

令和四年度  
交通安全環境研究所フォーラム2022  
講演概要

2022. 11. 15, 16  
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  
National Traffic Safety and Environment Laboratory



## 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おり、特に、近年急速に発展している自動運転に関する技術等への対応や国際的課題であるカーボンニュートラルへの取組みについては、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。

また、我が国の自動車や鉄道は国内外に生産拠点を有し、世界各国へ輸出されているため、我が国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「次世代モビリティの実現に向けた取組」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。

本年のフォーラムは、新型コロナウイルス感染症の発生状況を踏まえ、オンライン形式と対面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4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

10:00-10:05

事務局 連絡

10:05-10:10

開会の挨拶

交通安全環境研究所長 松田 敦

10:10-10:25

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

10:25-11:10

招待講演 1

早稲田大学 理工学術院 環境・エネルギー研究科 教授 紙屋 雄史 氏

大型車の電動化への期待

11:10-11:35

講演 1

上席研究員 鈴木 央一

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

2019年度より5ヶ年の計画で始まった本事業において、3ヶ年を過ぎて成果が出つつあることに加え、近年急速に進むカーボンニュートラル化の動きに対応するべく、新たに走行中給電、重量燃料電池車、カーボンニュートラルな液体燃料 (e-fuel) に関する調査研究を開始することとした。本報では既存テーマの結果の一部とともに、新規調査研究における狙いやポイントなどについて紹介する。

11:35-12:00

講演 2

主席研究員 奥井 伸宜

自動運転ロボットを活用したRDE試験運用の可能性追求

実路走行排出ガス (RDE) 試験が、日本で2022年よりディーゼル乗用車に適用される。試験の公平性を確保するために人間による運転操作の曖昧さをなくし、かつ試験の安全性を確保するため、実車走行時に運転ロボットを活用する手法を検討した。そこで、実際に車載可能な運転ロボットを試作し、独自に構築した操作アルゴリズムを適用することで、試験の公平性と安全性を同時に確保できることを確認し、新たな試験手法となる可能性を得た。

12:00-12:25

講演 3

主席研究員 宝渦 寛之

自動車の後退時警報についての新たな国連規則

大型車等に取り付けられている後退時警報装置については、歩行者等への安全対策として、苦情等の環境面への影響も踏まえた技術要件を国連傘下の作業部会において議論を行ってきた。著者が作業部会の議長を務め議論を主導したほか、当研究所にて取得した技術データを多数提供し、我が国主導による国際基準の策定を行った。本講演ではこの概要について述べる。

12:25-13:25

昼休み／ポスターセッション

13:25-13:40

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

13:40-14:25

招待講演 2

広島電鉄株式会社 執行役員 電車事業本部 副本部長／交通技術研究室長 東 耕一 氏

路面電車における交通技術の検討状況について

14:25-14:50

講演 4

主席研究員 山口 大助

LiDARセンサを利用した衛星測位の補完手法に関する検討

当研究所では車上主体の列車位置検知手法の一つに挙げられる衛星測位の精度評価に取り組んできた。電波を受信できず測位が困難な地点や測位精度が低下する地点では衛星測位を補完する他の測位手法が必要である。そこで、レーザ光を照射し測距するLiDARセンサに着目し、軌道側にマーキングして固有地点をコード化の上、LiDARでコードを検知する手法を考案した。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。

14:50-15:15

講演 5

主任研究員 小林 貴

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

当研究所では、自動車依存度が高く日常の移動が困難な地域の移動手段として、低速モビリティを活用した公共交通の有効性を検討している。低速モビリティによる移動手段の導入を検討するためには、移動困難地域の地域特性や人口規模、低速モビリティを導入することで見込める移動需要、について明らかにする必要がある。本研究では、これら低速モビリティによる移動需要の推計に関する検討内容について報告する。

15:15-15:40

講演 6

研究員 一柳 洋輔

地方鉄道における軌間拡大リスクの評価の効率化に関する検討

地方鉄道において軌間拡大による脱線事故を予防するため、レール横圧載荷治具による荷重と軌間拡大の関係に基づき軌間拡大リスクの評価が可能となっている。しかしながら、全線に渡り全てのまくらぎに対して評価を行うことは現実的でないため、小型情報端末を活用し、列車動揺のデータから軌間拡大リスクを評価すべき箇所を選定する方法について、車両運動シミュレーションや軌道検測車による軌道変位データ等を元に検討したので報告する。

15:40-15:45

事務局 連絡

15:45-16:15

ポスターセッション

10:30-10:35

事務局 連絡

10:35-10:50

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

10:50-11:35

招待講演 3

国土交通省 自動車局自動運転戦略室長 多田 善隆氏

自動運転の実現に向けた取り組みについて

11:35-12:00

講演 7

主席研究員 小鹿 健一郎

交通安全環境研究所におけるバッテリー安全に関する取組

当研究所では、電気自動車等を対象としたバッテリーの安全性評価に関する取り組みとして、自動車基準調和世界フォーラム(WP29)への研究者の派遣、所内での研究活動を行っている。研究者の国際会議への派遣では、電気自動車の安全性作業部会(EVS-IWG)での議論状況について報告する。また所内の研究活動では、レーザ照射をイニシエーション方法とした熱暴走試験の検討状況等について報告する。

12:00-12:25

講演 8

主席研究員 細川 成之

前面衝突事故における乗車姿勢が乗員傷害に及ぼす影響に関する研究

前面衝突事故時の乗員保護は、シートベルトやエアバッグが重要な役割を果たす。一方で、乗員姿勢によってはこれらの装置が有効に作用しない可能性がある。また、今後は自動運転車両の普及にともない、乗員の乗車姿勢は多様になると予想される。そこで、乗車姿勢が衝突時の受傷状況に及ぼす影響についてスレッド試験により検討を行った。

12:25-13:25

昼休み/ポスターセッション

13:25-13:40

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

13:40-14:05

講演 9

主席研究員 森 崇

陸上交通のシステム開発におけるライフサイクルとセキュリティ

鉄道・自動車などは安全性担保のため、機能安全マネジメントが重要とされ、IEC 62278やISO 26262により定義され一般化しつつある。また、セキュリティにおいても、ライフサイクル管理に関する事項を述べた規格が生まれつつある。今回は、鉄道(CLC TS/50701)と自動車(ISO SAE 21434)のセキュリティに関する規格を対比し、重要と思われる事項を述べる。

14:05-14:30

講演 10

自動車認証審査部長 小磯 和子

自動車認証審査部における審査の概要について

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。

14:30-14:55

講演 11

リコール技術検証部長 大森 隆弘

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、ユーザー等からの不具合情報の分析、事故・火災車両の調査、サーベイランスによる排出ガス性能の確認などを行うとともに、これらについて設計・製造に起因して保安基準不適合等が生じるおそれがないか技術的な検証を行っている。また、技術的な検証に必要な知見の蓄積等のための実験も行っている。これらの現状について紹介する。

14:55-15:00

閉会の挨拶

理事 坂本 一朗

15:00-15:30

ポスターセッション

# ポスターセッション

11月15日 / 12:25~13:25、15:45~16:15  
11月16日 / 12:25~13:25、15:00~15:30

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
①	路上走行試験における温度湿度影響の検討	環境研究部	※川原田 光典
②	NOxセンサを用いた重量車排出ガス計測システムによる尿素SCR触媒におけるNOx浄化性能の把握	環境研究部	※山本 敏朗
③	地方鉄道を対象とした列車動揺データに基づく軌道監視手法の検討	交通システム研究部	※緒方 正剛、一柳 洋輔、佐藤 安弘、篠田 憲幸 (客員研究員)
④	索道搬器の動揺モニタリングに関する取組	交通システム研究部	※千島 美智男、一柳 洋輔、山口 大助、八木 誠 (客員研究員)
⑤	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	交通システム研究部	※工藤 希、望月 駿登、押立 貴志 (客員研究員)
⑥	鉄道における自動運転の検討状況を踏まえた安全性評価の方向性について	交通システム研究部	※工藤 希、押立 貴志 (客員研究員)
⑦	第4種踏切に対する安全性向上に関する検討について	交通システム研究部	※長谷川 智紀、山口 大助、八木 誠 (客員研究員)
⑧	鉄道システムの第三者安全性評価と国際規格IEC 62425の接点について	交通システム研究部	※林田 守正、工藤 希、森 崇 (鉄道認証室)
⑨	降雨装置の導入と降雨環境下の認識性能評価に関する研究	自動車安全研究部	※中川 正夫、児島 亨、山本 裕之
⑩	自動運転車の公道試験におけるシナリオに関する研究	自動車安全研究部	※中川 正夫、杉本 岳史
⑪	大型ドライビングシミュレータの開発	自動車安全研究部	※田中 信壽、児島 亨、関根 道昭
⑫	高速道路上で車線変更中に衝突の危険性が高い状態に遭遇した場合のドライバのリスク回避行動に関する研究	自動車安全研究部	※真鍋 裕輝、児島 亨、岩瀬 常利
⑬	自動運転中の二次タスクと運転引継ぎに関する研究	自動車安全研究部	※阿部 晃大、加藤 洋子、関根 道昭、速水 亮 (中央大学)、戸井 武司 (中央大学)
⑭	高齢者における電気自動車の速度調整に関する研究	自動車安全研究部	※関根 道昭、加藤 洋子、阿部 晃大、宮崎 一樹 (東京農工大学)
⑮	ペダル踏み間違い事故のマクロデータ分析	自動車安全研究部	※加藤 洋子、阿部 晃大、関根 道昭、宮崎 一樹 (東京農工大学)
⑯	高齢者にも見やすい色使いに関する研究	自動車安全研究部	※加藤 洋子、中村 芳樹 (ビジュアル・テクノロジー研究所)
⑰	直前直左鏡による車両の近接視界領域の視覚認知特性	自動車安全研究部	※青木 義郎、加藤 洋子、関根 道昭
⑱	交差点右折時のドライバの運転特性	自動車安全研究部	※松井 靖浩、細川 成之、田中 良知、及川 昌子 (東京都立大学)
⑲	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
11/15 講演 1	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、新国 哲也
11/15 講演 2	自動運転ロボットを活用したRDE試験運用の可能性追求	環境研究部	※奥井 伸宜
11/15 講演 3	自動車の後退時警報についての新たな国連規則	環境研究部	※宝渦 寛之
11/15 講演 4	LiDARセンサを利用した衛星測位の補完手法に関する検討	交通システム研究部	※山口 大助、長谷川 智紀、一柳 洋輔、望月 駿登、八木 誠 (客員研究員)
11/15 講演 5	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	交通システム研究部	※小林 貴、大野 寛之、工藤 希
11/15 講演 6	地方鉄道における軌間拡大リスクの評価の効率化に関する検討	交通システム研究部	※一柳 洋輔、緒方 正剛、佐藤 安弘、篠田 憲幸 (客員研究員)
11/16 講演 7	交通安全環境研究所におけるバッテリー安全に関する取組	自動車安全研究部	※小鹿 健一郎
11/16 講演 8	前面衝突事故における乗車姿勢が乗員傷害に及ぼす影響に関する研究	自動車安全研究部	※細川 成之、田中 良知、松井 靖浩
11/16 講演 9	陸上交通のシステム開発におけるライフサイクルとセキュリティ	鉄道認証室	※森 崇、吉永 純

## 目次

### 次世代モビリティの実現に向けた取組

11月15日の講演(伊藤謝恩ホール)

題目	講演者	頁
<b>■環境研究部の取組</b>		
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 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	3
講演2 自動運転ロボットを活用したRDE試験運用の可能性追求	主席研究員 奥井 伸宜	7
講演3 自動車の後退時警報についての新たな国連規則	主席研究員 宝渦 寛之	11
<b>■交通システム研究部の取組</b>		
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	15
講演4 LiDAR センサを利用した衛星測位の補完手法に関する検討	主席研究員 山口 大助	17
講演5 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	主任研究員 小林 貴	21
講演6 地方鉄道における軌間拡大リスクの評価の効率化に関する検討	研究員 一柳 洋輔	25

11月16日の講演(伊藤謝恩ホール)

題目	講演者	頁
<b>■自動車安全研究部の取組</b>		
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	29
講演7 交通安全環境研究所におけるバッテリー安全に関する取組	主席研究員 小鹿 健一郎	31
講演8 前面衝突事故における乗車姿勢が乗員傷害に及ぼす影響に関する研究	主席研究員 細川 成之	35
<b>■鉄道認証室の取組</b>		
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	39
講演9 陸上交通のシステム開発におけるライフサイクルとセキュリティ	主席研究員 森 崇	41
<b>■自動車認証審査部・リコール技術検証部の取組</b>		
講演10 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 小磯 和子	45
講演11 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 大森 隆弘	47

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路上走行試験における温度湿度影響の検討	環境研究部	※ 川原田 光典	51
②NOx センサを用いた重量車排出ガス計測システムによる尿素 SCR 触媒における NOx 浄化性能の把握	環境研究部	※ 山本 敏朗	53
③地方鉄道を対象とした列車動揺データに基づく軌道監視手法の検討	交通システム研究部  客員研究員	※ 緒方 正剛 一柳 洋輔 佐藤 安弘 篠田 憲幸	55
④索道搬器の動揺モニタリングに関する取組	交通システム研究部  客員研究員	※ 千島 美智男 一柳 洋輔 山口 大助 八木 誠	57
⑤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	交通システム研究部  客員研究員	※ 工藤 希 望月 駿登 押立 貴志	59
⑥鉄道における自動運転の検討状況を踏まえた安全性評価の方向性について	交通システム研究部 客員研究員	※ 工藤 希 押立 貴志	61
⑦第 4 種踏切に対する安全性向上に関する検討について	交通システム研究部  客員研究員	※ 長谷川 智紀 山口 大助 八木 誠	63
⑧鉄道システムの第三者安全性評価と国際規格 IEC 62425 の接点について	交通システム研究部  鉄道認証室	※ 林田 守正 工藤 希 森 崇	65
⑨降雨装置の導入と降雨環境下の認識性能評価に関する研究	自動車安全研究部	※ 中川 正夫 児島 亨 山本 裕之	69
⑩自動運転車の公道試験におけるシナリオに関する研究	自動車安全研究部	※ 中川 正夫 杉本 岳史	71
⑪大型ドライビングシミュレータの開発	自動車安全研究部	※ 田中 信壽 児島 亨 関根 道昭	73
⑫高速道路上で車線変更中に衝突の危険性が高い状態に遭遇した場合のドライバーのリスク回避行動に関する研究	自動車安全研究部	※ 真鍋 裕輝 児島 亨 岩瀬 常利	75
⑬自動運転中の二次タスクと運転引継ぎに関する研究	自動車安全研究部  中央大学	※ 阿部 晃大 加藤 洋子 関根 道昭 速水 亮 氏 戸井 武司 氏	77
⑭高齢者における電気自動車の速度調整に関する研究	自動車安全研究部	※ 関根 道昭	79

	東京農工大学	加藤 洋子 阿部 晃大 宮崎 一樹 氏	
⑮ペダル踏み間違い事故のマクロデータ分析	自動車安全研究部  東京農工大学	※ 加藤 洋子 阿部 晃大 関根 道昭 宮崎 一樹 氏	81
⑯高齢者にも見やすい色使いに関する研究	自動車安全研究部 ビジュアル・テクノロジー研究所	※ 加藤 洋子 中村 芳樹 氏	83
⑰直前直左鏡による車両の近接視界領域の視覚認知特性	自動車安全研究部	※ 青木 義郎 加藤 洋子 関根 道昭	85
⑱交差点右折時のドライバの運転特性	自動車安全研究部  東京都立大学	※ 松井 靖浩 細川 成之 田中 良知 及川 昌子 氏	87
⑲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	89



**口 頭 発 表 11.15~16**



# 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

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2年度の二酸化窒素（NO<sub>2</sub>）の環境基準達成状況<sup>①</sup>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。一方、微小粒子状物質（PM<sub>2.5</sub>）の環境基準達成率は自排局で98.3%、光化学オキシダント（Ox）は自排局で0%であり、さらなる低減が課題となっている。

令和2年度の日本の二酸化炭素排出量<sup>②</sup>は10億4400万トンで、自動車全体で日本全体の15.5%（運輸部門の87.6%）を占めており、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」（令和3年10月22日閣議決定）<sup>③</sup>では、「電動車の普及促進に向け、燃費規制の活用や、安価な再生可能エネルギー等の安定供給を含め、費用の低減や利便性の向上を図る。」こととしている。

令和2年度の自動車交通騒音状況<sup>④</sup>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、道路に面する地域における環境基準の達成状況は改善傾向にあるものの、沿道での突出した騒音に対する苦情件数は、ここ数年は増加傾向にある。

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、陸上交通に係る環境の保全、及び、温室効果ガスの排出削減を図るため、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等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。

- ・燃料電池自動車、電気自動車等の新技術搭載車の安全・環境性能評価とOBD(On-Board Diagnostics)の活用による使用過程の車両性能情報収集方法の検討
- ・実環境走行でのエネルギー消費効率・有害排出物質等の信頼性・公平性を高めた評価
- ・走行実態に即した騒音の評価

本稿では、当部で行っている研究及び国際基準調和活動の概要と方向性について述べる。

## 2. 研究の概要

### 2. 1. 燃料電池自動車、電気自動車等の新技術搭載車の安全・環境性能評価とOBDの活用による使用過程の車両性能情報収集方法の検討

カーボンニュートラルの実現に向けて、電気自動車、燃料電池自動車、ハイブリッド自動車等次世代自動車の環境性能評価方法を、技術の進歩に対応して高度化するための研究を行っている。特に、電動車の普及が見込まれるため、技術が急速に進化しているバッテリーの安全性や耐久性を適切に評価するための研究を行っている。また運輸部門のCO<sub>2</sub>排出の約4割を占める商用車のカーボンニュートラル化に向け、運輸事業者におけるエネルギーマネジメントや運行管理等の最適化を実現するスマートモビリティ社会の構築するため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」に参画している。

### 2. 2. 実環境走行でのエネルギー消費効率・有害排出物質等の信頼性・公平性を高めた評価

自動車のエネルギー消費率や有害排出物質に関して、より実走行条件に即した様々な運転条件下において適用可能な評価方法の高度化に関する研究を行っている。微小粒子状物質のさらなる低減のため、2023年より従来の重量によるPM排出量の規制に加え、粒子数（PN: Particle Number）の規制が導入される。それを受けて、特に重量車においては国際基準への展開も視野に入れ、PNが大きく変化するDPF(Diesel Particulate Filter)再生前後も含めて適切な評価をするための検証実験を行っている。

重量車の実走行時における排出ガスを計測するため、当研究所ではNO<sub>x</sub>センサ等の排気管直挿センサを用いた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するとともに、排出ガスの実態把握に取り組んでいる。

国土交通省は、運輸部門におけるCO<sub>2</sub>排出量の多い重量車分野に関し、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るため、「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5か年計画（令和元年～5年度）で行っている。令和4年度も当研究所が中核的研究機関となって、前年度に引き続き、重量車の電動化に向けモータと変速機を一体化したアクスルの開発、重量車の空力性能改善のための車両形状の検討などを行っている。また、令和4年度から、重量車の高効率化技術として、新たに水素燃料電池自動車の重量車燃費試験法の確立、走行中ワイヤレス給電に関する車両要件の構築、水素燃焼メカニズムの解明、次世代燃料であるe-fuel使用時の排出ガス性能・車両影響の検証を実施しており、それらの技術指針等の策定を行うこととしている。

### 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の検討を行っている。また、街頭検査の効率化を図るため、単独走行をしている二輪車を対象として、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、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（WP29）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）

PMP（Particle Measurement Programme）インフォーマル会議では、重量車の微小粒子状物質のPNによる新たな評価法を検討している。当研究所は、PMPにおいて検討中の直接法（排気管出口の直下におけるPNの測定）と、従来の希釈法（希釈トンネル下流におけるPNの測定）の結果を比較し、両者の違いや、安定した結果を得るための試験方法について検討した調査結果を報告した。また、EVE（Electric Vehicles and the Environment）インフォーマル会議は当研究所の職員が副議長を担当している。さらにGRPEには新たに自動車のLCA（Life Cycle Assessment）に関

するインフォーマル会議も設立され、当部でも検討を開始した。

#### 3. 2. 騒音・タイヤ専門家会合（GRBP）

GRBPでは、重量車等の後退を音で知らせる警報装置に関する新たな国連規則を検討するため、タスクフォースが設置され、当研究所の職員が議長を担当し議論をリードした。議論を行うにあたり、暗騒音に応じた適切な後退警報の音量の調査や試験法の妥当性の検証等を行い、その結果を基に後退警報の技術要件を提案し、基準案の策定に貢献した。また、四輪車の加速走行騒音の国連規則R51/03に規定されている追加騒音規定に関するインフォーマル会議において、当所審査部の職員が副議長として参画し、国際基準作りをリードすることで新基準の策定に大きく貢献した。上記2つの基準案は第187回WP29（2022年6月）において承認された。

### 4. 環境研究部の今後の方向性

以上に述べたように、環境研究部では従来から進めてきた、排出ガスや騒音といった課題に対応する環境の保全への取り組みを今後も継続していく。さらに、カーボンニュートラルの実現に向け、温室効果ガスの排出削減を図るため、自動車の実使用における燃料及び電力量の消費を評価すること、さらに使用段階のみならず、製造や廃棄といった自動車のライフサイクル全体を考慮した評価方法に関する研究も進めていく。

### 参考文献

- 1) 環境省，“令和2年度 大気汚染状況について”，環境省ホームページ，<https://www.env.go.jp/content/900400269.pdf>，（参照2022.8.26）
- 2) 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](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html)，（参照2022.08.31）
- 3) “パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略”，<https://www.env.go.jp/content/900440767.pdf>，（参照2022.08.31）
- 4) 環境省，令和2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/900502152.pdf>，（参照2022.8.27）

# 講演 1. 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、新国 哲也

## 1. はじめに

バスやトラックなどの重量車における環境負荷低減とカーボンニュートラル化に向けて、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、その前身の事業も含めて「次世代事業」という。)を実施しており、交通安全環境研究所は、その中核的研究機関として本事業を推進している。次世代事業は、大気環境問題が深刻であった 2002 年度に開始され、その後のエネルギー問題や電動化の動きなど、その時々課題に対応しながら事業を継続している。現在は第 5 期として 2019 年度より開始し、2023 年度までの 5 ヶ年計画で事業を行っている。この第 5 期事業がそれまでと異なる大きな点は、産学官連携を促進して多くの大学とともに事業を実施していることである。実施体制として、有識者による検討会及びその下のワーキンググループ (WG) において方針の策定や進捗管理を行い、産及び学で構成される各研究グループがそれぞれの研究テーマを推進している。概要については、2020 年及び 2021 年の交通研フォーラムにて報告している<sup>1) 2)</sup>。

次世代事業において、カーボンニュートラル化のさらなる推進が課題であった。電動化は 1 つのアプローチではあるが、重量車、特に長距離輸送用途に多く用いられる大型トラックにおける電動化は、現在の蓄電池の能力などを踏まえると容易ではない。2021 年 6 月に閣議決定されたグリーン成長戦略<sup>3)</sup>においては「8t 超の大型の車については、貨物・旅客事業等の商用用途に適する電動車の開発・利用促進に向けた技術実証を進めつつ、2020 年代に 5,000 台の先行導入を目指す」(ここでいう電動車は、電気自動車 (EV)、燃料電池自動車 (FCV)、プラグインハイブリッド自動車及びハイブリッド自動車を指す。次も同じ。)とある。一方で軽・中量車については「2035 年までに、乗用車新車販売で電動車 100%を実現できるよう、包括的な措置を講じる」とされており、大型トラック等と

は様相が大きく異なる。そのような中、大型車のカーボンニュートラル化に向けた動きに対応するものとして、本次世代事業では、新たに走行中ワイヤレス給電システム、重量水素 FCV の燃費評価、e-fuel 使用時の排出ガス性能・車両影響などに関する検討を追加した<sup>4)</sup>。

そこで本報告では、第 5 期次世代事業において、実施中の一部テーマに関する成果の中間報告と、今年度より新たに開始する走行中ワイヤレス給電、重量 FCV、e-fuel に関する 3 テーマの概要について述べる。

## 2. 既存テーマの成果について

すでに実施している調査研究テーマに関して、後処理装置関連と内燃機関関連の中から、既報で取り上げたものと異なる各 1 テーマずつについて、これまでに得られている成果について紹介する。

### 2. 1. SCR 触媒システムの高機能化

大型トラック等における窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) 排出抑制のための浄化後処理装置として、現在ほぼすべての車両で尿素水を使用する還元触媒 (尿素 SCR) システムが用いられている。その SCR 触媒システムに関して「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」と題する研究を北海道大学にて実施している。本研究ではマイクロの視点から触媒を構成するゼオライトの粉末上の浄化反応について、中間生成物を含めて赤外分光等による測定を行い、並行してゼオライト細孔内の NO 等分子の吸着や拡散について分析している。加えて、よりマクロな視点での触媒反応モデルを構築して NO<sub>x</sub> 浄化現象を明らかにすることを行っている。そのモデルの構築には、表 1 に示す R1~R7 の反応式を用いた。

また表 1 に示す反応式における各種定数の同定とモデルの検証には、触媒テストピースを反応管の中に

設置してモデルガスを通して触媒前後のガスを計測して浄化性能を評価するリアクター試験の結果を用いた。

表 1 モデル作成に用いた反応式

No.	Reaction	Rate expression	Ef [kJ/mol]	Eb [kJ/mol]
R1	$S1 + NH_3 \rightleftharpoons S1NH_3$	$k_f \theta_{S1} [NH_3] - k_b \theta_{S1NH_3}$	0	180
R2	$Cu + NH_3 \rightleftharpoons CuNH_3$	$k_f \theta_{Cu} [NH_3] - k_b \theta_{CuNH_3}$	0	155
R3	$Cu + H_2O \rightleftharpoons CuH_2O$	$k_f \theta_{Cu} [H_2O] - k_b \theta_{CuH_2O}$	0	120
R4	$2NO + O_2 \rightleftharpoons NO_2$	$k_f \theta_{Cu} [NO][O_2] - k_b \theta_{Cu} [NO_2]$	35.3	130
R5	$4CuNH_3 + 3O_2 \rightarrow 4Cu + 2N_2 + 3H_2O$	$k_f \theta_{CuNH_3} [O_2]^{0.45}$	73.2	-
R6	$4Cu + 4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4Cu + 4NO + 6H_2O$	$k_f \theta_{Cu} [NH_3]^2 [O_2]^{0.33}$	106	-
R7	$4CuNH_3 + NO + O_2 \rightarrow 4Cu + 4N_2 + 6H_2O$	$k_f \theta_{CuNH_3} [NO]^{0.71} [O_2]^{0.26}$	69.5	-

図 1 はリアクター試験の結果で、触媒入口のアンモニアや NO、水などの濃度、入口ガス温度を順次変化させた過渡状態での出口ガス濃度の変化を示している。実測が△のプロットで、モデルを用いた計算結果が実線となっている。図に示すとおり、両者よく一致しており、特に NO の実験値と計算値の相関は 0.98 以上であり、モデルが高い精度で実験結果を表現できたことを示している。通常このようなモデルによりガス濃度や温度が変化する過渡状態を精度良く再現することは難易度が高い。本研究でそれができた理由として、粉末ベースで反応や吸着などを調査した基礎試験の結果を生かしたことが挙げられ、化学系、触媒系の専門家と共同で研究を進めていることが成果につながったものと言える。

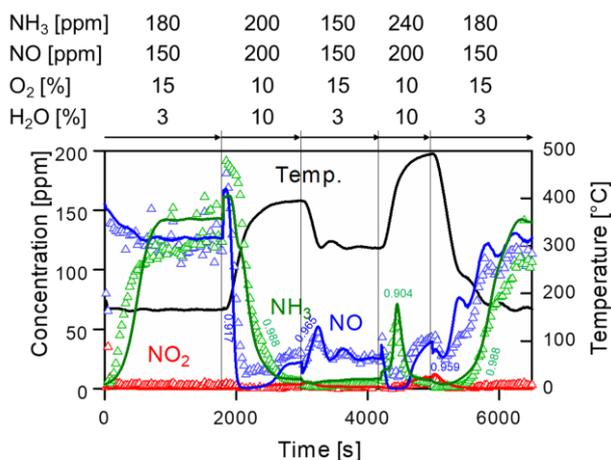


図 1 モデルを用いた計算とリアクター試験による実測値時間履歴の比較

## 2. 2. 天然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

天然ガス自動車の燃料は、これまでの多くが圧縮天然ガス (CNG) であったのに対し、より長距離走行が可能となる液化天然ガス (LNG) の重量車が市販される<sup>9)</sup>など、安価で CO<sub>2</sub> 排出の少ない燃料として天然ガスが注目されている。本事業では、天然ガスエンジンにおける高効率化を目指す際に課題となる異常な圧力変動をもたらす燃焼 (ノッキング) の発生メカニズムの解明について、岡山大学にて軽油着火天然ガスエンジンを用いて研究を進めている。その中で、特にエンジンの破損にもつながるノッキングと、ノッキングのような圧力振動を起こさない高熱効率を可能とする自己着火燃焼 (本研究では「PREMIER 燃焼」と呼称) の起こる境界について着目した。

自己着火火炎拡がり速度の測定結果を分析したものを図 2 に示す。図の横軸  $\epsilon$  は自己着火火炎拡がり速度を、縦軸  $\xi$  は温度勾配をそれぞれ無次元化した指標であり、Bradley 氏らの研究論文の結果<sup>6)</sup>を引用し、そこに本調査研究で計測した実測結果 (ケース 1~4) をプロットした。実際にノッキングが発生したケース 3 及び 4 は Bradley 氏らが示したノックが起こるエリアにプロットされた。また、同じ自己着火ながらノッキングに至らないケース 1、2 (PREMIER 燃焼のケース) では同図の通常燃焼のエリアにプロットされた。今回の実測結果は Bradley 氏の研究の結果を支持するものであり高効率燃焼を阻害するノッキングの発生メカニズム解明につながる成果と考えている。

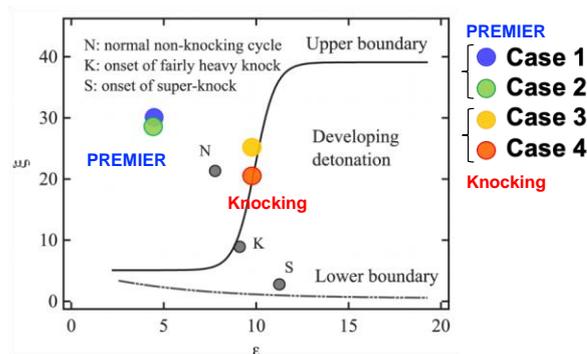


図 2 自己着火火炎拡がり速度と温度勾配の関係

## 3. 令和 4 年度より開始する新規テーマについて

### 3. 1. 大型車に適用する走行中ワイヤレス給電

次世代事業における各種の技術・評価法開発などは、ほぼ車両単体を対象としたものとして進めてきている。そのような中、車両ではないインフラ側の動き

として、国土交通省道路局は将来の走行中ワイヤレス給電の実用化に向けた技術開発支援を行っており、ここでは道路に 20kW クラスのコイルを埋設するものが検討されている。そこで本事業では走行中ワイヤレス給電について、道路局による技術開発支援に合わせて、車両側の技術的検討を行うこととした。

20kW という数値は、乗用車クラスであれば高速道路走行を行うことが可能であるのに対し、重量車が高速道路走行を行うにはその数倍の電力が必要となる。そこで本調査研究は 5 年計画で、重量車を想定した複数個の受電コイルを搭載したシステムを用いて、安全かつ効率よく受電できるシステムを設計、構築することを目指す。その概念図を図 3 に示す。その上で事業後半においては受電効率に加えて、他の金属部品への影響や漏洩電磁界などの評価を行う計画である。本調査研究は東京理科大学が実施することになっている。

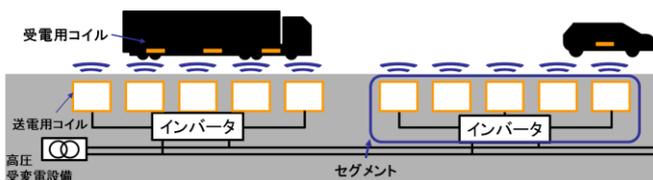


図 3 本事業で構築を目指す走行中ワイヤレス給電システムのイメージ

### 3. 2. 重量 FCV における燃費（水素消費量）測定

FCV の燃費測定について、乗用車等の軽・中量車では、国連規則で定める試験法 (UNR-154) に規定されており、具体的には燃料となる水素を車両外部のボンベから供給して、試験サイクル走行前後のボンベ重量の差分から水素消費量を評価する重量法が主流となっている。一方、重量 FCV の燃費測定については国際的な試験法はなく、国土交通省で検討を進めている試験法が 2022 年内にも策定される見通しである。FCV に限らず重量車の燃費評価は、車両を直接走行させて燃費を測定する軽・中量車とは異なり、事前にテストベンチにて燃料消費に関する実測データを取得し、各種車両諸元値などを反映した計算モデルに実測データを与えて計算するシミュレーション法により行われる。計算精度を高めるため、パワートレーンの数多くの作動条件で実測データを取得するのが一般的であるが、水素の場合、ボンベの重量測定による

方法では、非常に手間と時間がかかる。そこで、運用性を高めるため、燃料電池スタックに供給される水素流量そのものを測定する流量法を検討することとした。2022~2023 年度にかけては既存の大型車用シャシダイナモ (図 4) において、重量 FCV を評価できるように水素供給設備などの導入を図り、実車両を用いて流量法による測定や検証を行う予定である。将来的には FCV を含むハイブリッド機構を有する車両の燃費評価で用いられる HILS 法あるいはパワートレーン法を実施できるテストベンチの導入も視野に入れながら、試験法の精緻化を進めていく予定としている。



図 4 重量車のシャシダイナモ試験の例 (車両は過去の次世代事業で開発したディメチルエーテル (DME) 車)

このようにして得られた知見は、今後国際基準調和活動の中で重量 FCV の燃費評価方法の検討が行われる際に重要になるものである。本調査は交通安全環境研究所と自動車工業会とで実施していく。

### 3. 3. e-fuel 実用化に向けた影響調査

エネルギー密度の高い軽油などの液体燃料は、とりわけ長距離用途の多い大型トラックでは当面主流になると見込まれる。そのようなカテゴリーの車両で CO<sub>2</sub> 排出を低減していく手法の一つとして、既排出の CO<sub>2</sub> と再生可能エネルギーで生成される水素を用いた改質等により生成されるカーボンニュートラルな液体燃料 (e-fuel) の使用が挙げられる。e-fuel に関しては次世代事業以外にも多くの調査研究が行われている。それらでは高効率な合成法など燃料生成に関するもの以外では、燃料組成が変化することによる着火特性の変化などをみる基礎的なものと、車両からの排

出ガスがどのように変化するか、といった実用的なものに大別される。本調査では排出ガス性能への影響などに加えて各種部材への劣化等の影響を調査していくとともに、セタン価や蒸発特性の違いを生かした高効率燃焼の可能性調査を実施していく予定である。実施にあたっては交通安全環境研究所と株式会社新エィシーイーが連携をして、前者の影響調査などは主に交通研が、後者の高効率燃焼などについては主に新エィシーイーが実施していく。

フィッシャー・トロップシュ (FT) 合成は、e-fuel の製法としても可能性を有することに関して、過去の次世代事業において、FT 合成により製造された軽油互換の FTD 燃料を用いた車両の技術開発及び実証試験 (H17~22) を行っている (図 5)。当時の知見を活用しつつ、現在の基準に適合するエンジンに e-fuel を適用した場合の課題について検討する。例えば、既存軽油との混合時や、製法の違いによる成分の変化なども考慮して、e-fuel の実用化に際して車両側に求められる指針の策定を目指す。



図 5 FTD 燃料を営業路線バスにて 6 ヶ月の実証運行

#### 4. まとめ

国土交通省からの受託事業として実施している「産学官連携による高効率次世代大型車両開発促進事業」の現状として、2019 年度より実施している研究テーマの一部に関する成果と、大型車におけるカーボンニュートラル化をより意識して今年度より新たに 5 ヶ年かけて実施する予定の 3 テーマについての概要を紹介した。2019 年開始のテーマについては検討会等の指導の下順調に進捗しており、2023 年度のとりまとめに向けて進めていく。また今年度開始のテーマについては、よりカーボンニュートラル化に寄与できるものとして鋭意取り組んでいきたい。

#### 5. おわりに

本事業は委託元である国土交通省自動車局車両基準・国際課をはじめ、事業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明記し、謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 交通安全環境研究所ホームページ：  
[https://www.ntsel.go.jp/Portals/0/resources/forum/2020files/poster/post\\_07\\_s.pdf](https://www.ntsel.go.jp/Portals/0/resources/forum/2020files/poster/post_07_s.pdf)
- 2) 交通安全環境研究所ホームページ：  
[https://www.ntsel.go.jp/Portals/0/resources/forum/2021files/ok\\_20211129\\_kouen01s.pdf](https://www.ntsel.go.jp/Portals/0/resources/forum/2021files/ok_20211129_kouen01s.pdf)
- 3) 経済産業省ホームページ：  
<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-4.pdf>
- 4) 国土交通省ホームページ：  
<https://www.mlit.go.jp/page/content/001420229.pdf>
- 5) いすゞ自動車ホームページ：  
[https://www.isuzu.co.jp/newsroom/details/20211028\\_01.html](https://www.isuzu.co.jp/newsroom/details/20211028_01.html)
- 6) Kalghatgi, G., and Bradley, D., International J. of Engine Research, 13(4) 399-414, 2012
- 7) 国土交通省ホームページ：  
<https://www.mlit.go.jp/page/content/001420226.pdf>

# 講演 2. 自動運転ロボットを活用した RDE 試験運用の可能性追求

環境研究部

※奥井 伸宜

## 1. はじめに

自動車の実路走行における排出ガスとシャシダイナモ (CHDY : Chassis Dynamometer) を使ったサイクルをベースとする排出ガスの試験結果には、乖離があるとの指摘がある。このため、欧州ではディーゼル及びガソリン乗用車の路上走行 (RDE : Real Driving Emission) 試験が 2018 年より開始されている。日本においては、ディーゼル乗用車の RDE 試験が 2022 年 10 月より開始された。

日本では、型式認証前の車両を一般道路で走行させることは法律上難しい。一方で、路上走行検査のための国際的な統一試験法 (UNR-RDE) や独立行政法人自動車技術総合機構審査事務規程 (TRIAS : Test Requirements and Instructions for Automobile Standard) 31-J119-012 では、「試験は道路又は試験路 (テストコース) において行う」と記載され、試験路における RDE 試験が実施可能な状態である。

試験路の走行試験は、従来の CHDY 試験と同様、RDE 試験用に作成された目標車速パターンを追従することとなる。しかし、試験室内に固定された車両のアクセル及びブレーキ等のペダルを操作する CHDY 試験とは異なり、RDE 試験は車両が試験路を走行するため、上記操作に加えハンドル操作も必要となる。このため、試験路を用いた RDE 試験は、目標車速を正確に追従することがより難しくなる。

そこで本研究では、自動運転ロボットを活用した RDE 試験の運用を検討している。実際、車載可能な運転ロボットを製作し、CHDY 走行用に構築したドライバモデルを組み合わせ操作した。今回、乗用車を用いて試験路を走行し、RDE 試験への運転ロボットの適用性と有用性を評価した。

## 2. RDE 試験法

RDE 試験は道路又は試験路 (テストコース) において行い、試験時間は 90 分~120 分とする (路上走行時のディーゼル軽・中量車排出ガスに関する技術基準 (TRIAS 31-J119-01))。

試験路を用いた試験の運転状況を図 1 に示す。ドライバー一人で運転する図 1 (a) の場合、目標車速の表示画面を注視し各ペダルを操作するだけでなく、車両前方の道路状況を確認しハンドル操作を行う必要があり、試験路走行試験は困難である。そこで一般には、図 1 (b) のように、二人体制で試験が行われる。運転席に座ったドライバーがアクセル及びブレーキを操作し、助手席側のコ・ドライバーがハンドルを操作する。

### 2. 1. RDE 走行試験の規程条件

試験路を用いた試験の場合、「トレランス (表 1 右参照) の逸脱は避けるものとする」、「長時間の逸脱継続で無効とする」とされ、具体的な逸脱時間や回数の指定はない。

実際に、当研究所職員による二人体制で、試験路を用いた RDE 試験を行ったところ、約 5,500 秒の走行試験に対しトレランスの逸脱時間 (積算) は、試験 1 回目に 90 秒、2 回目に 55 秒となり、目標車速の正確な追従は困難であった。

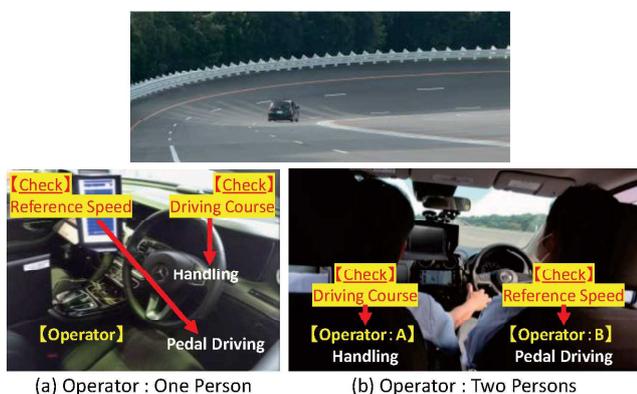


図 1 RDE 試験風景 (テストコース走行)

表 1 シャシダイ試験における試験許容値

Test Mode	Admission Criterion (Deviation from Limit Line)	
JCOS	Permissible Time per 1 Deviation	within 1 sec
	Permissible Total Time	within 2 sec
WLTP	Permissible Time per 1 Deviation	within 1 sec
	Permissible Number	within 10 times

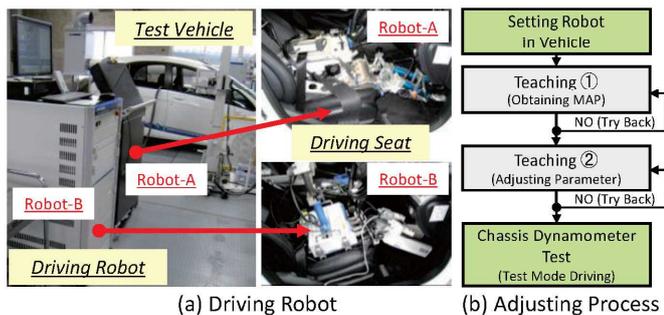


図2 市販運転ロボットの適用時の試験風景及びドライバモデルの調整方法

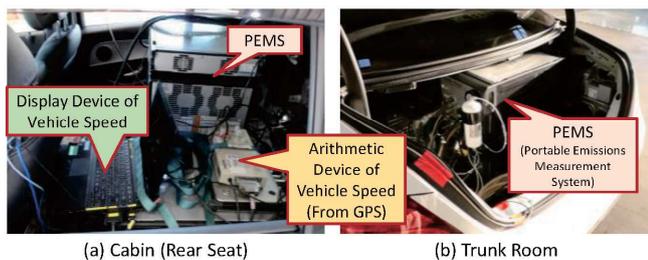


図3 RDE試験に必要な機器の車両搭載状況

一方で、表1左に示すCHDY試験における規程条件においては、どの試験モードにおいても、逸脱一回当たりの許容時間は1秒以内とされ、許容の積算時間は2秒以内であったり、積算回数は10回以内であったりと具体的に条件が決められている。

したがって、RDE試験の規定条件はCHDY試験に比べ緩い。

### 3. 自動運転ロボット

目標車速を追従するためには、人間（自動車メーカーのプロドライバ等）に頼らず、運転ロボットに行わせる方法があり、図2(a)に示すような運転ロボットが市販されている。

#### 3. 1. RDE試験における市販運転ロボットの適用課題

市販の運転ロボットをRDE試験に適用するには、下記のような課題がある。

##### ①ハードウェアの課題

RDE試験を行う場合、試験車両の車内には、目標車速の表示装置及び実車速をGPS等で取得する装置に加え、車載型排出ガス分析装置（PEMS：Portable Emissions Measurement System）を搭載する必要がある。これら装置の搭載状況の一例を図3に示す。後部座席及びトランクルームは、これら装置で埋め尽くされており、本体サイズの大きい市販の運転ロボット

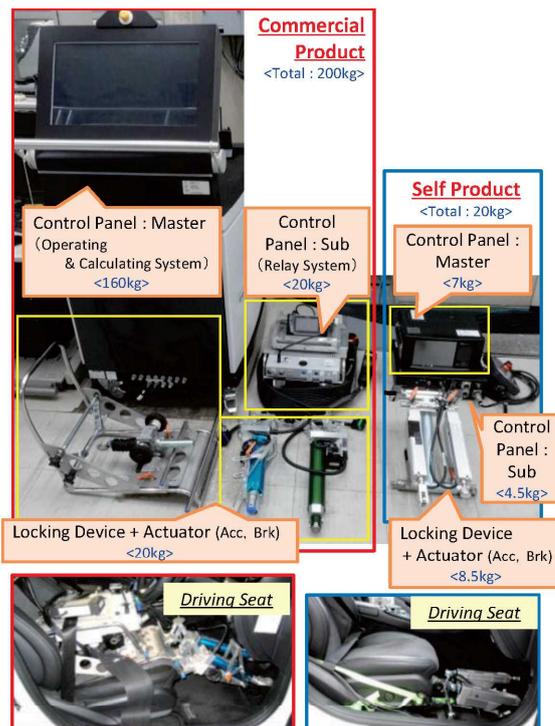


図4 市販ロボット及び構築ロボットの比較

(図2(a)及び図4左参照)を新たに搭載することは不可能である。さらに、運転席もペダルを操作するロボットで占有されることから、ドライバが運転席に座りハンドルを操作することは困難である。

##### ②ソフトウェアの課題

公平性の観点から、認証試験では一般的に試験車両に関する特性情報を最小限しか入手しない。一方で、市販ロボットを用いて試験する際には、車両特性に関する様々な情報を基に、図2(b)に示すような事前調整が必要となる。一例として、図5(a)に示すアクセル及びブレーキペダルの各開度と車両の要求駆動力から成る「動力特性マップ」を取得（学習）するため、ペダル開度を一定に保った走行が必要となる。仮に運転ロボットが搭載できたとしても、試験路上でペダルを全開などに保持した操作による学習運転を行うこととなる。別途、PID制御項の決定のため、ロボットの微調整にも多大な時間を要する。一般にこの調整はCHDYにおいて二週間程度が必要になるとロボットメーカーが報告しており、認証試験として運用上困難と考えられる。

#### 3. 2. RDE試験に向けた運転ロボットの構築

RDE試験に運転ロボットを適用させるため、ハードウェアの小型化及び動力特性マップやPID制御項

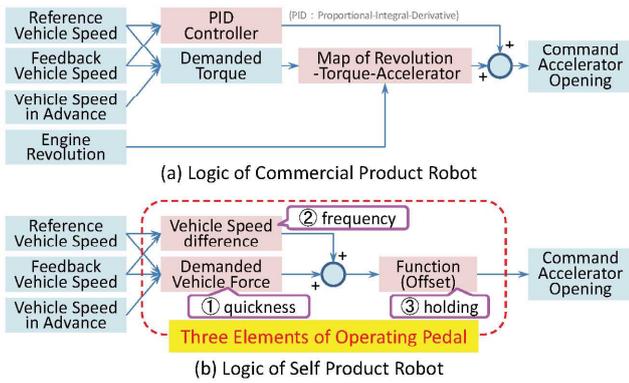


図5 ドライブモデルの制御

を用いないロボット制御といった課題に対応した新たなシステムを構築した。

①ハードウェアの構築

図4右(青枠)に製作したロボットを示す。車載可能とするため、ロボット制御盤は運転席と後部座席の間の足元空間に収めるサイズとした。また、運転席でドライバがハンドル操作を行うために、ペダル操作部は座面に置かず運転席のフロアに設置する構造とし、その固定方法も簡便化した。ロボットを操作するドライブモデルの演算装置も小型化した。装置一式の重量は約20kgと軽量化できており、試験現場への運搬と設置を一人で行うことを可能とした。さらに、装置電源を100Vとすることで、市販の小型ポータブルバッテリーを活用した電源供給が可能となり、長時間の走行試験にも対応できる。

②ソフトウェアの構築

アクセル及びブレーキペダルの操作には、過去に構築したドライブモデルを使用した。具体的には、市販ロボットに使われる「動力特性マップ」やPID制御項を廃止し、人間の運転動作を実現するため「ペダル操作の3要素」のロジックを導入した(図5(b)参照)。運転ロボットの事前調整を必要としないこのモデルの汎用性は高く、試験車両のパワートレイン特性に関係なく、運転ロボットを車載した後すぐに走行試験が開始できる(CHDY試験にて確認済)。

4. 構築した運転ロボットを用いた試験路走行

4. 1. 実験条件及び実験装置

供試車両として、ディーゼルエンジン(排気量2L)を搭載する乗用車(2017年製)を用意した。

走行試験に必要な装置の車載状況を図6に示す。GPS等から取得した実車速は、後部座面に設置した

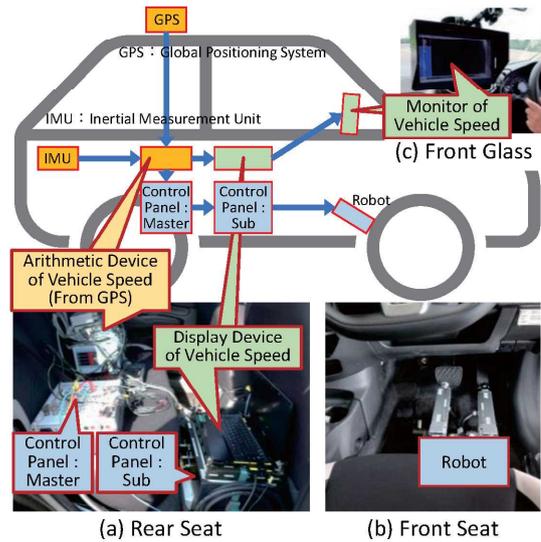


図6 実車両への運転ロボット搭載状況

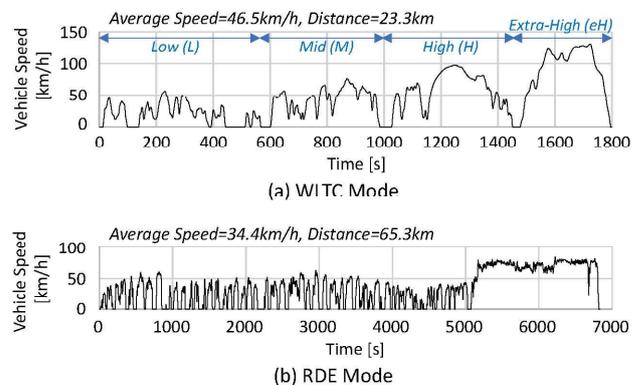


図7 試験モード

目標車速の表示装置(表示部はダッシュボードに設置)及びロボットを操作するドライブモデルの演算装置に送られる。演算したペダル開度指令が、運転席後ろのフロアに納まるロボット制御装置を介してロボットに送られ、ペダルを操作する。

4. 2. WLTCモード走行評価

図7(a)に示すWLTC(Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycle)で、加減速頻度が高いLow(L)、Middle(M)フェーズを使用した(ホットスタート)。運転者は、ロボット及び二名の人間である。

WLTCを走行した際の、エンジンスロットル開度及びテールパイプにおけるNOxの推移を図8に示す。Mフェーズの一部となる。人間が運転する際、不自然なアクセルペダルの加減速操作が発生している状況が確認でき、このアクセル操作に対応するように瞬時のNOx排出量も高まっている。

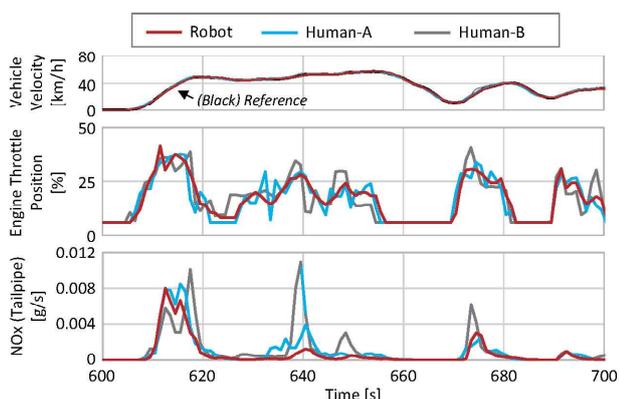


図8 運転操作違いによる車両性能比較  
<WLTC: LM\_Hot Start>

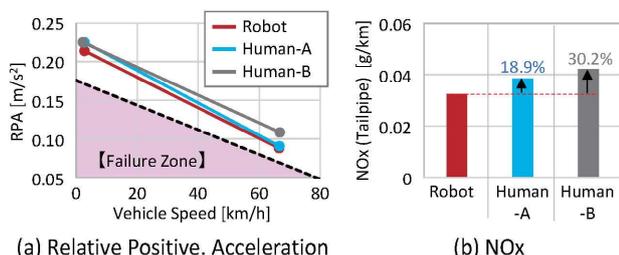


図9 テストコース走行時の走行指標 (RPA) 及び排出ガス性能 (NOx) <WLTC: LM>

ここで、欧州 RDE 試験法で要件として定められる「RPA (Relative Positive Acceleration: 相対的正加速度)」を用いて、加速が過度に緩やかとなっていないかを評価した。結果を図9(a)に示す。人間Bの加速はどの車速域においても高く積極的で、人間Aは低車速側における加速が積極的に、高車速側で運転ロボットとほぼ同様に緩やかな加速となることが確認された。ロボットによる運転は人間A、Bに比べ極端な加速が少ないものの、試験不成立となるほどの消極的な加速を行っていないことが確認できた。

さらに、図9(b)で走行全体のNOxを確認すると、ロボット運転に比べ、人間Bの排出量が約30%と増加しており、積極的なアクセル操作が不必要に行われたことと関係している。

以上のとおり、運転ロボットを適用した試験路走行試験に対し、有用性が高いことを確認した。

#### 4. 3. RDE モード走行評価

図7(b)に示すRDEモード(6,830s、コールドスタート)にて、ロボット操作による走行試験を行った。計測装置の車載状況を図10右に示す。車室内の隙間に運転ロボットが搭載できた。図10左には、運転時の車速追従性を評価する「ドライビングインデックス」の結果を示す。このドライビングインデックス(表

表2 ドライビングインデックス

ER (Energy Rating)	目標走行と実走行との仕事量比率
DR (Distance Rating)	目標走行距離と実走行距離との距離の比率
EER (Energy Economy Rating)	「DR/ER」による単位仕事あたりの走行距離の比率
ASCR (Absolute Speed Change Rating)	目標走行中の加速度と実走行中の加速度の累乗比率
IWR (Initial Work Rating)	目標にかかわる仕事量の変化率
RMSSE (Root Mean Squared Speed Error)	絶対速度差の二乗平均平方根

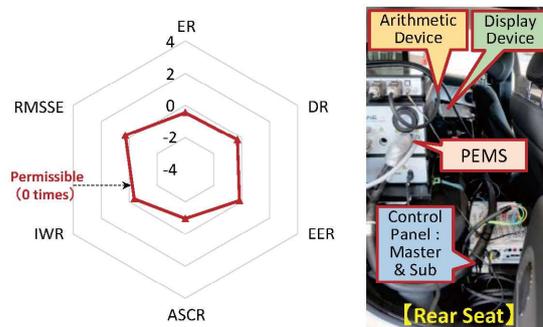


図10 RDE 試験結果 (ドライビングインデックス) <RDE Mode\_Cold Start>

2参照)は「SAE J2951」で規定されたものであり、乗用車等の国際調和排出ガス・燃費試験法(WLTP: Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure)の評価参考値として活用される。指標がすべて0であれば、目標車速と実車速に乖離がない運転ができていることを意味しており、今回、ロボットを用いた走行追従性は良好であることが確認できた。

以上より、ロボットの活用で、ドライバは運転席でハンドル操作のみに集中でき、長時間にわたるRDE試験も正確に安全に運用できることを確認した。

## 5. おわりに

路上走行(RDE)試験が、欧州に続き日本において2022年より開始される。試験路における走行試験も可能とされ、従来のシャシダイナモ試験と同様、RDE用に作成された日標車速パターンを追従することとなる。車両のアクセル及びブレーキ等のペダル操作に加え、車両が移動するためにハンドル操作も必要となり、試験の正確性や試験時の安全性が懸念される。そこで本研究は、自動運転ロボットを活用したRDE試験の運用を検討した。

実際に車載可能な運転ロボットを製作した。試験路にて試験車両を運転ロボットで操作し、目標車速を正確に追従できることを可能とした。

RDE試験への運転ロボットの適用性と有用性が高いことから、現在、RDE試験へ運転ロボットを導入することに対し、関係当局と協議を進めている。

# 講演3. 自動車の後退時警報についての新たな国連規則

環境研究部

※宝渦 寛之

## 1. はじめに

後退時警報とは、車両後退時に発する警報音であり、図1に示すように大型車等に装着されている。この後退時警報については、2022年6月に開催された国連の自動車基準調和フォーラム(WP29)において、新たな国連規則案が承認され、今後、「国連の車両・装置等の型式認定相互承認協定」(1958年協定)の加盟国のうち1/5の反対がない限り、新たな国連規則として2023年1月に発行される。後退時警報は、同装置が我が国の市場に投入されて以来、50年以上が経過しており、装置の装着義務がないことから、自動車ユーザー等の目的に合わせて様々な使い方がなされており、海外においても同様の状況である。そのため、国連規則の制定にあたっては、様々な困難が生じ多くの議論を要した。本稿では、新たな国連規則の概要と議論の経緯及び交通安全環境研究所の果たした役割について説明する。



図1 後退時警報装置とその取付け例

## 2. 議論開始時の状況

### 2. 1. 国際的な状況

WP29傘下の騒音・タイヤ専門家会議(GRBP)では、後退時警報装置に関する新たな国連規則を制定するためのタスクフォースが設置され、新規則案の制定のための議論を重ねてきた。タスクフォース設置の発端は、2016年3月に開催された第168回WP29にてトルコが国内での後退時の事故増加を理由に国連規則の必要性を訴え、その後、2016年9月に開催された第64回GRB(GRBPの前身)にて、ドイツが国内で後退時警報音に対する騒音苦情が多いため国連規則の必要性を訴えたことにある。2017年2月の第65

回GRBでは、日独より新規則のより具体的なイメージについて提案を行い、2017年9月に開催された第66回GRBでは、日本、ドイツ、トルコにて協議を行い、後退時警報音に関する新たな会議体の設立を要請し、同会議にて新たなタスクフォースを設置することが認められた。新たな会議体は”Task Force Reversing Alarm”とされ、筆者が議長を、トルコが副議長を務めることとなった。なお、会議体の名称については、活動開始後に”Alarm(警告)”のニュアンスが強いとの指摘があったことから、”Warning(警報)”を用いた”Task Force on Reversing Warning Sound issues”に変更された。

### 2. 2. 国内の状況

後退時警報装置は、1963年に日本の山口電機工業株式会社が世界に先駆けて発売したものである。我が国において後退時警報装置は、装着義務はないものの広く普及しており、装置から発せられる警報音は、その音の特徴とともに、それが車両の後退を意味するものとして広く一般に認識されていると言える。一方で、このような警報音は、苦情の原因となることもある。国内のバス事業者及びトラック運送業者に対しアンケート調査を行った結果では、回答した事業者のうち約半数が、後退時警報について苦情を受けた経験があるとのことである。また平成27年には、徳島県にて、苦情のために後退時警報を停止させて後退していた車両が、歩行中の視覚障害者と盲導犬をひいてしまうという痛ましい事故が発生した。このような状況から、我が国においても安全と環境の両面に配慮した後退時警報装置の規則が必要な状況であった。

## 3. 新たな国連規則の概要と議論の経緯

### 3. 1. 新規則の構成

後退時警報についての新規則は、装置単体での要件と装置を車両に装着した状態の要件から構成される。これは、警音器(ホーン)に関する国連規則と同様の構成となっており、国際自動車工業連合会(OICA)からの要望により、粗悪な装置を市場から排除する目的で装置単体にも要件が課されることとなった。

### 3. 2. 対象車両

新規則の対象となる車両は、国連規則における車両構造 (R.E.3) に定義されるカテゴリにおいて、車両総重量 3.5t を超える M2、M3、N2、N3 カテゴリとなった。対象カテゴリについては、トルコより M2 カテゴリ全てを対象とするよう要望があったが、日本より車両総重量 3.5t を境に車両タイプが異なり、車両総重量 3.5t 以下の車両は、ドライバーが車両後方を目視で確認できるため後退時警報は必須ではないことを主張し、これが了承された。

### 3. 3. 警報音のタイプ

警報音のタイプは、計 3 種が定義されている。国内において街中で多く遭遇するものは“Tonal sound”と呼ばれ、基本的に単一周波数のピークを持つ警報音である。これとは別に、ホワイトノイズに類似した“Broad band sound”とホワイトノイズに特定の 1/3 オクターブバンドのバンドパスフィルタを掛けたような音である“One-third octave band sound”が定義されている。これらの警報音は、装置メーカーから提案されたものであり、前者については市場での使用実績があり、後者は今後、普及が進められるものである。これらは、“Tonal sound”のようなピーク周波数帯が狭い警報音と比較してピーク周波数帯が広いため、既存の研究<sup>2)</sup>によれば警報音の到来方向を正確に認識できるとのことである。そのため安全面で有利であり、なおかつ同じ音量であれば減衰しやすいため苦情になりづらいともされている。

国内においては、これらの 3 種の警報音とは別に、音声にて車両の後退を案内するものがあり広く普及している。タスクフォースにおいては、日本より音声タイプも警報音として規定するよう提案を行ったが、言語を理解できないと警報音として意味をなさないとの理由で、多言語国家である欧州各国の反発に遭い提案を取り下げた。音声式の警報音の国内における取り扱いについては、国連規則の国内導入時に議論される予定である。

### 3. 4. 警報音の音量についての考え方

後退時警報は、様々な環境で使用されるため、使用環境に応じて適切な音量を発することが、安全面と環境面で重要である。そのため、新規則では、周囲の環境に応じて“Low level”、“Normal level”、“High level”を切り替えることが可能となっている。この切り替えは、ドライバーが手動で行う“Non-self-adjusting

audible reverse warning device” (非自動調整式) のほか、装置が暗騒音レベルに応じて自動で切り替えを行う“Stepwise self-adjusting audible reverse warning device” (段階的的自己調整式) も規定されている。さらに、暗騒音レベルに応じて無段階に音量を調節する“Self-adjusting audible reverse warning device” (自動調整式) ももの規定されている。この自動調整式は段階的自動調整式と比較して、発する音量を必要最小限に抑えることが出来る利点がある。ただし、現状では、暗騒音レベルを測定するマイクロホンは警報装置に内蔵されているため、車両のエンジン音等の影響を受け、正確に車両周囲の暗騒音レベルを測定することは困難である。そのため、完全にコンセプト通りに作動する装置とするためには、今後の技術開発が引き続き必要な状況である。

### 3. 5. 試験法

自動車の後退時警報の試験法については、装置単体の規格である日本自動車技術会規格 JASO D 901-96 が存在するものの、他には存在しない。そのため、タスクフォースにおいては、試験法の策定から議論を開始した。装置単体の試験法については、日本からは既述の JASO 規格と同様に、装置から距離 1m 位置での測定を提案した。一方、OICA からは、車両系建設機械向けの後退時警報の技術基準である ISO9533 や SAE J994 を参考に、装置から距離 1.2m 位置で測定することが提案された。装置単体の規制値は、車両装着時の規制値から音の距離減衰式に基づき換算することに合意していたため、距離減衰による規制値換算の理解が容易である 1m 位置にて測定を行うことで合意した。

後退時警報装置を車両に装着した際の試験法については、車両系建設機械向けの後退時警報の技術基準である ISO9533 では、車両後端から放射状に測定点が設けられていることから、自動車向けの後退時警報の国連規則においても様々な測定位置で検討を行った。後退時警報音の車両装着時の試験法として様々な測定点を検討する理由は、“Tonal sound”は基本的に単一周波数の警報音であるため、地面反射等により音量の大きな場所及び小さな場所が幾何学的に決定され、測定点によっては警報音の音量を過小評価または過大評価する可能性があるためである。警報音の種類の違いによる音場の違いの例として、図 2 に建設系車両向けの後退時警報装置から“Tonal sound”と“Broad

band sound”を発生した際の車両後方の音場を測定した結果を示す<sup>3)</sup>。”Tonal sound”については、発生する警報音の周波数（波長）に応じて、音量が大きい場所や小さい場所が存在する。一方、”Broad band sound”は後退時警報装置からの距離に応じて音は減衰している。

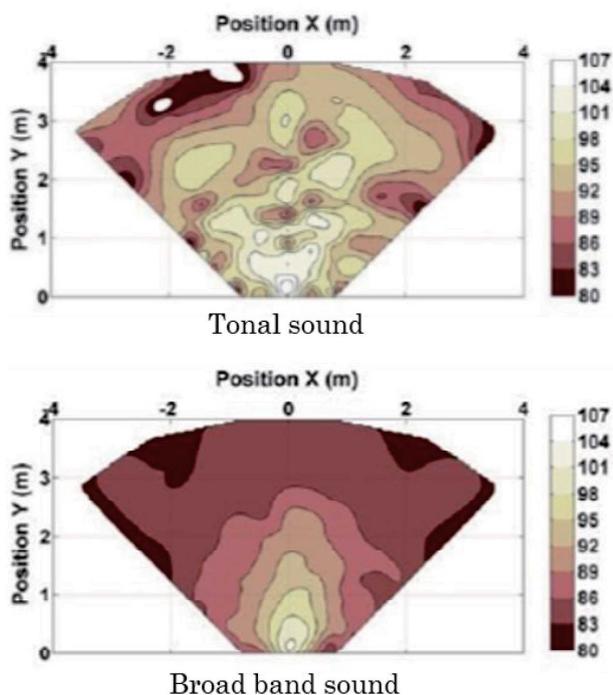


図2 “Tonal sound”及び”Broad band sound”発生時の車両後方の音場<sup>3)</sup>

検討対象とする測定点は、歩行者がすでに車両後方に存在している場合とこれから車両後方に移動する場合を想定し、図3のように測定点を設定した。各測定点において、高さ0.5～1.5mの間での最大の騒音レベルを評価することとした。検討にあたっては、当所にて測定したデータを提供したほか、欧州の自動車メーカー及び装置メーカーからデータの提供があった。試験法についての日本方針は、複雑なものではなく、車両後方7m位置の評価のみの単純な試験法でよいのものであった。この理由としては、車両後方の音場にばらつきがあっても、車両の後退により音場は時々刻々と変化するため、測定のはらつきは実環境での安全性に大きな影響は与えないとの認識によるものである。この日本方針をタスクフォースにて合意するため、当所で測定したデータを基に提案を行った。当所の結果では、車両中心から45°傾いた線上では、警報音の種類による騒音レベルのばらつきは大きく、反対に車両後方の線上の方が騒音レベルのばらつき

は小さいことから、車両後方の線上の方が評価点としてより適切であることを示した。またあわせて、車両近傍では車体形状の影響によるばらつきが大きいため評価点としては不適当であることを示し、タスクフォースの理解を得た。その結果、後退警報装置を車両に装着した際の試験法は、車両後端から7m位置にて、高さ0.5～1.5mの間での最大値を評価することとなり、日本提案の通りの試験法となった。

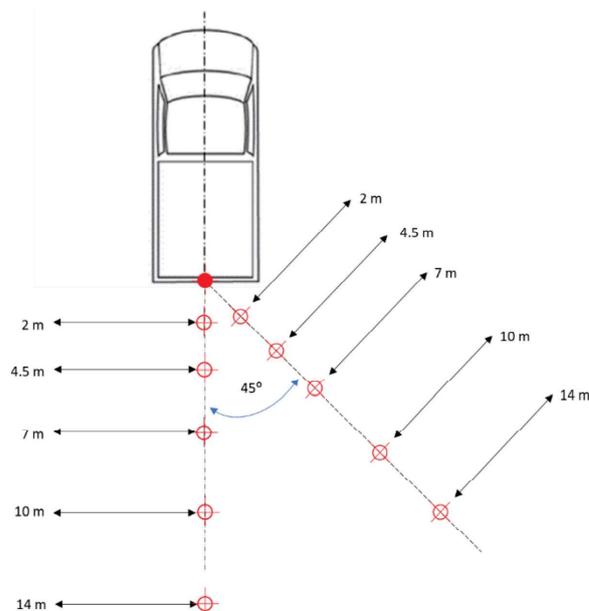


図3 車両装着時の試験法策定時に検討を行った測定点のレイアウト

### 3. 6. 規制値

規制値については、はじめに車両装着時について議論を行った。議論を行うにあたり、当所にて暗騒音と警報音の音量の違いによって、受容性及び認知性に与える影響の研究を実施し、タスクフォースへ報告を行った<sup>4)</sup>。この研究結果をもとに長期に渡って議論が行われた結果、以下の規制値にて合意した。

- Low level       : ≤40dB、≤55dB
- Normal level   : ≤60dB、≤75dB
- High level      : ≤80dB、≤95dB

このタスクフォース合意案の規制値に対し、会議終盤の段階において、Low level の下限値が小さすぎるため、屋外で測定することは困難であるとの懸念が欧州勢より示された。これに対し日本より、現状のLow level の実力値や製品ばらつき、さらに規制値を上げすぎるとLow level の存在意義がなくなること等を説明し、規制値は以下の通り変更となった。

- Low level       : ≤45dB、<60dB

Normal level :  $\leq 60\text{dB}$ 、 $\leq 75\text{dB}$

High level :  $\leq 80\text{dB}$ 、 $\leq 95\text{dB}$

これらの規制値について、さらにドイツより、Low level の上限値と Normal level の下限値が隣接しており、例えば Low level=59dB、Normal level=60dB のような意味のない設定となる恐れがあるとの懸念が示された。そこで筆者より、Low level と Normal level の測定値はそれぞれの規制値内でありなおかつ 5dB 以上の差があることとする要件を提案し、タスクフォースとして合意した。

### 3. 7. 装置単体の規制値と車両装着時の規制値を同時に満足できない場合の救済措置

既述の通り、装置単体の規制値は、車両後端から 7m 位置の騒音レベルを、距離減衰式に基づき、装置単体の測定距離 1m での騒音レベルに換算したものである。そのため、後退時警報装置を車両後端付近に装着することが出来ない場合、装置単体の規制値と車両装着時の規制値の双方を満足できなくなる場合がある。ドイツと OICA より、塵芥車等は車両後端付近に装着出来ない場合があるとして、双方の規制値を満たすことが出来ない場合の救済措置を設置することが提案された。この提案に対し、日本からは二点の条件を課すことを提案した。一点目は、規制値を満たすために過剰な音量を発することを防ぐため、装置の装着位置をリアオーバーハングエリアかつ車両長の後方 1/4 のエリアに制限することであり、二点目は、粗悪な装置を市場から排除することを目的に、耐久性試験を課すことである。これらの提案は、ともにタスクフォースにて合意した。

### 3. 8. 一時停止機能

現在、国内の後退時警報装置には、苦情対策として、警報音の一時停止機能を有したものがある。そのため、新たな国連規則においても一時停止機能を認めるよう日本より提案を行った。ただし提案にあたっては、既述の徳島県の事故はバックカメラ等の他の安全装置が装着されていない車両が、苦情対策として後退時警報音を停止した状態で後退したことが原因であることから、他の安全装置が作動しているときのみ一時停止機能を使用可能とする条件付きの提案とした。この提案に対し、当初は欧州各国より反対があった。反対の理由は、本件と同様に GRBP 傘下の会議体にて議論を行った、音により歩行者等へ車両の接近を通報するための車両接近通報装置について規定した国

連規則第 138 号の制定における議論の経緯にあった。車両接近通報装置の議論では、一時停止機能を認めることになっていたものを、後に日本が一時停止機能を認めないことを提案しシリーズ改正となった。一方、本件では一時停止機能を認めるよう提案したため、以前とは逆の対応を行っていると思えられた。これに対し、車両接近通報装置の音量は小さいが、後退時警報音はかなり大きいため状況が異なることを丁寧に説明し、一時停止機能について合意した。一時停止機能を認める要件としては、本タスクフォースと同時期に後退時車両直後確認装置に関する議論を行っていた VRU-Proxi IWG と情報交換を行い、国連規則第 158 号の認可のある後退時車両直後確認装置（バックカメラ、検知システム又はミラー）のみ認めることとした。

## 4. おわりに

自動車の後退時警報についての国連規則制定に向けて、GRBP 傘下に設置されたタスクフォースにおいて議論を行った。新規則案は、2023 年 1 月に国連規則第 165 号として発行される見込みである。本稿では、このタスクフォースにおける議論の経緯と当所の果たした役割について説明を行った。タスクフォースの議論においては、当所が主体的に議論に必要なデータを取得し日本提案とともにタスクフォースに報告し、多少の妥協はあるもののほぼすべての日本提案を新規則に盛り込んだ。

## 参考文献

- 1) Japan, "Pre-study for the discussion on reversing alarm systems: Japanese current situation," GRB-65-06, (2017)
- 2) R. Mlynski, et. Al, "Localization of Vehicle Back-Up Alarms by Users of Level-Dependent Hearing Protectors under Industrial Noise Conditions Generated at a Forge," Int. J. Environ. Res. Public Health 16(3), 394, (2019)
- 3) V. Vaillancourt, et. Al, "Safety of Workers Behind Heavy Vehicles: Assessment of Three Types of Reverse Alarm," IRSST R-833, (2014)
- 4) 宝渦、他、"後退時警報装置の国連規則制定に向けた国内外の動向," フォーラム 2019 講演概要集, (2019)

# 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きた。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きた。

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、行政ニーズやこれまでの研究成果等を踏まえ、当研究部では、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の安全性評価等を受託研究として実施してきており、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、無線式列車制御システム等新たな技術を用いた列車制御システムに対応し、国内外で活用できる安全性評価手法の構築を図るため、リスク解析等における関連国際規格との整合性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、評価に当たっての課題を抽出すべく検討を進めている。

このほか、鉄道における電磁放射に関する安全性の確保のため、車両から発生する大きさや周波数が変動する磁界については、測定・評価手法及び低減方策について継続的に調査を行っている。

### 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検討を進めている。このほか、走行安全性に関わる軌間拡大に関するリスクを的確に評価するため、実路線における軌道検測車による高低変位や軌間変位の検測データと営業列車の動揺データとの関係分析等により評価手順を整理するなど、効率的な評価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、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から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、CO<sub>2</sub>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。こうした、新たな低速モビリティを導入することで見込める移動需要について地域特性との関係を検討するとともに、公共交通の導入効果評価手法について、地域特性を反映した適切な評価を行うための評価指標を検討することとしている。

## 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、無線式列車制御システム、自動運転用技術、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 4. LiDAR センサを利用した衛星測位の補完手法に関する検討

交通システム研究部 ※山口 大助 長谷川 智紀 一柳 洋輔  
望月 駿登 八木 誠 (客員研究員)

## 1. はじめに

鉄道ではこれまで地上主体の設備である軌道回路等を用いて列車の位置検知を正確に行う列車制御システムによって安全を確保してきたが、そ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車上主体型の列車位置検知システムが期待されている。その一つに米国の GPS (Global Positioning System) や日本の準天頂衛星等に代表される衛星測位システム (GNSS: Global Navigation Satellite Systems) があり、交通安全環境研究所では鉄道分野における衛星測位の精度評価に取り組んできた<sup>1)</sup>。

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。このような地点では衛星測位を補完する他の位置検知手法が必要である。速度発電機による補完などが考えられる中で、筆者らは LiDAR (Light Detection And Ranging) センサに着目し、軌道側にマーキングして固有地点をコード化の上、LiDAR センサでコードを読み取る手法を考案した。実車による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。

## 2. LiDAR センサを利用した衛星測位の補完手法

LiDAR センサとは、レーザ光をパルス状に照射し、物体からの反射光を受光することで物体までの距離や方向を測定するセンサである。交通安全環境研究所では、自動車の分野で採用が進んでいるセンサ技術のうち、検出距離や検出精度、耐環境性能で有利な LiDAR センサが今後、鉄道分野へ活用され得ると考えている<sup>2)</sup>。そこで、筆者らは他の目的で使われるであろう LiDAR センサの共用を想定して、LiDAR センサを利用した衛星測位の補完手法を考案した。本手法

(以下、提案手法) の概要を図 1 に示す。

LiDAR センサを車上側、ターゲットマーカを軌道側に設置する。軌道側はターゲットマーカを複数個使用し、固有地点に応じてターゲットマーカの並べ方を変えることで固有地点をコード化する。これによって固有地点ごとに ID を付加でき、絶対位置の情報である緯度・経度や起点からのキロ程を ID に持たせることができる。LiDAR センサは物体からの反射光の強さ (輝度) を検知できるので、提案手法ではこの機能を利用して、ターゲットマーカに向けてレーザ光を照射し、ターゲットマーカからの反射光の輝度を測定してコードを読み取る。あらかじめ固有地点とコードを紐付けたデータベースを車上側に装備し、LiDAR センサが読み取ったコードをデータベースに照合することで、固有地点の特定が可能となる。

LiDAR センサが照射したレーザ光は周辺の様々な物体からも反射してくるため、周辺物体とターゲットマーカが同程度の反射では LiDAR センサでターゲットマーカを認識することが難しい場合もある。そこで、LiDAR センサから照射したレーザ光が確実に反

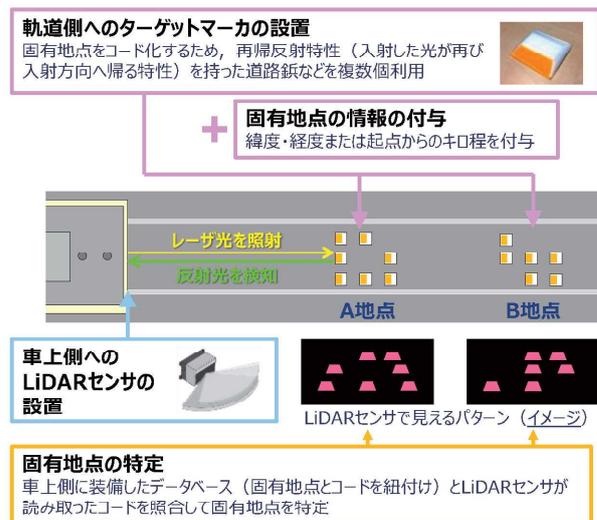


図 1 LiDAR センサを利用した衛星測位の補完手法

射するよう、ターゲットマーカには再帰反射性能を持った物体（道路錐など、以下、再帰反射体）を使用する。再帰反射体からの反射光は強く、輝度が大きくなる。この輝度の検出に閾値を設けることで、ターゲットマーカによるコードの認識率を向上させる。

筆者らは提案手法の利用として以下の二つを想定している。

- 列車の走行位置は、基本は衛星測位によって把握し、衛星測位の測位精度が低下する区間やトンネルなど電波受信が困難で測位が不可となる区間ではターゲットマーカを設置して、提案手法によって衛星測位を補完
- 衛星測位から得られる列車の速度<sup>3)</sup>を利用して列車の走行距離を推算し、LiDAR センサがターゲットマーカを検知したときの列車とターゲットマーカの間を測距するとともに、提案手法によって固有地点を特定して、推算した走行距離を補正

### 3. 実車による実験

提案手法の実現可能性を検討するため、広島電鉄株式会社のご協力を得て実車による実験を行った。

#### 3. 1. 実験に使用したLiDAR センサ

交通安全環境研究所が所有するLiDAR センサ<sup>2)</sup>がターゲットマーカを検知できるかを研究所内で予備的に実験したところ、レイヤ数が少ないために検知できないことが分かった。そこで、レイヤ数を多く有する、またはそれに相当するLiDAR センサを調べた結果、今回の実験では表1に示す諸元のLiDAR センサを使用した。このLiDAR センサは非反復走査と呼ばれる独特なスキャンが特徴の機種<sup>4)</sup>で、露光時間(Integration Time)が0.1秒の場合はレイヤ数64本のLiDAR センサと同等の性能を有し、1秒の場合はFOV(Field Of View: 視野角)内のほぼ100%を検知エリアとする性能を有する。反射光の輝度は0~255の数値で記録され、そのうち再帰反射体からの反射光の輝度は151~255の数値で記録される。本稿ではこの

表1 実験で使用したLiDAR センサの主な諸元

レーザー波長	905nm
安全等級	クラス1(IEC60825-1:2014)
範囲(@100キロルクス)	90m @反射率10%
	130m @反射率20%
	260m @反射率80%
FOV	81.7°(水平) × 25.1°(垂直)
データサイズ	240000点/秒 (480000点/秒:デュアルリターン)
FOVカバー率	60% @0.1秒, 98% @0.5秒

数値に基づいて実験結果を整理した。

#### 3. 2. LiDAR センサの車両への取り付け

実験では図2に示すように、運転席から前方に向かって左側に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。

#### 3. 3. センサ取付向きと検知エリアの関係

LiDAR センサの取付向き(軌道面に対する取付角度)によってレーザー光の照射状況が変化し、ターゲットマーカを検知できるエリアが変化する。そこで、取付向きは12.5度と20度の2条件を設けた。前者はターゲットマーカだけでなく先行する電車も検知することを狙って設定し、後者は車両に極力近い側で検知できるかを確認するために設定した。図3にLiDAR センサの取付向きと検知可能エリアの関係を示す。このエリアの線路方向の広さは図中の距離LとDによって示される。LiDAR センサ取付高さはH=1.87m、今回使用したLiDAR センサのFOVは垂直方向が25.1度である。取付向きが12.55度となると、FOVの上端が水平線と平行になるため、幾何学計算により検知可能エリアは電車先端L=4.00mより奥で、遠方はLiDAR センサの諸元の260mとなる。取付向き20度の場合はLiDAR センサの垂直方向FOVの半分である12.55度よりも大きいため、幾何学計算によりL=2.93m、D=11.37mとなり、検知エリアの広さは電車先端より2.93m~14.30mの部分となる。

#### 3. 4. 車庫内での実験とその結果

初めに、千田車庫において実験を行った。ターゲットマーカの配置(パターンI)を図4に示す。広島電

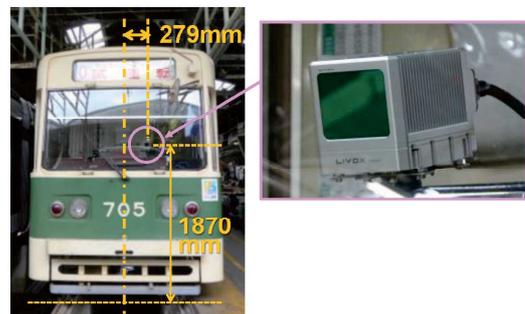


図2 LiDAR センサの仮設の様子



図3 LiDAR センサの検知可能エリア

鉄は標準軌(1435mm)を採用しており、この配置は実用を想定して250mm間隔の格子状にターゲットマーカである再帰反射体(道路鋸)を複数並べ、所々再帰反射体を置かないことで固有地点のコードをイメージしている。停車時はターゲットマーカの最前列(車両から見て一番手前の列)を車両先端から5m、10m、15m先に置いた。停車時の検知結果を図5に示す。LiDAR センサ取付向きが20度の場合には15m先は検知エリアを超えるため示していない。グラフの横軸はまくらぎ方向の位置で、ゼロはLiDAR センサの中心に相当する。グラフの縦軸は線路方向の位置で、ゼロはLiDAR センサの先端に相当する。図中の青い点は再帰反射体からの反射光を検知した点を示している(以下同様)。露光時間は0.1秒としている(以下同様)。本結果より、ターゲットマーカを5m先に置いたときは概ね検知し、コードを読み取れることが分かる。一方、車両から離れるにつれて反射光の検知点数が減り、ターゲットマーカの配置通りには検知できず、コードを読み取れないことが分かる。本結果より、実験で使用したLiDAR センサは車両から近い検知エリアの方がコードを読み取りやすいといえる。

低速走行時(8km/h程度)の検知結果を図6に示す。同図(a)はLiDAR センサ取付向き12.5度の場合、(b)は20度の場合である。本結果より取付向きが12.5度の場合にはターゲットマーカを概ね検知し、コードを読み取れることが分かる。一方、取付向きが20度の場合には、本来はターゲットマーカを置いていないところで検知している結果(図中の実線枠)や、逆にターゲットマーカを置いていないところで検知していない結果(図中の点線枠)となっている。このことから、実験で使用したLiDAR センサは取付向き12.5度の方がコードを読み取りやすいといえる。

### 3. 5. 営業線での実験とその結果

次に、営業線である宇品線海岸通電停～元宇品口電停間において実験を行った。車庫内での実験の結果を踏まえてLiDAR センサの取付向きは12.5度とした。仮設の様子は図2と同様である。ターゲットマーカの配置は図4で示したパターンIのほかにも、図7に示すパターンIIを設定した。

パターンIの検知結果を図8に示す。電車通過速度は25km/hである。本結果より、営業運転速度での走行時はターゲットマーカの配置通りには検知できていないことが分かる。これは特に線路方向が顕著であ

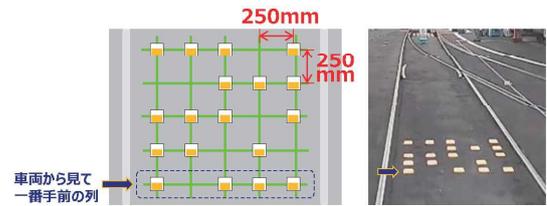


図4 ターゲットマーカの配置(パターンI)

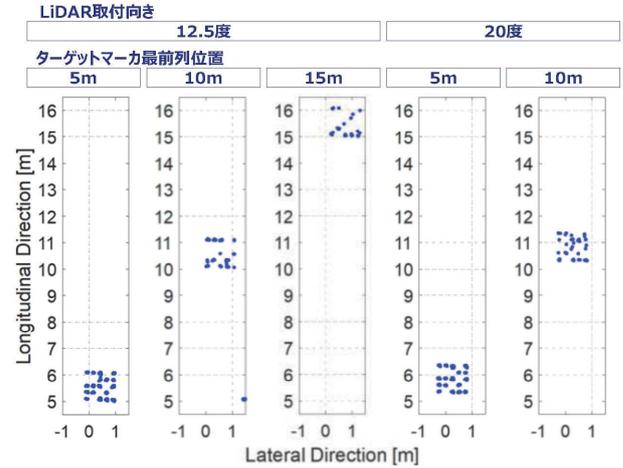
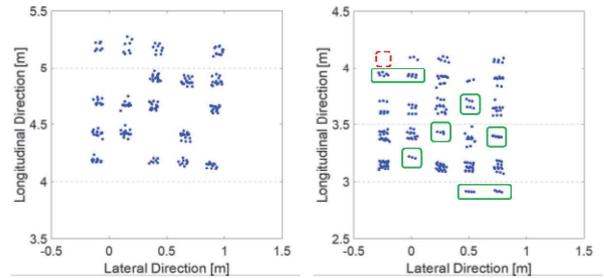


図5 ターゲットマーカの位置によるLiDAR センサの検知結果の違い



(a) 12.5度 (b) 20度

図6 LiDAR センサによる検知結果(パターンI、車庫内)

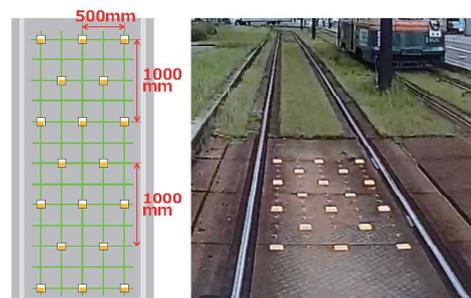


図7 ターゲットマーカの配置(パターンII)

る。一方、まくらぎ方向のターゲットマーカについては重複せずに検知できていることが分かる。

パターンIIの検知結果を図9に示す。電車通過速度は34km/hである。同図(a)は検知結果であるが、パターンIと同様に、ターゲットマーカの配置通りには検知できておらず、特に線路方向が顕著であることが

分かる。本結果を詳しく見たところ、同図(b)に示すように、線路方向に対して点群が概ね実線で囲んだグループと点線で囲んだグループの二つに分けられる。これは走行していることによって二重に検知されたためと考えられる。一方、まくらぎ方向については重複せずに検知できていることが分かる。

### 3. 6. 実験結果を踏まえた提案手法の利用

実験で使用した LiDAR センサを取付向き 12.5 度で図 2 のように設置し、標準軌の路面電車の走行速度 (40km/h 以下) で使用する場合は、図 10 に示すターゲットマーカの配置が適当と考えられる。この図において、線路方向にはターゲットマーカを複数個連続に置いて一つの塊として確実に検知できるようにし、まくらぎ方向のターゲットマーカの有無でコード化する。中央列にはターゲットマーカを必ず置き、「ここにコードがある」ことを明示する。この配置では最大 16 通り ( $=2 \times 2 \times 1 \times 2 \times 2$ ) のコードを生成できる。

### 4. 今後の展開

実験結果を踏まえると、提案手法の実現には使用する LiDAR センサの機構や仕様によるところが大きいといえる。実験で使用した LiDAR センサは内部をプリズムが回転する機構であったため、特に線路方向のコードの読み取りが困難であったと考えられる。現在、可動部分を持たない新しいタイプの LiDAR センサの開発が進んでおり<sup>5)</sup>、このタイプを使用すれば図 4 や図 7 に示すコードを読み取れる可能性が高い。

### 5. おわりに

衛星測位を補完する手法として、軌道側にマーキングして固有地点をコード化の上、LiDAR センサでコードを読み取る手法を考案し、実車による実験を通じて提案手法の実現可能性を検討した。その結果、使用する LiDAR センサの機構や仕様に応じて適切に調整することで、提案手法を実現できる可能性が高い。

今後は新しいタイプの LiDAR センサによる検知傾向の把握、一般の高速鉄道での提案手法の実現可能性の検討、保安の用途を含む衛星測位の補完の具体的な手法及び測位精度の総合的な評価手法について検討を進める予定である。

### 謝 辞

本稿は広島電鉄株式会社との共同研究の成果の一

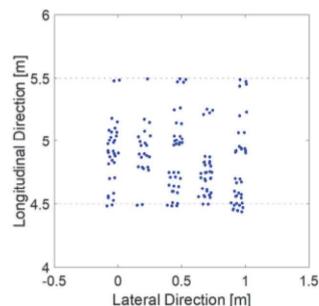
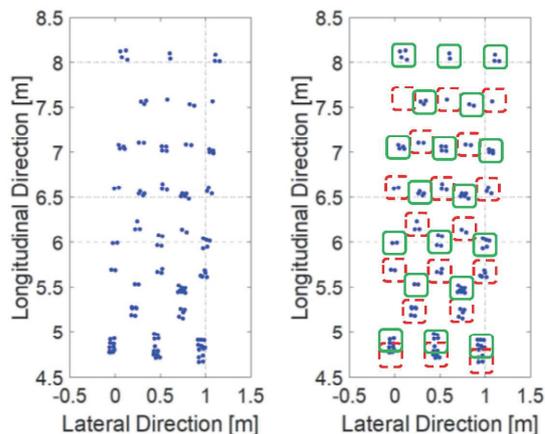


図 8 LiDAR センサによる検知結果 (パターン I、営業線)



(a) 検知結果 (b) グループ分け  
図 9 LiDAR センサによる検知結果 (パターン II)

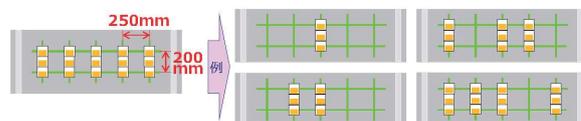


図 10 実用で想定されるコードの例

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) 例えば、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) 竹内俊裕、“汎用センサ技術を活用した鉄道における事故防止の取組み”、日本鉄道電気技術協会『鉄道と電気技術』2019年7月号、pp.3-13
- 3) 柳井香史朗、“GNSS と汎用携帯通信網を用いた踏切制御システムの開発”、日本鉄道電気技術協会『鉄道と電気技術』2021年10月号、pp.30-36
- 4) メーカーサイト <https://www.livoxtech.com/jp> または <https://www.symphotony.com/lidar/livox/>
- 5) NEDO 2022年2月21日付プレスリリース [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101518.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101518.html)

# 講演 5. 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

交通システム研究部 ※小林 貴 大野 寛之 工藤 希

## 1. はじめに

誰もが自由に移動できる社会の実現のために、電車やバスなどの公共交通にアクセスしにくく、自動車での移動に依存せざるをえない中山間地や過疎地等における交通手段の確保が課題となっている。このような移動困難地域の多くは、人口が少なく移動需要が小さいため、バス等の公共交通は採算面や維持管理の観点から導入が難しく、人口密度の高いエリアでの供給が基本となっている。人口の少ない中山間地や過疎地等のエリアに移動手段を供給するためには、小規模な需要でも維持可能な小型で安価なモビリティを地域で共有する仕組みが不可欠となる。

自動車の電動化や小型化・シェアリングといった利用形態が変化する中、小型で低速なモビリティ、一人乗りのモビリティ等様々なモビリティが開発されており、移動困難地域の移動手段としての活用が期待されている。カーボンニュートラルや MaaS (Mobility as a Service) の観点から、電動化・小型化・シェアリングと言った方向性で、今後もこれら新たなモビリティの開発が進むことが期待される。

移動困難地域に、これら新しいモビリティによる交通手段を供給するためには、移動需要が少ないため、どこから (出発地)、どこまで (目的地)、どのくらいの人 (人口)、どのくらいの距離、移動に困っているかといった移動ニーズをより詳細に把握し、ニーズに応じた移動手段をピンポイントに提供することを検討する必要がある。

移動需要を把握することを目的とした既存の調査にパーソントリップ調査や道路交通センサスがある。これらにより調査されている交通量のデータは、移動できた交通をデータ化したものである。移動が困難な地域の移動手段を検討する際には、移動したいができない潜在的な移動需要の把握手法が必要となり、既存の調査では不足する。

このような背景のなか、当研究所では、移動困難地域の対策として、低速なモビリティ等新たなモビリテ

ィを活用した公共交通のあり方について検討している。その一環として、移動したいができない潜在的な移動需要の推計手法の開発に取り組んでいる。本稿では、小規模な範囲において低速モビリティを導入した場合の需要を推計する現在構築中のツールの概要を紹介する。

## 2. 低速モビリティ導入時の需要推計ツールの概要

図 1 に低速モビリティ導入時の需要推計ツールの概要を示す。需要推計ツールは①～③の 3 つの小ツールから構成される。「①目的地への徒歩アクセス性の評価ツール」、「②交通手段へのアクセス性の評価ツール」により移動困難な地域の居住者を人口ベースで推計し、「③低速モビリティ導入時の利用者数推計ツール」により、②で出力される移動困難な地域に低速モビリティを導入した場合に発生する移動需要を利用者数やトリップ単位で推計する。

「①目的地への徒歩アクセス性の評価ツール」では、人口の分布、及び日常移動が必要なスーパーや病院等の複数の目的地の位置情報を入力し、目的地に徒歩でアクセスしにくい地域の移動困難な OD (O:Origin, D:Destination) ペアを出力する。移動が困難な OD ペアは、病院に行きにくい地域や買物に行きにくい地域等、移動が困難な目的地が同一の地域 (O) から、最寄りの複数の目的地を含んだ目的地群 (D) のペアデータを出力する。

「②交通手段へのアクセス性の評価ツール」では、上記のツールから出力される目的地に徒歩でアクセスしにくい OD ペアのデータ、及び年齢別人口分布、鉄道の駅、バス停の位置情報を入力し、直接アクセスしにくい地域のうち、電車やバス等の既存の公共交通にアクセスしにくいまたは自動車を運転するのが難しい年齢の居住者数を出力する。これが潜在的な OD 需要となりトリップ数の母数となる。

「③低速モビリティ導入時の利用者数推計ツール」では、上記のツールから出力される潜在的な OD 需

要、及び導入を検討するサービス水準を入力し、潜在的なOD需要から、低速モビリティを導入した場合に発生するトリップ数を推計する。そのために、導入する交通手段のサービス水準（運行頻度や運賃、ルート等）によって異なる利用者数を推計する手法を構築する。次章以降各ツールの詳細について説明する。

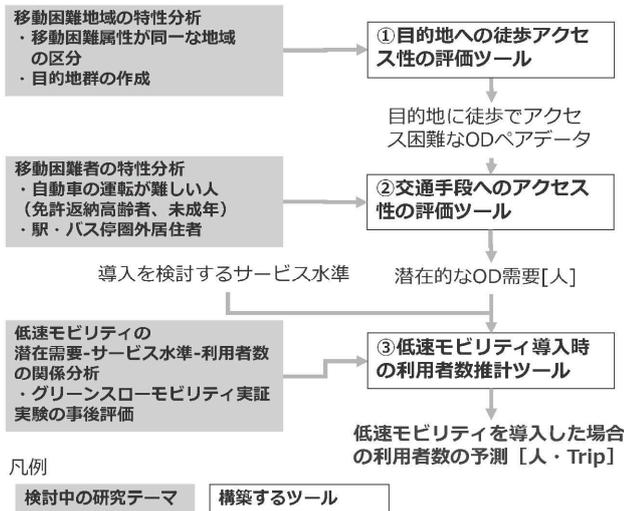


図1 低速モビリティの需要推計ツールの概要

### 3. 目的地への徒歩アクセス性の評価ツール

図2に目的地への徒歩アクセス性の評価ツールのフローを示す。このツールでは、目的地に徒歩でアクセスする場合のアクセス性について施設の位置情報及び人口分布のデータから移動困難地域の出発地(O) - 目的地(D)のペアデータを出力する。

出発地の移動需要を把握する際に、アクセスしにくい目的地(病院や買物等)が同一な地域に区分することが必要となる。これは、地域によって買物に行きにくい地域や病院に行きにくい地域等、移動が困難な目的地が異なる。そのため、移動困難な目的地の属性が同一な地域ごとに区分することで、地域の移動ニーズに応じた小規模な移動手段の検討に必要な情報を提供するためである。

目的地については、病院に行った帰りに買物に行く等、一回の移動で複数の移動目的を達成する需要が考えられるため、日常移動が必要な目的地を含んだ最小の目的地群を考慮する。

入力データである、目的地の位置情報は、移動の目的に該当する施設をウェブ上<sup>1)</sup>から全国で収集し、施設名を移動の目的地名に変換したものを用いる。人口分布のデータは国土数値情報<sup>2)</sup>より、全都道府県の500mメッシュの人口データを用いる。

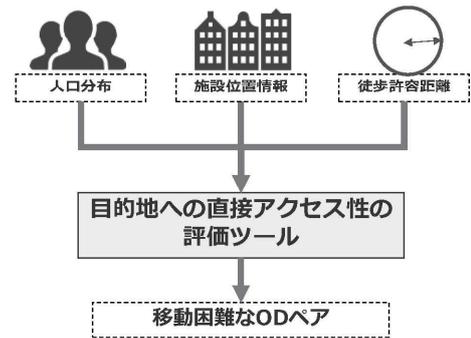


図2 目的地への徒歩アクセス性の評価フロー

図3に目的地に徒歩でアクセスしにくい地域におけるODペアの分布の出力例を示す。この図のグレーの着色部は5つの目的地(買物、医療、金融、郵便・宅配、保育)のいずれかに移動困難な地域の分布を、移動困難な施設数別に示しており、移動困難な施設数が多い程色を濃く表している。図中の緑の点は移動が困難なエリアの重心を、赤いメッシュのポリゴンは日常移動が必要な目的地群ポリゴンを、青い線はその出発地エリアから最寄りの目的地群ポリゴンを結んだ潜在移動需要のODを表している。この図により、OD間の距離や出発地、目的地群の面積を可視化することができ、低速モビリティの導入に適した地域を選定する際の検討を行うことができる。

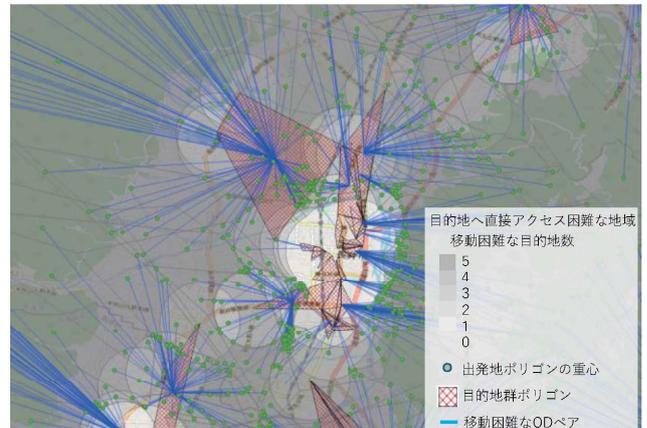


図3 目的地へのアクセス性の評価結果の出力例

図4に移動困難地域に居住している人口の、アクセスしにくい目的地の属性別の出力例を示す。図の縦軸は移動困難地域に居住する人口を、棒グラフの灰色部は各目的地へ移動困難な人口を、図中の帯の着色は移動困難な目的地の組み合わせを表している。各目的地にアクセスしにくい人口の総量は棒グラフで、各目的地にアクセスしにくい人口の内、他の目的地へのアクセス性についての内訳は交差する帯の幅で確認でき

る。アクセスしにくい目的地の属性を都道府県単位や全国的にマクロに把握することで広域な交通計画の策定のための情報も提供可能である。

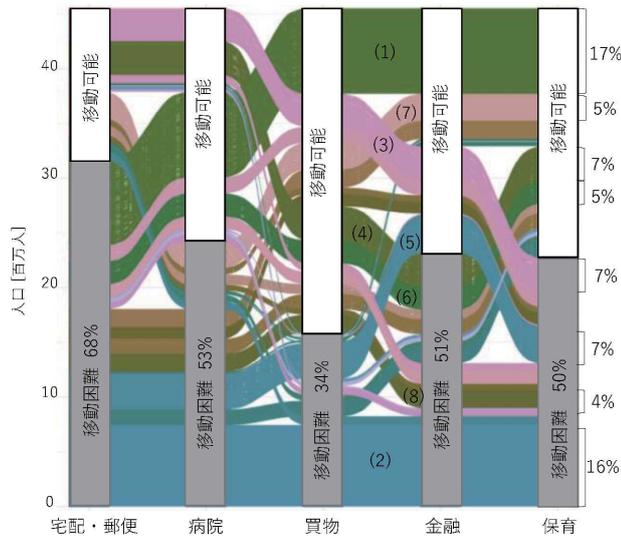


図4 移動困難な目的地の属性の出力例

#### 4. 交通手段へのアクセス性の評価ツール

前章で構築する「目的地への徒歩アクセス性の評価ツール」より出力される直接目的地へアクセスすることが難しいODペアのうち、大多数は自動車または公共交通（電車やバス）で移動すると考えられる。このツールでは、自動車または公共交通どちらでの移動も難しいODペアを出力する。図5に交通手段へのアクセス性の評価ツールのフローを示す。

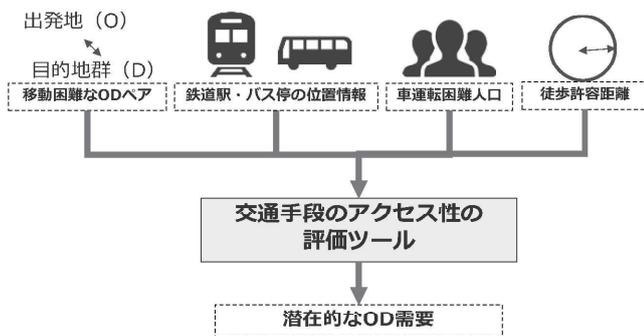


図5 交通手段へのアクセス性の評価フロー

このツールは、移動困難なODペア、鉄道やバス停の位置情報、自動車の運転が難しい年齢層の人口分布、徒歩許容距離の情報を入力し、潜在的なOD需要を出力するものである。

入力データである、移動困難なODペアは前段階のツールから出力されるデータを入力する。鉄道やバス停の位置情報は国土数値情報<sup>2)</sup>から入手可能である。

車運転困難人口は、国土数値情報<sup>2)</sup>から入手可能な年齢別の人口分布のデータより、自動車の運転が難しい若年（18歳未満）や高齢者（65歳以上）の人口分布を抽出することで入手可能である。移動可能距離は、パラメータとして設定可能である。

図6に交通手段にアクセスすることが難しい地域の人口分布の出力例を示す。このツールにより、目的地に徒歩でアクセスすることが難しい地域のOD需要から、交通手段にアクセスすることが難しい潜在的な移動に絞ったODの可視化をすることができる。

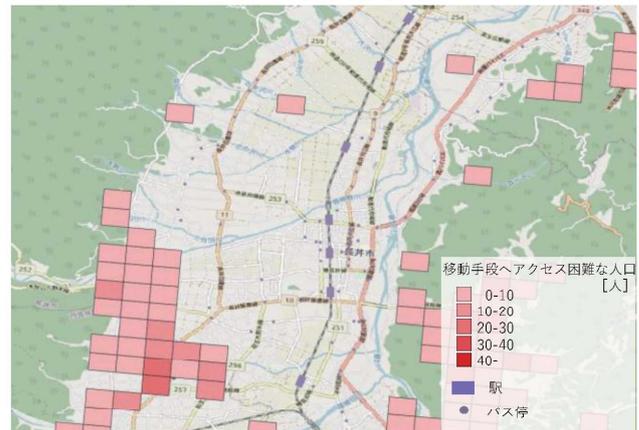


図6 交通手段へのアクセス性の評価結果の出力例

#### 5. 低速モビリティ導入時の利用者数推計ツール

このツールでは、地域によって異なる導入可能なサービス水準や移動困難者数に応じた移動の発生量の予測を出力する。

移動困難な地域に低速モビリティによる移動手段を導入することを検討する際、事前に導入を検討している移動手段の利用者数を適切に把握・予測することが必要となる。利用者数に影響する要因として、移動したいができない潜在的な移動需要量、導入する移動手段のサービス水準が考えられる。導入する移動手段のサービス水準が低ければ利用者数が得られない可能性がある。一方で、低速モビリティの特徴は安価で小型で低速であることである。そのため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てしまい、利用者便益を低下させてしまう課題が生じる可能性がある。そのため、需要量とサービス水準と利用者数の関係を把握した上で導入する移動手段のサービス水準を検討することができるツールが必要となる。

ここで構築するツールは地域特性やサービス水準に応じた利用者数を出力するために、需要量—運用方

法（車両サイズ、導入台数、運行頻度）－利用者便益の構造を明らかにし、移動需要量に応じた運用方法（車両サイズ、導入台数、運行頻度）を決定するツールの開発を目指している。

利用者数－サイズ－コスト－台数－運行頻度－利用者便益の構造の仮説を図7に示す。需要量が増えると車両サイズを大きくするか台数を増やすしかないためその間には正の相関が発生すると考えられる。車両サイズと導入台数は互いに代替可能であるため負の相関が、車両サイズや導入台数が増えるとコストが上がるため正の相関が生じると考えられる。車両サイズが大きくなると運行頻度は少なくて済むため負の相関が生じ、利用者便益は減少する。一方で導入台数が増えると運行頻度は増加するため正の相関が生じ、利用者便益が増加する。

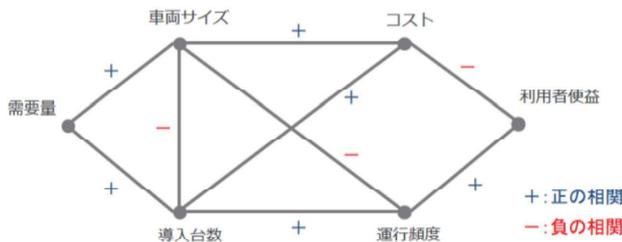


図7 潜在的な需要量－サービス水準－利用者数の関係の仮説

これらの関係性を実データから統計的に明らかにし、地域の特性や導入するモビリティのサービス水準によってどの程度の需要が発生するかを評価するための手法を開発する。

全国で実施されているグリーンスローモビリティ実証実験約60の事後調査を実施中であり、今後、利用者数（需要量）、車両サイズ、導入台数、コスト、運行頻度のデータベースを作成し、上記の構造の統計的な分析を行う予定である。

## 6. おわりに

本稿では、小規模な範囲において低速モビリティを導入した場合の需要を推計する現在構築中のツールの概要として、構成される「目的地への徒歩アクセス性の評価ツール」、「交通手段へのアクセス性の評価ツール」「低速モビリティ導入時の利用者数推計ツール」の3つのツールについて紹介した。要点は以下の通りである。

第一に「目的地への徒歩アクセス性の評価ツール」

では、目的地に徒歩でアクセスする場合のアクセス性について施設の位置情報及び人口分布のデータから移動困難地域の出発地（O）－目的地（D）のペアデータを出力する。その際、移動困難な目的地の属性が同一な地域ごとに区分し、日常移動が必要な複数の目的地を含んだ目的地群を作成してデータを作成する。

第二に、「交通手段へのアクセス性の評価ツール」では、直接目的地へアクセスすることが難しい移動困難なODペアのうち、自動車や電車やバス等の交通手段へのアクセスしにくいODペアを出力する。

第三に、「低速モビリティ導入時の利用者数推計ツール」では、地域によって異なる導入可能なサービス水準や移動困難者数に応じた移動の発生量を出力する。このツールを構築するために、現在実施されているグリーンスローモビリティの実証実験の事後評価を行い、需要量－サービス水準－利用者数の関係の分析を行う予定である。

今後の課題として次の3点を挙げる。

第一に、本稿で紹介した移動需要推定手法の構築である。3つの小ツールを統合し、需要推定ツールを構築することが課題である。

第二に、採算面の課題に対するアプローチである。移動困難地域の多くは移動需要が少なく、運賃収入のみで維持することが難しい。こういった地域においても移動手段を提供するための対策として、クロスセクション効果（低速モビリティの導入により移動が促進され、医療費の削減効果、地域活性化効果といった、他分野への波及効果）、移動の効率化（貨客混載や観光目的の移動等との共同）、モビリティの共有（移動困難な目的地の属性が同一なエリア内で少人数のグループで保有する）等の対策を検討する必要がある。

第三に、低速モビリティの活用領域の可視化である。低速なモビリティは低速であるため、交通に負荷を与えずに走行できる領域を明示することが必要である。交通量が少ない路線は交通量の観測がされていないため、交通量の推計手法も含めて活用領域を可視化することが必要である。

### 参考文献

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

# 講演6. 地方鉄道における軌間拡大リスクの評価の効率化に関する検討

交通システム研究部 ※一柳 洋輔 緒方 正剛 佐藤 安弘 篠田 憲幸 (客員研究員)

## 1. はじめに

鉄道の軌道構造として古くから用いられてきた木まくらぎ軌道は、地方鉄道等において現在も広く用いられている。急曲線部などでは列車の走行に伴い比較的大きな横圧（左右方向の力）がレールに作用する一方で、木まくらぎの劣化などにより犬くぎによるレール締結力が低下すると、軌間拡大（左右のレールの間隔が広がる状態）が発生し、脱線事故につながるリスクが高まる。軌道の維持管理において、まくらぎの劣化等については目視による異常の判断を要し、熟練した技能を要することから、異常の判断基準を数値で示せることが望まれる。5項目の軌道変位（高低、通り、水準、軌間、平面性）を測定する軌道検測車を用いれば、輪重や横圧が作用する条件での軌間変位の動的値を管理できるが、軌道検測車を導入せずに静的値で管理している地方鉄道事業者もある。

当研究所はこれまでに、横圧方向の荷重をレールに載荷でき、かつ載荷荷重に対する軌間の変化を定量的に測定できる治具（横圧載荷治具）を製作した<sup>1)</sup>。また、同治具で求めた荷重と軌間拡大量の関係に基づき、車両による横圧が作用した際の軌間拡大量を推定することで、締結状態を含むまくらぎの不良を判断できることを示した<sup>1)</sup>。しかし、全線に渡り全てのまくらぎに対して同治具による評価を行うことは現実的でないため、評価すべき箇所を絞り込みが必要と考えられる。そこで、小型情報端末を用いた新たな軌道監視手法<sup>2)</sup>を活用し、列車動揺のデータから軌間拡大リスクを評価すべき箇所を選定する方法について、車両運動シミュレーションや軌道検測車による軌道変位データ等を元に検討したので報告する。

## 2. 横圧載荷治具による評価法の概要

当研究所がこれまでに提案した、横圧載荷治具を用いてレールに横圧方向の荷重をかけることで軌間の変化を評価する方法の概要を説明する。

横圧と軌間拡大量の間にはほぼ線形の関係がある

ことから、横圧載荷治具により測定した荷重と軌間拡大量（表1の“a”）の関係にもとづき、実際に車両が曲線を通過する際の軌間拡大量（表1の“b”）は、車両通過に伴う発生横圧から推定できる<sup>1)</sup>。ここで、曲線通過時の発生横圧は、線形や車両諸元等により異なるものの、定常横圧（轉向横圧及び超過遠心力）と横圧変動分（車両の左右動の影響等）の和として算定でき、表1では40 kNとしている<sup>1)</sup>。

一方で、軌間変位の限度値は、レールと輪軸の寸法関係から一般に40 mm程度となる<sup>3)</sup>。25 mmのスラック（曲線部における設計上の軌間拡大量）に加え、静的な軌間変位5 mmが発生していると仮定した場合の、動的な軌間拡大の許容値は10 mm（=40-25-5）となる（表1の“c”）。推定した軌間拡大量“b”と許容値“c”の比較から、締結状態を含むまくらぎの不良を判定した結果（表1最下段）は、目視による締結状態の良否と一致し、特に、犬くぎ締結直後の地点4は、最も軌間拡大量が小さいことが確認されている<sup>1)</sup>。

表1 横圧載荷治具による締結状態の評価例<sup>1)</sup>

地点 No.	2	3	4
a: 軌間拡大量 [mm] (3 kN 載荷実験時)	0.7	1.8	0.4
b: 軌間拡大量 [mm] (横圧 40 kN 推定値)	8.8	24.3	5.1
c: 軌間拡大量 [mm] (許容値)	10	10	10
判定 (b < c)	○	×	○

## 3. 評価箇所の絞り込みに関する検討

前述の通り、当研究所は横圧載荷治具による測定結果にもとづき、車両による横圧が作用した際の軌間拡大量を推定することで、締結状態を含むまくらぎの不良を判断する方法を提案したが、軌間拡大リスクの評価を効率化するためには、横圧載荷治具による評価法を適用すべき箇所の絞り込みが必要と考えられる。一方、当研究所では地方鉄道における軌道管理の省力化を実現するために、小型情報端末を活用した軌道監視手法を検討しており<sup>2)</sup>、今回は小型情報端末で収集される列車動揺のデータから軌間拡大リスクを評価す

べき箇所を選定する方法について検討した。

### 3. 1. 車両運動シミュレーションによる検討

#### 3. 1. 1. 検討方法

軌間変位を含む軌道変位が車両運動に及ぼす影響について、汎用シミュレーションソフト Simpack を用いて検討した。解析モデルの主要諸元を表2に示す。軌間等の軌道変位が存在する軌道モデル上で車両モデルを走行させ、その際の前台車中心直上の車体床面における振動加速度及び角速度を計算する。

#### 3. 1. 2. 直線部における検討結果

図1の最上段のように直線部において静的に最大25mmの軌間変位(右レールに10mm、左レールに15mmの通り変位)が生じている箇所を車両が通過した際の、車体振動加速度等の計算結果を、図1の上から2段目以下に示す。軌間変位については、車体の上下と左右の加速度及びロールとヨーの角速度に影響するものの、その影響度は小さい。軌間変位が車体の上

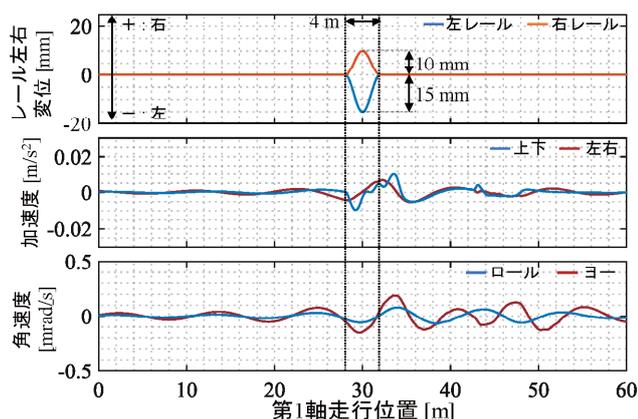


図1 直線部軌間拡大箇所通過時の運動解析結果

表2 解析モデルの主要諸元

	単位	数値等
車体質量	kg	26800
車体慣性半径 (ロール,ピッチ,ヨー)	m	1.4, 5.7, 5.7
台車枠質量	kg	1600
台車枠慣性半径 (ロール,ピッチ,ヨー)	m	0.66, 0.66, 1.1
輪軸質量	kg	1300
輪軸慣性半径 (ロール,ピッチ,ヨー)	m	0.62, 0.3, 0.62
二次ばね剛性 (前後,左右,上下)	kN/m	150, 150, 350
二次ばね減衰係数 (前後,左右,上下)	kN/(m/s)	0, 0, 35
左右動ダンパ減衰係数 (前後,左右,上下)	kN/(m/s)	20
一次ばね剛性 (前後,左右,上下)	MN/m	8, 6, 1
一次ばね減衰係数 (前後,左右,上下)	kN/(m/s)	0, 0, 1
車輪半径	m	0.43
軸距, 台車間距離	m	2.1, 13.8
一次・二次ばね左右間隔	m	2
軌間	m	1.067
車輪・レール間摩擦係数	-	0.3
車輪踏面形状	-	修正円弧
レール形状	-	50kgN

下加速度にもわずかに影響するが、これはレールと車輪の接触点が軌間拡大箇所において左右方向に変位すると同時に、車輪踏面勾配の影響によって車輪が上下方向に変位することが理由と考えられる。ただし、軌間変位が車体の上下加速度に及ぼす影響は、軌道の高低変位による影響に比べて一般に小さいことから、列車動揺のデータから軌間変位の影響のみを抽出することは困難と考えられる。

#### 3. 1. 3. 曲線部における検討結果

左レールが外軌の半径300mの曲線部において、図2最上段に示すようにスラック10mmに加え静的に最大25mmの軌間変位(外軌側に15mmの通り変位、内軌側に10mmの通り変位(図2“内軌拡大”))を有する箇所を車両が通過した際の、車体振動加速度等の計算結果を図2の上から2段目以下に示す。曲線部で軌間拡大箇所を通過すると車体の上下加速度のほか、特に左右加速度、ロール角速度及びヨー角速度に影響し、その影響は図1の直線部における結果に比べて大きい。これは、曲線部では台車の前軸(第1軸)外軌側車輪がレールに追従して変位することから、外軌側の通り変位の影響を主に受けるためと考えられる。

前述の条件から内軌側のレール左右変位を0mmへ変更した場合(図2“内軌拡大無”)の左右加速度、ロール角速度及びヨー角速度を計算した結果は、前述の25mmの軌間変位の場合と差が認められないことから、内軌の変位状態に関わらず外軌側の影響が大きいことが確認できる。したがって、列車動揺のデータか

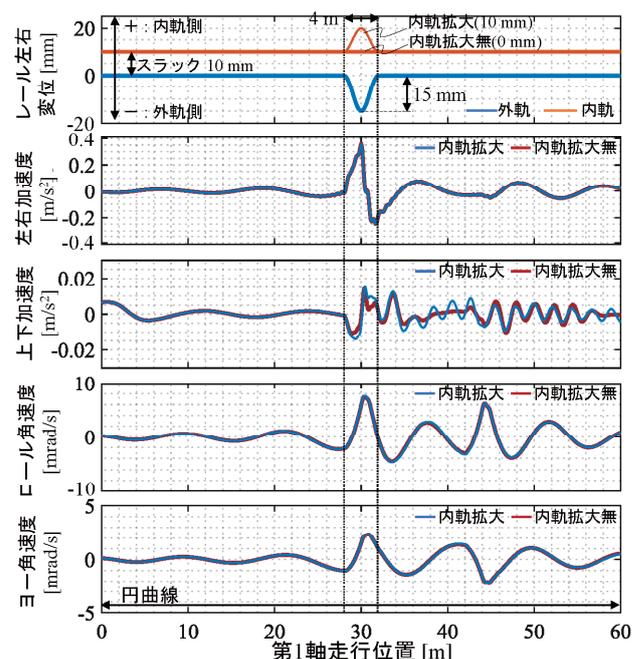


図2 曲線部軌間拡大箇所通過時の運動解析結果

ら、外軌の通り変位の影響と、内外軌ともに拡大するような軌間変位の影響とを区別するのは難しい。

### 3. 1. 4. 考察

以上のシミュレーション結果から、軌間変位が車体振動加速度等に及ぼす影響を定量的に明らかにした。しかし、車体振動加速度等は軌間変位のほか高低変位や通り変位の影響を大きく受けるため、列車動揺から軌間変位のみを定量的に推定することは難しい。

もとより軌間拡大は急曲線部等で比較的大きな横圧がレールに作用する一方で、木まくらぎの劣化などによりレール締結力が低下することで発生しやすくなるため、軌間変位の増加に加えて高低変位も増加している場合があると考えられる。そのような曲線部については、高低変位と相関の高い列車動揺（上下加速度）<sup>4)</sup>にもとづいて抽出できる可能性がある。そこで、地方鉄道路線における実際の軌間変位、高低変位及び車体上下振動加速度をもとに以下の検討を進めた。

## 3. 2. 軌道検測車と列車動揺データに基づく検討

### 3. 2. 1. 検討方法

定期的に軌道検測車による軌道変位の検査が実施される地方鉄道路線において、小型情報端末を用いて営業列車の動揺の常時測定を行った結果、列車動揺（上下加速度）と高低変位との高い相関が得られている<sup>4)</sup>。よって、まず当該路線の中から比較的大きな横圧がレールに作用すると考えられる半径 300 m の曲線部を抽出し、この中から緩和曲線部を除き、軌道構造として木まくらぎ・砕石道床である円曲線 10 区間を対象に軌道検測車による高低変位と軌間変位（スラック含む）の測定データ（最大値）の関係を求めた。

次に、当該曲線区間における小型情報端末による列車動揺データと軌道検測車による軌間変位の関係を求めた。ただし、小型情報端末では GPS（Global Positioning System）による速度から、軌道管理のための列車位置を求めているが、トンネル等 GPS による列車位置同定が困難な箇所や、駅近傍で速度が遅く、列車動揺と高低変位との相関が低くなる曲線区間は対象外とした。

### 3. 2. 2. 軌間変位と高低変位の関係

前述の半径 300 m の曲線部において、軌道検測車による高低変位と軌間変位の関係を求めた結果を図 3 に示す。概ね高低変位が大きい曲線では、軌間変位も大きくなる傾向を示している。ただし、高低変位が 6.4 mm と小さいにもかかわらず、軌間変位が 27.0 mm と

大きな曲線が一部認められるが、当該曲線は図 4 に示すとおり、円曲線長が 25 m と短く、緩和曲線部において高低変位 19.3 mm が検測されており、曲線部全体に着目すれば、高低変位と軌間変位ともに大きい箇所といえる。以上の結果から、高低変位の大きな曲線部では、軌間変位も大きい可能性があることから、横圧載荷治具により評価すべき箇所として注目すべき対象になると考えられる。

### 3. 2. 3. 軌間変位と車体上下加速度の関係

次に、軌道検測車による軌間変位の検測波形と、それと同時期に測定した小型情報端末による列車動揺（上下加速度）のデータの例を図 5 に示す。列車動揺については、再現性を確認するため、営業列車による 3 回の測定データを重ね書きしている。また図 5 には、円曲線内における両者の最大値を示している。同様にして、図 3 と同じ曲線区間（列車位置同定が困難

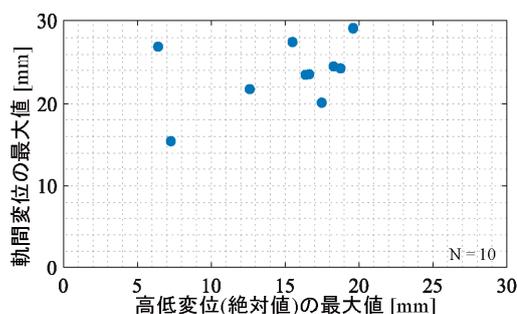


図 3 曲線部における高低変位と軌間変位の関係

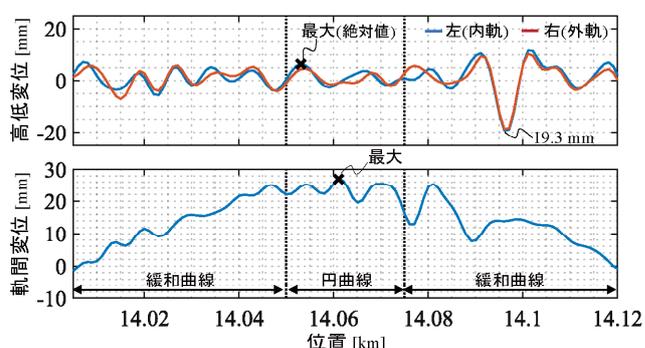


図 4 高低変位と軌間変位の検測データ例

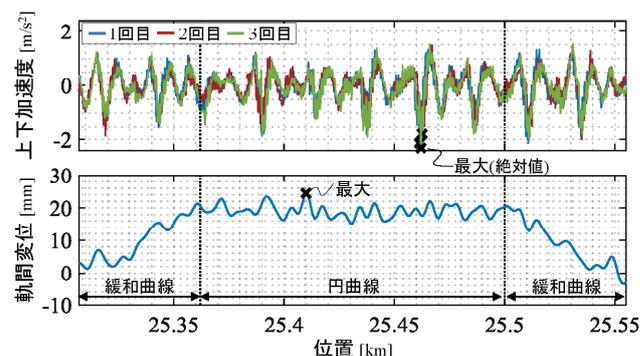


図 5 軌間変位の検測データと列車動揺データの例

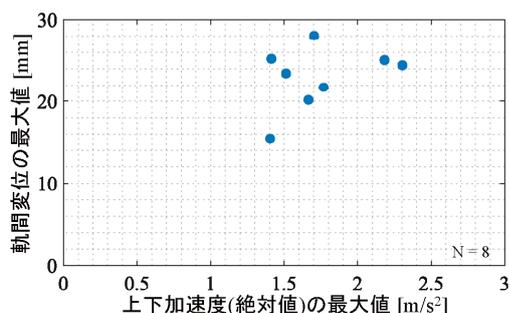


図6 曲線部における列車動揺と軌間変位の関係

な箇所や速度が遅い区間は対象外とした)において軌間変位と上下加速度の最大値を求め、図6にまとめて示す。図5に示したように、必ずしも同一曲線中での軌間変位の最大を観測した地点と、列車動揺の最大を観測した位置は一致しないものの、図6からは列車動揺の最大値が大きい曲線部で軌間変位の検測結果の最大値も大きい傾向が認められる。

#### 4. 評価手順

以上の検討を踏まえ、列車動揺データから軌間拡大リスクを評価すべき曲線部を選定する手順を図7にまとめた。図7左側の小型情報端末による列車動揺データの測定、データ処理、及びヨー角速度による曲線部の抽出までは、小型情報端末を活用した新たな軌道監視手法<sup>2)</sup>に相当する。また、図7右下部の「目視等でまくらぎの劣化等について疑われる箇所」に対し、横圧载荷治具による荷重と軌間拡大量の関係を求め、その関係に基づき車両による横圧発生時の軌間拡大量を推定し、動的な軌間拡大量の許容値と比較して締結状態を含むまくらぎの不良を判断することは、これまでに提案した評価方法<sup>3)</sup>にかかるものである。

今回、軌間拡大リスクの評価の効率化を図る方法の一つとして、曲線部における上下加速度の最大値を抽出することで軌間拡大リスクを優先的に評価すべき箇所を選定する手順を示した(図7右上部に相当)。具体的には、上下加速度の最大値が比較的大きな曲線部において、優先的に横圧载荷治具による軌間拡大リスクの評価を行うこととする。ただし、車体上下振動はシミュレーションで検討した軌間変位の他に、高低変位の影響や列車速度の影響を受けることから、上下加速度の大きな曲線で必ずしも軌間拡大リスクの大きな箇所を網羅できるとは限らない。そのため、上下加速度の最大値が大きい曲線部以外にも、目視等でまくらぎの劣化等が疑われる箇所については、併せて軌

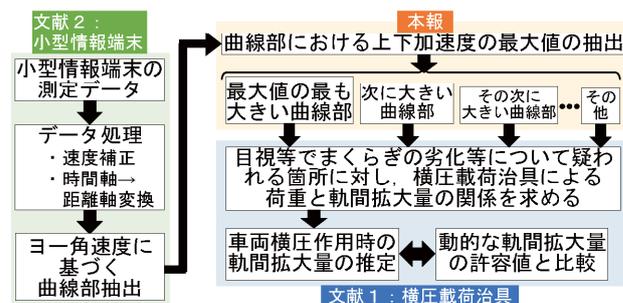


図7 軌間拡大リスクの評価手順

間拡大リスクを評価すべき箇所であると考えられる。

#### 5. まとめ

地方鉄道において発生している軌間拡大による脱線事故の予防のため、当研究所ではこれまでに横圧方向の荷重をレールに载荷でき、かつ载荷荷重に対する軌間の変化を定量的に測定できる治具を用いて、締結状態を含むまくらぎの不良を評価する手法を提案した。今回、軌間拡大リスクの評価の効率化を検討するため、列車動揺のデータから軌間拡大リスクを評価すべき箇所を選定する方法について、車両運動シミュレーションや軌道検測車による軌道変位データを元に検討した。その結果、曲線部における上下加速度データの最大値を抽出することによって、軌間拡大リスクを優先的に評価すべき箇所を選定する手順を示した。

今後の課題としては、優先的に評価すべき曲線部の選定手順にかかるデータ処理の自動化と実路線への適用、さらなる効率化の検討などが挙げられる。

本研究においてデータを提供していただいた会津鉄道株式会社に感謝の意を表します。本研究の一部はJSPS 科研費 JP 21K14113 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- 1) 緒方 正剛, 佐藤 安弘, “レール横圧载荷治具を用いた軌間拡大リスクに対する検討”, 交通安全環境研究所フォーラム 2019, pp.3-6 (2019)
- 2) 緒方 正剛, “地方鉄道を対象とした軌道状態の省力化監視手法に関する取組”, 交通安全環境研究所講演会, 講演 1, pp.45-54 (2021)
- 3) 国土交通省鉄道局監修, “解説 鉄道に関する技術基準(土木編)改訂版(第三版)” (2014)
- 4) 篠田 憲幸ほか, “携帯情報端末を用いた営業列車振動データにもとづく軌道管理手法”, 日本機械学会論文集, Vol. 88, No. 911 (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。2021年中の交通事故による死者数は2,636人で、5年連続で最少を更新している。しかし、その内容を見ると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、政府目標を達成するためには、いわゆる交通弱者と呼ばれる子供・高齢者・歩行者・自転車乗員等への安全対策が求められる。

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、並行して道路交通法の改正も行われた<sup>(1)</sup>。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)の販売が開始され、自動運転は実験段階から一般社会への導入、普及に向けて大きな一歩を踏み出した。引き続き国内外において、レベル4自動運転の実現を含む、より高度な自動運転機能にかかる研究開発や基準検討が進められている。また、2022年4月の道路交通法の一部改正により、新たに「特定小型原動機付自転車」が規定され、その一例として電動キックボードの普及、導入が進められようとしている。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における車両への電気エネルギーの活用にあらずる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の確保に新たに情報・通信の安全確保を加えて自動車安全の3本柱と捉え、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、情報通信、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、自車及び周囲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グループでは、自動運転中に運転者が行う二次タスクの作業負荷が運転引継ぎ時間や運転引継ぎ後の車両挙動の安全性に与える影響を定量的に評価する研究や自動運転車両及び現行車両に対するコミュニケーションライトの必要性や路面描画ライトの有効性の検討、提供する情報に関する研究を行うと共に、人間ドライバーの近接視界領域の視覚認知特性に関する研究も進めている。並行して、高齢者の運転特性や視覚特性を明らかにし、高齢ドライバーへの自動運転技術等を活用した適切な運転支援方法についても検討を行っている。

また、電動キックボードの走行状態を他の交通参加者に示すための走行状態識別灯火の装備が議論されているが、その識別灯の視認性や有効性等に関する調査を本グループにおいて行い、調査結果を検討会に提供している。

### 2.3 情報通信グループ

本グループでは、環境情報の認識と e-セキュリティへの対応を中心に研究を進めている。

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必要となる。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、安全上の課題について検討を進める目的で調査、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。

e-セキュリティに関して、現在欧州や日本を中心に、2021年1月に国連の基準として発効し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に関する基準に準拠した審査が進められている。各国で得られた審査の知見を共有し、新たな課題等を協議するための当局者間ワークショップが継続的に開催されている。特にサイバーセキュリティ機能に関するテストの評価については新たな領域であり、交通研として情報収集を進めながら調査研究を実施している。

### 2.4 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、国内に導入されている自動車における電磁両立性試験(R10)設備間の相関性評価等も行っている。

### 2.5 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実態を把握するために行った大規模な性能調査や、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、技術データを提供している。

## 3. 外部連携

自動車安全研究部では、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、中央大学、杏林大学医学部病院等との共同研究や、NHTSA(米)、VRTC(米)、BAST(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](https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha07_hh_000338.html)

# 講演 7. 交通安全環境研究所におけるバッテリー安全に関する取組

自動車安全研究部

※小鹿 健一郎

## 1. はじめに

国連の自動車基準調和世界フォーラム (WP29) において、電気自動車の安全性に関する世界技術規則 (Global technical regulation、以下 GTR) が議論されている。IIIここでは、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) の策定が話し合われている。本発表では、当研究所のバッテリー安全に関する取り組みとして、WP29 における熱連鎖に関する議論の状況および交通研で実施している研究内容について紹介する。

## 2. WP29 における議論

### 2. 1. EVS-IWG の概要

電気自動車の安全に関する作業部会 (EVS: Electric Vehicle Safety – Informal Working Group) は 2012 年に衝突安全分科会 (GRSP) 傘下に設置された。共同スポンサー国である、米国 (議長)、中国、欧州 (共同議長)、日本 (事務局) が会議を主導している。第 1 期 (フェーズ 1) は 2 度の会期延長を経て、2018 年に終了し、GTR-20 が 2019 年 3 月に成立した。現在は、第 2 期 (フェーズ 2: 会期 2019 年-2023 年 6 月 新型コロナウイルスの世界的な感染拡大のため、当初予定から 18 ヶ月の延長) であり、フェーズ 1 で合意に至らなかった『熱連鎖試験』の扱いを主要な議題として、議論が継続されている。

『熱連鎖』とは、組電池において一部の電池が熱暴走を起こした際に、その熱暴走現象が隣接セルに伝播する現象のことを言う。(GTR-20 において『熱暴走』は、セル内部の発熱反応により起こる制御不能なセルの温度上昇と説明されている。)

### 2. 2. 熱連鎖の議論におけるフェーズ 1 の結論

フェーズ 1 では、中国が自国で多発する電気自動車の火災への対応として、熱連鎖試験を GTR-20 に導入することを主張したが、合意に至らなかった。試験法導入に反対した米国、欧州、日本の主な主張は次の 2 点であった。①自国の事故発生状況を鑑みると試験法を用いて直ちに規制する必要があるという状況にない。②中国より提案された試験法が、客観性があり、

規制として活用するのに適当であるか、自国の研究機関に熱連鎖試験を実施させ検証する必要がある。

一方で、熱連鎖を原因とする電気自動車火災に対して対応が必要であるという認識が一致したことから、フェーズ 1 では、製造者が文書によってその安全性を説明することを義務付ける『文書化要件』による規制が採用となった。日本国内においては 2023 年 9 月以降に販売される新車から、製造者が熱連鎖に関する安全性についてその対策を文書で説明することが義務付けられた。

### 2. 3. フェーズ 2 における議論状況

フェーズ 2 では、熱連鎖試験について技術的な議論が活発化している。これは、フェーズ 1 におけるデータ提供国が中国に限られていたのに対し、フェーズ 2 では日本、欧州、米国、カナダなども、車載パッケレベル、車両レベルで熱連鎖試験を行い、その試験データを議論に提供していることによる。

熱連鎖試験の技術面では、熱連鎖における一つ目のセルの熱暴走発生 (イニシエーション) をどのように行うか、可否に係する観察対象 (爆発、火炎、煙、毒性ガス) を何にするか、どの程度まで許容するか、などいくつかの論点で議論されている。

米国は、熱連鎖試験はまだ客観性に乏しく、自国の事故発生状況を鑑みると試験法を用いて規制する必要があるという状況にないと主張し、熱連鎖試験により規制するよりも、フェーズ 1 で合意された文書化要件を改良 (文書化要件において製造者が説明すべき内容を明確化し、より公平かつ客観的なものにする) することを提案している。また米国は、熱連鎖試験以外にもバッテリーの非破壊分析手法<sup>2)</sup>などを活用し、安全性の低下を検知したら警報を出すなどしてユーザーに知らせるなど、熱連鎖試験以外にも問題解決の方法はあると主張している。

### 3. 当研究所における研究の紹介

ここでは、当研究所の研究として、①レーザーイニシエーションを活用した熱連鎖試験に関する検討事例と②モニタリングを活用した電気自動車の安全性向上に関する検討事例を紹介する。

#### 3. 1. レーザーイニシエーションを活用した熱連鎖試験に関する検討

##### 3. 1. 1. 検討の背景と明らかにする内容

欧州、米国がフェーズ1終了時に示した『今後検討すべきと考えるイニシエーション方法の候補リスト』にレーザー照射法が含まれていた。しかし、国内自動車メーカーにおいてレーザー照射法の検討事例はなかったため、当研究所において実施することとなった。ヒータ加熱法や釘差し法に比べ、ほとんど情報が無い状態から検討を開始した。そこで表1に示すように、明らかにする内容を設定し、調査を開始した。

表1. レーザー照射法に対して明らかにする内容と実験時の対象バッテリーの規模

検討	明らかにする内容	対象バッテリーの規模
1	イニシエーション方法の原理(熱暴走のメカニズムの推定)	セル
2	他の手法に比べた場合の特徴	モジュール
3	車載パックレベルでの実施可能性	車載パック

##### 3. 1. 2. 検討を行った内容の概略<sup>[3][4][5]</sup>

検討1<sup>[3]</sup>は、レーザー照射法の原理を明らかにすることを目的に実施した。具体的な手法としては、レーザー照射から熱暴走に至るメカニズムを、バッテリー構成材料の熱分析、レーザー照射後のバッテリーの解体観察のデータをもとに推定した。推定されたメカニズムは、『レーザー照射された部分、およびその直下が加熱されることにより、セパレータが熱収縮を起こし、内部短絡を発生、その後、熱暴走に至る。』というものであった。これにより、レーザー照射は、加熱法の一つに分類されるイニシエーション方法であり、内部短絡を経て、熱暴走に至ることが明らかとなった。

検討2<sup>[4]</sup>は、レーザー照射が、熱連鎖試験に用いられる場合、従来検討されてきた手法に比べてどのような

特徴があるかを明らかにすることを目的として実施した。具体的な手法としては、5セルを一組としたモジュールを用いて熱連鎖試験を行い、ターゲットセルの熱暴走が確認された時点の隣接セルの温度を従来検討されてきたイニシエーション方法である釘差し法とヒータ加熱法と比較した(隣接セルへの熱伝達状況の確認)。レーザー照射を用いた場合の熱暴走発生時の隣接温度の上昇程度は、釘差し法で実施した場合と同程度であった。これにより、レーザー照射法は、隣接セルの温度上昇を抑えた状態で、ターゲットセルを熱暴走させることができることが示された。これは、レーザーは加熱法の一つであるが、セラミックヒータなどに比べて、単位面積あたりの出力が大きく、レーザー照射による加熱面積が小さいため、熱暴走が短時間で起こることが理由であると考えられた。

検討3<sup>[5]</sup>は、車載パックを対象とした熱連鎖試験に、レーザー照射法が適用できるか確認することを目的として実施した。具体的な手法としては、車載バッテリーパックのカバーケースにレーザー照射用の穴をあけたうえで、熱連鎖試験を実施した。レーザーは、照射用の穴を通過し、ターゲットセルに照射され、熱暴走を発生させた。隣接セルはターゲットセルの熱暴走の影響を受けて温度上昇するも、熱暴走には至らなかった。これにより、レーザー照射は、カバーケースに穴あけ加工することで、ターゲットセルを熱暴走することが可能であり、車載バッテリーパックを対象とした熱連鎖試験において、イニシエーション方法として使用できることが確認された。

##### 3. 1. 3. 調査から得られたレーザーイニシエーションに関する知見のまとめ

レーザー照射法は、加熱法の一つであり、レーザーを照射された部分およびその直下の温度が上がることで、セパレータが熱収縮を起こし、内部短絡を発生する。レーザーの照射径が小さく(1mmφ未満)且つ、高出力である(単位面積あたりの出力が大きい)ため、短時間で対象セルを熱暴走させることができる。この特徴により、セラミックヒータなどに比べて、隣接セルの温度上昇(対象セルの熱暴走発生時)を低く抑えることができる。これまで、車載パックへの適用例はなかったが、今回の検討において、車載パック(PHEV用)を対象として、現実的に熱連鎖試験が行えることを実証した。

### 3. 2. バッテリー安全性モニタリングに向けた検討

#### 3. 2. 1. 検討の背景と明らかにする内容

米国は、バッテリーを対象とした非破壊診断技術を活用し、熱暴走発生前にその可能性を検知し、ドライバーに警報を出すなどして、電気自動車の安全性を高める検討を行っている<sup>14</sup>。一方、当研究所では、劣化と安全性の関係に関する調査<sup>16</sup>を進めており、この知見と非破壊診断技術を組み合わせたバッテリー安全性モニタリングによる電気自動車の安全性向上を検討している(表2)。モニタリングを安全対策として取り入れることの一番の意義は、使用過程の車両にも対応できるということである。(前述の熱連鎖試験は、新車(新品バッテリー)を対象として現在検討されている。)

表2. バッテリー安全性モニタリングに向けた検討において明らかにする内容

検討	明らかにする内容
4	安全性の低下に影響を与えるバッテリー劣化の要因
5	バッテリーの安全性低下事象のラボでの再現可能性
6	使用過程バッテリーのモニタリングによる安全性低下の検知可能性

#### 3. 2. 2. 検討を行った内容の概略<sup>16</sup>

検討4として、安全性の低下に影響を与えるバッテリー劣化の要因について調査した。現時点で日本では、電気自動車の火災事故の報告例はないので、民生用、定置用のリチウムイオン電池に関する文献を対象に調査を行った。以下にその一例を示す。劣化によりバッテリーの安全性が低下する事例として、リチウム析出により熱暴走を起こしやすくなる事例が報告<sup>17,18</sup>されており、安全性低下のメカニズムは、低温環境において充放電を繰り返すと、副反応によりリチウム金属が析出し、内部短絡の発生や自己発熱の発生により熱暴走を起こしやすくなるということであった。

検討5<sup>16</sup>は、バッテリーの安全性低下事象のラボでの再現可能性を確認することを目的に実施された。具体的な手法としては、リチウムイオン電池(セル)を低温環境(1℃)で繰り返し充放電することで劣化セルを作成、劣化セルを対象として熱安定性評価、熱暴走試験、およびセルの分解調査により金属リチウムの析出の確認を行った。熱安定性評価では、劣化セルは新品セルに比べて、より低い温度から自己発熱が発生す

ることが確認された。また、熱暴走試験では、レーザー照射を行った場合、劣化セルは新品に比べて少ないエネルギー投与量で熱暴走に至った。分解調査では、負極上に灰色の金属リチウムが析出していることが確認された。安全性低下を引き起こす劣化の一例であるリチウム析出を伴う劣化サンプルをラボで作成し、評価するプロセスを実施した。

検討6の目的は、使用過程バッテリーのモニタリングによる、安全性低下の検知可能性を確認することであり、2022年度実施中である。具体的な手法として、非破壊診断技術として、充電曲線解析法<sup>19</sup>を対象セルに適用し、セル内のリチウム析出程度に基づいて、熱暴走に対する安全性の変化を診断する。実際に安全性が低下しているかの判断は、レーザー照射による熱暴走試験を実施し、熱暴走に至るまでに投与したエネルギーをもとに判断することとする。

#### 3. 2. 3. バッテリー安全性モニタリングに関する知見のまとめ

車載のバッテリーをモニタリングしながら、電気自動車の安全性を高めるというコンセプトは非常に有用なものであると現時点で考えている。その理由として、熱連鎖試験は、新車(新品バッテリー)を対象として、評価を行うため、劣化による安全性低下をカバーできないことが挙げられる。劣化したバッテリーに対して、熱連鎖試験を行うこと自体は可能であるが、バッテリーの劣化の程度は、ユーザーの使用状況や使用環境の影響を受けるために一律に規定することは難しいことが予想される。

今後、使用過程にある電気自動車のバッテリーのモニタリング技術を実用化するためには、複数の非破壊分析を組み合わせることで、検出できる事象を増やすことや、想定している事象がリアルワールド(電気自動車のバッテリー)で実際に発生しているか調査することなども重要であると考えている。

#### 4. 今後の取り組みの方向性

当研究所は、電気自動車の安全性確保のために、バッテリー安全に関する取り組みを国交省と連携して進めていく。取り組みの主たる柱は、フィールドデータの調査、WP29における国際議論の主導、安全性向上に資する技術の評価である。フィールドデータの調査では、海外における事例に関する情報を収集、分析、分類等を行うことで、国内で事例が発生した場合に、適切に対応できるように準備する。WP29における国際議論の主導では、文書化要件の改良、客観性の高い試験法の開発と試験法を用いた規制の導入について、米国、欧州、中国をはじめとした締約国と議論を継続する。また、引き続き当研究所職員をテクニカルセクレタリとして派遣し、基準が調和されるように議論をリードする。安全性向上に資する技術の評価では、3.2で記載したモニタリング技術が、電気自動車の安全性を向上する技術として、実用化できる可能性があるか評価を行う。また、米国等と技術的情報交換を行い、熱連鎖試験以外にも安全性を高める方策がないか模索する。

#### 5. おわりに

本発表では、当研究所におけるバッテリー安全に関する取り組みとして、WP29における熱連鎖に関する議論の状況および当研究所における研究内容について紹介した。WP29における議論の状況では、規制のあり方（試験による規制、文書化要件による規制）や、試験法における技術的な課題、米国のモニタリングによる安全確保の取り組みなどについて紹介した。当研究所における研究内容では、レーザイニシエーションを活用した熱連鎖試験について紹介するとともに、今年度から開始したモニタリングを活用した電気自動車の安全性向上に関する検討についても一部説明した。

#### 参考文献

- 1) 国連 UN-ECE EVS ホームページ  
<https://wiki.unece.org/pages/viewpage.action?pageId=3178628>
- 2) Tanim, T.R et. al., "Challenges and needs for system-level electrochemical lithium-ion battery management and diagnostics ". MRS Bulletin 46, 2021, Pages 420–428.
- 3) M. Umeda, K. Koshika et.al., "Thermal runaway

- characteristics of a LiFePO<sub>4</sub>-based lithium-ion secondary battery using the laser-irradiation method", Journal of Energy Storage, Volume 40, 2021, 102715.
- 4) Y. Kagei, K. Koshika et.al., "Quantitative Comparison of Thermal Influence among Laser Irradiation and Other Methods for Thermal Runaway of Traction Lithium Ion Battery", International Journal of Automotive Engineering, Volume 13, 2022, Issue 1 Pages 15-20.
- 5) K. Koshika et.al., "Demonstrating Thermal Propagation Test for Battery Pack for PHEV with Laser Irradiation as Initiation Method", International Journal of Automotive Engineering, Volume 13, 2022, Issue 1 Pages 9-14.
- 6) 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.
- 7) T. Waldmann et al., "Li plating as unwanted side reaction in commercial Li-ion cells – a review", Journal of Power Sources, Volume 384, 2022., Pages 107–124.
- 8) X. Feng et al., " Influence of aging paths on the thermal runaway features of lithium-ion batteries in accelerating rate calorimetry tests", International Journal of Electrochemical Science, Volume 14, 2019, Pages 44-58.
- 9) 森田 朋和 "充電曲線解析法を用いた組電池のセルバランス・劣化状態ばらつき の推定" 電気化学, Volume 89, 2021, Pages 101-106.

# 講演 8. 前面衝突事故における乗車姿勢が乗員傷害に及ぼす影響に関する研究

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

前面衝突事故時における乗員保護は、シートベルトなどが乗員を拘束し、エアバッグが頭部や胸部が車室内部材との衝突を緩和することが重要である。シートベルトは、骨盤や肩を支点とするように装着する必要があるが、乗車姿勢によっては十分に機能しない可能性がある。筆者らは、これまで、衝突被害軽減ブレーキ作動時の乗車姿勢の乱れと乗員傷害の関係について研究を進めてきた<sup>1), 2)</sup>。また、今後は自動運転車の普及とともに乗員の乗車姿勢はこれまで以上に多様化することが予想される。

そこで、今回は乗員が座席背面を倒してリラックスした姿勢で乗車した場合(図1)について、前面衝突を模擬したスレッド試験を実施し乗員挙動や乗員傷害について比較検討を行った。

## 2. 方法

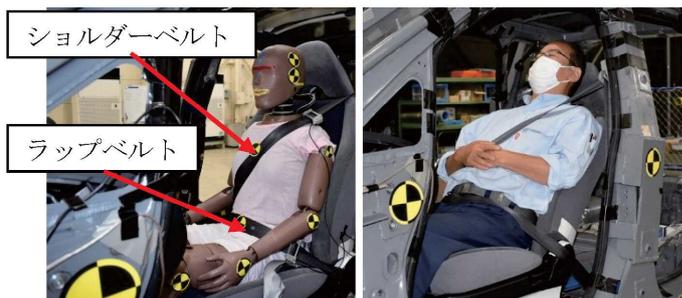
### 2. 1. ダミーの乗車姿勢及び試験装置

日本では前面衝突試験法として、国連協定規則第137号(以下、UN-R137:拘束装置を中心とした前面衝突時における乗用車に係る車両認可に関する統一規定)を採用している。これは、乗員傷害計測用ダミーの搭載方法についても細部にわたり定めているが、特にダミーの姿勢に関係する項目としてはヒップポイント角度(以下、H.P角度という)と頭部角度が重要である。H.P角度は水平面から22.5度+2.5度、頭部角度は、水平面から0度±0.5度、である。図2にダミーの搭載要件を示す。

一方で、乗員は長時間乗車している場合などで座席背面を倒すなどのリラックスした姿勢を取ることがあり、この姿勢でのH.P角度は衝突試験時とは異なる。そこで、今回は、乗員がリラックスした姿勢をとった場合の条件の一つとして、座席背面を倒した場合の乗員傷害について検討を行った。

試験はスレッド試験装置に小型乗用車のホワイトボディを搭載して行った。スレッドの加速度入力には

50km/hのフルラップ前面衝突試験における減速度波形を用いた。座席背部の角度は、座席背部表面に直定規をあてて測定した角度とした。



衝突試験法の乗車姿勢      リラックスした乗車姿勢例  
図1 乗車姿勢

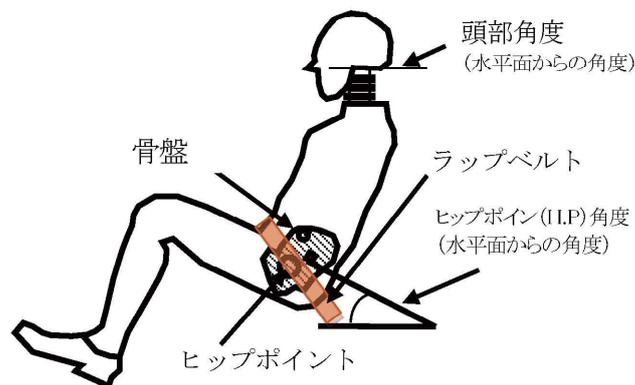


図2 ダミーの搭載要件

### 2. 2. 試験条件

本研究では、小柄女性ダミーを助手席に搭載させてスレッド試験を実施した。試験条件を表1に示す。Test 1はUN-R137で定められている搭載姿勢とした。このときの座席背面の角度は16度であった。Test 2はUN-R137で定められている搭載姿勢のうち座席背面のみを25度、Test 3は35度そしてTest 4では45度とした。

車体に対するH.Pの相対位置はTest 1を基準にして全て同一とし、ダミーの上半身の角度のみ座席背面に沿わせることで姿勢を変化させた。また、大腿部とシート座面との接触状態もできるだけUN-R137の搭

載状態と同じとした。ショルダーベルトは、いずれの条件においてもダミーの胸部中央を通る経路で装着することができたが、Test3 と Test 4 では肩部が下がるため、肩部とシートベルトの間隔が大きくなった。ショルダーベルトの高さ調整は、Test1 では最上段、Test2~Test4 では最下段とした。また、ラップベルトは、いずれの試験条件においてもダミーの腰部パーツを通る経路で装着することができた。また、下肢拘束の重要な要件である膝表面とダッシュボード間の距離はいずれの試験条件においても同一とした。

表1 ダミー初期姿勢

Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
座席背面角度 16度	座席背面角度 25度	座席背面角度 35度	座席背面角度 45度
頭部角度 0.7度 H.P 角度 21.8度	頭部角度 13.1度 H.P 角度 28.6度	頭部角度 22.6度 H.P 角度 33.5度	頭部角度 31.3度 H.P 角度 36.0度
			
			

#### 4. 試験結果

##### 4. 1. ダミー挙動と傷害値

表2にダミーの傷害値と UN-R137 の規定値を示す。また、図3にダミー挙動の時間履歴を図4に頭部合成加速度の時間履歴、図5に胸部たわみの時間履歴を図6に大腿骨荷重の時間履歴を示す。

Test 1 では、衝突開始後にショルダーベルトのプリテンショナーと繰り出し量抑制のため、ダミーの上半身は前方移動が制限され、頭部だけ慣性により前傾してエアバッグに接触した。下半身については、衝突後に前方に移動するがラップベルトの拘束により移動量は少なかった。これらの効果により、ダミーと車室内部材との強い衝突が回避され、傷害値は低く抑えられたと考えられる。Test 2, 3, 4 については、座席背面角度が大きいため頭部の初期位置が Test 1 に比べて後方になる。特に、Test 4 では、エアバッグによる拘束開始が遅くなったため、頭部合成加速度の最大値や HIC が増加したと考えられる。

胸部たわみの最大値は、Test 1, 2, 3 についてはほぼ同等であったが、Test 4 では若干低く、時間履歴において、0.05s 付近での落ち込みが見られた。

大腿部荷重については、大腿部が車室内のインパネ等の車室内部材と衝突した際に生じる圧縮荷重は負の数値として計測される。Test 1 では、腰部がラップベルトで拘束されており、大腿部は慣性力により引張方向に力が生じるため正方向の数値は高いものの(図6、表2)、車室内部材との衝突による圧縮方向の荷重は0.14 kN と小さかった(表2)。これに対して、Test 2 では車室内部材との衝突による荷重は0.48kN、Test 3 では1.49 kN、Test 4 では0.65 kN であり、ラップベルトが腰部から外れて下肢が前方に移動したことにより車室内部材と衝突し、大腿部の圧縮荷重が増加したものと考えられる。

傷害値については、実施した試験条件では基準値を上回るものはなかった。

表2 ダミーの傷害値

傷害値 (傷害基準値)	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
HIC36 (1000 以下)	349	377	597	667
頸部 Fx (2.7 kN 以下)	0.4	0.7	1.1	1.3
頸部 Fz (2.9 kN 以下)	0.7	1.0	1.7	1.5
頸部 My (57 Nm 以下)	27.7	30.0	32.1	20.2
胸部たわみ (42 mm 以下)	24.0	24.7	24.8	21.4
大腿部荷重 (-7 kN 以下)	-0.14	-0.48	-1.49	-0.65

頸部 Fx：頸部剪断方向荷重  
 頸部 Fz：頸部上下引張方向荷重  
 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



T = 0 s    T = 0.04 s    T = 0.06 s    T = 0.08 s

図3 ダミー挙動

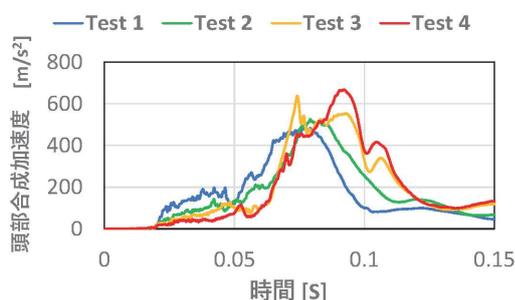


図4 頭部合成加速度の時間履歴

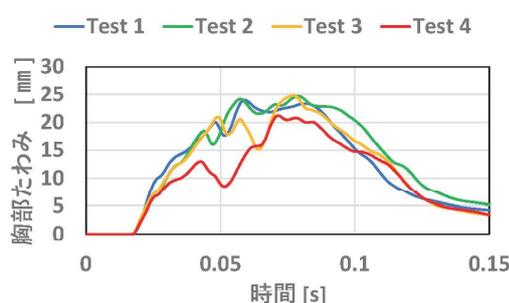


図5 胸部たわみの時間履歴

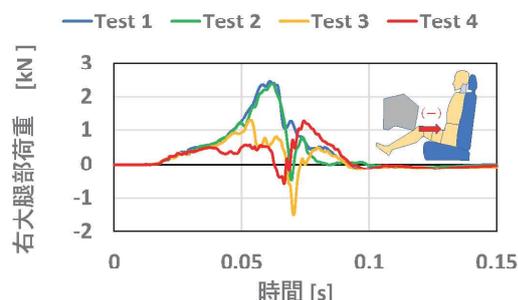
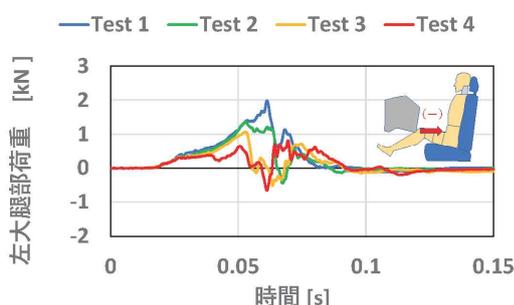


図6 左右大腿骨荷重の時間履歴

#### 4. 2. ラップベルト張力と腹部傷害

図7にラップベルト張力の時間履歴を示す。

Test 1では、ラップベルトは腰部から外れることなく、最大値は6.29 kN (0.062s)であった。Test 2ではラップベルト張力の最大値は、腰部を拘束している

状態での4.8 kN (0.062s)であった。この後、ラップベルト張力は減少するが、これはラップベルトが腰部から外れて腹部に移動したためと考えられる。その後、張力は増加し、1.7 kN (0.078 s)となった。Test 3では、ラップベルト張力の最大値は、腰部を拘束している状態での3.5 kN (0.052s)であった。この後、ラップベルトは腰部から外れて腹部に移動した。この時の最大値は、4.2 kN (0.08 s)であり、ラップベルトが腰部にあるときよりも大きくなった。Test 4では、ラップベルト張力の腰部を拘束している状態で1.4 kN (0.04s)であった。この後、ラップベルトは腰部から外れて腹部に移動した。この時の最大値は、7.5 kN (0.08 s)であり、Test 1よりも大きくなった。

以上のように、座席背面の傾きが大きくなるにしたがい、ラップベルトが腰部を拘束する張力は小さくなり、ラップベルトが腰部から外れる時間が短く、腹部を圧迫するベルト張力が高くなった。

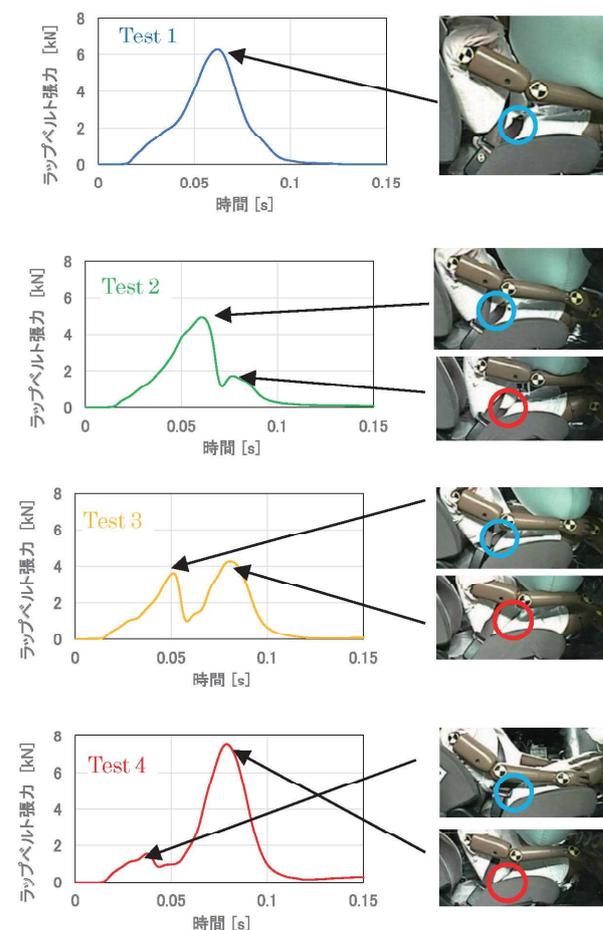


図7 ラップベルト張力の時間履歴

#### 5. 考察

今回の実験では、座席背面の角度を大きくした場合

について、UN-R137 が規定する傷害値を上回ること  
はなかったが、ラップベルトが腰部から外れること  
により、腹部傷害をもたらす可能性があることがわか  
った。

衝突時におけるダミー各部移動量は、図8に示す  
とおり、上半身では Test 1 に比べて Test 2～Test 4  
で大きくなっているが、膝部は青線の移動軌跡で示す  
ように実験条件による差は少ない。これは、上半身の移  
動はショルダーベルトやエアバッグによる拘束によ  
るものであるのに対して、下半身の移動はインパネな  
ど車室内部材によっても制限されるからであると思  
えられる。したがって、後席のように下半身の前方移  
動を制限するものがない場合は、ラップベルトによる  
腹部圧迫が大きくなる可能性がある。

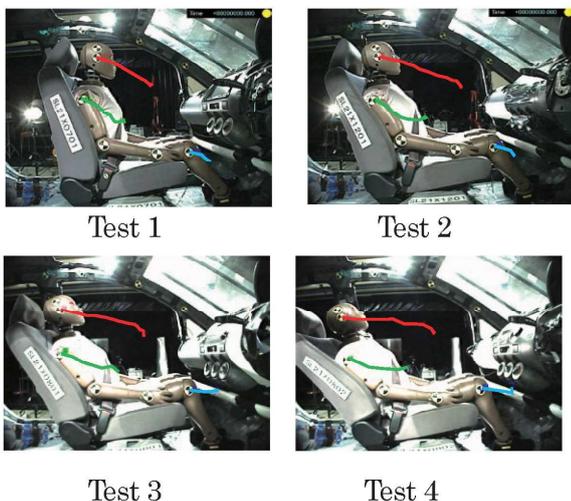


図8 ダミー各部の移動軌跡

#### 4. まとめ

今回の実験条件では、座席背面の角度を大きくした  
場合でも、現行の試験法規で規定された傷害値を上回  
ることはなかった。一方で、座席背面角度が 10 度程  
度後方に倒れただけでもラップベルトが腰部から外  
れ、腹部に大きな荷重が負荷される可能性があること  
が確認できた。

運転支援装置の普及が進み、さらに自動運転車両が  
普及すると、運転者を含む車両乗員の乗車姿勢はこれ  
まで以上に多様化することが予想される。特に、座席  
背面角度が大きくなるような乗車姿勢は、これまで想  
定していなかった腹部傷害を増加させる可能性がある。

今後、車両の衝突安全性能を評価する場合には、予  
防安全装置や自動運転技術を考慮にいれた傷害値や

評価項目の検討が必要であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 細川 他, “衝突被害軽減ブレーキ作動時の乗員  
挙動が衝突時の乗員傷害に及ぼす影響調査”, 交  
通安全環境研究所フォーラム 2020, pp.65-66  
(2020)
- 2) 細川 他, “乗車姿勢が衝突時の乗員傷害に及  
ぼす影響について—小柄女性ダミーによる検討  
—”, 交通安全環境研究所フォーラム 2021,  
pp.61-62 (2021)

# 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では、平成 23 年 4 月に鉄道認証室を設置するとともに、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。以来、10 年余が経過したところであり、ここでは、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は、一般的には、製品供給側（メーカ等）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 EN 規格（欧州統一規格）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 月に鉄道認証室が設置された。平成 28 年

4 月以降は、独立行政法人自動車技術総合機構内の機関として「交通安全環境研究所」が位置づけられた。現在の認証業務実施体制の概要を図 1 に示す。

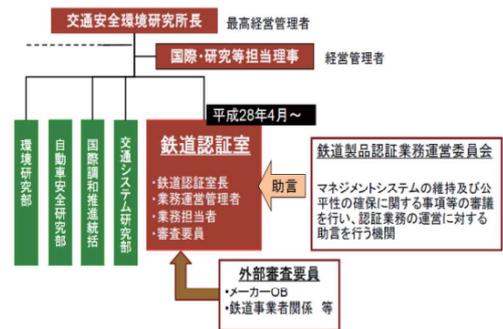


図 1 認証業務実施体制

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戴いている。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戴く鉄道製品認証業務運営委員会から助言を戴く体制となっている。

令和 2 年度から、業務量の増加傾向が顕著となったため、引き続き、体制の強化を図っているところである。

### 2. 2. 認証対象規格と認定の取得

認証対象規格は、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。平成 24 年 9 月に IEC 62425 を対象とする認定を取得して以降、認定機関による定期的な検査が実施され、当認証機関の適格性が継続的に認められてきており、平成 28 年 9 月には、IEC 62279 及び IEC 62280 について、さらに平成 30 年 5 月には、かねてより関係者から要望のあった IEC 62278 の認定を取得した。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	○
	クローズド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 52 件 (規格件数) である (図 2 参照)。一つの案件で複数の規格適合性を申請される場合があり、案件数では 42 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。

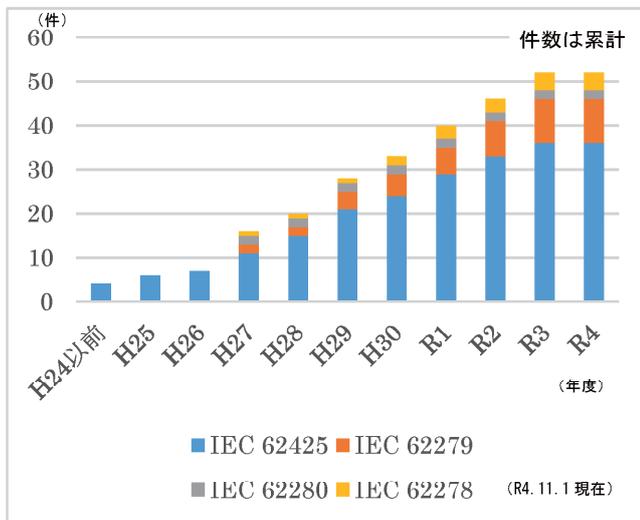


図 2 認証書発行実績 (規格件数)

#### 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

期的に実施している。

##### (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。令和 2 年度には、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の掲載を開始し、令和 3 年度においても、掲載情報の拡充を行った。

##### (3) その他

交通研フォーラム及び各種講演会での報告等を行っている。令和 4 年 2 月～12 月の予定で、国際規格と安全性・セキュリティに関する Web セミナー (全 5 回) を開催中である。

#### 3. 3. 鉄道製品認証システム (認証スキーム文書) の改定

RAMS 製品認証について、第 7 段階 (製造) までから、第 8 段階 (設置) まで、又は第 9 段階 (システムの妥当性確認) まで、認証対象範囲を拡大 (令和 3 年 4 月 1 日施行) しており、これについては、実際に申請を受け、認定取得に向けて取り組んでいきたいと考えている。

### 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。

# 講演 9. 陸上交通のシステム開発における ライフサイクルとセキュリティ

鉄道認証室 ※森 崇 吉永 純

## 1. はじめに

近年陸上交通においても、安全性を中心としたライフサイクル管理の標準だけではなく、セキュリティに関する標準も整備されつつある。サイバーセキュリティに関する標準としては、産業用オートメーション及び制御システム(IACS：Industrial Automation and Control System)全般を対象としたセキュリティ標準 IEC 62443 (Industrial communication networks – Network and system security)が着目され、鉄道においてもシステムとこの標準との整合性が問われつつある現状となってきた。

しかしながら、IEC 62443 は、項目が多岐にわたり、分冊も多く、標準を今後活用していこうとするユーザーにとっては決してわかりやすいとは言えず、その複雑さが障壁となっている。このため、鉄道においては、IEC 62443 を鉄道に活用した場合、開発・設計の特定のタイミングで具体的に何をすべきかをある程度具体化した CLC/TS 50701 が発行され、活用が見込まれている。

また自動車においても、ISO/SAE 21434 が発行されている。

本稿では、鉄道及び自動車で使用されているライフサイクルモデルを元に、機能安全についてある程度知識がある方が、サイバーセキュリティについて検討する際に、特徴的な点や、注意した方がよい点を記述する。

## 2. ライフサイクルモデル

鉄道において、機能安全や、システム全体の安全性と経済性のバランスを考える際に参照するライフサイクルは、一般的に RAMS (Reliability, Availability, Maintainability and Safety)ライフサイクルといわれるいくつかの段階が定義されている。RAMS ライフサイクルモデルには IEC 62278 と、EN 50126 に定

義されているものがあり、このライフサイクルモデルに沿った設計・製作・試験・運用がシステム発注者によって求められる場合が増加している。この2つのライフサイクルモデルの違いは、Operation and Maintenance 以降の段階の区分にあり、開発・製作段階において大きな差異はない。

自動車においても、ISO/SAE 21434 は、E/E(Electric and Electronics)における安全ライフサイクルの行為を規定した機能安全標準である ISO 26262 のライフサイクルに沿った要求を定義している<sup>[1]</sup>。これらから分かるように、鉄道においても、自動車においても、既存のライフサイクルモデルに、サイバーセキュリティの観点を加え、既存のモデルを活用できるように工夫されているものである。

図 1 に CLC/TS 50701 の参照モデルとなっている EN 50126<sup>[2]</sup>のライフサイクルモデル、及び図 2 に ISO/SAE 21434 の参照モデルである ISO 26262<sup>[3]</sup>のモデルを示す。

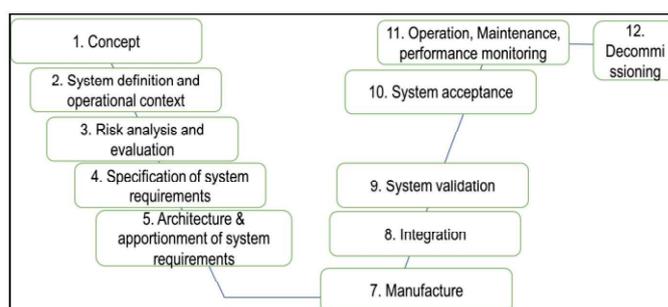


図 1 EN 50126 のライフサイクルモデル

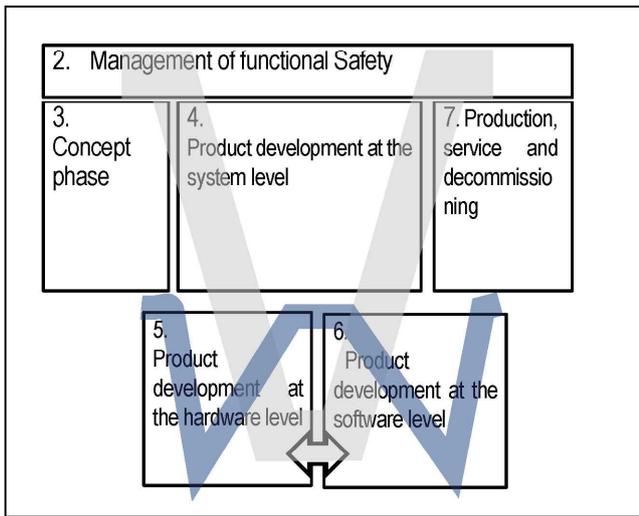


図 2 ISO 26262 ライフサイクルモデル

これらのライフサイクルモデルは、コンセプトをブレイクダウンし、システム的设计・製作を行うとともに、そのブレイクダウンの粒度と相当する試験を確実に実施する管理体制を構築し、機能安全の構築や安全と経済性のバランスをとることを目的としている。これは機能安全を「サイバーセキュリティ」に置き換えても成り立つ。このライフサイクルモデルを活用し、サイバーセキュリティの対処をどうするかを考えるのは前述のように今までの思想の延長線上にあると言える。

### 3. 機能安全とサイバーセキュリティの対処の差異

機能安全もサイバーセキュリティも人命を毀損する恐れがあるという点では同じであるが、機能安全はシステムの不具合から人を守り、サイバーセキュリティ対策は、外部からの攻撃に対してシステムを守る相互補完的な関係にあると CLC/TS 50701 は述べている。

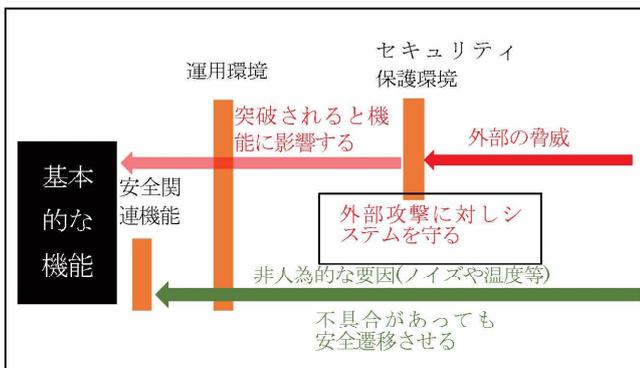


図 3 機能安全とサイバーセキュリティ防護の基本的な考え方

図 3 に基本的な機能安全対処とサイバーセキュリティの対処を示す。

サイバーセキュリティの外部脅威に対しては、まずセキュリティ保護環境 (Security-protected Environment) を設け、この層で外部攻撃を無効化する。外部攻撃に対し、リスクの低減がセキュリティ保護環境において十分ではない場合、脆弱性 (Vulnerability) となる<sup>14</sup>。脆弱性があってもそれは直ちにシステムの機能に影響を与えるかどうかは一概には言えず、運用環境(ネットワークがどの程度脅威にさらされているかなど)にも大きく依存する。

一方、機能安全については、偶発故障 (Random fault) によるものは、サイバーセキュリティの運用環境とは観点が大きく異なるが、ノイズ、温度、湿度など運用環境に依存し、偶発故障が起こったとしても、安全に状態が遷移するように、安全要求機能を設定し、故障時安全側遷移をするフェールセーフ性を確保することにより対処を行っている。

以下に、各段階における対処の差異を述べる。図 4 に EN 50126 のライフサイクルモデルと、そのライフサイクル段階で CLC/TS 50701 に要求されているサイバーセキュリティについての項目を示している。

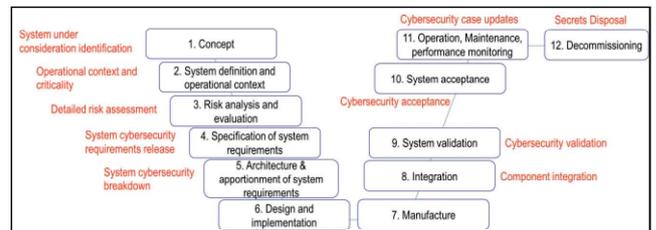


図 4 EN 50126 RAMS ライフサイクルとサイバーセキュリティ要求項目

#### 3. 1. コンセプト

システムのコンセプトを確立する際、システムの範囲、目的、ユーザーのシステムにおける考え方を明らかにしていく。この際に安全に関する基本的な考え方を明確にしていく。安全に対する基本的な考え方において、機能安全の場合、ライフサイクル全体で装置の故障が発生しても、許容範囲を超えない頻度で安全側に遷移するフェールセーフ思想でシステムを構築する<sup>15</sup>。しかしながら、サイバーセキュリティへの対処

については、相手のレベルアップや予期しない脆弱性の発見などの対処が出来るようにシステムの準備をしておくことが求められる<sup>6)</sup>。言い換えると、機能安全については事前対処、サイバーセキュリティについては機能安全の事前対処に加え、将来対応できるような準備をコンセプトとして考えておく必要がある。

この対処について、鉄道においては、サイバーセキュリティに対する対処と、安全関連系の防御は切り離して考えることが一般的である。

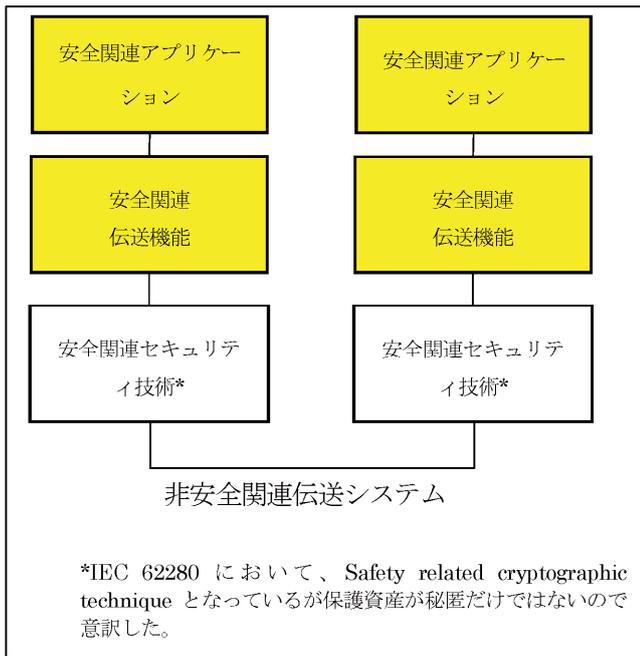


図5 IEC 62280 における伝送参照モデル  
(黄色の部分安全関連系として管理することが要求されている)

図5に IEC 62280:2014 (Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related communication in transmission systems)に示されている伝送参照モデルを示した。そのモデルの中で、黄色で示されている部分は、安全関連系として(機能安全として)扱うこととして示されている。人為的ではない機能安全を阻害する伝送エラーについては、安全関連伝送機能により、機能安全の実現として対処を行うこととなっている。これは、ノイズによって引き起こされる、ランダムエラーやバーストエラーの対処であり、システムの改修や環境条件の変化がない限り、ライフサイクル全体によってそれほど変化するものではない。また、前提とするエラーの特性に十分な対応能力を持つ、CRC 検定をはじめと

するメッセージダイジェスト符号で誤りの検出を行うことが一般的であり、その符号の符号化と復号化は、安全関連系のハードウェア、ソフトウェアとそれに適した技術と管理手法で行う。

一方、サイバーセキュリティへの対応は、「安全関連セキュリティ技術」で行い、これは機能安全による対応は必ずしも求められていない。

自動車においても、ISO/SAE 21434 によると、機能安全の人的な役割・責任のプロセスをサイバーセキュリティの力量などに含むことができ、機能安全とサイバーセキュリティの要求の矛盾を解消することが求められているが、セキュリティ技術の実装に機能安全は求められていない。

これは、セキュリティ技術については、世の中の技術をそのまま導入することのメリットが、自ら製作者が作ることよりも大きいことや、対応の迅速性が求められることなどから、現実的な解法としてこのような規定になっていると考えられる。

また、鉄道においては、サイバーセキュリティのアイテムの設計・製作自体が定義されておらず、自らサイバーセキュリティに関連するアイテムを製作することが、標準上想定されていないことにも留意する必要がある。

### 3. 2. リスク解析

機能安全について、一般的に考えられるのは、許容される THR(Tolerable Hazard Rate)を設定し、機能分析し、機能ごとに TFFR(Tolerable Functional Failure Rate)を決定し、受容できるリスクを機能ごとに設定する方法である。また、この受容可能リスクの厳しさに整合するよう SIL(Safety Integrity Level)を設定し、採用する品質管理及び技術的手段を決定する。この際、部品の故障など、確率論的なアプローチで対処できるものにおいては、どのような対策を行えば受容できるレベルまでリスクを低減できるかの解析方法の一つとして、FTA(Fault Tree Analysis)を採用することが一般的である。

力が向上することや、脆弱性の発見など変化があることに留意する必要がある。

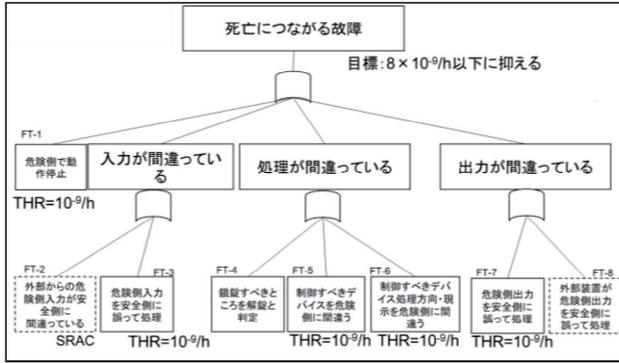


図 6 FTA 解析のイメージ

対してサイバーセキュリティにおいては、「どの程度脅威にさらされているのか(誰でもアクセスできるか、システムが専用機器室に収容されているか、インターネット接続か、専用線かなど)」「脆弱性のレベルとアタッカーの実力」など、環境条件が大きなファクターとなり、確率的なアプローチでは解析できないと考えられる。このため、攻撃の容易さを指標として解析を行う、「アタックツリー解析」が ISO/SAE 21434 で定められており、有効であると考えられる。

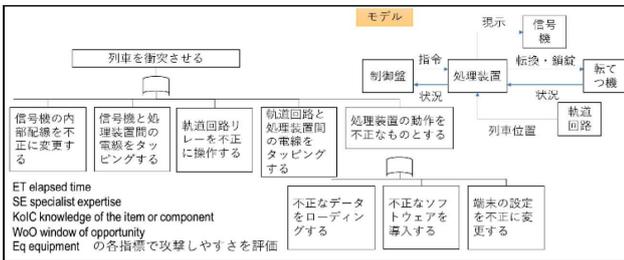


図 7 アタックツリーのイメージ

アタックツリーなどの解析をもとに、SI (Security Level) という概念を導入することが IEC 62443 に規定されている。各機能において、サイバーセキュリティ上求めるレベルである SL-T (Target) を設定し、技術的対応とその能力である SL-C (Capability) を選択し、SL-C の選択後、どのレベルまで到達したかを評価する SL-A (Achieved) を同定し、SL-T の求めるレベルまで到達したかを評価する。

自動車においても、cybersecurity assurance level (CAL) というレベルにおいて評価する方法が述べられている<sup>[7]</sup>。しかしながら、基本的にはライフサイクル全体を継続的に評価することについては、攻撃者の能

### 3. 3. 運用とメンテナンス

鉄道における機能安全については、運用とメンテナンスについては FRACAS (Failure Reporting Analysis and Corrective Action System) を使い、情報分析を行い、PDCA を回すことになっているが、それほど重視されているわけではない。しかしながら、自動車においては、不特定多数が占有される動産として扱われることから、制御システムを解析することが、鉄道に比べて容易であり、鉄道のサイバーセキュリティ対策と比べても、情報収集とトリアージに重点が置かれていることが特徴的である。

### 4. おわりに

本報告では、鉄道と自動車の標準を双方参照し、ライフサイクル管理における機能安全とサイバーセキュリティにおける取り組みの差異のうち、注意すべき点を示した。今後とも陸上交通に関する機能安全及びサイバーセキュリティ標準に着目し、皆様から信頼される鉄道認証業務を遂行して参りたい。

### 参考文献

- 1) INTERNATIONAL STANDARD ISO/SAE 21434:2021, Figure 1 - Overview of this document<sup>\*</sup>
- 2) EUROPEAN STANDARD EN 50126:2017, 6.2 Life cycle for the system under consideration
- 3) INTERNATIONAL STANDARD ISO 26262-2:2018-“5.2.1 Overview of the safety lifecycle”
- 4) TECHNICAL SPECIFICATION CLC/TS 50701:2021, Annex D Safety and Security
- 5) INTERNATIONAL STANDARD IEC 62278:2002, 4.8 Fail-safe concept
- 6) TECHNICAL SPECIFICATION CLC/TS 50701:2021, 5.3 Activities, synchronization and deliverables
- 7) INTERNATIONAL STANDARD ISO/SAE 21434:2021, Annex E Cybersecurity assurance levels

# 講演 10. 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

小磯 和子

## 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

2021 年度の審査部における審査型式数は、自動車にあつては 1,878 型式（前年比 996 型式減）、自動車装置にあつては 581 型式（前年比 229 型式減）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、2021 年度は 121 件（前年度比 460 件減）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、2021 年度は 241 件（前年比 17 件増）の受託があつた。

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つたこと、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 年度については前年度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。

- ・乗用車等の衝突被害軽減制動制御装置（協定規則第 152 号）
- ・サイバーセキュリティシステム（協定規則第 155 号）
- ・プログラム等改変システム（協定規則第 156 号）
- ・後退時車両直後確認装置（協定規則第 158 号）
- ・事故情報計測・記録装置（協定規則第 160 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、2021 年度の実績は申請自動車メーカー数は 7 社 評価型式数 238 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

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ている。



図 3 RDE 試験スキルアップ研修の様子

## 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。

2021 年度は特定改造等能力審査を 6 件、特定改造等に係る保安基準適合性審査を 15 件実施した。

## 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。

## 3. 2. 自動車試験施設の整備

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

ポール側面衝突試験に対応した衝突試験施設や WLTP 試験に対応した排出ガス試験施設について運用を開始したほか、車両接近通報装置の接近通報音及び後退警報装置の試験に対応した半無響室施設などを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、審査に必要となる知識・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 11. 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

大森 隆弘

## 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「次世代モビリティの実現に向けた取り組み」として、次世代モビリティに係る安全性の確保、環境の保全等の観点から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、国土交通省自動車局審査・リコール課と連携して、ユーザー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においては、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	R1	R2	R3
ユーザーからの不具合情報	3,458	3,811	3,509
メーカーからの事故・火災情報及び不具合情報	4,787	4,504	5,894
その他（警察、消防、消費者庁等）	702	552	402
計	8,947	8,867	9,805

### 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交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5のようになっている。

表5 事故・火災車両の調査件数の推移

年度	H28	H29	H30	R1	R2	R3
事故	21	15	20	15	10	22
火災	44	54	56	48	43	47
合計	65	69	76	63	53	69

### 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3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測定に加えて、路上走行等による排出ガス測定を行い、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3 車載式排出ガス測定システム (PEMS)

### 2. 1. 3. 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. 4. 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、今年度から運用を行っている。

## 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6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2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2 技術検証の実績

年度	H28	H29	H30	R1	R2	R3
開始した技術検証事案数	85	133	200	132	92	67
終了した技術検証事案数	112	96	97	141	107	97
リコールに繋がった技術検証事案数	21	18	11	17	21	16
(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	364	377	408	415	384	369

### 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6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して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 6 技術検証実験のテーマ数の推移

年度	H28	H29	H30	R1	R2	R3	
実験テーマ総数	10	13	10	10	10	11	
内訳	個別事案の検証	3	1	3	3	2	1
	知見の蓄積	7	12	7	7	8	10
	うち、火災関係	3	4	3	4	1	2
	うち、ASV関係	0	9	4	5	5	5

※「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<sup>2)</sup>によれば、表 7 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 55% 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、出火原因が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、エンジン失火時の燃料カット機能や、燃料がキャニスタに流れ込んだ場合の影響など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 7 車両火災の主な出火原因（令和 2 年）

出火原因	件数
排気管	563
放火（放火の疑いを含む）	223
電気装置	264
交通機関内配線	320
たばこ	115
その他（不明・調査中含む）	1,981
計	3,466

### 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 4、図 5）。



図 4 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 5 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

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。

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。

## 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）の装着割合<sup>3)</sup>については、令和元年では93.7%に達している。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、次世代モビリティの実現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。

### <参考文献>

- 1) 国土交通省「令和3年度リコール届出内容の分析結果について」
- 2) 消防庁「令和3年版消防白書」
- 3) 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）

# ポスターセッション



# ①路上走行試験における温度湿度影響の検討

環境研究部

※川原田 光典

## 1. はじめに

2022年10月から新型のディーゼル乗用車等を対象とした路上走行時の排出ガス試験が認証試験に導入され、窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）の排出量について台上試験における基準値の2倍を超えないことが求められる。これは2015年9月に発覚したフォルクスワーゲン社による排出ガス不正事案を受けて設置された「排出ガス不正事案を受けたディーゼル乗用車等検査方法見直し検討会」<sup>1)</sup>により同種事案の再発防止の検討を行った結果、対策の1つとして上記の導入が決定されたものである。

これまで燃費及び排出ガスの認証試験ではシャシダイナモメータを用いる台上試験のみ実施されてきた。台上試験では、車輪をローラー上に設置するよう車両を固定し、あらかじめ定められた速度パターンを走行する。現在の試験法は Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure : WLTP（国際調和排出ガス・燃費試験法）に基づく WLTC の速度パターンを用いる方法である。WLTC モード（Class 3b）の速度パターンを図1上に示す。Low（L）、Medium（M）、High（H）、Ex-High（ExH）の4フェーズ（国内認証試験ではL、M、Hの3フェーズ）があり、それらを連続で走行する。認証試験の際の環境条件は、温度23℃及び湿度50%RH（Relative Humidity：相対湿度）と規定されている。

これに対して路上走行試験法（道路運送車両の保安基準第31条、細目告示別添119）で規定されている温度域は-2℃から38℃であり、湿度範囲の指定はない。さらに実路では日射や地面からの照り返し、風や天候の影響などを受け、車両周囲の温度湿度は刻一刻と変動する。この条件下で試験法に沿ったルートで路上走行を実施し、図1のように台上試験とは走行速度が異なることから、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量に基づいてNO<sub>x</sub>排出量を台上試験と比較可能な値に再計算する。しかし、この時には一部の温度条件を除いて路上走行時の温度湿度の影響は考慮されない。これまでに交通安全環境研究所では、車両周囲の温度湿度の影

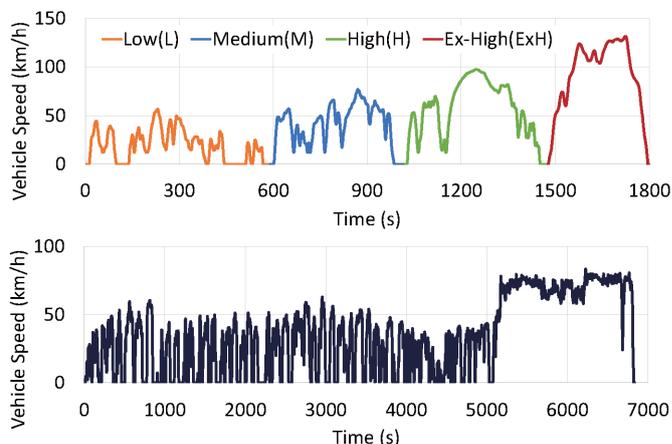


図1 WLTCの走行速度パターン（Class 3b）（上）及びRDE試験の走行速度パターン例（下）

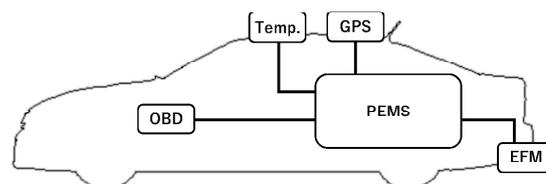


図2 計測システム

響を検討し、NO<sub>x</sub>排出量の湿度補正方法について報告した<sup>2)</sup>。本稿では既報で用いた補正方法を、実際の路上走行試験において得られたデータに適応し、温湿度影響について検討する。

## 2. 計測装置

図2に計測システムの模式図を示す。路上走行試験法で規定されている車載式排出ガス分析計（Portable Emission Measurement System; PEMS）を用いて計測を行った。排出ガス成分データに加えて Exhaust Flow Meter（EFM）による排出ガス流量、On Board Diagnostics（OBD）による車両情報、Global Positioning System（GPS）による位置情報、及び温度湿度センサによる環境情報を取得した。本稿においては、車両の天井にとりつけた温度湿度センサによる計測値を代表として使用した。なお、試験にはセダンタイプのディーゼル乗用車（ポスト新長期規制対応）を用いた。

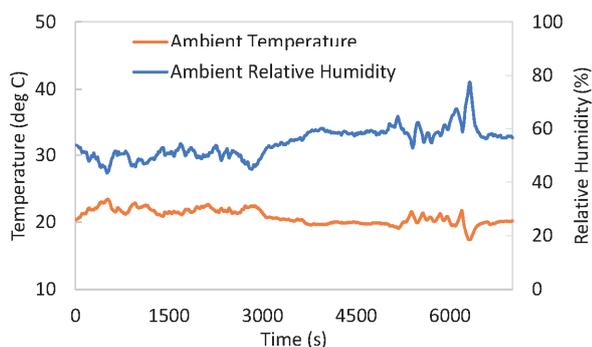


図3 温度湿度変化

### 3. 実験結果

図3に実験で得られた温度及び湿度の時間変化を示す。最大値と最小値を比較すると、温度で5°C程度、湿度で30%RH程度の変動があることがわかる。この環境条件で得られたNO<sub>x</sub>の測定結果について補正を試みた。補正方法は既報<sup>2)</sup>と同様とし、環境条件から算出される補正係数KHをNO<sub>x</sub>の排出量に掛け合わせた。以下にKHの算出式を記載する。

$$KH = \frac{1}{1 - 0.0182(H - 10.71)}$$

$$H = \frac{622e}{P_a - e}$$

ここで、KH : 湿度補正係数

H : 空気中の水分 (g) と  
乾燥空気 (kg) との質量比

e : 空気の水蒸気圧 (kPa)

P<sub>a</sub> : 大気圧 (kPa)

本稿では上記のKHを路上走行試験の結果に適用するにあたって、台上試験の環境条件である23°C、50%RHにおいてKH=1(補正無し)となるように、下記の通り変更した。

$$KH' = \frac{1}{1 - 0.0182(H - 8.749)}$$

図3に示す時系列データを用いてTetensによる近似式<sup>3)</sup>により飽和水蒸気圧を算出しeを求めた。P<sub>a</sub>については、気圧計による計測値をそのまま用いた。1秒ごとに算出したKH'を図4に示す。試験開始からしばらくは0.99程度であり、湿度が変動する5000秒

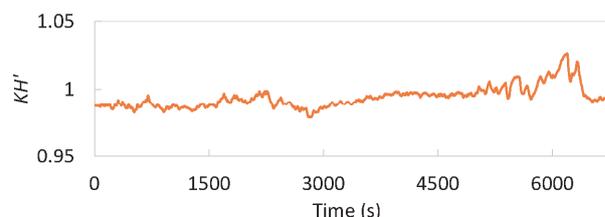


図4 KH'の時間変化

以降において、1を超えた。台上試験の環境条件である23°C、50%RHと比較して、わずかに空気中の水蒸気量が少ない条件から多い条件まで含まれた試験環境であったことが示唆される。このKH'によって補正したNO<sub>x</sub>の瞬時排出量を用いて路上走行試験中のNO<sub>x</sub>排出量を再計算したところ0.3mg/kmの減少にとどまった。比較的穏やかな天候下の走行であり、温度湿度条件が台上試験と比較して大きく変化しなかったため、ほぼ補正のない結果となったものと考えられる。今後は高温多湿の梅雨時や低温低湿の冬場の走行データを取得して影響を検討する。さらに、将来的には路上走行と同様の走行パターンをシャシダイナモメータ上で再現し、車両周囲の温度湿度を変化させた試験を実施することにより、温度湿度影響の補正手法の検討や妥当性の検証を行う。

### 5. おわりに

本検討では、路上走行試験における温度湿度影響の補正を検討するため、湿度補正係数KH'を用いた。路上走行で得られた温度湿度のデータから補正係数を算出したところ、穏やかな天候であったことからほぼ補正のない結果となった。今後は高温多湿や低温低湿の条件でデータを取得し影響を検討する。さらに、シャシダイナモメータ上で温度湿度を変化させた試験を実施することで、補正手法の検討や妥当性の検証を行い、将来の試験法策定の一助とする知見を得る。

### 参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ:  
[https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha\\_tk10\\_000035.html](https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_tk10_000035.html) (参照 2022.08.17)
- 2) 川原口光典, 奥井仲宜 “車両周囲の温度湿度環境が乗用車の排出ガス性能に与える影響”, 自動車技術会論文集, Vol.53, No.5, p.985-990 (2022)
- 3) Tetens, O. "Über einige meteorologische Begriffe", Z. Geophys., 6, p. 297-309 (1930)

## ②NO<sub>x</sub> センサを用いた重量車排出ガス計測システムによる 尿素 SCR 触媒における NO<sub>x</sub> 浄化性能の把握

環境研究部

※山本 敏朗

### 1. まえがき

現在、地球温暖化対策として、欧州を中心に、自動車の電動化が進められている。しかしながら、大型重量貨物車の電動化技術においては、現状レベルの積載重量及び輸送距離を維持することが難しいことから、短期間での電動車等への転換は困難であると考えられる。このことから、高効率ディーゼルエンジンの開発は、これからも続くものと推測される。一方、エンジンの高効率化が進んでも、窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) 対策は必須であると考えられる。現在の主流の対策である尿素を還元剤とした NO<sub>x</sub> 選択還元触媒システム (尿素 SCR システム) の性能向上はこれからも重要となる。尿素 SCR システムは、平成 17 年規制 (新長期規制) 適合車から一部の車種に初めて採用され、平成 21 年規制 (ポスト新長期規制) 適合車では尿素 SCR システムが主流となった。尿素 SCR システムとは、排気管に噴射した尿素水の熱分解及び加水分解により生じるアンモニア (NH<sub>3</sub>) を還元剤として、排出ガス中の NO<sub>x</sub> を還元して窒素 (N<sub>2</sub>) と水 (H<sub>2</sub>O) に分解する選択式還元触媒 (SCR 触媒) を中心とする触媒システムである。SCR 触媒は、鉄 (Fe) 系ゼオライト触媒、銅 (Cu) 系ゼオライト触媒等の種類が存在するが、積算走行距離の増加に伴い、性能劣化することがわかっている。現在、重量車の積算走行距離は、100 万 km 超となる場合もあり、実走行時の排出ガス性能確保の重要性が増しているものの、尿素 SCR システムの使用過程での性能変化等に関する知見が少ない。

このことから、本報では、尿素 SCR 触媒の使用過程での NO<sub>x</sub> 浄化性能の把握を目的として、運送事業用の平成 28 年排出ガス規制適合のディーゼル重量車に、NO<sub>x</sub> センサ、NH<sub>3</sub> センサ等の排気管直挿型センサを用いた車載型排出ガス分析装置 (SEMS : Sensor-based Emissions Measurement System) <sup>1)</sup> を装着してデータを収集し、これらのデータを用いて、平成 28 年規制適合車から尿素 SCR システムに導入されている Cu 系

ゼオライト SCR 触媒の実路走行時の NO<sub>x</sub> 浄化性能を調査した。以下に、その概要を報告する。

### 2. 実験方法

尿素 SCR 触媒における NO<sub>x</sub> 浄化性能の調査には、本調査に協力いただいた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 7.8 t、EGR 及び尿素 SCR システム搭載、積算走行距離 208,000km) を用いた。同車両に、SEMS を装着し、通常運送業務の中で、NO<sub>x</sub> 濃度、NH<sub>3</sub> 濃度、排出ガス温度、走行条件等のデータを収集した。SEMS を構成する NO<sub>x</sub> センサ (限界電流型 ZrO<sub>2</sub> センサ)、NH<sub>3</sub> センサ (混成電位型 ZrO<sub>2</sub> センサ)、排気温度センサ等のテールパイプへの取付状況を、図 1 に示す。走行試験データは、サンプリングレート 0.1 秒等で収集されて、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、1 日の運送業務終了後に収集データに異常はないか等の試験実施状況の確認を行った。尿素 SCR 触媒の NO<sub>x</sub> 浄化性能の評価には、触媒層の前後の NO<sub>x</sub> センサによる NO<sub>x</sub> 濃度の測定値から、「瞬時 NO<sub>x</sub> 浄化率」を概算して用いた。なお、触媒層前の NO<sub>x</sub> 濃度データは、尿素 SCR システムの制御用センサの信号から取得した。



図 1 SEMS のテールパイプへの取付状況



図2 走行試験ルート

### 3. 実験結果及び考察

#### 3. 1. 走行試験ルート及び走行条件の選択

本調査では、尿素SCR触媒の性能評価のため、高速道路走行ルートに着目した。同ルートにおいては、信号機による発進・停止がなく、走行中の速度を80km/h程度の一定速度に定めることができることから、尿素SCR触媒のNOx浄化性能等を評価するのに適している。図2に、選択したルートを示す。茨城県鹿嶋市を出発して、東関東自動車道、東名高速道路、新東名高速道路を走行して岐阜県各務原市に至るルートである。東関東自動車道の湾岸幕張PA付近を走行中にディーゼル微粒子捕集フィルター(DPF)の自動再生処理が行われた。DPF再生中は排出ガス温度が昇温され、触媒温度が高いときのNOx浄化性能を観測できることから、これを含む走行時の性能評価を行った。

#### 3. 2. 尿素SCR触媒のNOx浄化性能の分析

尿素SCR触媒による、NOx還元反応の分析に、瞬時NOx浄化率を用いた。この算出には、尿素SCR触媒前後でのNOx濃度の測定値が必要になる。尿素SCR触媒前のNOx濃度は尿素SCRシステムの制御用NOxセンサの信号(CAN信号)から、また、尿素SCR触媒後のNOx濃度はSEMSのNOxセンサの信号から、それぞれ取得した。DPF自動再生を含む走行時の瞬時NOx浄化率は、以下の式で概算した。

$$\text{尿素SCR触媒の瞬時NOx浄化率 (\%)} = (\text{触媒前NOxセンサのNOx濃度} - \text{触媒後NOxセンサのNOx濃度}) / \text{触媒前NOxセンサのNOx濃度} \times 100$$

ここで、瞬時NOx浄化率は、サンプリングレート0.5秒毎に算出している。触媒のNOx浄化率は、触媒層で浄化されたNOx量と触媒層に流入したNOx量の比率を表す。本報では、瞬時値としての浄化率の算出において、排出ガス流量は変化せず一定と仮定し、NOx濃度値のみで算出している。

上記の式を用いて、図2で示した東関東自動車道の

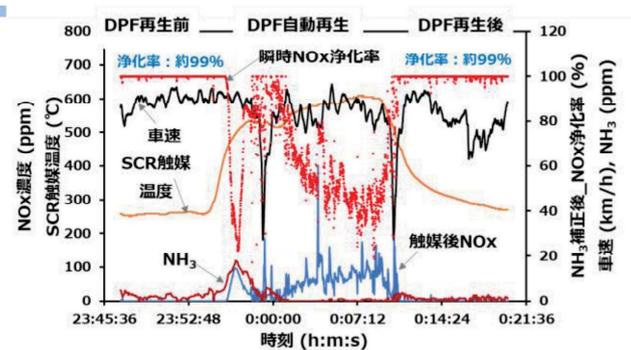


図3 実路走行時における尿素SCR触媒の瞬時NOx浄化率の変化

湾岸幕張PA付近を走行時の尿素SCR触媒の瞬時NOx浄化率を算出した。その結果を、図3に示す。同図より、DPF自動再生が生じる前と後の車速80km/h程度の走行条件では、瞬時NOx浄化率は約99%と高い値を示している。また、DPF自動再生中は、SCR触媒の昇温過程の400°C後半にNOx及びNH<sub>3</sub>が排出されて一時的に浄化率は低下するが、直ぐに80%程度まで回復している。その後、SCR触媒温度が600°C程度まで上昇する過程で、浄化率は徐々に40%程度まで低下していることがわかる。これは、DPF自動再生により、SCR触媒温度が上昇して、SCR触媒に吸着しているNH<sub>3</sub>(還元剤)の酸化が活発化し、瞬時NOx浄化率が低下したものと推測される。

### 4. まとめ

尿素SCR触媒の使用過程でのNOx浄化性能を把握するため、運送事業用の平成28年排出ガス規制適合のディーゼル重量車にSEMSを装着して実路走行時におけるデータを収集し、Cu系ゼオライトSCR触媒のNOx浄化性能を、瞬時NOx浄化率を指標として分析した。

車速80km/h程度の高速道路走行条件では、瞬時NOx浄化率は約99%と高い値を示した。DPF自動再生中は、SCR触媒温度が600°C程度まで上昇する過程で、浄化率は徐々に40%程度まで低下した。これは、SCR触媒に吸着しているNH<sub>3</sub>(還元剤)の酸化が活発化し、瞬時NOx浄化率が低下したものと推測された。

### 参考文献

- 1) 山本敏朗, 堤 玲子, 水嶋教文, 渡辺敬太郎, “NOxセンサベースの車載計測器による路上走行時における重量貨物車のNOx排出量評価”, 自動車技術会論文集, Vol. 46, No. 5, pp. 975-980 (2015)

# ③地方鉄道を対象とした列車動揺データに基づく 軌道監視手法の検討

交通システム研究部

※緒方 正剛 一柳 洋輔 佐藤 安弘

篠田 憲幸（客員研究員）

## 1. はじめに

地方鉄道において軌道管理の省力化を実現するために、小型情報端末を活用した新たな軌道監視手法について研究を進めており、令和3年度講演会において報告したり。その中で、軌道検測車による線路保守の基準値をもとに、列車動揺の基準値を提案することが課題となっていたが、その後、列車動揺の実測データと、軌道検測車による軌道変位のデータを用いて検討を進めた。その結果、軌道の高低変位と列車動揺の散布図を用いた評価方法、営業列車の動揺計測に基づく軌道監視手法を検討したので報告する。

## 2. 背景とこれまでの検討

### 2. 1. 従来の軌道管理の方法

軌道の維持管理は、従来から5項目(高低、通り、水準、軌間、平面性)の軌道変位の検測データをもとに行われている。これらは、軌道検測車、簡易軌道検測装置または手検測により定期的に測定される。また、軌道変位の検測を補完するものとして、任意の区間を任意の時期に測定することのできる列車動揺検査が行われている。これは、台車中心床面上に振動計を設置し、上下振動と左右振動を測定して、過大箇所を抽出するものである。軌道検測車は地方鉄道路線に導入するには非常に高価であり、また、簡易軌道検測装置または手検測では、1日に測定できる距離が限られる。これに対して、我々は列車動揺検査に必要な加速度センサなどの機材の低価格化・小型軽量化を背景に、列車動揺検査の方法を応用して地方鉄道の軌道監視手法の構築を進めている。

### 2. 2. 新たな軌道監視手法のコンセプト

地方鉄道事業者が、営業車両の振動加速度等を高頻度で測定を行うことで、異常の早期発見を可能とすることを目的とし、振動センサを内蔵した小型情報端末を利用し、データ取得をオンラインで行うことを検討した。列車位置は小型情報端末に内蔵されたGPS

(Global Positioning System) 受信機を利用し、GPSの搬送波のドップラー効果を利用した速度データを取得し、時間軸のデータを距離軸に変換する。さらに内蔵のジャイロセンサによって曲線の始終点を検出し位置同定の精度を上げる。

## 3. 列車動揺の基準値の検討

これまでの検討では、列車動揺データと軌道検測車による軌道検測データとの関連性を把握し、軌道検測車による線路保守の基準値をもとに、列車動揺の基準値を提案することが課題となっていた。そのため、以下の解析を行った<sup>2)</sup>。

### 3. 1. 上下振動と軌道の高低変位との関係

列車動揺のうち、車両の上下振動と軌道の高低変位の相関関係を調べるため、小型情報端末で測定した車両の上下振動のデータと、1m 間隔で測定された高低変位のデータとの関係について解析した。なお、解析区間は4 駅間で、列車動揺と高低変位との相関が低くなる低速区間は対象外とし、50 km/h 以上で走行する区間（距離約 8,400 m）について解析を行った。

上下振動については、営業列車で測定したデータのうち軌道検測日前後に測定した数日間のデータを抽出し、線路延長 10m ごとの区間での片振幅の絶対値の最大値(10 m 代表値)を求めた。高低変位については軌道検測車による検測データを用い、10 m 代表値を求めた。これらをプロットした散布図を図1に示す。なお、線路延長を 10m で区切ることにより、補修作業指示を出す場合の位置特定に便利である一方、これより短い区間で区切ると列車の位置誤差のため、経時変化が正確に把握できない恐れがある。

図1のデータについて線形回帰分析を行った結果、上下振動加速度  $x(m/s^2)$  と高低変位  $y(mm)$  の間には  $y=9.00x$  の比例関係があり、決定係数は  $R^2=0.89$ 、ばらつきを示す標準偏差は  $\sigma=3.39mm$  で、これらのデータは回帰式を中心にほぼ正規分布になっており、車

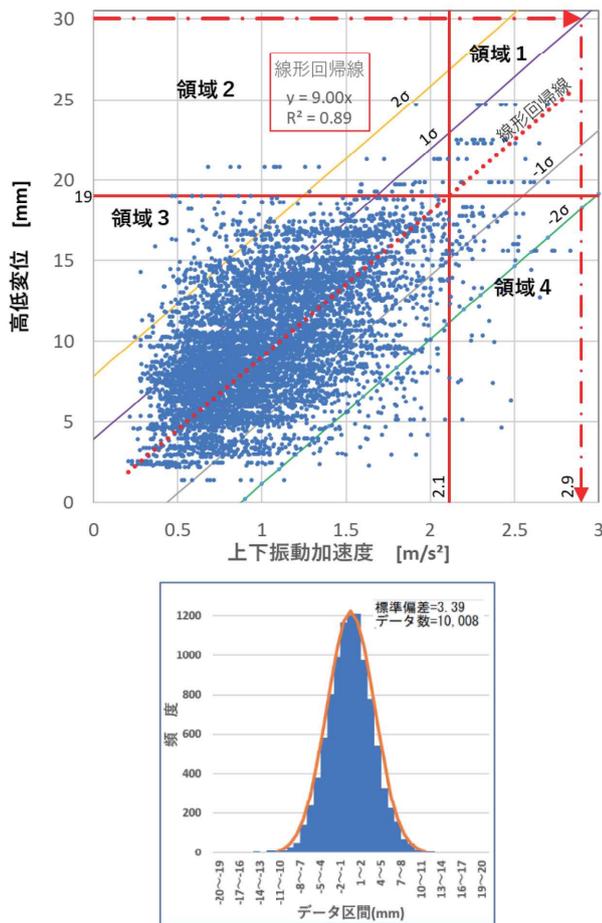


図1 上下振動加速度と高低変位の散布図

両の上下振動と軌道の高低変位との間には強い相関関係があることがわかる。また、図には示していないが、1年間隔を置いて検出された別の高低変位データ及び振動加速度データを解析した結果、回帰係数や標準偏差もこれと近い値であった。このことから、軌道変位の検出データのない期間でも、車両の上下振動の測定値から、軌道の上下変位の程度を推定することが可能であると考えられる。すなわち、毎日、車両の上下振動を測定することで、高低変位の変化を上下振動の変化から推定することにより、軌道管理が行える可能性があると考えられる。

### 3. 2. 上下振動による補修目標値の設定

図1に赤線で4つの領域を設定した。高低変位の19 mmは、軌道整備目標値(4級線における軌道検測車による動的値)を用いた<sup>3)</sup>。また、上下動については、列車動揺による整備標準値を参考に、小型情報端末の設置位置(台車中心床面上ではなく運転台に設置)を考慮して2.1 m/s<sup>2</sup>を補修目標値として領域分けを行った。領域1は、高低変位も大きく上下振動も大きい要注意箇所、領域2は高低変位が大きいのに上下

振動が小さいことから高低変位の大きな箇所を見逃す恐れがある、または軌道補修の効果があつた地点、領域3は高低変位も上下振動も小さく特に問題ない箇所、領域4は高低変位が小さいが上下振動が大きく、上下振動が漸増している恐れのある箇所、ということができる。

## 4. 列車動揺に基づく軌道監視手法

列車動揺に基づく軌道監視手法では、以下の手順によって、軌道状態の監視が可能となると考えられる。  
 ①: 軌道検測車の高低変位データから10 m代表値を作成、  
 ②: 検出の前後10日間程度の営業列車の上下振動のデータから10 m代表値を作成、  
 ③: ①と②から散布図を作成し、回帰式等を求める。  
 ④: 日々測定される営業列車の上下振動のデータから10 m代表値を作成、  
 ⑤: ④が③の散布図のどの領域に該当するかを判定する。要注意箇所(図1の領域1)となった場合は、例えば当該箇所の過去半年間の上下振動の経時変化から軌道劣化の予測を行い、整備基準値(図1の例では30 mm)に相当する振動加速度(図1の例では2.9 m/s<sup>2</sup>)を予測値が超えないように軌道整備を行うこととする。

## 5. まとめ

地方鉄道において軌道管理の省力化を実現するために、小型情報端末を活用した新たな軌道監視手法について研究を進め、軌道の高低変位と列車動揺の散布図を用いて関連性を把握するとともに、上下振動による補修目標値を高低変位の軌道整備目標値に相当する値として定め、これに基づき、日々の営業列車の動揺計測に基づく軌道管理が可能となることを示した。

今後の課題としては、車両の左右振動等についても軌道監視手法に組み入れることが考えられる。

## 参考文献

- 1) 緒方 正剛, “地方鉄道を対象とした軌道状態の省力化監視手法に関する取組”, 交通安全環境研究所講演会, 講演1, pp.45-54 (2021)
- 2) 篠田 憲幸ほか, “携帯情報端末を用いた営業列車振動データにもとづく軌道管理手法”, 日本機械学会論文集, Vol.88, No.911 (2022)
- 3) 財団法人鉄道総合技術研究所, 鉄道構造物等維持管理標準(軌道編)の手引き, pp.72 (2007)

## ④索道搬器の動揺モニタリングに関する取組

交通システム研究部

※千島 美智男

一柳 洋輔

山口 大助

八木 誠 (客員研究員)

### 1. はじめに

索道の搬器は風の影響を受けやすい構造のため、風による搬器の動揺を把握することは運行の可否を判断するうえで重要な事項であり、一般的には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いる。定常風を受ける搬器の傾斜角度は、支柱等の風速計や気象観測所による風の観測情報、搬器形状等から推定できるが、風速計から離れた位置を走行中の搬器に実際に作用する風や搬器動揺の動的な変化を常時把握することは難しい (図1 上段)。

近年の小型高性能化した各種センサ等を活用して走行中の搬器の動揺などの状態をモニタリングし、現状の支柱等における局所的な観測から連続的な状態監視 (図1 下段) へ移行すれば、リアルタイムな動揺の測定値から異常を検知でき、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、搬器が風を受けて動揺し建造物と接触する様な事象<sup>1,2)</sup>の防止にも有効であり、蓄積したデータを点検・保守に活用できる。

そこで、活用可能なセンサやデータ伝送方法を含む

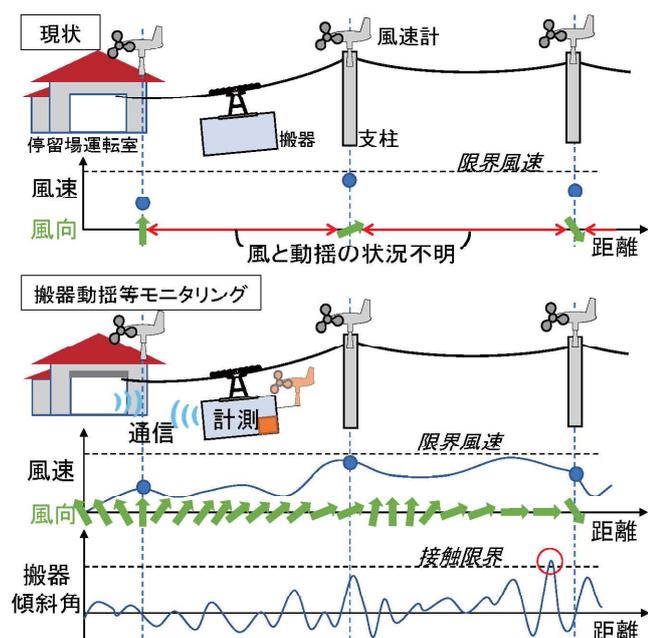


図1 本研究で提案するモニタリングのイメージ

搬器動揺等のモニタリングシステムについて検討したので報告する。

### 2. モニタリングシステムの概要

本研究では交走式ロープウェイを対象とした搬器動揺等のモニタリングを想定し、機能の要件を以下のとおり整理した。

- ・停留場間を走行中の搬器の位置と速度、搬器動揺 (加速度、回転角度)、搬器位置における風向及び風速を搬器内で連続的に自動収録できること
- ・搬器動揺、風向及び風速の測定値を、搬器位置の情報とともに搬器から運転室や監視室、クラウドサーバー等にリアルタイムで無線伝送できること
- ・搬器内や運転室、監視室等から各測定値の状況を随時確認でき、設定した閾値を超過した際は係員に通知すること
- ・日々の測定結果を運転室や監視室、クラウドサーバー等に一定期間蓄積できること
- ・外部からの電源供給がない搬器内において、可搬型バッテリーによって十分に動作すること
- ・以上の機能を安価で簡素に構築可能であること

上記の要件に基づくモニタリングシステムの概略を図2に示す。

### 3. モニタリングシステムの構成要素

前述の機能要件を踏まえ、モニタリングシステムのための構成機器や通信方式を選定した。構築中のシス

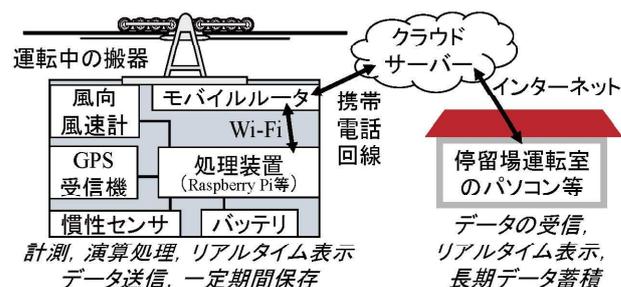


図2 搬器動揺等モニタリングシステムの概略図

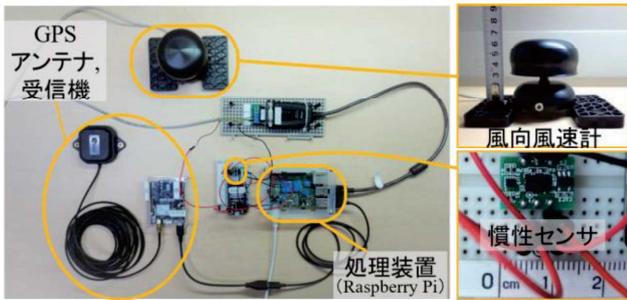


図3 構築中のシステムの搬器搭載部

テムの搬器搭載部を図3に示す。

### 3. 1. センサ

#### 3. 1. 1. 搬器動揺

水準器等の傾斜計では、搬器の静的な傾斜は測定できるが、動的な角度変化には追従しない。そのため、本研究では搬器の動的な角度変化を測定可能な小型の9軸（加速度、角速度、磁力の各3軸）慣性計測モジュールを用いる。直接測定できないロール角とピッチ角については、カルマンフィルタ等に基づき加速度と角速度から推定する。

#### 3. 1. 2. 風向と風速

搬器の前後、左右方向の動揺にそれぞれ影響する線路方向の風、横風の把握を目的とし、風杯型や風車型に比べて風向の早い変化に対応可能な超音波風向風速計を用いる。また、小型で低消費電力な機種を選定し搬器の外に設置する。

搬器が支柱付近を走行する場合と、支柱から離れた位置を走行する場合とでは、搬器の動特性に違いがみられる<sup>2)</sup>。また、地形等により搬器が受ける風の影響も変化する。風向と風速、搬器動揺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把握できる。

#### 3. 1. 3. 搬器位置及び走行速度

搬器の移動距離や速度は、一般的に滑車の回転速度から検出し、運転室等の表示器に表示される。本研究では前述の機能要件から、搬器の位置と速度を測定するためのGPS（Global Positioning System）受信機を搬器に設置する。

### 3. 2. データ伝送方法

搬器から運転室等へ測定データを伝送する方法として、モバイルルータによる携帯電話回線を用いた方法の他、通信契約を必要としないWi-Fi（Wireless Fidelity）のローカルネットワークや、低消費電力のLoRa（Long Range）等がある。本研究では線路長が3

km程度の交走式ロープウェイを想定し、各通信方法を比較する。

ローカルネットワークやLoRaを用いた場合は支柱等に複数の中継点を設ける必要があり、保守に負担が生じるため、搬器にモバイルルータを設置し、携帯回線を経由してクラウドサーバーへデータを送信する。

運転室や監視室等に配置したパソコン等では、インターネットを経由してクラウドサーバー上の情報を読み込んで表示し、必要に応じて状況を係員に通知する。

### 3. 3. 処理装置

搬器内の処理装置では、各センサからの信号の受信に加え、前述のロール角とピッチ角の推定演算を行い、それらの情報を同期して処理装置のWi-Fi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、収集した各種データは、メモリカードを用いて搬器内で一定期間保持する。外部から電源供給のない搬器内に設置することから、処理装置も小型でかつ低消費電力であることが求められる。本研究ではWi-Fi通信モジュールを内蔵し、各センサとシリアル通信が可能なRaspberry Piを用いてデータの収集、処理、保存、通信を行う。なお、本システムの運用に必要な可搬型バッテリーを搬器内に設置する。

## 4. まとめ

運転中の交走式ロープウェイ搬器の動揺と搬器位置における風向及び風速を、搬器の走行位置とあわせて収集し、リアルタイムで運転室や監視室等へ伝送し表示するための搬器動揺モニタリングシステムについて検討した。これまでにハードウェアや通信方式を選定し、システムを構築中である。今後はシステムの実装及び実際の搬器を用いた評価試験を実施し、本システムの実運用に向け課題を整理していく予定である。

## 参考文献

- 1) 佐藤ほか，“ロープウェイ施設における風分析と搬器の突風応答シミュレーション”，交通安全環境研究所フォーラム2015，pp.129-132（2015）
- 2) 一柳ほか，“支柱通過前後の索道搬器のロール振動に関する考察”，交通安全環境研究所フォーラム2021，pp.89-90（2021）

## ⑤ 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

交通システム研究部

※工藤 希、望月 駿登、押立 貴志

### 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で自動運転を行う場合、これまで運転士が行っていた業務を他の係員やシステムに行わせる必要がある。本稿では、安全性評価の観点から、運転士が行っていた業務を一覧にし、自動運転においてシステムが代行する必要がある項目と代行する際の課題を抽出した結果を報告する。

### 2. 鉄道の自動運転に関する動向

運転士の乗務しない自動運転を導入するため、踏切道がある等の一般的な路線を対象とし、平成30年度から令和3年度にかけて国土交通省において「鉄道における自動運転技術検討会」<sup>1)</sup>が開催され、自動運転に関する技術的要件の検討が行われた。検討会では、国際電気標準会議(International Electrotechnical Commission)発行の国際規格 IEC 62267 (自動運転都市内軌道旅客輸送システム)を参考に自動化レベル(GoA: Grade of Automation)をGoA0(目視運転)からGoA4(無人運転)まで定義し、GoA2.5、GoA3及びGoA4における技術的な要件について検討された。

また、各鉄道事業者においても、自動運転の検討が進められている状況である(表1)。

表1 鉄道の一般的な路線における  
自動運転の検討動向

鉄道事業者	動向
九州旅客鉄道 <sup>2)</sup>	GoA2.5の実証実験(香椎線)
南海電鉄 <sup>3)</sup>	GoA2.5の実証実験予定(和歌山港線)
東日本旅客鉄道 <sup>4)</sup>	将来のドライバレス運転目指した実証実験(山手線)
東武鉄道 <sup>5)</sup>	GoA3を目指した検討を開始(大師線)

### 3. 運転業務の見える化

#### 3.1. 検討の目的

踏切道がある等の一般的な路線において、システムによる自動運転を行う場合、経済的な観点から、従来の設備をできるだけ活用することが考えられている。しかしながら従来のシステムは、列車に運行の責任を担う動力車操縦者運転免許を保有する運転士が運転することを前提に製作され、運用されている。

装置の安全性評価を行う際、RAMS<sup>®</sup>の概念から考えると、従来の装置と、装置が自動運転をする場合の装置では、装置が稼働する前提や機能が異なるため、装置を改修する場合には変更が必要なフェーズに立ち返る必要がある。そこで本稿では、既存の一般的な路線を自動運転のために改修する場合の安全性評価手法の検討の一環として、従来運転士が行っている業務をリスト化し、それらをシステムが代行する場合に起こりえる課題を抽出した。

#### 3.2. 検討の前提

前述の検討会において議論された、以下の内容を本検討の前提とする。

- ・ 鉄道の安全は、鉄道専用敷地内は立入禁止とする法的措置のもと、線路内への人等の立入及び自動車の侵入に対する安全・安定輸送の確保は、列車運転士の前方視認力のみには頼っ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る。
- ・ 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。

### 3. 3. 対象とする自動化レベル

本検討では、GoA2.5を対象とした。GoA2.5は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（いわゆるGoA2.5係員）が乗務する。GoA2.5係員は動力車操縦者運転免許を保有している必要はなく、何かあった場合に非常停止操作のみを行い、減速をして様子を見る等の運転操作は行えないものとした。

### 3. 4. 整理結果

運転士の動作を資料<sup>7,8)</sup>から抽出した。その際、時間軸によらずシステム全体に関わるもの、出庫時、駅停車時、駅から進出時、走行中、駅進入時、及び異常事態の7つに分けて分類した。また、現在のGoA2（半自動運転、ATO(Automatic Train Operation: 自動列車運転装置)による支援のもと運転士が運転）との違いに注目して整理を行った。以下に結果を示す。

- ・ 従来のGoA2で実施している運転曲線に沿った運転は、GoA2.5においても装置で実施可能である。
- ・ GoA2.5係員、その他係員又は装置が代行できる作業として、出庫点検、ホームの安全確認、特殊信号発光機、及び沿線作業員の待避状況の確認、警笛の吹鳴、緊急停止操作、並びに駅や指令との連絡等があると整理した。これらの作業については、係員や装置がどの機能を担うのか予め定義し、必要に応じて装置の設計をし直す必要がある。また、GoA2.5係員では前方支障物、車両及び沿線の異常等の異常事態には対応できるが、それ以外の機器異常等に対しては、装置の信頼性を上げ、故障しにくくする、地上設備を利用する、及びGoA2.5係員に相応の教育を受けさせる等の対策を併用して総合的に対処できるようにする必要がある。
- ・ 運転士が実施しているもので、GoA2.5係員及び装置だけで完全に代行が難しい作業として、縮退運転、臨時速度制限及び徐行運転が考えられる。これらについては、係員と装置では対応できない場合が何で、どう扱うかについて予めルールを定めておく必要がある。同様に、非常停止操作後の復帰作業についても、運転士を派遣する等、運行にかかるルールを明確に整理しておく必要がある。
- ・ GoA2.5係員は緊急停止操作しか行えないため、前方支障物かもしれないので少し減速して様子を見る、エアセクションで停止しないようにブレーキを加減する等の操縦作業は行えないことに留意が

必要である。

### 4. おわりに

踏切道がある等の一般的な路線を、従来の運転士による運転からシステムによる自動運転へ変更することを想定した場合、これまで運転士がいることを前提に製作・運用されてきた装置をそのまま用いることは難しい。そこで本研究では、装置に求められる仕様の違いを検討するため従来の運転士の業務を整理した。その結果、支障物等の外乱や車両の異常等の異常事態及び臨時速度制限等への対応、非常停止しか行えないことや非常停止操作後の復帰作業にかかる対応が従来と異なることを整理した。安全性評価を行う際には、これらについて対処方針やルールを予め定めた上で装置の安全性評価を行う必要があると考えられる。

今後は、運転業務についてより詳細な検討を進めるとともに、一般的な路線に自動運転を導入する際の安全性評価手法について検討を行っていく予定である。

### 参考文献

- 1) 鉄道局ホームページ  
[https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo\\_fr7\\_000027.html](https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr7_000027.html)
- 2) 九州旅客鉄道，“自動列車運転装置の実証運転区間・対象列車を拡大します”，ニュースリリース 2022年2月
- 3) 南海電鉄，京三製作所，“和歌山港線における『自動運転実証試験』に向けて事前準備を2022年7月から順次進めてまいります”，ニュースリリース 2022年6月
- 4) 東日本旅客鉄道，“山手線の営業列車で自動運転を目指した実証運転を行います”，JR東日本ニュース 2022年5月
- 5) 東武鉄道，“鉄道の自動運転(GoA3)実施に向けた検証を東武大師線において開始します”，ニュースリリース 2021年4月
- 6) IEC 62278:2002, “Railway applications- Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety”
- 7) 西上，“電車を運転する技術”，2020年
- 8) 日本鉄道運転協会，“解説 鉄道に関する技術基準（運転編）”

## ⑥ 鉄道における自動運転の検討状況を踏まえた 安全性評価の方向性について

交通システム研究部 ※工藤 希 押立 貴志

### 1. はじめに

鉄道における運転士の乗務しない自動運転は、新交通やモノレールの自動運転システムで実現されている。鉄道事業者においては運転士の確保、養成など、係員不足が深刻な問題となっており、鉄道事業を維持するために、運転士の乗務しない自動運転の導入が求められている。このため、人や自動車が軌道を横切る踏切道がある等の一般的な路線を対象とし、安全性や利便性の維持・向上を図るための技術的要件を検討することを目的に国土交通省において「鉄道における自動運転技術検討会」が開催され、今般、2022年9月13日にとりまとめが公表された。この検討会は、学識経験者、関係鉄道事業者、研究機関及び鉄道局で構成され、交通安全環境研究所も、委員及び幹事として参画してきた。本稿では、とりまとめの要点を述べるとともに、実路線における自動運転の検討にあたり必要とされる安全性評価の課題について検討した結果を報告する。

### 2. 検討会とりまとめの要点

#### 2. 1. 自動化レベルに応じた検討

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されており、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（GoA: Grade of Automation）

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
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）

#### 2. 2. 自動運転の導入を進める上での基本事項

鉄道は列車相互の衝突を防ぐ信号装置や仕組みにより安全を保っている。一方、鉄道専用敷地内は立入禁止とする法的措置のもと、線路内への人等の立入及び自動車の侵入に対する安全・安定輸送の確保は、列車運転士の前方視認力のみにも頼っているものではな

い。線路内への人立入等の突発的な事象については、自動運転、手動運転に関わらず、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されている。

#### 2. 3. GoA2.5の留意事項

GoA2.5はシステムの機能レベル等に応じて、表2の3タイプが例示された。先頭車両に乗務するGoA2.5係員は動力車操縦者運転免許を有しないため、GoA2.5係員は操縦ができず、装置操縦となる。線路内支障物の対応は、現行の手動運転と同様にGoA2.5係員が対応できるが、自動運転であるため列車防護は自動化が基本となる。従来の自動運転は連続情報伝送のATC（Automatic Train Control: 自動列車制御装置）設置の場合に限っていたが、ATO（Automatic Train Operation: 自動列車運転装置）の高機能化などにより、地点情報伝送のパターン制御式ATS（Automatic Train Stop: 自動列車停止装置）の場合も自動運転が可能である。

表2 GoA2.5のタイプ分け

タイプ	システム概要
タイプA	GoA4、GoA3のシステム（例：無人の自動運転システム）をベースとするもの
タイプB	GoA2のシステム（例：有人の自動運転支援システムの地下鉄）をベースとするもの
タイプC	パターン制御式ATS（点送受信）と高機能ATOとで構成するシステム（例：手動運転の地方線区）をベースとするもの

#### 2. 4. GoA3、GoA4の留意事項

一般的な路線におけるGoA3、GoA4では、路線の状況等に応じ表3のとおり4タイプが例示された。装置の性能や路線の状況を踏まえた総合的な判断(表

4の措置等の組合せ)により、従来の一般的な路線での安全性と同等以上の性能を確保するとされた。

既存のバリアフリー用ホーム可動柵が活用でき、またホームドア・可動式ホーム柵の設置を必須要件としない。また、前方監視にカメラ・センサを活用することについては、鉄道は運転士に線路内支障物を発見させる法的義務付けがなく、運転士による行為を客観的に評価することはできないため、運転士の視認能力の評価から車上カメラ・センサの性能を正確に導くことは困難とされた。

表3 GoA3、GoA4のタイプ分け

タイプ	路線の状況等
路線1	踏切道がある等の一般的な路線(最高速度120km/h程度)
路線2	新交通等自動運転システムと同様の完全立体交差路線(最高速度70km/h程度、高速走行を前提とした設備構造や運行開始前の安全確認を行う場合は当該速度以上も可能)
路線3	道路近接がない準立体交差化路線(ホームドア又は可動式ホーム柵無し、最高速度70km/h程度)
路線4	踏切道がある等の一般的な路線(最高速度40km/h程度(車両のカメラ・センサの検知距離内で停止できる速度))

表4 組合せ措置内容の例

項目	措置
①ホーム・踏切道部分以外	立入防止柵や自動車用防護柵、積荷転落防止柵、監視カメラ等
②列車前方支障物への対応	車両のカメラ・センサによる検知、支障物衝撃検知装置等
③踏切道部分	踏切障害物検知装置、支障報知ボタン等
④ホーム部分	ホームドア又は可動式ホーム柵、非常停止装置等
⑤脱線・衝突への対応	脱線検知装置、限界支障報知装置等
⑥車内の異常時対応	指令通報装置、非常停止装置等

## 2. 5. その他の主要事項

### 2. 5. 1. 部内要因リスク低減

運転士が行ってきた各種の安全確認、列車の状態監視等の鉄道部内要因に係わるリスク管理については、システム等で代替が難しい領域については、そもそものリスク事象の発生を低減することとされた。

### 2. 5. 2. センサ類の新たな使用方法

リスク低減のためのセンサ技術等は、バックアップ装置としてや、低速域での使用等、センサ性能や特性が発揮できる使用方法も検討していくこととされた。

### 2. 5. 3. 実証試験による技術確立

鉄道事業者の実路線において実証試験を実施し、詳細に分析、評価して、必要に応じ改善を図り、実路線

での最適な自動運転のシステムを確立していくことが適切であるとされた。

### 2. 5. 4. 社会的認知の重要性

鉄道利用者等の遵法行動や自制的行動を前提に、自動運転導入時の鉄道の安全、安定輸送を確保することができることの社会的な認知が必要であるとされた。

## 3. 今後の安全性評価について

今回のとりまとめは、既存のシステムを活用した自動運転への道を開くものに繋がっており、総合的な判断での評価や、リスク低減の評価については、以下のような課題がある。

① RAMS などの機能安全規格は、閉じた運用環境を前提に適用され、踏切道での通行者やホームでの旅客の不安全行動は、人間行動を数値化できないため適用が困難である。装置故障とは言えない安全性能の限界外の事象や、曖昧性の大きな情報などの、開いた運用環境を対象としたリスク低減のプロセスを評価する方法の検討が必要となる。

② 装置故障の疑いがある場合や、フェイルセーフ特性による安全側停止が行われた場合に、従来は、運転士の操作により運転再開の処置を行っていたが、GoA2.5 係員などの無資格添乗員では処置させる内容には限界がある。また、既存のシステムは責任者である運転士が臨機に対処する前提でシステム設計されていたが、自動運転では運転士はおらず装置保安・装置運転となり、既存システムを活用する場合には、設計の前提が異なるため、鉄道運行の現実に照らしてシステムの役割、機能分担を見直すことが必要となる。

## 4. おわりに

本稿では、「鉄道における自動運転技術検討会」のとりまとめの要点と今後の安全性評価の課題について述べた。今後は鉄道特性を踏まえた自動運転の安全性評価のあり方の検討を進め、その結果を用いて自動運転を導入する鉄道事業者等のシステムの機能分担の検討や、試験、システムの最適化など新たな課題等に対して、技術検討の支援などを行っていきたい。

### 参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ:  
[https://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo07\\_h\\_h\\_000229.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo07_h_h_000229.html)

## ⑦第4種踏切に対する安全性向上に関する検討について

交通システム研究部

※長谷川 智紀

山口 大助

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2年度においては483件の運転事故が発生しており、中でも踏切事故が165件(第1種踏切147件、第3種踏切1件、第4種踏切17件)発生し、運転事故の約1/3を占めている状況である。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には、大手事業者では主に障害物検知装置を用いた手法がとられているが、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。

そのため、まず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ので紹介する。

### 2. 踏切事故の現状

安全性向上策の検討を行うにあたって、踏切事故の現状を把握する必要がある。

そこで、公益財団法人鉄道総合技術研究所の作成した「鉄道安全データベース」の平成30年度～令和2年度の3か年のデータを調査し、踏切事故の実態把握を行った。

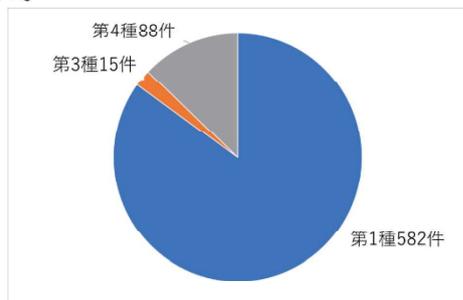


図1 踏切種別毎の事故割合 (3年間)

3か年の踏切事故の踏切種別毎の件数を図1に示す。なお、第1種踏切は警報機・遮断機がある踏切、第3種踏切は警報機だけの踏切、第4種踏切は警報

機・遮断機ともない踏切を指す。踏切種別毎の事故件数では、圧倒的に第1種踏切の事故が多いが、踏切種別毎の踏切箇所数は、令和2年度では、第1種踏切が29,567箇所、第3種踏切が639箇所、第4種踏切が2,527箇所と、第1種踏切は箇所数も多い。そこで、踏切種別毎の年・箇所あたりの発生件数としては次の通りとなる。

第1種踏切：0.0065件/年・箇所

第3種踏切：0.0078件/年・箇所

第4種踏切：0.0116件/年・箇所

この結果から、第4種踏切における事故発生割合が大きいことがわかる。

そこで、第4種踏切の事故対象を歩行者と自動車等(自動車、二輪車、軽車両)でみると、図2に示す通り、圧倒的に自動車等による事故が多いことがわかる。



図2 第4種踏切における事故対象別 (3年間)

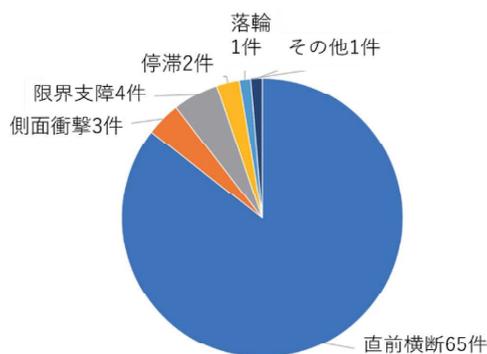


図3 第4種踏切の自動車等における事故原因 (3年間)

また、第4種踏切の自動車等における事故原因を図3に示す。第4種踏切による自動車等による事故は、直前横断が大半を占め、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。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種踏切の年・箇所あたりの発生件数は0.0038件/年・箇所少なくなっていることから、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。

ただし、踏切の安全対策としては、立体交差化、踏切遮断機の整備、踏切道の統廃合などが進められているほか、ICT(Information and Communications Technology)技術の発展やライフスタイルの変化等、社会を取り巻く環境の変化を見据え、更なる踏切道の安全性向上を目指し、対策を検討することとされている。第1種踏切にするためには、資金の問題や、周辺住民との交渉等、様々な課題があり、すぐに対策ができる状況ではない。

### 3. 第4種踏切に対する安全性向上策

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を検討することとした。

本検討では、機材や設置に関するコストの低減をコンセプトとした。

機材コストの低減としては、車両の位置検知としてGNSS(Global Navigation Satellite System)、車載装置及び地上装置における制御装置としてIoT(Internet to Things)デバイス、車載装置及び地上装置の通信にWiFi(Wireless Fidelity)等の汎用装置及び手法を活用することとした。

また、設置コストの低減としては、太陽光発電を利用した電源設備レス、地上装置の簡略化等を試みた。

これらのコンセプトをもとに、今回検討した装置構成を図4、動作イメージを図5に示す。



図4 検討した第4種踏切支援装置  
(左：車載装置、右：地上装置)

車載装置は、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。

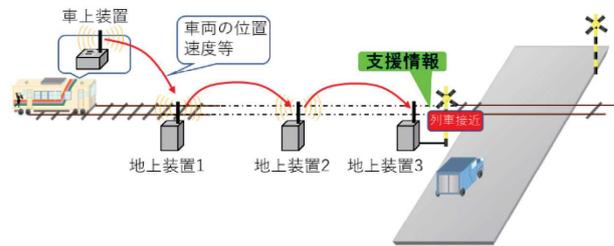


図5 第4種踏切支援装置の動作イメージ

地上装置は、車載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。これにより、支援すべき第4種踏切と列車との距離が、WiFiが直接通信できる距離より遠い場合においても、支援すべき第4種踏切へ列車の位置・速度等を送信することができる。

地上装置のうち、支援すべき第4種踏切に設置する装置については、当該踏切に近づく列車の情報を元に、当該踏切までの到達時間が所定の時間以内である場合、電光掲示板や音等により当該踏切付近にいる人や自動車等に対し、列車が接近していることを知るための支援を行う。

なお、装置は太陽光発電パネルによる発電により電力を確保するとともに、夜間でも装置が動作するようバッテリーによる運用を可能とする仕組みとした。

### 4. おわりに

今回、踏切事故の実態把握をするとともに、第4種踏切の安全性向上を目的に低コストをコンセプトとした支援装置の検討を行った。

今後の課題として、装置故障が起きた場合の取り扱いの検討、支援情報の提示方法の検討、実際の線区における機能試験、及び長期動作試験による耐環境性能等の確認があげられる。これらを踏まえ、支援装置の技術要件を提案していきたい。

### 参考文献

- 1) 鉄軌道輸送の安全に関わる情報(令和2年度)、令和3年12月、国土交通省鉄道局
- 2) 交通安全基本計画、令和3年3月、中央交通安全対策会議

# ⑧ 鉄道システムの第三者安全性評価と国際規格 IEC 62425 の接点について

交通システム研究部      ※林田 守正      工藤 希  
 鉄道認証室                      森 崇

## 1. はじめに

当研究所では、各種の鉄道に関する第三者安全性評価（以下「安全性評価」）を行ってきた。しかし近年、日本の鉄道システムの輸出に際しては、IEC (International Electrotechnical Commission) シリーズ等の国際規格への適合が求められるようになってきている。本報告では、主に信号システムのハードウェアに関する安全性評価と、それに関連が深いと考えられる IEC 62425 との接点に着目し、FTA (Fault Tree Analysis) 等のリスク解析を例として、フェールセーフ性の考え方やその担保の技法について考察した結果を報告する。

## 2. 安全性評価と IEC 62425 の項目

当研究所の安全性評価報告書の項目例と、IEC 62425 に規定される Safety Case の項目との対応を図 1 に示す<sup>2)</sup>。安全性評価報告書の「安全性評価結果」

の各項目と主に関連するのは、Safety Case Part 4: Technical Safety Report の各 Section であると考えられる。また IEC 62425 Annex A~E には安全インテグリティ (Safety Integrity) の考え方、安全性を担保するための技術と対策等が記述されているため、これらも安全性評価結果の各項目と対応すると考える。一方、IEC 62425 5.5 Safety acceptance and approval では、システムの安全性の承認に際して、Safety Case 等の他に、第三者安全性評価が必要であるとされている<sup>2)</sup>。当研究所の安全性評価では FMEA (FMECA 及び FMEDA を含む) 及び FTA によるリスク解析を中核としているため、本報告では特にそれらと関連が深いと考える Technical Safety Report の Section 2: Assurance of correct operation 及び Section 3: Effects of faults、並びに Annex B 及び Annex E の記述との対応について重点的に考察した。

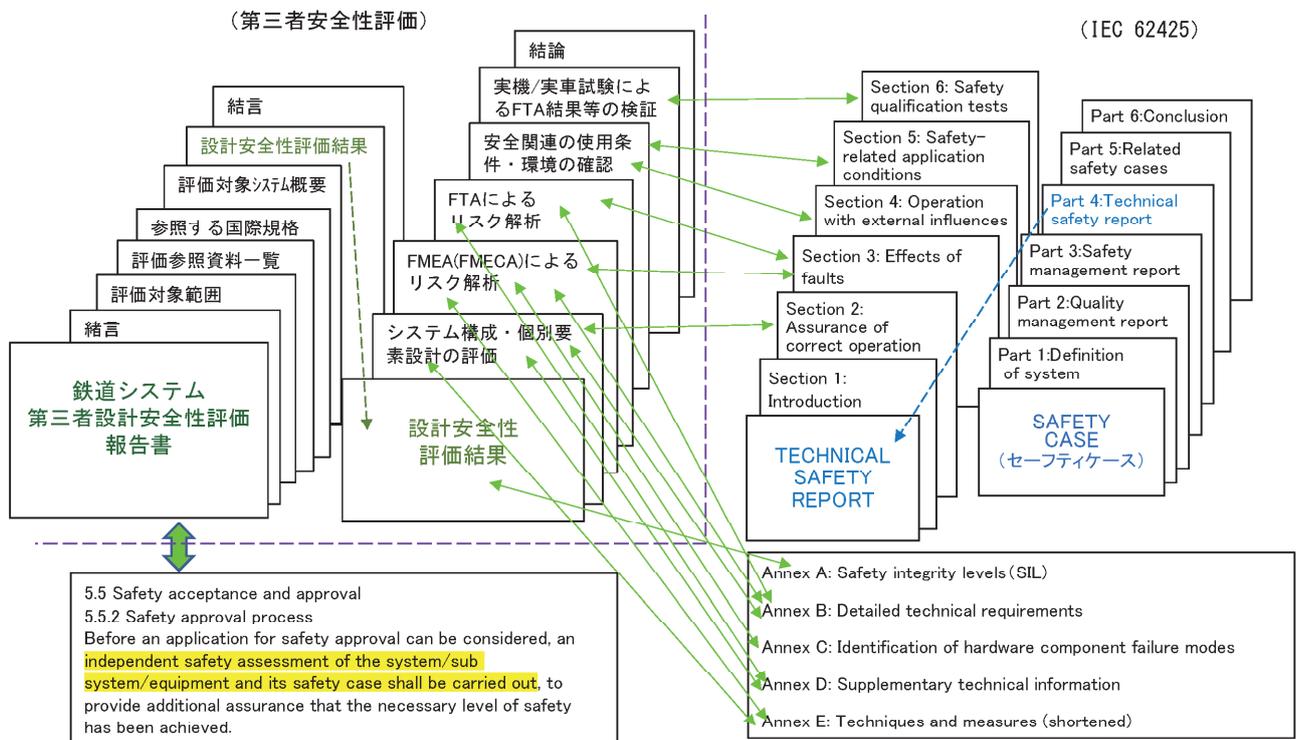


図 1 安全性評価報告書の項目例と IEC 62425 の構成<sup>2)</sup>

### 3. 対応例の検討例

#### 3. 1. システム要求と安全関連要求

IEC 62425 に記述される、システム要求仕様における安全インテグリティ要求の位置付け、及び安全性評価との対応を図2に示す<sup>2)</sup>。安全インテグリティは系統的（システムティック）故障に対するものと偶発的（ランダム）故障に対するものに二分され、前者は定性的な安全性評価、後者は定量的な安全性評価に対応すると考える。安全インテグリティのレベル（SIL: Safety Integrity Level）は3.2に後述するように4段階が定義される。安全性評価は指定された数値目標をクリアし、既存の類似システムと同等以上の安全性の確保の達成を判断基準とする事例が多い。

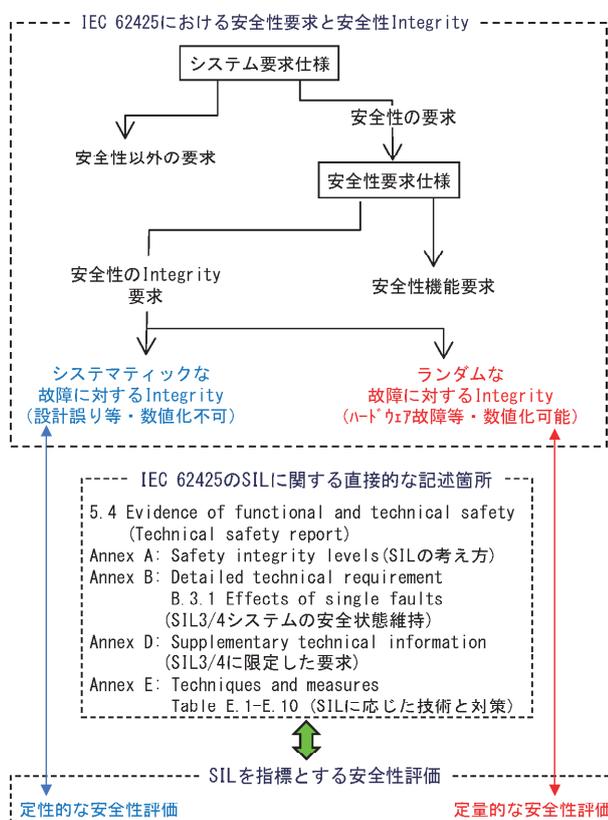


図2 IEC 62425 のシステム要求と安全要求<sup>2)</sup>

#### 3. 2. 安全性の確保の考え方

従前の安全性評価においては、マネジメント等の定性的な面を考慮しながらも、システム、サブシステム又は装置単位の許容ハザード発生率（THR: Tolerable Hazard Rate (/h)）等、定量的な側面と、類似の既存システムの技術的手法との比較によるものであった<sup>1)</sup>。しかしながら、IEC 62425 では、SILの達成には、レベルに応じた品質管理条件、安全管理条件、技術的

安全条件及び定量化された安全性目標の遵守が要求されている<sup>2)</sup>。またSILは装置等ではなく安全関連機能に割り当てられると規定されている。IEC 62425 に記述される、SILの割当ての手順を図3に示す<sup>2)</sup>。まず対象システムに対してリスク解析を行ってハザードログを作成し、認識された各ハザードのサブシステムの個別機能への割当てを行うことによってシステム機能としてのTHRが決定される。そして、表1に示すように、SIL Tableに沿って、THRに応じて要求されるSILが決定される。これに基づいてサブシステムのTHRとSILが設定されると共に、ハザード発生率が各要素に割り当てられ、各要素のSILと機能故障率（h）が設定される。

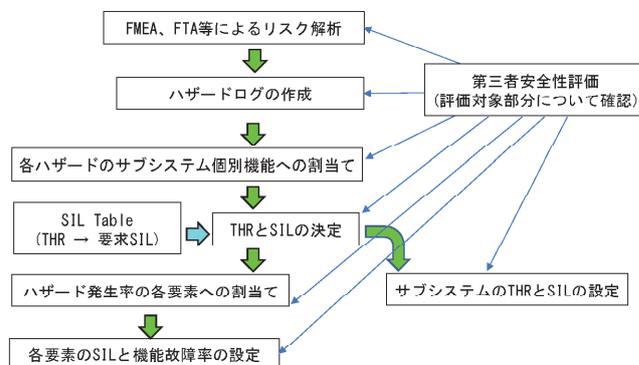


図3 THRとSILの割り当て<sup>2)</sup>

表1 SIL Table (THRに応じて要求されるSIL)<sup>2)</sup>

許容可能なハザード発生頻度 (THR: 1時間/1機能当たり)	要求されるSIL (Safety Integrity Level)
$10^{-9} \leq \text{THR} < 10^{-8}$	4
$10^{-8} \leq \text{THR} < 10^{-7}$	3
$10^{-7} \leq \text{THR} < 10^{-6}$	2
$10^{-6} \leq \text{THR} < 10^{-5}$	1

IEC 62425 によれば、本来はこのような手法で導出されるSILが、実際には鉄道事業者等の要求として例えば信号システムがSIL4と設定される事例が多い。これらの過程に必要な作業の一部（リスク解析等）は、安全性評価の対象となるが、IEC 62425 ではTHRに応じてSILが割り当てられるように記述されていることに留意し、整合を図ることが望ましい。

#### 3. 3. FTAに関する検討

##### 3. 3. 1. 機能の独立性と共通原因故障

安全性評価のために、主要なリスク解析手法としてFTAが行われるが、複数の故障モードの共通原因となる故障（共通原因故障）が存在する場合、それらの故

障モードを入力事象とする複数のツリー中のANDゲート又はORゲートに独立して共通原因故障を設定してしまい、その結果、誤ったハザード発生率を算出する可能性があると考え。図4(上)に、その例を示す。IEC 62425では、このような共通原因故障を重視し、それに関して詳細に記述している。この例では、図4(下)に示すように、共通原因故障は別のツリーに配置し、ORゲートで繋ぐことが妥当である<sup>2)</sup>。このように、共通原因故障の扱いは、安全性評価のFTAにおいても、IEC 62425の記述を意識して十分に注意すべきであると考え。

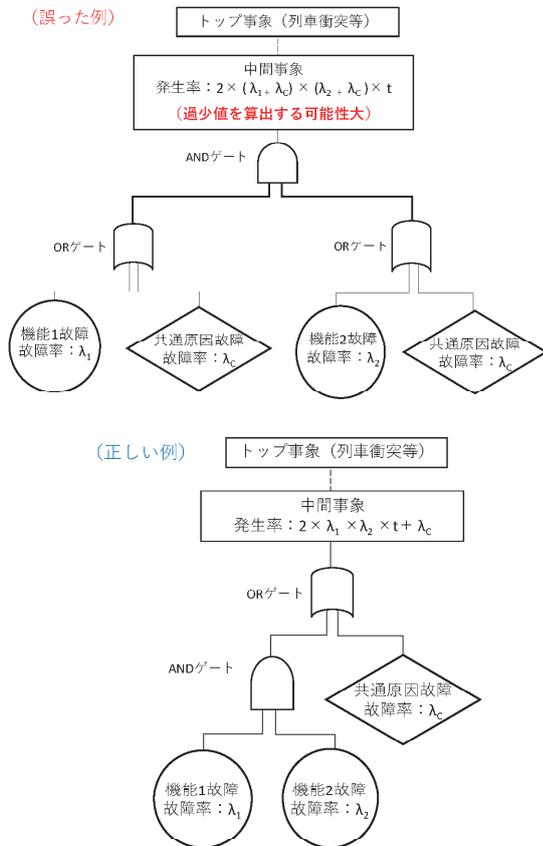


図4 共通原因故障を含むFTAの例<sup>2)</sup>  
(上): 誤 (下): 正

### 3.3.2. フェールセーフ性の確保

IEC 62425 B.3.1には、フェールセーフ性 (Fail safety) の達成方法として、Composite (複合型) fail safety、Reactive (反応型) fail safety及びInherent (本質型) fail safetyの3種類が挙げられている<sup>2)</sup>。それらの概念は、FTAにおいては、以下(1)~(3)に示す通り、時系列的な事象は再現できないものの、部分的なツリー (FT) として表すことができると考える。このことから、(1)~(3)のFTモデルがComposite fail safety、Reactive fail safety又は

Inherent fail safetyから導出される場合は、フェールセーフ性が確保されるとの判断が可能と考える。

#### (1) Composite fail safety

概念を図5に示す。独立した安全関連機能A/Bが論理積 (AND) で結合されたモデルにおいて、機能Aに危険側故障が生じた場合、十分に短い時間内の検知 (Detection) と否定 (Negation) により、続いて機能Bに危険側故障が発生しても錯誤出力をせず、安全状態を保つという概念である<sup>2)</sup>。この例では各々の検知、否定の機能も独立であると仮定する。

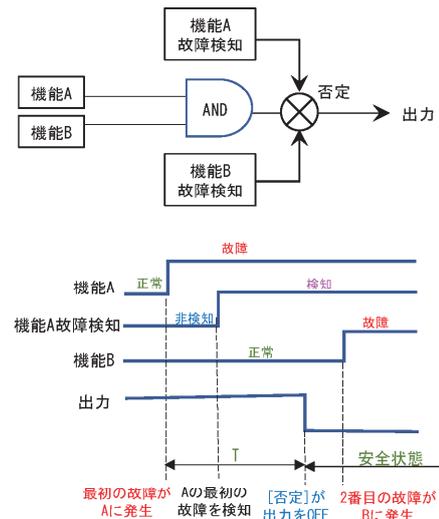


図5 Composite fail safetyの概念<sup>2)</sup>

Composite fail safetyの概念に対応すると考えるFTのモデルを図6に示す。機能A/Bの危険側故障を基本事象、それらを直上のANDゲートの入力事象、「故障検知・停止」を制約ゲートとする<sup>2)</sup>。

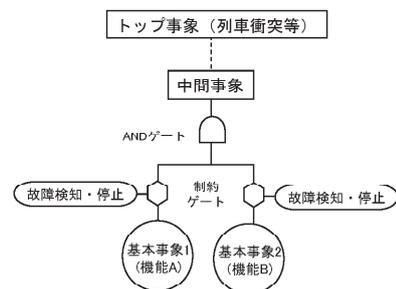


図6 Composite fail safetyに相当するFTモデル

このモデルでは、機能A/Bに同時に危険側故障が生じてANDゲートから錯誤的な出力がされる事象がハザードであり、その防止策が「故障検知・停止」であるため、図5に示すComposite fail safetyの概念に相当すると考える。

#### (2) Reactive fail safety

概念を図7に示す。1つの安全関連機能で構成されるモデルにおいて、その機能に危険側故障が生じた場合、十分に短い時間内で検知 (Detection)、否定 (Negation) することにより、錯誤出力を回避し安全状態を保つという概念である<sup>2)</sup>。

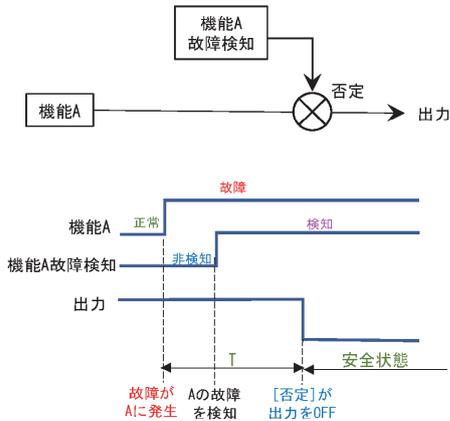


図7 Reactive fail safety の概念<sup>2)</sup>

Reactive fail safety の概念に相当すると考える FT のモデルを図8に示す。機能Aの危険側故障を基本事象、「故障検知・停止」を制約ゲートとするこのモデルでは、機能Aに危険側故障が生じて錯誤的な出力がされる事象がハザードであり、その防止策が「故障検知・停止」であるため、図7に示す Reactive fail safety の概念と合致すると考える。

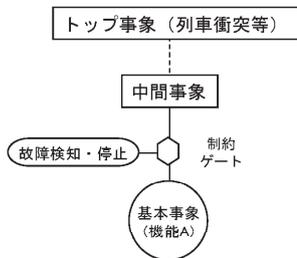


図8 Reactive fail safety に相当する FT モデル

### (3) Inherent fail safety

単一アイテム上の安全関連機能に起こり得る全ての故障モードがハザードに至らない、という条件下で認められる概念である。この条件は IEC 62425 Annex C で定義される手続を採用することにより正当化される<sup>2)</sup>。Inherent fail safety の概念に対応する FT としては、1つの機能の危険側故障を基本事象とし、その上方に制約ゲート、AND ゲート等が無い単純なモデルが考えられる。このモデルでは、機能自体が本質的なフェールセーフ性を備え、その危険側故障率が十分に低いことが、ハザードの防止策となる。

### 3. 4. FMEA に関する検討

FMEA においては、要素毎に、機能、故障モード、原因、影響、重大さ、頻度、リスク等が検討される。また開発の各段階で検討されたリスク低減の対策が反映された FMEA が繰り返されることにより、リスクが受入可能となるまでの対策効果が評価される<sup>1)</sup>。一方、IEC 62425 Annex E 及び Annex C には、系統的故障及び偶発的故障の防止、低減のための技法と対策 (Techniques and measures) が記述されている<sup>2)</sup>。この技法と対策は、表2に示すように、FMEA の結果表に追記された「対策」に相当すると考えられるため、FMEA に活用することが望ましいと考える。

表2 FMEA と IEC 62425 Annex E Technique & Measures (例) の対応<sup>2)</sup>

		FMEA の例				重大さ	発生頻度	リスク評価
要素	機能	故障モード	故障原因	故障の影響	対策			
a	地上電源	地上電力供給断	停電	地上信号保安システム機能停止	無停電電源設置	2	3	6
b	在線/非在線認識	非在線を在線と誤認	車両位置の誤認	当該軌道進入不能 →列車遅延	位置検知精度向上	1	2	2
		在線を非在線と誤認	車両位置の誤認 非防護車両の進入	他列車と衝突	高信頼装置の採用 位置検知精度向上	4	1	4
c	ATP信号送受信	信号断	送受信機故障	非常制動、出発不能 →列車遅延	通信系統の二重化	2	2	4
		伝送中のデータ欠け	ノイズ	バウンス生成条件錯誤 →列車衝突	所要SN比の確保 CRC検定等	4	1	4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮



IEC 62425 Annex E Technical Measures の例 (Table E.5 - Design features 抜粋)

Techniques/Measures	SIL 1	SIL 2	SIL 3	SIL 4
1 Protection against operating errors	R: plausibility checks on each input command		HR: plausibility checks on each input command	
2 Protection against sabotage	-		R: additional organisational measures are necessary	
3 Protection against single fault for discrete components	R: all hazardous failure modes to be either detected and negated or demonstrated to be inherently safe such as a result of inherent physical properties		HR: all hazardous failure modes to be either detected and negated or demonstrated to be inherently safe such as a result of inherent physical properties	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

### 4. おわりに

当研究所が行ってきた安全性評価と、鉄道関係の国際規格である IEC 62425 の接点について考察し、前者に後者の考え方を採り入れ、整合を図る場合の留意点を整理した。今後、安全性評価と IEC 62425 の他の項目、さらに IEC 62425 以外の国際規格との接点について考察し、国際規格との整合性について引き続き検討していきたい。

### 参考文献

- 1) 林田他, "RAMS を考慮した鉄道技術の標準的な第三者安全性評価手法に関する取組", 交通安全環境研究所フォーラム 2017 講演概要集 pp11-14
- 2) IEC 62425 Edition 1.0 2007-09

# ⑨降雨装置の導入と降雨環境下の認識性能評価に関する研究

自動車安全研究部 ※中川 正夫 児島 亨 山本 裕之

## 1. はじめに

自動運転車等の安全性を確保するうえで、センサ類による認識性能、なかでも降雨等の悪天候時の環境認識性能を評価することが求められている。

そこで、本研究では人工的に降雨を再現できる降雨装置を導入し、その装置を用いて実車の降雨環境下における認識性能を評価した。

## 2. 調査の概要

当研究所では図1に示す降雨装置<sup>1)</sup>を導入した。本装置により、20~100mm/h (20mm/h 間隔) の降雨及び霧を再現できる。また、付属の4輪等速ベンチにより、実車を台上で走行させることができ、ACC (Adaptive Cruise Control) を130 km/h を上限に作動させることも可能である。さらに、白線があればLKAS (Lane Keeping Assist System) を作動させることも可能である。



図1 導入した降雨装置

本研究では、評価対象車両としてステレオカメラのみによって先行車や白線を認識する車両を用いた。本車両に対して、以下の2つの実験を行った。

### 実験1：車間距離制御の評価

自車線前方30mに先行車を置き、ACCを設定車速100km/hで作動させ、車間距離の設定を最長から最短の4段階変化させた際の車速制御を評価した。

なお、一定距離に固定した先行車は、評価対象車両にとってはその車間距離にある相対速度ゼロの先行

車であり、ACCにおいてはその車間距離に対する車間時間に基づき、車速の制御がなされる。

### 実験2：最大認識可能距離の評価

自車線前方150mから先行車を徐行で後退させ、評価対象車両が先行車を認識した際の先行車までの距離を評価した。なお、評価対象車両のACC設定車速は60km/h及び100km/hとした。また、ACCの車間は評価対象車両における最短設定とした。

## 3. 実験結果

### 3. 1. 降雨環境の車速制御への影響 (実験1)

実験1における降雨の影響を調べた結果を表1に示す。実験条件は、降雨なし、20~100mm/h (20mm/h 間隔) とした。本実験では、降雨なしのときワイパーOFF、降雨ありのときワイパーON (AUTO) 及びOFFとした。また、参考のため2022年7月12日に熊谷地方で観測された実降雨でも計測した (計測を行った15時台の降水量は15mm/h<sup>2)</sup>)。

表1 降水量と平均車速 [km/h] (ワイパーAUTO)

降雨	設定車間			
	最長4	3	2	最短1
降雨なし	45	55	65	100
20mm/h	46	53	64	100
40mm/h	44	54	66	101
60mm/h	44	56	66	100
80mm/h	46	55	65	100
100mm/h	45	54	64	101
実降雨 (15mm/h)	45	54	66	100

表1より、降雨なしを含むいずれの降水量においても同様の平均車速であり、降雨による影響がないと考えられる。なお、降雨中にワイパーをOFFにするとACCが無効化され、車両による車速制御がない状態となった。したがって、ワイパーの適切な作動により、

降水量に関係なく先行車が正確に認識でき、車速制御に影響がないものと考えられる。

### 3. 2. 霧における認識性能（実験1）

降雨装置で霧を発生させた場合、図2に示すように先行車や白線の認識が途絶える現象が発生した。また、霧により視程が短くなった場合はACCが無効化されることが分かった。ただし、本装置の霧は風の影響を受けやすいため、本装置により正確な試験を行うには視程の制御に課題がある。



(a) 先行車／左右白線を認識した状態



(b) 先行車／右白線を見落とした状態

図2 霧における認識

### 3. 3. 降雨環境下の最大認識可能距離（実験2）

降雨環境下における最大認識可能距離の結果を表2に示す。実験条件は、降雨なし、20~100mm/h (20mm/h 間隔)とした。本実験でも降雨なしのときワイパーOFF、降雨ありのときワイパーON (AUTO) 及びOFFとした。

評価対象車両は、車速に応じて最大認識可能距離が変わる仕様であり、10m程度のばらつきはあるものの60km/hでは80m程度、100km/hでは130m程度で先行車を捉えており、降雨による影響は少ないと考えら

れる。なお、降雨中にワイパーOFFにするとACCが無効化され、先行車の認識ができない状態となった。

表2 降雨環境下の最大認識可能距離

(ワイパーAUTO)

降雨	60km/h	100km/h
降雨なし	77m	126m
20mm/h	85m	127m
40mm/h	79m	122m
60mm/h	88m	128m
80mm/h	78m	127m
100mm/h	85m	128m
実降雨	88m	128m

### 4. おわりに

本研究では、降雨装置を用いてステレオカメラにより認識を行う車両の降雨環境下における認識性能を評価した。ワイパーを適切に作動させることにより、降水量に関係なく対象を正しく認識できること、降雨よりも霧の方が認識に悪影響を与えることがわかった。

なお、並行して進めている研究では降雨環境下におけるステレオカメラによる認識性能は、フロントガラス上の水滴の状態に影響されることが示唆されているため、認識情報を取得できる単体のステレオカメラを用いた検証も進めている。

### 謝辞

本装置の開発及び本実験にご協力いただいた株式会社堀場製作所へここに謝意を示します。

### 参考文献

- 1) 児島亨、新国哲也他、自動車技術会 2022 年秋季大会学術講演論文集、降雨環境下における車両の認識性能を走行状態で評価可能な試験装置の開発、20226096.
- 2) 気象庁ホームページ：  
[https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/ctrn/view/hourly\\_s1.php?prec\\_no=43&block\\_no=47626&year=2022&month=7&day=12&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/ctrn/view/hourly_s1.php?prec_no=43&block_no=47626&year=2022&month=7&day=12&view=)  
(2022 年 7 月 15 日にアクセス)

# ⑩自動運転車の公道試験におけるシナリオに関する研究

自動車安全研究部

※中川 正夫

元自動車安全研究部

杉本 岳史

## 1. はじめに

自動運転車が遭遇する様々な交通場面における安全性を網羅的に確認するため、従来の試験場における試験だけでなく、公道における試験やシミュレーションを用いた試験、監査や市場投入後の継続的な調査等を組み合わせる新試験法（NATM: New Assessment and Test Method<sup>1)</sup>）が国連欧州経済委員会自動車基準調和世界フォーラム（WP29）において議論されている。なかでも、実際の運行設計領域である公道での試験において、自動運転車の安全性の評価をいかに行うかが課題となっている。

レベル 3 の自動運転に関する国連協定規則第 157 号<sup>2)</sup>（以下、UNR157）には、道交法の遵守や遭遇した交通場面に対する対応等、公道試験において評価すべきシナリオが記載されている。しかし、記載されているシナリオ全てを公道において評価できるか不明であることから、本研究では記載されているシナリオに遭遇可能か、公道試験として成立するか否かについて考察を行った。

## 2. 調査の概要

高速道路において遭遇するシナリオの取得にあたり、表 1 に示す異なる 3 つのルートを行走した。なお、UNR157 では渋滞を 5 時間含むことと規定されているが、本研究ではわざと渋滞に合うために休日の渋滞を狙うようなことはせず、平日の日中の走行を基本とした。結果、延べ 1090km、17.2 時間（うち、渋滞時が 5 時間）走行し、UNR157 の規定を満たした。

表 1 走行ルート

	スタート・ゴール	距離
ルート 1	調布 IC・花園 IC 往復	196km
ルート 2	霞が関 IC・台場 IC 往復	30km
ルート 3	府中 IC・常総 IC・谷田部 IC・高井戸 IC	192km

ドライブレコーダ（CS-41FH、セルスター製）より、図 1 に示す正面画像及び車内インパネ情報を時間同期して取得し、GNSS による位置情報や車速を取得した。ドライブレコーダにより取得した情報から、遭遇したシナリオを分類した。



(a) 正面画像



(b) 車内インパネ

図 1 ドラレコで取得した画像

## 3. 実験結果

### 3. 1. シナリオの分類

UNR157 に記載されている全 33 のシナリオ（うち 20 が必須、13 が推奨）について、以下の定義の元に分類した結果を表 2 に示す。

ラベル A：必然的に遭遇できるシナリオ（ルートにかかわらず遭遇できた場面、例：法定速度の変化）

ラベル B：自車により発生させる必要のあるシナリオ（自車から動かねばならない場面等、例：自車の車線変更）

ラベル C：他車両を用いて意図的に再現が必要なシナリオ（遭遇が極めて難しかった／遭遇できなかった場面、例：合流車線からの他車合流）

表 2 シナリオの分類結果

必須/推奨	ラベル	シナリオ数
必須	A	10
	B	6
	C	4
推奨	A	2
	B	-
	C	11

### 3. 2. 試験としての成立性

ラベル A は、いずれのルートを行っても遭遇できたシナリオであり、表 2 の通り必須なシナリオの半数を占める一方、推奨のシナリオでは 2 条件のみであった。また、ラベル B はドライバによるオーバーライドやシステムによる車線変更等、意図的に発生させるシナリオであり、試験項目として意図して行う必要があると考えられる。なお、推奨シナリオのラベル B には遭遇しなかった。

ラベル C は遭遇することが困難なシナリオであり、他車両を準備する等して意図的に再現する必要があると考えられる。例えば、「他車の合流車線からの合流」は、インターチェンジ等の合流車線毎に遭遇する機会があるものの、タイミングによっては合流車両に遭遇できない場合もあり、先行車との車間が狭い場合は合流車両が自車の前に合流しない等、シナリオが成立する確率が低かった。合流車線までに意図的に車速を落とし、車間距離を長くすれば成立しやすくなると考えられるが、自然な走行ではないため、試験としてそのような走り方をすべきか否かは議論が残ると考えられる。また、「車線終端での自車の車線変更」は渋滞中に 10 回試行することとされているが、図 2 に示すように工事等により走行していた車線が閉じるために車線変更をせざるを得ないシナリオであり、遭遇すること自体が稀である。このシナリオを再現するには他車両の準備だけでなく、車線を閉じる必要もあり、限られた時間の中で 10 回も試行することは困難であると考えられる。

また、異なる 3 ルートを走行したが、いずれの走行ルートにおいてもラベル A のシナリオには遭遇し、ラベル C のシナリオには遭遇する機会が少なかった。したがって、ラベル A、B、C のシナリオの遭遇可能性は走行ルートにはほとんど依存しないと考えられる。一方で、公道試験における走行ルートの評価及び選定については更なる考察が必要になると考えられる。



図 2 必須だが遭遇の難しいシナリオの例

さらに、本研究では UNR157 で暫定的に規定されている走行時間を満たしているが、33 シナリオ全てを網羅できていない。遭遇できていないシナリオに遭遇するための工夫なく走行を継続しても、ラベル A のシナリオが取得されるのみで、ラベル B やラベル C には遭遇できないと考えられる。

### 4. おわりに

本研究では、自動運転車の公道試験を実施するにあたり、高速道路において遭遇するシナリオに関して考察を行った。UNR157 で羅列されている公道試験において検証すべきシナリオは、必然的に遭遇できるシナリオ、自ら発生させる必要のあるシナリオ及び他車両を用いて意図的に再現が必要なシナリオに分類され、UNR157 に規定されているように全てのシナリオを公道試験で確認するのは難しいことがわかった。

公道試験における各シナリオの実施方法に関しては更なる検討が必要なものの、自ら発生させる必要のあるシナリオ及び他車両を用いて意図的に再現が必要なシナリオは試験場等において別の試験項目として実施し、公道試験では自然な交通流において必然的に遭遇できるシナリオに限定することが妥当である。

なお、本研究に関連したより詳細な研究を自動車技術会論文集に発表している<sup>3)</sup>ので参考にされたい。

### 参考文献

- 1) ECE/TRANS/WP.29/2022/58.
- 2) ECE/TRANS/WP.29/2022/59/Rev.1.
- 3) 中川正夫、杉本岳史、自動運転車の公道試験において遭遇し得るシナリオに関する考察、自動車技術会論文集、Vol.53, No.5 (2022). pp.1016-1020.

# ⑪大型ドライビングシミュレータの開発

自動車安全研究部 ※田中 信壽 児島 亨 関根 道昭

## 1. はじめに

現在、自動車基準調和世界フォーラム (WP29) の自動運転専門分科会 (GRVA) では、自動運転車に関する法規が議論されている。その中の一つである協定規則第 157 号 : ALKS (Automated Lane Keeping Systems) では、自動運転車の衝突リスクは「少なくとも習熟した注意深いドライバ (The Competent and Careful human driver、以下、C&C ドライバ) と同程度」にすることが求められている。

そこで当研究所では、この C&C ドライバの様に運転支援システムや自動走行システムの車両制御の規範となる人間ドライバの運転特性を明らかにするために大型のドライビングシミュレータ (Driving simulator、以下、DS) の施設整備を行った。

## 2. ドライビングシミュレータの構成

当研究所で整備した DS (日本無線株式会社製) は、6軸動揺装置、ターンテーブル、運転環境再現装置、並進装置及び視覚環境再現装置で構成される (図 1)。以下に各装置の概要を示す。



図 1 大型ドライビングシミュレータ

### 2. 1. 6軸動揺装置

6軸動揺装置は、車両に発生する Yaw、Pitch 及び Roll の回転並びに前後、上下及び左右の各方向の直線移動の運動情報をドライバに提供することを目的とした装置である (図 2)。可動範囲は、中心

位置から Yaw 最大 $\pm 13$  deg、Pitch 最大  $-15 \sim +13$  deg 及び Roll 最大 $\pm 14$  deg 並びに前後最大 $\pm 300$  mm、左右最大 $\pm 300$  mm 及び上下 $\pm 290$  mm である。最大加速度は、直線方向で $\pm 500$  mm/s<sup>2</sup>、回転方向で $\pm 150$  deg/s<sup>2</sup>である。

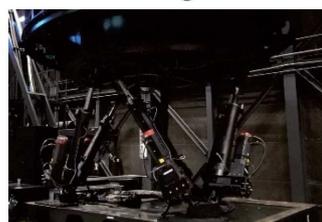


図 2 6軸動揺装置



### 2. 2. ターンテーブル

ターンテーブルは、交差点の右左折時等で車両に発生する大きな Yaw 回転の運動情報をドライバに提供することを目的とした装置である (図 3)。可動範囲は、中心位置から $\pm 180$  deg である。また、最大角加速度は $\pm 120$  deg/s<sup>2</sup> である。



図 3 ターンテーブル

### 2. 3. 運転環境再現装置

運転環境再現装置は、ステアリングやペダルの操作、ナビ操作、外部騒音等、実車両の運転と同等の操作感をドライバに提供することを目的とした装置である (図 4)。ステアリング反力は最大トルク 30 Nm ブレーキ反力は最大推力 300 N 及びアクセル反力は最大推力 150 N まで瞬時に発揮することが可能である。



図 4 運転環境再現装置

## 2. 4. 並進装置

並進装置は、車両が始動から巡航速度に達するまで等の長時間前後方向に生じる加減速度をドライバに提供することを目的とした装置である(図5)。本装置はリニアモータを搭載し、中心位置から前後の水平方向に±4,000 mm 移動することが可能である。発揮できる最大加速度は前後方向で±4,000 mm/s<sup>2</sup>である。



図5 並進装置

## 2. 5. 視覚環境再現装置

視覚環境再現装置は、実車両の運転時と同等の視覚情報をドライバに提供することを目的とした装置である(図6)。高輝度有機ELディスプレイ(55”、1920×1080 pixel、400 cd/m<sup>2</sup>、100,000 : 1 (コントラスト比)) 17台を曲面加工し、運転環境再現装置を覆うように直径3.8mの円筒形をなす360°スクリーンを実現している。

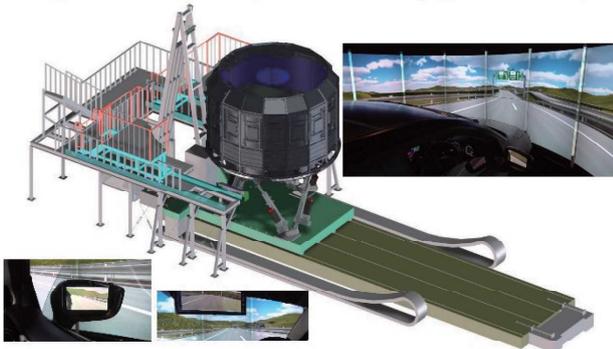


図6 視覚環境再現装置

## 2. 6. その他の機能

本DSでは、以下に示す実在する道路環境をCGにより仮想空間として模擬することが可能である。

- ・お台場エリア(フジテレビ、東京港湾合同庁舎、東京湾岸警察署等を含む約5 km 四方)
- ・首都高速道路環状線C1
- ・新東名高速道路(引佐連絡路周辺約20 km 分)

また、ドライバが運転する車両の運動はバーチャルメカニクス社製Carsimを用いて再現しており、

Matlab/Simulink 又はC++言語プログラミングで制御することが可能である。車両運動に伴う変数情報(自車位置、自車速度、自車操舵角、他車情報等)をリアルタイムに取得し、その情報を加工して評価対象として模擬した運転支援システムや自動走行機能に利用する(警報を発報する、自動操舵を行う等)ことも可能である。また、現在、以下の運転支援システム及び自動走行機能の模擬が可能である。

- ・Cruise Control 及び Adaptive Cruise Control
- ・AEBS 及び ACSF category C の車線変更機能
- ・Lane Keeping Assist System

インターフェース機能の一つとしてナビゲーション機能も有している。運転環境再現装置は、アナログ入力及びデジタル入力を備えており、視線計測装置等の外部計測機器のデータもDSの情報と同期した状態で収集することが可能である。

## 3. まとめ

本DSは、ドライバが実環境で実車両を運転する際の運転特性を安全かつ定量的に計測することを目的とした装置である。これを実現するためには、ドライバに実環境における運転時と同等の環境をDSで提供する必要がある。これを実現すべく、上記のような多岐にわたる感覚情報を提供する装置で本DSを構成した。特に、人間が受け取る感覚情報のうち、視覚の重要性が最も高いと考えられることから高輝度有機ELディスプレイを周囲に360°配置し、あらゆる方向から鮮明な映像を提供する点が本DSの特徴である。今後、ドライバの運転行動に基づいて安全上最低限担保すべき運転支援システムの性能や自動運転車の車両制御の規範となるC&Cドライバの運転行動などを明らかにする研究に本DSを使用していく予定である。

また、本DSは、その装置構成によって多くの感覚情報を高い自由度で再現可能となり、臨場感の高い仮想空間を設計できる可能性が高まった。その反面、実環境での運転時に得られる多くの感覚情報を複合的に整合させる必要が生じ、仮想空間の設計の難易度が大きく上がった。実環境との同等性が崩れた仮想空間を不用意に被験者であるドライバに提供した場合、各知覚情報間の矛盾が原因でシミュレータ酔いを発症させてしまう危険性がある。よって、今後は、実環境と高い同等性を有した仮想空間の設計方法や運用方法に関する研究についても進めていく予定である。

# ⑫ 高速道路上で車線変更中に衝突の危険性が高い状態に遭遇した場合のドライバーのリスク回避行動に関する研究

自動車安全研究部 ※真鍋 裕輝 児島 亨  
元自動車安全研究部 岩瀬 常利

## 1. はじめに

高速道路等自動車専用道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)を行うことを可能とする改正案(UN-R157/01 series)が2022年6月のWP29において採択された。本研究では、将来、自動運転車が LC の実行中に危険事象に遭遇した場合に求められる回避能力をより具体化する場合に備え、LC 時に遭遇すると考えられる危険事象について一般ドライバーの運転行動を調査した。

## 2. 調査の概要

本実験ではドライビングシミュレータを用い、片側3車線の道路において、第1車線を走行する実験参加者が LC を行う際に危険事象に遭遇する以下の4場面を再現した。実験参加者が運転する車両を Ego Vehicle (以下、Ego) とし、Ego に接近する行動を起こす車両を Subject Vehicle (以下、Sub) とする。

- LC1: Ego の前方の第1車線の Sub が、Ego の LC 開始と同時に減速を開始し停止
- LC2: Ego の前方の第1車線の Sub も、Ego の LC 開始と同時に第2車線への LC を開始
- LC3: Ego の後方の第1車線の Sub が、Ego の LC 開始と同時に加速しながら LC を開始
- LC4: Ego の2つ隣の車線を走行する Sub が、Ego の LC 開始と同時に中央の車線への LC を開始

## 3. 実験結果

### 3. 1. LC1 (先行車急減速)

LC1 について、Ego と Sub の速度差 20 km/h の条件における Ego が方向指示の操作を開始した時点の Sub との衝突予測時間(Time to Collision、以下、TTC)を求めた。これを最小 TTC が 0.9 秒未満だった場合と 0.9 秒以上だった場合に分けて示す(図 1)。TTC 0.9

秒は、乗用車の衝突被害軽減ブレーキ(以下、AEBS)に関する国連協定規則(UN-R152)を策定段階において、AEBS の緊急制動が作動を開始する目安として提案された値である<sup>2)</sup>。図 1 より、最小 TTC が 0.9 秒未満だった場合は、Ego が方向指示器の操作開始時点における TTC が約 8 秒を下回っていた。一方、最小 TTC が 0.9 秒以上だったほとんどの場合、方向指示器の操作開始時点で約 8 秒以上の TTC が確保されていた。以上より、速度差 20 km/h の Sub を追い越す場合には、TTC を 8 秒以上確保すると Sub が急減速した場合でも衝突を回避できる可能性が高まることが示唆された。

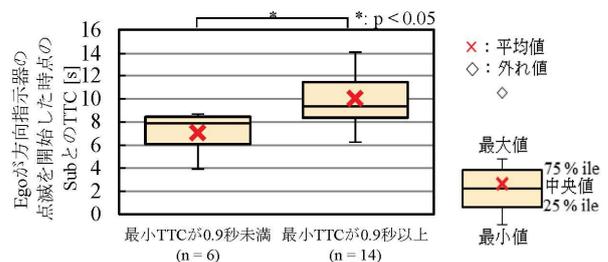


図 1 Ego が方向指示器の点滅を開始した時点の Ego と Sub の TTC (LC1)

### 3. 2. LC2 (先行車も同時に LC)

LC2 における、Sub の横移動の開始から Ego が衝突回避行動を起こすまでの反応時間を図 2 に示す。

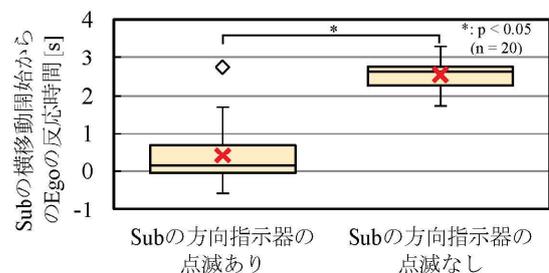


図 2 Sub の横移動開始からの反応時間 (LC2)

Sub が方向指示器を点滅させる場合と、点滅させない場合に分けて示した。Sub が方向指示器を点滅させ

る条件は、点滅させない条件よりも、反応時間が有意に短かった。また、Sub が方向指示器を点滅させる条件では 0 秒を下回る結果も見られることから、Sub が横移動を開始する前に Sub の方向指示器に反応した実験参加者がいることを示している。

### 3. 3. LC3 (追従車が加速しながら LC)

LC3 において、実験参加者が LC を中止し、元の車線にとどまった場合に関して調べた。図 3 に LC を中止した時点の Sub の横移動量を示す。Ego と Sub の最小 TTC が 0.9 秒未満だった場合と、0.9 秒以上だった場合を比較した。図 3 より、最小 TTC が 0.9 秒以上だった場合は、横移動量が小さいため、速やかに追従車の接近に気づいたものと考えられる。

また、LC を完了 (車線変更後、方向指示器の点滅終了を LC 完了と定義) した実験参加者の行動を調べた。図 4 は LC を完了した実験参加者が方向指示器の操作を開始してからすべての車輪が車線境界線を通るまでの時間を比較したものである。図 4 では、LC3 において Ego と Sub の初期相対距離が 56 m の場合と 28 m の場合と Sub が存在しない自発的な LC (ダミー) と比較した。図 4 より、追従車が Ego と近い位置 (28 m) にいる場合には、Ego と遠い位置 (56 m) にいる場合や Ego の近くに追従車がないダミーの LC と比較すると、LC の開始から完了までの時間が有意に短くなることがわかった。

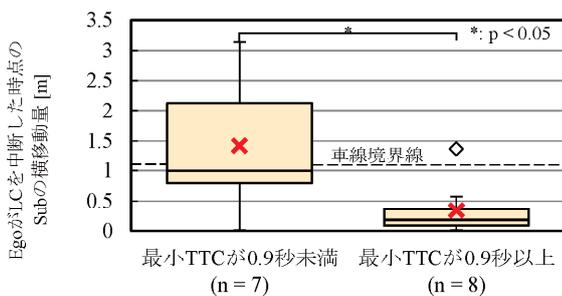


図 3 LC 中止時の Sub の横移動量 (LC3)

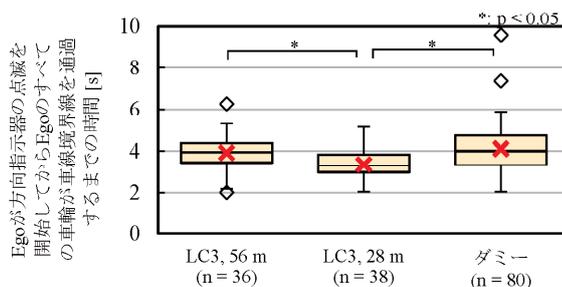


図 4 LC を完了した実験参加者の LC に要した時間 (LC3)

### 3. 4. LC4 (2 つ隣の車線の車両も LC)

LC4 において Ego が回避行動をおこなった時点の Sub の横移動量を調べた。Sub との衝突を回避した場合と Sub と衝突した場合の結果を図 5 に示す。図より、Sub との衝突を回避できた場合には、Sub が車線境界線に到達するまでに回避行動を開始したことがわかる。一方で、衝突した場合は Sub が車線境界線に到達した以降に回避行動を開始していることから、2 つ隣の車線の車両が LC の実行意思を確認した場合には、その車両が車線境界線に到達するまでに回避行動をとらないと衝突の危険が高くなることがわかった。

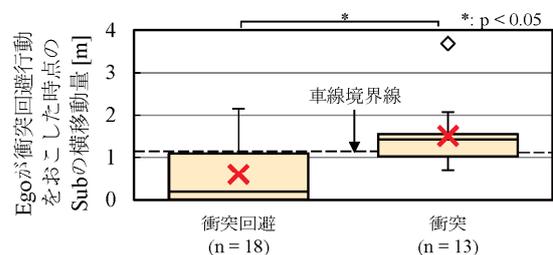


図 5 Ego が回避行動をおこなった時点の Sub の横移動量 (LC4)

## 4. おわりに

本研究では、LC を実行する際に発生しうる危険事象をドライビングシミュレータで再現し、実験参加者の運転行動を調査した。比較的安全な結果となった実験参加者の運転行動には以下の特徴がみられた。

- ・ 追い越しのための LC 時に先行車との車間を大きめに取る (LC1)
- ・ 先行車の方向指示器を認識し、自車の行動に反映する (LC2)
- ・ 追従車が自車の近くで加速しながら LC 時、自車は通常の LC よりも素早く LC を実行する (LC3)
- ・ 後方の車両、もしくは 2 つ隣の車線の車両と LC のタイミングが重なった場合にはすばやく LC を中断する (LC3, LC4)

## 参考文献

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

## ⑬自動運転中の二次タスクと運転引継ぎに関する研究

自動車安全研究部  
中央大学

※阿部 晃大  
速水 亮

加藤 洋子  
戸井 武司

関根 道昭

### 1. はじめに

レベル3以上の自動運転システムでは、あらかじめ定められた運行設計領域内（operational design domain、ODD）において、車両の運転に必要な「認知・判断・操作」をシステムが担う。そのため、自動走行中にドライバー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<sup>1)</sup>は、レベル3のシステムに車両故障やODDの逸脱が発生して自動運転が継続困難となった際、運転引継ぎ要求（transition demand、TD）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ーが応じない場合は、リスク最小化制御（minimum risk manoeuvre、MRM）が開始される。そのため、TDを受けたドライバーは速やかに運転を引継ぐ必要がある。

2019年に改正された道路交通法では、これまで運転中に禁止されていた携帯電話の保持通話やカーナビ画面の注視等について、自動運転の継続が困難となった際にドライバーが直ちに運転を引継ぐことを条件として、罰則を適用しないとされた。これは自動運転中に一定の運転以外の作業（二次タスク）に従事することを認めるものであり、今後自動運転技術がさらに発展していくことにより、他の二次タスクについても解禁に向けた議論がなされていくとみられる。

自動運転はドライバーの負担を軽減するものの、眠気を生じさせるおそれがあると言われており<sup>2)</sup>、覚醒を維持できる過ごし方が課題になる。しかしながら、自動運転中のドライバーが動画視聴などの二次タスクに没入していた場合、TDに気づかない、もしくはTDの警告音を動画の効果音と誤解して運転を引継がない可能性がある。自動運転システムはまだ普及しておらず、TDの適切な提示方法に関する検討は十分ではない。本研究ではTDとしての警告音に注目し、スマートフォンを用いた二次タスクの内容や、警告音の音質が運転引継ぎ行動に与える影響を調査した。

### 2. 二次タスクと警告音

この実験では3種類の二次タスクを検討した。①動画視聴課題条件では、6種類の動画から好きなものを選んで視聴した。②計算課題条件では、図1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、その和の下一桁を入力する作業を繰り返して行った。③課題なし条件では、スマートフォンを片手で持つのみで何も行わなかった。

警告音は周波数1.6kHz、音圧60dB(A)とし、吹鳴周期2Hzと6Hzの2種類を用意した。これらは暗騒音と重ねても十分聞こえる音であり、吹鳴周期により緊急感が異なることを確認している<sup>3)</sup>。

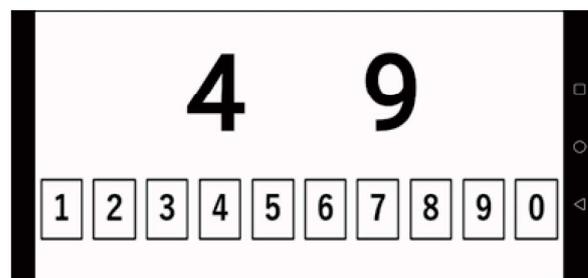


図1 ②計算課題条件におけるスマートフォン画面

### 3. 実験概要

#### 3. 1. 実験シナリオ

実験参加者はドライビングシミュレータ（DS）に乗車し、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片手で持ち、指定された課題を行った。走行開始から6分後に助手席側のスピーカから警告音が10秒間（引継ぎ余裕時間）提示され、その間に実験参加者は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求めた。運転を引継がない場合、本研究ではMRMについて検討しないため、警告音終了とともに自動運転を解除した。

実験に使用したコースは2種類とし、TDが曲線半径300mのカーブで提示される道路1と、直線で提示

される道路 2 を実験参加者ごとにランダムな順序で行った。本発表では道路 1 の結果について述べる。

### 3. 2. 実験参加者

運転免許を保有する実験参加者を研究所外部から募集し、20代から50代の若年者18名（男性9名、女性9名）、60代から80代の高齢者19名（男性13名、女性6名）が参加した。

## 4. 実験結果

### 4. 1. 警告音に対する印象

警告音に対する印象について、8項目を7段階で評価した結果を図2に示す。若年者・高齢者ともに吹鳴周期6Hzは2Hzよりも危機感や緊急感を抱きやすいことがわかる。

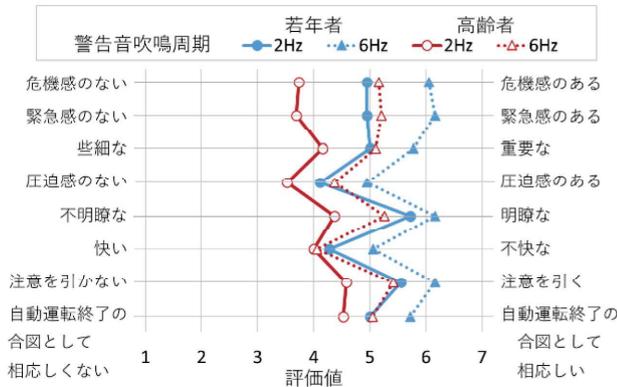


図2 警告音に対する印象

### 4. 2. 警告音に対する反応

警告音の提示開始から運転引継ぎ行動をとるまでの時間を実験映像から求めた。吹鳴周期による明確な違いは見られなかったため、合算して図3に示す。①動画視聴と②計算課題の平均反応時間は③課題なし条件より長くなる傾向がみられた。反応時間は特に①動画視聴において長く、動画に含まれる音声はTDの認識に悪影響を及ぼしたと推測される。

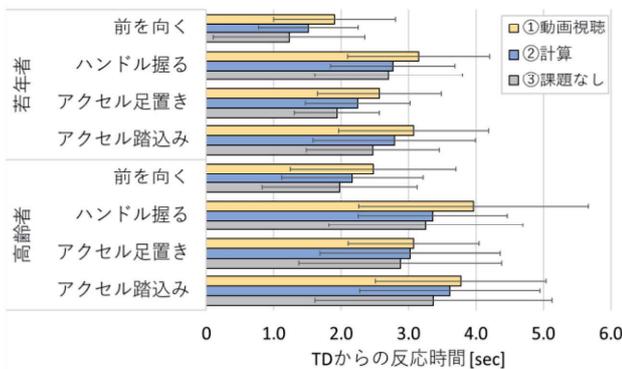


図3 TD提示からの平均反応時間  
(吹鳴周期合算、エラーバーは標準偏差)

## 4. 3. 運転挙動

DSの走行ログから、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。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、図4に示す結果では、一部を除き②計算課題の値が最も低くなった。②計算課題には集中力を要するものの、問題の区切りで容易に中断できることから、運転を引継ぎやすかったと推測される。また、吹鳴周期6Hzの警告音は2Hzよりも左右移動量が少なかった。警告音の危機感や緊急感がドライバの注意を促し、適切な運転につながったと考えられる。

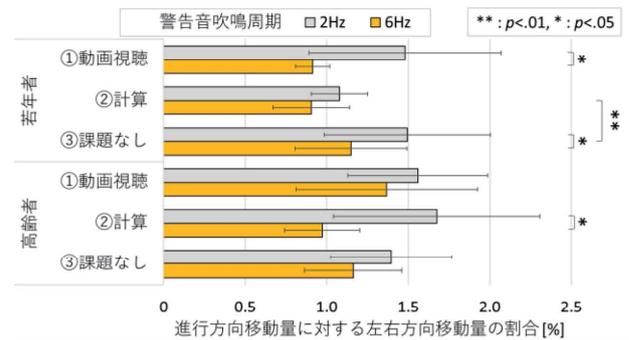


図4 進行方向に対する左右方向の移動量の割合

## 5. おわりに

今回の実験結果から、自動運転中に従事する二次タスクの内容や警告音の特性によって反応時間が短くなり、引継ぎ後の運転挙動が安定する可能性があることを確認した。実際の自動運転環境でドライバ自身が好む二次タスクに没入する場合、運転引継ぎや車両挙動のパフォーマンスが低下するおそれがある。また、より複雑な交通環境での運転引継ぎ行動についても検討する必要がある。今後はより現実的な二次タスクや交通環境が運転引継ぎ行動に与える影響や、有効なTDの提示方法などについて研究する予定である。

## 参考文献

- 1) UN Regulation No. 157 - Automated Lane Keeping Systems (ALKS) (2021)
- 2) 本間亮平、若杉貴志、小高賢二：高度自動運転における権限移譲方法の基礎的検討、自動車技術会論文集、Vol.47、No.2、p.537-542 (2016)
- 3) 五十部健太、戸井武司：セカンダリアクティビティと警告音の差異による自動運転引継ぎ時の行動評価、日本音響学会研究発表会講演論文集(秋季)、No.1-11-7 (2021)

## ⑭高齢者における電気自動車の速度調整に関する研究

自動車安全研究部  
東京農工大学

※関根 道昭 加藤 洋子 阿部 晃大  
宮崎 一樹

### 1. はじめに

近年、国内外を問わず電気自動車やハイブリッド自動車など（以下、電動車）が増加している。電動車は、モータ駆動による滑らかな加速と、回生ブレーキによる速やかな減速が特徴である<sup>(1)</sup>。中には油圧ブレーキを使用せず、回生ブレーキのみで減速、停止まで行える車種も存在する。一方、長年ガソリンエンジン車を運転してきた高齢ドライバーは、電動車のペダル操作にうまく適応できない可能性がある。そこで本研究は、電動車のペダル操作特性が高齢者の運転動作に及ぼす影響を調査し、安全走行のために求められる対策について考察する。

### 2. 実験概要

実験には、実車と同等の運転姿勢と視界を再現できる定置型ドライビングシミュレータを用いた（図1）。市販の電動車を参考にアクセルペダルを踏み込むと強く加速し、戻すと強く減速する電動車モデルをシミュレータ上に作成した。このような車両は速度の調整が難しいと考えられるため、交通流に合わせて一定速度を維持する定速走行条件と、周りの車両の車速変化に合わせて加減速を繰り返す速度変更追従条件を設定した。定速走行条件では、3車線直線路の中央車線を常に55 km/hで走行した。左車線に50 km/h、右車線に60 km/hの車両を複数走行させ、これらの中間の速度で走行することを求めた。速度変更追従条件では、自車の左車線前方、右車線前方、左車線後方、右車線後方に1台ずつ計4台の車両を配置し、常に4台の中央を走行することを求めた。周辺の4台は「発進→20 km/h→40 km/h→50 km/h→60 km/h→50 km/h→40 km/h→20 km/h→停止」の順に速度が変化した。各速度を1分間ずつ維持し、1 m/s<sup>2</sup>の加速、減速で次の速度に移行した。以上の条件において、速度変化やペダル操作の様子などを観察した（図2）。電動車の場合は、できるだけアクセルペダルのみで速度調整を行い、ブレーキペダルを踏まないように求めた。また、比較対象として一般的なエンジン車モデルでの走行

も行った。各走行終了後には指示通りに運転できたかなどを聞き取るアンケートを行った。

当研究所の実験倫理規程に基づき高齢者12名（平均年齢74.6歳）と若年者15名（平均年齢40.1歳）が実験に参加した。シミュレータ酔いなどで実験を中断した高齢者2名を解析対象から除外した。



図1 定置型ドライビングシミュレータ



図2 実験記録映像の例

### 3. 実験結果

#### 3.1 定速走行条件

定速走行条件における約3000 mの走行データについて、参加者ごとに目標速度の55 km/hと自車速度の差の平均とその標準偏差を求めた。図3に高齢者（E1~E12）、図4に若年者（Y1~Y15）の結果を示す。高齢者の場合、目標速度との差の平均において、エンジン車と電動車の間に大きな差は見られなかったが、電動車の標準偏差はエンジン車よりも大きかった。標

標準偏差が大きい参加者の足元映像を確認すると、アクセルペダルを適切な位置で維持することができず、連続的にゆっくりと踏み込んでいき、速度が超過すると一気にペダルを戻す動作を繰り返しており、ペダルの操作回数が多かった。このようなペダル操作は、高齢者では10名中7名、若年者では15名中5名において観察された。エンジン車ではアクセルペダルを頻繁に操作しても、加減速が緩やかであるが、電動車では強く加速・減速するため、目標速度を維持することが難しく、調整のためのペダル操作が増加すると考えられる。

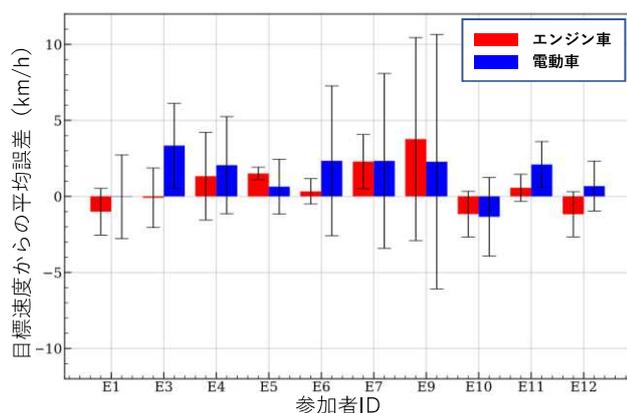


図3 定速走行条件の結果（高齢者）

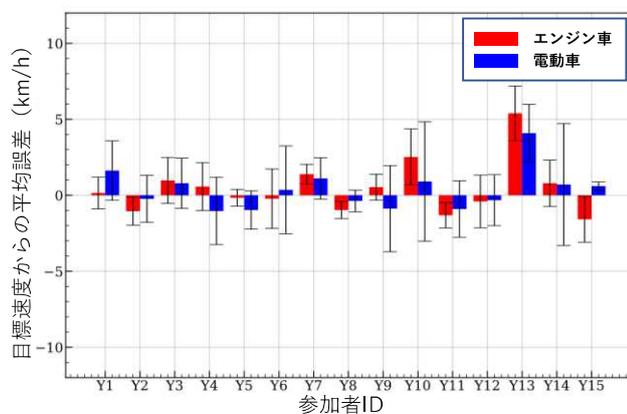


図4 定速走行条件の結果（若年者）

### 3. 2 速度変更追従条件

速度変更追従条件では、定速区間における目標速度との差の平均と標準偏差において、高齢者と若年者の間に大きい差が観察されなかった。大半の高齢者と約半数の若年者は、周辺車両の速度に安定して追従することが困難であった。速度追従が安定していた例と不安定だった例を図5、図6に示す。この図は、周辺車両の速度（目標速度）に対する自車両の速度変化を示したものである。参加者E12（図5）は、周辺車両の

速度と自車両の速度がほぼ一致しているが、参加者E7（図6）はいずれの目標速度においても速度が不安定である。アンケートによると、速度追従が不安定だった参加者は、日常的な運転頻度が低く、自動車技術への関心が低い者が多かった。また、実験後のヒアリングにより、高齢者は若年者よりも電動車とエンジン車の違いを理解していない者が多いことを確認した。

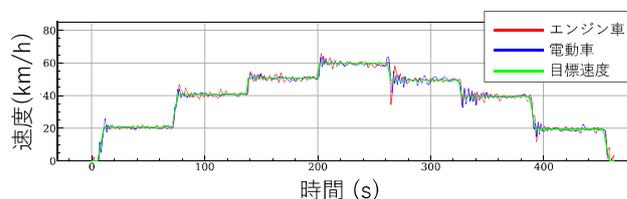


図5 速度変更追従条件の結果（参加者E12）

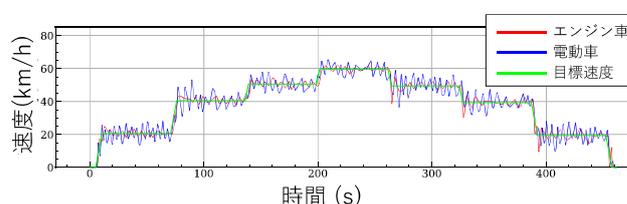


図6 速度変更追従条件の結果（参加者E7）

## 4. まとめ

今回の実験の結果、多くの高齢者は電動車において、エンジン車よりもアクセルペダルの操作回数が多かった。一方で、全ての若年者のアクセルペダル操作が安定しているわけでもなかった。特に、目標速度が頻繁に変化する場合は、年齢に依らず速度が不安定になり、アクセルペダルの踏み込み量、戻し量が大きくなる者が増加した。このようなドライバーの速度を安定させるためには、加速や減速をマイルドに制御するなどの車両側の対策が必要と考える。本論文では、目標速度の定速区間を解析対象としたが、今後は、加速、減速のタイミングや速度が安定するまでに要する時間なども含めて定量的に評価を行う予定である。

また、アンケート等の結果、高齢者は若年者よりも、電動車とエンジン車の違いを理解していない者が多かったため、加齢が車両の違いの理解に与える影響についても今後調査を行う必要がある。

### 参考文献

- (1) 力丸進, “EV車のモータ技術”, 文部科学省委託業務「次世代自動車エキスパート養成教育プログラム開発事業」, (2015)

# ⑮ペダル踏み間違い事故のマクロデータ分析

自動車安全研究部 ※加藤 洋子 阿部 晃大 関根 道昭  
 東京農工大学 宮崎 一樹

## 1. はじめに

自動車のアクセルペダルをブレーキペダルと誤って強く踏み込むことにより、車両が急加速し、他の車両や歩行者等に衝突する事故（以下、ペダル踏み間違い事故）が社会的な関心を集めている。年齢層別に見た場合、特に75歳以上の高齢ドライバーにおいて発生割合が高く、加齢による運転能力の低下や車両後退時の運転姿勢の崩れ等が原因と考えられている<sup>1)</sup>。この種の事故について様々な調査、対策が行われているが、依然として多く発生しているため、事故が発生しやすい状況を調査し、車両対策の検討等を継続する必要がある。

本研究では、ペダル踏み間違い事故の原因や対策の検討のため、「ブレーキとアクセルの踏み違い」に分類される事故のマクロ分析により、ペダル踏み間違い事故の発生状況を調査した。

## 2. 調査方法

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に登録されている四輪乗用車（軽四輪乗用車を除く）の事故について、第1当事者ドライバーの人的要因<sup>2)</sup>が「操作上の誤り」であり「ブレーキとアクセルの踏み違い」に分類される事故をペダル踏み間違い事故とみなして集計した。2011～2020年の事故データから、表1に示す発生年、ドライバーの年齢層、道路形状（発生場所）、行動類型、衝突部位、危険認知速度の項目によりクロス集計を行った。

また、運転頻度が高い区分では、必然的にペダル踏み間違い事故の件数が増えることが予想される。本研究では、運転頻度に対する事故の起こりやすさを検討するため、先行研究<sup>3)</sup>を参考に、代表的な事故類型である追突事故を対象として、第1当事者よりも過失が少なく偶然事故に遭遇した可能性が高い第2当事者（以下、2当追突事故）の件数を運転頻度の指標として用いることとした。

表1 分析項目

発生年	年齢層	道路形状	行動類型	衝突部位	危険認知速度
2011	24歳以下	単路	発進	前	10km/h以下
2012	25-34	交差点	直進	後ろ	10km/h越 20km/h以下
⋮	35-44	交差点付近	後退	側方	20km/h越
2020	45-54	一般交通の場所	その他		
	55-64				
	65-74				
	75歳以上				

## 3. 集計結果と考察

### 3. 1. 年齢層別の事故発生頻度

図1に事故発生年の区分のうちの直近3年（2018～2020年）分を合計した2当追突事故件数とペダル踏み間違い事故件数を年齢層別に示す。

2当追突事故件数（図1左）は山型の形状であり、35-44歳、45-54歳の区分が多く、24歳以下、65-74歳、75歳以上の区分は少ない。一方、ペダル踏み間違い事故件数（図1右）は、65-74歳、75歳以上の区分で多く、2当追突事故件数の分布の特徴とは異なっている。2当追突事故の件数が運転頻度を反映した指標であるとし、年齢層毎のペダル踏み間違い事故件数を2当追突事故件数で除すと、75歳以上で値が突出し、次いで24歳以下、65-74歳の区分で値が高くなった（図2）。この年齢層では、運転頻度に対してペダル踏み間違いが起こりやすいと言える。

### 3. 2. ペダル踏み間違い事故の詳細分析

次に、10年間のペダル踏み間違い事故件数の推移を、道路形状、行動類型、衝突部位、危険認知速度の区分別に、若年者（64歳以下）と高齢者（65歳以上）に分けて集計した。ここでは、道路形状別と危険認知速度別の集計結果について述べる。

図3に単路、交差点（横断歩道が設けられている場合は横断歩道も含む）、交差点付近、一般交通の場所（駐車場等）の区分で集計した道路形状別の10年間の

推移を、(a) 若年者、(b) 高齢者として示す。若年者、高齢者どちらも単路での事故件数が多いが、高齢者は若年者に比べ、一般交通の場所、交差点での事故件数割合が高い。また、高齢者において、単路の件数は減少傾向であるが、交差点、一般交通の場所の件数は横ばいであり、交差点や一般交通の場所でのペダル踏み間違い事故の発生割合が高くなっているとみられる。交差点、一般交通の場所は歩行者等の交通弱者が単路よりも多く存在する場所であるため、第2当事者が交通弱者となる可能性が単路の場合よりも高い。このことが高齢者のペダル踏み間違い事故において死亡重傷件数が多いことに関連する可能性が高い。

図4に10 km/h以下、10 km/h超20 km/h以下、20 km/h超の区分で集計した危険認知速度別の10年間の推移を示す。若年者は10 km/h以下の区分が最も多く、20 km/h超の区分が最も少ない。一方、高齢者は各区分の件数が同等であり、若年者より高速域で踏み間違い事故に至る割合が高いとみられる。

#### 4. おわりに

本研究は、高齢ドライバーのペダル踏み間違い事故の原因や対策の検討のため、ペダル踏み間違い事故の発生要因をクロス集計により分析した。追突事故の第2当事者の件数を用いて運転頻度の影響を相殺したところ、75歳以上、次いで24歳以下、65-74歳の区分で、運転頻度に対してペダル踏み間違い事故が起りやすいことが明らかになった。また、道路形状、危険認知速度等のクロス集計により、高齢者は若年者に比べ、駐車場での事故発生頻度が高く、高速域で事故に至りやすいことが明らかとなった。今後、多重衝突の有無、第2当事者の種別、人身損傷程度等との関係についても調査し、対策等を強化していく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 交通事故総合分析センター：アクセルとブレーキペダルの踏み間違い事故—高齢ドライバーに特徴的な事故の防止に向けて、ITARDA Information, No.124 (2018)
- 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>
- 3) 森田和元, 関根道昭：ドライバーの事故・違反歴と事故発生状況との関係, 自動車技術会論文集, Vol.43, No.6, pp.1327-1333 (2012)

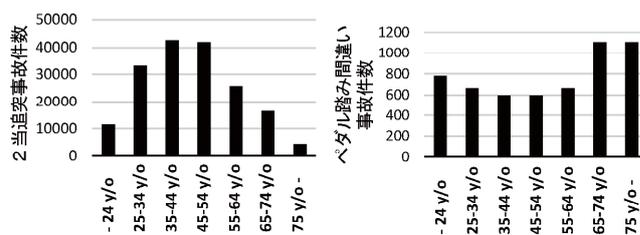


図1 2018～2020年の年齢別2当追突事故件数(左)とペダル踏み間違い事故件数(右)

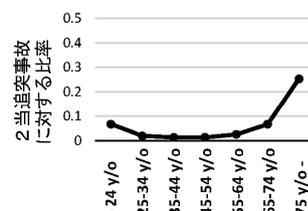
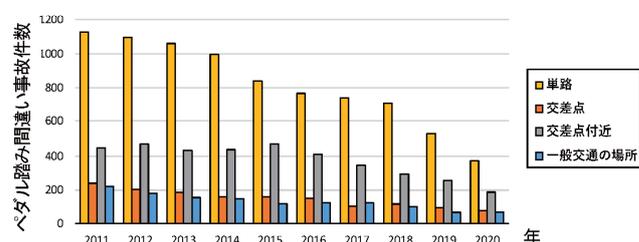
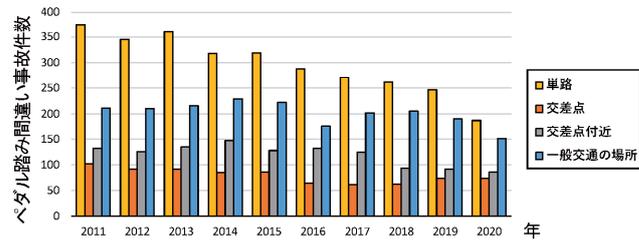


図2 ペダル踏み間違い事故の発生率

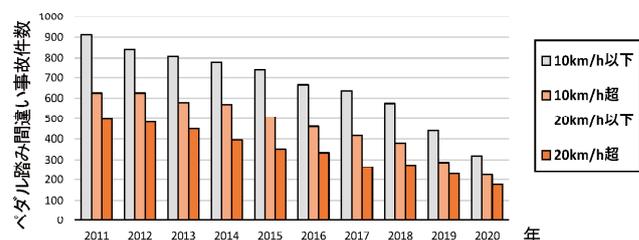


(a) 若年者 (64歳以下)

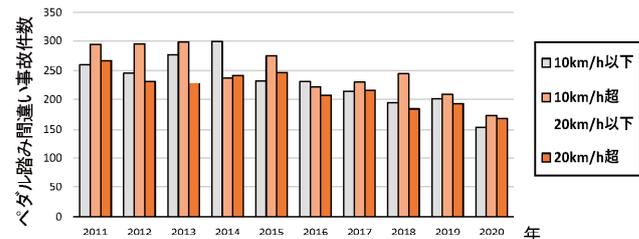


(b) 高齢者 (65歳以上)

図3 道路形状別ペダル踏み間違い事故件数



(a) 若年者 (64歳以下)



(b) 高齢者 (65歳以上)

図4 危険認知速度別ペダル踏み間違い事故件数

# ⑩高齢者にも見やすい色使いに関する研究

自動車安全研究部

ビジュアル・テクノロジー研究所

※加藤 洋子

中村 芳樹

## 1. はじめに

日本では、少子高齢化に伴い65歳以上の高齢ドライバーによる交通事故割合が増加している。その要因の一つは加齢に伴う視覚機能の低下であり、視力低下や視野障害の他、色識別能力の低下が考えられる。高齢者にとって見やすい・見えにくい色使いを理解することは、自動車灯火による安全対策や視覚機能低下を補うための運転支援機能の検討、高齢者にも見やすいヒューマンマシンインターフェイス (HMI) の設計・評価等に役立つと考えられる。本研究は、高齢者と若年者を対象として色の見やすさ評価実験を行い、筆者らが提案した色度コントラスト図<sup>2)</sup>を用いて、高齢者と若年者の色弁別特性 (色を区別する能力) を比較した。

## 2. 実験概要

高齢者の色弁別特性を検討するため、高齢者及び若年者を対象に、既往研究<sup>2)</sup>と同様の円形視標を用いた見やすさ評価実験を行った。

外部からの光を遮光した実験室において、2.5m離れた距離からPCモニター中央部に提示される均一背景上の円形視標を両眼で観察し (図1)、円形視標の見やすさを5段階 (0: 見えない、1: やっと見える、2: 多少見えにくいが見える、3: 苦勞せずに見える、4: 見やすい) の尺度で評価した。1つの条件を評価すると次の条件へ移り、実験終了まで評価を繰り返す。

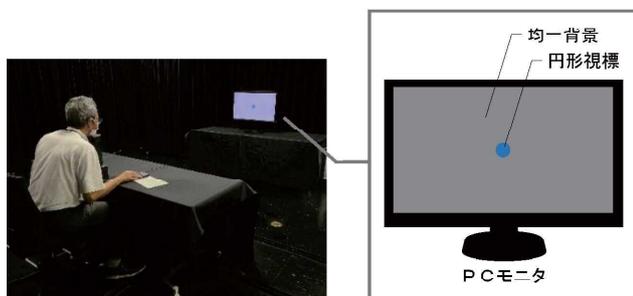


図1 実験風景

実験は、当研究所の実験倫理規程に基づき、若年者10名 (平均年齢39.4歳、標準偏差11.3歳) と高齢者6名 (平均年齢71.8歳、標準偏差2.3歳) で実施し

た。色覚検査を行い、全員が一般型の色覚であることを確認した。

## 3. 分析方法

筆者らの既往研究<sup>2)</sup>と同様に、実験条件毎に  $aC$  ([赤・緑]コントラスト)、 $bC$  ([黄・青]コントラスト) を求め、横軸:  $aC$ 、縦軸:  $bC$  とする色度コントラスト図 ( $aC$ - $bC$  図、図2) を用いて評価結果を示すこととする。 $aC$ - $bC$  図の原点は背景色と円形視標の色度が同一、 $aC$  が正の場合は背景と比べ円形視標が赤、 $aC$  が負の場合は背景と比べ円形視標が緑、 $bC$  が正の場合は背景と比べ円形視標が黄、 $bC$  が負の場合は背景と比べ円形視標が青であることを示す。次章では、図3の凡例により実験参加者の評価結果と併せてプロットする。

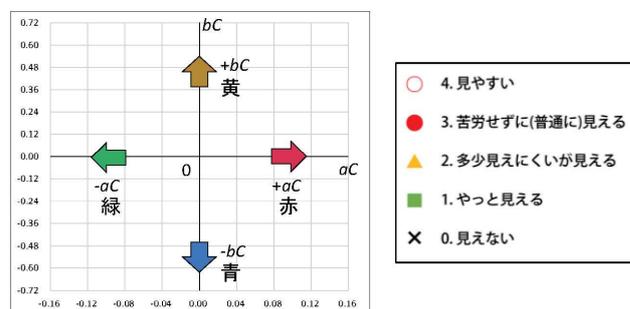


図2  $aC$ - $bC$  図の例

図3 評価結果凡例

## 4. 実験結果

円形視標サイズを 10 min (=1/6 deg)、背景輝度を約 20 cd/m<sup>2</sup>、背景の色度を  $x=0.311$ 、 $y=0.324$  とし、背景と同等の輝度の様々な色度の円形視標を提示した場合の評価結果を図4に示す。(a)若年者、(b)高齢者とし、実験参加者の半数以上でその見やすさ評価が得られたかを判定基準として評価結果を示す。

図4内に示す曲線は、視細胞のLMS錐体のうちS錐体が機能していない場合に区別できない色を示す「混同色線」である。一般色覚者であっても中心視野のS錐体の分布密度はL・M錐体よりも低いため<sup>3)</sup>、この曲線付近の色は区別しにくいことが確認されて

いる<sup>2)</sup>。本実験においても、若年者、高齢者ともにこの曲線付近は評価が低いことを確認した。

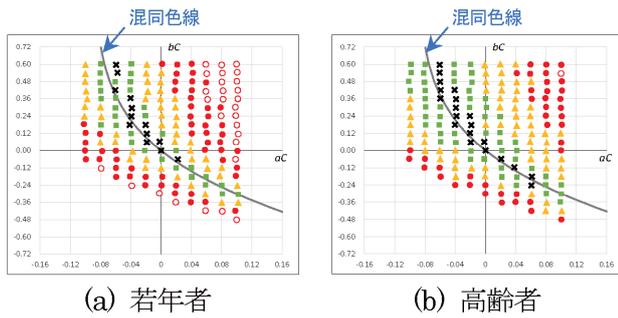


図4 評価結果 (円形視標サイズ 10 min)

実験前に行ったランドルト環 (図5左) による視力検査では、若年者、高齢者どちらのグループも両眼視力中央値が 1.35 であり同等の視力値であった。しかし、図4の評価結果から、高齢者は若年者よりも全体的に評価が低く「見えない」と評価する範囲が広いことがわかった。ランドルト環のように存在が既知で環の切れ目を探す「細部識別」能力が同等であっても、円形視標のように存在自体を探す「存在検知」においては高齢者が劣っている可能性がある。



図5 ランドルト環と円形視標

また、円形視標サイズを大きくした場合、全体的に見やすさ評価が向上するが、この場合でも高齢者は若年者よりも評価が低く、「見やすい」と感じにくいことがわかった。図6は背景輝度約 40 cd/m<sup>2</sup>、円形視標サイズ 90 min (=1.5 deg) のときの評価結果である。

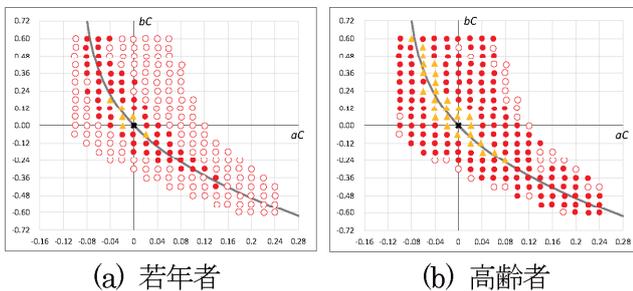


図6 評価結果 (円形視標サイズ 90 min)

上述は背景と円形視標の輝度が同等の場合だが、背景と円形視標に輝度 (明暗) コントラストがある場合についても実験を行っている。図7は、円形視標サイズ 10 min、背景輝度が約 20 cd/m<sup>2</sup>、円形視標輝度が

約 22.5 cd/m<sup>2</sup> のときの評価結果である。図4の輝度コントラストがない場合の結果と比べると全体的に評価が向上し、視対象と背景の輝度コントラストが増すことにより見やすさが向上することを確認できた。しかし、この場合でもやはり高齢者は若年者より全体的に評価が低かった。今回の高齢参加者が実際の見え具合よりも低く評価を付けている可能性もあるため、データを蓄積し、引き続き検証していく必要がある。

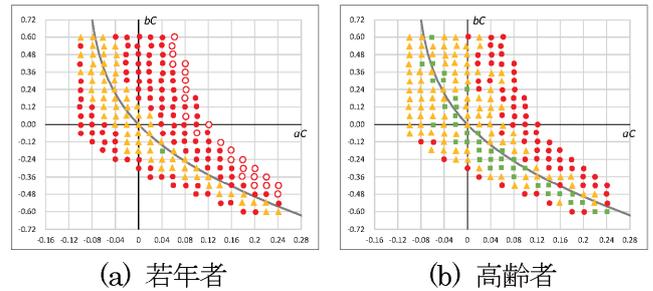


図7 評価結果 (円形視標サイズ 10 min、輝度コントラストあり)

## 5. おわりに

本研究は既往研究<sup>2)</sup>を参考とした実験方法により、高齢者の色弁別特性を調べた。今回の実験結果から、高齢者は特定の条件で若年者よりも大幅に見えにくくなるのではなく、あらゆる条件において全体的に見えにくいことが示唆された。また、今回実験に参加した若年者と高齢者の視力検査の視力値が同等であったことから、高齢者は細部識別能力が保持されている場合でも、あらゆるものが全体的に見えにくくなる可能性があることが示唆された。今後、円形視標だけでなくランドルト環を用いた実験も行い、細部識別能力と存在検知の関係を追及し、運転時の障害物の見え方やHMIの評価等に役立てていきたい。

## 参考文献

- 1) 警視庁：防ごう！高齢者の交通事故！，  
<https://www.keishicho.metro.tokyo.lg.jp/kotsu/jikoboshi/koreisha/koreijiko.html>
- 2) 加藤洋子，中村芳樹：一般色覚者を対象とした円形視標の見やすさ評価に関する検討，日本建築学会環境系論文集，Vol.84，No.755，pp.39-46 (2019)
- 3) 篠田博之，藤枝一郎：色彩工学入門 定量的な色の理解と活用 (2007)

# ⑰直前直左鏡による車両の近接視界領域の視覚認知特性

自動車安全研究部 ※青木 義郎 加藤 洋子 関根 道昭

## 1. はじめに

日本の道路運送車両の保安基準は、ドライバーが運転席に座った時に、乗用車の前面及び左側面（左ハンドルの場合は右側面）に接する高さ1m、直径0.3mの円柱（視対象）を確認できることを求めている。ドライバーから直接視対象が見えず、サイドミラーを通じても視対象が見えない場合には、直前直左鏡等を追加設置する必要がある。しかし、直前直左鏡が小さい場合や映りが歪んでいる場合は視対象が見えにくいと考えられ、今後国際基準調和を進めるためにも、見え方に関する調査分析が求められている。本研究は、現行車両の直前直左鏡による視対象の見え方を調査し、その大きさと曲率が視対象の見え方に与える影響を調べる実験を行い、基準策定に資する技術資料を得ることを目的とする。

## 2. 直前直左鏡の市場調査

市場の車両の直前直左鏡における視対象の見え方を調べるため、約500名を対象にインターネットアンケート調査を実施した。対象車両以外からの回答を除外した有効回答数は135名（乗用車122名、商用車13名）であった。その結果を図1に示す。乗用車の場合、視対象が“見えにくい”及び“全く見えない”の割合が77.0%であった。商用車ではその割合が5割以下であり、ある程度見えやすさが確保されていることが分かった。

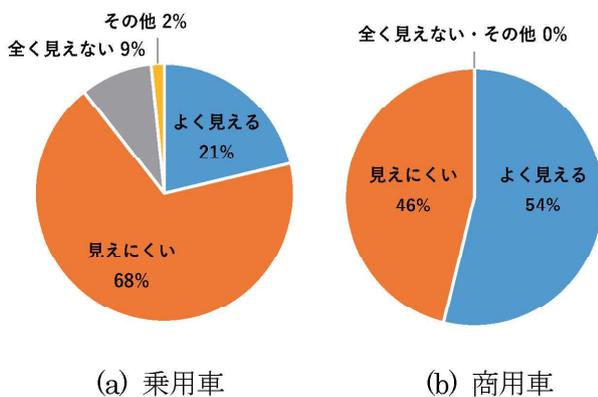


図1 直前直左鏡見えやすさアンケート結果

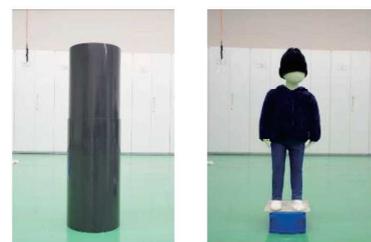
## 3. 現行車両の直前直左鏡に映る近接視界

乗用車（SUV：図2）の直前直左鏡による近接視界を調査した。視対象はポール（高さ1m、幅0.3m）及びダミー人形（高さ1m）である（図3）。視対象は保安基準で定められている近接視界領域内で、直接視やサイドミラーでは確認できない場所、かつ、特に見えにくい場所（直前2か所B1・B2、直左2か所A1・A2）に設置した（図4）。所定のドライバーポイントから直前直左鏡に映る近接視界を写真撮影した。ダミー人形の場合を図5に示す。

今回調査した全ての条件において、乗用車（SUV）の近接視界領域に設置した視対象は直前直左鏡を通してごく一部分しか見ることができず、また歪んで映るために確認しにくいことが明らかになった。



図2 実験車両



(a) ポール (b) ダミー人形

図3 視対象（高さ1m）

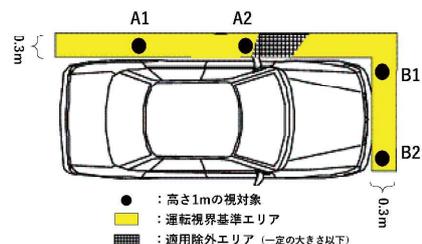


図4 視対象の設置場所



図5 直前直左鏡による見え方（ダミー人形）

#### 4. 直前直左鏡評価実験

直前直左鏡の大きさと曲率が近接視界の見え方に与える影響を調査するため、実験参加者 16 名による主観評価実験を実施した。実験参加者は実験車両（図2）の運転席に座り、所定のドライバアイポイントから直前直左鏡による視対象の見え方についてアンケート形式で評価した。実験車両に標準装備されている直前直左鏡（そのサイズを表1に示す）のほか、保安基準を満たす3種類の曲率半径（直前 100 mm 以上、直左 300 mm 以上）の鏡を加工して、最小限の視野範囲を確保するサイズ小のミラーと広い視野範囲を確保可能なサイズ大（表2）のミラーを製作し、標準ミラーに置き換えて同様の評価を行った。

表1 標準装備ミラーのサイズ

	ミラーの最長部分(mm)	
	縦	横
直前	120	45
直左	120	45

表2 実験用に製作したミラーの曲率半径及びサイズ

曲率半径 (mm)	直前				直左				
	サイズ小(mm)		サイズ大(mm)		サイズ小(mm)		サイズ大(mm)		
	縦	横	縦	横	縦	横	縦	横	
小 100	70	50	110	65	小 300	70	50	110	65
中 200	80	60	150	100	中 400	70	50	110	65
大 300	110	65	150	100	大 600	80	60	150	100

表3 アンケート評価

・直前直左鏡の見え方について

①見えない（何も無いように見える）

②何かある気がする

③物体の存在がわかる

④普通に物体が認識できる

⑤はっきり物体が認識できる

・①～④を回答された方はどの場所に見えたかお答えください

A.（側方） B.（前方）

前章の調査で視対象が見えにくいことが判明した「直前」のポール B2、人形 B1・B2、「直左」のポール A1、人形 A1・A2 の見え方を表3に示す評価尺度で点数化した。ミラー条件毎の平均値を図6に示す。ここでは、直前直左鏡に映る視対象の見え方として「2.

物体の存在がわかる”以上の評価値が必要と仮定する。標準装備の直前直左鏡については直前鏡及び直左鏡の評価値はいずれも2を下回っており、視対象を十分に見ることはできずと考えられる。一方、製作した6種類のミラーにおける評価値は、曲率半径よりもサイズが大きく影響することが示されている。特に直前ミラーはサイズ小において評価値が低く、評価値2以上となる条件は曲率半径 200 mm（中）、サイズ大（150 mm×100 mm）のみであり、標準装備の直前鏡（120 mm×45 mm）よりも大きいサイズのミラーにより広い範囲を映す必要があることが示された。

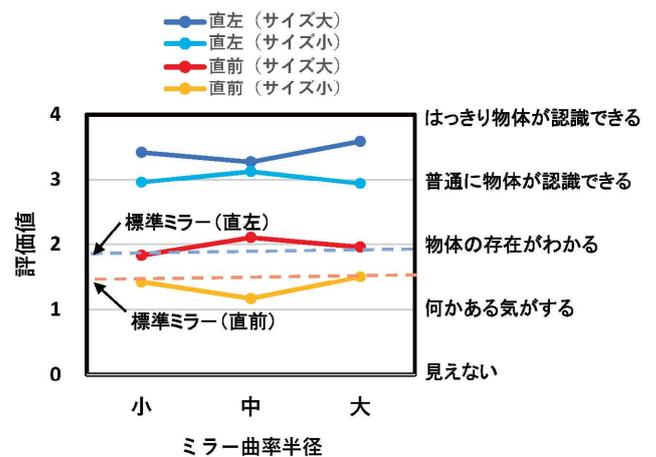


図6 標準ミラー及び製作ミラーによる近接視界

#### 5. おわりに

本研究では、自動車の直前直左鏡による視対象の見え方に関する調査実験を実施した。その結果、今回対象とした乗用車に標準装備されている直前鏡及び直左鏡のいずれも、視対象を十分に見ることはできずことが判明した。直前鏡については、大きいサイズのミラーにより広い視野を確保する必要があることが明らかになった。

今後さらに、直前直左鏡の視覚認知特性の評価実験を追加し、安全確保のために必要となる直前直左鏡の必要条件の明確化を目指す。

## ⑱交差点右折時のドライバーの運転特性

自動車安全研究部 ※松井 靖浩 細川 成之 田中 良知  
東京都立大学 及川 昌子

### 1. はじめに

我が国のセダン及び車両総重量(GVW)7.5t 以下貨物車と歩行者との低速度衝突事故では、右折時に歩行者へ衝突する事例の割合が最も高いことが判明している。これは、交差点に存在する歩行者の見落としが事故要因として考えられるが、右折時の交通事故発生メカニズムは明らかにされておらず、その解明にはドライバーの注視特性を含む行動を把握する必要がある。そこで、本研究では、信号機のある交差点でセダン及びGVW7.5t 以下の貨物車が右折する際に、歩行者の存在がドライバーの運転行動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。ここでは、実験参加者を対象とし、ドライバーの視線注視位置及び注視時間、車両の走行速度を計測した。

### 2. 調査方法

本研究では、実験参加者に供試車両の運転操作を依頼し、信号機付き交差点において右折を行うよう指示した。普通自動車運転免許を所有し、GVW7.5t 以下の貨物車の運転経験のある男性 13 名、女性 2 名の計 15 名を対象とし、独立行政法人自動車技術総合機構交通安全環境研究所の人間を対象とする実験に関する倫理規程に基づき、右折の運転操作を行う際のドライバーの視線注視位置及び注視時間、車両の走行速度を計測した。本実験では、実験参加者に「普段どおりの運転で直進し、交差点を右へ曲がってください」と教示し、交差点手前 400 m 地点より走行を開始した。

ここで使用した供試車両は、セダン (GVW1.5t) 及び小型トラック (GVW4.7t) 各 1 台とした。実験では、図 1 に示すように信号機付き交差点を右折する際、条件 1: 歩行者なし、条件 2: 手前歩行者、条件 3: 対面歩行者、条件 4: 手前・対面歩行者の計 4 条件を設定した。「歩 1」は手前歩行者、「歩 2」は対面歩行者をそれぞれ指す。歩行者モデルは自立歩行をせず、横断歩道幅の中央に位置するよう、車両の転回方向側に配置した。また、他車両が注視特性に及ぼす影響を把握

するため、転回方向とは逆方向側に、停止車両 (1 台) を配置した。本実験では、車信号機を青、歩行者信号機を赤に設定した。

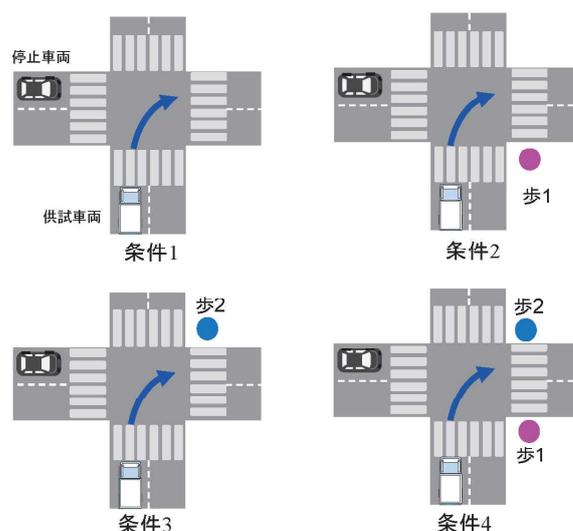


図 1 実験条件

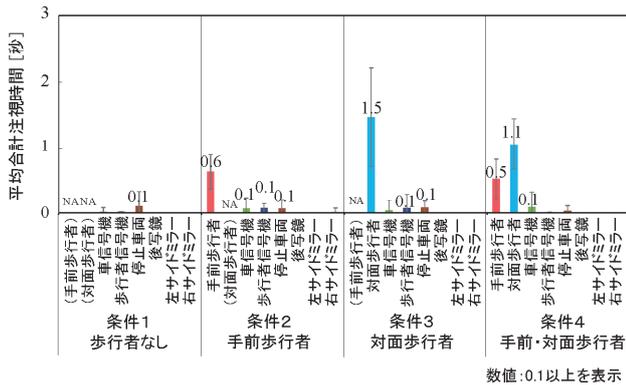
本研究では、眼球の動きから視線を推定可能とする視線計測用眼鏡を実験参加者に装着し、運転操作を行う際の注視状況を調査した。人間が見える視野として、中心視野及び周辺視野がある。本研究では、運転中の前方注視状況を中心視野に限定し計測した。交差点を右折時におけるドライバーの注視対象として、①手前歩行者、②対面歩行者、③車信号機、④歩行者信号機、⑤停止車両、⑥後写鏡、⑦左サイドミラー、⑧右サイドミラーの計 8 カ所を指定した。それら注視対象を特定 8 注視対象と呼称し、対象を注視した場合の注視時間を調査した。

Global Positioning System (GPS)受信器を使用し、GPS による位置情報から、交差点出口の横断歩道中央位置における車両走行速度を計測した。

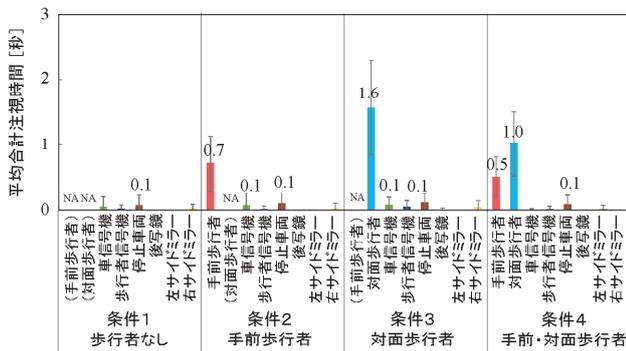
### 3. 実験結果

#### 3. 1. ドライバの合計注視時間

交差点を右折する際、ドライバは特定 8 注視対象を複数回注視している。本研究では、それぞれの注視時間の合計を合計注視時間と呼称する。15 名の実験参加者による右折時の特定 8 注視対象の合計注視時間の平均値を図 2 に示す。右折における特定 8 注視対象の合計注視時間の平均値は、条件 1「歩行者なし」では停止車両を注視した時間が最も長かった（セダン 0.1 秒、小型トラック 0.1 秒）（以下、() 内はセダンの値、小型トラックの値で表示）。条件 2「手前歩行者」では手前歩行者（0.6 秒、0.7 秒）、条件 3「対面歩行者」では対面歩行者（1.5 秒、1.6 秒）を注視した時間が最も長く、条件 4「手前・対面歩行者」では、対面歩行者（1.1 秒、1.0 秒）に次いで手前歩行者（0.5 秒、0.5 秒）を注視した時間が長かった。このように、右折において歩行者モデルを注視した合計注視時間の平均値はセダンと小型トラックとで近似していた。



(a) セダン



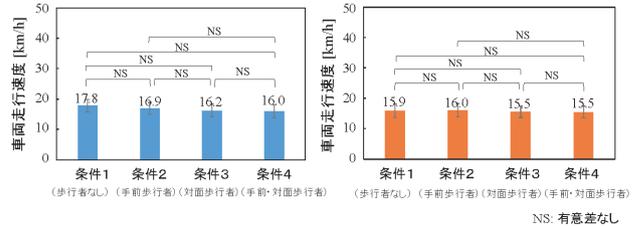
(b) 小型トラック

図 2 特定 8 注視対象の合計注視時間の平均値

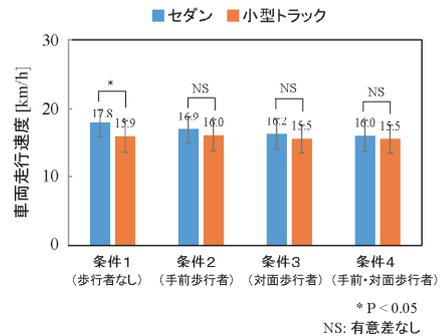
#### 3. 2. 車両走行速度

車両が右折時、交差点出口における車両走行速度の平均値を図 3 に示す。図 3(1)に示すようにセダンを走

行時において提示条件間の車両走行速度の平均値を多重比較した結果、有意差はなく、車両走行速度は歩行者の提示条件に依存しないことが判明した。小型トラックを走行時も同様の結果を得た。図 3(2)に示すようにセダン及び小型トラックを比較すると、セダンは小型トラックと比べ平均車両走行速度は高く、特に「歩行者なし」では有意に高かった。



(a) セダン (b) 小型トラック  
(1) 条件毎の比較



(2) セダンと小型トラックとの比較

図 3 交差点出口における車両走行速度の平均値

### 4. おわりに

本研究では、供試車両としてセダン及び小型トラックを使用し、交差点進入時のドライバの運転特性を調査した。対象物の注視時間については、右折において歩行者モデルを注視した合計注視時間の平均値はセダンと小型トラックとで近似していることが分かった。交差点出口の横断歩道中央位置における車両走行速度については、歩行者の提示条件に依存しないことが判明した。セダンは小型トラックと比べ平均車両走行速度は高いことが分かった。

尚、実際の交差点における交通環境下では、対向車を始めとする他車両も走行していることから、ドライバの視線も走行車両を注視することが想定される。今後、ドライビングシミュレータを使用することで、走行車両及び歩行者に対する注視状況も把握していく必要がある。

## ⑬ 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/GRSP会議(以下GRSPという)において、欧州委員会(以下ECという)が欧州域内の歩行者保護基準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)まで拡大する改定を行う予定であることと、歩行者保護国際基準(UN Regulation No.127、以下R127という)でも同じ改定を提案する予定であることを報告し、その改定案について議論する国際会議(以下TFという)が開催されることとなった。

一般に前面ガラス部を対象とした頭部保護試験では、その傷害値が低いことが過去の調査やアセスメントの試験結果から知られていた。しかし、TFにおいて国際自動車工業連合会が、新品の前面ガラスで頭部保護試験を実施した際にその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を報告した。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。

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(以下「JASIC」という。)が調査<sup>①</sup>を実施、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報告した。ただしJASIC調査は1車種でのみ行われたことから、他の車種でも非典型状態が発生するのか、その場合に同様の現象が発生するのかを確認することと、国際基準改定に貢献しうるさらなる非典型状態に関する知見を得ることを目的として、2020年度からJASIC調査と異なる車種を用いて新品ガラスを対象とした歩行者頭部保護試験を実施した。そして、JASIC調査と同様に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である

ことを確認し、さらに調査した車両において非典型状態が頻繁に発生することを確認した。

TFにおいて、非典型状態の発生原因とその対策案が議論されたが結論に至らず、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9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。この改定案には、日本から提出された非典型状態の発生を加速度波形により定義する提案と、非典型状態発生時の試験やり直しの回数を制限する提案が織り込まれた。

以下に当研究所が実施した新品の前面ガラス部を対象とした頭部保護試験での非典型状態に関する調査結果を報告する。

### 2. 新品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2.0mm/0.76mm/2.0mmの合計4.76mm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、子供インパクトと大人インパクトの2種類を使用した。衝突位置は、JASIC調査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。R127では、地面からボンネット前端までは車両に沿って、ボンネット前端から衝突位置までは直線で計測した地面から衝突位置までの距離(以下WADという)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のWAD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

のWAD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への入力小さく、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と大人インパクトの両方で実験を実施した。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2に実験での衝突位置を示す。実験は子供インパクトと大人インパクトで各11回実施した。



図1 実験車両外観



図2 実験衝突位置

## 2. 2. 実験結果

図3に子供インパクト実験、図4に大人インパクト実験の頭部加速度波形を示す。子供実験5と大人実験5と9の場合を除き、波形の形状はほぼ類似していた。大半の加速度波形は1ms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3ms付近で2回目のピークに達し、その後減少し5ms付近で若干増加した後に急速に減少した。子供実験5と大人実験5の場合では2ms付近でピークに達した後に減少し、5ms付近で急速に減少した。大人実験9の場合では1ms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2ms付近で2度目のピークに達し、その後200m/s<sup>2</sup>付近まで減少した。大人実験9の場合を除く全ての実験で、頭部加速度が4ms付近で800m/s<sup>2</sup>以上と高い状態を保持していた。大人実験9の場合は2msで200m/s<sup>2</sup>付近の低い状態まで減少し、その後は400m/s<sup>2</sup>を超えなかった。

表1に子供インパクト実験、表2に大人インパクト

表1 子供インパクト実験頭部傷害値

	子供1	子供2	子供3	子供4	子供5	子供6
HIC	778	765	780	775	792	778
	子供7	子供8	子供9	子供10	子供11	
HIC	763	763	778	759	783	

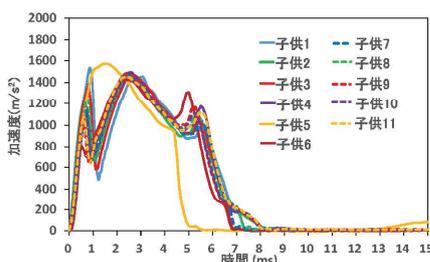


図3 子供インパクト実験頭部加速度

実験の頭部傷害値を示す。子供実験の全てでHICは759から792の間にあった。大人実験のうち実験9を除く全てでHICは563から609の間にあった。大人実験9の場合のHICは147であった。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、大人実験9の場合に比べて、子供実験では5倍以上、9を除く大人実験では約4倍HICが高かった。このため、大人実験9の場合には典型状態が、それ以外の実験では非典型状態が発生したと考えられる。

## 3. 考察及びまとめ

今回の調査において、前面ガラスを対象とした頭部保護実験を22回行い、21回で非典型状態が発生した。さらに、非典型状態の加速度波形は類似しており、大きな差は見られなかった。JASICの調査結果と同様に、典型状態の場合は非典型状態とは大きく加速度波形が異なっており、加速度波形により非典型状態の発生が判断できることが確認できた。また、1実験を除く全ての実験で非典型状態が発生しており、車両によって非典型状態が頻繁に発生することが確認できた。このような車両は歩行者保護性能が低く、市場に出すことは望ましく無い。

これらの結果に基づき、日本から非典型状態の発生を加速度波形により定義する案と、非典型状態が頻繁に発生する車両を除外するために非典型状態発生時の試験やり直しの回数を制限する案が提出され、R127の改定案に織り込まれた。

## 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」

表2 大人インパクト実験頭部傷害

	大人1	大人2	大人3	大人4	大人5	大人6
HIC	584	567	568	552	609	588
	大人7	大人8	大人9	大人10	大人11	
HIC	563	595	147	567	588	

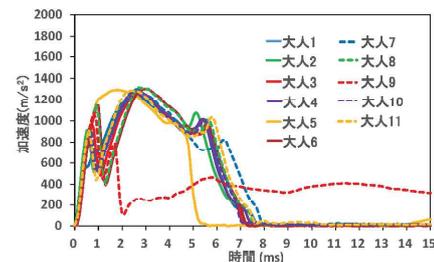


図4 大人インパクト実験頭部加速度

## 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部(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4年度 交通安全環境研究所フォーラム 2022 講演概要

令和4年 11 月 15 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等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。

○リサイクル適正の表示: 紙へリサイクル可

本冊子はグリーン購入法に基づく基本方針における「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。

