. 1. SOH の観点からの整理

今回得られた 3.3.1.の結果を GTR22 (Global technical regulation No. 22)の要件と比較し評価することとする。車載バッテリーの耐久性に関する基準である GTR22 においては、バッテリー容量保証 (5 年 10 万キロで 80%、8 年 16 万キロで 70%) が要件とされている。^[4] 今回得られた結果は、最も SOH が低いものでも、SOH89%であり、GTR22 での要件である 80%と比較すると、良好な状態にあると評価することができる。

4. 2. SOS の観点からの整理

本報告では、熱暴走リスクの上昇を SOS のひとつの指標とし、レーザ照射の結果および金属リチウムの析出有無から評価することとした。本発表では、『レーザからの投与エネルギーが 6000 J 以下で熱暴走を起こしている』または、『金属リチウムが析出している。』のどちらか一つでも満たすものを熱暴走リスクが上昇しているサンプルとした。(表 4)

表 4. 熱暴走リスクが上昇していると判断した条件

夏期 運用	充電レート	高SOC	広範囲SOC	中間SOC
	急速充電	—	✓	—
	普通充電	—	✓	—
冬期 運用	充電レート	高SOC	広範囲SOC	中間SOC
	急速充電	✓	✓	✓
	普通充電	—	✓	—

✓：熱暴走リスクの上昇

4. 3. 総合評価

本実験では、12 種類の条件で、積算放電容量が 795 Ah (参考、テスラモデル S における 125 千 km 走行に使用される放電容量相当) となるまで繰り返し充放電を行った。このとき、一充電走行距離に影響を与える SOH に関しては、12 種類のすべての条件において SOH が 80%を下回るケースはなく、良好であると評価した。一方、SOS の観点では、広範囲 SOC 運用または、冬期の急速充電において、熱暴走リスクが上昇していることが示された。

5. 車載バッテリーの熱暴走リスクの上昇について

5. 1. 車載バッテリーの熱暴走リスクの上昇と車両の安全性の関係について

本節では、バッテリーの熱暴走リスク上昇と車両の安全性の関係について述べる。結論から述べるとバッテリーの熱暴走リスクが上昇しても、直ちに『車両の安全性に問題あり』ということにはならない。それは、GTR20 (Global technical regulation No.20)^[1]に記された車載バッテリーの熱連鎖に関する安全要件 (図 8) は『警報発報後、5 分間客室内がハザードな状況 (火災、爆発、煙等の侵入) にならないこと』を求めていること、自動車メーカーは熱暴走が発生しても客室がハザードな状況にならないように、モジュールレベル、パックレベルあるいはキャビンレベルにおいて対策を施した設計を行っていると考えられるためである。一方、自動車メーカーが対策を設計した前提シナリオを超えるセル数の熱暴走が起こった場合、結果として警報発報から 5 分間という時間より短い時間で火災、爆発、煙が客室内に到達する可能性もあり、その場合において、熱暴走のリスク上昇が車両の安全性に問題を起こしたと判断される。また、本報告 3 章で示したリチウム析出に由来する熱暴走リスク上昇の場合では、セルの熱暴走を抑制するには、セルの温度管理が重要となる。

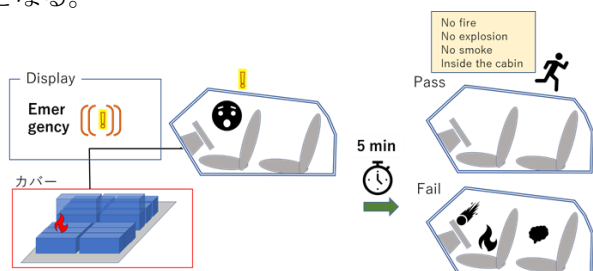


図 8. GTR20 に規定された安全要件

5. 2. 熱暴走リスクが上昇しないことのメリット

前節では、熱暴走リスク上昇が直ちに『車両の安全性に問題あり』とならないことについて説明したが、本節では、熱暴走リスクが上昇しないことのメリットについてバッテリーの残価の観点から述べる。バッテリーの劣化程度を評価する手法のひとつは、放電容量測定による SOH の評価である。車載バッテリーの耐久性に関する基準である GTR22 においても、バッテリー容量保証 (5 年 10 万キロで 80%、8 年 16 万キロで 70%) が要件とされている。一方で、4 章の総合評価で述べ

たように、SOH89%を超えた状況でも熱暴走リスクの上昇は起こりうる。このため、車載時の使われ方の違いによって同じ SOH であっても、熱安定性の異なるセルが存在することになる。3 章で示したようにリチウム析出に由来して熱安定性が低下しているセルでは、二次利用の際の用途が、熱安定性が低下していないセルに比べて狭まることから、二次利用市場においてその価値は低く評価されることが予想される。(熱暴走リスクの上昇していない電池の方が、残価が高く評価される。)

5. 3. 今後進展が期待される 2 つの関連技術

本節では、より安全で持続可能な交通を実現することに大きく貢献すると考えられる関連技術について説明する。一つは、バッテリーの劣化程度を診断する技術であり、もう一つは最適運用シミュレーション技術である。この 2 つの技術が進展し、社会実装されるとバッテリー劣化 (SOH、SOS の両方の低下) を抑制した車両の運行管理が実現し、バッテリーが車両から取り外された後もバッテリー劣化の程度に応じて適切に使用される二次利用の市場が醸成されることが考えられる。これにより、バッテリーの残価が上昇し、使用後の車両の残価も上昇することから、リースなどで EV を導入する場合、リース費用が低減されることが期待される。

5. 3. 1. バッテリー非破壊診断技術

インピーダンス法や充電曲線解析法といった非破壊でバッテリーの劣化状況を含む内部状態を診断する技術の開発が進められている。^[1] これにより 2 章で述べたバッテリー容量 (SOH) の低下や内部抵抗上昇に加えて、安全性の状態 (SOS) も診断することができる。本報告におけるレーザ照射は破壊分析であるため、熱暴走リスクに関する情報を入手することはできるが、レーザを照射した対象電池は二次利用することができないことが課題である。非破壊診断技術の場合、車両で使用している際の点検、整備を行う目的での使用や、二次利用を目的とした中古バッテリーの価格査定などに活用されることも期待される。

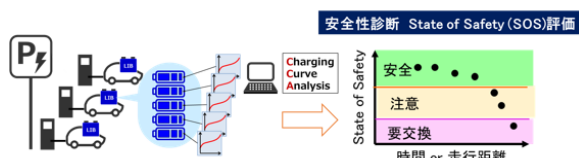


図 9. 充電曲線解析法による安全性診断のイメージ

5. 3. 2. 最適運用シミュレーション技術

現在、カーナビをはじめとして、距離、時間などを指標として複数の運行ルートを提供してくれるシステムが存在する。前項のバッテリー非破壊診断技術が実装されると、車両の使い方と劣化の進行速度や程度に関する情報が集積され、システムとして、バッテリー劣化を抑制した運行ルートを提案できるようになることが予想される。このように最適化シミュレーション技術を活用することで現在の使い方に比べて、バッテリー劣化を抑制する使い方を意識的に選択できるようになることが期待される。

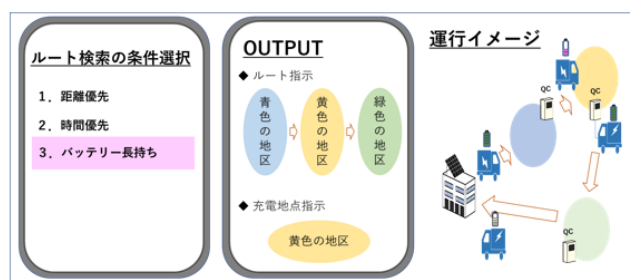


図 10. 『バッテリー長持ち』を指標として、運行ルートが提案されるシステムのイメージ

6. おわりに

今回、試験に使用した三元系のリチウムイオン電池において、設定した条件によって、劣化の程度に違いが表れたことから、設定した3つのパラメータが2025年以降の車両データの解析においても、車両使用条件と劣化の関係を明らかにするうえで重要であることが示唆された。

以下本試験にて得られた結果の一部。

- ① SOC100～35%で充放電を繰り返した場合、SOC100～70%、70～35%に比べ、環境温度10℃、35℃の両条件下において急速充電でSOHが大きく低下した。
- ② SOC100～35%で充放電を繰り返した場合、熱暴走発生リスクが上昇したことが確認された。

(新品に比べ最小約 1/4 の外部加熱によるエネルギー投与で熱暴走が発生した。)

- ③ SOC100～35%で充放電を繰り返したバッテリーセルは、新品には存在しない金属リチウムを含む析出物が確認され、SOH の低下および熱暴走リスク上昇に寄与していることが示唆された。
- ④ なお、熱暴走リスクの上昇は、SOC100～35%に加え、環境温度 10℃で急速充電を行ったSOC70～35%およびSOC 100～70%の条件においても確認された。

参考文献

- 1) Tanim, T.R., Dufek, E.J. & Sazhin, S.V. "Challenges and needs for system-level electrochemical lithium-ion battery management and diagnostics", MRS Bulletin 46, 420–428 (2021).
<https://doi.org/10.1557/s43577-021-00101-8>
- 2) K. Koshika et.al., " Summarizing Relation between Battery Degradation and EV Safety and Evaluating Battery Safety with Laser Irradiation", 2023 JSAE Annual Congress (Spring), presentation No 193.
- 3) M. Umeda, K. Koshika et.al., "Laser irradiation illuminates uncertain degradation, leading to thermal runaway of 18650 cells charged/discharged at low temperatures", Journal of Power Sources, Volume 542, 2022.
- 4) Global Technical Regulation No.22 (In-vehicle Battery Durability for Electrified Vehicles)
https://unece.org/sites/default/files/2023-01/ECE_TRANS_180a22e.pdf
- 5) Global Technical Regulation No. 20 (Electric Vehicle Safety (EVS))
<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/ECE-TRANS-180a20e.pdf>

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)の助成事業(JPNP21028) の結果得られたものです。

講演 2. 産学官連携による高効率次世代大型車両開発促進事業の現況について

環境研究部

※鈴木 央一

奥井 伸宜

川原田光典

田中 信壽

新国 哲也

1. はじめに

国土交通省は、「産学官連携による高効率次世代大型車両開発促進事業（以下、「次世代事業」という。）を、平成 14 年度より開始した「次世代大型車開発・実用化促進プロジェクト」の第 5 期として、令和元年度から 5 年度にかけて実施している（図 1）。交通安全環境研究所はその中核的研究機関として、企業や大学などの協力を得て事業を推進している。令和 4 年度から、カーボンニュートラルに資する 3 つのテーマを新規に開始した。それらを含めた現在実施中のテーマを表 1 に示す。テーマ数が 13 あるが、これは事業名に「産学官連携」とあるように、第 5 期では第 4 期までと比較して多くの大学が事業に参画したことによるものである。

本次世代事業については、フォーラム 2020、同 2021、2022 にて概要や一部テーマの途中経過などについて紹介してきた。本報では、これまで取り上げてこなかったテーマに加えて、令和 4 年度に開始したテーマのうち重量燃料電池車（FCV）の燃費試験に関するテーマで得られた成果を紹介する。

2. 事業の成果について

本事業で第 5 期当初より実施しているテーマのうち、電動技術及び車両技術に関するテーマ、令和 4 年度より開始した重量 FCV の燃費試験に関するテーマに関して実施した試験結果等を報告する。

2. 1. 大型車に適用するための高効率化技術開発及び性能評価

ディーゼルエンジン等を搭載する一般の重量車では、車体前方にエンジンがあり、その後ろのトランスミッションを経てプロペラシャフトにより後部に動力を伝え、デファレンシャルギア等を介して後輪を駆動するエンジン及び動力伝達機構の基本形が確立している。それに対して、モータを動力源とする場合には、こうした基本形から大きく異なるレイアウトが可能となる。伝達機構も、プロペラシャフトを用いることなく、モータと変速機を車軸と

運輸部門におけるCO₂排出量の約4割を占める大型車分野に関し、産学官連携のもと、電動化技術や内燃機関分野等の開発促進の強化を図り、2050年カーボンニュートラルの実現に貢献する。

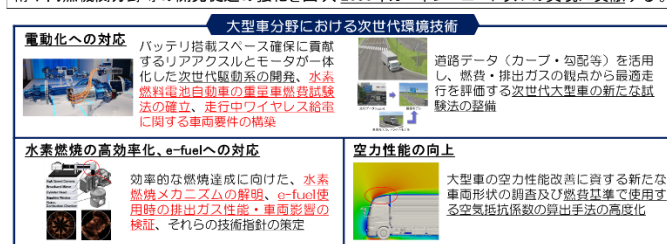


図 1 次世代事業の概要

表 1 次世代事業で推進中のテーマ

テーマ名	本報において
大型車に適用するための高効率化技術開発及び性能評価	成果の一部を紹介
重量車の空力性能改善に関する調査	成果の一部を紹介
道路データを活用した新たな重量車評価手法の検討	✓（別報）
重量車のパワートレイン改良による電費向上効果の検討	✓
(R4開始) 大型車に適用する走行中ワイヤレス給電システムの検討	
過渡反応・吸着・拡散・固体尿素の挙動解析に基づくSCR触媒システムの高機能化	✓
還元剤濃度の能動的制御による尿素SCR触媒システムの浄化性能向上の調査	✓
(R4開始) 重量水素燃料電池自動車の燃料消費率試験法の精緻化に向けた調査	成果の一部を紹介
大型ディーゼル機関において画期的熱効率向上を実現するための冷却損失低減技術に関する調査	✓
ディーゼルエンジンの壁面熱伝達に及ぼす燃焼スケールの影響解明とその知見に基づく高熱効率燃焼法に関する調査	
すす及び燃料起源デポジット生成の化学及び物理過程の解明とそのモデル化	
ガスエンジンにおけるノッキング発生メカニズムの解明とその知見に基づく高熱効率燃焼法に関する調査	✓
(R4開始) e-fuel実用化に向けた実車両への影響調査	関連内容をボスター①で紹介

（「✓」は既報にてその時点での成果の一部を紹介）

一体化することにより、高いスペース効率が得られる全く新しいものが考えられる。

こうした背景に基づいて、本テーマでは電動トラックの高効率化に向けて、モータと一体化した高効率動力伝達機構（以下、「eAxle」という）の技術開発や評価を行っている。

本事業において開発、評価中の eAxle の概略を図 2 に示す。重量車では、積載量や用途のバリエーションが非常に広いのが特徴である。EV トラックを考えたとき、それぞれの重量カテゴリーでその重量に見合った異なる出力のモータを使用するよりも、乗用車等で利用可能なものを複数個搭載することで部品を共通化しトータルの開発工数削減や低コスト化を図ることが有効である。ここでは、車両総重量 14.5t、最高出力 191kW レベルの車両を想定したものとして、2 モータで 1 軸を駆動するものとしている。

高効率化に向けた検討結果の一つとして、モータから車軸に至るギア比の検討結果を表 2 に示す。モータは組込時の搭載要件を満たす連続最大出力 93kW の汎用品とした。そのモータで eAxle を駆動させて実走行サイクルを走行させたシミュレーション結果である。注目されるのは、もっとも効率が良かったのは set 3 の両モータを同じギア比にした場合ではなく、むしろギア比を変化させた場合となっていることである。ギア比を低くすると同一車速におけるモータ回転数が低くなり効率が良い傾向になる一方で、ギア比が低いと発進時のトルクが低下し性能確保が難しくなるのと合わせて変速回数が増える背反がある。それに対して、中間的な一律のギア比にするよりも、いわば効率重視と発進性重視の役割分担をした 2 つのギア比とした方が総合的に効率改善につながることを示している。

これらの検討結果を基に、令和 3～4 年度にかけて現物の試作を行い、現在その試作機を用いた評価試験を進めている。評価試験の結果の一例として、オイルの吐出状況と各部のオイル流量について机上計算と実測を比較したものを図 3 に示す。各部にほぼ設計通りのオイルが供給されていることがわかる。また、別途ギアの歯当たり評価においても、異常な歯当たりはないことが確認されている。潤滑や歯当りに問題があると、実運用で焼き付きを起こすなどのトラブルにつながるが、こうした懸念はなく、適切な設計と試作が行われたことが確認できた。

今年度の最終とりまとめに向けて、実機での総合効率の評価や、規制値は満足するものの必ずしも良好な結果でなかった NV（騒音、振動）のさらなる改善を実施している。

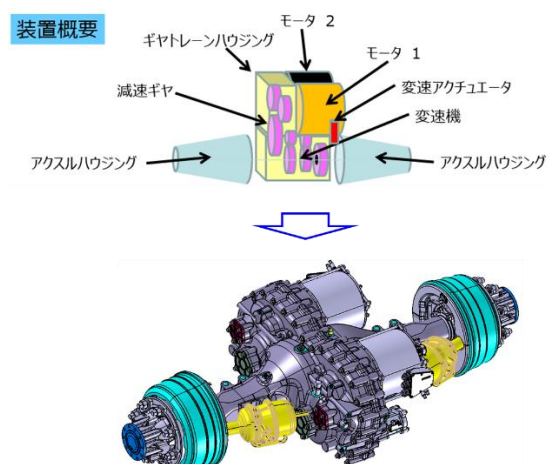


図 2 次世代事業で開発を進める eAxle の概要

表 2 eAxle における最適ギア比算出結果

ギア比	モーター1		モーター2		エネルギー効率 kWh/100km	変速回数 回
	ギア1	ギア2	ギア1	ギア2		
Default	35.103	13.826	44.754	17.628	70.8416	547
set 1	36.700	13.201	42.600	15.324	70.8951	521
set 2	33.750	14.104	45.550	19.035	70.8894	545
set 3	39.650	14.107	39.650	14.107	71.1264	492

《評価風景》 オイル吐出方向と流量測定

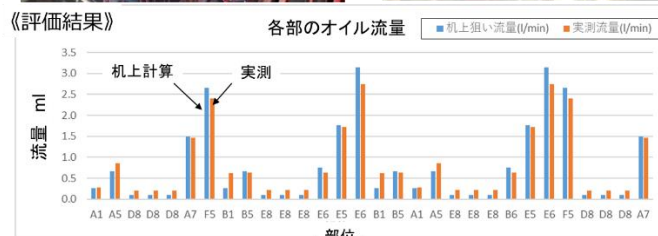
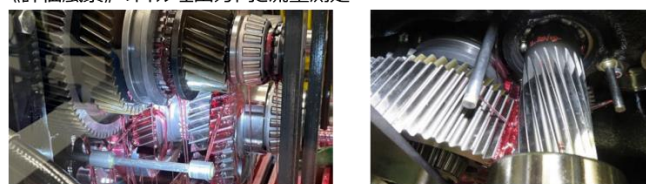


図 3 実機でのオイル吐出状況とオイル流量の机上計算と実測の比較

2. 2. 重量車の空力性能改善に関する調査

大型トラック等においては、前面投影面積（主に全幅×全高）が大きい上に高速走行頻度が高いため、空気抵抗が燃費に及ぼす影響が大きい。例えば 14t 積載の大型トラックが 80km/h 一定で走行するとすると、必要な仕事の約 6 割が空気抵抗によるものとなり、空気抵抗を低減できれば大きな燃費向上効果がある。一方で、限られた寸法の範囲内で最大限の荷室容積を確保する必要があるため、形状的な自

由度は非常に限られ、空気抵抗の低減は容易でない。そうした背景を受けて、重量車の 2015 年度燃費基準における試験法 (JH15) では、トラック等における走行抵抗はメーカー間の違いなどは比較的小さいとして、空気抵抗係数は寸法などから算出した計算値となっていた。それに対して、同 2025 年度基準の試験法 (JH25) ではメーカーの改善努力が燃費に反映できるよう実測値とすることになっている。しかしながら、空気抵抗が大きいということは、それだけテストコース等で実測する場合に風の影響を受けやすいことを意味し、実車を用いた計測は容易でなく、JH15 で計算値を用いた理由の一つにもなっていた。

そこで本テーマでは、空気抵抗を低減させる形状の検討に加えて、車両の空気抵抗係数 (Cd 値) を数値流体力学 (CFD) から求めることができるか、という視点の調査研究を進めている。

CFD を用いた計算例としてピッチングの影響の計算結果を示す。車両モデルは実車の実寸を詳細に反映したものである (図 4)。計算格子は、トラック車体面では格子幅 1.09375cm とするなどにより、格子数は 98,934,784 に及んでおりスーパーコンピュータを用いて計算を行っている。

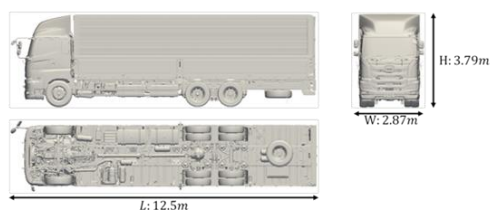


図 4 車両モデル

図 5 は通常の姿勢に対して、ピッチング -0.5° 及び -0.7° (それだけ前傾姿勢となっている) の時の Cd 値を比較したものである。流速は 22.22m/s (80km/h 相当) である。 $0.5\sim 0.7^{\circ}$ のピッチングは積載や加減速による姿勢変化として十分起こりうるものである。このレベルのピッチングでも約 2 割 Cd 値が増加し、空気抵抗に大きく影響することがわかった。空気抵抗を測定する手法として惰行試験が挙げられるが、数値計算で惰行試験と同じ Cd 値を得るためには、惰行時のピッチング運動を考慮する必要があることが示された。

今年度はこれまで実施している変動風の影響に加えてヨー角 (車両に対して角度を持つ=斜めに吹く風) の影響などの調査し、Cd 値を CFD を使って求めるために考慮すべき事項を明らかにしてとりまとめる予定である。

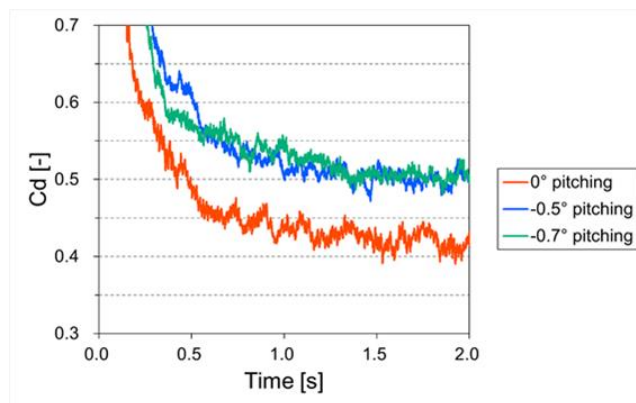


図 5 ピッチング角度の Cd 値への影響

2. 3. 重量 FCV における水素消費量測定の精緻化に関する調査

重量 FCV における燃費試験法は、世界に先駆けて 2022 年に策定された¹⁾。しかしながら、測定実績は乏しく、精度を確保しつつ実際に運用可能なものとしていくには引き続き検討が必要な状態にある。軽・中量 FCV における水素消費量測定は試験前後のボンベ重量差から水素消費量を算出する重量法で評価されるのに対し、重量 FCV ではフォーラム 2022 で紹介したとおり²⁾ 重量法による評価が困難であると考えられることから、水素流量を流量計により直接測定する手法 (流量法) の活用が望まれる。そこで、重量法と流量法による水素消費量の相関について調査するため、ボンベガスで一定圧力と流量を流す基礎試験及び実車を用いたシャシダイナモ試験を実施した。ここでは、シャシダイナモ試験の結果の一部を紹介する。なお、試験に用いたのは燃料配管加工の都合上乗用 FCV とした。

重量車における燃費評価では、2つの手法があり、一つは車両と同じパワートレインシステムをベンチ上に立ち上げ、そこでモード走行と等価な運転を行って評価を行う「パワートレ法」、もう一つはパワートレイン各要素の燃費に係る特性データをマップ状に取得して、モード走行と同じ走行を行った場合の各要素の値を ECU に入力してその制御値に沿った燃費を計算より求める「HILS 法」である。パ

ワトレ法による評価を行う場合、試験サイクルを走行するのと等価な過渡的な変化のある測定となるのに対して、HILS 法による測定では、燃料電池スタックの各出力ごとの水素消費量を取得することとなり、定流量を流し続ける状態で測定が行われることになる。それらを考慮して、シャシダイナモ試験ではパワトレ法を想定した試験サイクルにおける測定と、HILS 法を想定した一定速度走行の試験を実施した。

測定結果を図 6 に示す。上が各試験サイクル、下が一定速度走行における重量法と流量法による水素消費量の相関を示したものである。いずれも高い相関を示しており、流量法でも重量法に近い精度で評価が可能であることを示している。その上で、傾き、相関係数 (R^2) のいずれも一定速度走行時の方が 1 に近い値となっており、定常状態より高い精度で測定されたということが出来る。

精度が良いとした一定速度走行時の誤差原因として、ポンベの切り替えに伴う圧力変化や流量計の測定時間の同期ずれなどが影響していることがわかっているが、それらは水素消費の絶対量が多い試験サイクル走行時には影響度が小さくなる。にもかかわらず、試験サイクル時にバラツキがやや大きくなった原因は現時点では明らかでない。流量が過渡的に大きく変化する場合に精度が確保できるのか、などがポイントと考えられるものの、重量法では実時間的な流量はわからないため解析は容易でない。他の流量計あるいは異なる手法（例えば車両信号の活用）で測定を行うなどにより試験サイクル走行時のばらつき原因などについて、今後考察を進めていく。

3. まとめ

令和元年度より実施している「産学官連携による高効率次世代大型車両開発促進事業」の現況として一部テーマの成果を紹介した。本報でも取り上げた「大型車に適用するための高効率化技術開発及び性能評価」等 2019 年度に開始した調査研究テーマは今年度とりまとめる予定である。次年度以降については、令和 4 年度に開始した調査研究テーマに加えて、図 1 にある水素燃焼の高効率化などについてテーマ化すべく勉強会を実施するなど検討を行っている。国土交通省及び有識者等と連携して有意義な

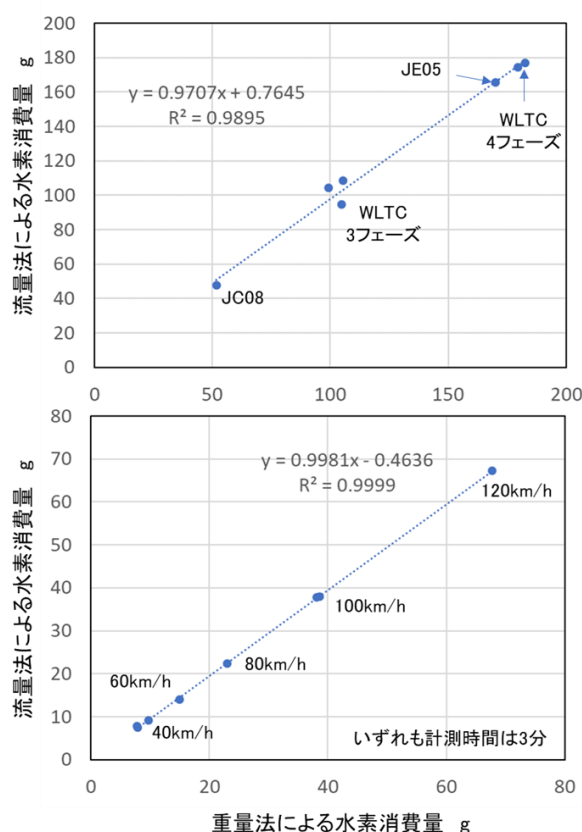


図 6 シャシダイナモ試験における各走行状態における水素消費量の測定についての重量法と流用法の相関

事業として継続して実施していけるよう取組んでいきたい。

4. おわりに

本事業は委託元の国土交通省自動車局車両基準・国際課をはじめ、実施内容などを審議いただく検討会、WG を構成する委員の先生方、個別の調査研究を実施いただいている企業、大学の研究者各位の協力と献身の上に成り立っていることを記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 道路運送車両の保安基準の細目を定める告示別添 41VII
- 2) 鈴木ほか, “産学官連携による高効率次世代大型車両開発促進事業の現況について”, 交通安全環境研究所フォーラム 2022, (2022)

講演 3. 自動車認証審査部における審査の概要について

自動車認証審査部 鈴木 延昌

1. はじめに

自動車を購入し使用する際は、その自動車が安全面や環境面での基準に合致していることを運輸支局等で行われる検査により一台一台確認することになっているが、この検査を効率的に行うため、自動車、共通構造部及び自動車装置（以下「自動車等」という。）が安全・環境基準に合致しているか否かを販売前の段階で確認する「型式指定制度」が設けられている。

自動車認証審査部（以下「審査部」という。）は、型式指定制度の一環として、自動車等の安全・環境基準への適合性の確認を行う機関であり、近年は、まだ基準が定められていない先進技術の性能評価も行っている。

自動車等の審査は、基準に適合しない自動車が市場に出回ることを防止することを目的としており、厳正に行うことは当然であるが、併せて、自動車は技術革新の進展が著しく、また、国際的な流通を念頭に置いた商品であることに鑑み、合理的に行うことも必要である。

ここでは、昨今の審査部の取組を概説する。

2. 自動車認証審査部の業務実績

2. 1. 審査型式数等の実績

2022 年度の審査部における審査型式数は、自動車にあつては 2,120 型式（前年比 242 型式増）、自動車装置にあつては 775 型式（前年比 194 型式増）となっている（図 1）。

このうち、国連の「車両等の型式認定相互承認協定（1958 年協定）」に基づく、日本政府による装置型式指定認可証（E43）発行については、概ね国内で使用される突入防止装置及び大型後部反射器を除くと、2022 年度は 339 件（前年度比 218 件増）であった。

また、メーカーの設計・開発をより円滑に進めるため、審査業務に先立ち試験等を行う先行受託試験

については、2022 年度は 253 件（前年比 12 件増）の受託があった。

2020 年度は燃費・排出ガス規制の JC08 モードから WLTC モードへの切替に対応するための申請が多かったこと、また、2021 年度からはトラック・バス等が共通構造部型式指定制度に移行したことから、2021 年度以降については、それまでと比較して審査型式数が減少したと考えられる。

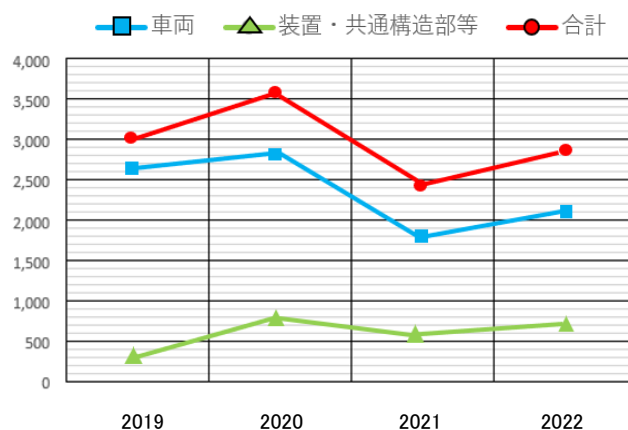


図 1 審査型式数の推移

2. 2. 新規導入基準の審査

新たに導入されることとなった以下の基準に関して、規制適用日に先立って審査を開始した。

- ・施錠装置（協定規則第 161 号）
- ・イモビライザ（協定規則第 162 号）
- ・盗難発生警報装置（協定規則第 163 号）

2. 3. 先進安全技術の性能評価試験実績

政府が推進している「安全運転サポート車」の普及啓発のため、2018 年度に創設された先進安全技術に係る国の性能認定制度に基づき、性能評価試験を審査部にて実施している。当初導入された乗用車の衝突被害軽減ブレーキ（対車両要件）に加え、2020 年度より、対歩行者要件、ペダル踏み間違い急発進抑制装置の性能認定要件が新たに追加された。これ

らの試験について、2022 年度の実績は申請自動車メーカー数は 8 社 評価型式数 124 型式であった。



図 2 衝突被害軽減ブレーキ性能評価試験の様子

2. 4. 特定改造等に係る審査の実績

2020 年 11 月に特定改造等許可制度が施行され、申請者が特定改造等を適確に実施するに足りるかどうかを審査する能力審査、プログラム等の改変により改造された自動車の保安基準適合性審査を開始した。

2022 年度は特定改造等能力審査を 1 件、特定改造等に係る保安基準適合性審査を 25 件実施した。(※特定改造とは自動運行装置等のプログラムの改変・改造により自動車保安基準に適合しなくなるおそれのあるもの)

3. 審査体制の構築に係る取組

審査部では、中立・公正な審査を実施するため、基準の制定及び改正等の機に、審査手法の確立、職員の研修、さらに必要に応じて施設の整備を行い、審査体制を構築している。

3. 1. 新たな排出ガス・燃費基準への対応

排出ガス低減装置を新規検査時には作動させる一方で、実際の走行時には意図的に作動させないようにするシステムを用いた排出ガス不正事案が平成 27 年に発覚したことを受け、その再発防止策の一環として車載式排出ガス測定システム (PEMS) を用いた路上走行時の排出ガス試験 (RDE) が導入され、2022 年 10 月以降の製作車より新たに適用されることとなった。

本試験においては、実際の路上において様々な条件での走行試験による排出ガスの測定を行い、測定された窒素酸化物の規制値を台上試験における規

制値の 2 倍以下とすることなどが定められている。

これらの試験を実施するために必要となる審査機器等の導入を行うとともに、職員研修を通じて審査を適切に実施できるよう準備を進めた。



図 3 路上走行時の排出ガス試験研修の様子

3. 2. 自動車試験施設の整備

自動車試験場等において、国際基準の強化に対応するために各種試験施設等の整備を行った。

サイバーセキュリティ及びソフトウェアアップデート基準の適合性を適切に審査するために、専用の審査施設を建築し情報管理区域及び管理システムの構築を行うとともに、車両要件を確認するための試験設備を導入するなど新たに整備することにより、審査体制の強化に加え、申請者の利便性向上のための取り組みを行った。

4. まとめ

自動運転技術等の複雑で高度な新技術の導入・普及やサイバーセキュリティをはじめとする新たな視点からの基準の導入に伴い、審査に必要な知識・技術レベルが高まっている。また、基準の国際調和や IWVTA に基づく相互承認など、審査業務の国際化の必要性も増しているところである。

このような中、審査部は、適切な審査体制の保持・整備を通じて業務を確実に実施し、認証審査制度の信頼性の向上及び自動車の安全確保、環境保全等を図っていくとともに、自動車産業の成長にも十分貢献できるよう努めていく所存である。

講演 4. リコール技術検証部における業務の概要について

リコール技術検証部

真下 一則

1. まえがき

交通安全環境研究所では、国土交通省と連携して、自動車に関する安全性の確保、環境の保全のための取り組みについて、自動車の設計から使用段階までを総合的に対応するなど、国の施策に対して一体となった貢献を行っている。

リコール技術検証部では、使用段階の自動車に関して、国土交通省物流・自動車局審査・リコール課と連携して、道路運送車両法において定められているリコール制度に基づき、自動車メーカー等による自動車の設計又は製造に起因する不具合へのリコール等の対応が適切に行われるよう、業務を行っている。

リコールとは、自動車又はタイヤ、チャイルドシートについて、道路運送車両の保安基準に適合していない、又は、適合しなくなるおそれがある状態で、その原因が設計又は製作過程にあると認められるときに、自動車メーカー等が、保安基準に適合させるために必要な改善措置を行うことをいう。

これらの業務は、本フォーラムのテーマ「社会の変化と交通の変容に向けた対応」として、激変する社会においても欠かせないものであるところ、本稿では、これらのリコール技術検証部における業務の概要について紹介する。

2. リコール技術検証部の業務の概要

リコール技術検証部では、国土交通省物流・自動車局審査・リコール課と連携して、ユーザーからの自動車に関する不具合情報等を分析するとともに、これらの不具合が、自動車の設計又は製造に起因して法令上の基準（道路運送車両の保安基準）に不適合となるおそれがあるものであるかどうか、また、そうである場合に、どのような対応を行うことが妥当であるかなどについて、技術的な検証（以下「技術検証」という。）を行うことを主な業務としている。

以下、これらの業務の各段階における対応について概要を説明する。

2. 1. 不具合情報分析

2. 1. 1. ユーザーからの不具合情報等の分析

リコール技術検証部では、国土交通省において収集した、ユーザー等からの自動車に関する不具合情報、メーカーから報告された事故・火災情報、警察や消防等の関係機関からの不具合情報について、国土交通省からの委託を受けて個別事案及び傾向の分析などを行っており、その件数は表 1 のようになっている。

表 1 不具合情報分析件数推移

情報の種類	H30	R1	R2	R3	R4
ユーザーからの不具合情報	3,313	3,458	3,811	3,509	3,231
メーカーからの事故・火災情報及び不具合情報	5,010	4,787	4,504	5,894	5,665
その他（警察、消防、消費者庁等）	713	702	552	402	429
計	9,036	8,947	8,867	9,805	9,325

2. 1. 2. 事故・火災車両の調査

自動車の不具合原因が設計・製造に起因するかどうかの判断材料を迅速に収集するため、実際に事故や火災が起きた車両について確認する車両調査を国土交通省等の行政機関と連携して実施しており、その調査件数は表 2 のようになっている。

表 2 事故・火災車両の調査件数の推移

年度	H30	R1	R2	R3	R4
事故	20	15	10	22	23
火災	56	48	43	47	42
合計	76	63	53	69	65

2. 1. 3. 排出ガスに係る不具合・不正の調査

排出ガス低減装置に関する不具合や、不正ソフトの使用の有無を確認するため、市場からの抜き取り調査（サーベイランス）を実施している。

サーベイランスは、リコール技術検証部が図 1 の車載式排出ガス測定システム（PEMS）を使用して、従来の排出ガス測定方法であるシャシーダイナモメー

タによる測定に加えて、路上走行等による排出ガス測定を行い、双方の排出ガス値に乖離がないかを確認するなどにより、排出ガス低減装置に関する不具合や不正ソフトの使用の有無を確認している。



図1 車載式排出ガス測定システム (PEMS)

2. 1. 4. 検査時の不具合情報の活用

自動車の検査時における不具合情報については、自動車技術総合機構の検査部門と連携し、検査部門で発見した不具合情報を共有している。

また、検査時の車両部位別の不適合率が高い自動車を抽出し、把握することにより、ユーザー等からの不具合情報との関係を確認できるようにしている。

2. 1. 5. 不具合情報確認の効率化

ユーザー等から提供された不具合情報の分析を効果的に実施するためには、過去のものも含め不具合情報を網羅的に確認し、参照することが重要となるところ、これを効率的に実施するため、令和3年度に、自動車の不具合情報等を検索するためのシステムを構築し、令和4年度から運用している。

2. 2. 技術検証

国土交通省では、ユーザー等から提供された自動車に関する不具合情報について、リコール技術検証部での分析結果を踏まえつつ、メーカーでの調査結果の報告を求め（道路運送車両法（以下「車両法」という。）63条の4）、その報告等の分析により不具合が設計・製造に起因するおそれがあると判断した場合、リコール技術検証部へ技術検証の依頼が行われる（車両法63条の2）。

リコール技術検証部では、国土交通省からの依頼により、メーカーから国土交通省に報告された上記の不具合情報に関する調査結果等について、技術検証を行い、その結果を国土交通省へ通知する。技術検証のためにメーカーへの確認が必要な場合は、国土交通省を通じて再度メーカーからの調査報告を求めることになる。

このようにして不具合発生事案に関して可能と考えられる確認が一通り行われたと認められる場合、技術検証を終了し、国土交通省にその結果を通知する。

メーカーからリコール届出が出された不具合事案に対しても、再発等が疑われる場合やリコールの対象範囲の妥当性が疑われる場合には、不具合に関して実施する場合と同様に、国土交通省からの依頼を受けてリコールの妥当性に関する技術検証を行う（車両法63条の3）。

過去5カ年の間に行った技術検証について、各年度において開始した技術検証事案数、終了した技術検証事案数及びリコールに繋がった事案数は表3のようになっている。

メーカーによるリコール等の市場措置に関して、リコール技術検証部における自動車の不具合分析からの技術検証が貢献してきていることがわかる。

表3 技術検証の実績

年度	H30	R1	R2	R3	R4
開始した技術検証事案数	200	132	92	67	69
終了した技術検証事案数	97	141	107	97	94
リコールに繋がった技術検証事案数	11	17	21	16	9
（参考）メーカーから国土交通省へのリコール届出件数全体	408	415	384	369	383

2. 3. 技術検証のための実験の実施

リコール技術検証部では、技術検証の過程において必要となった場合は技術検証のための実験を行っている。また、技術検証に必要な知見の蓄積を目的とした実験にも取り組んでいる。これらの実験（以下「技術検証実験」という。）のテーマ数の推移は表4のと

おりであり、毎年のテーマ数は 10 件程度となっている。

その中で、近年、重点的に知見を蓄積しようと取り組んでいるものとしては、車両火災に関する実験と先進安全自動車に関する実験が挙げられる。

表 4 技術検証実験のテーマ数の推移

年度		H30	R1	R2	R3	R4
実験テーマ総数		10	10	10	11	10
内訳	個別事案の検証	3	3	2	1	2
	知見の蓄積	7	7	8	10	8
	うち、火災関係	3	4	1	2	2
	うち、ASV 関係	4	5	5	5	2

※「先進安全自動車(ASV：Advanced Safety Vehicle)」とは、先進技術を利用してドライバーの安全運転を支援するシステムを搭載した自動車のことをいう。

2. 3. 1. 火災に関する実験

車両火災については、消防庁の公表データ²⁾によれば、表 5 にあるとおり、年間約 3,500 件程度起きており、そのうち、出火原因が「その他（不明・調査中含む）」が約 58%程度を占めている。また、当部が参加した車両調査においても、出火原因の特定に至らなかった事案が多々ある状況である。このような状況を踏まえ、車両火災の原因究明を図るべく、車両火災に関する実証実験を実施している。

今年度においては、ロングライフクーラント、スス、オイル等の混合物の燃焼に関する実験を行うことにより、車両火災に係る知見を蓄積した。

表 5 車両火災の主な出火原因（令和 3 年）

出火原因	件数
排気管	531
放火（放火の疑いを含む）	235
電気装置	254
交通機関内配線	316
たばこ	152
その他（不明・調査中含む）	2,024
計	3,512

2. 3. 2. ASV に関する実験

ASV については、その実用化に向けて官民が連携して

推進しているところであり、衝突被害軽減ブレーキについては普及が進んでいるなかで直進のみならず右左折時に対応するものもでてきている。また、運転支援技術が高度化した自動運転レベル2の運転支援システム(システムが前後及び左右の車両制御を実施。)を搭載した自動車が近年急速に普及している。

これらの運転支援システムは、ドライバーによる運転の支援を行うものではあるものの、その挙動によっては交通事故につながるおそれがある。このため、各自動車メーカーの車両に搭載される運転支援システムについて各種実験を行い、その特性を把握していくこととしている(図2、図3)。



図 2 自動運転レベル2運転支援システムの調査
(交差点での衝突被害軽減ブレーキの機能確認(右折))



図 3 自動運転レベル2運転支援システムの調査
(アダプティブ・クルーズ・コントロール(ACC) 機能確認)

2. 3. 3. 適切な使用の啓発方法検討のための実験

ユーザーから提供される不具合情報において、ユーザーが自動車の使用に関して適切に認識できていないことによる事故等の事案が発生する懸念があることがうかがえることから、自動車の機能・性能に関する確認のための実験を行うとともに、その結果を踏ま

えてユーザーに対して懸念点と自動車の適切な使用方法を理解してもらえようとするための伝え方の検討を実車の実験により行い、「ユーザーへの啓発ビデオ」としてまとめている。令和4年度は、電動車と従来車の加速・減速時の特性に関するビデオをまとめた（図4）。

これらの啓発ビデオは国交省のホームページで公開されている。



図4：令和4年度にまとめたビデオの1シーン

<参考文献>

- 1) 消防庁「令和4年版消防白書」
- 2) 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」（令和3年6月28日）

2. 4. 海外の不具合対応機関との連携

自動車に関する不具合情報分析、技術検証等のリコールに係る業務を効果的かつ効率的に進めるため、海外におけるリコール関係機関との意見交換等を行うこととしている。

国交省と連携しつつ、日本と同様に自動車メーカーが多い国の当局との情報共有、意見交換等を行っていくこととしている。

3. 終わりに

近年、自動車には、社会的なニーズから新技術が次々と導入され、またそれらの普及率が急速に高まっている。例えば衝突被害軽減ブレーキの乗用車（新車）については、装着割合が既に令和元年には93.7%に達し²⁾、令和3年11月には国産車への義務付けが開始されている。これにともない自動車の新技術の不具合も増加していくことが予想されるため、リコール技術検証部としては、これまで以上に先進技術に対応した検証を行えるようにしていくこととしている。

このような新たな技術に関する不具合情報の収集・分析をより適切に行えるようにすることで、「社会の変化と交通の変容に向けた対応」に不可欠である安全性の確保、環境の保全等に向けて尽力していきたいと考えている。

口 頭 発 表 11. 2

交通システム研究部における研究の概要と方向性

交通システム研究部

佐藤 安弘

1. まえがき

交通安全環境研究所は、日々の生活や経済活動に欠かせない自動車及び鉄道等の陸上交通について、国の施策に直結した試験研究業務を通じて、安全・安心の確保及び環境の保全に貢献するための取組を進めている。

その中で、交通システム研究部は、鉄道、LRT（Light Rail Transit：次世代型路面電車システム）等の交通システムに係る安全及び安定輸送の確保に貢献するため、省コストで安全性の向上を図ることができる事故防止対策の検討、国内外の動向を踏まえた新たな交通システム・設備・車両の技術評価等を実施している。また、地域交通の維持・活性化、高齢者や交通弱者の移動の安全・安心の確保、自動車と鉄道等の技術連携など、陸上交通の総合的な安全・環境に関わる様々な課題について、自動車・鉄道の双方を所管する当研究所の特長を生かした分野横断的な研究にも取り組んでいる。

本稿では、当研究部が実施している最近の取組の概要について報告する。

2. 交通システム研究部の研究

2. 1. 研究重点分野

自動車技術総合機構の令和3年度から令和7年度までの中期計画において、当研究部では、行政ニーズやこれまでの研究成果等を踏まえ、以下の3つの柱を研究重点分野として取り組んでいる。

- (1) 新技術を用いた交通システムに対応する安全性評価
- (2) 列車の安全運行や施設の維持管理の省力化に資する技術の評価
- (3) 新技術を含む公共交通の地域に応じた導入促進評価

この各重点分野において、1つ又は複数の研究テーマを立てて、研究に取り組んでいる。以下、各重点分野ごとに現在の取組を紹介する。

2. 2. 新技術を用いた交通システムに対応する安全性評価

本重点分野では、新たな技術を用いた交通システムの安全性に関し、信頼性も考慮した的確な評価を行うため、国内外の動向を踏まえた評価手法の研究を行い、交通システムの海外展開を含む導入促進に貢献することを目指している。

具体的には、海外プロジェクト向け列車制御システムの安全性評価等を受託研究として実施しており、我が国の鉄道における安全確保の考え方に立脚しつつ、国際規格との調和や信頼性にも着目した評価手法について、標準化・体系化に取り組んできた。最近では、国内外で活用できる安全性評価の体系化を図るため、列車制御システム等に対応した評価支援ツールの導入について検討を進めている。また、踏切道がある等の一般的な鉄道路線で新たな装置や技術を活用した自動運転の導入が我が国で検討されており、こうしたシステムの安全性の評価に対応できるよう、安全性評価における課題の整理や自動運転の評価基準に活用可能なデータの収集などを進めている。

このほか、電磁放射に関する安全性の確保のため、これまで検討を行ってきた鉄道車両のほかに検討対象を広め、発生する磁界の測定・評価手法及び低減方策について継続的に調査を行うこととしている。

2. 3. 列車の安全運行や施設の維持管理の省力化に資する技術の評価

本重点分野では、各種センサ技術や状態監視技術に着目し、列車の安全運行や施設の維持管理の省力化等に資する技術の評価を行い、低コストでの輸送の安全確保を前提とする地方鉄道・索道等の維持に

貢献することを目指している。

脱線事故の防止等走行安全性の確保のため、鉄道車両や施設の適切な維持管理が極めて重要であり、近年低コスト化、高性能化が進んでいる各種センサ技術や状態監視技術に着目し、施設の維持管理の省力化等に資する技術の評価に取り組んでいる。最近では、営業列車において小型情報端末を活用した動揺計測に基づき、軌道状態の要注意箇所を把握し監視する手法について、これまでの上下動揺に加え、左右動揺等と軌道検測データとの関係性の把握により検討を進めている。また、走行安全性に直結する車輪／レール接触力のモニタリングについては、摩耗進展に伴い変化する車輪／レール形状が走行安全性に影響することから、摩耗進展に注視が必要な曲線を営業列車によるモニタリングデータから把握する方法について検討を進めている。

また、ロープウェイやリフト等の索道については、観光立国の実現に向けたスノーリゾートの形成に関する取組や都市部への導入など近年の社会情勢変化を踏まえ、索道施設の維持管理の省力化等に資する技術の評価に取り組んでいる。具体的には、運転中の索道において異常を検知し、運転の停止や点検整備に活用するための搬器動揺のモニタリング方法について検討を進めている。

一方、将来に向けて一層の保守負担軽減、省コスト化を図るには、軌道回路等の地上設備に頼っている列車の位置検知を車上主体に置き換え、地上設備を削減・省力化することが求められる。このため、準天頂衛星、GPS（Global Positioning System：全地球測位システム）等の衛星測位技術を活用して列車の位置検知を行う車上システムに対する評価を目的として、衛星測位の健全性を確認するための方法や、測位精度が低下する地点等において衛星測位を補完するための他のセンサを併用するシステムの性能評価手法について検討を進めている。

このほか、自動車・鉄道の双方にかかる分野横断的な研究として、主に地方鉄道を対象に、列車の接近を知らせる装置が無い踏切等における自動車と列車との衝突事故防止に資する低コストな安全性向上策の技術要件に関する検討を進めている。

2. 4. 新技術を含む公共交通の地域に応じた導入促進評価

本重点分野では、超高齢化・人口減少等の社会情勢の変化に対応し、共生社会での新たなモビリティ

サービスを指向した技術及び既存の交通との連携や利便性等の観点を踏まえた公共交通導入評価手法に関する研究を行い、地域の特性に適した公共交通の整備に貢献することを目指している。

LRT は、地下鉄・高架鉄道に比して乗降における上下移動が少なく、高齢化社会が進展する中で交通弱者にも利用しやすい軌道系交通システムである。その一方で、既存の道路空間に併用軌道として導入する場合には、車線減少や交差点での信号制御の変更などによる道路交通流への影響が考えられる。このため、路線バスなどを含む道路交通及び LRT などの軌道系交通を模擬したシミュレーションによる評価を行い、LRT の導入効果や道路交通流への影響等について、CO₂ 排出量など環境への影響も含めた定量的評価をこれまで行ってきた。

近年では、電動で、時速 20km 未満で公道を走る 4 人乗り以上のモビリティ「グリーンスローモビリティ」の活用が推進されている。既存の交通では日常の移動が困難な地域を主な対象として、人口分布や住民の移動先となる施設の位置情報などをもとに、こうした新たなモビリティの導入が有効となる地域の評価手法等について検討を進めている。

3. 今後の展開

交通システム研究部では、新技術を用いた交通システムに対応する安全性評価、列車の安全運行や施設の維持管理の省力化に資する技術の評価、新技術を含む公共交通の地域に応じた導入促進評価を重点分野として研究に取り組んでおり、これらの研究を通じて、国の施策の支援や、安全で持続可能な交通社会の実現に貢献している。

今後も、新たに開発されたシステム等の安全性評価を継続的に実施することとしており、自動運転用技術、列車制御システム、車上列車位置検知技術をはじめとする、新たな技術を用いた交通システムの安全で円滑な導入に貢献していく。また、列車の安全運行や施設の維持管理の省力化に資する技術の評価を通じた地方鉄道・索道等の維持のほか、地域の特性に適した公共交通の整備に貢献できるよう、当研究所が有する研究資産と、これまで培ってきた技術力を活用しつつ、自動車・鉄道の双方を所管する当研究所の特長を生かした研究に積極的に取り組んでいきたいと考えている。

講演5. スローモビリティの有効性評価手法の開発

交通システム研究部

※小林 貴 大野 寛之

1. はじめに

近年、中山間地や過疎地等における公共交通手段として、小型で低速なスローモビリティが着目されている。特に、グリーンスローモビリティ（GSM：Green Slow Mobility）は、全国で実証実験が行われており、実用化が期待されている。GSMは小型で低速であるために、利用可能な人数や運行する距離において制約がある。中山間地等の公共交通手段がなく日常の移動が困難な地域にGSMによる公共交通手段の導入を検討する際に、導入の有効性に関する評価が必要となる。当研究所では、運行距離面・需要規模面及びコスト面から導入の有効性を評価する手法を検討したので報告する。本手法では、容易に入手可能な情報（人口分布、日常移動が必要と想定される施設の位置情報）から、移動困難な移動需要を推測し、移動需要をもとに、有効性の事前評価を行う。

2. 評価手法の構築方法

2. 1 GSM導入のために必要な情報の整理

ここでは、自治体や交通事業者がGSMを導入するための検討ステップと、検討に必要な情報を整理し、本手法で出力すべき項目を整理する。

第一段階として、移動困難地域に関する問題意識の認識がある。これには、対象とする地域が移動困難な地域である事実の認識が必要であり、その情報源として、住民の要望や自治体職員の土地勘などが挙げられる。一般に、自治体の職員は移動困難地域がどこに存在しているかを認識していることが多く、第一段階の情報収集に関しては問題無いと考えられる。

第二段階として、移動困難地域の潜在的な移動需要の把握が必要となる。つまり、どこからどこまでどのくらいの人数の住民が移動に困っているかといったことである。この点を把握するためには、アンケート調査やパーソントリップ調査等の大規模な調査が必要となるが、中小の自治体にはこれらの調査を行うことがリソース的に難しい現状がある。簡便に需要を把握するために有用な情報として、人口分布と施設の位置情報が挙げられる。一般に、日

常の移動に困っている移動の出発地は居住地で、目的地は日常移動が必要と想定される施設である場合が多い。そのため、人口分布と施設の位置情報を用い、ある程度の移動需要を推測することができると考えられる。第二段階については、移動困難地域の潜在的な移動需要の把握手法¹⁾を開発している。この手法では、人々の居住地分布、施設の位置情報から、徒歩、電車・バスなどの公共交通、自身が運転しての自家用車の順に、アクセスが難しい移動需要の抽出を行っている。

第三段階として、GSMの有効性の事前評価が必要となる。ここでは、推計した潜在需要からGSMの供給可能輸送力や運行距離面での有効性、コストや採算上の有効性を評価する必要がある。GSMは20km/h程度の低速であるため、運行ルートが長くなる場合サービス水準を低下させてしまう懸念が生じる。また、GSMは乗車人数が4~10人程度の小型なモビリティであるため、対応可能な移動需要の規模の制約が生じる。GSMは比較的安価に導入することが可能であるが、そもそも移動需要も少ないため、維持するための採算面の評価が不可欠となる。それには、導入する台数やルート数、運行頻度など導入時の大まかなサービス水準に関する情報が必要となるため、移動需要からある程度のサービス水準を仮定した上でコスト面の評価を行う必要がある。

本稿では、上記第三段階（移動困難な地域に対するGSMによる移動手段の供給可能輸送力、運行距離及びコストから見た有効性）に適用する手法について報告する。

2. 2 GSMの有効性の事前評価方法

(1) 運行距離面の有効性の評価方法

GSMは20km/hの低速での走行となるため、長距離の運行には適さない。そのため、運行距離面での有効性を評価する必要がある。運行距離面での有効性を評価するにあたり、出発地エリアが広く目的地エリアが狭い場合やその逆の場合、出発地から目的地の距離が長い場合等、出発地と目的地の位置関係が多様である。地域によっては出発地内で別途ル

ート設定する場合等が想定される。ここでは、出発地内走行距離 SPL、目的地内走行距離 GPL、出発地目的地間走行距離 SGL、及び総道路延長 L により以下の条件でルート数を決定する。

- ・ルート数 1 となる場合は、 $L < 6\text{km}$ の場合のみ
- ・ルート数 2 となる場合は、以下の 2 通りとする
 $\text{SPL} + \text{SGL} < 6\text{km}$ かつ $\text{GPL} < 3\text{km}$
 $\text{SPL} < 3\text{km}$ かつ $\text{SGL} + \text{GPL} < 6\text{km}$
- ・ルート数 3 以上となる場合は GSM 不適とする
 6km を基準とした理由は 20km/h で走行する 1 台の GSM で 1 時間に 3 本運行可能な距離として設定した。出発地内走行距離 SPL の定義は出発地内の道路延長 $\times 0.5$ 、目的地内走行距離 GPL の定義は目的地内の道路延長 $\times 0.5$ と仮定する。出発地目的地間走行距離 SGL の定義は出発地の中心から目的地の中心までの最短経路の延長、総道路延長 L の定義は $\text{SPL} + \text{GPL} + \text{SGL}$ とし、これを移動需要距離とする。

(2) 需要規模面の有効性

GSM は乗車人数が 4～10 人程度の小型なモビリティであるため、供給可能な輸送力の制約が生じる。つまり、需要量が大きくなると需要をさばききれず多くの台数を導入する等のコストが増加し、利用者便益を低下させてしまう懸念が生じる。この点を評価するために、以下の条件で導入する車両のタイプ（乗車人数）と台数を決定する。

GSM には 4 人乗り、6 人乗り、10 人乗りの大きく 3 タイプがあるため、一運行あたりの希望旅客人数の切り上げ値が 4 以下の場合は 4 人乗り (GSM04)、5 以上 6 以下の場合は 6 人乗り (GSM6)、7 以上 10 以下の場合は 10 人乗り (GSM10)、それ以外の場合は GSM 不適合とする。

一運行あたりの希望旅客人数は、式(1)により一時間あたりの移動需要人数に GSM 移動原単位を乗じ運行頻度で除して算出する。運行頻度は移動需要距離の往復距離を 20km/h で走行すると仮定した場合の移動時間の逆数により算出する。

$$\begin{aligned} & \text{一運行あたり希望旅客人数}[\text{人/本}] \\ &= \text{一時間あたり移動需要人数} \times \text{GSM 移動原単位} \\ & \quad \div \text{運行頻度} \cdots (1) \end{aligned}$$

ここに、一時間あたり移動需要人数[人/h]は徒歩、電車・バス、自家用車での移動が難しい移動需要人

数[人/日]の推計値 η を 1 時間あたりに換算した値、GSM 移動原単位[%]は移動需要人数中の移動発生量の割合、運行頻度[本/h]は一時間あたりの運行本数を表す。

(3) 導入・維持コスト面の有効性

移動困難地域に交通手段を導入する際、維持可能な程度の採算が得られるかが非常に重要な課題となる。現状、ほとんどの実証実験において国の補助金により導入・維持されている状況であり、事業化に至るケースが少ないことの原因の一つに採算面の課題があると考えられる。ここではコスト面の有効性について、GSM を導入した場合の移動需要一人・一ヶ月当たり負担額による評価方法を示す。

導入による総費用の試算は、表 1 に示す導入初期費用、維持費用、諸雑費の合計とし、導入する車両のタイプ別に設定する。これらの車両のタイプ別の費用は日本各地で実施されている実証実験の事後評価より全国平均を入力している。初期費用は車両の償却期間を 5 年として 5 年毎に発生するものとし、維持費及び諸雑費は毎年発生するものとする。

導入タイプは、上述した一運行あたりの人数により決定されるタイプとする。導入台数は、必要なルート数分導入するものとする。ルート数は、運行距離面の有効性を検討する際に算出されるルート数を用いる。

表 1 初期・維持費用の項目

項目	細目	費用		
		GSM10	GSM06	GSM04
初期費用	車両本体、登録費用			
	広告費	16	6	4
	冬用タイヤ等		[百万円/台/5 年]	
維持費	運転手人件費			
	運行管理費			
	保険料			
	車検費用	1	0.7	0.6
	修繕		[百万円/台/年]	
	運行委託料			
諸雑費	電気代			
		0.5	0.3	0.1
			[百万円/台/年]	

3. GSMの有効性の評価結果

図1にGSMが運行距離面・需要規模面で有効と評価された箇所の全国の分布と一部地域の拡大図を、図2に、GSMを導入した場合の一人・一ヶ月あたりの負担額の試算結果を示す。

図1の図中の線の色は一人・一ヶ月あたりの負担額（赤：1万円以下、緑：1-2万円、青：2-5万円、紫：5万円以上）を表している。茶線は移動困難な潜在需要ではあるが、運行距離面・需要規模面において有効でないと判定された潜在需要である。灰色の濃さで移動困難な目的地数を表し、赤メッシュの多角形は凡例の5つの目的地を含む最小の目的地群を表す。図2の点の色は図1の線の色と対応しており負担額を、点の形は車両タイプとルート数の組み合わせを表している。凡例部分に一人・一ヶ月あたりの負担額区分ごとの移動需要の累積割合を示している。

図1より、中山間地では一人・一ヶ月5万円以上負担の地域（紫）が多く、都市部周辺付近に一人・一ヶ月1万円未満の地域（赤）が多い事がわかる。

図2凡例部分の移動需要の累積割合最下行より全ての移動困難な移動需要の44.9%において、運行距離面・需要規模面からGSMが有効であった。

一日あたりの移動需要人数が7人以上かつ移動需要距離が6km以下の地域（A）において一人・一ヶ月あたり2万円程度負担することで導入可能となる。その中には6人乗りのGSM06を選択することが有効な地域（A-1）や10人乗りのGSM10を選択することが有効な地域（A-2）がある。いずれも需要人数が多いほうが一人・一ヶ月あたりの負担額が低くなる（右側に負担額が低い赤点が分布）。一日あたりの移動需要人数6-7人以下になると一人・一ヶ月あたりの費用負担が大きくなる。

一日あたりの移動需要人数が12人以上かつ移動需要距離が5km以下の地域（B）で月1万円以下の負担で導入が可能となる。一日あたりの移動需要人数が30人以上の地域において6人乗りのGSM06が有効となる地域がある（B-1）。30人以上の箇所においても移動需要距離が3km以下程度の短い距離の地域（B-2）では4人乗りのGSMでも有効となる場合がある。これは、距離が短いために運行頻度を増やすことができるためである。移動需

要人数が50人を超えると10人乗りのGSM10が有効な地域（B-3）となる。

4人乗りのGSM04は、6km以上（C）になるとルート数が増えるため一人・一ヶ月あたりの負担額が高くなる。

2万円以下の条件で導入可能な地点は全移動困難な潜在需要の内3%程度であり、限られた地域であることがわかる。しかしながら、図示はしていないものの導入可能な地域における移動困難地域と目的地のペアは、全国に3400箇所程度存在する。

以上、GSMの有効性の可視化により、GSMの導入を検討する際に運行距離面・需要規模面及びコスト面での有効性を簡便に評価可能となる。

4. まとめ

本研究では、移動困難な地域にGSM等の低速なモビリティによる移動手段の供給の可能性を評価するために、人口分布、日常移動が必要と想定される施設の位置情報から、人・物流の発生する可能性のある潜在需要を推定し、GSMの供給可能輸送力や運行距離の制約に適した地域を示す手法を開発した。

開発した手法により評価を行った結果、次の2点を明らかにした。

第一に、全移動困難な潜在需要の45%程度において、運行距離面・需要規模面からGSMが有効である。

第二に、コスト面では、2万[円/月/人]以下の条件で導入可能な地点は移動困難な潜在需要全体の内3%程度であり、限られた地域であることがわかる。限られた地域ではあるが、全国に3400箇所程度存在する。

今後の課題として次の3点を上げる。

第一に、移動需要人数が少ないために一人あたりの負担額が大きく、導入が現実的でない地域が多く見られた。これらの地域には更に小さなパーソナルモビリティ等が有効である可能性があるため、今後検討が必要である。

第二に、高齢者は病院に行くことが多い等、目的地は年齢や性別といった個人属性、移動目的、時間帯によって異なると考えられる。GSMの導入を具体化するためには、これらを考慮した詳細な移動需要の推計を行う必要がある。

参考文献

- 1) 小林貴ら, “新技術を含む公共交通の地域に応じた導入促進評価のための移動需要推計に関する検討”, 交通安全環境研究所フォーラム 2022, PP.21-24

- 2) NAVITIME, <https://www.navitime.co.jp/> (アクセス日 2021 年 8 月)
- 3) 国土数値情報
<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-mesh500h30.html> (アクセス日 2022 年 4 月)

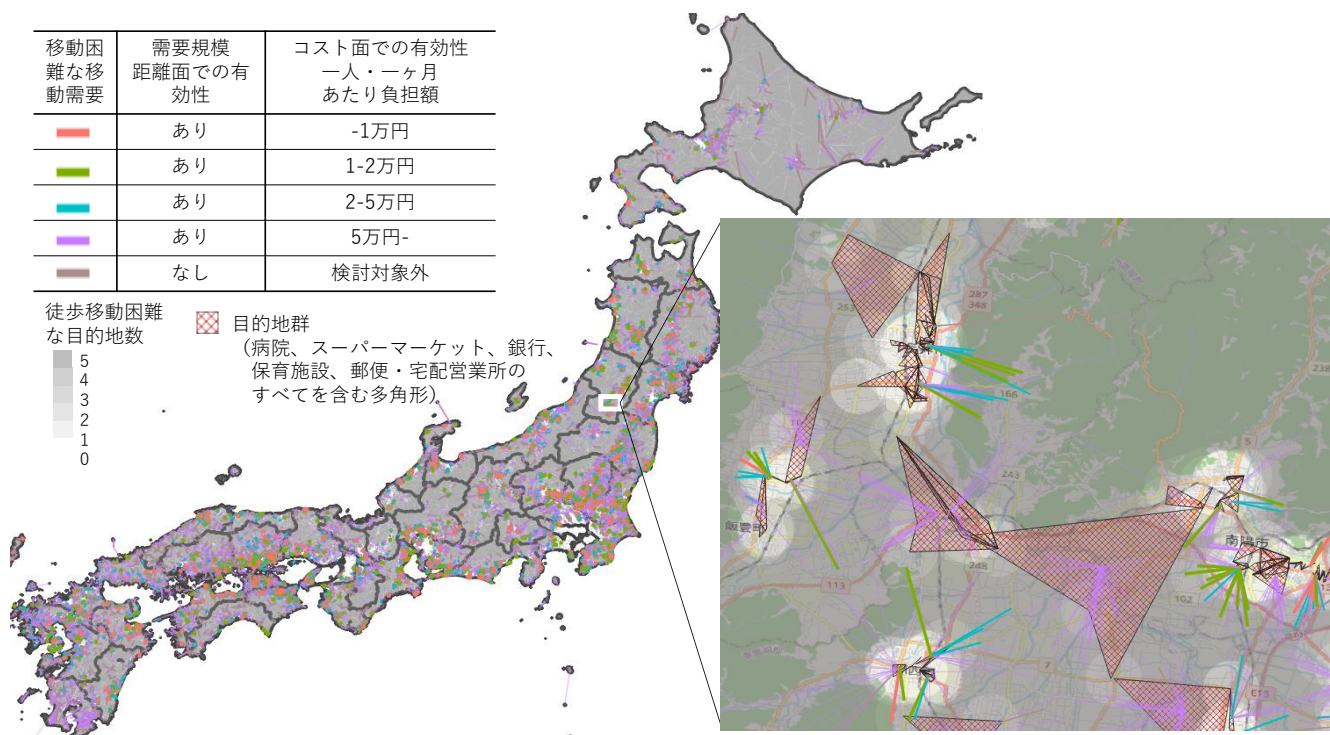


図1 運行距離面・需要規模面から GSM が有効な潜在需要の分布

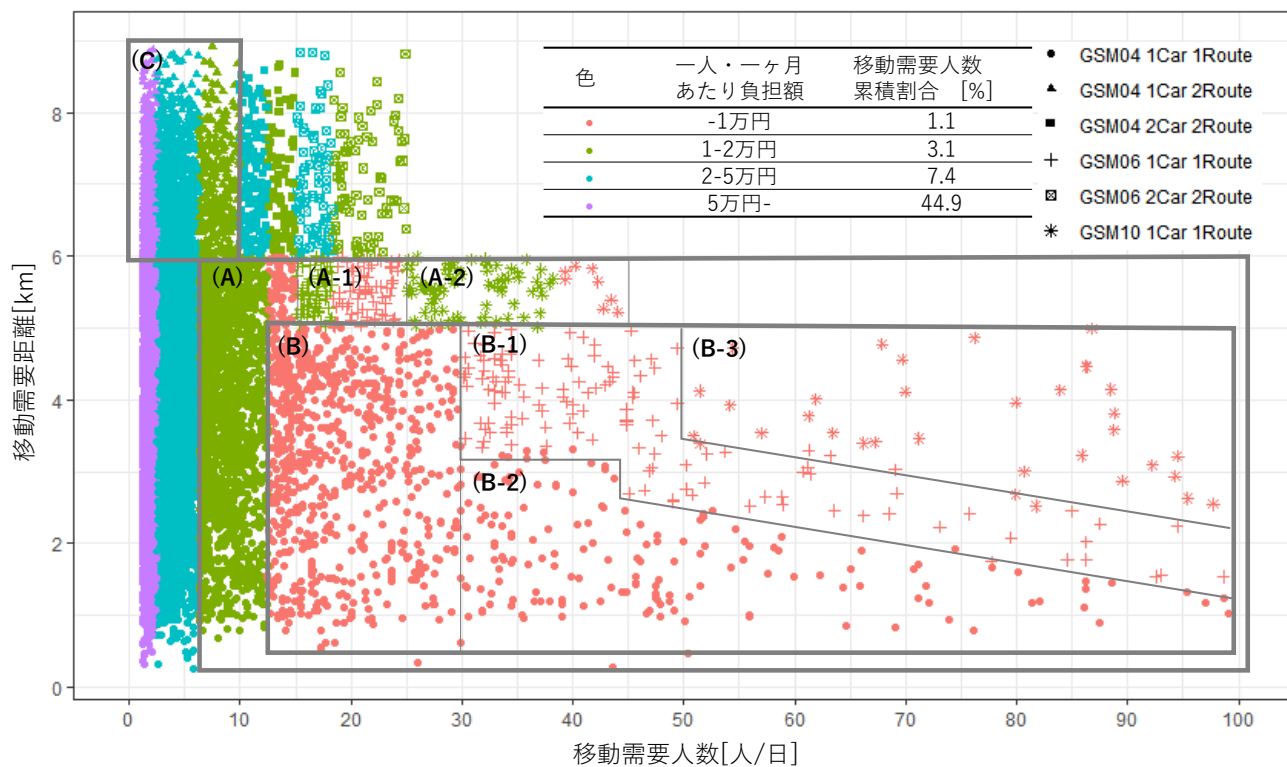


図2 GSM を導入した場合の一人・一ヶ月当たりの負担額

講演 6. LiDAR センサを利用した列車の位置検知手法の検討

交通システム研究部

※望月 駿登

工藤 希

山口 大助

1. はじめに

鉄道における列車制御システムは、軌道回路等を地上に設置して列車の位置検知を行うが、その維持及び更新に係るコストが鉄道事業者の大きな負担となっている。この負担を軽減するために、軌道回路等を用いない車上主体の新たな列車の位置検知装置として、衛星測位システムを活用する手法が注目されている¹⁾。しかし、衛星測位システムは衛星からの電波を利用するため、トンネル等により電波が受信できない地点では測位できず、また高層ビル等によって電波が反射することにより生じるマルチパスを含む電波を受信する地点では、測位精度が低下する懸念がある。そのため、筆者らは衛星測位システムのみでの位置検知では一定の測位精度が確保できないと考え、衛星測位システムを補完するために、LiDAR(Light Detection And Ranging)センサを利用した位置検知手法を提案した²⁾。その実験の結果、列車の位置を特定するために軌道内に設けた固有地点を走行中に認識することは困難であった。そこで、走行中に固有地点を認識できるようにするために、LiDAR センサが検知したデータへの補正手法を考案し、実車による実験結果を基に位置検知手法の実現可能性を検討したので報告する。

2. LiDAR センサを用いた列車の位置検知手法

2. 1 LiDAR センサ

使用した LiDAR センサは、非反復走査を用いて本体からレーザ光を照射し、物体からの反射光を受光する。これにより、物体からの反射光の強さ及び LiDAR センサを原点とする物体までの 3 次元の位置を一つのデータのまとまりとして連続的に出力することができる³⁾。そこで、LiDAR センサは他の装置からの電波及び通信を使用しないため、衛星測位システムで一定の測位精度が得られない地点において、衛星測位システムを補完するセンサの一つとして活用できる可能性があると考えた。

2. 2 列車の位置検知手法の概要

列車の位置検知手法²⁾を図 1 に示す。本手法では、LiDAR センサの物体からの反射光の強さとそ

の物体の位置を出力する機能を利用する。まず、光が入射した際に光源に向かって反射する物体(以下、「ターゲットマーカ」という)を複数用意する。次に、ターゲットマーカの配置を変えて緯度・経度等の位置情報と紐付けを行い、軌道内の固有地点にそれぞれ固有の配置のターゲットマーカを設置する。そして、車上に取り付けた LiDAR センサが検知した個々のターゲットマーカの座標データ(以下、「LiDAR 検知データ」という)により、設置されたターゲットマーカの配置を認識する。さらに、その認識した配置を車上のデータベースと照合して得た位置情報と、LiDAR センサからターゲットマーカまでの距離から列車の位置を特定する手法である。

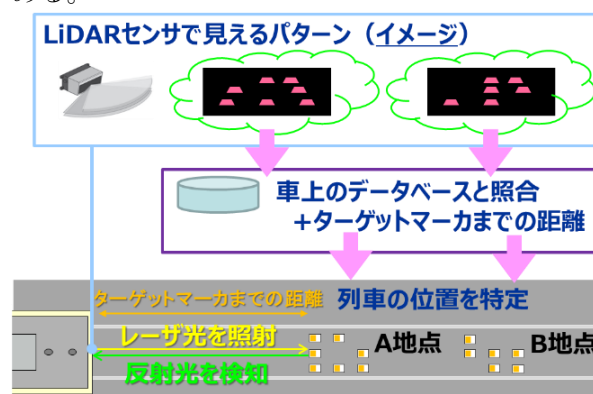


図 1 列車の位置検知手法

2. 3 LiDAR 検知データの補正手法

本手法による列車の位置検知は、任意の時刻における LiDAR 検知データを用いて行う。しかし、LiDAR センサを車上に取り付けると、列車が移動することに伴い LiDAR センサの位置も移動する。よって、走行中の異なる時刻においては、同じ物体を検知しても異なる LiDAR 検知データを取得することとなる。そのため、LiDAR センサがデータを取得してから列車の位置検知を行うまでの列車の移動距離を用いて、LiDAR 検知データを列車の移動後の位置に補正する必要がある。具体的には、式(1)に基づいて、各 LiDAR 検知データを列車の移動後の位置に補正する。ここで、列車の位置検知は周期 $T[s]$ で行うこととし、データ数を確保するため

に、 b 秒前までの LiDAR 検知データを使用する。次に、 c 周期目の列車の位置検知を行うとき($cT[s]$)に使用する各 LiDAR 検知データに対して、データを取得したとき($cT - t_b[s]$): t_b は b 秒までの任意の時間($0 \leq t_b \leq b$)からの列車の移動距離を、その間の走行速度($v(t)[km/h]$)を積分することにより算出する。そして、算出した列車の移動距離を使用して、 $cT - t_b[s]$ のときに取得した LiDAR 検知データの進行方向の座標($x_{cT-t_b}[m]$)を、列車の移動後の LiDAR 検知データの座標($x_{cT}(t_b)[m]$)に補正する。

$$x_{cT}(t_b) = x_{cT-t_b} - \int_{cT-t_b}^{cT} \frac{v(t)}{3.6} dt \dots (1)$$

LiDAR センサがデータを取得してから列車の位置検知を行うまでの時間(b)を短くすると、その時間内における速度の変化は小さくなるため、列車の位置検知のときの速度($v_{cT}[km/h]$)で列車が等速に移動するとみなせる。よって、LiDAR 検知データの補正は式(2)のように近似することができる。後述の 5.3 節においては、図 2 のように式(2)を用いて LiDAR 検知データを補正する。

$$x_{cT}(t_b) = x_{cT-t_b} - v_{cT}/3.6 * t_b \dots (2)$$

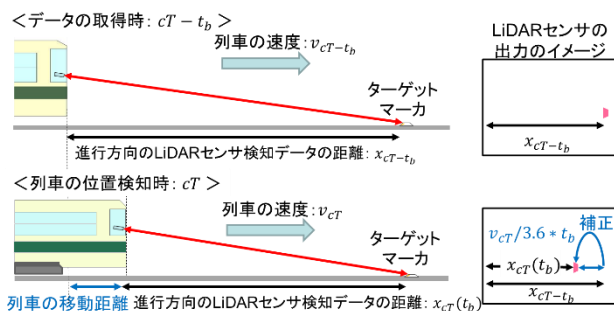


図 2 LiDAR 検知データの補正

3. LiDAR センサを用いた列車の速度検知手法

式(2)は速度を用いて補正を行うため、他の手法を用いて走行速度を検知する必要がある。速度発電機等の他のセンサを用いて走行速度を検知する手法も考えられるが、本手法では LiDAR センサのみで走行速度を求める手法を提案する。

3. 1 列車の速度検知手法の概要

列車の速度検知は周期 $T_v[s]$ で行うこととし、その周期ごとに b_v 秒前までの LiDAR 検知データを使用する。式(3)により速度(以下、「検知速度」という)を算出する。ここで図 3 に示すように、進行方向において、 c_v 周期目の速度検知を行うとき($c_v T_v[s]$)の

LiDAR センサから LiDAR 検知データの重心までの距離($M_{c_v T_v}[m]$)と、そのときから 1 周期前($(c_v - 1)T_v[s]$)の LiDAR センサから LiDAR 検知データの重心までの距離($M_{(c_v-1)T_v}[m]$)との差分距離を算出する。そして、その差分距離を速度検知の周期(T_v)で除することにより検知速度($v_{c_v T_v}[km/h]$)を算出する。ただし、LiDAR 検知データの重心の算出が行えない状況での検知速度は $0km/h$ とする。

$$v_{c_v T_v} = 3.6 * \frac{M_{(c_v-1)T_v} - M_{c_v T_v}}{T_v} \dots (3)$$

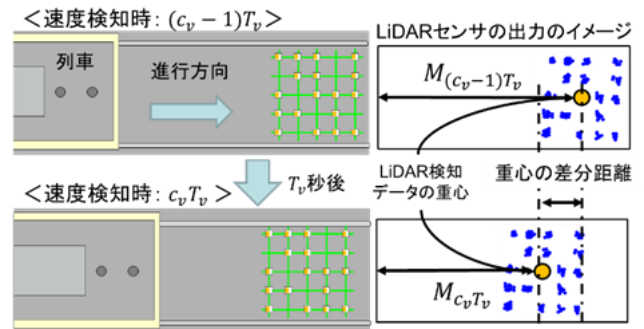


図 3 速度検知手法

3. 2 検知速度の平滑化

LiDAR センサは検知範囲の情報全体を取得するまでの時間(以下、「露光時間」という)が長いセンサもあり、その情報全体を使用することを検討する場合、 b_v を増加させる必要がある。一方、 b_v を増加させると、2.3 節と同様に LiDAR センサの移動に伴い、検知速度にも影響が生じる。また、露光時間を短くすると、LiDAR センサの検知範囲においてターゲットマーカーを検知しない、または一部のみを検知することとなり、検知速度に急な変化が生じる場合がある。本手法では、LiDAR センサを取り付ける車体に急な加速及び減速がないことを前提とし、露光時間より短い時間内の LiDAR 検知データを用いて速度検知を行うため、移動平均フィルタの使用を検討した。移動平均フィルタは式(4)に示すように、入力データ($x[i]$: i はデータの順番)を含め、一定数(n)の過去の入力データを用いて、それらのデータの平均($y[i]$)を出力するものである。このフィルタの入力を検知速度、出力を走行速度とすることで、急な検知速度の変化を抑制することができる。考える。(ただし、式(4)より、 $i - k < 0$ の入力データ $x[i - k]$ は 0 とする。)

$$y[i] = \frac{1}{n} * \sum_{k=0}^{n-1} x[i-k] \dots (4)$$

4. 実車による実験

提案手法の実現可能性を検討するため、路面電車の営業線において実験を行った²⁾。また、3章の走行速度の精度評価には、衛星測位システムの数値データをリファレンスとして使用することとした⁴⁾。

4. 1 LiDAR センサの車両への取付け

運転席から進行方向に向かって左側に LiDAR センサを軌道面から高さ 1870mm、車体中心から 279mm の車内に仮設した。また LiDAR センサの取付角度は 12.5 度とした²⁾。

4. 2 ターゲットマーカの配置

図 4 のように、250mm の格子状に 3 つのパターンのターゲットマーカを設置した。各パターンを路面電車が通過した時の衛星測位システムの数値データを表 1 に示す。また、パターン 1 は走行速度を変化させて 2 回の実験を行った。

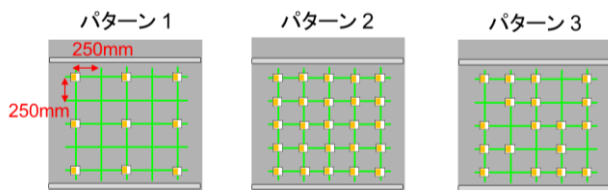


図 4 ターゲットマーカの配置図

表 1 衛星測位システムの数値データ

	ターゲットマーカの通過速度
パターン1 ①	36.6km/h
パターン1 ②	9.6km/h
パターン2	36.1km/h
パターン3	25.3km/h

4. 3 列車の位置検知及び速度検知手法の仕様

本実験に用いた列車の位置検知及び速度検知手法の主なパラメータを表 2 に示す。本研究で使用する LiDAR センサにおける検知範囲の 98% の情報を得るための露光時間が 0.5 秒³⁾であることから、速度検知の周期から移動平均フィルタのデータ数を

表 2 使用するパラメータ設定

	位置検知	速度検知
各検知を行う場合の LiDAR センサから LiDAR 検知データの重心までの距離	5 ~ 6m	5 ~ 30m
検知周期	$T = 0.02s$	$T_p = 0.02s$
各検知時より前に取得したデータが使用可能な時間	$b = 0.1s$	$b_p = 0.1s$

25 とし、検知速度に対して移動平均フィルタを 2 回使用した出力を本手法の走行速度とした。

5. 本手法の評価

5. 1 速度検知手法の速度安定距離

3.1 節より、LiDAR 検知データの重心を算出できない状況が続いた場合は移動平均フィルタの入力には 0 が連続する。よって、その状況の直後に速度検知を開始すると、移動平均フィルタは過去の入力である 0 を用いて走行速度を出力することとなる。したがって、本手法の走行速度が実際の走行速度に近づくためには、移動平均フィルタに入力される検知速度と、使用する過去の検知速度が同等程度になるまでの入力数が必要となる。また、表 2 の本実験のパラメータから、少なくとも速度検知を開始して (30m 手前) から位置検知を行うまで (6m 手前) の 24m 以内に、本手法の走行速度が実際の走行速度に近づく必要がある。本手法では図 5 に示すように、速度検知を開始してから走行速度の増加量が 0 となるまでの LiDAR 検知データの重心までの距離を速度安定距離とした。表 3 に各実験での速度安定距離の結果を示す。各パターンにおける列車の走行時の速度安定距離は 24m 以下であるため、2.3 節の補正をする際に使用する走行速度に、本手法で得られた値を適用することが可能であるといえる。また、走行速度が速くなると速度安定距離が増加する傾向にあるが、対象線区として路面電車(最高速度が 40km/h)を想定すると、本手法で求めた速度を使用することが可能であると考えられる。

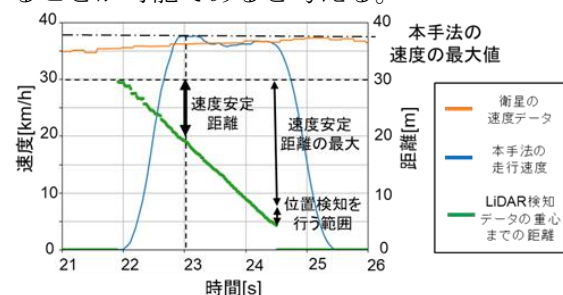


図 5 パターン 1 ①の速度安定距離

表 3 走行速度と速度安定距離との関係

	走行速度の増加量が0のとき		速度安定距離
	本手法の走行速度	衛星測位システムの数値データ	
パターン1 ①	37.6km/h	36.2km/h	10.3m
パターン1 ②	13.1km/h	12.8km/h	3.86m
パターン2	36.3km/h	35.0km/h	10.2m
パターン3	28.0km/h	25.3km/h	8.12m

5. 2 走行速度の精度

走行速度の速度誤差は、本手法と衛星測位システムの速度データとの差の絶対値を前提とした。また、評価範囲は表 2 の速度検知を行う範囲(5~30m)と表 3 の速度安定距離の最大が 10m 程度であることから、LiDAR センサから 5~20m の範囲内とした。その評価結果を図 6 に示す。鉄道車両の速度計は JIS 規格に準拠して、デジタル式速度計の誤差は $\pm 2 \sim 3 \text{ km/h}$ を管理基準⁵⁾としているが、本手法の速度誤差は上記前提において、JIS 規格で想定される管理基準の誤差を下回っていることが分かる。

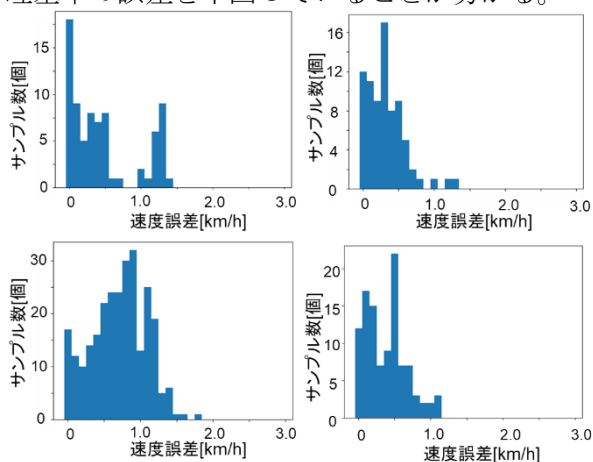


図 6 各パターンの速度誤差の分布

左上：パターン 1 ①、右上：パターン 2
左下：パターン 1 ②、右下：パターン 3

5. 3 ターゲットマーカの認識結果

図 7 にパターン 3 での補正前と補正後の LiDAR 検知データを示す。本図から進行方向におけるデータの広がりを補正することができ、ターゲットマーカの配置を認識可能な見通しを得た。図 8 にパターン 3 以外のパターンの補正結果を示す。走行速度が 35km/h 程度(パターン 1 ①、パターン 2)の場合は、進行方向に LiDAR 検知データが広がる傾向にあり、ターゲットマーカを狭い間隔で設置すると、その配置の認識が困難になることが分かった。

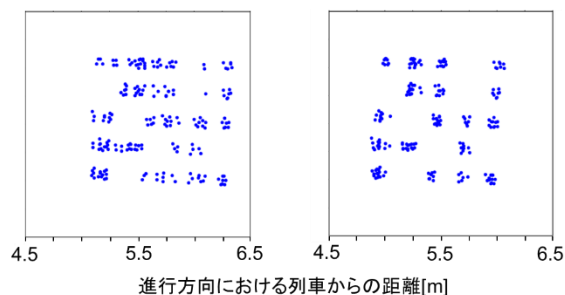


図 7 LiDAR 検知データ(左:補正前 右:補正後)

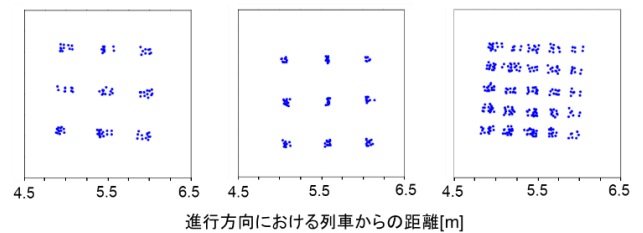


図 8 LiDAR 検知データの補正結果

左：パターン 1 ①、中央：パターン 1 ②
右：パターン 2

6. まとめ

列車の位置検知に衛星測位システムを用いた場合に、一定の測位精度が得られない地点において、LiDAR センサを利用してターゲットマーカの配置を検出する位置検知及びデータ補正手法を提案した。また、本手法の実現可能性を実車による実験を通じて検証した結果、走行速度が 25km/h 程度の場合はその配置を認識可能な見通しを得たが、走行速度が 35km/h 程度の場合は、ターゲットマーカの間隔を広げることで認識が可能になると考えている。今後は、走行速度に応じて必要となるターゲットマーカの間隔について検討していきたい。

謝辞

本稿は広島電鉄株式会社との共同研究の成果の一部をまとめたものです。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 山口大助ほか、“衛星測位による列車位置検知の精度の評価に向けた取組”、交通研フォーラム 2021 講演概要集、pp.23-26
- 2) 山口大助ほか、“LiDAR センサを利用した衛星測位の補完手法に関する検討”、交通研フォーラム 2022 講演概要集、pp.17-20
- 3) 代理店サイト http://www.kobeseiko.co.jp/Livox_Horizon.html
- 4) 浅野 晃ほか、“列車保安制御への GNSS 利用に関する一検討”、日本信頼性学会誌 2018 年 40 巻 3 号、p.159-167
- 5) 国土交通省 速度計等の精度確保に係る実態調査結果について https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/08/081129_.html

講演 7. 営業列車を用いた車輪／レール接触力のモニタリング技術の活用に関する検討

交通システム研究部 ※一柳 洋輔 佐藤 安弘 緒方 正剛 大野 寛之
 茨城大学 道辻 洋平 日本大学 松本 陽 メトロ車両 谷本 益久
 東京地下鉄 伊藤 淳矢 日本製鉄 品川 大輔

1. はじめに

鉄道車両の乗り上がり脱線（車輪が回転しながらレールに乗り上がって脱線するもの）に対する走行安全性に直結する車輪／レール間の接触力を営業列車で常時観測することが可能となったり。これらのデータをもとにして車輪／レール間潤滑状態の時間変化等も捉えられるようになることから、適切な潤滑の管理を可能とするツールの開発に取り組んできた。乗り上がり脱線に対する走行安全性には車輪／レール接触力のほかに、摩耗進展に伴い変化する車輪／レール形状と、潤滑条件に伴い変化する車輪／レール間の摩擦係数とが関係することから、営業列車による車輪／レール接触力のモニタリングデータを活用し、摩耗進展に注視が必要な曲線区間を把握する方法について検討したので報告する。

2. 車輪／レール接触力と潤滑状態の関係

図 1 左部は急曲線走行時の台車の上面図を示す。図 1 右上部は台車の前軸外軌側（曲線外側）の車輪とレールの断面図であり、前軸外軌側車輪はフランジ部でレールと接触し、接触面は水平に対し角度 α_{1out} を有している。車輪とレールの接触点では接触

面に垂直に法線力 N_{1out} 、接触面に平行に接線力が作用する。接線力の横方向成分を横クリープ力 T_{y1out} （図 1 右上部）、接線力の前後方向成分を縦クリープ力 T_{x1out} （前後接線力、図 1 左部）と呼ぶ。横クリープ力は主にアタック角（図 1 左上部）によって生じ、前後接線力は主に左右の車輪の回転半径差によって生じる。なお本報告では記号の添字“1”、“2”はそれぞれ台車の前軸と後軸、“out”と“in”はそれぞれ外軌側と内軌側（曲線内側）を意味する。

図 1 右上部において T_{y1out} と N_{1out} の合力を水平、鉛直方向に分解したものが横圧 Q_{1out} 、輪重 P_{1out} である。車輪フランジ部でレールと接触する台車前軸外軌側の横圧輪重比 Q_{1out}/P_{1out} は脱線係数と呼ばれ、乗り上がり脱線に対する走行安全性に関する指標として用いられる。脱線係数は軌道変位（レールのゆがみ）やレールの支持状態、車輪／レール間の潤滑状態などの影響を受けて変化する。

一方、図 1 右下部のように前軸内軌側車輪は踏面部でレールと接触しており、車輪とレールの接触角 α_{1in} は前軸外軌側に比べ小さい。前軸内軌側における横圧輪重比 Q_{1in}/P_{1in} を κ と呼ぶ。急曲線においてアタック角が大きい前軸では、横方向のすべりが大きいいため、 κ は前軸内軌側の車輪／レール間の摩擦係数に近い値を示す。前軸内軌側の摩擦係数が大きいと、横クリープ力 T_{y1in} が増加する。 T_{y1in} の増加は車軸を通じ前軸外軌側の車輪フランジ部をレールに押し付ける方向に作用し、 N_{1out} および Q_{1out} が増加する、また車輪がレールを乗り上がる方向の力である T_{y1out} も増大する。以上のように前軸内軌側摩擦係数の増加は脱線係数増大の要因となる。

前後接線力 T_x は左右の車輪で同程度の大きさの反対方向の力が発生する。後軸では左右変位が小さく、内外軌間で車輪回転半径差が十分にとれず、前後方向のすべりによる前後接線力 T_{x2in} 、 T_{x2out} が大きくなる。急曲線において後軸で発生する T_{x2in} 、 T_{x2out} は台車の前軸を外軌側に押しつける方向のモ

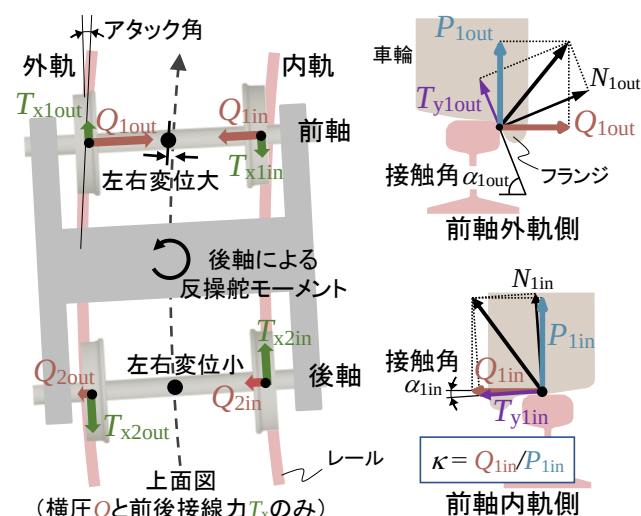


図 1 急曲線走行時の車輪／レール接触力

ーメントとして作用し脱線係数を増加させる。

以上の車輪／レール接触力の発生状況は車輪／レール間の摩擦係数に応じて大きく変化する。そこで、別途実施した車両運動シミュレーションの結果を参考に、以下の4つの潤滑条件について台車前軸の状況を図2で比較する。

条件1：全輪乾燥

条件2：前軸外軌側フランジ部潤滑

条件3：内軌側踏面潤滑

条件4：内軌側踏面，前軸外軌側フランジ部潤滑

条件1では前軸内軌側の摩擦係数が大きいため Q_{lin} と κ が大きい。これにより前述の通り前軸外軌側の横圧 Q_{lout} も大きくなる。また、前軸内・外軌とも摩擦係数が大きいため、前後接線力 T_{x1out} 、 T_{x1in} も大きくなる。

条件2も Q_{lin} および κ は大きい。しかし前軸外軌側フランジ部の潤滑によって前後接線力 T_{x1out} が減少し、 T_{x1in} もそれに釣り合いをとるように減少する。前軸の前後接線力の減少はアタック角を増加させ、 Q_{lin} と Q_{lout} は条件1に比べ大きくなる。

条件3では、前軸内軌側の潤滑によって Q_{lin} および κ は減少し、 Q_{lout} も減少する。前軸内軌側の潤滑によって T_{x1in} が減少し、 T_{x1out} もそれに釣り合いをとるように減少する。この状態から前軸外軌側も潤滑された条件4では、 T_{x1out} 、 T_{x1in} は最も小さい。

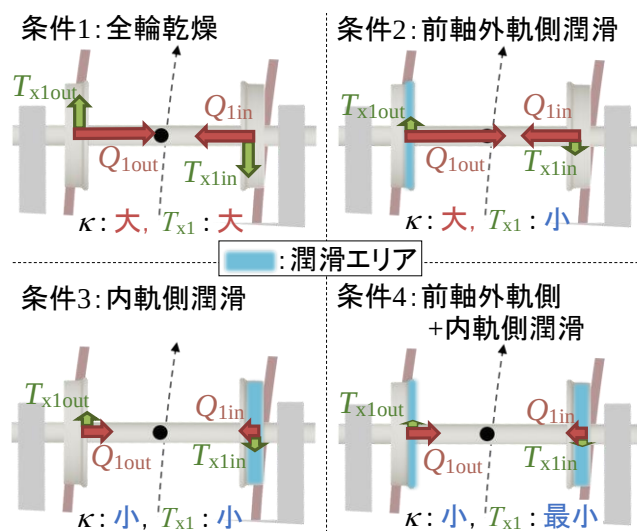


図2 潤滑と車輪／レール接触力の関係

3. 車輪／レール摩擦係数と車輪／レール形状

脱線に対する限界を示す脱線係数「限界脱線係数」は図3に示すとおり、車輪／レール間の摩擦係

数 μ_{lout} や車輪フランジ角 α_{lout} によって変化する。

車輪とレールは、繰り返し走行に伴い摩耗しその形状が変化する。図4には前軸外軌側における車輪／レール接触をシミュレーションした結果を示す。ここでは摩擦係数は同一の条件で車輪とレールがともに新品の状態と、双方がある程度摩耗した状態とを比較している。車輪とレールの摩耗によって接触位置や接触力の発生状況が変化することが分かる。またフランジ摩耗が進展しフランジ角が変化すれば、図3に示すように摩擦係数が同一条件下でも限界脱線係数は変化する。

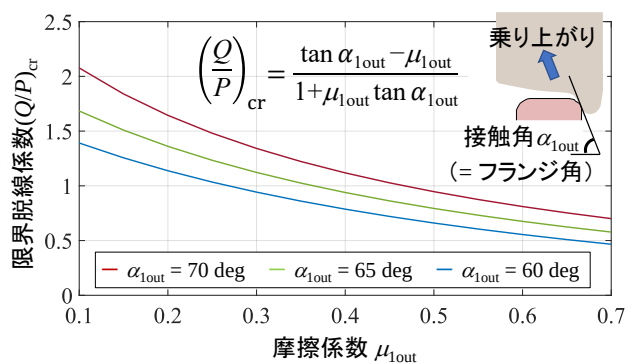


図3 限界脱線係数

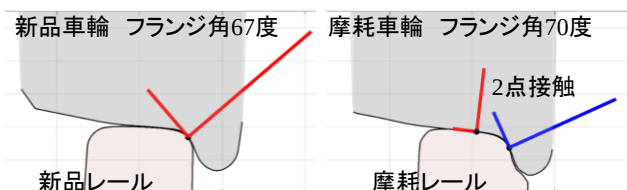


図4 車輪／レール摩耗による接触状態の変化 (接触点における法線力と横クリープ力を図示)

4. 車輪／レール接触力による潤滑状態推定

4. 1 車輪／レール潤滑状態の推定の必要性

輪重、横圧、前後接線力は後述のモニタリング台車で測定でき、脱線係数も把握できる。観測した脱線係数の値が同じでも、摩擦係数が大きいと限界脱線係数は小さくなることから、乗り上がり脱線に対する余裕度が小さくなる。また、摩擦係数は走行安全性のみならず、車輪やレールの急速な摩耗や騒音、振動の発生などに関係する。よって、急曲線においては、車輪とレール間にグリスなどの潤滑材を介在させることで摩耗防止を図る例も多い。しかしながら、過度の潤滑は空転・滑走の誘発や無駄な潤滑材の消費につながるため、潤滑の程度を適切に管

理する必要がある。一方で、潤滑の程度や天候の影響を受けて走行中に時々刻々と変化する摩擦係数は車上で連続的に把握することが困難であるため、一般的には摩擦係数を 0.3 として限界脱線係数を計算し、その限界脱線係数に安全率を見込んだ目安値を用いて走行安全性の評価が行われる。

走行安全性の評価をより精緻に行うためには、車輪／レール間の摩擦係数や車輪／レール形状の実態を脱線係数と併せて把握できることが望ましい。

4. 2 潤滑状態推定のための指標

前述の通り、前軸内軌側の潤滑状態は前軸内軌側の摩擦係数に相当する κ から判別できる。前軸外軌側の潤滑状態については、図2の条件1と2の比較から、前軸内軌側の摩擦係数が同程度であれば T_{x1out} および T_{x1in} の大小で区別できる。しかし条件3と4の比較にみるように、前軸内軌側の摩擦係数が小さいときは T_{x1out} および T_{x1in} は前軸外軌側の潤滑状態の影響を受けるものの、前軸内軌側の摩擦係数が小さいために常に小さい。そのため前後接線力の値単独で前軸外軌側の潤滑状況を推定することは難しい。しかし Q_{lin} にも着目すると、条件3と4では Q_{lin} の大きさに対する前後接線力の変化量が大きい。そこで本報告では前軸内軌側車輪における摩擦力の前後・横成分のバランスにもとづいた指標値として、両者の比 T_{x1in}/Q_{lin} を提案する。実用上、左右の前後接線力 T_{x1out} と T_{x1in} を平均化した T_{x1} を用い、さらに T_{x1} と Q_{lin} は摩擦係数のほか軌道の曲線半径に依ってもそのバランスが変化するため、軌道の曲線半径 R で除した値、 $T_{x1}/(RQ_{lin})$ を指標値として用いる。

5. 曲線走行実験による摩耗発生分析

図5に示す交通安全環境研究所の都市内鉄軌道用台車試験設備を用いた曲線走行実験の結果²⁾から、車輪／レール接触力と摩耗発生量の関係を分析した。実験条件は、曲線半径 $R=130, 160, 180, 200, 250, 300, 350, 400, 800$ mであり、全ての条件で走行速度は一定の 20 km/hとしている。車輪と軌条輪（レールを模擬した円盤）の形状も同一である。各軌条輪にグリスを塗布することで、前述の4つの潤滑条件を実現した。

実験では各車輪の輪重と横圧、前後接線力を測定したため、その結果から指標値 $T_{x1}/(RQ_{lin})$ を計算する。また前軸外軌側に相当する車輪／軌条輪間における摩耗粉の発生状況も測定した（図5右部）。接触位置の進行方向後方側に粘着スプレのりを付着させたケント紙を設置し、一定時間走行の後にケント紙に付着した摩耗粉の単位面積当たりの面積占有率をもとに各条件の摩耗量を比較した。

指標値と前軸外軌側における摩耗量を比較した結果を図6に示す。前軸外軌側における摩耗量は、全輪乾燥の条件1で最も顕著であり、次いで内軌側のみ潤滑された条件3でも摩耗が多く確認できる。また、条件1のみに着目すると、急な曲線ほど摩耗の発生量が多い。

指標値と摩耗量の関係から、指標値が小さいときは摩耗は殆ど観測されず、指標値が一定の値を超えると指標値の増加に従って摩耗量も増加する関係を確認した。また別途実施した車両運動シミュレーションの結果から、前軸外軌側の摩擦係数が大きいほど指標値も大きい結果を得た。以上より、営業線で測定される車輪／レール接触力から指標値を計算し、指標値が大きい傾向にある曲線部では、摩擦係数が大きく摩耗進展に注意が必要といえる。

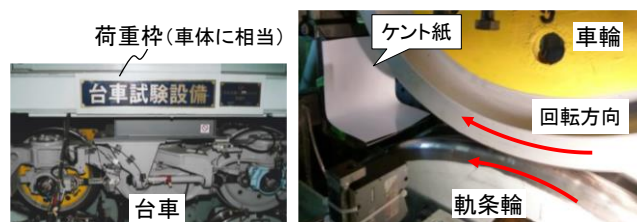


図5 曲線走行実験における摩耗発生量の測定²⁾

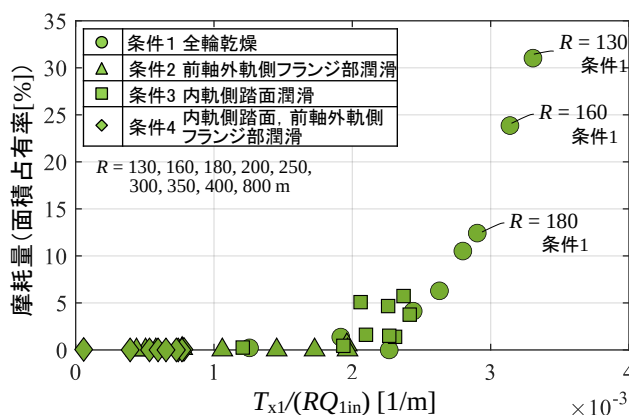


図6 台上試験における指標値と摩耗量の関係

6. 営業線における実測データへの適用

6. 1 脱線係数の常時モニタリング技術

車輪／レール接触力を営業列車で常時観測する目的で開発された台車「PQ モニタリング台車」(図7)により、車輪／レール間の接触力および脱線係数の継続的、長期的な収集が可能となった。

図8にはPQモニタリング台車が一つの曲線部を一日の間に複数回走行して得た脱線係数の波形を示す。同じ車両、同じ台車が同じ地点を同日に通過した場合でも、潤滑条件の変化によって脱線係数が走行毎に変動する様子が確認できる。

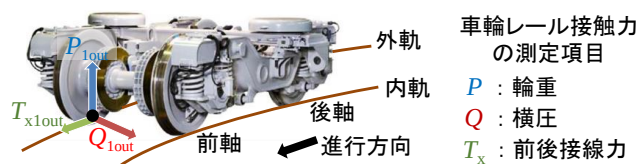


図7 PQモニタリング台車

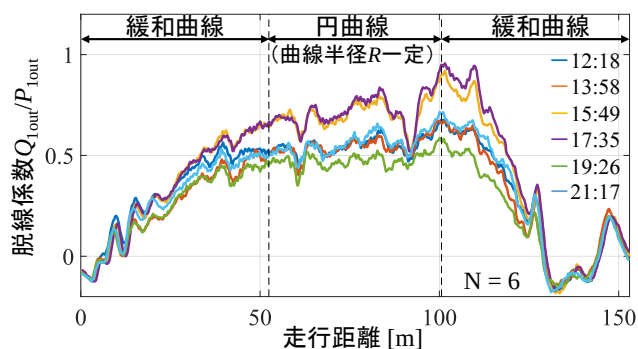


図8 脱線係数の測定例

6. 2 潤滑状態推定のための指標の検証

PQモニタリング台車による車輪／レール接触力の観測データから指標値を計算した一例として、 $R = 160 \text{ m}$ の曲線部における約半月の間の観測データのうち κ の推移を図9に、指標値を計算した結果を図10にそれぞれ示す。各プロット点は当該円曲線部を一回通過する毎の平均値を示す。図9より、 κ が0.2~0.6程度の幅をもって変動しており、当該曲線部では前軸内軌側の潤滑状態が変化しやすいことが推定される。図10より7月10日を境に、それ以降は指標値 $T_{x1}/(RQ_{1in})$ が比較的大きい傾向にある。 κ が変動している一方で、 $T_{x1}/(RQ_{1in})$ は κ の影響を受けずに高い値を維持していることから、前軸外軌側の摩擦係数が大きいことが推定される。 κ が小さいときは前軸外軌の状態に関わらず前後接

線力 T_{x1} の値が小さくなるが、 T_{x1} と Q_{1in} の比をとることで前軸内軌側の影響を受けずに前軸外軌側の潤滑状態を評価できることを表している。

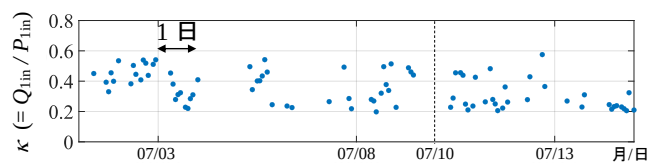


図9 前軸内軌側横圧輪重比 κ の時間変化

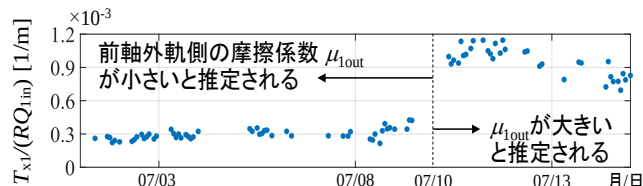


図10 提案指標値 $T_{x1}/(RQ_{1in})$ の時間変化

7. まとめ

営業列車による車輪／レール接触力のモニタリングデータを活用し、摩耗進展に注視が必要な曲線区間を把握する方法として、台車前軸内軌側の横圧と前後接線力の比をもとにした指標値を提案した。

手順としては、モニタリング台車で測定した前後接線力と横圧、および走行位置と軌道諸元についてのデータベースを照合して取得した軌道の曲率半径をもとに指標値を算出する。これが設定した閾値を超過する箇所、あるいは他曲線部に比べ大きい値が観測される箇所については、摩擦係数が大きく優先的に対策が必要な曲線部と判定する。摩擦係数が大きく走行安全性や摩耗進展に対し注意を要すると判定した場合に、当該曲線区間においてレールに潤滑材を供給するなど、優先的に保守管理を実施するという活用方法が考えられる。

第5章の内容は車輪／レール形状が一定の条件での考察であるため、今後は車輪とレールが摩耗した環境での指標値の扱い方を整理する予定である。

参考文献

- 1) 佐藤ほか、交通研フォーラム 2009 講演概要, pp.85-88 (2009)
- 2) 齋藤ほか、“各種潤滑条件が車輪フランジ摩耗に与える影響に関する研究”, J-RAIL2011, No. S8-JSCM-4, pp.391-394 (2011)

鉄道認証室における最近の活動概要

鉄道認証室

平石正嗣

1. はじめに

交通安全環境研究所鉄道認証室は、製品認証機関に対する要求事項を規定した ISO/IEC 17065 に基づき、鉄道製品が IEC62278 (RAMS) 等の国際規格に適合していることを認証する認証機関である。

本稿では、認証機関としての最近の活動の概要について紹介する。

2. 鉄道認証機関の体制整備と現状

2. 1. 鉄道認証機関の体制整備

鉄道の安全で安定な輸送の確保を図るため、鉄道事業者、メーカー等の関係者において、過去の事故やトラブルの経験を踏まえ、事故防止等のための努力が積み重ねられている。これらの安全等に係る活動は、技術基準、規格（日本産業規格や鉄道関連団体規格等）等のもとで実践されてきている。このうち各種鉄道製品・システムの規格類への適合性に関して、日本では、一般的には、製品供給側（メーカー等）において技術文書中で規格準拠が宣言され、調達側（鉄道事業者等）において製品等の受入れの妥当性判断が行われている。

他方、海外、特に欧州においては、規格として欧州統一規格（EN 規格）または国際規格（IEC 等）に準拠することが求められ、その規格適合性判断を客観的な第三者機関にゆだねる「認証」が主流になっている。そのため、日本の鉄道関連メーカー等の安全関連製品等の海外展開に際しては、製品等の国際規格に対する認証が求められることが多くなっている。

このような状況の下で、平成 20 年 6 月の交通政策審議会陸上交通分科会鉄道部会提言を受けて鉄道技術標準化調査検討会の下に設置された鉄道認証機関設立検討 WG における検討等を踏まえ、平成 23 年 4 月に交通安全環境研究所に鉄道認証室が設置された。また、平成 24 年 9 月には独立行政法人製品評価技術基盤機構 認定センター (IAJapan) から、鉄道分野の認証機関としては我が国初の認定を取得した。現在の認証業務実施体制の概要を図 1 に示す。

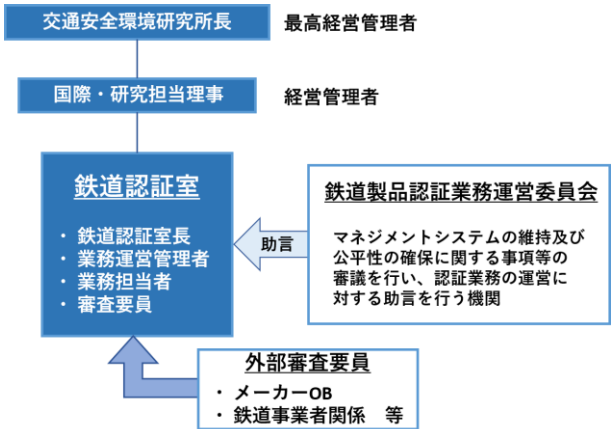


図 1 認証業務実施体制

認証業務の実施にあたっては、内部の審査要員に加えて、関連規格に精通し適切な実務経験を有する技術者を外部審査要員として予め登録し申請された案件毎に指名して認証業務を担当いただいている。また、マネジメントシステムの維持及び公平性の確保に関する事項を審議する「鉄道製品認証業務運営委員会」から助言をいただく体制となっている。

2. 2. 認証対象規格と認定の取得

認証対象規格は、鉄道認証室発足前の関係者において選定された海外でニーズの高い IEC 62278、IEC 62279、IEC 62280、IEC 62425 及び IEC 62236 の 5 規格である。現在の認証対象規格を表 1 に示す。なお、IEC 62236 については、実際に申請を受けて認定を取得したいと考えている。

表 1 認証対象規格及び認定規格

規格名称		規格番号	認定規格
信頼性、アベイラビリティ、保全性、安全性 (RAMS) の仕様と実証		IEC 62278:2002	○
通信、信号及び処理システム	信号用の安全関連電子システム	IEC 62425:2007	○
	鉄道の制御、保護システム用ソフトウェア	IEC 62279:2002	○
		IEC 62279:2015	○
	クローストランスミッションシステムにおける安全性に関する通信	IEC 62280-1:2002	○
	オープントランスミッションシステムにおける安全性に関する通信	IEC 62280-2:2002	○
電磁両立性	トランスミッションシステムにおける安全性に関する通信	IEC 62280:2014	○
	通則、鉄道システム全体の外部等へのエミッション等	IEC 62236-1～5:2018	

3. 認証機関としての活動

3. 1. 認証の業務

本年11月1日までの認証書の発行実績は合計60件（規格件数）である（図2参照）。一つの案件で複数の規格への適合性を申請される場合があり、案件数では45案件になる。なお、当該実績には、認証を終了したもの等も含まれている。

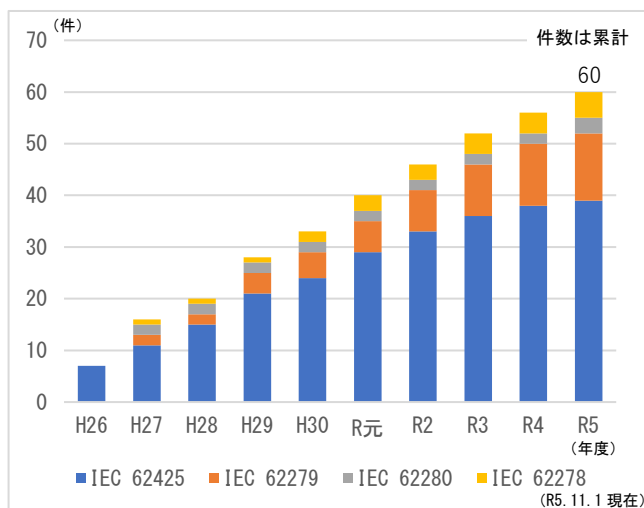


図2 認証書発行実績（規格件数）

3. 2. 広報活動

認証活動を国内外に広く周知することにより、当認証機関の活用を促すとともに、国際通用性を高めるための広報活動にも力を注いでいる。

(1) 鉄道認証情報交換会

認証活動の状況を周知するとともに認証を取り巻く情勢について情報共有を行うため、鉄道関連メーカー、関連協会及び国土交通省との情報交換会を定期的実施している。

(2) 電子媒体による情報提供

これまでの認証実績、各種規程類の最新版を Web ページに掲載している。また、英語版の Web ページにおいて、認証が活用された海外鉄道プロジェクト例を掲載している（図3参照）。

(3) Web セミナを開催

鉄道関係者の方々に、国際規格における考え方等を含め、国際規格の理解を深めて、業務に役立てていただけるよう、Web セミナを開催している。令和5年5月から3ヶ月に1回の頻度で「新技術と国際規格セミナー」を開催中である。

4. 今後の取組について

近年、世界的に鉄道に対する期待が高まる中で、多くの国において都市鉄道や高速鉄道等の整備が検討・推進されている。日本政府のインフラ海外展開においても鉄道は重要な産業に位置づけられており、引き続き、国内の鉄道関連メーカーを中心に積極的な展開が進められている。

このため、当室においては、認証機関に対する国際規格の要求事項を遵守し認定の維持を図ることはもちろん、引き続き、認証業務を着実に進め、認証実績の拡充に努めるとともに、業務ニーズに対応した体制整備等を図っていく。また、規格適合性評価の手法を活用した製品品質の確保に向けた取組の重要性について情報発信に取り組んでいきたいと考えている。このような活動を通じて、当研究所では公平中立の立場から、日本の鉄道システムの海外展開や鉄道技術の維持・発展に引き続き貢献したいと考えている。鉄道関連メーカー、鉄道事業者をはじめ鉄道業界の様々な立場の方々並びに関係機関のご指導、ご協力をお願いする。

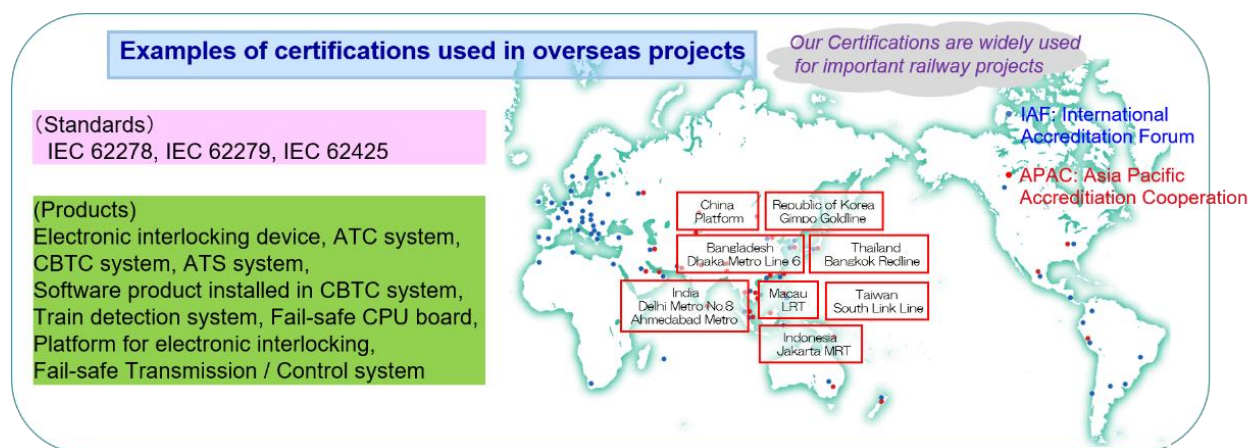


図3 鉄道認証室の認証が活用された海外プロジェクトの例

講演 8. 鉄道と自動車技術を融合した新しいモビリティと認証

鉄道認証室 ※森 崇

交通システム研究部 山口 大助 望月 駿登

1. はじめに

鉄道は、制動距離が自動車と比べて非常に長いことから、黎明期から間隔の制御を機械的に行う装置が運行に不可分であり、また、電気車による運転が過去から行われてきている。高速鉄道では、間隔制御の高度化や電気運転が発達し、不可分な技術となっている。また鉄道においても無線による間隔制御が国内外で都市鉄道を中心に普及しつつあり、列車間隔の短縮や効率化に貢献している。

しかしながら鉄道はその設備市場が小さいことから、装置が非常にコスト高であり、高度な制御装置の普及は稠密な運行が必要な線区又は高速鉄道以外は非常に困難な状況にあり、設備投資が難しい現状がある。また、鉄道車両についても高価であり、損益分岐点が高く、多くの事業者が既存線区の在り方を検討する状況にある。ひるがえって近年、自動車の自動間隔制御や電動車が普及しつつあり、自動車にも機能安全が求められ、鉄道と自動車の技術が近づきつつある現状にある。

本稿では、鉄道の安全性と自動車の技術発展を活用した新しい保安装置をベースとしたシステムについて検討し、規格適合性を中心に考察する。

2. 現状の鉄道と自動車の融合

鉄道と自動車の融合として、いくつかの類型がある。

- (1) 保安装置は鉄道と同一として、車両は自動車そのものを活用する方法

この類型には 2 つの形態が存在し、既存の軌道を活用する DMV (Dual Mode Vehicle) と、新規のガイドウェイを敷設する「ガイドウェイバス」がある。前者は高知県、後者は愛知県に存在するが、鉄道と同じ間隔制御を行うことにより、安全性を確保する。

- (2) 専用道を使用するが、道路交通と同一のルールで運行するもの。

これはローカル線において、災害後鉄道による復旧が困難とされている線区で活用されており、専用

道を使用するためある程度の定時性が確保できるが、安全性は自動車とほぼ変わらない。

本稿においては、国際規格に準拠し、鉄道並みの保安レベルを確保しつつ、自動車の運行柔軟性を確保できる新しいモビリティについて検討する。

3. 鉄道の保安の考え方

鉄道における保安の考え方は、よく知られているように、fail-safety を重視している。これは、「正常状態という確認ができない場合、安全とされる状態に遷移させる」仕組みである。例えば、車両の離隔を確保する場合、大まかには図 1 のような仕組みで実装される場合がある。車両は自車の位置及びその長さを、地上の制御装置に報告する。その位置をもとに、後続の車両に、どこまで進行してよいかの停止限界である LMA(Limit of Moving Authority) を後続の車両に送信することで、その範囲内の移動を地上の制御装置が許可する。

安全を担保するためのいくつかの技術を鉄道は使用している。一例として、制御を行う各サブシステムの安全性の確保のため、複数のデバイスの計算結果が一致しない場合は、安全側に遷移させることにより、デバイスの故障などのランダム故障の安全性を確保する。また、ソフトウェアのバグなどシステムティック故障については、重篤度に応じて管理や技術的手法の推奨事項を定めることにより、故障を防止することとしている。これらは国際規格の中にも述べられており、IEC 62425 Annex B¹⁾及びそこから参照されている IEC 62279²⁾に考え方が示されている。これらは本質的には、安全関連系の産業機器についての考え方と同一である。

LMA の送信が連続的に行われ、許容されている時間間隔を超えて LMA の更新がない場合、またはその情報の正当性が確認できない場合はその時点で非常停止させる。これは、いずれかのサブシステムが故障した際、安全側に遷移、または通信路が途絶することにより、LMA の更新が行なえなくなるため、安全側遷移の原則により、車両を停止させる、

または確実に安全な区間のみの走行を許可することとなる。

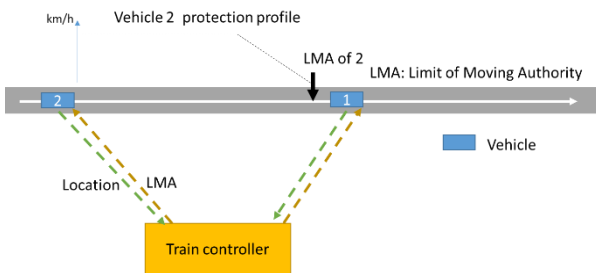


図 1 鉄道における間隔制御例

この原則により、鉄道においては、先行車両を見つけ、見つけた場合はブレーキをかけるという制御は行わない。これは、先行車両を見つけるという機能が失われた場合で、その故障が検知できなかった場合、衝突という事象が発生するため、そのような状態への遷移を防止するための思想としてそのような制御は行わないこととしている。あくまで、無難な区間においてのみ走行を許可するという思想で制御を行っている。これらの思想の具体的な要求については、IEC 62290-2³⁾ 5.1.4.1 Determine movement authority limit や IEEE 1474-1⁴⁾ 6.1 ATP Functions にも記載されており、鉄道の保安制御の一般的な要求事項として世界的な共通認識事項となっている。

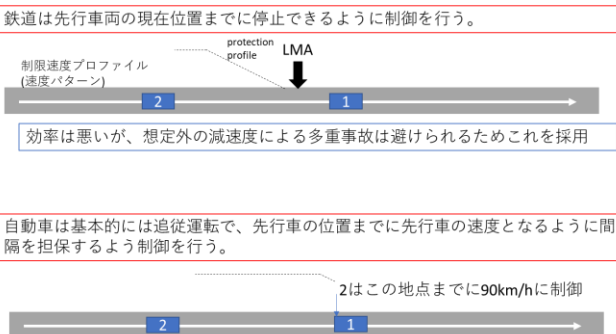


図 2 鉄道と自動車の間隔制御思想

次に鉄道と自動車の間隔制御思想の違いについて述べる。鉄道の場合は多重衝突事故の防止を非常に重視しており、前方を走行する列車との相対速度を考慮し制御するという思想は持っていない。しかしながら自動車交通においては、そのような思想について安全上は推奨されてはいるものの、実態の制御としては、相対速度をできるだけなくすように制御することが一般的であり、追従速度制御となっている。このため、鉄道の思想で運行を行う場合、ど

うしても時間単位当たりの輸送力は追従速度制御よりも低下することとなる。

4. モデルケースと技術課題

モデルケースとして下記のような形状の専用通路を考える。これは、一般的な鉄道複線区間の駅構造とも言え、また高速道路におけるサービスエリアの形状とも言える。このケースには、合流、分岐、間隔制御、速度制限、停車、発車を含み、一般的な鉄道のモデルを含んでいる。

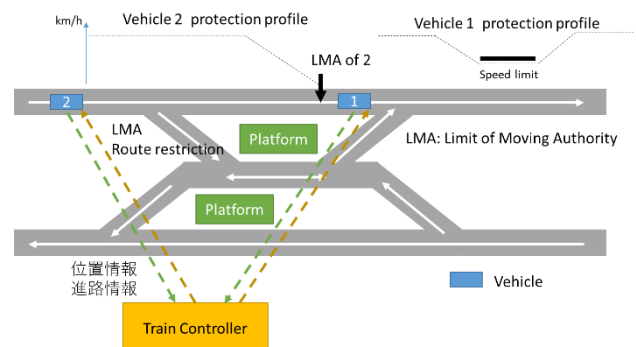


図 3 検討モデル

このモデルにおいて、必要とされる技術のうち、保安装置として代表的なものとしては、IEC 62290 によると以下のとおりである。

(1) ensure safe separation of trains

間隔を制御するには、位置と車両長が必要。鉄軌道を使用していないため、レール短絡による位置検知は使用できず、新規の位置検知システムが必要となる。

(2) ensure safe speed

安全な速度を担保するには、速度制限計算が必要。これには、先行列車と衝突しないための速度制限、走行路の特性による速度制限、自然条件や作業による臨時速度制限、輸送力確保のための速度制限があり、各種条件や LMA をもとにした、ブレーキ力の計算、滑走防止再粘着処理が必要。また自動運転の場合、加速計算も必要である。

(3) authorise train movement

先行列車や合流点を基にした走行許可範囲である LMA の計算をデータが集約されている地上装置で行うことが必要。また合流する際においては、合流点までに安全な間隔を確保しつつ合流する制御が必要である。鉄道においては、線路が合流する場合、どちらか一方の車両の走行を許可し、合流点手

前で許可を受けない車両は停止させ待たせることとなるが、このような制御を行う場合、この地点がボトルネックとなり輸送力が大幅に減少することは自明である。

(4) use of data communication between wayside and onboard equipment

地上車上の通信には無線通信が必須。発達している 5G ネットワークなどを使用した場合の要件について明らかにする必要がある。

IEC 62290 規格にはないが、以下の要件も必要と考えられる。

(5) 間隔制御のボトルネックの検討

鉄道車両ではなく自動車をベースとした車両の場合、編成当たりの輸送力が減少する。ローカル線の場合はこれでも問題ない場合も多いが、ある程度の中規模線区に適用する場合は、車両間隔を適正化しないと輸送能力が大幅に低下する恐れがある。このため、鉄道の保安の思想を活用しつつ、輸送力を確保するため、何がボトルネックになるかをシミュレーションで明らかにしたのち、解決する方法を検討する。

これらはどれも重要であるが、本稿では、主に(1)と(5)について述べる。

5. 位置の同定と規格

鉄輪を使用しない「鉄道」はすでに新交通システムなどで実用化しているため、技術的に位置検知は確立しているともいえる。一般的にこれらは「交差誘導線方式」⁵⁾と言われている方法で車両を検知する。原理を図 4 に示す。車両が交番する磁束を発生し、その磁束を受けるコイルを軌道または側面に設ける。コイルはある延長ごとに交差されている仕組みとなっている。このため車両がコイルの交差点を超えると、受信機で受信された交番磁束が反転し、車両の在線位置の変化が判明する。もし車両の磁束発生装置が故障した場合やコイルが断線した場合はコイルに誘起される電流がなくなり、故障が判明することとなり、安全側に遷移できることとなる。これは、IEC 62425 Annex B における、inherent fail-safety に相当し、規格上も問題がない構成をとることができる。

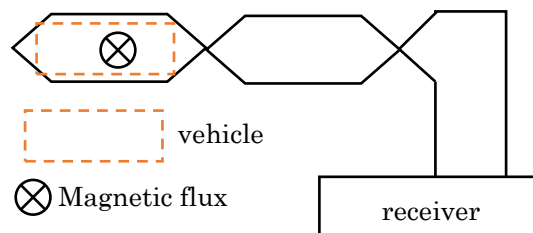


図 4 交差誘導線による検知原理

しかしながらこの方式はコイルを全線にわたり敷設する必要があり、コストの問題が過去から課題になってきた。このため、できるだけ地上システムのコストをかけず、位置検知を行う方法を検討する必要がある。

(1) GNSS を使用した方法

位置検知において、GNSS(Global Navigation Satellite System)は、各分野で普及しており、安価であるが、鉄道分野においてフェールセーフ性について明確な考え方の整理がなされている状況にはなく、電波伝搬上不可能な地域もあるため、鉄道における保安での実用化事例は乏しい。しかしながらコスト面では有利であるため検討に値すると考えている。本稿では規格上の課題と解決方針について簡単に述べる。

a) システムが正常でない場合の、安全側遷移原則の確保について

GNSS について、Preliminary Hazard Analysis を行った場合、ハザードの要因として、「衛星系の故障」、「受信機の故障」、「電波伝搬環境障害」が挙げられる。これらが発生した場合、IEC 62425 において、前述したように、故障を検知し、安全側とされる状態に遷移させることが必要であり、その失敗の頻度は、システム要求上の THR (Tolerable Hazard Rate)以下に抑える必要がある。また、規格適合性を考慮する場合は、規格が要求する、Technics and Measuresを実施し検証する必要がある。

GNSS の衛星システムは、IEC 62425 を意識して構築されているわけではない。これは受信機においても同じである。このため、何らかの形で、故障の検知及び安全側遷移を行うため、GNSS の異常を

機器の組み合わせで故障検知及び安全側遷移をさせることを目指すとよいと考えている。

類似の事項として、**fail-safety** について考慮されていない集積回路を活用する場合、IEC 62425 は、C.3 b)項において、定量的な解析と悲観的に見たハザードを前提として、外部装置での故障検知及び許容時間内の安全側遷移を許容しているため、組み合わせにおける故障検知及び安全側遷移について、C.3 b)項における条件を満たす限り、許容されるものと考えている。

これらを考慮して提案する構成を以下に示す。

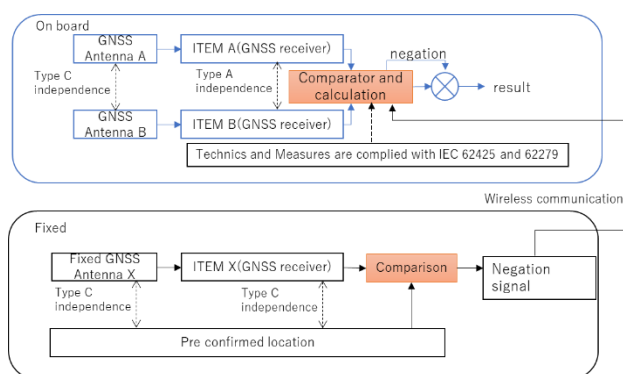


図 5 GNSSを活用した位置同定システムの案

図 5 において GNSS 受信機の故障、GNSS アンテナの故障は、IEC 62425 および IEC 62279 の規格に合致した比較器で比較し、故障検知し、異常時は安全側遷移を行う。これにより、GNSS の受信機には故障検知をはじめとするハードウェアの安全要求は行わなくとも、受信系のランダム故障検知は可能である。但し、受信機のソフトウェアの **Technics and Measures** は満たしていないため **Pre-existing software** としての要求を満たし、かつ GNSS 受信機が異なるソフトウェアを使用することによる **Software Diversity** を行うことにより対処を考えていく。

また、衛星系や電波伝搬の異常については、沿線数キロメートルおきに、車上と電波伝搬状態が近似となる地点に地上局を置き、地上絶対位置と測位結果を比較することにより衛星系や電波伝搬の異常を検知する。これらにより対処するシステムを提案する。

b) 路線プロファイルと位置について

GNSS で緯度経度が正確に算出できたとしても、運行は緯度経度で行われるわけではなく、走行通路

のどの地点にいるかどうか、またその地点にどのような走行制約があるかどうかを正確に知る必要がある。これらの緯度経度から、路線のプロファイルに正確に置き換え、速度制限や停車位置などを守りつつ運行する必要がある。

これらのデータの正当性は、鉄道において規格上のルールがあり、IEC 62279 の 8 章に要求がまとめられている。また、そのデータを作成するツールの要件は、6.7 章に存在する。いずれにしても自動車の自動運転においてもほぼ要求されることは同一であり、これらの技術の活用を注視していきたい。

(2) 弊所の交通システム研究部により提案されている位置検知手法

前述したように、交差誘導線方式は、通路近辺にコイルを連続的に敷設する必要があることから、コストが非常にかさむ可能性があり課題となっている。そのため、弊所の交通システム研究部では、以下のようなシステムの提案と実験⁶⁾を行っている。



図 6 ターゲットマーカ方式による位置検知

通路上に複数のターゲットマーカを敷設する。ターゲットマーカはレーザを反射する機能を有するものとする。これは反射体であるので極めて安価である。ターゲットマーカの配列に意味を持たせ、マーカの配列をスキャンすることにより車上は情報を得る。その情報をもとにデータベースと照合することにより、位置を取得できる。敷設方法を工夫することにより、**Fail-safety** を確保することもできる。例えば、車上からスキャンできる範囲内に必ずターゲットマーカを置き、データベースの要素と常に比較することにより、車上のスキャナとターゲットマーカの故障を連続的に検知する。故障が検知された場合は速やかに安全側遷移を行うことができ、IEC 62425 に合致した故障の検知及び安全側遷移制御ができることとなる。また、マーカの配列によっては、一部のマーカが欠損し故障した場合でも、冗長性を持たせることができ、**THR** を確保できる

ことが前提になるが、誤り訂正技術によって運行を継続できるとともに、故障検知も可能であり、ターゲットマーカの事後メンテナンスとするような方法も可能である。

6. 新モビリティの安全性と輸送力の関係

自動車交通の場合、多くとも 50 人程度の高速バスが一単位として運行を行い、それらが相対速度で衝突を防止する追従運転制御を行っている。しかしながら、大部分の新設都市鉄道においては、前述の通り、先行の車両の後端部分から余裕距離を足した LMA の範囲内で走行を許可し、LMA までに停止できるように速度プロファイルを設定し、その速度を超過した場合はブレーキをかける方法となっている。これは、路面電車を除き、多ければ一度に 1000 人以上を輸送できる鉄道であることから 1-2km の車間距離は輸送上問題にならないことや、鉄車輪によるブレーキ力が自動車交通に比べて悪いこと、多重衝突の場合影響が甚大であることなどからそのような制御となっていると想定される。

鉄道の間隔制御方式は明らかに自動車交通よりも車間距離が広がることになる。その影響がどの程度で、現実問題として大きな影響になりうるのかをシミュレーションで検討した。

以下にシミュレーション結果を示す。前提として、LMA の計算処理時間と空走(ブレーキ処理命令を行ってから実際に減速が始まるまでの時間)を変化させた場合、また走行速度との輸送力の関係を示したものである。計算処理時間及び空走時間は、ブレーキをかけるタイミングが遅れることとなるため、その値は車両間の離隔拡大というペナルティとして現れるため、処理速度を向上させると輸送力が増大する。

この計算結果によると、輸送力は処理速度と非常に大きな因果関係があることがわかる。例えば、LMA の計算と空走の合計時間が 10 秒から 2 秒に改善した場合は、輸送力が 3 倍程度増加することがわかる。これにより処理装置の高速化がこの技術の実現の大きなカギを握ることとなる。また、速度においては 70km/h 付近に輸送力のピークがあり、自動車の速度域と合致した特性にあることがわかる。

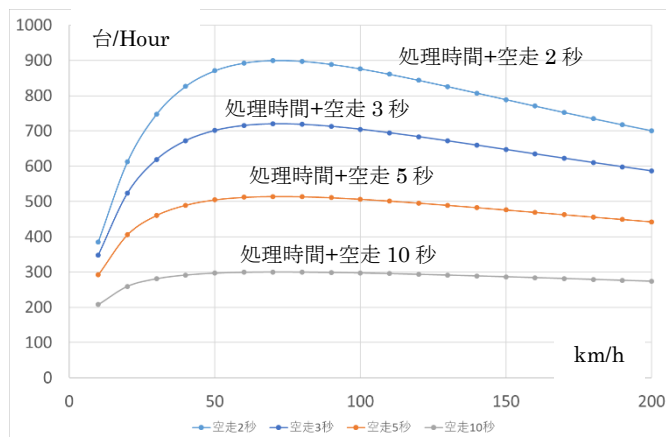


図 7 制御速度、運行速度と輸送力の関係

前提として車両長を含め最低車間 20m(速度に応じて延長され、速度が 0 のときも最低 20m は確保)、減速度 10m/s^2 とし、鉄道と同一の思想で保安装置を実現した場合、計算上一時間当たり 200 台から 900 台の範囲で運行することができ、これは一台当たり 10 人乗車とした場合、時間当たりの輸送力は数千人程度となる。高密度の鉄道線区には適用できないにせよ、加減速性能の高さにより、既存の新交通システムを超える程度の輸送力を処理装置の高速化で確保できる可能性がある。

7. 処理高速化の戦略

現在 Fail-safety を確保するために日本国内でよく使用されている処理装置の概要を以下に示す。

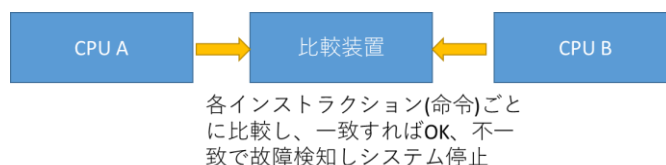


図 8 制御速度、運行速度と輸送力の関係

独立した CPU が計算を行い、インストラクションごとに比較装置で結果を比較し、一致すれば次の計算処理を許可し、不一致であればシステムを停止させる仕組みである。この比較装置の故障時の状態遷移は、安全側に遷移するように回路設計がなされている。これはインストラクションごとの比較であり、故障検知を非常に厳密に行える安全性の高い装置であるが、近年の CPU の高速化により、いろいろな課題が生じている。

- CPU の高速化により、ハードウェアの比較器の比較時間が CPU の処理時間に大きく影響を与えていること。
- CPU 黎明期のものはすべてのデータがバスに出力されており、外部の比較器により比較することも可能であったが、現在の CPU の大部分はキャッシュメモリや内蔵のメモリが存在し、必要がある場合のみバスにデータが出力されず、全てのインストラクションを比較することが困難になっていること。

上記の課題があり、鉄道信号の製作会社は、様々な取り組みをしてきたが、過去の CPU の在庫で製作することや、FPGA(Field Programmable Gate Array)に過去の CPU の IP コア(Intellectual Property Core)を導入し、互換性のあるものを作成している現状にあり、処理速度の向上を行うためには設計思想を変更する必要がある。

IEC 62425 においては、ここまでの厳密性は求められておらず、処理結果の整合性の担保のみが必要とされている。このため、故障検知と安全側遷移の目標値の確保を担保しつつ、高速処理を実現するためには、計算出力結果の比較のみを行うことで規格上は足る。

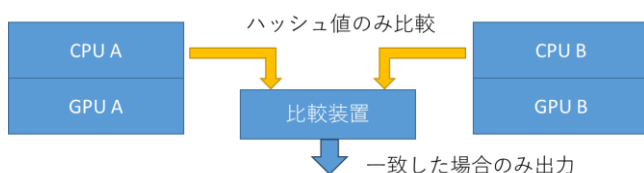


図 9 高速処理を行うための手法案

図 9 にできるだけ高速処理を行うストラクチャを示す。CPU と GPU(Graphic Processing Unit)が組み合わされている計算装置は一般的であり、入手は容易である。LMA の計算は車両ごとに行う必要があるが、どの車両においてもアルゴリズムは同一であり、GPU における並列計算になじむアルゴリズムを構築することが可能であると考えられる。それらの計算結果のハッシュ値を計算し、その結果のみを比較することにより、処理装置のランダム故障の検定を行うことを考える。この誤りの見逃しは、ハッシュ値の系列にも依存するが、一般的に使用されている SHA-256 を活用した場合、ほぼ偏りなく均等にハッシュ値が出現するとされているため、理想的には、誤りの見逃し確率は一処理当たり

2^{-256} となり、100ms ごとに処理を行った場合の一時間当たりの誤り発生確率 p は二項定理により、

$$p = 1 - (1 - 2^{-256})^{36000} \approx 36000 \times 2^{-256} \approx 3.1 \times 10^{-73}$$

となり、これを発生頻度に置き換えると

$$p = 1 - e^{-\lambda t} \text{ から } 3.1 \times 10^{-73} = 1 - e^{-\lambda \times 1} \approx \frac{\lambda}{1!} - \frac{\lambda^2}{2!} + \dots$$

となる。 $\lambda^2/2!$ 以降の項は非常に小さいので無視した場合の故障発生頻度 λ は $3.1 \times 10^{-73}/h$ となり一般的に許容されている THR である $10^{-9}/h$ と比較しても全く問題がない値と想定される。

8. まとめ

今回検討の結果、新しいモビリティを実現していくには、保安装置単体としても、輸送計画、安全性の担保、高速処理のアーキテクチャ、位置検知技術、それに加え安全の justification など多くの技術分野の組み合わせが必要であり、総合力を生かした取り組みが必要であることを痛感させられた。総合力という観点では、自動車技術及び鉄道技術双方を兼ね備えている弊法人はそのポテンシャルを有していると考えており、今後とも多様な側面での検討を行ってまいりたい。

参考文献

- 1) IEC 62425 Railway applications – Communication, signalling and processing systems –Safety related electronic systems for signalling, IEC (2002)
- 2) IEC 62279 Ed.2 Railway applications – Communication, signalling and processing systems –Software for railway control and protection systems, IEC (2015)
- 3) IEC 62290-2 Ed.2 Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems –Part 2: Functional requirements specification, IEC (2014)
- 4) IEEE 1474-1 IEEE Standard for Communication Based Train Control(CBTC) Performance and Functional Requirements, IEEE (2004)
- 5) RRR, 平栗 滋人, 鉄道総合技術研究所 (2008-12)
- 6) LiDAR センサを利用した衛星測位の補完手法に関する検討, 山口 大助他, 交通研フォーラム 2022

自動車安全研究部における研究の概要と方向性

自動車安全研究部 河合 英直

1. はじめに

政府は第11次交通安全基本計画において2025年までに交通事故による24時間死者数を2,000人以下(30日以内死者数2,400人以下)、重傷者数を22,000人以下とする目標を掲げている。2022年中の交通事故による死者数は2,610人と6年連続で最少を更新しているが、前年(2021年)との比較では、その減少は26人(-1.0%)に留まっている。交通事故死者の状況を見ると2008年以降、自動車乗車中の死者数よりも歩行中の死者数の方が多く、政府目標達成には、いわゆる交通弱者と呼ばれる子供・高齢者・歩行者・自転車乗員等の死者数を減少させる必要がある。これら交通弱者の安全確保を進める為にも先端技術の活用等が求められている。

自動運転車に関して、2019年に道路運送車両法が改正され、2020年4月にはレベル3、4の自動運転車を対象とした保安基準の改正⁽¹⁾、並行して道路交通法の改正も行われた。これら一連の法規改正を受けて、2021年3月、日本において世界で初めて型式指定を取得した自動運転車(レベル3)の販売が開始、さらに2022年4月にはレベル4に相当する、運転者がいない状態での自動運転(特定自動運行)を許可できる様道路交通法の改正が行われ、これまで実験段階にあった自動運転車は、一般社会への導入、普及を目的として、更なる準備が進められている。政府は新たに、限定地域における無人自動運転サービスを2025年目処に50箇所程度、2027年目処に100箇所以上での実現を目標として掲げて、より高度な自動運転機能にかかる研究開発や基準検討、実証実験が進められている。また、次世代モビリティに求められる駆動用エネルギーの多様化に伴い、EV、PHEV、HEVやFCVにおける電気エネルギーの活用に欠かすことのできない要素の一つである車載バッテリーの安全性確保も、その重要性がより認識されてきている。

このような背景において、自動車安全研究部では従前からの衝突安全と予防安全に加えて、新たな技術、特に自動運転技術及び次世代モビリティにおける安全の確保に重点をおいた研究を進めている。部内に衝突安全・点検、予防安全、電気・電子技術のグループを構成し、自動車の安全に係る技術に対して柔軟かつ総合的に対応しながら、次世代モビリティの実現に向けた研究に取り組んでいる。

2. 研究概要

2.1 衝突安全・点検グループ

衝突安全・点検グループでは、交通事故の多様な実態を踏まえながら、車両の衝突安全について広く検討している。特に、高齢者、年少者、自転車乗員等の交通弱者を対象とし、衝突安全技術に関する基準化に必要なデータを提供することを主眼に、交通事故の調査解析、実車衝突実験、スレッド実験等によるコンポーネント試験、シミュレーション解析等を行っている。衝突事故の高次脳機能障害への影響を評価することを目的として、脳の回転衝撃によるびまん性軸索脳損傷(神経細胞の軸索損傷)を対象とした新たな評価基準を提案するための研究も進めている。さらに、昨今の予防安全装置の普及に鑑み、それらの装置作動時の乗車姿勢の乱れが乗員傷害に及ぼす影響を調査し、衝突試験法規の改定に必要な情報を提供するための研究や、未だ明らかにはなっていない交差点右左折時の事故発生メカニズム解明を目的としたドライバの注視特性を含む運転行動把握のための研究も行っている。

2.2 予防安全グループ

自動運転や運転支援技術に関連する研究課題は多く、主として、自車及び周辺車両の振る舞いに関する研究を行う車両挙動グループと、人間の認知・判断・操作に関する研究を進めるヒューマンファクタ認知・判断グルー

プの二つを予防安全グループ内に設け、効率的に研究を進めている。車両挙動グループでは、次の目標である「レベル 4 の自動運転システムの市場化」の達成に向けて、より高度な自動運転技術の評価法に関する検討を中心に取り組んでいる。

ヒューマンファクタ認知・判断グループでは、社会的な関心が高い高齢者におけるアクセルペダルとブレーキペダルの踏み間違い事故の発生状況を分析し、車両側の安全対策について研究している。また、普及段階にある自動運転車を利用するドライバの行動を理解するため、自動運転から手動運転に切り替わるときの運転行動を解析している。このほか、車体からの灯光により信号灯の情報を路面に投影する技術の注意喚起効果について評価している。さらに、新型前照灯やオートレベリングなどにより、夜間の視界を確保しつつ、対向車や歩行者への眩しさを抑制する方法についても研究を進めている。

また、自動運転車の安全性を確保するには車両が取得する情報の正確性が重要となる。センサ等による外部環境認識の正確性及び特性を比較・評価し、安全上の課題を解決するための調査、研究を行っている。悪天候時の認識性能を評価する手法を検討するために自然環境での降雨に極めて近い状況を再現可能な降雨装置を開発導入し試験を進めている。

2.3 電気・電子技術グループ

燃料電池自動車、電気自動車等に必須の車載バッテリーの安全性について、国連の自動車基準調和世界フォーラム(WP29)において、車載バッテリーセルの熱暴走発生を前提とした安全性を評価するための試験法(熱連鎖試験)が議論されている。熱連鎖試験に関して、一つ目のセルの熱暴走発生(イニシエーション)手法をどのように規定するかという技術的論点があるが、本グループではレーザを活用したイニシエーション手法の研究を進め、その結果を国交省に提供することで国際議論に貢献している。

電子制御装置に係る安全性・信頼性を確実に確保するため、不具合検出方法、電磁両立性に関する評価方法等に関する研究を進めてきた。現在は、自動車部品における電磁耐性試験方法間の比較評価等も行っている。自動運転車は高度な電子制御技術によって成り立っているとと言っても過言ではなく、その電磁両立性の重要性については、WP29 においても高く注目されている。

2.4 その他

国の施策を技術的に支援するために、各グループ横断的に調査研究を行っている。昨今の次世代モビリティの導入に際して、市販電動キックボードの大規模な性能調査による実態把握や、電動キックボードの走行状態を他の交通参加者に示す最高速度表示灯の判別性や受容性に関するモニタ評価、さらに、大きな社会的問題となっている大型車のホイール脱落事故防止の議論に貢献するための実験を行い、技術データ、調査結果を検討会に提供するなど、自動車安全研究部の持つ知見とリソースを活用し、国の技術施策に貢献している。

3. 外部連携

自動車安全研究部では、交通事故総合分析センター(ITRDA)に研究員を派遣、双方の知見を生かして、自動運転車の事故調査の高度化や EDR データの車両安全対策への活用に貢献している。さらに種々の研究課題について、芝浦工業大学、東京都立大学、東京農工大学、東京電機大学、杏林大学医学部等との共同研究や、NHTSA(米)、VRTC(米)、BASf(独)、TÜV(独)、IIHS(米)、Thatcham(英)等の研究機関等との連携、情報交換を進めると同時に、部品メーカーや計測器メーカー等とも連携し、最新技術の評価研究に取り組んでいる。

4. まとめ

昨今、特に自動運転技術など最新の技術が広く社会に普及してきている。さらに、次世代モビリティと呼ばれる新しい移動手段も数多く市場に導入されようとしている。これら新しい技術を搭載した車両の性能を公正、適切に評価することが正しい技術の導入・普及につながると考える。自動車安全研究部では、より安全な交通社会実現の為に次世代モビリティを含む新たな技術の正しい導入と普及そして更なる安全技術開発の一助となる調査、研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha07_hh_000338.html

講演 9. 自動運転車が車線変更する際に備えるべき危険回避能力に関する研究

自動車安全研究部 ※真鍋 裕輝 児島 亨 北田 幸一

1. はじめに

高速道路等で使用する自動運行装置に関する国連協定規則(UN-R157)において、自動運転車（乗用車）が追い越しのための車線変更（Lane Change、以下 LC）をおこなうことを可能とする改正案が採択されたり。UN-R157 において、自動運転車の危険回避能力は定量的な指標がない場合には Competent and Careful human driver（以下、C&C ドライバ）と同程度以上の危険回避能力を持たなければならないとされているため、自動運転車の危険回避能力を議論する上では C&C ドライバの運転行動の調査が必要となる。

本報告では、LC 時に危険事象に遭遇する一般ドライバーの運転行動を網羅的に調査し、危険事象の回避をおこなう際の運転行動の定量的な評価をおこなった。

2. 実験方法

2.1. ドライビングシミュレータ

本実験ではドライビングシミュレータ（以下、DS）を用い、実験参加者が LC をおこなう際に危険事象に遭遇する場面を再現した。実験に用いた DS の概観を図 1、仕様を表 1 に示す。17 枚の有機 EL パネルで水平方向に 360°覆われたポッドを、8m 並進台と 6 軸電動ユニットによって動かし、車両の動きを模擬した。

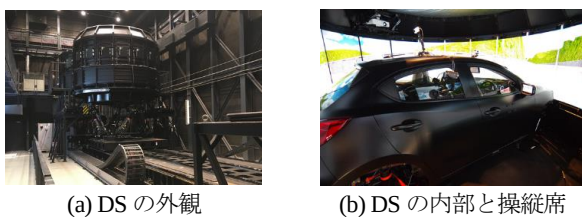


図 1 DS の概観

表 1 DS の仕様

画面	サイズ	55 in
	解像度	1920 x 1080 ppi
	フレームレート	60 fps
	画面数	17
	水平視野	360°
並進装置	可動範囲	8 m
	最大加速度	$\pm 4 \text{ m/s}^2$
6 軸ユニット	可動範囲	$\pm 0.3 \text{ m}$
	最大加速度	$\pm 0.5 \text{ m/s}^2$

2.2. 実験場面

本調査の実験場面は、Validation Method for Automated Driving/ New Assessment Test Method²⁾の Annex2 において想定されている危険な運転場面から選定した。片側 2 車線の高速道路での実験場面を 3 種類と片側 3 車線での実験場面を 1 種類の合計 4 種類を設定した。図 2 に実験場面の概略図を示す。

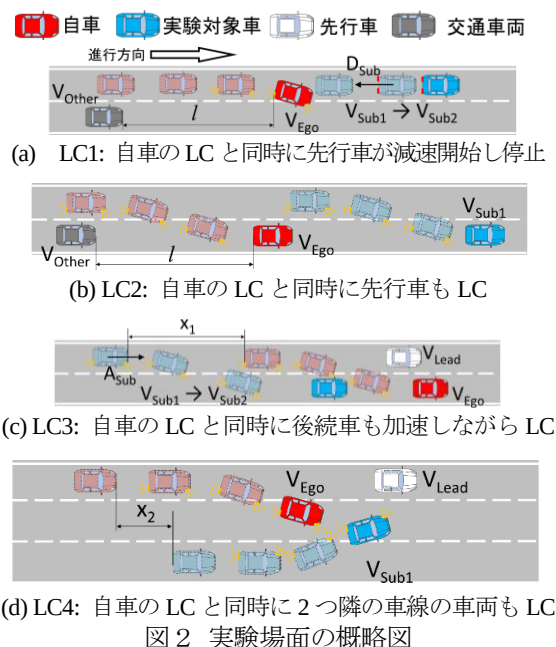


図 2 実験場面の概略図

ドライバーが運転する車両を自車（図表中 Ego）、自車に接近する車両を実験対象車（図表中 Sub）、自車が追い越しをするきっかけとなる低速の車両を先行車（図表中 Lead）と呼称する。なお、先行車が実験対象車である場合は、実験対象車の呼称を優先する。

<実験場面 1（以下、LC1）>（片側 2 車線）

第 1 車線上を 100km/h で走行する自車が、前方を 80km/h で走行する先行車（実験対象車）に追いつき、追い越す場面で、自車が方向指示器を点滅開始すると同時に実験対象車が減速を開始し停止（図 2(a)）。

<実験場面 2（以下、LC2）>（片側 2 車線）

100 km/h で走行する自車が前方の第 1 車線の低速の先行車（実験対象車）に追いつき追い越す場面で、実験対象車は自車の方向指示器点滅開始と同時、もしくは

は自車の白線到達と同時に第 2 車線への LC を開始 (図 2(b))。

<実験場面 3 (以下、LC3) > (片側 2 車線)

自車が低速の先行車を追い越す場面で、自車後方で自車と同じ 100 km/h で走行していた第 1 車線の実験対象車が、自車方向指示器点滅開始と同時に加速しながら LC を開始 (図 2(c))。

<実験場面 4 (以下、LC4) > (片側 3 車線)

自車が低速の先行車を追い越す場面で、自車と同じ 100 km/h で第 3 車線 (自車の 2 つ隣の車線) を走行する実験対象車が、自車の方向指示器点滅開始と同時にもしくは自車の白線到達と同時に第 2 車線への LC を開始 (図 2(d))。

2.3. 実験条件

2.2 節で示した実験場面の詳細条件を表 2 ~ 5 に示す。なお、表中無色の行は実験条件により変化するパラメータ、灰色でハッチングされた行は定数を示す。

表 2 LC1 の実験条件 (先行車減速)

LC No.	1_1	1_2
D_{Sub} [m/s ²]	3	6
V_{Ego} [km/h]	100	100
V_{Sub1} [km/h]	80	80
V_{Sub2} [km/h]	0	0
V_{Other} [km/h]	100	100
l [m]	56	56
イベントトリガ	自車方向指示器	自車方向指示器

表 3 LC2 の実験条件 (先行車も LC)

LC No.	2_1	2_2	2_3	2_4	2_5
V_{Sub1} [km/h]	80	80	60	60	60
イベントトリガ	自車白線到達	自車方向指示器	自車白線到達	自車方向指示器	自車方向指示器
実験対象車の方向指示器点滅有無	あり	あり	あり	あり	なし
V_{Ego} [km/h]	100	100	100	100	100
V_{Other} [km/h]	100	100	100	100	100
l [m]	56	56	56	56	56

表 4 LC3 の実験条件 (後続車も加速しながら LC)

LC No.	3_1	3_2	3_3	3_4	3_5
A_{Sub} [m/s ²]	1.5	1.5	3	3	3
x_1 [m]	56	28	56	28	28
実験対象車の方向指示器点滅有無	あり	あり	あり	あり	なし
V_{Ego} [km/h]	100	100	100	100	100
V_{Sub1} [km/h]	100	100	100	100	100
V_{Sub2} [km/h]	130	130	130	130	130
V_{Lead} [km/h]	80	80	80	80	80
イベントトリガ	自車方向指示器	自車方向指示器	自車方向指示器	自車方向指示器	自車方向指示器

表 5 LC4 の実験条件 (2 つ隣の車線の車両も LC)

LC No.	4_1	4_2	4_3	4_4	4_5	4_6	4_7
イベントトリガ	自車白線到達	自車方向指示器	自車白線到達	自車方向指示器	自車白線到達	自車方向指示器	自車方向指示器
x_2 [m]	-20	-20	-4	-4	10	10	-4
実験対象車の方向指示器点滅	あり	あり	あり	あり	あり	あり	なし
V_{Ego} [km/h]	100	100	100	100	100	100	100
V_{Sub1} [km/h]	100	100	100	100	100	100	100
V_{Lead} [km/h]	80	80	80	80	80	80	80

ここで、 V_{Ego} は自車速度、 V_{Sub1} は実験対象車の初期速度、 V_{Sub2} は実験対象車が加減速をおこなう場合の加減速終了後の速度、 D_{Sub} は実験対象車が減速をおこなう場合の減速度、 A_{Sub} は実験対象車の加速度、 x_1 は LC3 における自車と実験対象車の初期車間距離、 x_2 は LC4 における自車と実験対象車の初期車間距離とした。 x_2 は自車前端から実験対象車後端の距離とし、自車と実験対象車は約 4 m で横並びとなる。

20 ~ 50 代の 20 名の男女が実験に参加した。1 人の実験参加者は、表 2 ~ 5 に示した 19 種の条件をすべて走行することとした。参加者には定速走行装置を用いて 100 km/h で走行し、低速の先行車に追いついた場合には追い越しのために LC するよう教示した。

また、自車の車幅は 1.57 m、車線幅は 3.7 m とした。

3. 実験結果

以下に紹介する実験結果の有意差検定として、行動割合の比較では、2 標本 KS 検定をおこない、Bonferroni 補正をおこなった。分布の比較ではノンパラメトリックの順位和検定である Kruskal-Wallis 検定をおこない、Steel-Dwass 法による多重比較をおこなった。

3.1. LC1 の結果と考察 (前方の車両が減速)

LC1 における実験参加者の行動割合を図 3 に示す。実験対象車の減速度の違いによって実験参加者の行動割合に有意差はみられなかった。ブレーキ操作する参加者は半数を超えたものの、完全に停止するケースは少なかった。

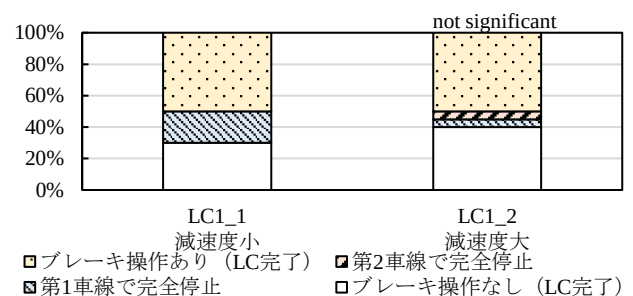


図 3 実験参加者の行動割合 (LC1)

次に、LC が完了した試行のうち、自車が実験対象車と衝突寸前まで接近した場合と、両者の距離に十分な余裕があった場合を比較した。ここで、乗用車用衝突被害軽減ブレーキの緊急制動の目安として提案された指標³⁾を参考に、衝突予測時間 TTC (Time to Collision: 相対距離を相対速度で除した値、速度関係

に変化がなければ何秒後に衝突するかを表す指標) の最小値が 0.9 秒未満の場合を衝突寸前まで接近した状態であると判断した。

自車と実験対象車との最小 TTC が 0.9 秒未満の場合と 0.9 秒以上の場合の自車方向指示器点滅開始時の実験対象車との TTC (LC 開始時の TTC) を図 4 に示す。最小 TTC が 0.9 秒未満の場合は、LC 開始時の TTC は中央値で約 8 秒を下回っている。一方で最小 TTC が 0.9 秒以上の場合は、LC 開始時の TTC は中央値で 9 秒以上であった。速度差 20 km/h の先行車を追い越す場合には、TTC が 8 秒以上の状態から LC を開始すると、先行車が急減速した場合でも衝突の危険が高い状況に陥ることなく LC を完了することが可能であることがわかった。

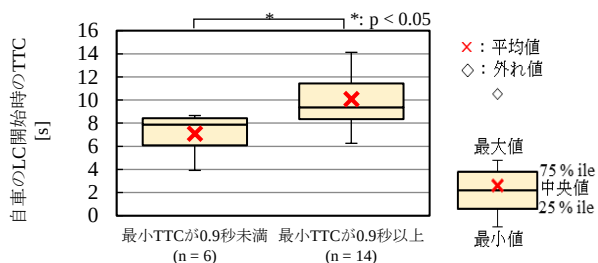


図 4 自車の LC 開始時の TTC (LC1)

3.2. LC2 の結果と考察 (前方の車両も LC)

LC2 における実験参加者の行動割合を図 5 に示す。LC2_5 において 1 件の衝突が発生した。図中の赤線で囲まれた部分は、実験参加者が LC を中断した場合を示している。図 5 より、LC2_2 および 2_4 では実験参加者の 70% 以上が LC を中断していることがわかる。LC2_2 および 2_4 は自車と実験対象車の方向指示器点滅開始が同時の条件であり、多くの実験参加者は先行車の方向指示器の点滅開始が自車とほぼ同時であった場合には、自車の LC を中断することがわかった。

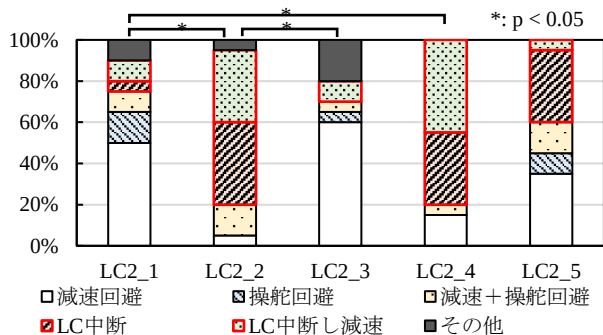


図 5 実験参加者の行動割合 (LC2)

また、本実験場面においては、全ての条件において、最小 TTC の 25 %ile 値が 0.9 秒を下回らず、多くの場合で衝突の危険が高い状況に陥ることはなかった。

3.3. LC3 の結果と考察 (後方の車両も LC)

LC3 における実験参加者の行動割合を図 6 に示す。図中の赤枠で囲まれた部分は実験参加者が LC を中断した場合を示している。図 6 より、LC3_2、LC3_4、LC3_5 では LC を中断する割合が 35 ~ 40 % となっており、LC3_1 および LC3_3 よりも LC を中断する割合が高くなっている。LC3_2、LC3_4、LC3_5 では自車と実験対象車の初期相対距離が約 28 m と非常に近く、実験参加者が後方車両の行動を認識していた可能性がある。

次に、LC3 の中で衝突の危険がより高い実験条件 ($x_1 = 28$ m、 $A_{Sub} = 3$ m/s²) である LC3_4 および LC3_5 で LC を中断した場合に関して、実験参加者が LC を中断した時点での実験対象車の横移動量を調べた結果を図 7 に示す。ここで、図 4 と同様に最小 TTC が 0.9 秒を上回った場合と下回った場合で比較した。図 7 より、最小 TTC を 0.9 秒以上確保できた場合には、ほとんどの場合で実験対象車が車線境界線に到達するまでに自車の LC を中断したことがわかる。このため、衝突の危険なく回避ができたドライバは、後方の車両の動きを認識していたため、素早く LC を中断できたと考えられる。

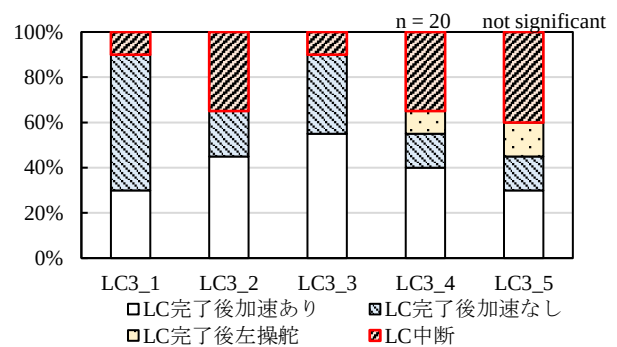


図 6 実験参加者の行動割合 (LC3)

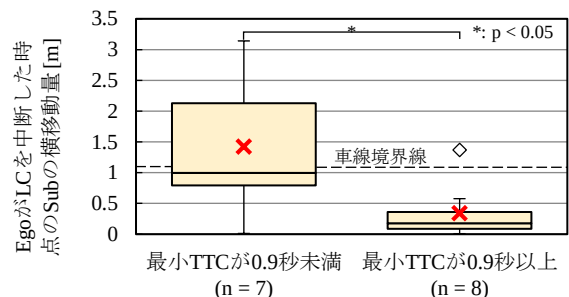


図 7 LC 中断時の実験対象車の横移動量 (LC3)

3.4. LC4の結果と考察（2つ隣の車線の車両もLC）

LC4における実験参加者の行動割合を図8に示す。図8は実験対象車と自車の位置関係ごとに比較した。ここで、LCの中断とは、自車が車線境界線に到達する前に方向指示器を消灯し、LCを断念した場合を指し、回避行動は左操舵・加速・減速を指す。図8より、実験対象車が自車後方にいる場合には回避行動をおこなわずにLCを完了する割合が約70%、実験対象車が自車前方の場合には回避行動もしくはLCの中断をおこなう割合が80%となり、自車と2つ隣の車線の車両のLCのタイミングが重なった場合には、より前方にいる車両のLCの実行を優先する傾向が確認された。なお、本実験場面では、LCを開始せず先行車に追従する参加者もいた。

一方で、実験対象車が真横にいるLC4_3、LC4_4、LC4_7は自車がなんらかの回避行動をおこなさない限り衝突してしまう条件であるため、ほとんどの場合でLCの中断もしくは回避行動をおこなった。しかし、LC4_3で11件、LC4_4で1件、LC4_7で5件の衝突が発生した。LC4_3は実験対象車の行動開始トリガが自車の白線到達であり、実験対象車がLCのための横移動を開始した時点では自車のLCの手順がほとんど完了し、実験参加者の多くがすでに前方に注意を向けており、衝突回避行動が遅れたと考えられる。

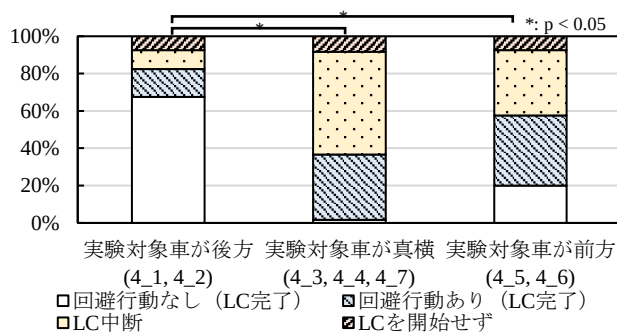


図8 実験参加者の行動割合 (LC4)

次に、LC4_3、LC4_4、LC4_7において、LC中の自車の右前輪が白線に到達した後に左操舵をおこなって元の車線に戻った場合の、左操舵時点の実験対象車の横移動量を調べた結果を図9に示す。ここで、衝突は合計17例あったが、加速したが衝突した2例と減速したが衝突した1例および回避行動なく衝突1例の合計4例は除いた。

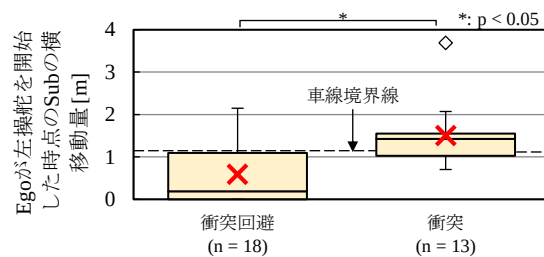


図9 自車が左操舵を開始した時点の実験対象車の横移動量 (LC4)

図9より、衝突を回避した例では25~75%ileで実験対象車が車線境界線に到達するまでに左操舵を開始できていることがわかる。一方で、衝突した場合にはほとんどの場合で実験対象車が第2車線に進入した後に左操舵を開始していることがわかった。

4. まとめ

LCを実行中に衝突の危険が高い状況に陥る場面をDSにより再現し、一般ドライバの危険回避行動に関する調査をおこなった。得られた結果の内、特に重要と考えられる点を以下にまとめる。

- ・ 自車がLCを開始する時点で先行車とのTTCを8秒以上確保していれば、自車のLC中に先行車が急減速した場合であっても衝突の危険なくLCを完了することができる (3.1節)
- ・ 自車のLC中に先行車もLCをおこなった場合は、優れたドライバは衝突の危険なくLCを完了することが可能である (3.2節)
- ・ ドライバは先行車の方向指示器を認識しており、先行車と自車の方向指示器点滅開始がほぼ同時であった場合には、多くのドライバが自車のLCを中断する (3.2節)
- ・ 自車のLC中に後続車が加速しながらLCをおこなった場合、優れたドライバは、後続車の横移動を認識して回避行動をおこなう場合がある (3.3節)
- ・ 自車の2つ隣の車線の他車両と第2車線を競合することになった場合には、他車両が車線境界線に到達するまでに元の車線に戻るための左操舵をおこなわなければ衝突の危険性が高くなる (3.4節)

参考文献

- 1) UN ECE: ECE/TRANS/WP.29/2022/59/Rev.1 (2022)
- 2) UN ECE: ECE/ TRANS/ WP. 29/ 2022/ 58 (2022)
- 3) Patrick Seiniger: AEB Car-Car and Pedestrian: Last Point To Steer For Various Cars and Speeds, AEBs 04-05 (2018)

講演 10. 自動運転から手動運転への引継ぎ要請に用いる警告音の断続周期が運転引継ぎ行動に与える影響

自動車安全研究部
中央大学

※阿部 晃大
戸井 武司

加藤 洋子

関根 道昭

1. はじめに

レベル 3 以上の自動運転では、あらかじめ定められた運行設計領域 (ODD: Operational Design Domain) 内において、車両の運転に必要な「認知・判断・操作」を自動運転システムが担う。そのため、自動走行中にドライバは運転操作から解放されることとなる。国連協定規則第 157 号¹⁾ (以下、UN-R157) は、レベル 3 の自動運転車に対して、システムの故障や ODD からの逸脱が発生して自動運転が継続困難となった際に、運転引継ぎ要求 (TD: Transition Demand) を提示することを求めている。TD は少なくとも光学式の信号とし、それに加えて音響式または触覚式の信号のいずれかによるものとされている。TD 提示後 10 秒以上経過してもドライバが応じない場合は、リスク最小化制御 (MRM: Minimum Risk Manoeuvre) が開始される。そのため、TD を受けたドライバは速やかに運転を引継ぐ必要がある。

自動運転システムはまだ普及初期の段階であり、また TD の適切な提示方法に関する検討も十分ではない。筆者らの既報²⁾では、TD の警告音として断続音を使用する場合の断続周期や自動運転中に行う運転以外の作業 (二次タスク) の内容が運転引継ぎ時のドライバ行動に与える影響を調べるシミュレータ実験を行った。1.6kHz の警告音が 1 秒間に ON/OFF を繰り返す回数 (cps: cycle per second) として 2 回 (2cps) と 6 回 (6cps) の 2 条件を設定し、運転引継ぎ後の左カーブ走行中の車両挙動を分析したところ、6cps 条件は 2cps 条件よりも車線に対して左右方向への移動量が少なく (車線の中心に近い位置を走行でき)、走行が安定することを確認した。また、実験後に行った断続音に対する印象評価では 6cps は 2cps より緊急感が高く評価され、この特性がカーブ路における車線の追従性に寄与したと考えられた。その一方で、6cps は「不快感」も高く評価されることが確認されており、自動運転中に強い緊急感、不快感を生じさせる音が提示された場合にドライバを不要に驚愕させ、不安全な行動を誘発する恐れがあると考えられる。また、二次

タスクとしてスマートフォンを用いた 2 種類の課題を設定し、課題なし条件 (スマートフォンを手に持つのみ) との比較を行ったところ、TD の提示から前を向くまでの時間が課題なし条件、動画視聴課題、計算課題の順に増加したほか、課題への没入によって TD に対応しなかったとみられる事例が確認された。

ドライバが TD に対して適切に反応しない場合、TD の警告を強めることによってドライバの行動を促す必要がある。UN-R157 では、TD は提示から遅くとも 4 秒後に強化 (escalate) されなければならないと規定している。しかしながら、その手法について具体的な記述はない。本研究では、TD の強化方法の一つとして「警告音の断続周期の変化」に着目した。既報²⁾にて用いた 2 種類の断続音を使用し、2cps で鳴り始め、その後 6cps に変化する音を用いた場合、鳴り始めにおけるドライバの驚愕感を抑えつつ、断続周期の増加により引継ぎ後に車線に沿った走行となり、走行が安定する効果が期待される。これを検証するためドライビングシミュレータ実験を行った。

2. 実験条件

断続音の断続周期がドライバの運転引継ぎ動作に与える影響を調べるため、パターンの異なる 3 種類の断続音を用意した。また、二次タスクによる影響も確認するため、既報²⁾にて用いた 2 種類の課題を設定した。これらを組み合わせた計 6 条件を全被験者に対して 1 回ずつ実施した。

2. 1. 警告音

実験に使用した断続音の断続パターンを図 1 に示す。このうち、図 1 の上段と中段は既報²⁾にて使用したもの (それぞれ、2cps 条件、6cps 条件) であり、図 1 下段は 2cps で鳴り始め、2 秒後に 6cps に変化するもの (エスカレーション条件) である。エスカレーション条件における警告音変化までの時間については、既報²⁾にて警告音が鳴ってからアクセルペダルを踏み込むまでの時間を計測した際、非高齢者の結果が 2.5 秒程度 (二次タスクの種類によって変化) であっ

たことから、2秒に設定することによって警告音の変化による効果を確認できると考えた。断続音は、いずれも周波数 1.6kHz、音圧レベル 60dB(A)（運転席着座時のドライバの耳元位置で計測）とし、TD と同時に助手席側に設置したスピーカから提示して、自動運転の解除とともに停止した。

2. 2. 二次タスク

二次タスクは動画視聴条件と計算条件の 2 種類を実施した。どちらも実験用のスマートフォン（縦 149mm、横 71mm）を手を持って行うものである。

動画視聴条件は、5 種類の動画の中から被験者が好きなものを選んで視聴する。動画視聴中は音量調整や再生場面の操作を禁止し、タスクに集中させる目的で走行後に動画に登場するキーワードを問う簡単なテストを行った。動画の音量は 1 分間の平均音圧レベルで約 57dB(A)であった（スマートフォンをステアリングの手前に設置した場合）。

計算条件では、図 2 に示すようにスマートフォンの画面上に一桁の数字をランダムに 2 個表示し、その下の下一桁をタップ操作で入力する作業を繰り返し行う。本課題は、視覚情報を理解し、考え、指で入力することから、メール等のテキスト入力に類似する作業と考えられる。なお、これらの二次タスクは先行研究³⁾にて作業負荷に関する検討を行っており、NASA-TLX などを用いた評価から、動画視聴よりも計算のほうが高い作業負荷を持つことを確認している。

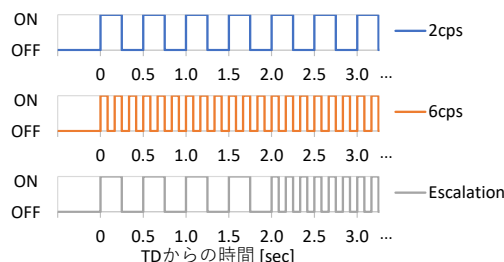


図 1 警告音の断続パターン

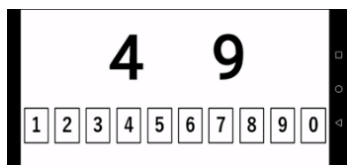


図 2 計算条件におけるスマートフォン画面

3. 実験方法

3. 1. 実験シナリオ

被験者は図 3 に示すドライビングシミュレータに乗車し、他交通の存在する片側 3 車線の高速道路の第

2 車線を時速 80km で自動走行した。走行中はスマートフォンを持ち、指定された二次タスクを行った。走行開始から 6 分後に TD に相当する警告音を提示した。警告音が聞こえたらできるだけ速やかに二次タスクを中断し、アクセルペダルもしくはブレーキペダルを踏み込むか、ステアリングを操作することによって運転を引継ぐよう被験者に教示した。

実験に使用したコースは直線区間と曲線区間から構成される道路とした（図 4）。TD は曲線半径 300m のカーブで提示されるため、運転を引継いだ直後に被験者が適切に操舵を行う必要がある。実験は図 5 に示す順序で行い、走行風景から TD のタイミングを予測されないよう、走行ごとに往路と復路を入れ替え、他車の配置を変更した。また、TD が直線区間で発生するダミー走行を 2 回設けた。



図 3 実験の様子

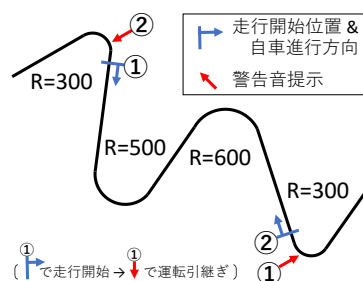


図 4 実験コース

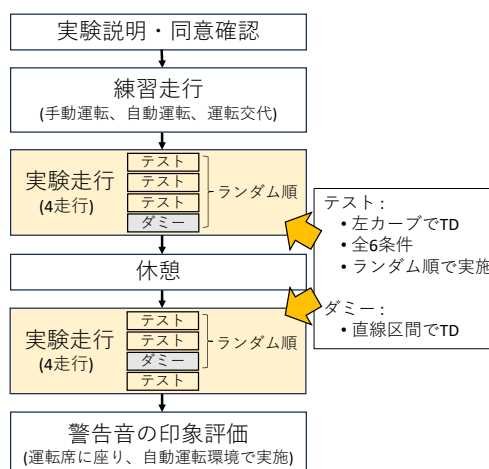


図 5 実験の流れ

既報²⁾では、二次タスクの中断後、直ちにスマートフォンを助手席に置き、運転を引継ぐよう指示した。一方、今回の実験では、端末側面にある電源ボタンを押して画面を消灯させ、助手席に設置した箱（縦160mm、横83mm、深さ53mm）に入れてから運転を引継ぐよう教示した。これは、現実の運転引継ぎ場面を想定した際、スマートフォンをむやみに放置するのではなく、画面を消灯し、小物入れなど安定した場所に置くことが多いと考えたためである。また、これら一連の動作にある程度時間を要するため、警告音の変化を確実に被験者に聴かせることができると考えた。

3. 2. 被験者

運転免許を保有する被験者を研究所外部から募集し、20歳代から50歳代の非高齢者16名（男性8名、女性8名、平均年齢38.8歳）が参加した。実験は交通安全環境研究所の「人間を対象とする倫理規定」に基づく事前審査を経ており、全被験者から同意を得た上で実施した。被験者には視力検査と聴力検査を実施し、実験の実施に問題がないことを確認している。

3. 3. 取得データ

実験中の被験者の動作を複数台のカメラを用いて毎秒30フレームで記録した。運転引継ぎ後の操作はドライビングシミュレータのログ機能を用いてサンプリング周波数60Hzで取得した。また、すべての実験が終了後、実験と同じ状態で警告音をランダムな順序で提示し、警告音に対する印象を8項目、7段階で評価させた。

4. 実験結果

4. 1. 警告音に対する主観評価

警告音の印象評価の平均値を図6に示す。6cpsは「危機感がないー危機感がある」「緊急感がないー緊急感がある」「些細なー重要な」「不明瞭なー明瞭な」「注意を引かないー注意を引く」の項目で評価値が高かった。2cpsは全体的に中立的な評価値（3-5）となり、「快いー不快な」では6cpsより「快い」側に評価された。エスカレーションの評価値は、8項目中7項目で2cpsと6cpsの中間となった。

断続音の断続周期の変化がドライバの緊急感や心理的負担に与える影響を調べるため、「緊急感がないー緊急感がある」「不快なー快い」の2項目に対して警告音（3水準）を一要因とする分散分析を行った。

緊急感については主効果が有意（ $F(2,30)=7.241$, $p<.01$ ）であり、Holm法による多重比較の結果、6cpsとエスカレーションが2cpsに対して評価値が高い（ともに $p<.05$ ）ことがわかった。一方、快不快について警告音の主効果は有意ではなかった。断続音の断続周期を変化させたことにより緊急感は一時的に上昇したものの、不快感の上昇は見られなかった。

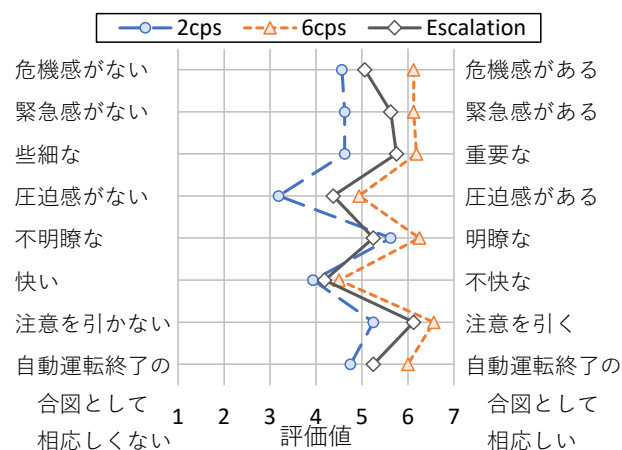


図6 警告音に対する印象

4. 2. 警告音に対する反応

警告音が提示されてから運転を引継ぐまでの行動について、以下の4種類の動作に着目し、警告音が鳴り始めてから各動作が観測されるまでの時間（反応時間）を実験映像から計測した。

- ・前を向く
- ・ステアリングを握る
- ・アクセルペダルに足を載せる
- ・アクセルペダルの踏み込みを開始する

反応時間の平均値と標準偏差を図7に示す。引継ぎに要した時間が10秒を超える事例や、エスカレーション条件にて警告音の変化前に引継ぎを終える事例はなかった。平均反応時間に対して警告音（3水準）と二次タスク（2水準）の二要因分散分析を行った結果、有意差は確認されず、エスカレーション条件は2cps条件、6cps条件と同等であった。既報²⁾では2cps条件と6cps条件の間に差は見られなかったものの、動画視聴条件の反応時間は計算条件よりも0.4秒程度長かった。今回の実験映像を確認したところスマートフォンの画面消灯に手間取る被験者がいたため、実験条件間の差が生じにくくなった可能性がある。

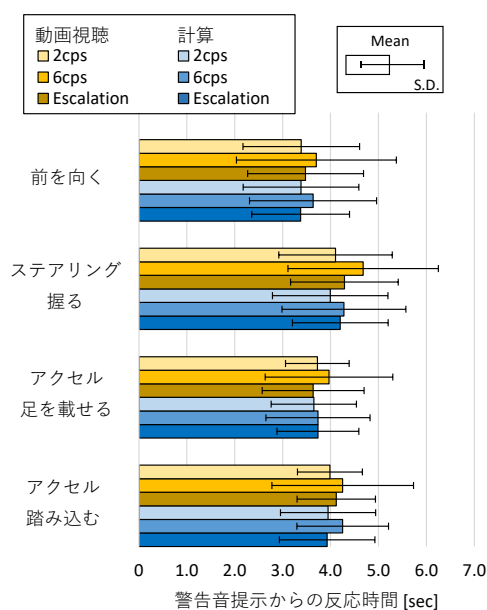


図7 警告音提示からの反応時間

4. 3. 車両挙動

運転引継ぎ後の走行の安定性を評価する一つの手法として、運転引継ぎ後 10 秒間の「進行方向の移動量に対する左右方向の移動量の割合」を求めた。条件ごとの平均値と標準偏差を図 8 に示す。値が小さいほど道路線形に沿って走行したことを意味しており、動画視聴、計算ともに、平均では 6cps 条件が最も小さく、次いでエスカレーション条件、そして 2cps 条件が最も大きかった。警告音 (3 水準) と二次タスク (2 水準) の二要因分散分析を行った結果、有意差は見られなかった。

既報²⁾では 6cps の条件においてこの指標が有意に小さかったものの、今回の実験では確認されなかった。今回の実験では TD と同時に警告音を開始し、運転引継ぎと同時に停止したため、警告音の提示時間は約 4 秒間であった。一方、既報²⁾では運転を引継いでも TD から 10 秒間持続する設定であった。そのため、警告音の提示時間が運転の安定度に影響した可能性があると考えられる。

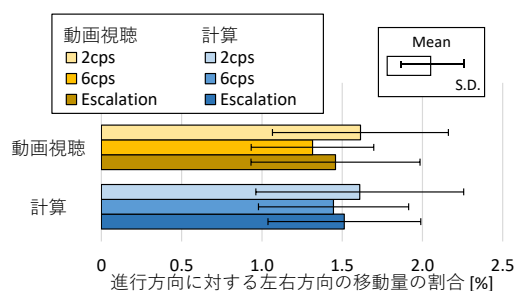


図8 進行方向に対する左右方向の移動量の割合

5. まとめ

自動運転から手動運転への運転引継ぎ時に用いる警告音について、断続周期の変化が運転引継ぎ行動に与える影響について調査を行った。

断続周期が毎秒 2 回 (2cps 条件)、毎秒 6 回 (6cps 条件)、2cps で開始し 2 秒後に 6cps に変化するもの (エスカレーション条件) の 3 種類を比較した。警告音の印象を評価したところ、断続周期の増加によって緊急度は上昇したものの、不快感は上昇しなかった。警告音に対する反応時間や運転引継ぎ後の車両挙動を比較した結果、エスカレーション条件は他の条件と同等であった。これらの結果より、エスカレーション条件は、断続周期が高い警告音により生じる不快感や緊迫感を抑えつつ、安定した運転引継ぎを促すことができると期待される。

今回の実験結果は既報²⁾と異なる傾向を示す部分が多かった。特に車両挙動の指標に、警告音の提示時間が影響した可能性が懸念された。TD は自動運転から手動運転への引継ぎを求める信号であるため、引継ぎが終了した時点で TD を停止することが自然と考えられる。しかしながら、警告音の持続により運転が安定するのであれば、一定時間警告を継続することが望ましいと考えられる。今後の実験により、運転引継ぎ時間の短縮や車両挙動の安定化に寄与する要因を特定する予定である。

参考文献

- 1) UN Regulation No.157, “Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems”, E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.156 (2021)
- 2) 阿部晃大, 加藤洋子, 関根道昭, 五十部健太, 速水亮, 戸井武司, “二次タスクと警報音が運転引継ぎ行動に与える影響”, 自動車技術会 2022 年秋季大会学術講演会予稿集, No.075, pp.1-6 (2022)
- 3) 関根道昭, 加藤洋子, 榎本恵, 五十部健太, 戸井武司, “自動運転中の二次タスクが運転引継ぎの安全性に及ぼす影響 (第 1 報) 二次タスクの分類と作業負荷の定量化に関する考察”, 自動車技術会 2021 年秋季大会学術講演会予稿集, No.086, pp.1-6 (2021)

講演 1 1. 前面ガラス部を対象とした歩行者頭部保護試験に関する調査

自動車安全研究部

※田中 良知

細川 成之

松井 靖浩

1. はじめに

2019 年 5 月に開催された衝突安全に関する国際基準を議論する UN/ECE/WP29/GRSP 会議（以下 GRSP という）において、欧州委員会（以下 EC という）から歩行者保護国際基準（UN Regulation No.127、以下 R127 という）でボンネット部に限定されている頭部保護試験範囲を、前面ガラス部（ただし、A ピラー、ルーフ及びカウル近辺を除く）まで拡大する改定が提案された。その改定案について議論する国際タスクフォース会議（以下 TF という）が開催され、新品の前面ガラスで頭部保護試験を実施した際に傷害値が高くなる事例が発生し、まれに基準のしきい値を超える場合があることが報告された。TF ではこの頭部傷害値が高い状態を *atypical fracture mode*（以下「非典型状態」という）、頭部傷害値が低い状態を *typical fracture mode*（以下「典型状態」という）と定義し、非典型状態の発生原因とその対策案について議論した。しかし、結論に至らず、解決には更なる調査と議論のための時間が必要となった。他方、EC が欧州域内の基準改定の予定に合わせて R127 を早期に改定することを求めたことから、2021 年 12 月の GRSP において、2028 年 8 月までは認証試験時に非典型状態が発生した場合に試験のやり直しを可能とすることで、頭部保護試験範囲を拡大する R127 の基準改定案は合意された。

日本では非典型状態に関する知見が無かったことから、2019 年度に自動車基準認証国際化研究センターが調査⁽¹⁾を実施した。そして、当研究所でも 2020 年度から調査を実施し、新品のガラスを対象とした頭部保護実験で非典型状態の発生の確認と、頭部インパクトの加速度波形により典型状態と非典型状態の区別が可能と考えられることを確認した。さらに実験に用いた車両ではほぼすべての頭部保護実験で非典型状態が発生していた。その結果は昨年度のフォーラムで報告している⁽²⁾。

しかし、2028 年 9 月以降の認証試験においては試験のやり直しが出来ないことから、前面ガラス部

の頭部保護試験において適切な対策を講じる必要がある。そこで、昨年度報告した調査で使用した、ほぼすべての実験で非典型状態が発生した実験車両の前面ガラスに対して加工を施し、その加工が非典型状態の発生に与える影響について調査を実施したので、その結果を報告する。

2. 加工したガラスにおける歩行者頭部保護実験

2. 1. 実験方法

車両の前面ガラスには、一般に 3 層の合わせガラスが使用されており、今回の調査ではアウトガラス／中間膜／インナガラスのそれぞれの厚さが 2.0 mm／0.76 mm／2.0 mm の合計 4.76 mm の前面ガラスを使用した車両で実施した。図 1 に実験に使用した車両を示す。

前面ガラス部に衝突させる頭部インパクトとして、子供インパクトを使用した。衝突位置は、過去の調査結果⁽¹⁾⁽²⁾から非典型状態が発生しやすいと考えられる前面ガラス中央部とした（図 2）。R127 では、衝突位置により、子供インパクトと大人インパクトのどちらを使用するか定めている。実験車両における衝突位置は大人インパクトの試験範囲である。しかし、日本で多く普及している軽乗用車では前面ガラス部が子供インパクトの試験範囲となる場合がある。また、より軽い子供インパクトの方が、ガラスとの衝突時にガラスからの反力により発生する加速度が高くなることから、非典型状態発生の可能性が高いと考えられる。そのため、今回の調査では子供インパクトで実験を実施した。インパクト種類と衝突位置以外は、R127 の頭部保護試験方法に準じて実験を実施した。



図 1 実験車両外観



図 2 実験衝突位置

2. 2. ガラス加工方法

一般にガラスの破損はガラス表面の目に見えない傷がきっかけとなって発生することが知られている。また、当研究所で実施した調査⁽³⁾において、

非典型状態の発生時にガラスの破損が頭部インパクトの衝突部位ではなくガラスの端部から発生していたことを確認している。前面ガラスはその製造方法のため、ガラス端部に大きな傷が生じることから、端部の強度が最も低くなる。そのため、頭部インパクト衝突位置でガラスが破損しない場合、端部まで応力が伝わると、強度の低い端部から破損すると考えられる。

そこで、加工方法として、(1) 前面ガラスの表面に研磨剤を塗布して傷をつける、(2) 前面ガラス端部をやすり掛けしてより大きな傷をつける、の2種類の加工を行った。研磨剤塗布は、前面ガラス表面の傷を増やして、インパクト衝突時に前面ガラスが破損する可能性を高めることを、端部やすり掛けは端部での破損タイミングを早めることを目的としている。

さらに、研磨剤を塗布する加工では、(1) 研磨剤に指定された方法により塗布する（以下「研磨剤実験」という）、(2) 指定された方法で研磨剤を塗布した後にポリッシャーで前面ガラスを研磨して傷をより増加させる、の2種類の条件で加工を行った。前面ガラス端部をやすり掛けする加工は、(1) 前面ガラス表面を保護しない状態でやすり掛けを行う（以下「やすり掛け実験」という）、(2) やすり掛け時に発生するガラスの粉が前面ガラスに付着しないことを目的として前面ガラス表面を保護した状態でやすり掛けを行う（以下「表面保護実験」という）、の2種類の条件で加工を行った。

2. 3. 研磨剤塗布の方法

実験に使用した研磨剤には市販の研磨効果のある油膜取り（商品名：キイロビン 100）を使用し、研磨剤に指定された方法により塗布した。塗布後の前面ガラスに目に見える傷はなかった。研磨剤実験では、同じ条件で5回実験を実施した。

研磨剤塗布後にさらにポリッシャーで前面ガラスを研磨する作業については、ガラスを研磨する時間を、(1) 全体を一回磨く（以下「ポリッシャー1回実験」という）、(2) 全体を1分間磨く（以下「ポリッシャー1分実験」という）、(3) 全体を5分間磨く（以下「ポリッシャー5分実験」という）、の3水準とし、各2回実験を実施した。ポリッシャーで研磨後の前面ガラスに目に見える傷はなかった。図3に前面ガラスを磨いたポリッシャーを、図4に前面ガ



図3 ポリッシャー



図4 前面ガラス研磨状況
ラスの研磨状況を示す。

2. 4. 研磨剤塗布実験結果

図3に研磨剤実験により、図4にポリッシャーで研磨した前面ガラスへの歩行者頭部保護実験により計測された頭部加速度時間履歴図を示す。全ての研磨剤実験と、ポリッシャー1回実験の1回目とポリッシャー5分実験の1回目の加速度波形が近似していた。1 ms 付近で1回目のピークに達した後に急速に減少し、その後再び増加して3 ms 付近で2回目のピークに達し、その後減少し5 ms 付近でわずかに増加した後急速に減少した。

ポリッシャー1回実験の2回目、ポリッシャー1分実験の1回目と2回目、及びポリッシャー5分実験の2回目の加速度波形は近似していた。加速度は2 ms 付近でピークに達した後に減少し、5 ms 付近で急速に減少した。

全ての実験で、頭部加速度が4 ms 付近で800 m/s²以上と高い状態を保持していた。少なくともアウトガラスかインナガラスのどちらか1枚が5 ms 付近まで割れなかったために頭部加速度が高い状態を維持したと考える。

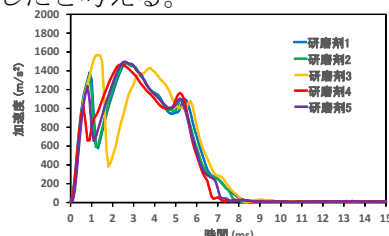


図5 研磨剤実験頭部加速度

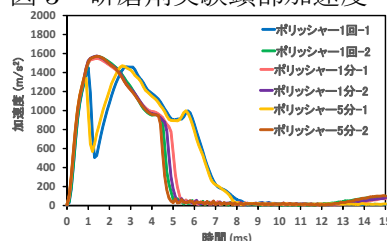


図6 ポリッシャー研磨実験頭部加速度

表1に研磨剤を塗布した前面ガラスに対する歩行者頭部保護実験の頭部傷害値を示す。全ての実験でHICは759から801の間にあった。全ての場合で頭部傷害値は基準のしきい値である1,000を下回ったが、典型状態のHICの値は一般に200前後であり、今回の全ての実験でその3倍以上の値であ

表 1 研磨剤実験頭部傷害値

実験番号	研磨剤1	研磨剤2	研磨剤3	研磨剤4	研磨剤5
HIC	776	760	801	759	769

表 2 ポリッシャー実験頭部傷害値

実験番号	ポリッシャー 1回-1	ポリッシャー 1回-2	ポリッシャー 1分-1	ポリッシャー 1分-2	ポリッシャー 5分-1	ポリッシャー 5分-2
HIC	763	775	792	793	761	774

ることから、非典型状態が発生していた。

2. 5. やすり掛け方法

図 7 に前面ガラス端部をやすり掛けした状況を、図 8 にやすり掛け前後のガラス端部の状況を示す。やすり掛けは 100 番の紙やすりを使用した。やすり掛け後の端部の傷は目に見えて増加していた。やすり掛け実験では同じ条件で 5 回実験を実施した。

図 9 に表面保護実験でのやすり掛け時の前面ガラスの保護状況を示す。表面保護実験では同じ条件で 6 回実験を実施した。

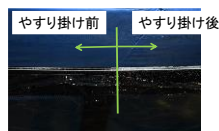


図 7 やすり掛け状況 図 8 やすり掛け前後状況



図 9 表面保護実験での保護状況

2. 9. やすり掛け実験結果

図 10 にやすり掛け実験により、図 11 に表面保護実験により計測された頭部加速度時間履歴図を示す。やすり掛け実験 2、4 と、表面保護実験 3 の加速度波形は近似していた。加速度は 1 ms 付近で 1 回目のピークに達した後に急速に減少し、その後再び増加して 3 ms 付近で 2 回目のピークに達し、その後減少し 5 ms 付近でわずかに増加した後に急速に減少した。5 回の研磨剤実験、ポリッシャー 1 回実験の 1 回目、及びポリッシャー 5 分実験の 1 回目における加速度波形とも近似していた。

やすり掛け実験 1、3、5 と表面保護実験 1 の加速度波形は近似していた。1 ms 付近でピークに達し、その後急速に減少し、その後再び増加し 2 ms 付近で 2 度目のピークに達し、その後 200 m/s² 付近まで減少した。

表面保護実験 2、4、5、6 の加速度波形は近似していた。加速度は 2 ms 付近でピークに達した後に減少し、5 ms 付近で急速に減少した。ポリッシャー 1 回実験の 2 回目、ポリッシャー 1 分実験の 1 回目と 2 回目、及びポリッシャー 5 分実験の 2 回目

における加速度波形とも近似していた。

やすり掛け実験 2、4 と表面保護実験 2、3、4、5、6 の場合で頭部加速度が 4 ms 付近で 800 m/s² 以上と高い状態を保持していた。やすり掛け実験 1、3、5 と表面保護実験 1 の場合で加速度は 2 ms で 200 m/s² 付近の低い状態まで減少し、その後は 400 m/s² を超えなかった。やすり掛け実験 2、4 と表面保護実験 2、3、4、5、6 の場合では、少なくともアウトガラスかインナガラスのどちらか 1 枚が 5 ms 付近まで割れなかったために頭部加速度が高い状態を維持し、やすり掛け実験 1、3、5 の 3 実験と表面保護実験 1 の実験では 2 ms 付近でアウトガラスとインナガラスが両方とも破損したために加速度が低下したと考える。

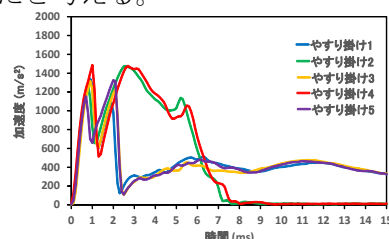


図 10 やすり掛け実験頭部加速度

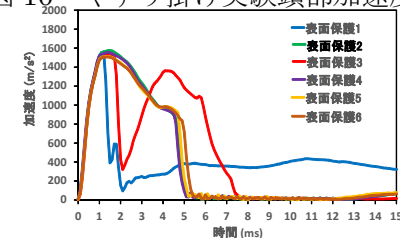


図 11 表面保護実験頭部加速度

表 2 に前面ガラス端部によすり掛けを行った前面ガラスに対する歩行者頭部保護実験の頭部傷害値を示す。加速度波形が 4 ms で 800 m/s² 以上の場合の HIC は 748 から 789 の間にあった。4 ms で 400 m/s² 以下の場合の HIC は 198 から 225 の間にあった。全ての場合で頭部傷害値は基準のしきい値である 1,000 を下回ったが、加速度波形が 4 ms で 400 m/s² 以下の場合の HIC に比べて、加速度波形が 4 ms で 800 m/s² 以上の場合の HIC は約 3.3~4 倍高かった。このため、加速度波形が 4 ms で 400 m/s² 以下の場合は典型状態が、加速度波形が 4 ms で 800 m/s² 以上の場合は非典型状態が発生していた。

表 3 やすり掛け実験頭部傷害値

実験番号	やすり掛け1	やすり掛け2	やすり掛け3	やすり掛け4	やすり掛け5
HIC	218	757	217	776	225

表 4 表面保護実験頭部傷害値

実験番号	表面保護1	表面保護2	表面保護3	表面保護4	表面保護5	表面保護6
HIC	198	789	771	777	748	756

3. 非典型状態発生時のガラス面におけるひずみ

今回の調査において、一部の実験で頭部インパクト衝突位置に x 軸、y 軸、45°軸方向の 3 軸測定用のひずみゲージを貼付し、衝突時のガラスのひずみを測定した。

図 12 に表面保護実験 4、5、6 の 3 実験で計測した衝突部位のひずみの時間履歴図を示す。計測した 3 実験で、ひずみゲージの軸方向によらずほぼ近似の結果となった。今回ひずみを計測した実験では全て衝突後約 5 ms でガラスが破損しており、破損したタイミングでひずみの計測値が振動した。ひずみは 1.5 ms 付近で最大となり、それ以降は値が減少した。また、ひずみが最大となる時刻は、図 11 で示すひずみを計測した表面保護実験の頭部インパクトの加速度が最大となる時刻と近似していた。

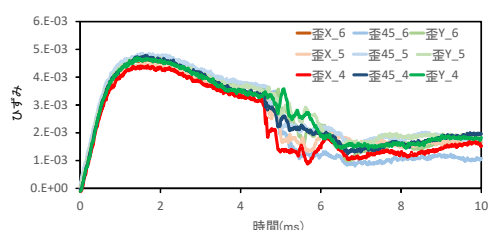


図 12 前面ガラスひずみ時間履歴図

4. 考察及びまとめ

今回の調査において、研磨剤を塗布、及び研磨剤塗布後にポリッシャーで研磨した前面ガラスを対象とした歩行者頭部保護実験を合計 11 回実施し、全ての実験で非典型状態が発生した。昨年度報告^②したように、今回の実験車両は新品ガラスに対する頭部保護実験のほとんどの場合で非典型状態が発生している。そのため、研磨剤塗布が非典型状態の発生に与える影響は小さいと考える。

表面を保護しない条件で端部をやすり掛けした前面ガラスを対象とした歩行者頭部保護実験を 5 回実施して、典型状態の発生する割合は 60%と昨年度報告した新品ガラスを対象とした場合や研磨剤を塗布した場合に比べて高くなった。しかし、表面を保護した条件で端部をやすり掛けした前面ガラスを対象とした歩行者頭部保護実験を 6 回実施して、典型状態の発生する割合は約 17%と表面を保護しない場合に比べて小さくなった。やすり掛けの際に発生したガラスの粉が前面ガラス表面に付着したことが典型状態の発生に影響を与える可能性があると考えられる。ただし、歩行者保護基準における頭部保護試験は新車の認証において実施する

ものであり、前面ガラス表面に微細な粒子を付着させた状態は認証試験を実施する上で妥当な状況ではないと考える。また、やすり掛け実験での非典型状態の加速度波形は研磨剤塗布実験の加速度波形と近似しており、やすり掛けにより端部の破損するタイミングの変化は見られなかった。

今回の調査で測定した歩行者頭部保護試験時に発生したガラスのひずみから、前面ガラスのひずみは方向によらず近似しており、全方向で近似したひずみが発生したと考える。また、約 1.5 ms でひずみが最大となり、それ以降は減少していたことから、前面ガラスは約 1.5 ms 時に変形が最大となったと考える。そして、ひずみが最大となる時刻と頭部インパクトの加速度が最大となる時刻がほぼ近似しており、前面ガラスが最大変形時に頭部インパクトへの入力が最大となったと考える。

今回の実験で測定した 3 軸方向のひずみから、頭部保護試験時に前面ガラス衝突部位に発生した最大応力を計算^④した結果、437 MPa～443 MPa であった。今回調査に使用した車両の前面ガラスは、歩行者頭部保護実験において 440 MPa 程度の応力で破損する可能性が低いと考える

今回の調査範囲では、認証試験で行う頭部保護試験で典型状態発生に影響を与える明確な加工方法は見つけられなかった。今後は、前面ガラスの形状や大きさ等が歩行者保護試験での典型状態の発生に与える影響や頭部傷害値に与える影響について調査する必要があると考える。

参考文献

- 1) 令和元年度公益財団法人日本自動車輸送技術協会自動車基準認証国際化研究センター調査「歩行者保護試験のガラス中央部における傷害値バラツキの確認」
- 2) 田中 他，“前面ガラス部を対象とした歩行者頭部保護試験に関する調査”，交通安瀬環境研究所フォーラム 2022, pp.89-90 (2022)
- 3) 田中 他，“前面ガラス部の歩行者頭部保護試験に関する調査”，自動車技術会 2023 秋季学術講演会，セッションナンバー125 (2023)
- 4) 株式会社 共和電業ホームページ：https://www.kyowa-ei.com/jpn/technical/notes/technical_note/rosette_analysis.html

ポスターセッション

①内燃機関搭載車のカーボンニュートラル化にむけた代替燃料の検討

環境研究部

※川原田 光典

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現にむけて自動車の電動化が進められており、新車販売台数に占める電動車の割合について目標が設定されている。一方で既存の内燃機関搭載車においてもカーボンニュートラルに寄与することは可能である。その1つは大気中の CO_2 および再生可能エネルギーで生産された水素を原料として合成する液体燃料である e-fuel を利用することである。しかし e-fuel はまだ研究開発段階にあり大量生産には時間がかかることから、導入初期には化石燃料やバイオ燃料などと混合して使用することが考えられる。本稿ではカーボンニュートラルの要件や代替燃料使用時の車両影響に関する交通研の取組みの一部を紹介する。

2. カーボンニュートラルの要件

図1に自動車を中心とする CO_2 排出の概念図を示す。原油からガソリンや軽油などの化石燃料を製造すると、製造工程で CO_2 が大気中に排出される(A)。e-fuel は大気中の CO_2 を回収(B)して炭素源とし、再生可能エネルギー由来の電力を用いるため製造時に CO_2 は排出されない。任意の混合比の化石燃料と e-fuel の混合燃料を車両で使用すると CO_2 が排出される(C)。これを森林・海洋吸収や再生可能エネルギー由来の電力を用いる装置などにより回収および貯留する(D)ものとする。化石燃料と e-fuel を混合して用いる場合、排出分の A+C と回収分の B+D が同量になれば、カーボンニュートラルといえる。

排出分のうち A については、製造に要するエネルギーを再生可能エネルギーに転換することなどにより削減が可能である。しかし C は使用した燃料量に応じて排出されるため、燃費向上による削減は見込めるものの、極端な削減は見込めない。ここで e-fuel の主成分はガソリンもしくは軽油相当の炭素数の直鎖炭化水素であることから、芳香族を含まないことや炭素数分布の違いなど異なる点はあるものの、いずれも同等の燃料として考える。化石燃料と e-fuel の混合比を仮に 50:50 とした場合、排出される CO_2 には同等の比率で化石燃料由来および e-fuel 由来のものが含まれる。このうち e-fuel 分については B と同量であるため、A を極力削減したとしても、C に含まれる化石燃料の混合比分の CO_2 については回収(D)しなければカーボンニュートラルにはならない。

なお、回収した CO_2 を合成燃料の炭素源として活用することも検討されている。この合成燃料は、カーボンリサイクル(CR)燃料と呼ばれ、大気から回収した CO_2 を炭素源とする狭義の e-fuel とは異なるものの、いずれも CO_2 を炭素源とするため製造プロセスや燃料性状は同等である。排出ガスから回収された CO_2 のみを炭素源とする場合、e-fuel の製造時に大気から回収する CO_2 が無い(B=0)ため、大気中の CO_2 を増加させないためには $A+C=D$ となるだけの回収が必要である。なお CR 燃料については排出(+回収)者と CR 燃料の利用者のどちらの排出とすべきか議論が進められている。例えば CR 燃料である合成メタンを用いた際の排出に

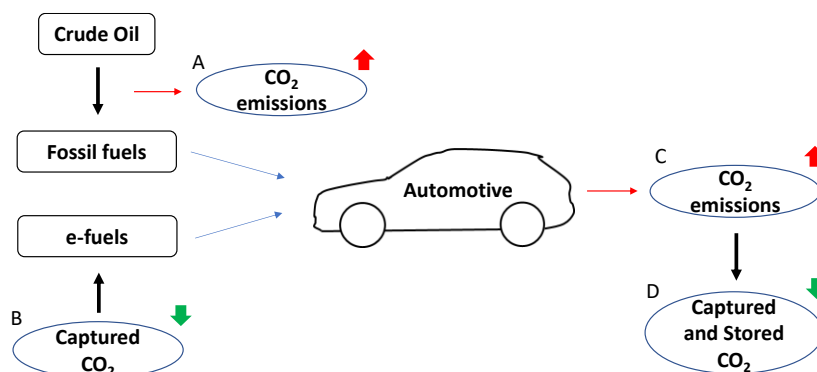


図1 内燃機関搭載車の CO_2 排出の概念図

については、排出者と利用者のどちらか一方の排出とする案や按分する案の他、どちらもゼロとする案についても検討が行われている¹⁾。

次にバイオ燃料（植物由来）を用いる場合を考える。バイオ燃料は製造時に排出（A）があるものの、燃焼時の排出ガスに含まれる CO_2 は植物の成長によって大気中から固定された CO_2 である。このため、e-fuel とバイオ燃料を用いる場合、燃料由来の CO_2 は元の大気中に戻るだけであり総量は増加しない。これらのことから、大気中の炭素分を増加させない方法としては、供給量の制約はあるものの e-fuel とバイオ燃料に切り替えを進め、化石燃料の使用量を削減していくことが考えられる。

3. 噴射試験

前章では CO_2 の回収を含めカーボンニュートラルにむけた燃料の要件などについて説明したが、同時に実車両への影響も検討しなければならない。そこで本章では、代替燃料を使用した際の車両への影響を確認すべく、実機のインジェクタを用いて噴射試験を実施した。e-fuel はまとまった量の入手が困難であることから、同様の合成プロセスで製造される GTL（Gas To Liquid）燃料を用いた。バイオ燃料としては植物油を水素化処理して製造する HVO（Hydrotreated Vegetable Oil）を用いた。まずは化学分析により違いを把握した。図2に GTL、HVO と比較対象の軽油（JIS #2）に含まれる直鎖飽和炭化水素の炭素数分布を示す。軽油が広い範囲でピークを持ち、多少狭まるものの GTL も広い範囲でピークを持つ。HVO は分布の範囲が狭いうえ、ピークが判別しづらい。これは直鎖飽和炭化水素以外にも多く含まれることを示す。軽油相当の GTL、HVO を選択したものの、このように燃料性状には差がある。続いて噴射試験を実施した結果を図3に示す。噴射圧は実機で用いる最高圧付近の 200MPa に設定した。噴射信号印加後 0.8ms（左）と 0.85ms（右）の画像を示す。なお図中の(a)から(c)は図2と同じである。(c)の軽油は他の燃料と比べてわずかに噴射の始まりが遅れているものの、それ以外には全体として極端な差は見られなかった。今後は、性状表だけで実機で使用可能か判断できることを1つの目標に、燃料種を増やしつつ車両や排出ガスへの影響について調査を続けていく。

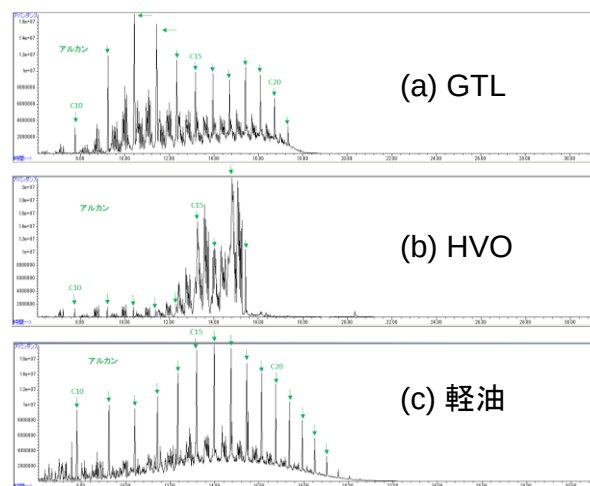


図2 直鎖飽和炭化水素の炭素数分布

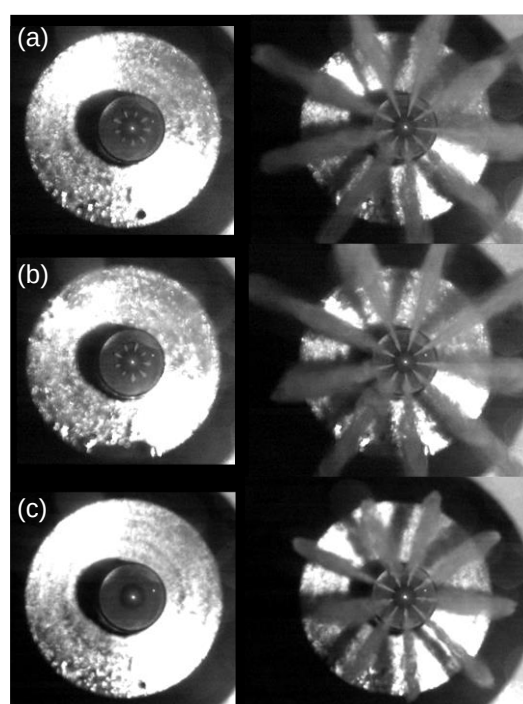


図3 噴射試験： $T=0.8\text{ms}$ （左）、 0.85ms （右）

4. まとめ

カーボンニュートラルの要件や代替燃料、それらに関する交通研の取組みの一部を紹介した。今回の実験の結果、燃料性状には差があるものの、燃料噴射には極端な差は見られなかった。今後は、性状表だけで実機で使用可能か判断できることを目標に、燃料種を増やしつつ車両や排出ガスへの影響について調査を続けていく。

参考文献

- 1) “ CO_2 カウンترلールの検討に係る論点”，資源エネルギー庁，(2023)

②深層学習による異常検知を利用した走行音に基づく違法車両検出

環境研究部

※尾崎 信利

宝渦 寛之

1. はじめに

道路交通騒音問題の中でも、住民感情を著しく損ねる存在として、自動車ユーザが自ら交換・改造したマフラーによって大きな騒音を発する車両が挙げられる。このような車両の取り締まりとして、街頭検査が実施されている。街頭検査では走行中の車両を呼び止めて停車させ、マフラー近傍に設置した騒音計でエンジン作動時の騒音レベル（以下、近接排気騒音）が規制値を超過するかを検査する。ここで本稿では、近接排気騒音が規制値を超過する車両を違法車両、超過しない車両を適法車両とする。近接排気騒音の検査は時間・労力を要するため、車両走行音から違法車両である可能性のある車両をスクリーニングできれば効率的な街頭検査に資すると考えられる。

交通安全環境研究所では、これまでに深層学習を利用した車両走行音に基づく違法車両の検出手法を開発・検討してきた。これまでの研究では、深層学習モデルに、学習データで適法/違法車両の走行音の特徴を学習させ、テストデータの走行音が適法/違法車両のどちらに近いかを判断させていた（教師あり分類学習）が、これには適法/違法車両の走行音データが同数程度必要であった。一方で、実際の道路交通状況を考えて、違法車両の走行音は適法車両に比べて入手機会が少ないため、学習データに含まれる違法車両の走行音データが不足し、学習が不十分となることで、検出精度が低下する可能性があった。

そこで本稿では走行音に基づく違法車両の検出を異常検知問題として取り扱う。すなわち、深層学習モデルに適法車両の走行音だけを学習させ、テストデータの走行音が適法車両のものにどの程度似ているかを判定させる。このアプローチにより、適法車両の走行音のみの学習データから、違法車両の検出が可能であるかを検証する。

2. 異常検知手法を利用した違法車両の検出

本稿の異常検知手法を利用した違法車両検出方法の概要を図1に示す。まず前処理として、車両走

行音を人の聴覚に基づいた音響特徴量を得るためにメルスペクトログラム変換し、変換結果をデータ毎に正規化することで走行音の周波数パターンを短時間ごとに可視化（画像化）する。ここで正規化する理由は、公道に騒音計を設置できる場所は限られていることから、車両から騒音計までの距離が場所によって様々となり、同じ車両が同じ条件で走行しても異なる騒音レベルとして測定されるためである。また学習時にはデータ拡張¹⁾（Data augmentation）処理も走行音データに適応した。前処理で得られた各走行音の2次元データをグレースケール画像とみなして、画像の異常検知をおこなう。本稿ではこの異常検知にDN2²⁾と呼ばれる深層学習モデルを用いた。DN2は、深層学習モデルによって抽出した正常データの特徴量がどのように分布しているかを学習段階で定義し、テストデータから抽出した特徴量が、学習段階で定義した特徴量の分布からどの程度乖離しているかの乖離度を算出する異常検知手法である。この乖離度は、大きいほ

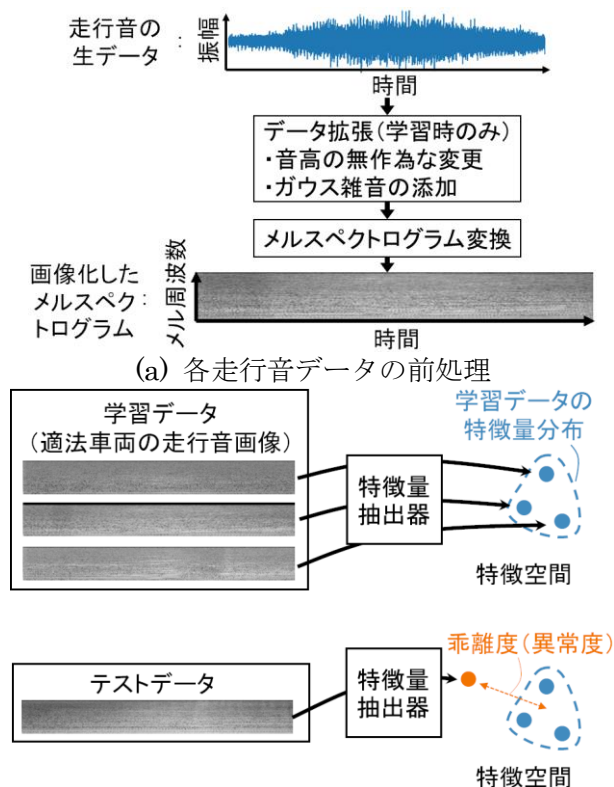


図1 違法車両検出方法の概要

ど対象のデータが正常データから離れていることを示しているため、異常度として取り扱われる。本稿の場合は、適法/違法車両の走行音をそれぞれ正常/異常データとし、異常度の大きいデータを違法車両として検知する。

3. 実験概要

3. 1 走行音データの測定

本稿では、実験対象を単独で走行する二輪車の走行音とした。試験車両には型式の異なる2台の二輪車を用い、マフラーを交換することで、各車両の適法車両状態と違法車両状態の走行音を測定した。すなわち、適法車両状態では純正マフラー、違法車両状態では不正改造マフラーを装着した。また走行音は各車両状態で、テストコースを様々なパターンの車速、加速度、ギア位置で走行した時のものを測定した。

3. 2 実験方法

上記の測定実験で得られた走行音データは、適法車両状態のものが合計42件、違法車両状態のものが合計64件であった。この走行音データのうち、適法車両状態から21件の走行音を無作為抽出して学習データとし、残りの走行音をテストデータとした。DN2により、学習データの特徴量の分布を定義し、テストデータ中の各走行音の異常度を解析した結果を評価した。この試行は無作為抽出による結果のばらつきを確認するために50回繰り返した。

4. 実験結果

DN2による解析結果の一例をヒストグラムとして図2に示す。図2では適法車両と違法車両の異常度の分布が完全に分離しており、図2において異常度の閾値を200とすると100%の精度で違法車両を検出できることがわかる。一般的に異常検知問題の解析結果は、正常データと異常データの異常度の分布が分離できているかを評価し、その指標にはAUC-ROCが用いられる。AUC-ROCは、1.0で正常/異常データの異常度の分布が完全に分離(図2のように精度100%の異常検出が可能)し、0.5で全く分離していないことを表す。DN2による解析を50回繰り返した結果をAUC-ROCのヒストグラムとして図3に示す。図3より、解析結果のほとんどのAUC-ROCが1.0と、DN2が非常に高い精度で

適法車両と違法車両の走行音を区別できていることがわかる。以上から、本稿の走行音データでは、深層学習による異常検知手法を用いることで、学習データに適法車両の走行音しか含まれていない場合でも、非常に高い精度で違法車両を検出できることがわかった。

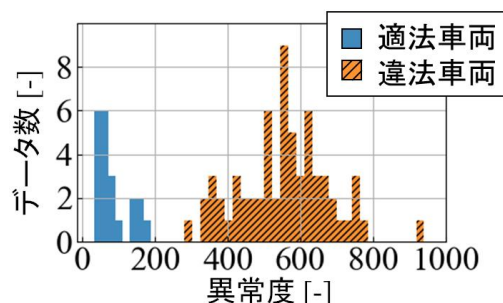


図2 DN2による解析結果の一例

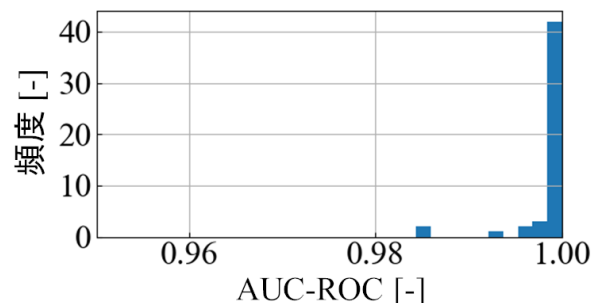


図3 DN2による解析を50回試行した結果

5. まとめ

本稿では、異常検知を目的とした深層学習手法を利用することで、適法車両の走行音のみで構成された学習データに基づいて違法車両を有効に検出できる可能性を示した。今後は、街頭検査に合わせた騒音測定を通じ走行音のデータ数を増やすことで、検出モデルの高精度化を目指す。

参考文献

- 1) J. Abeßer, S. Grollmisch and M. Müller, "How Robust are Audio Embeddings for Polyphonic Sound Event Tagging?", in IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 31, pp. 2658-2667, (2023).
- 2) L. Bergman, N. Cohen and Y. Hoshen, "Deep nearest neighbor anomaly detection", arXiv preprint arXiv:2002.10445, (2020).

③重量車 RDE 評価に向けた Model Based Testing 手法の検討

環境研究部

※奥井 伸宜

1. はじめに

乗用車の新たな排出ガス試験として、路上走行排出ガス（RDE：Real Driving Emission）試験が実施されている。トラック及びバス等の重量車においても、実際の道路状況下でそれら进行评估することは、乗用車と同様に望まれる。

重量車の燃費及び排出ガス試験法としては、「エンジンベンチ試験法」、実車を用いず机上計算となる「シミュレーション法」や「HILS（Hardware in the Loop Simulation）法」が用いられている。そこで環境研究部は、HILS 法を基にした重量車の新たな高精度評価（Model Based Testing：MBT）手法を検討している。我々は、その新たな評価装置を「拡張 HILS」、「RDE-HILS」と呼び、それら運用を目指している。

現在、RDE-HILS の構築に向けた活動を進めており、今回その手法について紹介する。

2. RDE-HILS 手法について

2. 1 HILS

ハイブリッド重量車の燃費及び排出ガス試験法には、HILS が用いられている。図 1 に、HILS の装置構成を示す。操作 PC 上で実行される HILS プログラム（MATLAB/Simulink）は、ハイブリッド車両モデル、ドライバモデル、道路状況（車速及び勾配）等から構成され、実車両のエンジン制御装置（ECU）、ハイブリッド制御装置（HCU）と制御信号を送受信することで、机上で仮想車両を走行させる。机上計算となるため、ホットスタート状態における評価が前提となる。

2. 2 拡張 HILS

プラグインハイブリッド重量車に対しては、HILS 上に構築した仮想車両モデルと実エンジンをリアルタイムに協調制御する「拡張 HILS」を新たな手法として提案している。拡張 HILS を用いることで、エンジン始動後のコールド状態におけるエンジンの潤滑油温度や冷却水温度、排出ガス後処理装置（DPF（Diesel Particulate Filter）、SCR（Selective Catalytic Reduction））等の温度情報を

ハイブリッド制御にリアルタイムにフィードバックし走行できる。このため、実車両を試作しなくてもコールドスタート時の燃費及び排出ガスの評価が可能である。

拡張 HILS の走行環境条件に関しては、従来の HILS 手法を踏襲していることから、入力条件が「時間に対する車速、勾配」で、例えるならば直線路を仮想車両が走行する状態にある。

2. 3 RDE-HILS

従来の HILS 試験法を用い、実路走行時の燃費及び排出ガスの評価を台上で可能とするためには、①エンジンベンチ内で実車走行時の走行風を再現させる、②カーブや勾配等の実路走行時の環境条件を机上で再現した仮想路面にて、仮想車両を走行させる必要がある。

①は拡張 HILS にて構築及び検証を実施し、その有効性を確認済みである。現在、②について実施しており、仮想路面を机上で再現できる「車両運動シミュレーション（Carsim：バーチャルメカニクス）」を、拡張 HILS に組み合わせた。この手法を「RDE-HILS」と呼び、構成図を図 2 に示す。走行情報は、従来試験手法の「時間に対する車速、勾配」に、走行時の位置情報「緯度、経度、高度」を関連づけることで、図 3 中央部に示す RDE-HILS 上に再現した仮想路面上を、仮想車両が走行できる。これにより、「カーブ、路面うねり、車体変動」が考慮でき、実路走行状態により近づけた評価が可能となる。

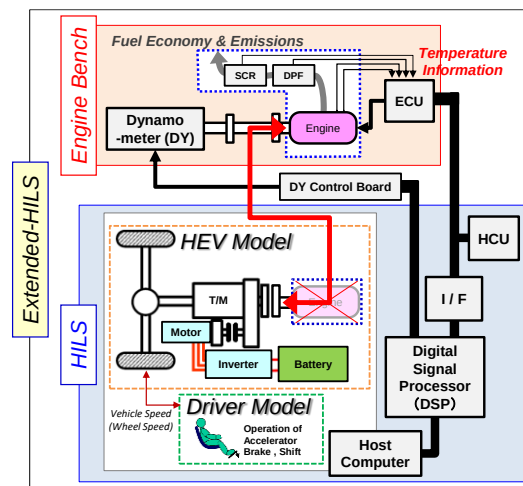


図 1 HILS 及び拡張 HILS の構成図

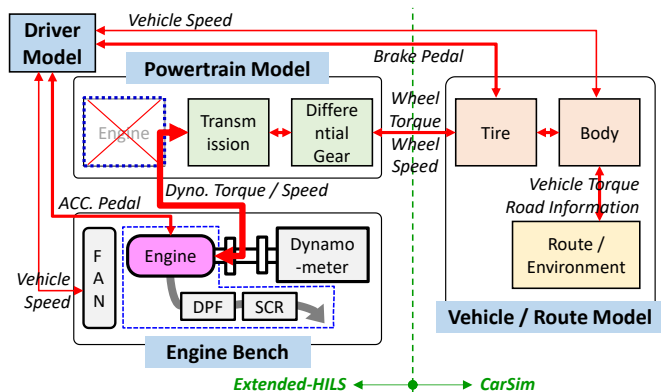


図2 RDE-HILSの構成図

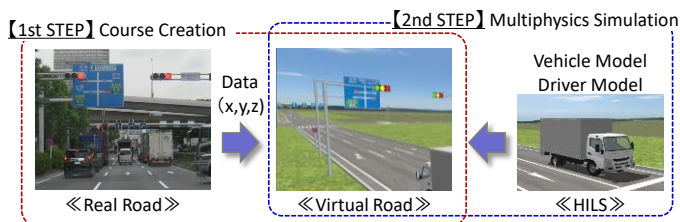


図3 RDE-HILS構築に向けたアプローチ

3. RDE-HILSの運用に向けた構築アプローチ

本研究で目指すゴール像は、図3に示すとおり、任意の走行コース（仮想路面）を仮想車両が走行できる環境を構築し、運用することである。そのためには、仮想路面をCarSim上に再現する手法（1st STEP）、拡張HILSとCarSimとの連成計算手法（2nd STEP）の構築が必要である。

1st STEP及び2nd STEPの各手法については、構築及び検証を終了した¹⁻²⁾。現在、本研究の最終ゴールとする、任意走行コースを用いたRDE-HILS評価に向けたシステム環境を構築中である。

3. 1 RDE-HILS走行評価例：カーブ走行場面

RDE-HILSは、カーブ路面を含む走行における車両挙動の再現を可能としている。一例として、左カーブ走行時の重量車の車両挙動を紹介する。積載重量3,000kgの貨物車で、半積載状態である。図4(a)に実際の走行シーンを、図4(b)に走行時のタイヤ垂直荷重等のイメージを表す。図4のグラフにおいては、上段より、車速、車両の各輪におけるタイヤ垂直荷重及びタイヤ回転速度を示す。

図4の各グラフを確認すると、図中段に示す右前輪のタイヤ垂直荷重は大きく、左前輪は平坦路走行時よりも荷重が小さくなる。さらに、図下段に示すタイヤ回転速度については、右前輪側の方が左前

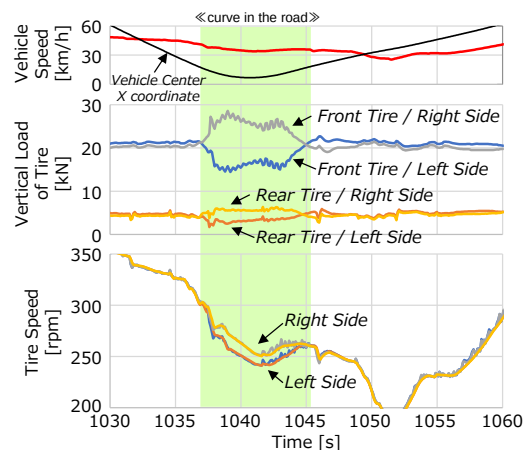
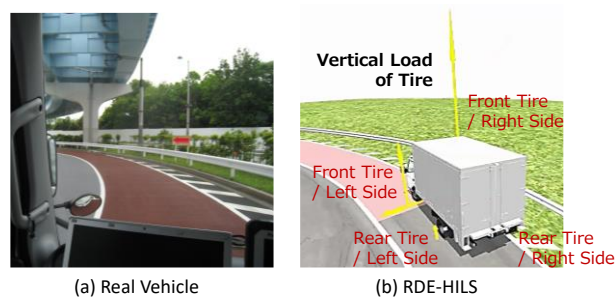


図4 RDE-HILSの走行評価例（カーブ走行）

輪よりも速度が速くなることが確認できる。この結果より、仮想路面を適用したRDE-HILSは、カーブを含む路面状態の変化による走行時の負荷変動が詳細に再現でき、その変動分が走行抵抗に反映可能であることが分かった。

4. まとめ

乗用車と同様、重量車のRDE評価を目指している。そこで、従来HILS試験手法を基にした新たな評価手法「RDE-HILS」の構築を試みている。実際に、任意走行コースを用いたRDE-HILS評価を可能とするシステム環境の構築に向け対応中である。

参考文献

- 1) 奥井伸宜, “重量車 RDE 評価に向けた Model Based Testing 手法の構築 (第 1 報) —実路走行環境の再現手法の確立—”, 自動車技術会術講演会予稿集(秋), No. 20226003, p.1-6 (2022)
- 2) 奥井伸宜, 前唄 康祐, “重量車 RDE 評価に向けた Model Based Testing 手法の構築 (第 2 報) —MBT 装置の構築及び評価—”, 自動車技術会学術講演会予稿集 (春), No. 20235012, p.1-6 (2022)

④国連 WP.29 における 自動車ライフサイクルアセスメントの議論の動向

環境研究部

新国 哲也

1. はじめに

令和3年度の日本のCO₂排出量は10億6400万トンで、自動車全体で日本全体の15.1%（運輸部門の86.8%）を占めている¹⁾。また、IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)による報告は、人的活動により排出されるCO₂は地球温暖化における温度変化に顕著な影響を与えていることを指摘している²⁾。地球温暖化への対応において、自動車におけるCO₂排出量の削減が大きな課題となっている。

このような流れの中、国連欧州経済委員会自動車基準調和世界フォーラム(UNECE/WP.29)では、自動車に特化したLCA(Life Cycle Assessment)の議論が開始されることとなった。WP.29における排出ガスとエネルギーに関する分科会であるGRPEでは、第86回(2022年6月)においてLCA専門家会議(IWG: Informal Working Group)を新設することを決定した。これを受け第1回Automotive LCA(A-LCA)IWG(2022年10月)が日本の沖縄で開催され、日本と韓国による共同議長体制で議論を進めることが決定された。第87回GRPE(2023年1月)では、議論の進め方を定義したTerms of Reference³⁾案を審議した。その後、本案は合意され本格的な議論が開始された。

本報告では、このWP.29におけるA-LCA IWGの最新の議論の動向について説明する。

2. 議論の状況

2. 1. 専門家会議の概要(Terms of Reference)

A-LCAIWGは、自動車のライフサイクルにおけるGHG(Green House Gas)排出量の算出方法を構築するために設立された。この算出手法は、WP.29に参画している各国の政策立案に活用でき、自動車産業によるエネルギー使用も考慮してCO₂排出量を削減することを奨励することができる。ただし、エネルギー政策は各国に依存するため、WP.29で一般的に議論される強制力のある自動車基準とはせず、ガイドラインにとどめる。

また、ISO 14040をはじめ、既存の手法を活用する。例えば同標準による範囲の定義に関する各項目(例えば機能単位、参照フロー、技術的、時間的、地理的範囲、割り当てルールなど)は、A-LCAIWGでも同様にカバーする。

A-LCAに関するIWGの作業タイムラインとして、下記とすることが合意された。

(1) 2025年6月:GRPEによるA-LCAに関する採択

(2) 2025年11月:WP.29によるA-LCAに関する国連決議の採択

2. 2. サブグループの構成

A-LCAの手法開発に当たっては、多岐にわたる専門性が必要とされる。GRPEには通常自動車技術に関する専門家が参加しているが、これ以外の分野(例えば燃料製造など)に関する専門家の知見が必要となる。これはA-LCAIWGの発足当初から予想された。そこで2022年12月に開催された第2回A-LCAIWG会議では、より広い技術分野から専門家を招くための枠組みについて議論が行われた。第2回A-LCAIWG会議の結論として、2023年6月までの6ヶ月間を目処に、A-LCAの手法構築についての大きな方向性を確認し、その上で外部専門家の招聘と、必要な場合は小規模で機動的に議論が進められるサブグループの設置を検討するという大まかな方針が確認された。

A-LCAの手法構築についての大きな方向性について、A-LCAIWGとして重要な論点とされたのは、メーカが計測できるPrimary Dataの可用性であった。詳細は本文の2.3節で述べるが、Primary Dataが自動車のライフサイクルの(製造、使用、廃棄などの)各フェーズにおいて可用であるか、と言う点はA-LCAの手法の精度に係わる重要な課題である。また、GRPEの特性から、自動車の使用段階に関する専門家は多いが、例えば廃棄プロセスの専門家は必ずしも多くないなどの課題もあり、こうした知見の多寡についてもサブグループ構成に考慮する必要があった。第4

回 A-LCAIWG 会議では、まずサブグループ構成につき自動車のライフサイクルの各フェーズに対応するサブグループを置くことが CLEPA（欧州自動車部品工業会）から提案された。また、Primary Data の可用性等については、各サブグループで専門家を招聘し一度議論をした上でサブグループごとの Primary Data の可用性を示し、A-LCA IWG 全体として議論を行う、とする進め方が合意された。サブグループの構成は下記の通りである。

- SG1… サブグループ全体統括
- SG2… 材料製造に係わる排出量計算手法の開発
- SG3… 部品及び車両製造に係わる排出量計算手法の開発
- SG4… 車両の使用に係わる排出量計算手法の開発
- SG5… 車両の廃棄に係わる排出量計算手法の開発
- SG6… 燃料及び電力に係わる排出量計算手法の開発
- SG7… 草案作成のためのグループ

図 1 には各サブグループの議長（leader）と参加者人数を示す。

Subgroup Structure under A-LCA IWG

A-LCA-07-02

as of May 2023

	Responsible for	Membership*			notes
		Leader(s)	Participants	Observers	
SG1	Overarching Aspects	IWG Leading Team	SG Leaders	2	
SG2	Material & Material Recycling	Japan	10	23	
SG3	Productions	Korea/OICA/CLEPA	19	26	
SG4	Use	EC/OICA/AVERE	14	22	waiting for leaders election
SG5	End of Life	China/Japan	7	25	waiting for leader election (China)
SG6	Fuel and Energy Cycle	EC/AVERE	15	16	waiting for leaders election
SG7	Drafting		3	4	No action is expected in 2023

EC:欧州委員会

OICA: 国際自動車工業連合会

CLEPA: 欧州自動車部品工業会

AVERE: 欧州電動モビリティ推進団体

図 1 A-LCA IWG におけるサブグループの構成

2. 3. 包括的課題(Overarching aspects)について

Primary Data とは、例えばメーカーなどの製造工場における使用電力量の実測値を取得するなど、統計等のデータではない実測値を意味する。当然、A-LCA の計算にあたり、製造プロセスの大部分について Primary Data を使用することができれば、その製造

プロセスによる CO₂ 排出量の計算精度は向上する。一方で自動車にはサプライヤーから提供される部品や素材が多く使用されており、その全てにおいて製造プロセスの Primary Data を取得できるとは限らない。この課題への対応策について、第 5 回 A-LCAIWG 会議にて韓国から提案があった。Primary Data の適用範囲という切り口で 4 段階のレベル分けを行う、とするものである。レベル 1 は統計等をベースとする Secondary Data を使用し、レベルが上に上がるにつれ各メーカー特有の Primary Data の適用範囲を広げるというコンセプトである。第 8 回 A-LCAIWG 会議では、この韓国提案について原理として採用することを決定した。しかし、例えば車両の廃棄というフェーズでもこのコンセプトが適用できるか等の懸念もあることから、同コンセプトの可用性をサブグループの専門家により検討し、IWG 会議全体として可用性を確認する手順を踏むこととした。

3. まとめ

WP.29 の GRPE で開始された A-LCA IWG について、議論の状況を説明した。自動車のライフサイクルにおけるフェーズごとに専門家で構成されるサブグループを設定し、A-LCA 手法の開発を本格的に開始した。2025 年度には、少なくとも自動車メーカーに係わる製造プロセスにおいては、メーカーによる Primary Data を活用できる計算手法を開発する予定である。これにより、自動車メーカーによるプロセスの改善効果を数値化でき、ライフサイクルにおける CO₂ 排出量削減につながると期待できる。

参考文献

- 1) 国土交通省，“運輸部門における二酸化炭素排出量”，
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html,
- 2) IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- 3) United Nations/Economic and Social Council, GRPE-87-39r1e.docx” (A-LCA) Latest version of draft Terms of References (ToRs)” (2023)

⑤ディーゼル貨物車の路上走行時における 夏季と冬季での排出ガス挙動の比較

環境研究部

※山本 敏朗

1. まえがき

排出ガス規制の強化にもかかわらず、実際の路上走行では排出ガスが低減していない車両が存在するとの懸念がある。欧州では、路上走行時に自動車型式認証時の排出ガスレベルが維持されていることを確認する手法として、車両に車載型排出ガス測定システム（PEMS: Portable Emissions Measurement System）を搭載して、路上走行時の排出ガスを測定する RDE (Real Driving Emissions) 試験による規制が実施されている。わが国でも 2022 年 10 月より新型ディーゼル乗用車を対象とした RDE 試験が導入された。今後、電動化が困難な重量貨物車への適用拡大も予測される。さらに、重量貨物車においては、積算走行距離が 100 万 km 超の車両も存在することから、使用過程における排出ガス低減装置（EGR 装置、尿素 SCR システム等）の性能劣化に起因する NOx 排出量の増加が懸念される。これらのことから、路上走行時の排出ガス評価は、益々重要視されると考えられる。本報では、まず重量貨物車の路上走行時における排出ガス特性の把握を目的として、大気温度の大きく異なる夏季と冬季における排出ガス特性に着目した。尿素 SCR システム搭載の重量貨物車を用いて、同一ルートを同一の積載条件及び車両速度で夏季と冬季に走行したときの排出ガス測定データを比較分析することにより、大気温度の違いが尿素 SCR システム搭載車の NOx 排出挙動に及ぼす影響について考察した。以下に、その概要を報告する。

2. 実験方法

本調査には、運送事業者所有の中型貨物車（平成 28 年規制適合、車両総重量 7.8t、排出ガス低減装置：EGR 装置、尿素 SCR システム及び DPf）を用いた。同車両に、NOx センサ、NH₃ センサ等の排気管直挿型センサから成る車載型排出ガス分析装置（SEMS: Sensor-based Emissions Measurement System）と大気温度・大気湿度・大気圧センサを装着し、運送業務走行の中で、NOx 濃度、NH₃ 濃度、排出ガス温度、大気温度・湿度・圧力等のデータを収集した。走行試験データは、サン

プリングレート 0.1 秒で収集されて、それらのデータはデジタル式の運行記録計の通信モジュールにより、サンプリングレート 0.5 秒に再構築されて 1 分間隔で遠隔地のデータサーバーに送信された。さらに、試験データはデータサーバーから交通安全環境研究所にあるデータ解析サーバーに送られ、順次、データ処理を行った。これらの中から、同一のルートをほぼ同一の積載条件及び車両速度で夏季と冬季に走行したときのデータを抽出し、両者を比較して NOx の排出挙動等を分析した。NOx 排出挙動に大きな影響を及ぼす尿素 SCR 触媒の NOx 浄化性能の把握には、触媒前後の NOx センサによる NOx 濃度の測定値から、触媒前後の NOx 排出量と NOx 浄化率を算出して用いた。なお、SCR 触媒前の NOx 濃度の測定値は、尿素 SCR システムの尿素水噴射制御用 NOx センサの信号から取得した。また、尿素 SCR 触媒の NOx 浄化率は、以下の式で算出した。
$$NOx \text{ 浄化率}(\%) = (\text{触媒前 NOx センサの NOx 濃度} - \text{触媒後 NOx センサの NOx 濃度}) / \text{触媒前 NOx センサの NOx 濃度} \times 100$$

3. 実験結果及び考察

3. 1. 調査分析に用いた路上走行試験データ

調査に用いた夏季の走行データは、2021 年 8 月 1 日（23 時頃）～8 月 2 日（8 時頃）に、茨城県鹿嶋市の営業所を出発して、東関東自動車道、東名高速道路及び新東名高速道路を通して愛知県小牧市まで全積載で走行したデータである。また、冬季の走行データは、2021 年 12 月 21 日（23 時頃）～12 月 22 日（8 時頃）に、茨城県鹿嶋市の営業所を出発して、東関東自動車道、東名高速道路及び新東名高速道路を通して岐阜県各務原市まで全積載で走行したデータである。両データともに、同一のルートをほぼ同一の積載条件及び車両速度で走行している。なお、データ取得時における試験車両の積算走行距離は、夏季データが 18.5 万 km で、冬季データが 21 万 km である。図 1 に、夏季データ及び冬季データにおける走行時の大気温度、大気絶対湿度及び大気圧の変化を比較して示す。天候は、両

者ともに、走行距離 450km 超の間に变化するが概ね晴れであった。大気温度は、夏季では出発時に 26.7℃で走行中に最大 36.4℃まで上昇した。また冬季では出発時に 5.1℃で走行中に 16℃まで上昇した。走行ルート全体を通じて夏季データと冬季データの温度差は、常に 20℃程度であった。大気圧については、走行ルート全体を通じて、夏季データ、冬季データともに、概ね一致した。大気絶対湿度は、空気中に含まれる水蒸気量を表し、走行ルート全体を通じて、冬季は 5g/m³程度に対して夏季では 22g/m³程度と 4 倍強であった。

3. 2. 路上走行時の NOx 排出挙動の比較・分析

大気温度の差が約 20℃となる夏季と冬季の走行データを用いて、路上走行時の NOx 排出挙動を分析した。図 2 に、夏季と冬季の走行時に变化する SCR 触媒前 NOx 排出量、SCR 触媒温度及び車速を時系列に沿って示す。車速 80km/h～90km/h で加減速の比較的小さい高速道路走行時の SCR 触媒前 NOx 排出量（赤線）に着目する。時刻 1 時～1 時 30 分の間の平均値は、冬季では 0.056g/s となり夏季の 0.038g/s よりも排出量が多い。この違いは、夏季と冬季での大気の絶対湿度の違いに一因があると考えられる。低温度かつ低湿度の冬季では、吸入空気中の水蒸気量が低下してエンジンの燃焼温度が高くなり、NOx 排出量が増加している可能性がある。一方、高速道路走行時の SCR 触媒温度（オレンジ色）は、夏季、冬季ともに 250℃超で、SCR 触媒は活性化温度に達していることがわかる。

図 3 に、夏季と冬季の走行時に变化する SCR 触媒後 NOx 排出量、NOx 浄化率、SCR 触媒温度及び車速を時系列に沿って示す。高速道路走行時の SCR 触媒後 NOx 排出量に着目する。夏季、冬季ともに NOx 排出量は僅かであることがわかる。これは高速道路走行時の SCR 触媒温度は、夏季、冬季ともに 250℃超であることから、NOx 浄化率が 100%近い値となっていることに起因する。一方で、車両発進時には SCR 触媒温度の低下等が原因となって NOx 浄化率が低下するため、SCR 触媒後の NOx 排出量の増加が、夏季、冬季ともに観測される。特に、冬季においては SCR 触媒前の NOx 排出量が増加しているため、より顕著であることがわかる。

4. まとめ

尿素 SCR システム搭載の重量貨物車を用いて、高速道路走行を同一の積載条件及び車両速度で夏季と冬季に走行したときの排出ガス測定データを比較分析

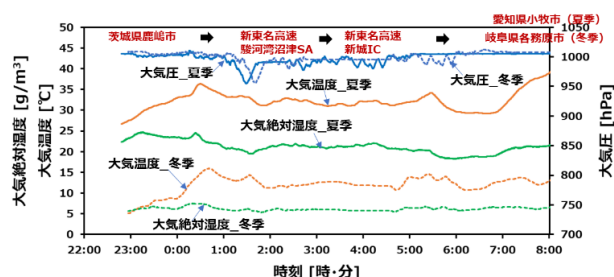


図 1 夏季データ及び冬季データにおける走行時の大気温度、大気絶対湿度及び大気圧

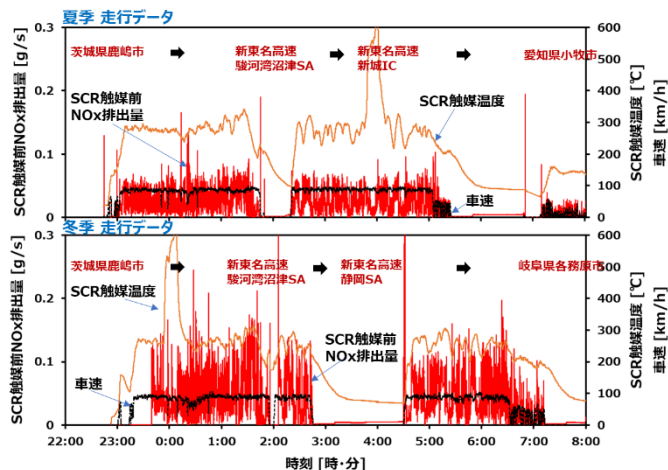


図 2 夏季と冬季の走行時において変化する SCR 触媒前 NOx 排出量、SCR 触媒温度及び車速

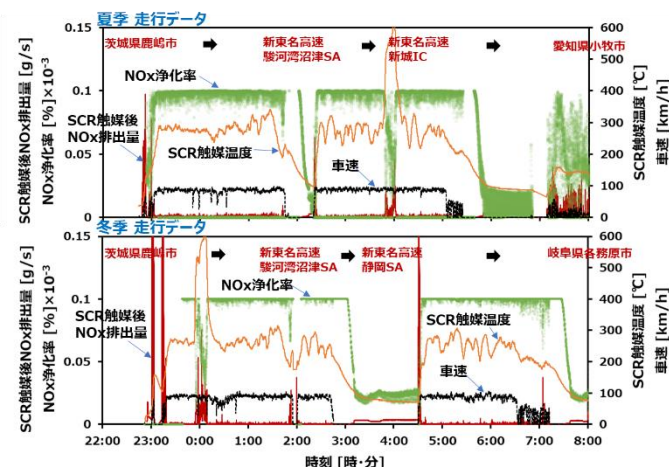


図 3 夏季と冬季の走行時において変化する SCR 触媒後 NOx 排出量、NOx 浄化率、SCR 触媒温度及び車速
し、大気温度の違いが尿素 SCR システム搭載車の NOx 排出挙動に及ぼす影響について考察した。

エンジンから排出される NOx 排出量 (SCR 触媒前 NOx 排出量) は、冬季の方が夏季より大きくなったが、高速道路走行時の SCR 触媒温度は、両者ともに 250℃超で NOx 浄化率は 100%近い値となり、SCR 触媒後の NOx 排出量は夏季、冬季ともに僅かであった。NOx 浄化率が低い車両発進時は、夏季、冬季ともに SCR 触媒後の NOx 排出量が急増し、特に、SCR 触媒前の NOx 排出量が増加している冬季においてはより顕著であった。

⑥鉄道等陸上交通における衛星測位の健全性判定手法の検討

交通システム研究部

※山口 大助

工藤 希

望月 駿登

1. はじめに

地方鉄道等では列車の位置検知に使用する軌道回路の維持や更新に係るコストが大きな負担となっている。これを解決する手段として軌道回路によらない列車位置検知技術が期待されており、その一つに米国のGPS (Global Positioning System) や日本の準天頂衛星に代表される衛星測位システム (GNSS: Global Navigation Satellite Systems) がある¹⁾。衛星測位は複数の衛星から発信される電波を受信して現在位置を算出するが、トンネル等の電波の受信が難しい場所では測位できず、高層ビル等が密集する場所などでは建物に反射した電波を受信すること (マルチパス) で測位精度の低下が懸念される。これらが生じる路線では衛星測位とセンサ (速度発電機やジャイロセンサ等) を組み合わせた仕組みが必要となる。

一方、衛星からの電波の受信が不可の懸念やマルチパスの懸念がほとんどない路線では衛星測位単独による列車の位置検知の可能性がある²⁾。この場合、列車の走行位置が衛星測位のみによって確定するため、特に列車制御等の保安への利活用という観点からは衛星測位で検知した列車位置が健全なものであるかを判定する必要がある。そこで、衛星測位単独での列車位置検知の実現に向けて、地上側で衛星測位の健全性を判定する手法を検討したので報告する。

2. 衛星測位の健全性判定と列車位置検知の関係

衛星測位のみによって走行位置が確定する列車と衛星測位の健全性判定の関係を図1に示す。先述の通り、本稿で提案する判定手法は列車の車上位置検知を衛星測位単独で行う場合に衛星測位の健全性を地上側で確認するためのものである。提案手法によって地上側で健全性を常時確認し、健全性に懸念が生じた場合はその旨を列車へ通知し、衛星測位による位置検知を中断して列車の走行を停止する (図1(a))。一方、健全性を常時確認する地上側自体が健全性を失う場合 (地上受信機の故障等) もあり、列車側では正常に衛星測位を行えているかもしれないが、地上側が健全性を確認できる状況にないため、列車の走行を停止する (図1(b))。

3. 衛星測位の健全性判定手法

提案する地上側で衛星測位の健全性を判定する手法の概略を図2に示す。提案手法では3個の受信機 (アンテナを含む) を頂点とする三角形を地上に構成する。この三角形を「基準三角形」と呼ぶことにする。各頂点の受信機は常時衛星測位を行う。衛星測位によって逐次得られる測位結果が許容できる誤差の範囲内にあるかを判定するため、基準三角形の頂点である各受信機の設置点を中心とした円 (「許容誤差円」と呼ぶことにする) を描く。許容できる誤差の範囲が許容誤差円の半径に相当し、この

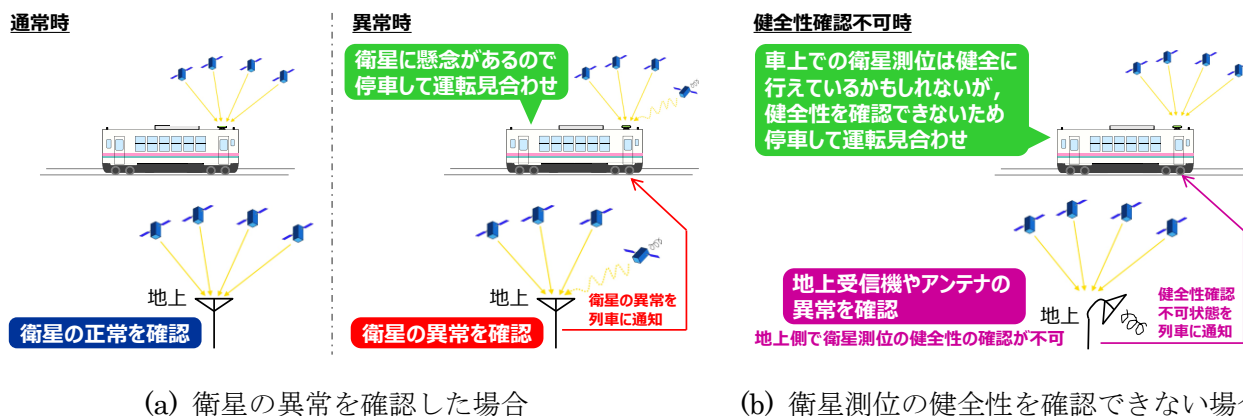


図1 衛星測位の健全性判定と列車位置検知

(a) 基準三角形と逐次三角形

(b) 基準三角形と逐次三角形の比較

図 2 提案する衛星測位の健全性判定手法

大小で判定の厳しさが決まり、半径が小さいほど判定が厳しくなる。先ず受信機自身の測位結果がこの許容誤差円の中に収まっているかを確認する。円の中に収まっていれば受信機は正常に動作していると判定し、測位結果は受信機の設置点に一致しているものと見なす。受信機から出力される測位結果を用いて三角形を逐次描くことができ、この三角形を「逐次三角形」と呼ぶことにすると、3 個の受信機とも正常動作していれば逐次三角形の形状は基準三角形の形状に一致する（図 2(a)）。

一方、受信機のうちの1個に故障や何らかのトラブルが発生すると測位結果が許容誤差円の中に収まらなくなり、逐次三角形の頂点の一つが基準三角形の頂点から離れ、逐次三角形の形状が基準三角形の形状と一致しなくなる。これによって地上側の健全性が損なわれた状態にあると判定できる(図2(b)左上)。この場合は、列車上では衛星測位を正常に行えていたとしても列車を速やかに停車させることになる。

衛星に故障やトラブルが発生し、衛星が異常な状態に陥っても、電波を放送し続けると衛星測位の結果に影響を及ぼす可能性がある。また、周辺から妨害電波が放送されても、受信機は妨害電波であることを識別できないためにそのまま計算してしまい、測位結果に影響を及ぼす可能性がある。衛星の故障や妨害電波は 3 個の受信機に一律に影響を与えることが予想され、逐次三角形は基準三角形から大きく離れたところで描かれることになるため、衛星測位の健全性が損なわれた状態にあると判定できる(図 2(b)左下)。この場合は列車を速やかに停車させることになる。

図 2(b)右段のように、逐次三角形の形状が基準三角形の形状と一致するケースが発生し得るが、受信機の一部が許容誤差円の中に収まっていないことから、地上側の健全性が損なわれた状態と判定され、列車を速やかに停車させることになる。

上述より、提案手法では3個の受信機がそれぞれ許容誤差円の中にいるかの自己監視と、隣り合う受信機同士の距離や方位（一方の受信機から他方の受信機への方向ベクトル）の一致度合いを確認する相互監視を行っているといえる。三角形の各頂点では一般的な単独測位（コード測位）による測位を想定しているが、準天頂衛星独自のセンチメートル級測位補強サービス（CLAS）を利用することで健全性の判定をより精密に行える可能性がある。

4. おわりに

衛星測位単独での列車位置検知の実現に向けて、地上側で衛星測位の健全性を判定する手法を提案した。本稿では鉄道を想定して述べたが、提案手法は鉄道に限らず、自動運転バスやその他の陸上交通への適用も可能と考えている。衛星の故障や妨害電波の発信の模擬が難しいが、提案手法の有用性について検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 山口大助、工藤 希、“鉄道分野における衛星測位システム利活用のための測位精度評価”，日本信頼性学会誌，Vol.45，No.4，pp.164-171
- 2) 鉄道における準天頂衛星等システム活用検討会第 4 回検討会配布資料，国土交通省ホームページ，https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk7_000014.html

⑦運転シミュレータを用いた鉄道運転士の 運転動作把握に関する検討

交通システム研究部

※工藤 希 望月 駿登

1. はじめに

鉄道を含む軌道交通の分野では、人等が容易に立ち入れない構造となっている新交通システムにおいて自動運転が行われてきた。しかし、近年、少子高齢化に伴う労働力不足等に対応するため、踏切道がある等の一般的な路線においても運転士の乗務しない自動運転の導入が検討されている。踏切道がある等の一般的な路線の自動運転については、「鉄道における自動運転技術検討会」のとりまとめが公表された（2022年9月）¹⁾。この検討会のとりまとめでは、「一般的な路線での安全性と同等以上（既存線区の場合は当該線区、新規線区の場合は周辺環境との分離等の条件が同等の線区）の性能を確保すること」とされている。

安全性評価の観点から、既存の路線と比較して評価する際、運転士の作業する項目及び作業の質との同等性を示す必要があると考える。これまで当研究所では運転士が作業する項目について整理してきた²⁾。今回は作業の質に注目し、鉄道の運転を模擬するシミュレータを用いて運転士の運転動作を把握する試験を実施したのでその結果を報告する。

2. 列車運行システム安全性評価シミュレータ

当研究所が所有する列車運行システム安全性評価シミュレータ（以下、「シミュレータ」という）の概要を示す。運転席前方のスクリーンに投影した映



図1 列車運行システム
安全性評価シミュレータ

像により鉄道の運転操作が可能な設備である。任意の路線と車両性能をインプットして走行を再現する機能を有する（図1）。

このようなシミュレータを用いることにより、天候、時間帯、営業運行の条件（前方列車との間隔等）、及び被験者の線路の知悉度合いといった条件をそろえることができるほか、線路上に物体を配置するという営業路線では実施できない条件をつくることことができる。

3. 実験概要

本試験では、線路上に障害物がない場合（通常状態）とある場合（異常状態）について、動力車操縦者免許保有者がシミュレータを運転又は3Dゴーグルを用いて動画を視聴し、その走行記録から、運転士の運転操作の実態把握を行った。

試験には、5名の被験者が参加した。5名は20代から50代の男性で、それぞれ別の事業者における運転経験を持つ。

3. 1 通常状態における試験

通常状態における試験では、被験者はシミュレータで仮想路線を運転する。その後、3Dゴーグルで同じ路線を運転した動画（3分程度）を視聴し、その時の視線の動きを計測した。記録映像の例を図2に示す。図中赤い丸で示されている箇所が視線を向けている位置を示している。

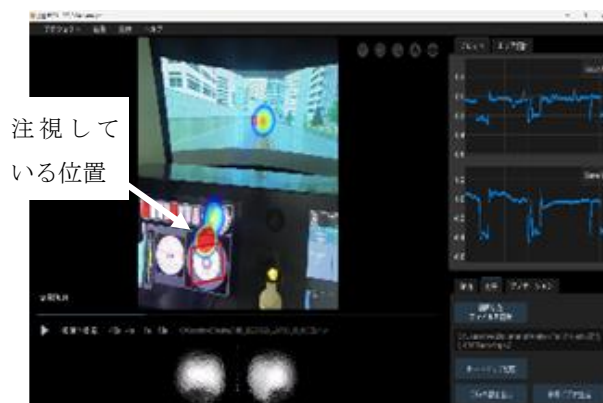


図2 試験の様子（3Dゴーグルの場合）

被験者がどのような物体に視線を向けているかを確認するため、予め線路上に速度メータ、出発信号機、踏切、及びホーム旅客を定義し、その確認回数を計測した(図3)。ここで、図3の横軸は被験者の番号を示している。試験の結果、速度メータの確認回数が最も多く、次いで踏切となった。速度メータは常に手元にあるため、確認機会が多いことが原因と考えられる。ホーム旅客及び踏切については、被験者が日常に運転している路線環境(ホーム柵及び踏切の有無)によっても違いが出ている可能性があるが、今回はその特定にまでは至らなかった。

踏切について、被験者の視線の動きの例を図4に示す。図4は踏切が前方に見えている状態での視線の動きに着目した。左図では、前方中心をとらえ視線の動きはあまりないが、右図では頻繁に視線が動く様子が計測された。

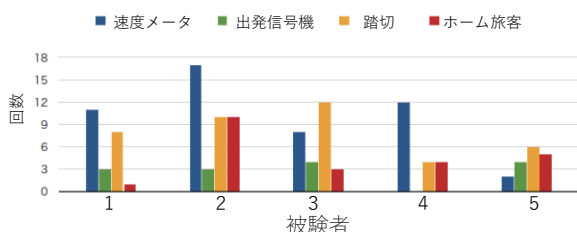


図3 特定の物体の確認回数

(注: 物体近くに視線を向けていても

物体から外れた場合は回数に数えていない)

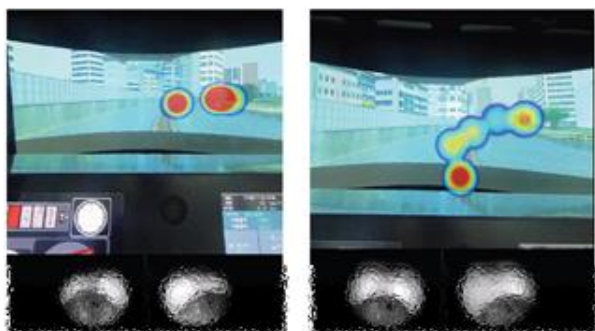


図4 視線計測の傾向の違い

(左: 運転経験年数 20 年以上、

右: 運転経験年数 5 年未満)

3. 2 異常状態における試験

3.1 節と同じ路線の線路上に障害物を設置し、走行試験を実施した。障害物を視認し、ブレーキ操作を始めた地点から障害物までの距離を図5に示す。障害物を視認してブレーキ操作を始めた地点から障害物までの距離に大きな差は見られなかった。また、図6に障害物を視認後のブレーキ操作の比較を

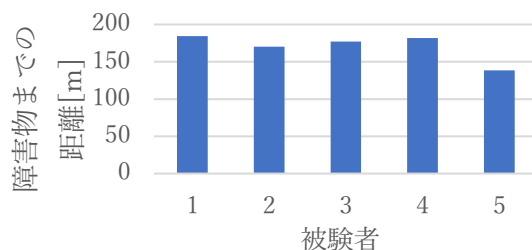


図5 ブレーキ操作開始時の障害物までの距離

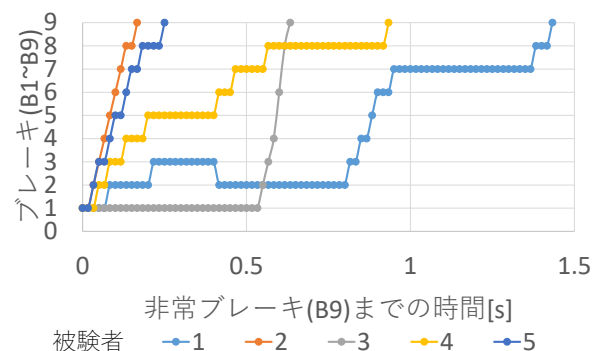


図6 障害物確認時のブレーキ操作の比較

示す。被験者によってすぐに非常ブレーキを入れる場合と、状況を確認しつつブレーキを調整する場合が見られた。

4. まとめ

鉄道の自動運転に向けて、安全性評価の観点から従来の路線との同等性を評価することを目的に、運転士の運転動作の把握のための被験者試験を実施した。試験の結果、障害物を視認してブレーキ操作を始めた地点から障害物までの距離は被験者による違いは見られなかった。一方で、運転士の視線の動きについては、通常運転している路線の環境や経験年数等により違いがあることが分かったが、今回は被験者数が少ないために傾向の把握までは至らなかった。

今後は、傾向の把握も含め、鉄道の自動運転に向けた検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ;
https://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo07_hh_000229.html
- 2) 工藤ら, "鉄道における自動運転の安全性評価に向けた運転業務の見える化に関する取組", 交通安全環境研究所フォーラム 2022, pp.59-60

⑧鉄道の自動運転 GOA3,GOA4 に使用する車上カメラ・センサ類の安全水準に関する考察

交通システム研究部

※工藤 希

押立 貴志（客員研究員）

1. はじめに

鉄道において、踏切道がある等の一般的な路線の自動運転については、「鉄道における自動運転技術検討会」のとりまとめが公表(2022年9月、以後、「検討会とりまとめ」という)¹⁾された。

本研究では、鉄道の自動運転の自動化レベルGOA3及びGOA4において線路内への人立入りの検知に使用される車上カメラ・センサ類について、機械類に関する国際規格に準拠した考え方と、「工学システムの社会的安全目標の新体系」²⁾に関する考え方に沿って、安全水準のあり方を考察する。

2. 検討会とりまとめの要点

検討会とりまとめでは、自動運転では、従来の安全性と同等以上（既存線区の場合は当該線区、新規線区の場合は周辺環境との分離等の条件が同等の線区）の性能を確保することとし、表1のとおり自動化レベルが設定された。

表1 自動化レベル

自動化レベル	内容
GOA2.5	列車の先頭車両の最前部の運転台に緊急停止操作等を行う係員が乗務する。線路内への人立入りについては、手動運転と同様に係員による対応が可能である。
GOA3	列車の前頭には係員が乗務する必要がない。
GOA4	係員が乗務する必要がない（無人運転）。

備考：GOA(Grade of Automation)とは、鉄道における自動運転のレベルを示すものである。

また検討会とりまとめでは、「鉄道専用敷地内は立ち入り禁止とする法的措置のもと、列車運転士の前方視認力のみに頼って線路内への人等の立ち入り及び自動車の侵入に対する安全・安定輸送の確保をしているものではない。自動運転、手動運転にかかわらず、鉄道利用者、踏切道通行者、鉄道沿線住民等の遵法行動や自制的行動によることが一般原則であり、鉄道利用者等の理解と協力が不可欠である。鉄道事業者においては、線路内への立入防止柵や自動車用防護柵の設置、気笛吹鳴、列車を停止させるブレーキ操作等により事故防止や被害軽減に最善を尽くしている実態があり、自動運転での対応

にあたっては、コスト負担を含めて合理的で実行可能な技術の導入を検討すべきである」としている。

そのため、GOA3及びGOA4に車上カメラ・センサ類の使用を検討する際には、その位置づけと安全水準の考え方が課題となると考えた。

3. 国際規格に準拠した非常停止装置の考え方

国際標準化機構(International Organization for Standardization)発行の国際規格 ISO 12100（機械類の安全性－設計のための一般原則－リスクアセスメント及びリスク低減。日本産業規格（Japanese Industrial Standards）では JIS B 9700）の段階的安全方策の考え方に準拠して、部外者が行う突発的な事象である鉄道の線路内への人立入りに対する各種処置を整理すると次の①～④のとおりと言える。

- ① 鉄道沿線住民等の遵法行動や自制的行動によることが一般原則である点から、「本質安全対策」を担う主体は、鉄道沿線住民等である。
- ② 線路内への立入防止柵や自動車用防護柵の設置については、「安全防護対策」である。
- ③ 気笛吹鳴は本質安全対策を担う鉄道沿線住民等への警告であり、本質安全対策を補完する緊急措置としての「付加保護方策」である。
- ④ 線路内への立入者を発見した場合に列車運転士が行うブレーキ操作は、既に発生した異常事態への対応であり「付加保護方策」である。

この整理から、GOA3及びGOA4において、信号機等の確認を目的としない、人立入りの検知に使用する車上カメラ・センサ類は「付加保護方策」に分類されると考えられる。

4. 工学システムの社会的安全目標の新体系

日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会が公表(2020年8月)した「工学システムの社会的安全目標の新体系」では、ALARP(As Low As Reasonably Practicable)の考え方に沿ってリスク許容の領域等を設定することが提言されている。

安全目標には、達成できないことが許容されない安全レベル（基準A）が存在し、その状態を達成

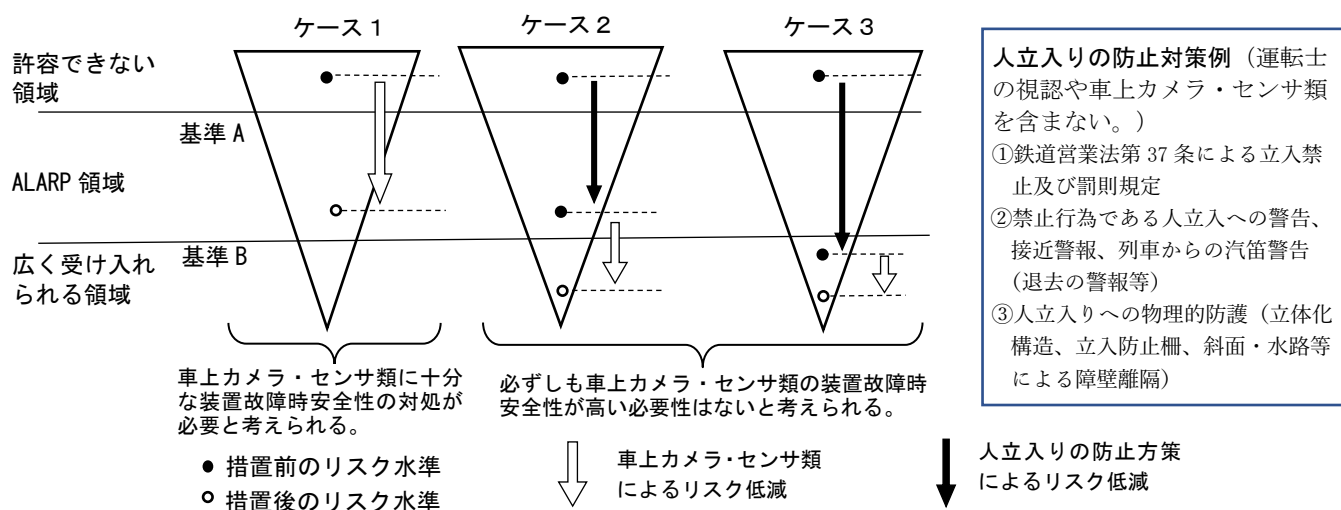


図1 安全目標と線路内への人立入りに関する車上カメラ・センサ類の関係性

すればさらなる改善を求めないレベル（基準 B）も存在する。基本的には、基準 A は事業者と社会との合意事項である。基準 A と基準 B との間の判断は、ALARP 領域として、便益、リスク低減により得られるメリットと低減に要するコストとの兼ね合い、さらには代替施策におけるリスクとの兼ね合いで目標値を定めるべきであるとされている（図 1 参照）。

5. 考察

線路内への人立入りは、路線毎に周辺環境が異なるうえ、部外者行為の多様性や、予測不可能な突発的な事象のため、鉄道事業者のみに於いて全てを措置できるものではない。

事故の発生が極めて抑制され、本質安全対策及び安全防护対策が相当程度有効に機能している場合、「付加保護方策」のみに使用されるカメラ・センサ類の装置には以下の要件があると考えられる。

- 異常事態の発生を検知した場合に迅速に作動することが必要。
- 他の装置の動作に優先して作動することが必要。
- 高度な故障時安全性は必要ない。但し、高度な故障時安全性を求めないならば、本質安全対策及び安全防护対策に置き換えることはできない。
- 誤検知による非常停止の動作は、自動運転システム全体の信頼性を失いかねないため、誤検知率を低下させ、検知の確実性の向上の努力が必要。

また、ALARP の考え方に沿った検討では、車上カメラ・センサ類は、①基準 A をクリアするた

めのものかどうか（図 1 ケース 1）、②使用停止に伴う社会的影響の程度、③人立入りの防止対策等のリスク低減効果の状況（図 1 ケース 2 及び 3）、④装置故障時の安全リスク変化の増大の程度、によって、安全水準が異なると考えられる。

自動運転においても従来の安全性と同等以上の性能を確保することとされており、カメラ・センサ類が「付加保護方策」であるならば、人立入りの防止対策は、図 1 のケース 2 及び 3 のように十分な安全水準とする必要がある。

6. おわりに

本研究は、鉄道の自動運転 GOA3 及び GOA4 において線路内への人立入の検知に使用される車上カメラ・センサ類の安全水準のあり方を検討した。自動運転に車上カメラ・センサ類の使用を検討する際には、車上カメラ・センサ類がどの段階の安全方策にあるかを決め、それに対応した安全水準を求める必要があると考える。今後は、自動運転を導入する鉄道事業者等のシステムの試験及び最適化といった新たな課題等に対しても、引き続き技術検討の支援等を行っていきたい。

参考文献

- 国土交通省ホームページ：
https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr1_000058.html
- 日本学術会議ホームページ：
<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t293-5.pdf>

⑨第 4 種踏切に対する安全性向上支援装置に関する検討状況について

交通システム研究部

※長谷川 智紀 三好 正太

八木 誠（客員研究員）

1. はじめに

鉄軌道輸送において、安全の確保は最大の使命である。近年、関係者の努力の結果、事故件数は減少傾向にあるものの、令和3年度においては542件の運転事故が発生しており、中でも踏切事故が217件（第1種踏切189件、第3種踏切4件、第4種踏切24件）発生し、運転事故の約2/5を占めている状況である¹⁾。なお、踏切事故の約1/5は中小民鉄で発生している。

踏切における安全対策として、大手事業者では主に障害物検知装置が使用されているが、極めて高コストであることから、収支が厳しい中小民鉄が多い地方鉄道への導入が進まない状況である。そのため、地方鉄道においては、低コストかつ効果が高い踏切の安全性向上策が必要である。

昨年度、踏切事故の実態把握を行い、優先的に防ぐ事故形態及び踏切種別を明確にしたうえで、汎用技術を利用した低コストな安全性向上策の検討を行った結果について紹介した²⁾。

本報告では、昨年度紹介した汎用技術を利用した低コストな安全性向上策のうち、通信機能の動作確認を行ったので紹介する。

2. 第4種踏切に対する安全性向上策

第4種踏切での事故原因は直前横断が大半を占めており、列車が接近していることに気づかず横断し、衝突しているものと考えられる。筆者らの調査では、警報機・遮断機がない第4種踏切に対し、警報機のみある第3種踏切は、事故の年・箇所当たりの発生件数が2/3になることから、列車の接近を知らせる警報機の効果が大きいものと考えられる²⁾。

そこで、踏切遮断機の整備すなわち第1種踏切化までの間における第4種踏切の安全性を向上させる支援装置として、GNSS(Global Navigation Satellite System)やIoT(Internet to Things)デバイス、WiFi(Wireless Fidelity)等の汎用装置を用いることにより、コストを削減した安全性向上策を検討している。

今回作成した第4種踏切支援装置のうち、通信機能を確認する装置を図1に、動作イメージを図2に示す。



図1 検討した第4種踏切支援装置
(上：車上装置、下：地上装置)

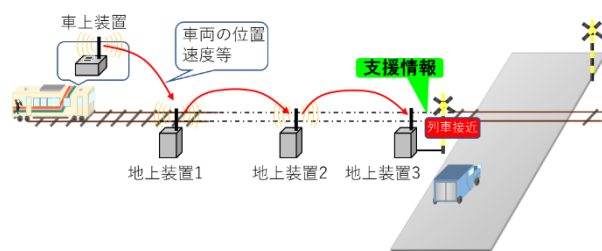


図2 第4種踏切支援装置の動作イメージ

車上装置は、列車の現在位置及び速度をGNSSにより取得し、取得した情報をWiFi経由で地上装置に送信する。WiFiによる通信は距離に制限があるため、地上装置は、車上装置から受け取った情報を、近隣に設置してある地上装置に再送する（ホッピング）。これにより、WiFiによる距離の制約を超えることとした。

3. 通信機能の確認試験

本報告で提案する第4種踏切に対する安全性向上策で用いる通信機能は、列車が速度72km/h(20m/s)で走行していると仮定すると、第一種踏切

では遅くとも 20 秒前から報知を開始するため、踏切から 400m 手前までに踏切に近づいている列車と通信ができていなければならない。

そこで、山形鉄道フラワー長井線及び京都丹後鉄道宮豊線において、実車を用いた通信試験を行った。

車上装置は先頭運転台そばに配置し、地上装置は基本踏切に配置（図 3, 図 4 参照）することとした。



図 3 フラワー長井線における地上装置の配置



図 4 宮豊線における地上装置の配置

フラワー長井線では、周辺の障害物が少なく見通しがよいことから、沿線装置によるホッピングにより第二勸進代踏切から約 1.2km の範囲で通信できることが確認された。

宮豊線では、矢立踏切から見通しがよい郷踏切方向は沿線装置なしで約 800m 前から通信できることを確認できたが、第二森の下踏切方向は、途中に

竹林があり、沿線装置なしで直接通信を行うことができなかった。そのため、第二森の下踏切と矢立踏切の間に沿線装置を配置することで、通信を確保することとした。これにより、矢立踏切から第二森の下踏切までの通信が確保できるとともに、矢立踏切から見通しがよい網野駅付近との通信が確保できたこともあり、矢立踏切において網野駅～第二森の下踏切～矢立踏切間、及び矢立踏切～郷踏切間の列車との通信ができることを確認した。

以上の結果から、見通しが良い場所においては沿線装置なしで 800m 程度、沿線装置を用いると 1km 以上の通信が確保できるものの、竹林のような水分を含んだ草木があると通信距離が短くなることが確認できた。草木による影響が生じる場所においては、沿線装置を配置することにより通信を確保することで対応することが望ましいことが確認された。

4. まとめ

今回、昨年度紹介した汎用技術を利用した低コストな安全性向上策のうち、通信機能の動作確認を行った。その結果、見通しが良い場合は沿線装置なしで 800m 程度、沿線装置を使って 1km 以上の通信ができた。一方、通信エリア内で草木がある場合は、通信距離が短くなる傾向があり、通信距離を確保するために沿線装置を配置することで対応することが有効であることも確認できた。

今後、人等への報知方法について検討を行う必要がある。報知方法においては、報知をした場合、及び報知がなかった場合に、人等がどのような行動を起こすか、その行動が誤った認識による行動にならないかといった検討が必要であり、コストをかけずに対策ができるかが課題である。本件については、鉄道事業者の意見を聞きつつ、対策について検討を進めていく予定である。

謝辞

本報告の試験にご協力いただいた山形鉄道株式会社、WILLER TRAINS 株式会社、北近畿タンゴ鉄道株式会社へここに謝意を示します。

参考文献

- 1) 鉄軌道輸送の安全に関わる情報（令和 3 年度）, 令和 4 年 10 月, 国土交通省鉄道局
- 2) 長谷川ら, “第 4 種踏切に対する安全性向上に関する検討について”, 交通研フォーラム 2022, pp.63-64 (2022)

⑩ 索道の安全確保に関する取組

交通システム研究部

※千島 美智男

一柳 洋輔

小野 寛典

山口 大助

八木 誠（客員研究員）

1. はじめに

交通安全環境研究所（以下、交通研）は、国内唯一の索道試験機関である。ロープウェイやリフトの搬器の中でロープをつかむ要素である索道用握索装置（以下、握索装置。図1）は、安全上極めて重要な構成要素であるため、索道施設設計標準・管理標準¹⁾等への適合性について確認するための試験を実施する必要がある。ロープウェイやリフトの新設や老朽化更新、輸送力増強等に伴う新形式の握索装置の試験に継続的に対応していくために、整備後40年以上が経過した「索道用握索装置試験施設（以下、耐滑動力試験装置）」を更新した。本報告では、更新した耐滑動力試験装置や索道の安全確保に関する研究活動について紹介する。



図1 握索装置の一例（模式図）

2. 握索装置試験

2.1 握索装置試験の概要²⁾

握索装置の試験は主に以下の検査及び試験を実施し、判定基準に適合した握索装置を合格とする。

- ・外観検査：各部の状態を目視により確認し、ひび、きず及びまくれの有無を調べる。
- ・形状及び寸法検査：組立寸法及び部品の寸法を計測し、図面との相違の有無を調べる。
- ・機能検査：使用するロープに応じてその握索の動作を確認し、確実に握索できるかを調べる。
- ・耐荷重試験：握索装置が搬器、乗客等により生じる荷重に対し十分耐えられるものかを確認する。握索装置に作用する総重量（握索装置自重＋搬器自重＋最大乗車人員）の3倍の荷重を作用させたときの各部の応力が、材料の降伏点またはそれに相当する応力を超えないことなどを確認する。

- ・耐滑動力試験：運転による衝撃、勾配及び風等によって握索装置に対しロープ方向に力が作用するが、握索装置がこれに十分耐えられるかを確認する。

2.2 耐滑動力試験装置の更新

更新後の耐滑動力試験装置を図2に、耐滑動力試験の概要図を図3に示す。耐滑動力試験は、ロープに切断荷重の1/5の張力を与えた後に、握索装置をロープに装着し、ロープに平行なけん引力を作用させて150 mm滑動する間の最大滑動力を測定する。この値が握索装置の使用条件に応じて計算される基準滑動力の3倍以上であることを確認する。

今回の工事では、張力やけん引力を発生させる装置のほか操作部やデータ計測部、収録部等も更新し、従来よりも試験を円滑に実施でき、その結果を容易に取り扱うことも可能とした。さらに、ロープ緊張用の油圧装置の出力が向上したことで、本体機械部分の更新は必要だが将来的にロープの緊張力を高められる仕様となっている。近年、旅客が乗り込む搬器が大型化し、これに伴い握索装置が大型化する傾向にあることから、大型の握索装置の試験への対応を想定したものとしている。



図2 更新後の耐滑動力試験装置の外観

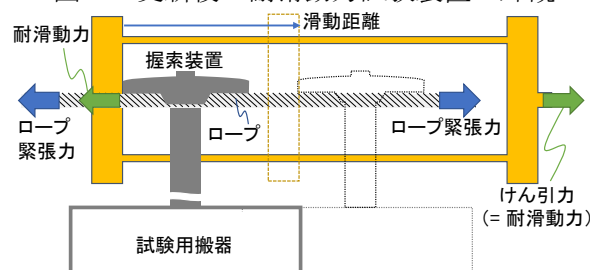


図3 耐滑動力試験の概要図

3. 索道搬器の動揺等モニタリング

索道の安全確保に関する研究として行っている搬器の動揺等モニタリングの検討状況について述べる。

3. 1 モニタリングの概要

索道では一般的に支柱や停留場に設置した風速計の情報を基に運転規制等を行っており、風速計から離れた位置を走行中の搬器に作用する風や搬器動揺の動的变化の常時把握は難しい。図4のように走行中の搬器動揺等の状態をモニタリングし、風や搬器動揺の情報を搬器位置と同時に収集できれば、どの場所で著大な風や動揺が生じたかをリアルタイムに把握でき、運行停止を素早く判断することで運行の安全性向上が期待できる。また、継続してデータを蓄積することによって、異常なデータを検出した場合はその原因等を検証することにより点検・保守に活用することが考えられる。

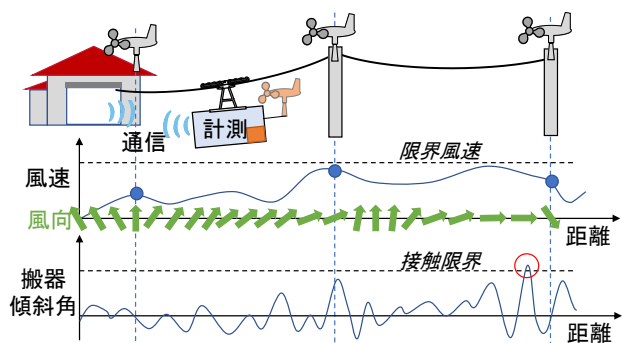


図4 本研究で提案するモニタリングのイメージ³⁾

3. 2 モニタリングシステムの構築状況

活用可能なセンサやデータ伝送方法を含む搬器動揺等のモニタリングシステムの基礎検討については既報³⁾で報告したが、その構築状況を図5に示す。

小型の慣性センサ（加速度と角速度を測定）を用いて搬器の動的な動揺を測定する。また、搬器の動揺に影響する風の把握のための超音波風向風速計を設置する。搬器の移動距離や速度は、GPS (Global Positioning System) 受信機によって測定する。搬器内の処理装置では、各センサからの信号を Wi-Fi (Wireless Fidelity) 通信モジュールからモバイルルータを経由してクラウドサーバーに送信する。また、運転室や監視室等におけるパソコンでは、インターネット経由でクラウドサーバー上の情報を読み表示し、必要に応じて状況を係員に通知する。

研究所内において、搬器を想定した自動車にモニタリングシステムを搭載し、動揺等のデータ取得について動作確認を行った(図6)。自動車から離れた場所にあるパソコン(停留所運転室を想定)に測定結果が表示されることを確認した。

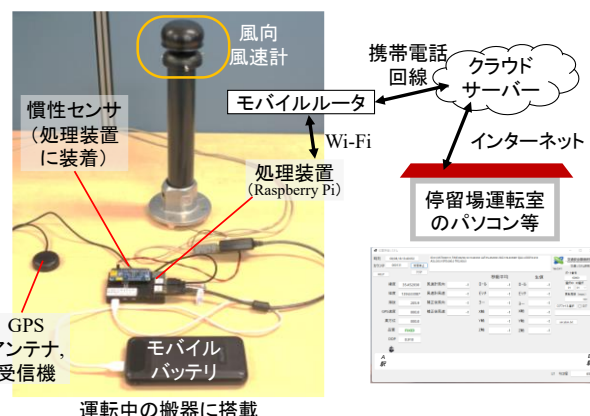


図5 構築中の搬器動揺等モニタリングシステム



図6 自動車による動作確認試験の様子

4. まとめ

交通研における索道の安全に関する取組として、握索装置の試験業務及びそのための試験施設の更新について紹介した。また、索道の安全に関する研究の取組の一つとして、索道搬器の動揺等モニタリングの検討状況について紹介した。

交通研では引き続き索道施設の新設や老朽化更新の際に必要な握索装置試験への対応や、各種評価試験業務、研究業務を通じて索道の安全に資する活動を行っていききたい。

参考文献

- 1) 日本鋼索交通協会, “索道施設設計標準・管理標準及び同解説 2018年改訂版” (2018)
- 2) 日本鋼索交通協会, “握索装置の試験基準 FAS 02-2007” (2007)
- 3) 千島 美智男ほか, “索道搬器の動揺モニタリングに関する取組”, 交通安全環境研究所フォーラム 2022, pp.57-58 (2022)

⑪車両前方ソナーにおける人検知の可能性調査

自動車安全研究部
東京都立大学

※松井 靖浩 細川 成之
及川 昌子

1. はじめに

2022 年の我が国の交通事故死者数 2,610 人のうち歩行中は 955 人 (37 %) であり、全交通事故死者の中に占める割合が最も高かった¹⁾。このような状況から歩行者への対策は極めて重要な課題である。

日本の交通事故において、車両発進時に歩行者と衝突する事例のあることが判明している²⁾。その対策として、車両発進直後の事故防止を目的に直前直左鏡等に関する安全基準が定められている。一方、車両発進前に物体をソナーにより検知し運転者に警告することで、物体と車両との衝突を回避する技術が既に開発されている。車両前方ソナーは、駐車場などで車両が発進前に、一定範囲の衝突危険性のある壁を始めとした障害物を検知し、ドライバーへ警告することで車両単独事故予防支援を主目的としている。本研究の目的は、車両前方ソナーにおける人検知の可能性を明らかにし、歩行者事故の予防装置としての活用可能性を検証することとした。

2. 調査方法

国産セダン 1 車種 (A 車)、国産 SUV2 車種 (B 車、D 車)、輸入 SUV1 車種 (C 車) の計 4 車種を対象とした。供試車両の前方ソナーには、センターセンサ、コーナーセンサがあり、それぞれ 2 個装着されている (図 1)。本実験では、車両前部に対する人の立位向きを正面、横向きの 2 条件とし、各センサの検知距離を調査した。いずれの車両のソナーも物体を検知すると、表示警報が表示され、警告音が鳴る。

本実験参加者は、7 歳子供 (以下、子供と呼称)、大人女性、大人男性各 1 名の計 3 名とし、独立行政法人自動車技術総合機構交通安全環境研究所における人間を対象とする実験に関する倫理規程に基づき、ソナーによる人検知距離を調査した。実験参加者の身長は、子供が 122 cm、大人女性が 161 cm、大人男性が 174 cm であった。尚、ソナー開発には ISO 規定のパイプを使用していることから、本研究では比較対象として、塩化ビニール製のパイプ (高

さ 1 m、直径 75 mm) を用いて、同様の調査を実施した。



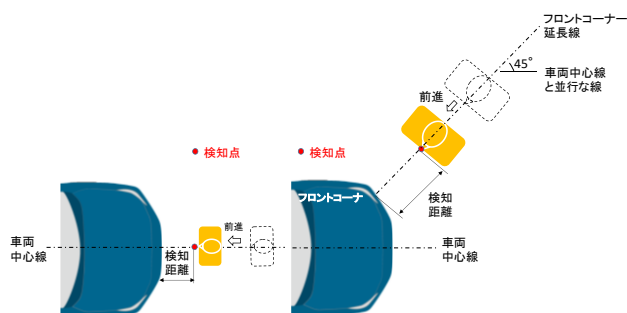
図 1 車両前方ソナー装着状況概観

センターセンサに関しては、センサ 2 個を稼働させ、図 2(a)に示すように、被験者が車両中心線上を車両に向かって前進し、警告音が安定して鳴る位置を検知点とした。車両前端から検知点までの距離を検知距離として計測した。コーナーセンサに関しては、助手席側のセンサ 1 個を稼働させ、図 2 (b)に示すように、フロントコーナーを起点とし車両中心線と平行な線から 45° の線をフロントコーナー延長線とした。被験者はフロントコーナー延長線上を車両に向かって前進し、警告音が安定して鳴る位置を検知点とした。尚、計測に関係ないセンサを鉄板で塞ぐことにより、検知距離への影響を排除した。

フロントコーナーから検知点までの距離を検知距離として計測した。分析では、パイプの検知距離に対する人の検知距離の比を式(1)のように対パイプ比とした。

$$\text{対パイプ比 (\%)} = \frac{\text{人検知距離}}{\text{パイプ検知距離}} \times 100 \quad (1)$$

尚、D 車のセンターセンサに関しては、インストルメントパネル内の表示警報が表示される時の距離と警告音が鳴る時の距離は異なることから、両者を計測結果とした。



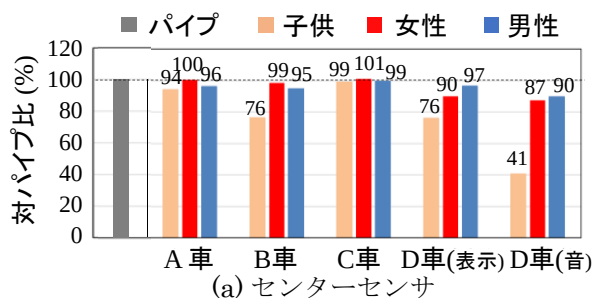
(a) センターセンサ (b) コーナーセンサ

図2 検知距離の測定

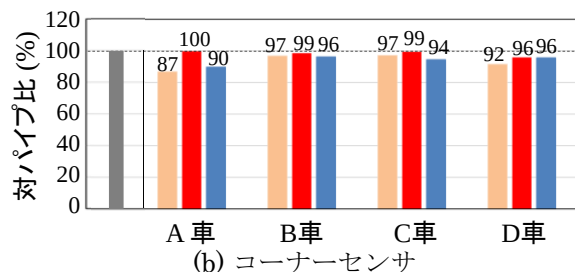
3. 実験結果

人が正面を向いている条件での対パイプ比を図3に示す。センターセンサの対パイプ比は、子供が41～99%、大人女性が87～101%、大人男性が90～99%であった。コーナーセンサの対パイプ比は、子供が87～97%、大人女性が96～100%、大人男性が99～99%であった。

大人全体の対パイプ比は、センターセンサが87～101%、コーナーセンサが90～100%であった。子供の対パイプ比は、大人に比べて低く、センターセンサの最低値が41%、コーナーセンサの最低値が87%であることが判明した。



(a) センターセンサ



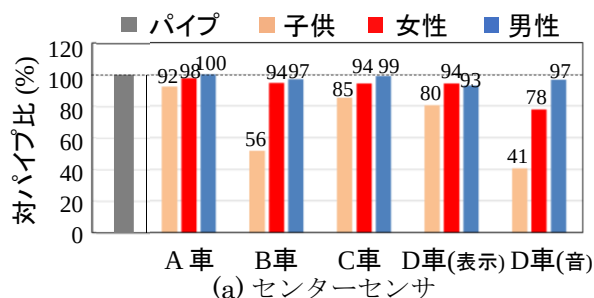
(b) コーナーセンサ

図3 人が正面向きの場合の対パイプ比

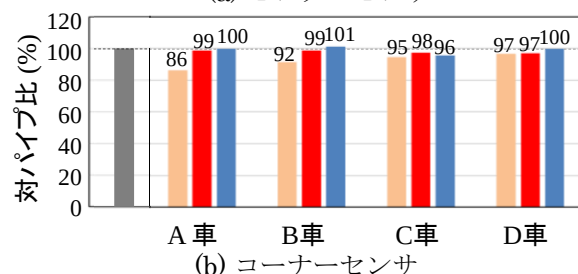
人が横向きの場合での対パイプ比を図4に示す。センターセンサの対パイプ比は、子供が41～92%、大人女性が78～98%、大人男性が93～100%であった。

た。コーナーセンサの対パイプ比は、子供が86～97%、大人女性が97～99%、大人男性が96～101%であった。

大人全体の対パイプ比は、センターセンサが78～100%、コーナーセンサが96～101%であった。子供の対パイプ比は、大人に比べて低く、センターセンサの最低値が41%、コーナーセンサの最低値が86%以上であることが判明した。



(a) センターセンサ



(b) コーナーセンサ

図4 人が横向きの場合の対パイプ比

4. おわりに

子供、大人女性、大人男性各1名の計3名を対象とし、車両前方ソナーにおける人検知の可能性を実験的に調査した。供試車両は、セダン1車種、SUV3車種の計4車種とした。本実験により、ソナーは人も検知可能であることが明らかとなった。但し、ソナーによる人検知は、子供の対パイプ比が低い結果から人の体形差に依存する可能性があり、ソナーに加えてカメラ等の併用も事故予防支援技術として必要と考える。

参考文献

- (1) 公益財団法人交通事故総合分析センター, “交通統計令和4年版” (2023)
- (2) Matsui, Y. and Oikawa, S., "Situational characteristics of fatal pedestrian accidents involving vehicles traveling at low speeds in Japan", Traffic Injury Prevention, Vol. 20, No. S1, pp. S1-S6 (2019)

⑫ペダル踏み間違い時加速抑制装置の実車性能調査について

自動車安全研究部

※児島 亨

真鍋 裕輝

北田 幸一

1. はじめに

近年、国内で販売される乗用車の多くに、アクセルペダルとブレーキペダルの踏み間違いによる事故の抑止または被害軽減に効果が期待されるペダル踏み間違い時加速抑制装置（Acceleration Control for Pedal Error、以下、ACPE）が装着されている。本装置に関しては、（独）自動車事故対策機構による予防安全性能アセスメントの中で性能試験が行われ、結果が公表されている。また、本装置に関する国連規則の策定に向け、国連自動車基準調和世界フォーラム（WP29）の自動運転専門家会合（GRVA）の配下に ACPE インフォーマル会議が設置され⁽¹⁾、技術要件等の議論が進められている。

本調査は、ACPE に関する現在の技術水準を把握するため、実車による性能調査を実施したものである。調査結果は第 2 回 ACPE インフォーマル会議で報告された⁽²⁾。以下、概要を報告する。

2. 調査概要

下記の 3 項目について実車性能調査を行った。

- 1) ACPE の基本性能調査
- 2) センサが検知できない可能性のある障害物に対する ACPE の性能調査
- 3) センサが障害物を検知できない可能性のある状況における ACPE の性能調査

2. 1 実車性能調査の方法

2. 1. 1 ACPE の基本性能調査

ACPE の基本性能調査は、自動車アセスメントのペダル踏み間違い時加速抑制装置性能試験方法（以下、JNCAP 試験）を参照して行った。

障害物は 3D タイプの車両ターゲット（ISO 19206-3:2018 に準拠）及び大人歩行者ターゲット（脚部固定式、ISO19206-2:2018 に準拠）（以下、大人ターゲット）を使用した。

ターゲットの横方向の位置は車両の車体中心線とターゲットの中心線が一致するようにした。また、大人ターゲットについては、調査車両がターゲットの背面に接近するように設置した。ターゲットと車両の前後方向距離は 1m とした。

走行方法は、車両を停止させた状態で、ドライブはブレーキペダルからアクセルペダルに素早く踏み替え、フルストロークまでアクセルペダルを急踏みする。アクセルペダルの踏み込み速度（踏み込み時間）は JNCAP 試験に準拠して 0.13 秒～0.25 秒とした。

2. 1. 2 センサが検知できない可能性のある障害物に対する ACPE の性能調査

本調査では、障害物として、子ども歩行者ターゲット（脚部固定式、ISO19206-2:2018 に準拠）（以下、子どもターゲット）及び無地の石膏ボード（アイボリー色、高さ：1220mm、幅：2440mm、厚さ：12.5mm）を使用した。衝突時の評価車両へのダメージを軽減するため、石膏ボードは可動式台車に設置した。障害物の配置は、子どもターゲットについては 2.1.1 と同様とした。石膏ボードについては、ボードの幅が車両の全幅を覆うように配置し、前後方向距離は 1m とした。走行方法は 2.1.1 と同様とした。

2. 1. 3 センサが障害物を検知できない可能性のある状況における ACPE の性能調査

本調査では、障害物として、車両ターゲット、子どもターゲット及び石膏ボードを使用した。障害物の横方向の配置は 2.1.1 及び 2.1.2 と同様とし、前後方向距離は、0.3m、3m、5m の 3 水準とした。走行方法は 2.1.1 と同様とした。

2. 2 実車性能調査に使用した車両

実車性能調査には、現在市販されている、メーカー及び検知方式の異なる 3 台の車両（車両 A～C）を使用した。3 台の車両はいずれもガソリンエンジン車で、車両 A は小型乗用車、車両 B は普通乗用車、車両 C は軽乗用車である。

2. 3 実車調査結果

Fig.1～Fig.3 に、2.1.1～2.1.3 に記した実車性能調査の結果を示す（例として前進方向の結果を記載）。いずれのグラフも縦軸を速度変化率（Velocity change rate）としている。速度変化率は、装置 OFF でアクセルペダルを急踏みした時の衝突地点の速度から、装置 ON で急踏みした時の同地点の速度を引いた値を、装置 OFF 時の同地点の速度で除した

値である。速度変化率が1の場合は、障害物の手前で車両が停止（衝突回避）、0よりも大きく1未満の場合は衝突速度を低減、速度変化率が0の場合は装置OFF時と同じ速度で衝突したことを示す。なお、速度変化率が1の場合、加速抑制制御に加え、ブレーキ制御も行われたことを意味する。

Fig.1より、車両ターゲットの場合は3台とも速度変化率は1であった。大人ターゲットの場合は、車両B（2回中1回）を除き、速度変化率は1となった。また、速度変化率が1とならなかったケースの衝突速度は5km/h未満であった。

Fig.2より、車両AとCについては、子どもターゲット、石膏ボードともに速度変化率は1であった。車両Bについては、両ターゲットともに速度変化率は0.5付近であった（衝突速度は5km/h未満）。

Fig.3(a)より、車両Aは、3種類の障害物及び3つの距離の条件に対し、速度変化率は1となった。

Fig.3(b)より、車両Bは、子どもターゲット及び車両ターゲットの場合、3m及び5mにおいて速度変化率は1となった。石膏ボードの場合は3mの条件で速度変化率は約0.3（衝突速度は約11km/h）であった（5mの条件は未実施）。また、距離が0.3mの条件では、3種類の障害物ともに速度変化率は0.2～0.3程度であった（衝突速度は2～3km/h）。

Fig.3(c)より、車両Cは、車両ターゲット及び歩行者ターゲット（2回中1回）の場合、速度変化率は1となったが、その他の条件では約0.4以下となった（3mと5mで速度変化率が1とならなかったケースでは、衝突速度は約11km/h～約20km/h）。

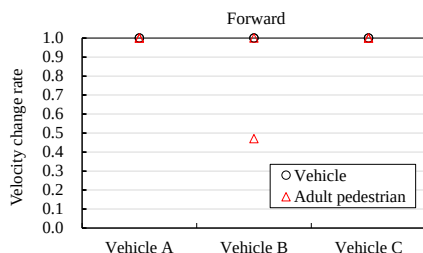


Fig.1 Velocity change rate of 2.1.1

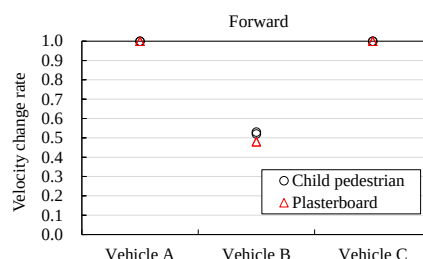
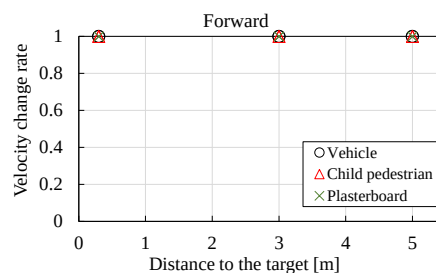
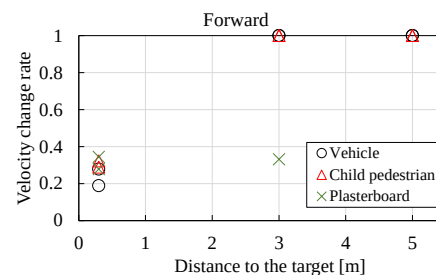


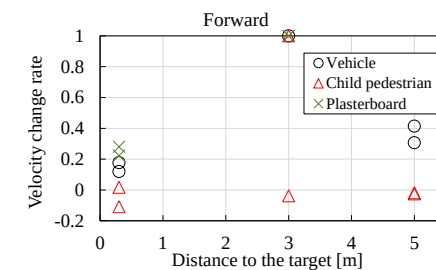
Fig.2 Velocity change rate of 2.1.2



(a) Vehicle A



(b) Vehicle B



(c) Vehicle C

Fig.3 Velocity change rate of 2.2.3

3. まとめ

実車性能調査結果から、現在の技術水準を考慮したACPEの性能要件としては、以下の条件において、停止状態からアクセルペダルを急踏みした場合に、衝突回避または衝突速度を5km/h以下とすることが妥当であると考えられる。

- ・ 障害物：車両、歩行者、壁
- ・ 障害物までの距離：1m

なお、ペダル踏み間違い事故は走行中にも発生する可能性があることから、将来的には走行中の性能要件についても検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) GRVA-15-07Rev.3, UNECE GRVA 15th session (2023)
<https://unece.org/sites/default/files/2023-01/GRVA-15-07r3e.pdf>
- 2) ACPE-02-04, UNECE GRVA ACPE IWG 2nd session (2023)
<https://wiki.unece.org/display/trans/ACPE-02>

⑬自動運転の規範となる人間ドライバの過失認定に係る考え方の整理

自動車安全研究部

※中川 正夫

1. はじめに

自動運転車には、人間ドライバと同等かそれ以上に安全である¹⁾ことが求められており、「運行設計領域内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を起こさないこと²⁾」が求められている。そのため、その規範となる人間ドライバによる安全運転を理解する必要がある。

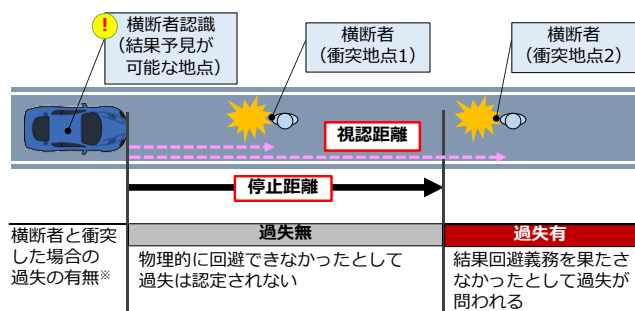
本研究では、人間ドライバが安全に運転を行っていなかったとして刑事罰を科される事となる過失認定の考え方を交通事故裁判の分析から整理する。

2. 予見と回避可能性の関係性

過失とは、故意ではなく、注意を怠ったために犯した過ちであり、その認定においては危険事象の発生を予見できたか（予見可能性）、危険事象の発生を回避できたか（回避可能性）が問われる。

交通事故裁判の裁判例において、予見が可能であったと考えられる時点を固定し、複数条件の停止距離により回避可能性を検討している事例³⁾や、複数の予見が可能であったと考えられる時点とその時点における停止距離を検討している事例⁴⁾などがあるが、いずれも予見が可能であったと考えられる時点を基準として回避の可否を検討している。

つまり、図1に示すように予見が可能になった時点を起点とし、その時点において対象までに残された距離と車速から定まる停止距離とを比較して回避の可否を検討し、回避できるにもかかわらず事故を生じさせた際には過失があると認定される。



※前提条件：車両には整備不良がなく、交通法規を遵守し、凍結などの外乱がない環境

図1 過失の基本的な考え方

3. 予見に関する考え方

予見が可能であったと考えられる時点は、回避可能性を検討する上で重要である。予見では、「危険事象の発生につながる一連の流れの端緒をどこで認識すべきか」が課題であり、交通場面に大きく依存する。

例えば、高速道路では走行領域内に歩行者が存在しない道路構造であることから100 km/h以上の高速で走行することが許されており、通常は歩行者の存在を考える必要はない。一方で、「500 m 先工事中」の標識など、人の存在を窺わせる具体的な事情があると、人の存在やその人との衝突を予見する義務が生じる⁵⁾。他方、落下物の急な出現など、通常は予見できない危険事象の発生までもを予見することは求められていない⁶⁾。

交通場面は、Ⅰ．対象が見えた時点が危険事象の発生時点と一致する交通場面（図2(a)）と、Ⅱ．対象があらかじめ見えており、ある時点で危険事象が発生する交通場面（図2(b)）に大別できる。交通場面Ⅰでは、対象が見えた時点から予見が可能である一方、交通場面Ⅱでは対象があらかじめ見えているため、一義的に危険事象の発生時点を定めることが難しい。この問題を検討するため、様々な交通場面において、人間ドライバが危険事象を認識するタイミングなどについて研究を進めている。



(a) 歩行者飛び出し



(b) 大型車カットイン

図2 交通場面の大別

4. 回避に関する考え方

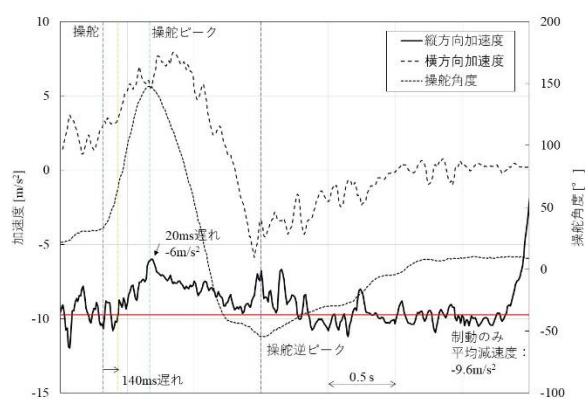
回避の可否に関し、予見が可能となった時点から、将来の危険事象の発生を回避可能であったかが検討される。危険事象の発生を回避するにあたり、制動と操舵のいずれか、あるいはその併用が選択肢として考えられる。

裁判例において、回避の可否は停止距離を基準に検討される場合が多い。停止距離は、空走距離と制動距離から構成されるが、空走距離を決定する認知反応時間（危険事象の発生時点からドライバが反応するまでに要する時間）が $0.75\text{--}0.8\text{ s}$ ⁹⁾ であることが明らかになっており、空走距離はある程度見積もることができる。一方、制動距離はその時点の车速及び車両の特性、路面状況などの影響を受け、事例ごとに異なる。なお、裁判例において制動により回避可能でない場合に、更に操舵による回避を行うことまでは求めていない⁸⁾。

制動回避の場合と異なり、操舵回避の場合は走行経路変更と制動距離の変化が同時に生じ、加えて車両挙動も複雑になることから、回避可能性の検討が容易でない。操舵回避時における車両挙動を計測した事例を以下に示す。120 km/h から最大制動中に操舵した際の操舵角と加速度を図3に示す。図において、操舵開始時から140 ms 遅れで車両が反応し、横方向の加速度の立ち上がりに伴って縦方向の加



(a) 実車計測の外観



(b) 操舵角及び加速度

図3 操舵回避における車両挙動

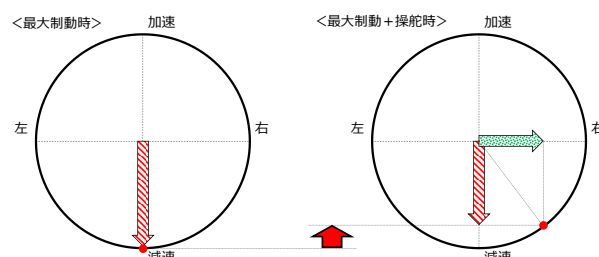


図4 タイヤの特性（摩擦円の概念）

速度が減少している（最大制動のみの時、平均減速度 -9.6 m/s^2 に対し、操舵時は -6 m/s^2 まで減少）。これは、図4に示す摩擦円⁹⁾で表されるタイヤの特性によるものであり、力の変遷に時間を要するだけでなく、操舵のため横方向に力を使うと、制動のため縦方向に使える力が減少することにより制動力が減じるためである。

加えて、操舵により回避先で新たな危険事象が生じる可能性もある。操舵時点におけるその先で生じる危険事象の予見可能性を検討した裁判例¹⁰⁾もあり、操舵回避の妥当性を一般論的に検討、整理することは難しい。

5. まとめ

本研究では、人間ドライバへの過失認定の考え方を交通事故裁判の分析から整理した。

予見が可能であったと考えられる時点は、回避可能性の検討する上で重要であり、交通場面に大きく依存する。制動による回避可能性は、ある程度見積もれる一方、操舵による回避可能性は、車両挙動が複雑になることなどから検討が難しい。

参考文献

- 1) ECE/TRANS/WP.29/2021/151, UNECE WP 29 185th session (2021)
https://unece.org/sites/default/files/2021-10/ECE_TRANS_WP.29_2021_151e.pdf
- 2) 国土交通省自動車局、自動運転車の安全技術ガイドライン（2018）
- 3) 東京高判平 26.3.28 4) 名古屋地判平 26.9.29
- 5) 奈良地判平 28.2.25 6) 広島高判昭 57.2.25
- 7) 中川正夫他、実交通環境下における人間ドライバの認知反応時間に関する研究、JSDE 設計工学、Vol.58, No.6, pp.249-264 (2023)
- 8) 中川由賀他、自動運転に関する法的問題（2）、研修、No.822, pp.21-31 (2021)
- 9) 株式会社ブリジストン、自動車用タイヤの基礎と実際、東京電機大学出版局（2008）
- 10) 京都地判平 27.1.23

⑭電動キックボード最高速度表示灯の見え方に関するモニタ評価実験

自動車安全研究部

※関根 道昭

加藤 洋子

阿部 晃大

1. はじめに

近年、国内外を問わず移動サービスの多様化とそれに対応した電動キックボードや立ち乗り電動スクーター等の「新たなモビリティ」の開発・利用が進んでいる。国内では電動キックボードを自転車並みの扱いとする改正道路交通法が令和 5 年 7 月 1 日より施行された。最高速度が 20km/h 以下の電動キックボードを「特定小型原動機付自転車」と新たに分類し、最高速度を 6km/h 以下に制御できる車両は、自転車通行可の歩道や路側帯を通行できるようになった¹⁾。このとき最高速度がどちらの状態であるか示すため、保安基準が定める最高速度表示灯（以下、表示灯）の装備が義務づけられている。

当研究所は、今回の道路交通法改正に先立ち、サンプルの電動キックボード（以下、試験車両：図 1）に取り付けた表示灯の見え方を調べるモニタ評価実験を行った。その結果は、国土交通省の車両安全対策検討会²⁾に提出され、令和 4 年 12 月 23 日に改正された保安基準に反映されている。本稿はモニタ評価実験の概要と主な結果を紹介する。

2. モニタ評価実験の概要

当研究所、灯火電波実験棟灯火暗室においてハンドルを持って支えた静止状態の試験車両を約 25m 離れた位置から横一列に並んだ 4 名が同時に観察した（図 2）。試験車両の前照灯、方向指示器、尾灯とは独立した専用の表示灯（以下、単独タイプ）の他、ハンドルバー両端の方向指示器のランプを別の色・点滅周期で点灯させる兼用タイプの表示灯についても評価した。



図 1 試験車両

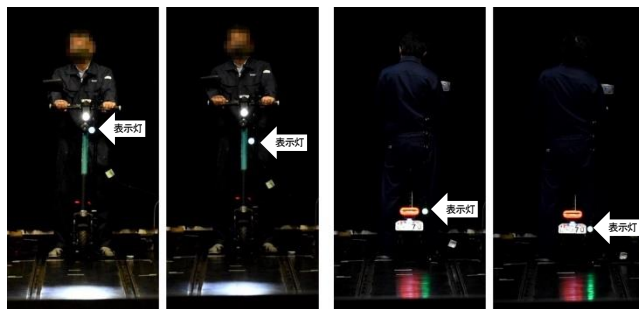


図 2 実験室の様子

方向指示器の色は橙色、点滅周期は毎分 75 回であった。実験では、表示灯の色、点滅周期、取付位置などを適宜組合わせ、以下の条件における表示灯の判別しやすさ、煩わしさを 5 段階（1 から 5）で評価させた。

- ・ 表示灯の色：青、緑
- ・ 点滅周期：常時点灯、点滅（毎分 20 回、40 回、80 回、100 回）
- ・ 前照灯との距離（試験車両前方から観察：図 3）
0 cm（近接）、10 cm、20 cm
- ・ 尾灯との距離（試験車両後方から観察：図 4）
0 cm（近接）、5 cm、10 cm
- ・ 昼間・夜間：天井照明の点灯、消灯

実験には 10 歳代から 70 歳代の男女 21 名が参加し、「交通安全環境研究所における人間を対象とする実験に関する倫理規程」に従って実施した。



(a) 10 cm 青 (b) 20 cm 青 (a) 0 cm 緑 (b) 10 cm 緑
図 3 前照灯との距離と色 図 4 尾灯との距離と色

3. 主な結果

昼間条件と夜間条件の結果は同等であったため、以下、昼間条件の結果を紹介する。前照灯から 20cm 離れた単独タイプの色と点滅周期が判別しやすさに与える影響を図 5 に示す（棒グラフは平均、誤差線は標準偏差）。色については緑色が青色より判別しやすく、点滅周期については毎分 80 回と毎分 100 回は常時点灯より判別しやすかった。また、緑色と青色の煩わしさは同等であり、毎分 20 回、80 回、100 回の煩わしさが高かった（図 6）。以上の結果から、毎分 20 回の点滅は判別しにくく煩わしいため、表示灯として適切ではないことが示唆された。

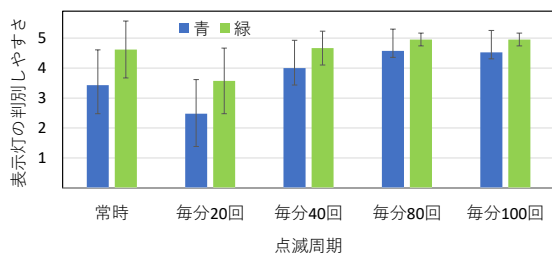


図5 色・点滅周期と判別しやすさ（単独）

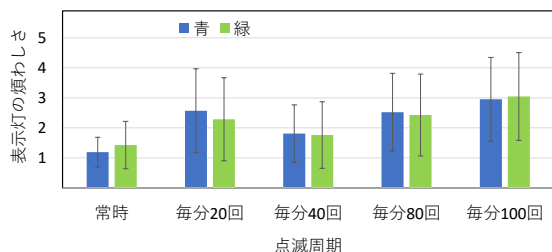


図6 色・点滅周期と煩わしさ（単独）

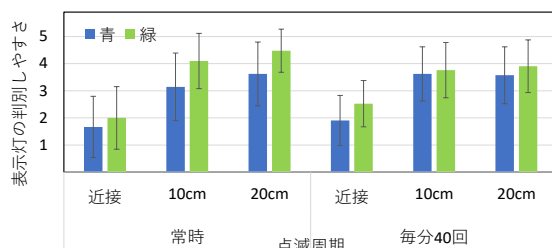


図7 前照灯との距離と判別しやすさ（前方）

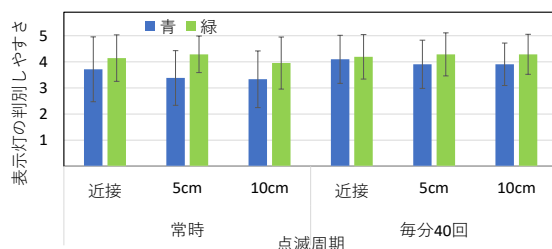


図8 尾灯との距離と判別しやすさ（後方）

次に表示灯の色と取付位置が判別しやすさに与える影響を示す。前照灯に近接する表示灯は判別しにくい、前照灯から 10 cm 以上離れると判別しやすさが大きく向上した（図 7）。一方、尾灯からの距離は判別しやすさにほとんど影響しなかった（図 8）。今回評価した表示灯は、試験車両の前照灯と混同しやすく、尾灯とは混同しにくいと考えられる。また、前方後方のいずれも緑色は青色よりも判別しやすかった。

兼用タイプの表示灯点灯中に、左右の方向指示器を数秒間隔で交互に点灯させた場合の方向指示器の判別しやすさ（図 9）と、このときの表示灯の煩わしさ（図 10）を示す。表示灯が常時点灯している場合は、方向指示器のみが点灯している場合と同程度に判別しやすかった。しかし、表示灯が毎分 40 回、100 回で

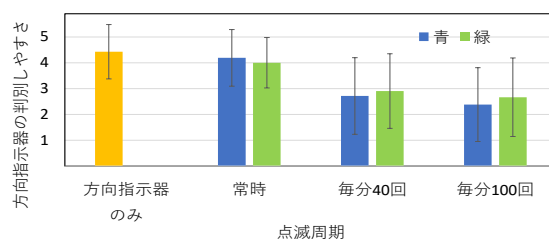


図9 方向指示器の判別しやすさ（兼用）

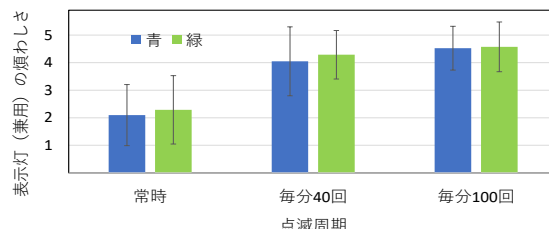


図10 方向指示器と同時点灯した表示灯の煩わしさ

点滅している場合は、方向指示器が判別しにくく、表示灯が煩わしく感じられた。そのため、方向指示器と同時に兼用タイプの表示灯を点滅させるべきではないと考えられる。

4. まとめ

電動キックボードが新たに備える最高速度表示灯（表示灯）の保安基準を策定するため、サンプルの試験車両に取り付けた表示灯の判別しやすさ、煩わしさを調査するモニタ評価実験を行った。結果として次の主要要件が規定された。

- ・ 昼間に前方と後方 25 m の距離から確認できる緑色とする
- ・ 最高速度 20km/h 時（車道通行時）は常に点灯、最高速度 6km/h 時（歩道通行時）は毎分 60 回以上 120 回以下の一定周期で点滅させる
- ・ 前照灯から 100 mm 以上離れた位置に設置する
- ・ 表示灯を方向指示器と兼用する場合は、方向を指示する側の表示灯を消灯させる

参考文献

- 1) 警察庁ホームページ，“特定小型原動機付自転車（いわゆる電動キックボード等）に関する交通ルール等について”
- 2) 国土交通省ホームページ，“「識別点滅灯火」の保安基準について”，車両安全対策検討会 第 4 回新たなモビリティ安全対策 WG 資料

⑮薄暮・夜間の交通死者数削減に向けた 道路照明の明暗が起因した交通事故の分析

自動車安全研究部

※加藤 洋子

阿部 晃大

関根 道昭

1. はじめに

近年、国内における交通死亡事故は、日没と重なる17～19時台に最も多く発生し、当事者別に見た場合、薄暮・夜間は昼間よりも「自動車対歩行者」の事故発生割合が高くなっている¹⁾。また、夜間に発生した「自動車対歩行者」の死亡事故のうち、前照灯上向き点灯（ハイビーム）により衝突を回避できた可能性が高い事故が56%という調査結果もある¹⁾。道路交通法では、夜間は基本的に上向き点灯で走行することが定められているが、対向車や前走車が存在する場合には相手に眩しさを与えないよう下向き点灯（ロービーム）にしなければならない。しかし、下向き点灯が常態化し、上向き点灯が必要な暗い道路でも下向き点灯のまま走行したために、歩行者の見落としが生じ事故に至った可能性も考えられる。本研究では、このような薄暮・夜間時間帯における交通事故の実情を理解するため、交通事故マクロ統計データベースを用いて、道路照明が不十分あるいは不均一な環境で生じたとされる交通事故の発生状況を調査した。

2. 調査方法

本研究は、交通事故総合分析センター（ITARDA）が保有する交通事故マクロ統計データベースを用い、2012～2021年の第1当事者が四輪車のドライバである交通事故について、環境的要因の「道路照明の明暗のため発見が遅れた」に該当する事故の分析を行った。第1当事者とは、最初に交通事故に関与した当事者のうち、当該交通事故における過失が重いものをいい、また過失が同程度の場合には人身損傷程度が軽い者をいう²⁾。環境的要因とは、道路不良箇所や施設不備、その他交通環境の障害が事故発生の要因と考えられるものをいい、環境的な要因が発見の遅れや判断の誤り等の人的要因を誘発したものを含んでいる²⁾。

3. 集計結果と考察

3. 1. 事故類型別の年次推移

「道路照明の明暗のため発見が遅れた」に該当する交通事故の件数について、事故類型（人対車両・車両相互・車両単独）^{※1}別の年次推移を図1に示す。10年間に於いて事故件数は減少傾向であるものの、人対車両の占める割合が高く、減少の程度は鈍化している。

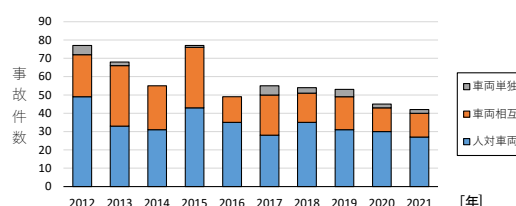


図1 事故類型^{※1}別事故件数

※1 人対車両：衝突相手が歩行者の事故
車両相互：衝突相手が車両の事故
車両単独：衝突相手が物件の事故

3. 2. 地形・時間帯別の年次推移

市街地、非市街地^{※2}における時間帯（明け・昼間・暮れ・夜間）^{※3}別の事故件数の年次推移を図2、3に示す。市街地の事故件数（図2）は非市街地（図3）よりも多く、どちらも暮れと夜間の割合が高い。市街地は非市街地よりも道路照明が多く明るい環境であ

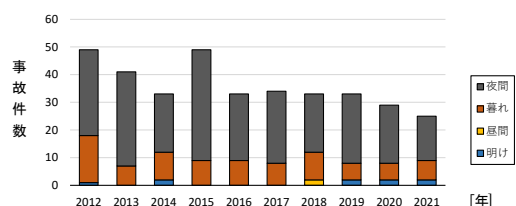


図2 市街地^{※2}の時間帯^{※3}別事故件数

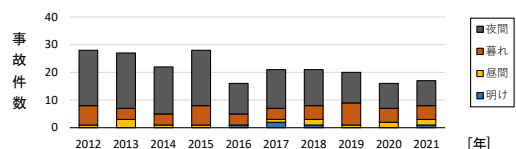


図3 非市街地^{※2}の時間帯^{※3}別事故件数

※2 市街地：道路にそっておおむね500メートルにわたって、住宅、事業所又は工場等の建造物が連立する市街地的形態をなしている地域
非市街地：市街地以外の地域

※3 明け：日の出の1時間前から1時間後まで（払暁）
昼間：明け及び暮れ時間以外の昼間
暮れ：日没の1時間前から1時間後まで（薄暮）
夜間：明け及び暮れ時間以外の夜間

ると考えられるが、交通参加者が多いために事故が多く発生していると推察される。

3. 3. 人対車両事故の詳細分析

図1より、この種の事故において人対車両の事故が半数以上を占めることを確認したが、人対車両事故における第2当事者（衝突相手）の人身損傷程度^{※4}の内訳（図4）では、死亡・重傷が半数程度を占め、この種の事故は重大事故になりやすいことが分かった。

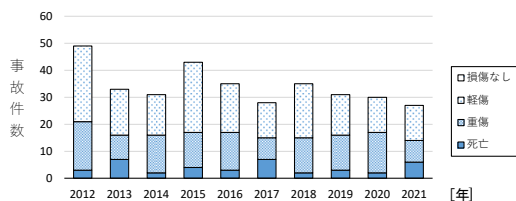


図4 人対車両事故における第2当事者の人身損傷程度^{※4}別事故件数

※4 死亡：事故発生後24時間以内の死亡
 重傷：1箇月（30日）以上の治療を要する傷害
 軽傷：1箇月（30日）未満の治療を要する傷害
 損傷なし：人身に損傷がない

また、人対車両事故における事故類型の詳細（図5）では、横断歩道以外での横断中、対面＋背面通行中の事故の割合が高く、道路を横断あるいは道路に沿って通行する歩行者の発見遅れにより事故が発生した可能性が高い。人対車両事故におけるライト点灯状況^{※5}（図6）では、殆どが下向き点灯となっている。ドライバが歩行者をより早く発見するためには前照灯の上向き点灯が望ましいが、市街地では他の交通参加者への配慮のため上向き点灯が難しい場面も多いと考え

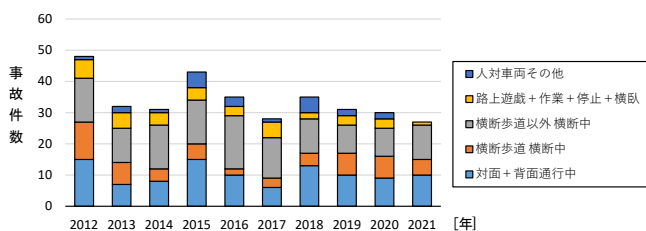


図5 人対車両 詳細事故類型別事故件数

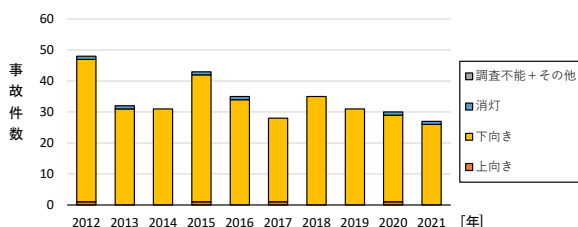


図6 人対車両 ライト点灯状況^{※5}

※5 上向き：前照灯を上向きに点灯させていたもの
 下向き：前照灯を下向きに点灯させていたもの
 消灯：灯火類の点灯がなかったもの
 調査不能：ライト点灯状況が判明しないもの

られる。道路照明により道路の均斉度を高めつつ十分な明るさを確保することや歩行者の鉛直面照度を高めるといった対策が必要である。

3. 4. 車両相互事故の詳細分析

車両相互事故における衝突対象の内訳（四輪車・二輪車・自転車）を図7に示す。車両相互は自転車に衝突する件数が概ね半数程度を占めていることが分かった。ライト点灯状況（図8）は、人対車両の場合（図6）と同様に下向き点灯が殆どであり、前照灯の上向き点灯や道路照明により自転車を発見しやすくする対策が必要と考えられる。また、暗い環境でも歩行者や自転車を検知し適切に作動する衝突被害軽減ブレーキ等、車両側の技術面の補強も望まれる。

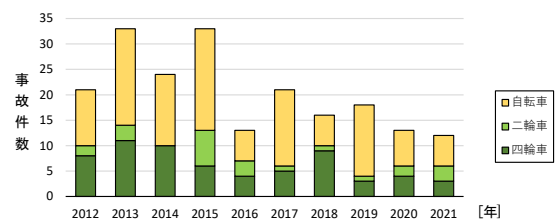


図7 車両相互 衝突対象別事故件数

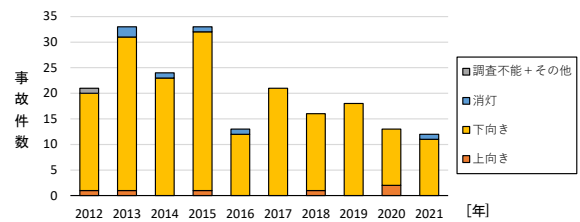


図8 車両相互 ライト点灯状況^{※5}

4. まとめ

本研究は、薄暮・夜間時間帯における道路照明の明暗が起因する事故の発生状況について調査した。薄暮・夜間時間帯の歩行者・自転車への衝突事故の予防のため、前照灯の上向き点灯、十分な道路照明の確保、暗い環境でも歩行者・自転車に対して適切に作動する衝突被害軽減ブレーキの開発や普及が望まれる。

参考文献

- 1) 警察庁，“ハイビームの上手な活用で夜間の歩行者事故防止”，<https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/anzen/highbeam.html>
- 2) 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>

⑯車線変更時の信号灯路面描画の有効性に関する評価解析

自動車安全研究部
小糸製作所

※青木 義郎
北澤 由希子

加藤 洋子
須藤 佑基

関根 道昭

1. はじめに

現在 GRE（国連灯火器分科会）では、自動車の信号灯路面描画の有効性や必要条件などについて検討が行われている。信号灯路面描画の一例として、方向指示器と連動して路面に記号などを投影し、周囲の交通参加者に車線変更や右左折の意思を伝え易くする方法が検討されている（図 1）。筆者らは、方向指示器に連動する路面描画は、車両の横を走行する自転車乗員が方向指示器を認識するまでの反応時間を短縮させることを報告した¹⁾。本研究では、このタイプの路面描画の有効性をさらに検討するため、ドライビングシミュレータ実験により、車線変更を意図する路面描画が後方車両のドライバに与える影響について調査した。



図 1 信号灯路面描画

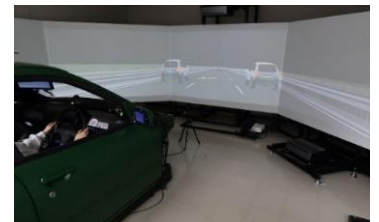


図 2 実験用シミュレータ



図 3 シミュレータ画像



図 4 反応ボタン

2. 方向指示器点灯に対する反応時間取得実験

被験者はプロジェクトによって映像が投影されるドライビングシミュレータ（図 2）に乗車して、片側 3 車線の直線路（図 3）の第 2 走行車線を目標速度 60 km/h で走行するよう教示された。ステアリングにはボタンが設置されており（図 4）、運転中、左側車線を走行する車両の方向指示器が点灯した場合に即座に左側のボタンを、右側車線を走行する車両の方向指示器が点灯した場合に即座に右側のボタンを押すこととした。方向指示器の点灯と連動して路面描画が表示される場合（路面描画あり）と表示されない場合（路面描画なし）の 2 種類を実施した。方向指示器の点灯からボタン操作までの時間をドライビングシミュレータのログから反応時間として算出し、路面描画の有無が反応時間に与える影響を調べた。また、走行条件ごとに信号灯路面描画のわかりやすさなどについて質問するアンケートを実施した。

走行条件を表 1 に示す。運転状況 2 条件、方向指示器点灯車両までの距離 3 条件及び路面描画の明るさ 2 条件（通常走行のみ）の全 9 走行条件を被験者ごとにランダムに施行した。本実験の路面描画の色や明るさ

表 1 走行条件

運転状況	方向指示器点灯車両までの車間距離	路面描画明るさ※	方向指示器点灯車両
通常走行	10m	明 平均輝度52cd/m ²	左側or右側
	20m		
	35m		
	10m	暗 平均輝度15cd/m ²	
	20m		
	35m		
注意散漫走行	10m	明 平均輝度52cd/m ²	
	20m		
	35m		

※方向指示器点灯輝度は53cd/m²

は RGB 階調値によって設定し、保安基準において方向指示器の灯色と指定される「橙色」に近い色味でなるべく明るく表示したものを明条件とし、暗条件はその 30%程度の輝度とした。各走行、方向指示器の点灯車両の左右 2 条件×路面描画ありなし 2 条件をランダムな順序で 3 回ずつ、被験者にタイミングが予測されぬよう平均 20 秒の不定期な間隔で点灯した。

また、運転状況条件における注意散漫走行とは、同乗者との会話などドライバの注意が運転以外のことにも向いている状況を模擬する条件である。ISO/TS

14198:2019 2)に基づき、2.25 秒間隔で一桁の乱数を音声で提示し、一つ前の数字を口頭で回答させる One-Back 課題を与えた。

本実験に参加した被験者は、本研究の目的を知らない外部から派遣された運転免許保有者 16 名（21～60 歳）である。本実験は、当研究所の人間を対象とする実験に関する倫理審査規程に基づく承認のもと、本人の同意を得て実施した。

3. 実験結果

3. 1. 信号灯路面描画による反応時間の変化

方向指示器点灯に対する反応時間を図 5 に示す。各走行の路面描画あり条件となし条件について、各被験者における 6 回（左 3 回、右 3 回）の反応時間の平均値を算出したのち、被験者 16 名分の平均値を求めた。

通常走行の場合、路面描画ありとなしで反応時間に大きな差は見られなかった（t 検定有意差なし、 $p>0.05$ ）。注意散漫走行時には自車両と方向指示器点灯車両との距離が 10m の場合、路面描画により反応時間が有意に短縮した（t 検定有意差あり、 $**p<0.01$ ）。注意散漫時、近接距離の割り込み車線変

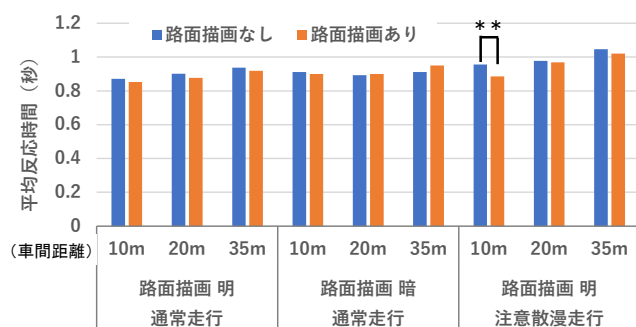


図 5 信号灯路面描画による反応時間の変化

更時において信号灯路面描画により方向指示器の点灯に気づきやすくなることが示唆された。

3. 2. アンケート評価

図 6 に各走行の終了直後に実施したアンケート結果（16 名分）を示す。「路面描画による方向指示はわかりやすかったですか？」の問いに対し、いずれの条件でも 8 割以上の被験者が“非常にわかりやすい”または“わかりやすい”と回答しており、路面描画の有効性が示される結果となった。

4. おわりに

今回の実験により、信号灯路面描画が方向指示器の点灯に気づくまでの反応時間に与える影響を検討した結果、通常走行の場合、路面描画ありとなしで反応時間に大きな差は見られなかった。被験者の注意が運転以外のことにも向いている場合においては自車両と信号灯点灯車両との距離が 10m の場合、路面描画によって反応時間が短縮した。信号灯路面描画はドライバの注意が運転以外のことにも向いている状態で、車間距離が短い場合に効果が高い可能性があることが示された。今後も国際基準案作成のため、必要要件についても検討を進めていく。

参考文献

- 1) 加藤, 青木, 関根, 佐々木, 北澤, 須藤, “ターンシグナル路面描画の注意喚起効果に関する研究”, 照明学会誌, 第 107 巻, 第 1 号, pp. 13-19 (2023)
- 2) ISO/TS 14198:2019, “Calibration tasks for methods which assess driver demand due to the use of in-vehicle systems”

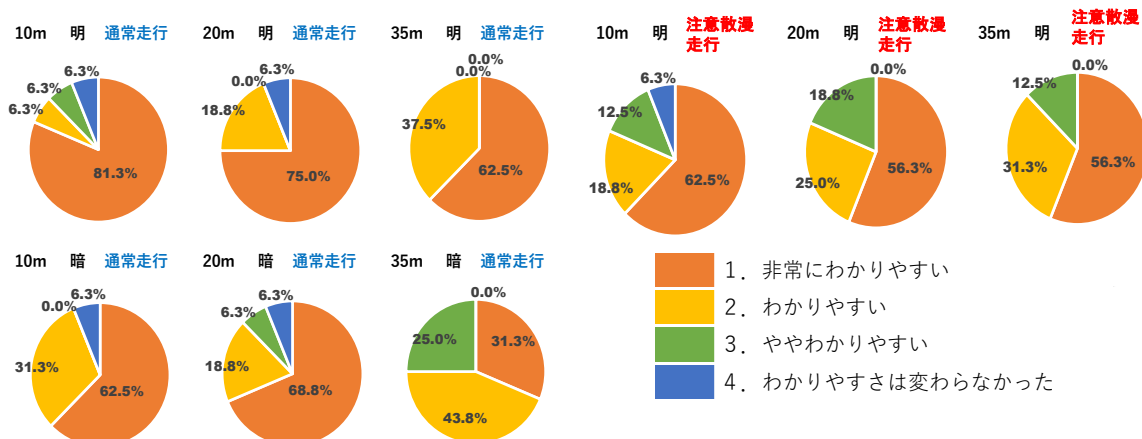


図 6 信号灯路面描画による方向指示のわかりやすさ（アンケート評価）

⑪前面衝突における前席と後席の乗員傷害比較

自動車安全研究部

※細川成之、田中良知、松井靖浩

1. はじめに

近年、交通事故死亡者数は減少傾向にあるが、それでも令和4年中では約30万件の交通事故が発生し2,610人が亡くなっている。

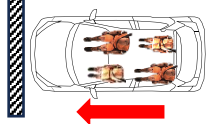
自動車乗車中の死亡者の座席別構成率は、交通統計¹⁾によると、令和4年中では運転席が78.3%、助手席が12.5%、後席が8.7%、その他が0.5%と運転席が多いものの、今後高齢化の進展や自動運転車両の普及などにより助手席や後席の乗車機会が増えることも予想される。そこで、車両乗員の安全向上をより一層図るため、前面衝突時の乗員の受傷特性について、実車を用いた衝突実験により座席位置における乗員傷害特性について調査し、交通事故死者数の低減対策について考察する。

2. 実験概要

実験条件を表1に示す。実験に使用した車両は、JNCAPでも試験実績のある比較的販売台数が多い2020年式の小型乗用車を用いた。この車両は、乗員の衝突安全装備として運転席及び助手席には前面衝突用のエアバッグと3点式シートベルト（プリテンショナー及びフォースリミッタ機能付き）が装備されている。また、後席にはプリテンショナー及びフォースリミッタ機能付きの3点式シートベルトが装備されている。

前席と後席の乗員傷害を比較するため、傷害値計測用のダミーとして、運転席と後席運転席側に成人男性ダミーを、助手席と後席助手席側に小柄女性ダミーを搭載した。ダミーの搭載方法について、前席は前面衝突の法規試験法に従い、法規試験が存在しない後席については、JNCAPのオフセット衝突試験における小柄女性ダミーの搭載方法を参考にした。乗員傷害の指標として、HIC（頭部傷害基準）、頸部前後方向モーメント、胸部たわみ（胸部肋骨と背骨の間の相対変位量）、大腿部荷重を求めた。

表1 実験条件

実験形態	フルラップ前面衝突 
衝突速度	50km/h
前席 搭載ダミー	運転席 成人男性ダミー 助手席 小柄女性ダミー
後席 搭載ダミー	運転席側 小柄女性ダミー 助手席側 成人男性ダミー

3. 実験結果

3.1 ダミーの挙動

図1に衝突直後から後席ダミーの頭部移動量が最大になる時点までの前席、後席ダミーの挙動を示す。運転席と助手席では、衝突後にエアバッグが展開して頭部とハンドルまたはインパネとの衝突を保護した。一方で、後席では頭部が大きく前方に傾いたものの、頭部と前席シートとの衝突はなかった。

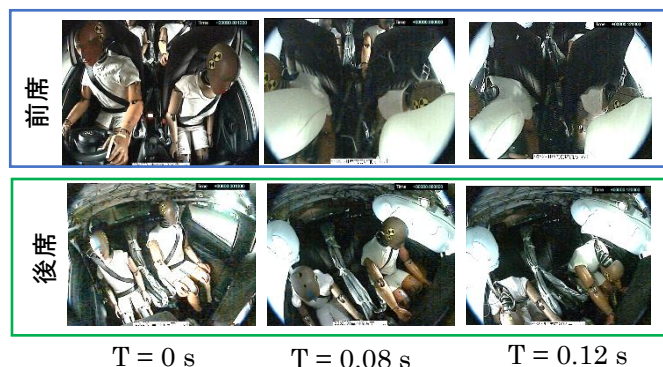


図1 ダミーの挙動

表2に各ダミーの主な傷害値を示す。前席（運転席、助手席）と後席を比較すると、成人男性ダミーと小柄女性ダミーのいずれについても、後席のHICは高い値を示した（ただし、頭部が前席シートと接触しなかったため参考値）。頸部の前後方向モーメントと胸部たわみも大きな値を示した。一方で、大腿部荷重は若干低い値を示した。

表2 ダミーの主な傷害値

成人男性ダミー 傷害値（傷害基準値）	運転席	後席
HIC（1000 以下）	134	564*
頸部 My（57Nm 以下）	31	86
胸部たわみ（42mm 以下）	24	36
大腿部荷重（-9.07kN 以下）	-0.8	-0.3

小柄女性ダミー 傷害値（傷害基準値）	助手席	後席
HIC（1000 以下）	112	403*
頸部 My（57Nm 以下）	22	47
胸部たわみ（42mm 以下）	20	22
大腿部荷重（-7kN 以下）	-1.5	-0.1

頸部 My：頸部前後方向モーメント

大腿部荷重は左右のうち大きい方の数値をとる

* 後席の HIC は頭部が前席シートと接触しなかったため参考値

図2に頭部合成加速度の時間履歴を示す。頭部合成加速度の最大値は、成人男性ダミーと小柄女性ダミーともに前席に比べて後席が大きかった。また、後席では前席に比べて最大値が発生するまでの時間が長かった。これは、前席では頭部の前方移動がエアバッグにより比較的早い段階で制限されるのに対し、エアバッグがない後席では、頭部移動が制限されず車体の停止時間付近で急激な加速度が発生するためと考えられる。

図3に頸部前後方向モーメントの時間履歴を示す。成人男性ダミーと小柄女性ダミーとも前席に比べて後席の最大値が大きく、特に成人男性の増分が顕著であった。0.06s 付近で上部部がシートベルトに拘束され、頭部の慣性移動によりモーメントのピークが発生する。その後、フォースリミッタによる上部部の前方移動により頭部モーメントは減少する。0.11s 付近でシートベルトの繰り出し限界により上部部は停止するが、頭部は慣性で前方に移動するため大きなモーメントが発生すると考えられる。

図4に胸部たわみの時間履歴を示す。成人男性ダミーでは前席と後席の最大値の差が大きかった。前席では下肢の前方移動が大腿部とインパネとの接触により制限されるが、後席では下肢の移動が制限されないため、ショルダーシートベルトにかかる負担が大きくなり、結果として胸部たわみが増大したものと考えられる。特に、成人男性ダミーは小柄女性ダミーに比べて質量が大きいので、前席と後席の差が顕著であったものと考えられる。

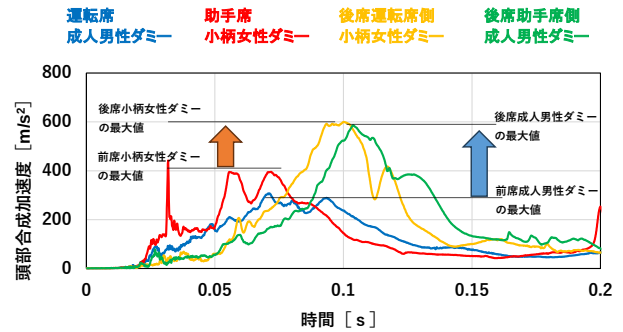


図2 頭部合成加速度の時間履歴

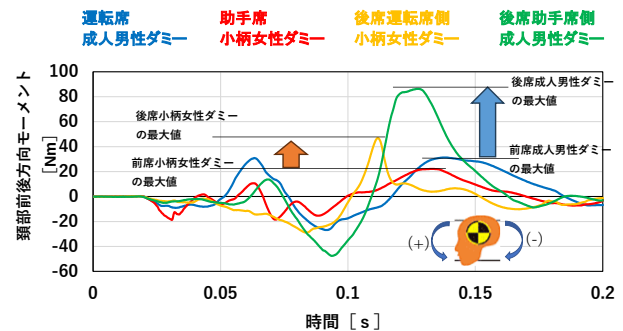


図3 頸部前後方向モーメントの時間履歴

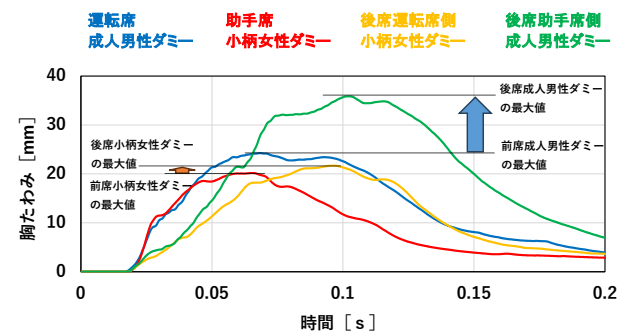


図4 胸部たわみの時間履歴

4. まとめ

今回の実験の結果、成人男性ダミー、小柄女性ダミーともに前席に比べて後席ではほとんどの傷害値が高い結果となった。これには後席では前席に対して、衝突時に乗員の前方移動を制限するインパネ等がない、補助拘束装置であるエアバッグなどが装備しにくいなどの理由が考えられる。

自動車乗車中の交通事故死者数を低減させるためには死亡者数の多い運転席の対策を充実させることは必要であるが、さらなる死傷者低減には後席の衝突安全性能の向上も重要であると思われる。

参考文献

- 1) “交通統計 令和4年版”，公益財団法人交通事故総合分析センター，(2023)

受託・施設利用等について

■受託・共同研究について

皆様のご要望に応じて、当所の研究業務に関連した受託研究、試験及び共同研究を行っています。
詳細については、企画部技術コーディネーター(kikaku@ntsel.go.jp)へお問い合わせください。

●実績(受託元)

関係省庁(国土交通省、環境省 等)、関係団体、民間企業 等
年間 50 件以上

■施設利用について

ご希望の方には施設を有償でお貸ししています。希望される方は総務課(交通安全環境研究所)
(soumu@ntsel.go.jp)までご連絡ください。なお、貸与は、研究所の業務に支障のない範囲で一定の
基準の下となりますので、予めご了承ください。

令和5年度 交通安全環境研究所フォーラム 2023 講演概要

令和5年11月1日発行

編集兼発行人 独立行政法人 自動車技術総合機構 交通安全環境研究所

発 行 所 独立行政法人 自動車技術総合機構 交通安全環境研究所

〒182-0012 東京都調布市深大寺東町 7-42-27

URL <http://www.ntsel.go.jp/>

本書についてのお問い合わせは、企画部技術コーディネーター(交通安全環境研究所)
までお願いいたします。

電話 (0422)41-3207

FAX (0422)41-3233

○本冊子は、グリーン購入法(国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律)に基づく基本方針の判断の基準を満たす紙を使用しています。

○本冊子は、グリーン購入法に基づく印刷に係る判断の基準に従い、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料 A ランクのみを用いて作製しています。

