

# 鉄道総研報告

第38巻 第6号

2024年6月

## 論文

- 車両** アルミナ粒子散布による低粘着皮膜条件下での接線力の増加  
..... 深貝晋也, 古谷勇真, 高野亮 (1)
- 車両** **電気** 架線・パンタグラフ系の接触力推定に対するカルマンフィルタの適用可能性  
..... 小林樹幸, 山下義隆 (7)
- 施設** 劣化したバラストに対する低強度安定処理工法による沈下抑制効果  
..... 景山隆弘, 中村貴久, 北条優, 田島史花 (15)
- 施設** 駅男子トイレの清掃品質に関する鉄道利用者の意識調査  
..... 京谷隆, 池田佳樹, 大石洋之, 川崎たまみ (23)
- 施設** 熊本市における表層地盤震動の時空間変動評価  
..... 津野靖士, 是永将宏, 小林怜央, 山中浩明 (31)
- 運転** 加齢による運転士の作業の負担感の増加と関連する機能  
..... 中村竜, 佐藤文紀, 増田貴之, 北村康宏, 藤道宗人, 斎藤綾乃 (37)
- 運転** 通勤列車グリーン車需要の価格弾力性の推定  
..... 松本涼佑 (45)



# アルミナ粒子散布による 低粘着皮膜条件下での接線力の増加

深貝 晋也\* 古谷 勇真\*\* 高野 亮\*\*\*

Increase of Tangential Force by Ceramic Particles on the Low Adhesion Condition

Shinya FUKAGAI Takemasa FURUYA Ryo TAKANO

Vehicle slipping and sliding caused by fallen leaves especially in autumn is an important issue that needs to be resolved in terms of safety and on-time operation. Though the equipment which apply ceramic particles between rail and wheel of vehicle to increase the adhesion has been developed, a complete solution has not yet reached at the peak of fallen leaves season. Therefore, the authors conducted a brake test to investigate the influence of particle amount and particle size on the tangential force. The test was conducted with paper tape attached to the rail for simulating leaves on the rail. The test results showed that the tangential force increased with the amount of particle apply. A correlation was also observed between the number of holes penetrated by particles remaining on the paper tape and the tangential force. In particular, a relatively good correlation was found between the estimated area of the holes and the tangential force. These results will contribute to design and performance evaluation of particle for improving adhesion between wheel and rail.

キーワード：低粘着条件，アルミナ粒子，増粘着材，滑走，走行試験

## 1. はじめに

車輪とレールの間に生じる接線力が低下し空転すると、列車の遅延や運休の原因となり得る。また、制動時の滑走はオーバーランを引き起こし、安全上の問題となる可能性がある。さらに、空転や滑走はレールおよび車輪などの部材に損傷を引き起こす場合がある。

接線力の低下を抑制するために、車両から砂などの硬質の粒子を散布することが一般的に行われている。国内では特に、噴射応答性の高さや過度の散布による弊害（軌道短絡の阻害や道床の目詰まり等）の抑制等を利点として、直径約 0.3~0.4mm のアルミナ粒子を圧縮空気少量（例えば 30g/min）散布する技術が開発され、広く実用化されている<sup>1) 2) 3)</sup>。

接線力の低下はさまざまな要因で起こり得るが、最も日常的に生じる要因として降雨による水の介在が挙げられる。車輪とレールの間に形成される水膜は通常 1 $\mu$ m 未満として見積もられており<sup>4)</sup>、この場合僅かな粗さ増大で車輪とレールの粘着性能を向上させることが期待できる。一方で秋の山間部のレールに形成される厚い皮膜は、より困難な問題となり得る。線路上に落ちた葉は、通過する列車によって舞い上がり、レールと車輪に押し

つぶされることでレール頭頂面上に厚い皮膜を形成する。このような膜の厚さは数十 $\mu$ m のオーダーであると報告されている<sup>5)</sup>。

Skipper らは、車輪とレールの接触圧を模した高圧ねじり試験機を用いて、乾燥条件、湿潤条件、葉からの抽出液で汚染された条件で 3 種類の砂の効果を調査し、いくつかの条件下で、介在する粒子の径が大きくなるほど接線力が高まると報告した<sup>6)</sup>。また葉からの抽出液で汚染された場合、より大きな粒子が皮膜の破壊を起こしやすいとした。一方で、Arias-Cuevas らは、試験線のレール上に葉を貼り付けた条件で数百 $\mu$ m から数 mm までの幅広い粒径の粒子を用いて、車輪とレールの粘着に及ぼす砂の粒径の影響を調査した<sup>7)</sup>。その結果、粒子径が大きくなるにつれて摩擦係数が低下すると報告した。

このように、増粘着材の粒径の違いが及ぼす効果については、これまでに調査が行われているが、砂の種類や試験条件が統一されておらず一般的な傾向は不明である。本研究では、増粘着材にアルミナ粒子を用い、ブレーキ粘着を対象に、単純で均一な低粘着性の皮膜として紙テープを使用して、増粘着材の散布量や粒子径の違いについて調査した。試験線で実車を走行させ、車載の噴射装置から増粘着材を噴射散布しながらブレーキ試験を行った。また試験終了後、紙テープの状態を観察することにより、摩擦特性への影響を考察した。

\* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

\*\* 車両技術研究部 駆動システム研究室

\*\*\* 株式会社テス

## 2. 試験手法

### 2.1 試験車両および試験条件

図1 (a) に試験車両の写真, 図1 (b) に試験時のレール頭頂面の写真を示す。試験は鉄道総合技術研究所の試験線で行われた。試験車両には同所が所有する R291 系車両 (2 両編成) を使用した。計 4 台車のうち進行方向 2 番目の動台車に搭載されたモーターを駆動した。図2 は, 試験車両に取り付けた各試験装置の位置関係の概略図である。図3 に試験車両に取り付けた各試験装置の外観を示す。動台車の進行方向前方の車輪とレールの間にアルミナ粒子を散布する装置を設置した。

図1 (a) に示すように, 試験区間のレール頭頂面に紙テープ (幅 50mm×厚さ 0.14mm) を貼り付けて低粘着条件とした。なお, こうした紙テープによる皮膜条件での試験は, 従来にも実施例がある<sup>8)</sup>。実際の落葉による皮膜の厚さは 5~100 μm との報告があり<sup>5)</sup>, 本研究の試験の皮膜条件はこれらの値と比較してやや厚さが大きい。本研究では, 散布した粒子の量と大きさが粘着に及ぼす影響に着目するために, 他のパラメータをできるだけ均一にする必要があることから, 既往研究<sup>8) 9)</sup> を踏ま



図1 実車制動試験の様子

え紙テープを使用した。

試験時の制動では, 動台車の電気ブレーキのみを使用した。今回使用した試験車両では, ブレーキを開始した後, 直線的にブレーキ力を増加させる制御を用いた。また, ブレーキ力の増加後, 車輪の滑走が開始し減速度が一定時間, 所定の閾値を下回ると, ブレーキを緩めるように設定した。

紙テープは導電率が低いため, 紙テープで覆われたレールを試験車両が走行する際に, 帰線電流の経路が遮断され, 車輪やレールにアークが発生する可能性が懸念された。そのため, 駆動用バッテリーによる運転を行い, レールに帰線電流が流れないようにした。車輪とレールの設計形状から算出したヘルツ接触圧は約 650MPa であった。

車輪外周に生じる接線力  $F_t$  は, 式 (1) で算出した。

$$F_t = T_m \alpha \eta_i / r \eta_g \quad (1)$$

ここで,  $T_m$  はモータートルク,  $\alpha$  はギア比,  $r$  は車輪半径,  $\eta_g$  はギア効率,  $\eta_i$  はインバータ効率である。  $T_m$  は, 測定したモーター電流に校正試験から得られた係数を乗じて算出した。接線力  $F_t$  を輪軸の静荷重  $F_n$  で除した  $F_t/F_n$  を接線力係数とした。試験条件を表1に示す。

### 2.2 試験手順

図4 は, 試験手順の概略図である。試験では (1) ~ (5) の手順を繰り返した。

- (1) 試験車両を目標速度 (30km/h) まで加速。
- (2) 動台車が低粘着区間に入る前に, アルミナ粒子の散布と制動を開始。このとき, 動台車の電気ブレーキのみを動作 (制動力は徐々に直線的に増加)。
- (3) 滑走の発生。
- (4) 動台車が低粘着区間を通過した時点で試験終了。



図2 試験車両に取り付けた各試験装置の位置関係の概略図



図3 試験車両に取り付けた各試験装置の外観

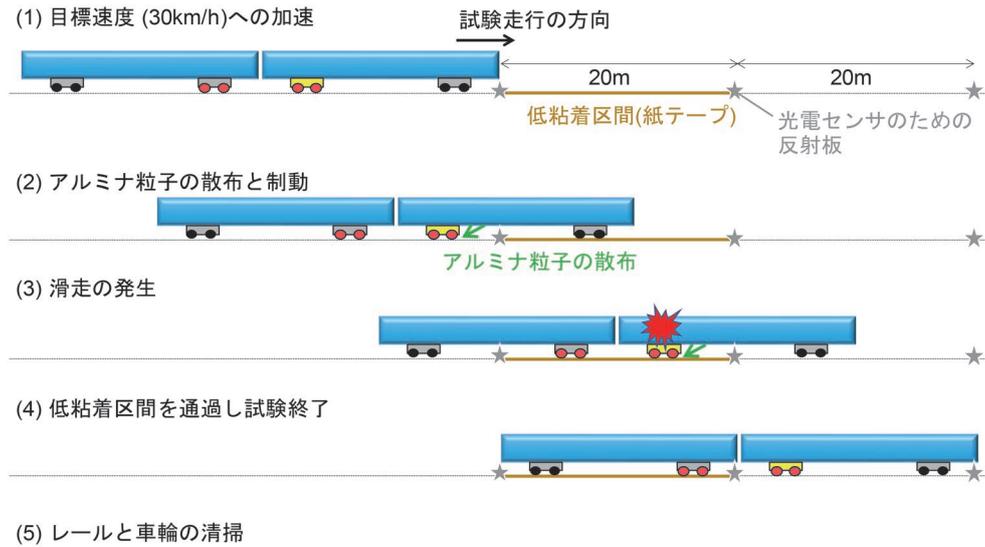


図4 試験手順

表1 試験条件

項目	値	
ブレーキ初速度 (目標値)	30km/h	
粒子噴射用空気圧	500kPa	
ブレーキ制御	電気ブレーキのみ (ブレーキ開始後ブレーキ力が直線的に増加)	
粒子の粒径 (中央値)	通常粒径: 383 $\mu$ m 大粒径: 487 $\mu$ m	
粒子散布量	通常粒径	0 (散布なし), 54, 134, 235g/min
	大粒径	0 (散布なし), 56, 135, 189, 249g/min
レール皮膜	疑似皮膜 (紙テープ使用)	
各条件での走行回数	1~3回	

(5) レールから紙テープを剥離。その後レール研磨機で頭頂面を研磨するとともに、車輪踏面を清掃。

(5) において剥離したテープの一部をサンプルとして、透明なポリエチレンテレフタレートフィルムに貼り付けて保管した。このフィルムをLEDパネル上に置き、下から光を照射しながら写真を撮影することで、アルミナ粒子散布によるテープの孔の分布状態を調査した。噴射条件や車両の走行条件、レール形状の変化による影響をできるだけ少なくするため、各試験では、試験区間の入口付近、中央、出口の3カ所で左右のレールの合計6点からサンプルを採取した。調査した紙テープのサイズは、幅方向は写真撮影時に若干の傾き誤差が生じることを考慮して、紙テープ幅50mmから両端部の数mm分を除外した45mmとし、長さ方向は紙テープをレールから剥がす際に破れずに取得できた最大の長さの135mmを基本とし(45×135mm)、レールから剥がす際に破れた紙テープ等については45×90mmもしくは45×45mmとした。

### 3. 試験結果

#### 3.1 試験中の接線力係数の変化

図5は、試験中に各測定値に生じた変化の一例である。一番下の線は光電センサで測定した値である。左から1番目と2番目のピークの間は、動台車が低粘着区間(紙テープ上)を走行したときに得られたものである。下から2番目の線(点線)は、噴射装置のON/OFF状態を示しており、数値が大きい方がON、小さい方がOFF状態を表す。アルミナ粒子の散布とブレーキ動作は、動台車が低粘着区間に入る前に開始した。 $F_t/F_n$ は、動台車が同区間に入る約2秒前から増加し始め、同区間内でピークに達した。以降では、このピーク値を $(F_t/F_n)_{peak}$ と呼ぶ。図5から明らかなように、接線力係数 $F_t/F_n$ がピークを示したのは、従軸と動軸の速度差(動軸の車輪/レール間のすべり)が最大となる瞬間であった。2.1節で述べたように、制動力は、減速度が一定時間、所定の閾値を下回ると弱まるようにプログラムされている。そのため、 $(F_t/F_n)_{peak}$ は、同プログラムが増加してきた制動力を低下させ、車輪/レール間のすべりが減少をはじめる直前に最大となった瞬間の接線力係数と解釈できる。

#### 3.2 アルミナ粒子散布量と $(F_t/F_n)_{peak}$ の関係

図6は、1分間あたりのアルミナ粒子の散布量と $(F_t/F_n)_{peak}$ の関係を示したものである。いずれの粒径においても、アルミナ粒子の散布量が多いほど、 $(F_t/F_n)_{peak}$ が大きかった。通常粒径の粒子では、アルミナ粒子の散布量とともに $(F_t/F_n)_{peak}$ が直線的に増加した。

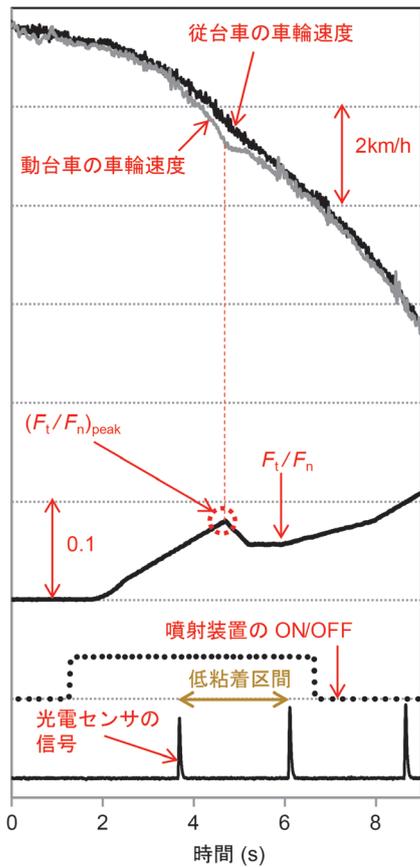


図5 試験中に各測定値に生じた変化の一例

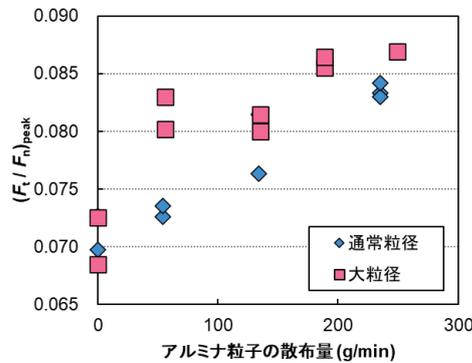
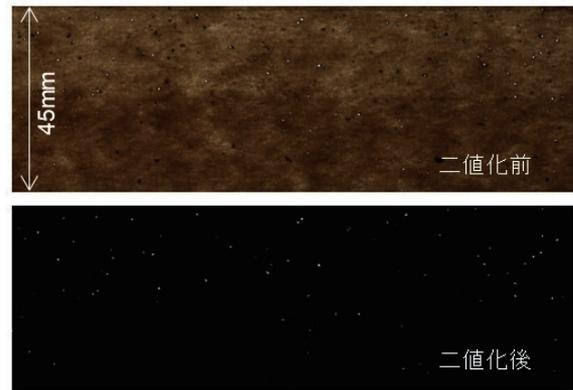


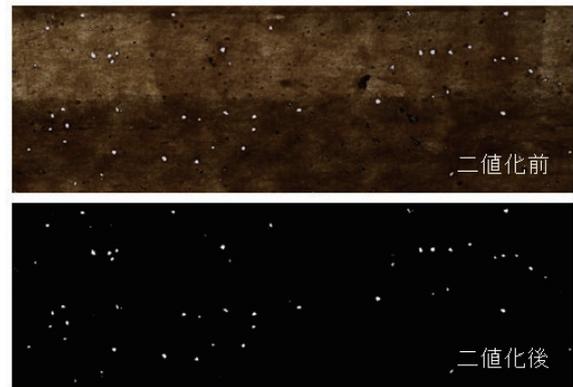
図6 アルミナ粒子の散布量と  $(F_t/F_n)_{peak}$  の関係

### 3.3 アルミナ粒子の散布量と貫通孔の数の関係

図7は、試験後の紙テープの写真で、各写真を白/黒に二値化したものである。比較のため、(a) 通常粒径の粒子を散布した試験と (b) 大粒径の粒子を散布した試験で得られた紙テープを示す。両写真において、デジタルカメラのシャッタースピード、絞り、感度、露出補正等の設定は同一である。いずれの場合も多数の孔が見られたが、両写真を比較すると (a) は (b) と比較して微小であった。これらの孔は車輪とレールの間に粒子が介在して、粒子がテープを貫通することで形成されたものと推測した。



(a) 通常粒径，粒子の散布量: 130 g/min



(b) 大粒径，粒子の散布量: 130 g/min

図7 試験後の紙テープの写真

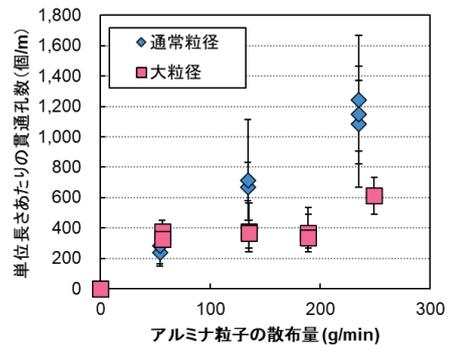


図8 アルミナ粒子の散布量と単位長さあたり (m) の貫通孔数の関係 (エラーバーは最大—最小値)

図8は、1分間あたりのアルミナ粒子の散布量と単位長さあたりの貫通孔数の関係を示す。貫通孔数は、取得した画像を二値化処理することで孔を現出させ、所定の範囲 (例えば、45×135mm) 内の孔の数を計数し、単位長さあたり (m) の孔数として求めた。左右両レールの低粘着区間の入口付近、中央付近と出口付近の計6本の紙テープの貫通孔数をカウントし平均値を求めプロットした。通常粒径の粒子では、アルミナ粒子の散布量に応じて貫通孔数が直線的に増加していた。

### 3.4 貫通孔数と $(F_t/F_n)_{peak}$ の関係

図9に単位長さあたりの貫通孔数と  $(F_t/F_n)_{peak}$  の関係を示す。いずれも単位長さあたりの貫通孔数に対して、 $(F_t/F_n)_{peak}$  が増加する傾向が見られた。しかしながら、通常粒径と大粒径を比較すると同程度の貫通孔数でも  $(F_t/F_n)_{peak}$  に差があり、大粒径の方が高い傾向が見られた。

## 4. 考察

図6では、通常粒径では  $(F_t/F_n)_{peak}$  と粒子量の間に関係が見られたが、大粒径では、具体的には56g/minにおける  $(F_t/F_n)_{peak}$  が線形関係から外れていた。通常粒径の粒子は大粒径と比べて散布された粒子の数が多いため、車輪とレールの界面に均一に介在することができ、これと比較して大粒径の粒子では粒子の数が少なく、貫通孔数に不規則に多寡が生じることで、貫通孔の数と散布量の間には線形関係から外れた可能性が考えられる。また、粒度分布の均一性の違いの影響も考えられる。両粒子の粒径分布は均等係数（粒度分布を表す指標の一つで、1に近いほど粒径がそろっている）に差があり（通常粒径：1.64、大粒径：1.98）、大粒径は通常粒径に比べて粒度分布のばらつきが大きい。これにより、車輪とレールとの接触部における粒子分布のばらつきが大きくなった可能性が考えられる。

図6および図8において、 $(F_t/F_n)_{peak}$  および貫通孔数は、粒子の散布量が多いほど増加し、図9において、 $(F_t/F_n)_{peak}$  および貫通孔数の間に相関がある可能性が示唆された。しかしながら、通常粒径と大粒径を比較すると同程度の貫通孔数でも  $(F_t/F_n)_{peak}$  に差が見られた。図7から、大粒径の粒子を散布した場合、紙テープに形成される貫通孔は、通常粒径の粒子で形成される貫通孔よりも大きかった。図10に、紙テープの面積に対する推定貫通面積の比率と  $(F_t/F_n)_{peak}$  の関係を示す。ここで貫通面積は粒子の個々の投影面積に比例すると仮定し、貫通孔数に粒子あたりの投影面積（面積は粒径から算出）を乗じて推定した。図9の貫通孔数と  $(F_t/F_n)_{peak}$  の関係

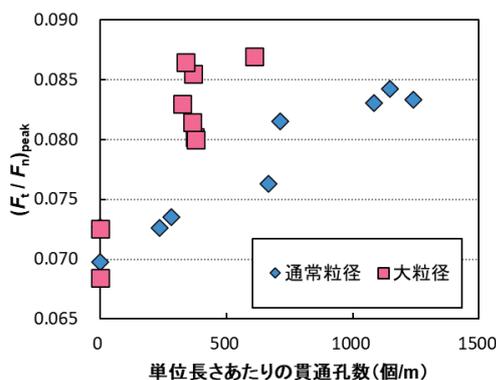


図9 単位長さあたりの貫通孔数と  $(F_t/F_n)_{peak}$  の関係

と比較して、図10の推定貫通面積の比率と  $(F_t/F_n)_{peak}$  の関係では通常粒径と大粒径の差が小さくなっており、貫通孔数よりも推定貫通面積の比率の方が、粒径の差に依らず  $(F_t/F_n)_{peak}$  との相関が高いと考えられる。このことから、車輪とレールで接線力を伝達する増粘着材の領域が増加したことで  $(F_t/F_n)_{peak}$  が増加した可能性が考えられる。硬質粒子が接線力を増加させる要因としては、車輪やレールの表面の粗面化、表面の洗浄などいくつか考えられるが、低粘着性皮膜を効率よく貫通させ、貫通面積を増加させることが、接線力を高めるための有効な手段となり得る可能性がある。

図11は、散布時の粒子数に対して皮膜を貫通した粒子数の比率を通常粒径と大粒径について比較したものである。散布個数は、全体の重量を粒子一個の平均重量で割ることで求めた。粒子一個の平均重量は、数十個の粒子の重量を、実際に数えた粒子の数で除すことで求めた。数値は全試験結果の平均値であり、エラーバーは最大値と最小値の範囲を示す。今回の試験においては、大粒径の粒子は、通常粒径の粒子に比べて、紙テープを貫通しやすかったと考えられる。こうした傾向に関連して、Skipperらは高圧ねじり試験により、粒子の特性が表面状態に及ぼす影響を調査し<sup>10)</sup>、小さな粒子は葉への作用面積が減少するため、葉の除去効率の低下につながる可

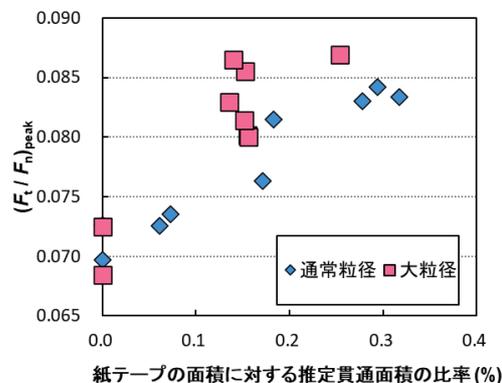


図10 推定貫通面積の比率と  $(F_t/F_n)_{peak}$  の関係

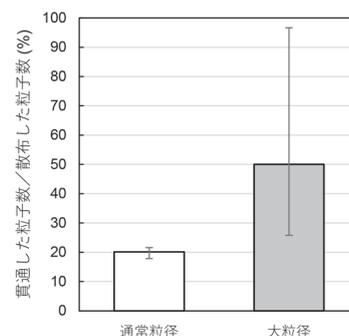


図11 散布した粒子数に対する皮膜を貫通した粒子数の比率（エラーバーは最大—最小値）

能性があるとしている。

しかし、既に述べたように、粒子が大きくなることで車輪とレールの界面への介入が不均一になり、安定的な効果を得づらくなる可能性がある。今後膜厚と粒子径の関係や圧縮時の粒子挙動についてなど、より系統的な研究が求められる。

今回用いた接線力測定手法では、粒子の大きさに関わらず皮膜を貫通した面積が増加するとともに接線力が増加すると考えられた。このことから、対象となる低粘着皮膜を貫通できる特性を持つ粒子を散布することが重要と考える。これらの知見は、新しい増粘着材の設計に役立つと期待される。また皮膜の貫通面積と接線力の間に相関が見られた知見は、たとえば、皮膜の貫通状況を観察・比較することで増粘着材の性能の違いを簡易に評価できる可能性を示していると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、低粘着皮膜条件下でアルミナ粒子を散布した際の接線力の増加効果について実車走行試験により調査した。試験には増粘着材としてアルミナ粒子を散布する装置を搭載した車両を使用した。また、秋の落ち葉で形成される厚い皮膜による低粘着状態を、紙テープを用いた単純かつ均一な膜により模擬した。試験結果より、以下の知見を得た。

- (1) アルミナ粒子の散布量が多いほど、車輪／レール間のすべりが最大となった瞬間の接線力係数が高くなった。粒径約 0.4mm のアルミナ粒子の場合、接線力は散布量に対して直線的に増加した。粒径約 0.5mm の粒子でも散布量に対して接線力が増加する傾向が見られた。
- (2) 試験後の紙テープに形成された孔の数と車輪／レール間のすべりが最大となった瞬間の接線力係数の間には相関が見られた。
- (3) 紙テープに形成された孔の数と粒子 1 個あたりの投影面積の積から、紙テープの貫通面積を推定した。貫通面積と車輪／レール間のすべりが最大となった瞬間の接線力係数には相関がみられた。
- (4) レール上に厚い低粘着性の皮膜がある場合、散布した硬質粒子により十分な貫通面積を得ることが

接線力を増加させる上で重要であると考えられる。

この論文は、Elsevier の許可を得て、Wear, Volumes 530-531, Shinya Fukagai, Takemasa Furuya, Ryo Takano, Penetration of contaminated film on rails by ceramic particles and increase of traction force, 205001, 2023 年から転載したものである

## 文 献

- 1) 大野薫, 伴巧, 小原孝則, 川口清: セラミックス粒子による高速域の増粘着, 鉄道総研報告, Vol.9, No.1, pp.31-36, 1995
- 2) 大野薫, 伴巧, 小原孝則: セラミックス粒子噴射による車輪・レール間の増粘着, トライボロジスト, Vol.41, No.12, pp.973-978, 1996
- 3) 大野薫: 車輪・レールの転がり摩擦とその制御, トライボロジスト, Vol.44, No.7, pp.506-511, 1999
- 4) 陳樺, 名村明, 石田誠: 湿潤状態における車輪/レール間の粘着力に及ぼす輪重の影響, 鉄道総研報告, Vol.24, No.4, pp.27-32, 2010
- 5) C.R. Fulford, Review of Low Adhesion Research, RSSB Rep. CRF04002, 2004.
- 6) W.A. Skipper, S. Nadimi, A. Chalisey, R. Lewis, Particle characterisation of rail sands for understanding tribological behaviour, Wear, Vol. 432-433, 202960, 2019.
- 7) O. Arias-Cuevas, Z. Li, Field investigations into the adhesion recovery in leaf-contaminated wheel-rail contacts with locomotive sanders, Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit. Vol.225, pp.443-456, 2011.
- 8) L. Purcell, A. Lightroller, Trial of Sander Configurations and Sand Laying Rates (T1107) RSSB Report, 2018.
- 9) 伴巧, 深貝晋也, 高野亮, 大野薫: 秋季の空転防止用増粘着材の検討, 第 21 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2014) 講演論文集, No.21, pp.665-668, 2014
- 10) W.A. Skipper, S. Nadimi, M. Watson, A. Chalisey, R. Lewis, Quantifying the effect of particle characteristics on wheel/rail adhesion & damage through high pressure torsion testing, Tribology International, Vol.179, 108190, 2023.

# 架線・パンタグラフ系の接触力推定に対する カルマンフィルタの適用可能性

小林 樹幸\* 山下 義隆\*

Fundamental Study on Contact Force Estimation Method of Pantograph/Catenary Systems using Kalman Filter

Shigeyuki KOBAYASHI Yoshitaka YAMASHITA

The contact force between overhead wires and pantographs is an important indicator for evaluating the current collection performance. This study proposes to use a Kalman filter as a model-based approach to estimate the contact force. In this paper, an external force identification method based on an augmented state-space equation is applied to solve the dynamics of pantographs. First, the validity of the proposed method is verified through by simulations based on a 2-degree-of-freedom model, in order to clarify the effect of measurement error, modeling error and variance of the contact force on the contact force estimation. A finite element model of the pantograph is then used to investigate the effect of modeling errors on the accuracy of contact force estimation.

キーワード：パンタグラフ，電車線，接触力，カルマンフィルタ，シミュレーション，有限要素法

## 1. はじめに

電気鉄道において車両屋根上に設置されるパンタグラフは、架線から車両へ電力を導く役割を担う。そのため、車両への安定的な電力供給を実現するためには、架線に対するパンタグラフの追従性能を確保する必要がある。追従性能の指標値の一つとして架線・パンタグラフ間の接触力が用いられており、国際規格では最高走行速度における接触力変動の標準偏差の上限值等が規定されている<sup>1)</sup>。接触力は、架線を電化柱に固定している支持点の通過周期や、トロリ線を支持するハンガの通過周期等に起因して変動し、IEC 62846では20Hzまでの測定精度が求められる<sup>2)</sup>。

接触力の測定手法として、パンタグラフ舟体に作用する慣性力・復元力と接触力との力のつり合い式に基づいて接触力を陽に求める方法（以下、つり合い法）が提案されており<sup>3)</sup>、現車走行試験等で活用されている<sup>4)</sup>。つり合い法では、パンタグラフ舟体に加速度計とひずみゲージを取り付け、これらのセンサで測定した時刻歴データと校正係数との線形結合によって接触力を求める。この方法は計算コストが小さく、リアルタイムでの演算も容易にできるため、実時間計算に基づくHardware-in-the-loop simulation手法等でも用いられている<sup>5)</sup>。一方で、接触力を高精度に測定するためには多くの加速度計とひずみゲージをパンタグラフ舟体に取り付ける必要がある。そのため、舟体にセンサを実装するスペースが限られる新幹線用パンタグラフでは、適用が容易ではないと

いう課題がある。

ところで、構造物へ作用する接触力のような加振力や、変位等の状態量を高精度に推定する手法として、カルマンフィルタが様々な分野で用いられている<sup>6)</sup>。カルマンフィルタとは、対象物の力学モデルと加速度等の観測値から状態量を推定する手法であり、モデル化誤差や観測誤差等を考慮することで、誤差や不確かさが存在する場合であっても最適な状態推定を行えるという特徴を有する。車輪・レールの分野では、車輪・レール間の相対的なアタック角と接触位置の状態推定に対して、推定システムの非線形性を考慮したカルマンフィルタが用いられている<sup>7)</sup>。また、Lourensらは加振力を状態量に組み込む拡大カルマンフィルタ（Augmented Kalman Filter）を提案し、自由支持された梁構造物を対象として、打撃加振によるインパルス加振力の推定と、加振器を用いた定常波加振による掃引正弦波加振力の推定を行うことで妥当性の検証を行った<sup>8)</sup>。

本報告では、架線・パンタグラフ系の接触力推定に対する拡大カルマンフィルタの適用可能性の検討を行う。はじめにパンタグラフの2元系モデルを用いて、パラメータや誤差等が推定精度に与える影響について検討する。つぎに有限要素モデルに基づいて、モデル化誤差が推定精度に与える影響について検討を行う。なお、本報告では拡大カルマンフィルタを便宜的にカルマンフィルタと称する。

\* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

## 2. カルマンフィルタによる接触力推定手法

### 2.1 拡大状態方程式

パンタグラフに対する入力である加振力を状態量に含める拡大状態方程式を定義して、これにカルマンフィルタを適用することで加振力推定を行う手法について述べる。

拡大状態空間モデルを定義するために、モデル化誤差  $\mathbf{u}(k)$  を考慮した離散時間状態方程式を導入する。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{v}(k) + \mathbf{u}(k) \quad (1)$$

ここで  $k$  は離散時刻を表す整数であり、 $\mathbf{A}_d$  と  $\mathbf{B}_d$  はそれぞれ離散時間状態行列と入力行列である。 $\mathbf{x}(k)$  と  $\mathbf{v}(k)$  は、それぞれ状態量ベクトルと接触力を含む入力ベクトルであり、 $\mathbf{v}(k)$  の時刻  $k$  から  $k+1$  への更新は次式で行う。

$$\mathbf{v}(k+1) = \mathbf{v}(k) + \boldsymbol{\eta}(k) \quad (2)$$

ここで  $\boldsymbol{\eta}(k)$  は入力の更新量である。カルマンフィルタを用いて接触力を推定するために、状態量ベクトル  $\mathbf{x}(k)$  に  $\mathbf{v}(k)$  を含めることで、以下のように拡大状態空間モデルを定義する。

$$\mathbf{x}_a(k) \equiv \begin{Bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{v}(k) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

これにより、拡大状態方程式は次式で与えられる。

$$\mathbf{x}_a(k+1) = \mathbf{A}_a \mathbf{x}_a(k) + \boldsymbol{\zeta}(k) \quad (4)$$

ここで  $\mathbf{A}_a$  は拡大状態空間モデルの遷移行列を表し、次式で与えられる。

$$\mathbf{A}_a \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{B}_d \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (5)$$

また、 $\boldsymbol{\zeta}(k)$  は  $\mathbf{u}(k)$  と  $\boldsymbol{\eta}(k)$  から成り、次式で表される。

$$\boldsymbol{\zeta}(k) \equiv \begin{Bmatrix} \mathbf{u}(k) \\ \boldsymbol{\eta}(k) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

本モデルの観測方程式は次式となる。

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}_a \mathbf{x}_a(k) + \mathbf{w}(k) \quad (7)$$

ここで  $\mathbf{y}(k)$  は加速度等の観測値であり、 $\mathbf{C}_a$  は

$$\mathbf{C}_a = [\mathbf{C} \quad \mathbf{J}] \quad (8)$$

であり、 $\mathbf{C}$  は観測行列、 $\mathbf{J}$  は直達行列である。また、 $\mathbf{w}(k)$  は観測誤差である。

### 2.2 カルマンフィルタのアルゴリズム

カルマンフィルタでは、2.1 節における  $\mathbf{u}(k)$ 、 $\mathbf{v}(k)$ 、 $\mathbf{w}(k)$ 、 $\boldsymbol{\eta}(k)$  および  $\mathbf{x}_a(k)$  を確率過程として扱い、これらはその平均値からどの程度変動し得るかを表す統計量である分散によって特徴付けられる。この仮定の下で状態量を推定する問題を考える。カルマンフィルタによる状態推定アルゴリズムについて述べるための準備として、事後推定値  $\hat{\mathbf{x}}_a(k)$  と状態量ベクトルとの誤差を表す事後状態誤差ベクトル  $\tilde{\mathbf{x}}_a(k) = \mathbf{x}_a(k) - \hat{\mathbf{x}}_a(k)$  を用いて、事後誤差共分散行列  $\mathbf{P}(k)$  を次式で定義する。

$$\mathbf{P}(k) = E[\tilde{\mathbf{x}}_a(k) \tilde{\mathbf{x}}_a^T(k)] \quad (9)$$

ここで  $E[\quad]$  は期待値を表す。また、状態方程式のモデル化誤差  $\mathbf{u}(k)$  の共分散行列  $\mathbf{Q}$  を次式で定義する。

$$\mathbf{Q} = E[\mathbf{u}(k) \mathbf{u}^T(k)] \quad (10)$$

観測誤差  $\mathbf{w}(k)$  の共分散行列  $\mathbf{R}$  を次式で定義する。

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{w}(k) \mathbf{w}^T(k)] \quad (11)$$

入力の更新量  $\boldsymbol{\eta}(k)$  の共分散行列  $\mathbf{S}$  を次式で定義する。

$$\mathbf{S} = E[\boldsymbol{\eta}(k) \boldsymbol{\eta}^T(k)] \quad (12)$$

なお、これらの共分散行列  $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{S}$  はいずれも本手法における調整パラメータであり、その値を適切に決定する必要がある。

つぎに、拡大状態空間モデルにおける多変数時系列データに対するカルマンフィルタのアルゴリズムについて述べる。予測ステップでは事前状態推定値を次式で計算する。

$$\hat{\mathbf{x}}_a^-(k) = \mathbf{A}_a \hat{\mathbf{x}}_a(k-1) \quad (13)$$

事前誤差共分散行列は次式で計算する。

$$\mathbf{P}^-(k) = \mathbf{A}_a \mathbf{P}(k-1) \mathbf{A}_a^T + \mathbf{Q}_a \quad (14)$$

ただし  $\mathbf{Q}_a$  は以下の通りである。

$$\mathbf{Q}_a \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S} \end{bmatrix} \quad (15)$$

フィルタリングステップでは、次式によりカルマンゲイン  $\mathbf{G}(k)$  を計算する。

$$\mathbf{G}(k) = \mathbf{P}^-(k) \mathbf{C}_a^T (\mathbf{C}_a \mathbf{P}^-(k) \mathbf{C}_a^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (16)$$

つぎに、状態推定値を次式により計算する。

$$\hat{\mathbf{x}}_a(k) = \hat{\mathbf{x}}_a^-(k) + \mathbf{G}(k)(\mathbf{y}(k) - \mathbf{C}_a \hat{\mathbf{x}}_a^-(k)) \quad (17)$$

最後に、事後誤差共分散行列を次式により計算する。

$$\mathbf{P}(k) = (\mathbf{I} - \mathbf{G}(k)\mathbf{C}_a)\mathbf{P}^-(k) \quad (18)$$

式(13)～(18)を各時刻において計算することにより接触力推定を行う。

ただし、 $\mathbf{A}_a$ と $\mathbf{C}_a$ はパンタグラフの力学モデルに基づく変数であり、これらの値はパンタグラフの加振試験等からモデルのパラメータを同定することで決定する。

### 3. 2元系モデルのシミュレーションによる検証

はじめに、新幹線用シングルアームパンタグラフを2個の質点でモデル化した2元系モデルを用いた時刻歴応答シミュレーションに基づき、カルマンフィルタによる接触力推定を行うことで、手法の適用可能性を確認する。3.2節では本手法の調整パラメータである入力の新更新量 $\boldsymbol{\eta}(k)$ の共分散行列 $\mathbf{S}$ が推定精度に与える影響について検討を行う。3.3節では観測誤差が推定精度に与える影響について検討を行い、3.4節では2元系モデルのパラメータ同定誤差が推定精度に与える影響について検討を行う。

#### 3.1 シミュレーションの概要

本章ではパンタグラフの力学モデルに対して強制変位加振を行うシミュレーションを実施し、観測値である応答加速度にカルマンフィルタを適用することで接触力を推定する。シミュレーションの対象は、図1に示すパンタグラフの2元系モデルである。図1において $m_1$ はすり板の等価質量、 $m_2$ は舟体と枠組の等価質量、 $k$ と $c_1$ はそれぞれすり板・舟体間の剛性と減衰を、 $c_2$ は枠組基部に取り付けられているパンタグラフダンパの減衰を、 $P_0$ は静押上力を表す。また、 $f_c$ は接触力である。本モデルの各パラメータの値を表1に示す。

本シミュレーションでは、すり板に相当する質点1に対して、片振幅10mm、周波数2Hzの正弦波で強制変位加振を行う。時刻歴応答計算によって接触力の真値を求めるとともに、本計算から得られる質点1および質点2における加速度の時刻歴波形に基づいて、カルマンフィルタによって接触力を推定する。

本シミュレーションでは、式(3)の状態量は次式となる。

$$\mathbf{x}_a(k) = \{x_1(k) \quad x_2(k) \quad \dot{x}_1(k) \quad \dot{x}_2(k) \quad f_c(k) \quad P_0\}^T \quad (19)$$

カルマンフィルタによる接触力推定を行う際は、 $P_0$ の初期値を54Nとし、それ以外の初期値はすべて0とした。また、事後誤差共分散行列 $\mathbf{P}(k)$ の初期値は単位行列とした。観測誤差 $\mathbf{w}(k)$ の共分散行列 $\mathbf{R}$ は、加速度信号に与えた観測誤差の標本分散・共分散を用いた。

#### 3.2 調整パラメータの値が推定精度に与える影響

はじめに、調整パラメータが接触力推定に与える影響について検証する。本研究では、調整パラメータであるモデル化誤差 $\mathbf{u}(k)$ の共分散行列 $\mathbf{Q}$ と、入力の新更新量 $\boldsymbol{\eta}(k)$ の共分散行列 $\mathbf{S}$ を以下のように設定した。

$$\mathbf{Q} = \text{diag}[10, 10, 10, 10], \quad \mathbf{S} = \text{diag}[\sigma^2, 10] \quad (20)$$

ここで、式(20)に示す各要素は $\mathbf{Q}$ については左から、質点1の変位、速度、質点2の変位、速度に対応し、 $\mathbf{S}$ については接触力、静押上力に対応する。このうち、 $\mathbf{S}$ の1つ目の成分である $\sigma^2$ は接触力の時間更新量の分散を表し、接触力推定に対する影響が大きいパラメータである。本節では、 $\sigma^2$ の値と接触力推定精度との関係を調査する。

シミュレーションによって得られた接触力と、カルマンフィルタによる接触力の推定結果との比較を図2に示す。 $\sigma^2 = 10^3$ の場合には接触力の推定値はシミュレーション結果に対して過小評価される傾向にある。一方、 $\sigma^2 = 10^7$ とすることで推定値とシミュレーション結果は

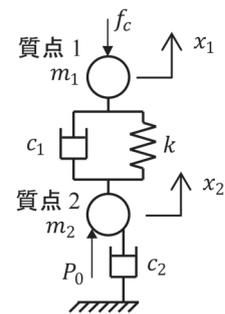


図1 パンタグラフの2元系モデル

表1 2元系モデルのパラメータ

パラメータ	値
$m_1$	3 kg
$m_2$	15 kg
$k$	105 kN/m
$c_1$	10 Ns/m
$c_2$	50 Ns/m
$P_0$	54 N

ほぼ一致することがわかる。 $\sigma^2$  が大きいとカルマンゲインが大きくなるため、観測データに対するフィルタの応答性が向上する。ただし、 $\sigma^2$  の値を  $10^7$  からさらに増加させても推定結果に大きな変化が認められなかったため、本報告では式 (20) において  $\sigma^2 = 10^7$  として検討を行う。

このように、本研究では調整パラメータの値を、接触力の真値と推定値を確認しながら試行錯誤的に決定したが、本来は接触力の真値は未知のため何らかの方法で決定する必要がある。調整パラメータの決定方法として、黄金分割法を用いた最適化手法等が提案されており<sup>9)</sup>、本研究においても、調整パラメータの決定方法については今後検討すべき課題である。

### 3.3 観測誤差が推定精度に与える影響

本節では、カルマンフィルタに用いる加速度に重畳した観測誤差が、接触力推定精度へ与える影響を調査する。本シミュレーションでは、平均が  $0\text{m/s}^2$ 、分散が  $0.05\text{m}^2/\text{s}^4$  の正規分布に従う乱数を観測誤差として、2元系モデルの時刻歴応答計算によって得られる加速度に対して与えた上で接触力を推定した。

シミュレーションに基づく接触力の推定結果を図3に示す。本図より、推定された接触力には観測誤差に起因したノイズ成分が含まれるものの、加速度に観測誤差が含まれる場合においてもカルマンフィルタによって接

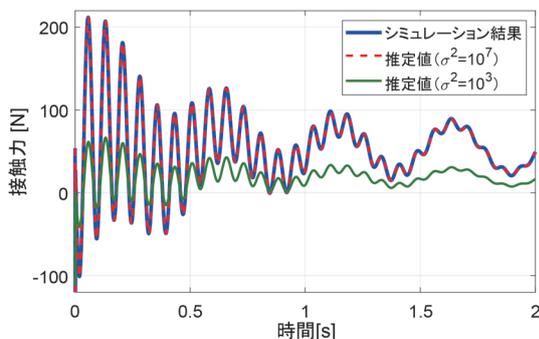


図2 接触力の推定結果 (調整パラメータの影響)

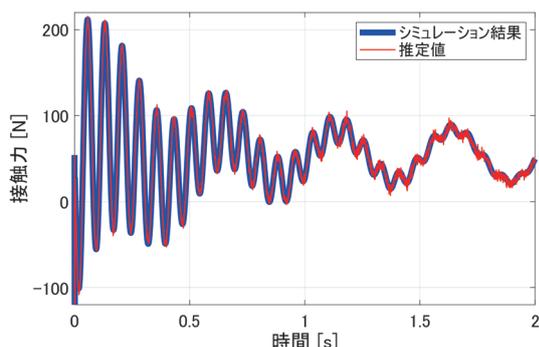


図3 接触力の推定結果 (観測誤差の影響)

触力の過渡的な変動や定常的な変動を概ね推定できることがわかる。

### 3.4 パラメータ同定誤差が推定精度に与える影響

本節では、カルマンフィルタに用いる2元系モデルのパラメータ同定誤差が推定精度に与える影響を調査する。前節では、各質点の加速度を計算するシミュレーションに用いるパラメータと、カルマンフィルタに用いるパラメータは同じ値を使用したのに対し、本節では表2に示すように、前者のシミュレーションに用いるパラメータは表1に示す値を使用し、後者のカルマンフィルタに用いるパラメータについては、 $m_1$  と  $k$  は表1に示す値の1.5倍を用いる。これにより、カルマンフィルタを設計する際にモデル化誤差が生じる状況を模擬する。

シミュレーションによって得られた接触力を図4に示す。青線は表2の第2列に示すパラメータを用いたシミュレーションから得られた接触力であり、これを真値とする。これに対して赤線は、カルマンフィルタに用いるパラメータに同定誤差が存在する状況での接触力推定結果である。この推定結果は、接触力のシミュレーション結果と良好な一致を示しており、カルマンフィルタではモデル化誤差を仮定しているため、パラメータの同定誤差がある状況においても接触力を高精度に推定できることがわかる。

表2 2元系モデルの同定誤差を表現するパラメータ

パラメータ	シミュレーションに用いる値	カルマンフィルタ設計に用いる値
$m_1$	3 kg	4.5 kg
$m_2$	15 kg	15 kg
$k$	105.0 kN/m	157.5 kN/m
$c_1$	10 Ns/m	10 Ns/m
$c_2$	50 Ns/m	50 Ns/m
$P_0$	54 N	54 N

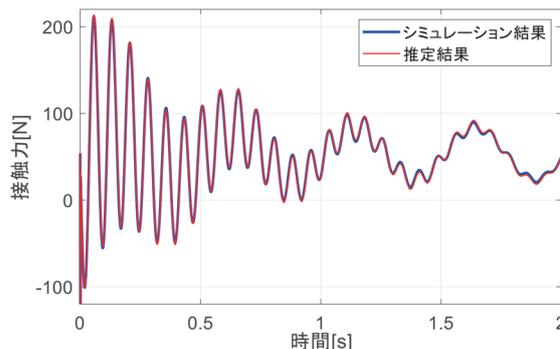


図4 接触力の推定結果 (同定誤差の影響)

## 4. 有限要素モデルのシミュレーションによる検証

### 4.1 有限要素法を用いた検討方法

本章では、パンタグラフの各部材の弾性変形等を表現するために構築した有限要素法に基づく比較的自由度の高い力学モデル（以下、有限要素モデル）の応答加速度と、このモデルの自由度を低減した2元系モデルの拡大状態空間モデルを用いて接触力推定を行うことで、モデル化誤差が接触力推定精度に与える影響について検討する。

はじめに、観測値である各部の加速度を得るために、有限要素モデルのすり板上面を鉛直方向に強制変位加振する時刻歴応答シミュレーションを行う。つぎに、有限要素モデルを低次元化して得られた2元系モデルを用いて接触力推定精度を検証する。

有限要素モデルは、図5に示すように、すり板・舟体・ホーンおよび枠組を有限要素法によって離散化したモデルである。すり板と舟体は、いずれも三角形の板曲げ要素を用いてモデル化した。これらの中央を、実機に実装されるばねを模擬したばね・ダッシュポットの並列要素で接続し、両端においてもばね・ダッシュポットの並列要素で接続することで実機に実装されるピンのブッシュの特性を簡易的に表現した。なお、ホーンと枠組は、オイラー梁要素を用いてモデル化した。また、下枠基部に取り付けられているパンタグラフダンパの特性を表現するために、下枠の回転角速度に比例したモーメント荷重を下枠基部の節点へ与えた。

2元系モデルは図1に示したモデルを用いた。2元系モデルと有限要素モデルの伝達関数（コンプライアンス）の比較を図6に示す。また、有限要素モデルに対する2元系モデルの伝達関数のゲインの比を図7に示す。有限要素モデルを基準とする2元系モデルのモデル化誤差は、最大で5倍程度であることが図7よりわかる。本節では、このモデル化誤差が接触力推定に与える影響について検討する。

### 4.2 検討結果（パンタグラフのモデル化誤差の影響）

はじめに、有限要素モデルのすり板上面を鉛直方向に強制変位加振するシミュレーションを実施して、加振点における加振力と図5（b）に示す観測点における加速度の時刻歴波形を取得する。加振波形は50Hzまでの周波数成分を有する擬似ランダム波とした。

つぎに、得られた加速度と2元系モデルを用いてカルマンフィルタによる接触力推定を行う。状態推定値の初期値は0とし、事後誤差共分散行列の初期値は分散が1で平均が0の乱数とした。本検討ではシミュレーションによって得られた加速度に対して観測誤差は与えないものとし、観測誤差の共分散行列はゼロ行列とした。

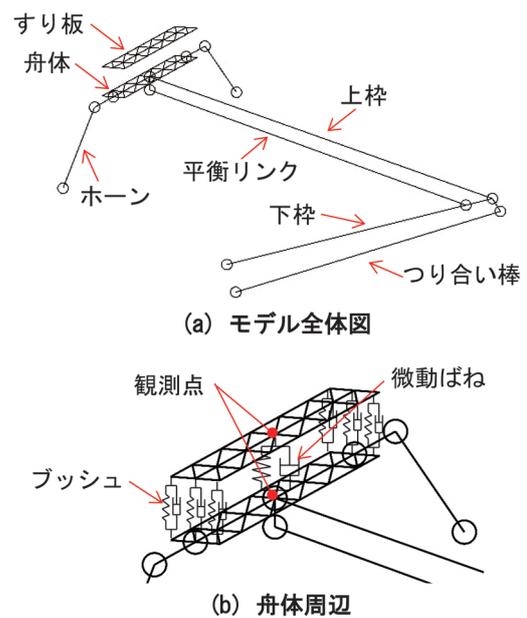


図5 パンタグラフの有限要素モデル

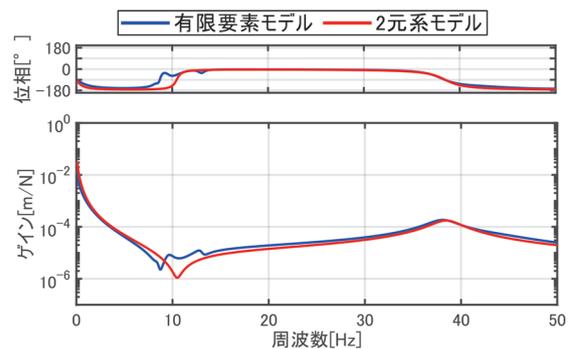


図6 モデルの伝達関数の比較

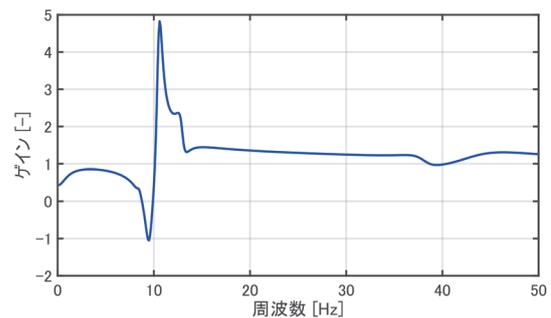


図7 モデル間における伝達関数のゲインの比

接触力の推定精度を調べるために、シミュレーションにおいてモデルに作用した接触力と推定接触力との伝達関数のボード線図を図8に示す。図8は接触力の推定精度を表し、ゲインが1に近いほど、また位相が0°に近いほど推定精度が高いことを表す。本図より、モデル化誤差の影響を受けて12Hz近傍において推定精度が低下しているものの、概ね35Hzまでの周波数範囲におい

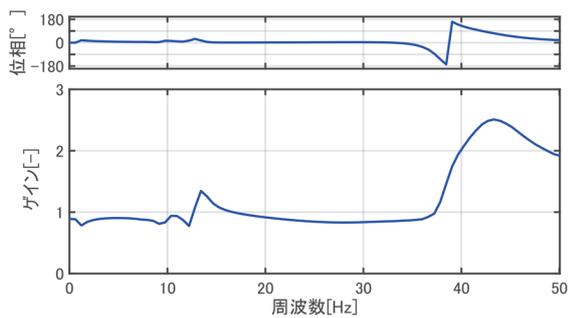
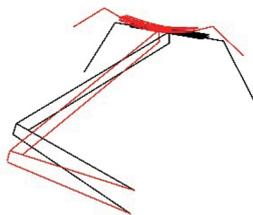


図8 シミュレーションに基づく接触力推定精度

— 元形状 — 変形状



(a) 固有振動数 11.8Hz, 枠組の運動モード



(b) 固有振動数 41.2Hz, すり板・舟体の変形モード

図9 有限要素モデルの固有モード形状

て接触力推定が可能なのことがわかる。

図9に、有限要素モデルの固有モード形状を示す。このように、枠組が主体となる固有モードの固有振動数は11.8Hzであり、すり板・舟体の弾性変形が主体となる固有モードの固有振動数は41.2Hzである。これらの振動形状は、2元系モデルでは表現できないため、図8に示すようにこれらの周波数近傍において接触力推定精度が低下したと思われる。

そのため、12Hz近傍の推定精度を向上するためには、枠組の自由度を2元系モデルへ追加することで自由度を3に増やしたモデルを用いることが有用だと考えられる。また35Hz以上の推定精度を向上するためには、すり板・舟体の弾性変形を表現可能な力学モデルを用いてカルマンフィルタを設計する必要があると考えられる。

## 5. まとめ

カルマンフィルタを用いた架線・パンタグラフ系接触力推定手法を提案し、はじめにパンタグラフの2元系モ

デルを用いて、調整パラメータ、観測誤差や2元系モデルのパラメータ同定誤差が推定精度に与える影響について検討し、つぎにパンタグラフの有限要素モデルに基づいてモデル化誤差が推定精度に与える影響について検討を行った。

本報告のまとめを以下に記す。

- ・2元系モデルのシミュレーションに基づく検討から、接触力の時間更新量に関する調整パラメータの値によって接触力推定結果が大きく変化することがわかった。一方で、観測誤差やパラメータ同定誤差が存在する場合においても、カルマンフィルタを用いて接触力を概ね推定可能であることがわかった。
- ・有限要素モデルのシミュレーションに基づく検討から、自由度が大きく異なるようなモデル化誤差が存在する場合においても35Hz程度までの周波数においては接触力を推定できることがわかった。一方で、2元系モデルでは表現が困難な固有モードの固有振動数近傍では接触力推定精度が低下することがわかった。

今後は、調整パラメータを適切に決定する方法についての検討や、より高次の力学モデルを用いることによる更なる精度向上の検討を行うとともに、架線下をパンタグラフが走行する状況下における接触力推定の適用可能性の検討をシミュレーションに基づいて行う方針である。

## 文献

- 1) IEC 62486:2017, "Railway applications—Current collection systems—Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead contact line (to achieve free access)", International Electrotechnical Commission, 2017.
- 2) IEC 62846:2016, "Railway applications—Current collection systems—Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line", International Electrotechnical Commission, 2016.
- 3) 池田充：架線・パンタグラフ間の接触力測定手法に関する研究，日本機械学会論文集C編，Vol.70, No.694, pp.92-99, 2004
- 4) 池田充，白田隆之：架線・パンタグラフ間の接触力測定手法の研究，鉄道総研報告，Vol.14, No.6, 2000
- 5) 小林樹幸，小山達弥，原田智：高速パンタグラフ試験装置を用いた集電系ハイブリッドシミュレーション手法，鉄道総研報告，Vol.35, No.12, pp.47-52, 2021
- 6) 足立修一，丸田一郎：カルマンフィルタの基礎，東京電機大学出版局，2012
- 7) 國行翔哉，本堂貴敏，鈴木貢，宮本岳史，中野公彦：PQ輪軸を用いた単一車輪クリープ力モデルによる輪軸運動状態推定法の性能評価，第31回交通・物流部門大会

- (TRANSLOG2022) 講演論文集, No.TL1-4, 2022
- 8) E. Lourens, E. Reynders, and G. De. Roeck, et al., "An augmented Kalman filter for force identification in structural dynamics", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 27, pp.446-460, 2012.
- 9) 日野順市, 山室亮太: カルマンフィルタによる機械構造物の時間領域加振力推定に関する研究 (重み係数の最適化), Dynamics and Design Conference 2020 講演論文集, No.310, 2020



# 劣化したバラストに対する 低強度安定処理工法による沈下抑制効果

景山 隆弘\* 中村 貴久\* 北条 優\* 田島 史花\*

Development of Low Strength Stabilization Method for Fouled Ballasted Tracks

Takahiro KAGEYAMA Takahisa NAKAMURA Masaru HOJO Fumika TAJIMA

As ballast on railway track is more crushed and grained, settlement of the track tends to occur even if after tamping, so that maintenance frequency increases. Although the basic measure to reduce the maintenance frequency is replacing the ballast with new ballast, the cost is high. Then, a low-cost method for reducing the settlement without replacing the ballast has been required. Therefore, the authors developed a low-strength stabilization method for reducing settlement without replacing the ballast. In this study, we confirmed the effectiveness of the developed method for reducing settlement through laboratory tests. In addition, we conducted field tests on a commercial line verify the effectiveness for reducing settlement.

キーワード：低強度安定処理，繰返し三軸圧縮試験，実物大試験，試験施工，劣化バラスト

## 1. はじめに

バラスト軌道では，列車の繰返し荷重でバラストの沈下が発生する。そのため，定期的な軌道の検測結果に基づき，軌道の沈下が大きい箇所では，タイタンパによるつき固め作業が必要となる。バラストの破碎・細粒化が進行していない健全な状態であれば，つき固め作業後のバラストの沈下は小さいことから，保守頻度は低い。しかし，列車荷重やつき固め作業の繰返しにより，バラストの破碎・細粒化が進行（以下，劣化バラスト）<sup>1) 2)</sup> すると，つき固め作業を行ってもすぐにバラストの沈下が生じやすくなることで，保守頻度が増大する。そのため，基本的には，保守頻度の低減のために，道床交換が行われる。しかし，道床交換の施工コストが高いことから，劣化バラストの沈下を抑制する低コストな沈下対策工法が求められていた。これまでに劣化バラストの強度を向上させ，バラスト軌道の沈下を抑制する工法として，劣化バラストにグラウト材料を充填し，固化後に破碎して造粒することで，排水性および強度を増加させる造粒化工法<sup>3)</sup>，および劣化バラストを生分解性PVAポリマー水溶液と反応促進材で安定処理するポリマー安定処理工法<sup>4)</sup>が開発されている。

造粒化工法では，まくらぎの撤去作業，グラウトの攪拌作業およびグラウトの充填層の破碎作業が必要となり，施工性に課題があった。また，ポリマー安定処理工法では，PVAポリマー水溶液が大量の水を含んでおり，施工直後に劣化バラストの強度が低下して初期沈下が生

じやすいといった課題があった。

そこで，施工が簡易で，劣化バラストの初期沈下を抑制し，固化後も通常のつき固め作業が可能な方法として，超速硬セメントおよび高分子材料の混合材（以下，補修材）を用いる低強度安定処理工法<sup>5) 6) 7)</sup>を開発した。

本稿では，繰返し三軸圧縮試験および実物大軌道模型を用いた繰返し載荷試験による沈下抑制効果を確認した結果，および営業線で試験施工を実施し，沈下抑制効果を検証した結果について報告する。

## 2. 低強度安定処理工法の概要と施工手順

低強度安定処理工法は，タイタンパによるつき固め作業時に補修材を投入し，劣化バラストを安定処理することで，軌道の沈下を抑制するものである。補修材の投入箇所はまくらぎ1本当たり8箇所（図1）である。本工法の特徴は，次の通りである。

- ・ハンドタイタンパ（以下，HTT），マルチプルタイタンパ（以下，MTT）およびバックホウタイタンパ（以下，BHHT）を用いて施工可能
- ・施工直後からバラストの沈下を抑制でき，昼間の作業

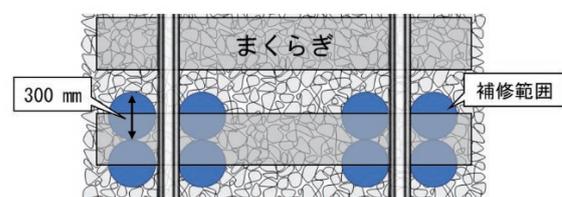


図1 上から見た低強度安定処理工法の補修範囲

\* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

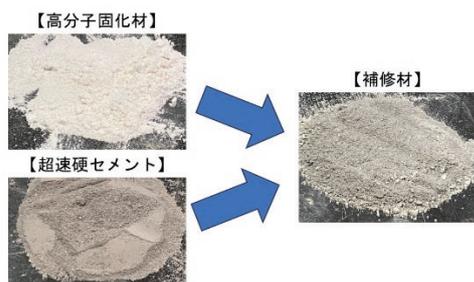


図2 低強度安定処理工法の補修材



(a) 掘削作業 (b) 補修材投入 (c) つき固め作業

図3 低強度安定処理工法の施工方法<sup>7)</sup>

間合いでも施工可能

・施工後もタイタンパによるつき固め作業が可能

補修材は、超速硬セメントと高分子固化材の2種類の材料(図2)を1:1(重量比)の割合で混合したものである。超速硬セメントは、普通ポルトランドセメントにカルシウムサルフォアルミネート化合物を添加したものである。劣化したバラストに含まれる水と反応し、養生2時間程度で普通ポルトランドセメントの養生28日に相当する20N/mm<sup>2</sup>程度の圧縮強度<sup>8)</sup>が発現する。

また、高分子固化材は、ポリアクリルアミド系の粉体を主体としたものである。劣化バラストと混合することにより、即時に劣化したバラストに含まれる水を吸水して見かけの含水比を低下させるとともに、架橋作用によりバラストの細粒分を安定化させる効果<sup>9)</sup>がある。

これらの材料を仮に単体で使用した場合、超速硬セメントは混合直後の強度発現の不足、また高分子固化材は雨水が流入した時の強度低下が懸念される。そのため、超速硬セメントと高分子固化材を混合する本補修材では、それぞれの欠点を補うことが可能となる。

なお、低強度安定処理工法では、新品のバラストへの交換や発生バラストの廃棄を行わないため、道床交換の1割程度のコストで施工できる。

低強度安定処理工法の施工手順を次に示す。

- 1) つき固め位置においてまくらぎ底面位置の深さまで掘削する(図3(a))
- 2) つき固め位置(まくらぎ1本あたり8箇所)1箇所あたりに補修材を500g投入する(標準添加量)(図3(b))

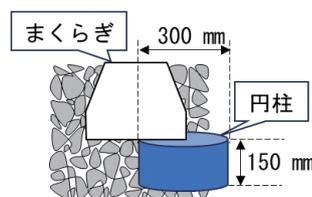


図4 補修材の添加箇所

- 3) バラストを埋め戻してつき固め作業を実施し、劣化バラストを安定処理する(図3(c))

なお、MTTを用いて施工した場合においても、上記の手順の通り、掘削した箇所に補修材を投入する。しかし、後述する5.2節のMTTを用いた試験施工にて、道床表面に補修材を散布した場合においても、沈下抑制効果が見られた。そのため、施工性を考慮して、MTT施工時のみ道床表面に補修材を散布することも可能である。

また、タイタンパでつき固め作業が可能な範囲を直径300mm×高さ150mmの円柱形(図4)と仮定し、式(1)を用いて補修材添加量 $A_s$ (g)を決定した。

$$A_s = \frac{V \rho_d R_s}{100} \quad (1)$$

ここで、 $V$ :円柱の体積(cm<sup>3</sup>)、 $\rho_d$ :劣化バラストの乾燥密度2.05(g/cm<sup>3</sup>)、 $R_s$ :補修材の添加割合2%とした。補修材の添加割合は、後述する4章および5章の結果を踏まえて決定した。

なお、補修材投入後に保守作業を行うことが可能か検討するために、標準添加量の4倍の補修材(添加量8%)で安定処理した円形土槽(直径300mm)内の劣化バラストに対して、タイタンパでのつき固め作業を行った。強度が十分に発現したと考えられる気中養生3ヵ月目につき固め作業を行った結果、バラスト内に問題なくタンピングツールを挿入できることを確認した。

### 3. 繰返し三軸圧縮試験による検討

劣化バラストに対する補修材の添加量を検討するため繰返し三軸圧縮試験を実施した。試験用の劣化バラスト(以下、試料)は、劣化指数 $FI$ (Fouling Index, 通過質量百分率0.075mmと4.75mmの合計<sup>8)</sup>)を変えた2種類( $FI=36\%$ および $FI=52\%$ )とした(図5)。また、E法で実施した締固め試験結果として、最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ および最適含水比 $w_{opt}$ を図5に示す。なお、 $FI$ が20%以上になると、バラストの沈下が増大しやすい「劣化」の判定<sup>10)</sup>となる。現地より採取したバラストと粒度分布が近くなるように、新品バラストにクラッシュランおよびカオリン粘土を混合して試料を作製した。三軸圧縮試験では、JGS 0524(圧密・排水)に準拠して供

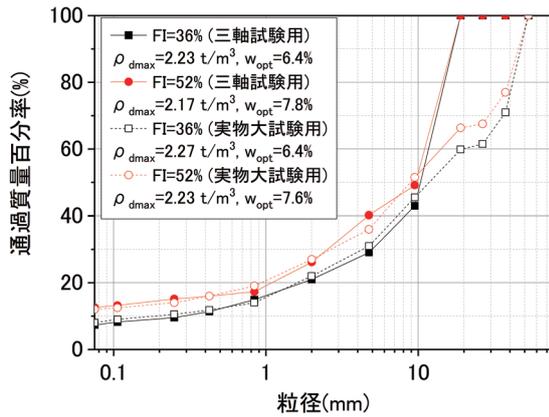
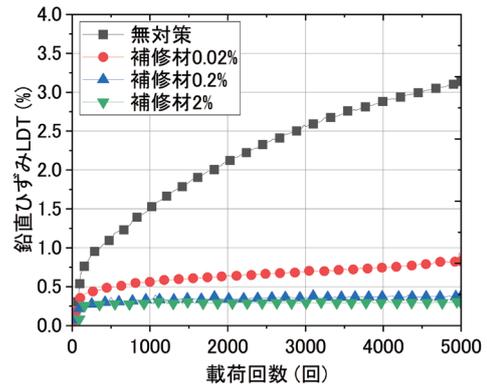


図5 試料の粒度分布

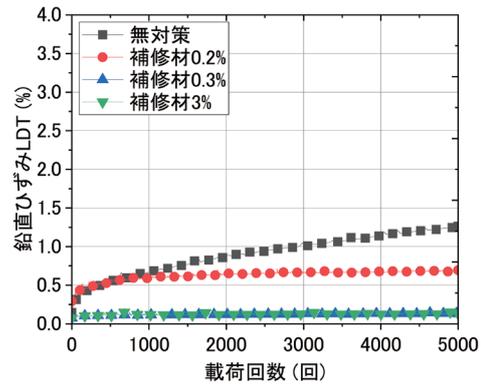
試体寸法を直径 100mm、高さ 200mm の円柱形とし、供試体寸法と最大粒子径を考慮して試料のせん頭粒度を調整した。含水比 8% ( $FI=36\%$ 、飽和度  $S_r=68\%$ ) もしくは 10% ( $FI=52\%$ 、飽和度  $S_r=77\%$ ) に含水調整した試料と図 6 に示す添加量の補修材を混合し、5 層に分けて円柱モールドに入れ、締め固め度  $D_c=92\%$ <sup>(11)</sup> を目標に締め固めることで供試体を作製した。含水比は最適含水比より 2% 程度湿潤側とし、沈下量が大きくなる条件とした。補修材の添加量は、乾燥試料に対する質量%で示す(図 6)。

試験の手順としては、最初に負圧 20kPa で等方圧密させた後、ハーバーサイン波で繰返し載荷を行った。載荷条件は、載荷回数 5000 回、載荷周波数 0.5Hz、拘束圧 20kPa とした。鉛直応力振幅は、列車荷重 160kN に対してレールによる荷重分担率を 0.4<sup>(12)</sup> とし、次章の実物大試験に使用するまくらぎの底面積で除した値とした。ここで、列車荷重 160kN に関して、実列車の軸重は在来線で 9t 程度<sup>(13)</sup>、新幹線で 11t 程度<sup>(14)</sup> であり、新幹線では速度衝撃率<sup>(12)</sup> を、在来線ではレール継目部の衝撃率<sup>(12)</sup> を考慮して設定した。次章において、 $FI=36\%$  のケースは在来線に敷設されている PC3 号まくらぎを、 $FI=52\%$  のケースは新幹線に敷設されている PC3H まくらぎ(PC3 号まくらぎの 1.5 倍の底面積)を使用し試験を行った。そのため、鉛直応力振幅は、 $FI=36\%$  が 133kPa、 $FI=52\%$  が 88.6kPa とした。本工法の養生時間は、夜間の作業間合で初列車までの時間を考慮して 2 時間とした。

$FI=36\%$  と  $FI=52\%$  の沈下量と載荷回数の関係をそれぞれ図 6 (a) および図 6 (b) に示す。図 6 より、無対策のケースと比較して、 $FI=36\%$  のケースの沈下量は補修材を 0.2% 以上添加することで約 1/8、 $FI=52\%$  のケースの沈下量は補修材を 0.3% 以上添加することで約 1/7 に低減した。



(a)  $FI=36\%$  のケース



(b)  $FI=52\%$  のケース

図6 鉛直ひずみの推移

#### 4. 実物大試験による沈下抑制効果の検討

実施工における補修材の適切な添加量を検討するため実物大軌道模型に対する繰返し載荷試験を実施した。実物大軌道模型はまくらぎ 1 本のバラスト軌道とした。試験ケースは、 $FI=36\%$  で PC3 号まくらぎ(在来線用)を用いた模型(ケース 1)と  $FI=52\%$  で PC3H まくらぎ(新幹線用)を用いた模型(ケース 2)の 2 ケースとした。バラストの粒度分布は、図 5 に示した通りである。載荷条件は、載荷回数 30 万回、載荷周波数 5Hz、載荷荷重は最小荷重 5kN および最大荷重 85kN とした。ケース 1 およびケース 2 の試験条件をそれぞれ図 7 に示す。低強度安定処理工法の施工手順について、はじめにまくらぎ 1 本あたり 8 箇所ツール形状が円筒型のタイタンパでまくらぎ下までバラストを掘削し、そこに補修材を投入した。その後バラストを埋め戻して、ツールの形状がへら型のタイタンパで通常のつき固め作業を実施した。また、PC3 号まくらぎ(在来線用) 1 本を用いて、新品バラストに対する繰返し載荷試験を別途実施した。

図 8 (a) にケース 1 のまくらぎ沈下量を示す。無対策のケースでは、載荷開始から沈下が急進し、その後も沈下がなだらかに増加して、30 万回の繰返し載荷で 32mm 程度の沈下が生じた。それに対し、繰返し三軸圧

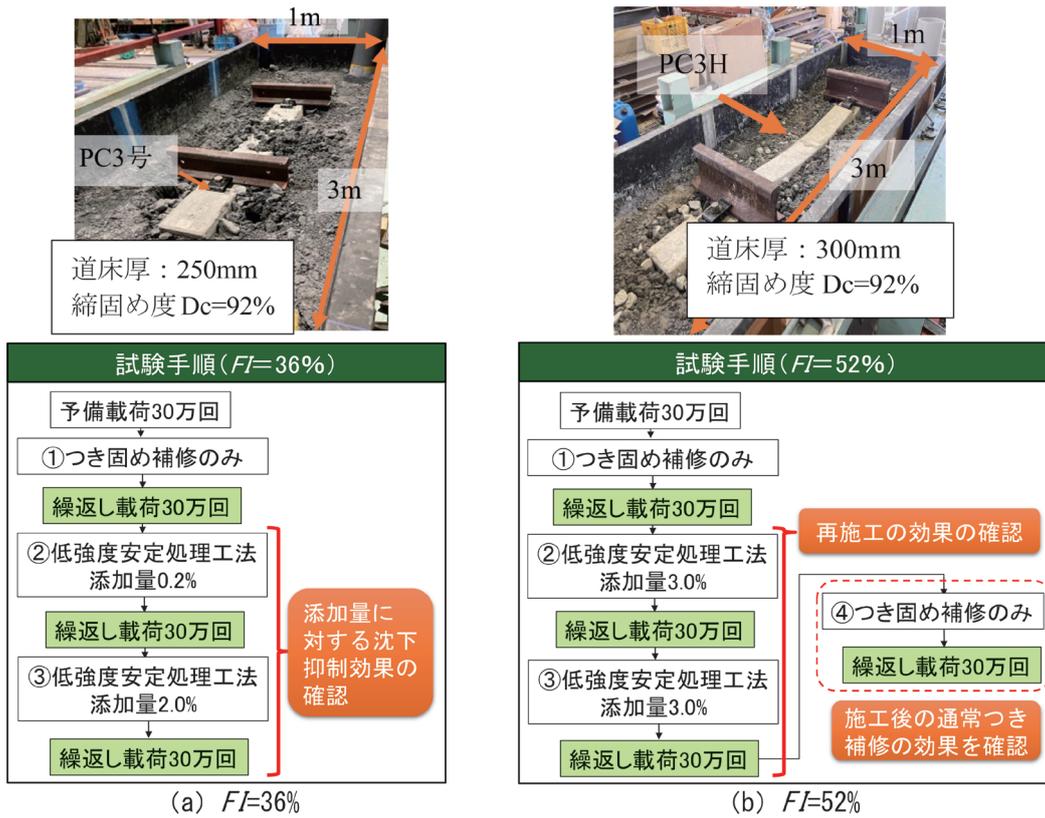
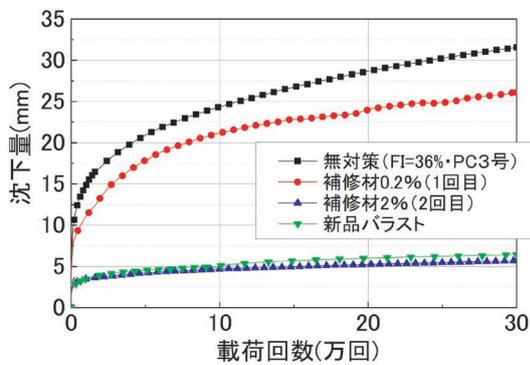
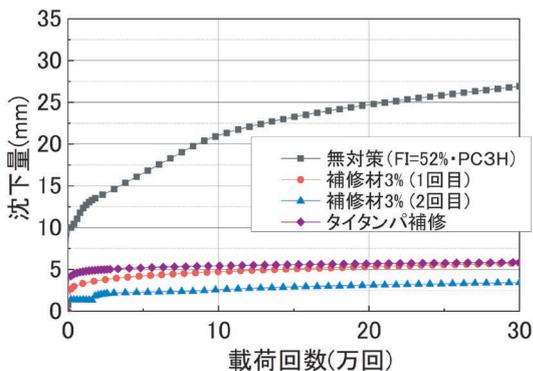


図 7 実物大試験の試験条件



(a)  $FI=36\%$ のケース



(b)  $FI=52\%$ のケース

図 8 実物大試験の沈下量

縮試験では沈下抑制効果が得られた補修材 0.2% の添加では、30 万回後の沈下量が 26mm 程度であり、無対策のケースと比較して約 20% の低減であった。繰返し三軸圧縮試験と比較して沈下抑制効果が低下した理由は、実施工において、タイタンパを用いてバラストに補修材を混合する際に、補修材を均一にバラストと攪拌できないためと考えられる。そこで、現場での強度のばらつきを考慮し、補修材 0.2% の 10 倍である補修材を 2% 添加した。その結果、30 万回後の沈下量が 5.6mm 程度となり、無対策と比較して約 1/6 になった。また、新品バラストの沈下量と同程度となった。

図 8 (b) にケース 2 のまくらぎ沈下量を示す。無対策のケースでは、ケース 1 と同様に载荷開始から沈下が大きく、30 万回の繰返し载荷で 27mm 程度の沈下が生じた。また、ケース 2 の FI が 52% と高いため、ケース 2 では標準添加量よりも添加量を増やした 3% の補修材を添加した。その結果、30 万回後の沈下量が 6mm 程度となり、無対策のケースと比較して約 1/5 になった。再度、補修材を 3% 添加すると、30 万回後の沈下量が 3.5mm 程度となり、無対策のケースと比較して約 1/8 になった。さらに、タイタンパを用いた通常につき固め作業を行ったところ、30 万回後の沈下量が 6mm 程度となった。そのため、低強度安定処理後も問題なくつき固め作業を実施できると考えられる。

## 5. 営業線における試験施工

### 5.1 ハンドタイタンバ (HTT) を用いた試験施工

HTTを用いた試験施工は年間通トン数1700万トンの直線区間において実施した(図9)。当該箇所は、バラストのFIが24%であり、沈下量が大きくなり、保守量が増大していた。本施工では、掘削を手作業で行った(図9(a))。本施工では、噴泥が生じていた継目部の前後のまくらぎ15本分に対して、補修材を2%添加した。

図10に施工前後の高低変位を示す。通常につき固め作業の2ヵ月後の高低変位は最大-11mm程度であった。一方、低強度安定処理工法の施工16ヵ月後の高低変位は-5mm程度であった。低強度安定処理工法の施工範囲内における施工16ヵ月後までの高低変位は施工前に比べて1/2程度に低減し、従来につき固め作業よりも高い沈下抑制効果が得られることを確認した。

継目部直下の高低変位進みは、施工1週間後から16ヵ月後の間で-7mm程度であった。一方、施工16ヵ月後に施工範囲の境界部外側(水平位置7m付近)において最大-6mm程度の高低変位が生じた。これは、施工範囲内の上げ越し量が10mm程度とやや大きく、施工箇所が施工範囲外と比較して相対的に高くなったことが影響したと考えられる。

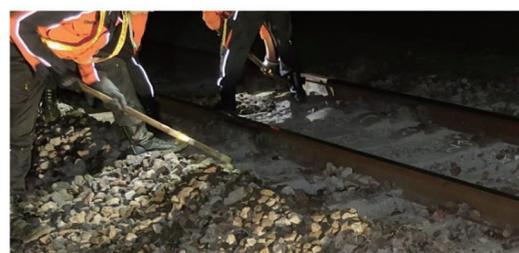
### 5.2 マルチプルタイタンバ (MTT) を用いた試験施工

MTTを用いた試験施工は年間通トン数が520万トンの直線区間で実施した。本施工では、噴泥が生じている継目部前後のまくらぎ合計6本分に対して、補修材を2%添加した。当該箇所は、バラストのFIが46.5%であり、保守量が増大していた。

ここで、本施工では掘削作業をせず、道床表面に補修材を散布した。通常のMTTのつき固め作業では、タンピングツールを大きく開いて挿入し、まくらぎの外側から直下に向かってバラストを強制的に押し込むようにつき固める。そのため、まくらぎ周辺に補修材を散布してもまくらぎ直下のバラストに補修材を十分に混合できないことが懸念された。そこで、補修材をまくらぎ下のバラストと混合しやすくするために、MTTのタンピングツールを予めまくらぎに沿う程度に狭めてつき固め位置に挿入し、まず補修材をまくらぎ下まで押し込んだ(図11)。最後にタンピングツールを開いて再び挿入し、通常のMTTの施工と同様につき固めた。

図12に施工前後の高低変位を示す。通常のMTTの補修3ヵ月後の高低変位は、-20mm程度であった。一方、本工法の施工8ヵ月後の高低変位は-3mm程度であり、施工前に比べて1/7程度に低減した。

また、施工4ヵ月後から8ヵ月後の間では、ほとんど沈下が進行せず、良好な軌道状態を維持していることを



(a) 掘削作業



(b) 補修材投入



(c) つき固め作業

図9 試験施工状況 (HTT)<sup>5)</sup>

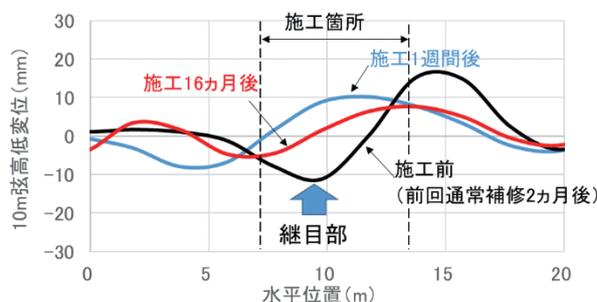


図10 試験施工前後の高低変位 (HTT)

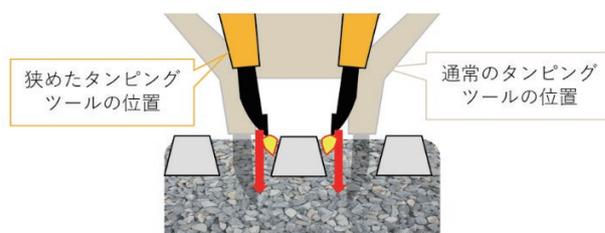


図11 まくらぎとMTTのツール位置

確認した。

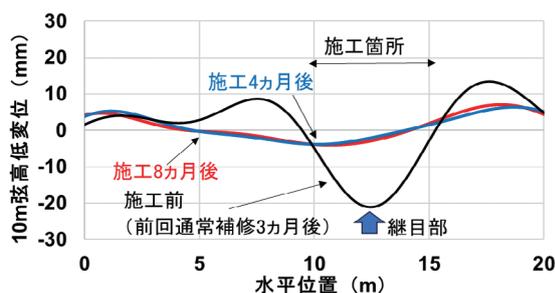


図 12 試験施工前後の高低変位 (MTT)<sup>5)</sup>

## 6. まとめ

劣化バラストに対して、超速硬セメントと高分子材料からなる補修材をつき固め作業時に混合することで沈下を抑制する低強度安定処理工法を開発した。本研究では、繰返し三軸圧縮試験および実物大軌道模型を用いた繰返し載荷試験により沈下抑制効果を確認した。さらに、営業線で試験施工を実施し、沈下抑制効果を検証した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1)  $FI$  が 20% 以上となる条件で作製したバラストに対して、補修材で安定処理し、繰返し三軸圧縮試験を実施した。無対策のケースと比較して、 $FI=36\%$  のケースの沈下量は補修材を 0.2% 以上添加することで約 1/8 に、 $FI=52\%$  のケースの沈下量は補修材を 0.3% 以上添加することで約 1/7 に低減した。
- (2)  $FI$  が 20% 以上となる条件で作製したバラストに対して、補修材で安定処理し、バラストの実物大試験を実施した。 $FI=36\%$  のケースにおいて、繰返し三軸圧縮試験で沈下抑制効果が得られた補修材を 0.2% した添加したケースでは、無対策のケースと比較して約 20% の低減であった。タイタンパでの施工による強度のばらつきにより、沈下抑制効果が低減したものと考えられる。また、無対策のケースと比較して、 $FI=36\%$  のケースの沈下量は補修材を 2.0% 以上添加することで約 1/6 に、 $FI=52\%$  のケースの沈下量は補修材を 3.0% 以上添加することで約 1/8 に低減した。
- (3)  $FI$  が 20% 以上の現地の劣化バラスト区間において、ハンドタイタンパを用いて補修材を 2% 添加した試験施工を実施した。その結果、施工範囲内における施工 16ヵ月後までの高低変位は、通常につき固めの 2ヵ月後の高低変位の 1/2 程度に低減し、従来のつき固め作業よりも高い沈下抑制効果が得られることを確認した。
- (4)  $FI$  が 20% 以上の現地の劣化バラスト区間において、マルチプルタイタンパを用いて補修材を 2% 添加した試験施工を実施した。その結果、施工 8ヵ

月後までの高低変位は通常につき固めの 3ヵ月後の高低変位の 1/7 程度に低減することを確認した。

## 謝 辞

本試験施工にご協力いただいた西日本旅客鉄道株式会社および四国旅客鉄道株式会社の関係各位に感謝の意を表す。

## 文 献

- 1) 中村貴久, 桃谷尚嗣, 木次谷一平: バラストの破砕・細粒化メカニズムの解明と余寿命予測方法の提案, 鉄道総研報告, Vol.35, No.4, pp.35-40, 2021
- 2) Jose, P., André, D., "Railway ballast degradation," In 15 th Swiss Transport Research Conference, pp.1-26, 2015.
- 3) 中村貴久, 桃谷尚嗣, 木次谷一平: 道床交換せずに劣化したバラストの性能を取り戻す, RRR, Vol.76, No.7, pp.16-19, 2019
- 4) 中村貴久, 木次谷一平, 伊地知卓也: 細粒土混入率の高いバラスト軌道に対する生分解性ポリマーを用いた沈下抑制対策, 日本鉄道施設協会誌, Vol.55, No.6, pp.26-29, 2017
- 5) 景山隆弘, 中村貴久: 劣化したバラストの沈下を抑制する低強度安定処理工法, 日本鉄道施設協会誌, Vol.60, No.8, pp.27-30, 2022
- 6) Kageyama T, Nakamura T, Kijiya I, Momoya Y, Akagi H, Saito R., "Development of low-strength stabilization method for fouled ballasted tracks," Transportation Geotechnics, Vol.34, 100765, 2022.
- 7) 景山隆弘, 中村貴久: 大規模降雨で被災した鉄道バラスト軌道の道床交換判定方法, 日本鉄道施設協会誌, Vol.61, No.8, pp.21-24, 2023
- 8) 樺山好幸, 大友弘志, 半田実, 五味秀明: 床版上面増厚工法に関する超速硬 SF コンクリート付着強度発現機構に関する研究, 土木学会論文集, Vol.1996, No.540, pp.241-250, 1996
- 9) Romel, G., Rayya, H., Robert, E., Piratheepan, J., "Effect of the Use of a Polymeric Stabilizing Additive on Unconfined Compressive Strength of Soils," Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol.2473, No.1, pp.200-208, 2015.
- 10) Selig, E.T., "Ballast for heavy duty track. In: Track Technology," Proceedings of a Conference organized by the Institute of Engineers (ICE), Nottingham, pp.245-252, 1985.
- 11) 青柳智之, 石川達也, 松屋真吾, 中村貴久, 木次谷一平: 鉄道バラストの繰返し変形特性に及ぼす細粒分と含水状態の影響評価, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.1185-

- 1186, 2018
- 12) 公益財団法人鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説－軌道構造, 丸善出版, pp.363-371, 2012
- 13) 株式会社総合車両製作所 総合車両製作所技報：[https://www.j-trec.co.jp/company/070/04/jtr04\\_088-093.pdf](https://www.j-trec.co.jp/company/070/04/jtr04_088-093.pdf)（参照日：2024年4月4日）
- 14) 新星出版社編集部：徹底図解 新幹線のしくみ 改訂版, 新星出版社, p.21, 2010



# 駅男子トイレの清掃品質に関する鉄道利用者の意識調査

京谷 隆\* 池田 佳樹\*\* 大石 洋之\*\*\* 川崎 たまみ\*

Survey on Railway Customers' Consciousness of Cleaning Quality in Men's Restrooms in Railway Stations

Takashi KYOTANI Yoshiki IKEDA Hiroshi OISHI Tamami KAWASAKI

In order to extract factors that affect customers' evaluation of men's restrooms in railway stations, we conducted surveys on railway customers' consciousness of cleaning quality in men's restrooms in railway stations. Statistical processing of the survey results revealed that two indicators, "odor satisfaction" and "urine stains on skirting boards", affect the users' evaluation of whether they would like to use the same restroom again. It also became clear that men's restrooms with dry cleaning in railway stations had statistically significantly better evaluations than men's restrooms with wet cleaning in railway stations from the viewpoint of odor.

キーワード：駅，トイレ，清掃，利用者意識，衛生

## 1. はじめに

公共交通機関の一つである旅客鉄道において、快適な空間（駅構内や車内等）を提供することは、鉄道利用者確保するうえで非常に重要である。中でも駅トイレは、見た目やにおいなど、快適性に影響を与える要因に関して、利用者からの多くの意見が挙がる旅客設備の一つである。筆者らは、過去に実施した調査<sup>1) 2)</sup>で、駅の快適性を考える上で、においが重要な要因であると考えている利用者が、全体の約2割いることを明らかにした。また、小崎ら<sup>3)</sup>は、商業施設のトイレを対象とした印象評価で、「またこのトイレに來たいか」「施設の評価が上がったか」などの総合評価項目と、「におい」「きれいさ」「快適さ」などの評価項目との間に、高い相関があると述べている。さらに高橋らにより<sup>4) 5)</sup>、駅男子トイレにおける小便器のトラップ方式や水洗方式、汚垂石や側溝の有無、および床タイルの大きさがにおいの快適度に影響を与えていることを確認したという報告もある。男子トイレでは、小便器がある部分が床歩行面に展開しており、利用者の移動に伴って、床に飛散した尿汚れなどを拡げている可能性があることから、上記のような結果が得られたと考えられる。一般的に、駅トイレの清掃は鉄道事業者からの委託を受けた清掃会社により実施され、清掃作業の品質評価は、清掃会社自身によるインスペクションにより清掃箇所ごとに評価基準を設けて実施されている。一方で、駅トイレを対象とした利用者による清掃品質評価の報告例はほとんどなく、現在行われている清掃作業の品質が利用者によってどのように評価されているのか、

どのような清掃品質であれば利用者による評価結果が向上するのか、明らかではないのが実情である。

また近年は、トイレのにおいの原因の一つと考えられている細菌<sup>6)</sup>の繁殖を抑制する目的で、駅トイレの床の清掃に水を用いない方式（乾式清掃）を導入する駅が増えている。乾式清掃を導入した駅トイレでは、従来の水を用いる清掃方式（湿式清掃）による駅トイレと比べて、においが低減されたとする報告もある<sup>7) 8)</sup>。しかし、清掃品質評価については、乾式・湿式を問わず、ほぼ同じ基準で実施されている。

そこで筆者らは、鉄道利用者が駅トイレの清掃品質についてどのような評価を行っているのかを把握し、利用者にとっての清掃品質の向上に資することを目的として、利用者から見た駅トイレの清掃品質調査（以降、「モニター調査」と記載する）を実施した。利用者による評価結果の分析に当たっては、先に述べた先行研究<sup>3)</sup>の内容から、「再度利用したいか」という質問に対する回答に影響を与える指標を考慮することとした。調査対象としたトイレは、先行研究<sup>4) 5)</sup>の内容から、男子トイレに限定した。また、清掃方式の違い（乾式・湿式）によって、調査結果に違いが表れるか否かについても検討した。本稿ではそれらの内容と結果について報告する。

## 2. 調査概要

### 2.1 調査対象トイレ

調査対象としたトイレは、床に対して乾式清掃を実施している2箇所の駅（以降、A駅、B駅と表記する）と、湿式清掃を実施している2箇所の駅（以降、C駅、D駅と表記する）の男子トイレである。これらの4箇所の駅は、以下の条件を満たす駅より選択した。

\* 人間科学研究部 快適性工学研究室  
\*\* 東日本旅客鉄道株式会社  
\*\*\* 東北工業大学

表 1 調査対象の駅トイレ<sup>7) 9) 10)</sup>

駅	A	B	C	D
床の清掃方式	乾式		湿式	
リニューアル回数	2	2	1	2
直近のリニューアル年	2015	2015	2014	2006
清掃道具 (通常)	・掃除用シート装着 フラットモップ		・固く絞ったモップ	
清掃道具 (深夜) (月 1 回程度)	・掃除機 ・固く絞ったスポンジ		・ブラシ ・回転ブラシ	
清掃道具例 <sup>7)</sup>	 (フラットモップ)		 (固く絞ったモップ)	
床構造	ゴムタイル		磁器タイル+目地	
トイレ内写真 (例)				
床材写真				
一日平均乗降者人数 (概数) <sup>9)</sup>	70,000	35,000	70,000	30,000

<sup>9)</sup> 一日平均乗降者人数については、JR 東日本が公表している「各駅の乗車人員 2017 年度」(<https://www.ireast.co.jp/passenger/2017.html>) を基にして算出している。ただし、公表されている数字は「乗車人員」のみであり、降車した人数は含まれていない。そこで、「乗車人員」の 2 倍が「乗降者人数」であると推測して、表 1 の数値 (概数値) を算出した。

- 条件① 乗降者人数がほぼ同等の規模であること
- 条件② トイレの床の変更を含むリニューアルが、ほぼ同様の時期に実施されたこと

ただし、D 駅については、湿式清掃を行うトイレで条件②に当てはまる駅が他になかったことから、同日に調査を行う B 駅の近隣の駅から①に当てはまる駅を選択した。各駅の乗降者人数とトイレの清掃方法や床材の写真等について表 1 に示す。また、各トイレの模式図とおおよその寸法・面積を図 1 に示す。

ここで、調査対象トイレの清掃方式の違いについて簡単に記述する。乾式清掃を行うトイレでは、日中は掃除用シートを装着したフラットモップを用いた床拭き清掃を行い、月に 1 回程度、営業時間外 (深夜) に掃除機で埃を吸い取り、尿汚れがあれば、水を含ませて固く絞ったスポンジで拭取るという方法で清掃を行っている。一方、湿式清掃を行うトイレでは、日中は固く絞ったモップで床を水拭きする清掃を行い、月に 1 回程度、営業時間外に洗剤を含む水を床全体に撒き、ブラシや回転ブラシでこすり、最後は側溝から下水管に排水するという方法で清掃を行っている。

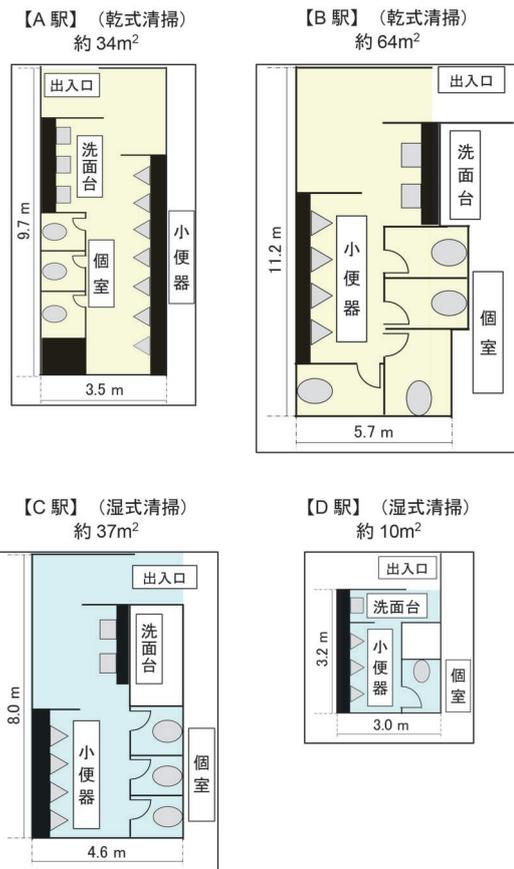


図 1 調査対象トイレの概略図

## 2.2 モニターの属性と調査の行程

今回の調査は、2018 年から 2019 年にかけて計 3 回実施した。そのうち 2018 年に実施した第 1 回の調査を「予備調査」とし、その結果を踏まえて質問を追加した上で、2019 年に第 2、3 回の調査を「本調査」として実施した。各回の調査日と調査対象駅を表 2 に示す。また、男子トイレを調査対象としたことから、参加者はすべて男性である。各回の人数と年代別内訳を表 3 (a) に、ふだんの駅の利用頻度を尋ねた結果を表 3 (b) に、ふだんの駅トイレの利用頻度を尋ねた結果を表 3 (c) にそれぞれ示す。

参加者の人数については、駅業務と一般の利用者の通行、トイレの利用を支障しない範囲で調査を行う必要があったことから、調査対象駅を管轄する鉄道事業者と協議の上で決定した。年代については、駅利用頻度が高く、調査当日 (平日) の昼間に参加可能な 20 歳代から 50

表 2 調査日および調査対象駅

調査日	調査対象駅
第 1 回 (予備調査) 2018 年 10 月 2 日	A, C
第 2 回 (本調査) 2019 年 7 月 23 日	A, C
第 3 回 (本調査) 2019 年 7 月 30 日	B, D

表3 参加者の属性  
(a) 年代

年代	回答人数 (人)			計
	第1回 (予備調査)	第2回 (本調査)	第3回 (本調査)	
20歳代	7	2	2	11
30歳代	7	5	7	19
40歳代	8	3	2	13
50歳代	3	2	2	7
計	25	12	13	50

(b) ふだんの駅の利用頻度

駅利用頻度	回答人数 (人)			
	第1回	第2回	第3回	計
ほぼ毎日	16	5	6	27
週に数回	9	7	7	23

(c) ふだんの駅トイレの利用頻度

駅トイレ利用頻度	回答人数 (人)			
	第1回	第2回	第3回	計
利用する	20	7	8	35
たまに利用する	4	5	5	14
全く利用しない	1	0	0	1

歳代までとした。10歳代には高校生が含まれ、通学等により参加できないことが考えられたこと、60歳代以上については、駅の利用頻度が低いのではないかと予想されたこと、夏場を実施した調査(本調査)もあり、熱中症を発症する危険が高まることなどを考慮し、今回の参加者からは外すこととした。調査当日は、調査実施者が、1回あたり2箇所の駅トイレ(表2)に参加者を引率し、後述する評価項目への回答を行うよう教示した。

## 2.3 調査内容

全3回のモニター調査において、最初に男子トイレに入って内部の設備を確認した後に、各設備の清掃状況の印象(以降、「清掃状況評価」と表記する)を回答するよう参加者に教示した。具体的には、各調査対象設備の清掃状況評価を、設備ごとに設定した評価項目に基づいて、4件法で回答するように教示した。表4に調査対象設備と設備ごとの評価項目を、表5に回答の選択肢を示す。ここで、表4の評価項目のうち、●で示すものは、予備調査と本調査の双方で設定し、◇で示すものは、予備調査の結果を踏まえて本調査で追加設定した項目である。なお、●の項目は、先行研究<sup>11) 12)</sup>とこれらの駅トイレの清掃を担当している会社が実施している清掃作業

表4 清掃状況評価の調査対象設備と評価項目  
(●: 予備調査, 本調査共通)  
(◇: 本調査で追加)

調査対象設備	評価項目
小便器	●器具周囲に汚れはないか ●器具内部(内面)や目皿にごみや汚れの堆積はないか ◇「水滴・水濡れ」はあるか ◇「尿汚れ」はあるか
床 (小便器まわり)	●小便器下に汚れはないか ●拭きムラ・拭き残しはないか ●ガムの固着や隅に埃・汚れはないか ◇「水滴・水濡れ」はあるか ◇「尿汚れ」はあるか
床 (小便器まわり以外)	●足跡が目立たないか ●汚れ・土砂が目立たないか ●ガムの固着や隅に埃・汚れはないか ◇「水滴・水濡れ」はあるか ◇「尿汚れ」はあるか
グレーチング	●ゴミが詰まっていないか ●水たまりがないか ◇「水滴・水濡れ」はあるか ◇「尿汚れ」はあるか
ライニング	●ライニングにゴミが放置されていないか ●隅に埃・汚れはないか ◇「水滴・水濡れ」はあるか
壁面	●小便器まわりの壁面の汚れはないか ●落書きはないか ◇「水滴・水濡れ」はあるか ◇「尿汚れ」はあるか
幅木	●埃が目立たないか ●傷が目立たないか ●汚水やワックスの付着がないか ◇「水滴・水濡れ」はあるか ◇「尿汚れ」はあるか
個室扉(外側面)	●扉周辺に埃はないか ●扉下部に汚れはないか ●落書きはないか ◇「水滴・水濡れ」はあるか ◇「尿汚れ」はあるか
換気口	●埃が目立たないか ●傷が目立たないか ◇「水滴・水濡れ」はあるか
鏡	●上部に拭きムラはないか ●下部に水滴汚れはないか ●埃の付着はないか ◇「水滴・水濡れ」はあるか
洗面台	●洗面台に水垢汚れ等がなく清潔か ●化粧台(荷物台)にゴミ等はないか ●蛇口が汚れておらず、光沢があるか ◇「水滴・水濡れ」はあるか
エントランス	●ピクトグラム(トイレマーク等)は汚れていないか ●入口付近にゴミの落下はないか ●入口付近の明るさは十分か ◇「水滴・水濡れ」はあるか
トイレ全体	●清掃に関する全体の印象

表5 清掃状況評価(表4)に対する回答の選択肢

選択肢	内容
1	全体的に悪い
2	清掃すれば許容範囲
3	許容範囲
4	全体的に良い

の品質評価項目<sup>13)</sup>(以降、「これまでの清掃品質評価項目」と記載する)を参考に設定した。また、調査対象設備のうち、床については、小便器まわりとそれ以外の箇所で評価結果が分かれる可能性があると考え、「床(小便器まわり)」と「床(小便器まわり以外)」に分けた。さらに、先行研究とこれまでの清掃品質評価項目には含まれ

表6 「汚れ等の気になる点」に関する回答欄  
(予備調査のみ)

(箇所名) の	(何) が	( )
【例】		
(小便器) の	(黒ずみ) が	(残っていた)

ていない「グレーチング (排水溝まわり)」「ライニング (小便器奥の棚)」「エントランス (出入口)」については、利用者の目につきやすく、利用したトイレの印象に影響を与える可能性があると考え、調査対象設備として新規に追加した。

なお、予備調査 (第1回) に限り、●の項目以外で、トイレの清掃品質を評価する際の視点となる項目を探索し、本調査で表4の評価項目に追加すべき内容がないか確認することを目的に、各調査対象設備とトイレ空間の空気に対し、「汚れ等の気になる点」を自由に記述してもらうこととした。回答の形式は、表6に示すような定型自由記述形式とした。得られた回答については、以下の手順で整理した。

- ① 表4中の●の評価項目と同内容の回答を除外。
- ② ①の結果、回答が残った設備を、駅ごとに抽出。
- ③ 「気になった汚れ」の原因 (水、トイレットペーパー等、臭気も含む) 別に、各回答を分類。
- ④ 分類の結果、言及数が1件のみの内容と、清掃では除去が不可能な内容の回答を除外。

この手順により、2名以上の参加者から得られた回答の内容と言及数 (a件とする)、同じ調査対象設備に関して得られた総言及数 (b件とする)、bに対するaの割合を表7にまとめる。なお、回答の数を「人数」ではなく「言及数」と記載したのは、同一の駅の同一の設備に対して、回答を2件記入した参加者がいたことから、bの値が回答者人数と一致しないケースが確認されたためである。

両駅とも、トイレ空間の空気が「し尿臭い」との回答が挙がっており、A駅では全回答数の50%、C駅では73%を占めた。さらに、C駅で空間空気に対する残りの回答内容は、いずれも臭気に関するものであった。また、A駅の床 (小便器まわり以外) や洗面台では、「水濡れ」や「壁や床への水はね」を指摘する回答割合がそれぞれ25%と50%、C駅のエントランスでは、「床や壁の汚れ」を指摘する回答割合が80%という結果となった。

表4中の●の評価項目を確認すると、「床」と「壁」については、汚れに関する評価項目が含まれているが、「水濡れ」については、「床 (小便器まわり)」「グレーチング」「鏡」以外の設備の評価項目には含まれておらず、「し尿」に関する評価項目は、どの設備にも含まれてい

表7 表4中の●の評価項目以外の「気になる点」

駅	調査対象設備	回答内容	言及数 (a)	同じ設備に関して得られた総言及数 (b)	a/b	
A	床 (小便器まわり以外)	●水濡れ	3	12	25%	
		●トイレットペーパー屑	4		33%	
	壁面	●テープの跡	3	8	38%	
	洗面台	● (壁や床へ) 水はね	3	6	50%	
C	空間空気	●し尿臭い	2	4	50%	
	エントランス	●床や壁の汚れ	4	5	80%	
		●し尿臭い	11		15	73%
		●においがきつい	2			13%
	空間空気	●においが気になる	2	2	13%	

(言及数が1件のみであった点は除外)

ない。なお、A駅で指摘されていた、床 (小便器まわり以外) のトイレットペーパー屑や壁のテープ跡については、いずれも駅トイレで通常見かけるものではなく (個室内で時折トイレットペーパーの屑が落ちていることがあるが、それ以外の床に落ちていることは稀である)、時々見かけるペットボトルや空き缶同様、見つけ次第除去することも容易である。これらのことから筆者らは、表4に示した調査対象設備に対し、「水滴・水濡れ」と「尿汚れ」についても利用者の意識を把握する必要があると判断し、前述の通りこれら2つの評価項目を本調査で追加設定した。

トイレ内のおいの評価については、においの強さ (臭気強度)、においが気になるか、においの快・不快度、においの満足度、においの許容度の5つの評価項目への回答を行うよう教示した (全3回共通)。各評価項目に対する回答の選択肢を表8に示す。

さらに、駅トイレ全体として清潔だったか (以降、「清潔さ」と表記する)、この駅トイレを再度利用したいか (以降、「再度の利用」と表記する) の2点について尋ねた (全3回共通)。それぞれの質問に対する回答の選択肢を表9、10に示す。

### 3. 調査結果と考察

#### 3.1 清掃方法の違いによる、各評価結果の有意差の確認

清掃方式の違い (乾式・湿式) による、モニター調査結果の違いについて、ノンパラメトリック検定を用いて検討を行った。具体的には、乾式清掃を実施している駅トイレ (A, B 駅) と湿式清掃を実施している駅トイレ (C, D 駅) 別に、全3回分の調査結果を取りまとめ、Mann-Whitney のU検定を行い、調査結果に有意差があるかどうかを調べた。その結果を表11に示す。表11 (a) は、表4に示した調査対象設備と評価項目に対する結果、表11 (b) は、においに関する5つの評価項目 (表

表 8 においに関する評価項目への回答の選択肢  
(全 3 回共通)

(a) においの強さ		(b) においが気になるか	
臭気強度	内容	選択肢	内容
0	感知できない(無臭)	1	気になる
1	やっと感知できるにおい	2	気にならない
2	何のにおいであるかがわかる弱いにおい		
3	楽に感知できるにおい		
4	強いにおい		
5	強烈なにおい		

(c) においの快・不快度		(d) においの満足度	
快・不快度	内容	選択肢	内容
-4	極端に不快	1	不満
-3	非常に不快	2	やや不満
-2	不快	3	どちらでもない
-1	やや不快	4	やや満足
0	快でも不快でもない	5	満足
1	やや快		
2	快		
3	非常に快		
4	極端に快		

(e) においの許容度	
選択肢	内容
1	受け入れられる
2	受け入れられない

表 9 「清潔さ」に対する回答の選択肢  
(全 3 回共通)

選択肢	内容
1	清潔だった
2	どちらかというときと清潔だった
3	どちらでもなかった
4	どちらかというときと不潔だった
5	不潔だった

表 10 「再度の利用」に対する回答の選択肢  
(全 3 回共通)

選択肢	内容
1	利用したい
2	どちらかというときと利用したい
3	どちらでもなかった
4	どちらかというときと利用したくない
5	利用したくない

8) と「清潔さ」(表 9), 「再度の利用」(表 10) に対する結果について示したものである。

有意確率が 0.05 を下回ったのは, 表 11 (b) に示すにおいに関する 5 つの評価項目(強さ, 気になるか, 快・不快度, 満足度, 許容度)のみであった。これら 5 つの評価結果について示したグラフ(図 2)と照合すると, 乾式清掃を実施する A, B 駅の方が, 湿式清掃を実施す

表 11 Mann-Whitney の U 検定の結果得られた有意確率(清掃方式の違い)

(a) 表 4 に示す調査対象設備の清掃状況評価

調査対象設備	有意確率		
	評価項目: 表 4 中●	評価項目: 表 4 中◇	
		「水滴・水濡れ」 はあるか	「尿汚れ」 はあるか
小便器	0.866	0.708	0.456
床(小便器まわり)	0.440	0.162	0.470
床(小便器まわり以外)	0.924	0.454	0.900
グレーチング	0.247	0.099	0.307
ライニング	0.504	0.792	-
壁面	0.536	0.475	0.488
幅木	0.408	0.054	0.688
個室扉(外側面)	0.533	0.601	0.885
換気口	0.799	0.895	-
鏡	0.722	0.570	-
洗面台	0.145	0.103	-
エントランス	0.887	0.455	-
トイレ全体	0.441	-	-

(b) におい, 「清潔さ」, 「再度の利用」

評価項目	有意確率
においの強さ(臭気強度)	0.037
においが気になるか	0.008
においの快・不快度	0.048
においの満足度	0.011
においの許容度	0.028
「清潔さ」	0.473
「再度の利用」	0.437

る C, D 駅に比べ, 5 つ全ての評価結果が有意に良好であることがわかる。

### 3.2 「再度の利用」に影響を与える指標

先行研究<sup>3)</sup>では, 被験者によるトイレの総合評価項目の一つに「またこのトイレに來たいか」という項目が挙げられていた。このことから, 本研究においても, 利用者による評価結果を分析する際, 「再度の利用」に対する回答に影響を与える指標を考慮することとした。そこで, 「再度の利用」(表 10) の評価結果に対する, 調査対象設備の清掃状況評価(表 4, 5), におい関連(表 8), および「清潔さ」(表 9) の評価結果との相関分析を行った。相関係数は, 表 5, 8~10 に示す選択肢の内容がいずれも順序データであることから, Kendall の順位相関係数とした<sup>14)</sup>。その結果について, 全 3 回共通評価項目(表 4, 5, 8, 9, ただし, 表 4 中◇の評価項目を除く), 本調査で追加した評価項目(表 4 中◇の評価項目)別に表 12 に示す。また, 相関係数の絶対値が 0.4 を上回った箇所には, 他に比べて絶対値が大きい(「再度の利用」との相関が強い)ことを示すために網掛けを施した。

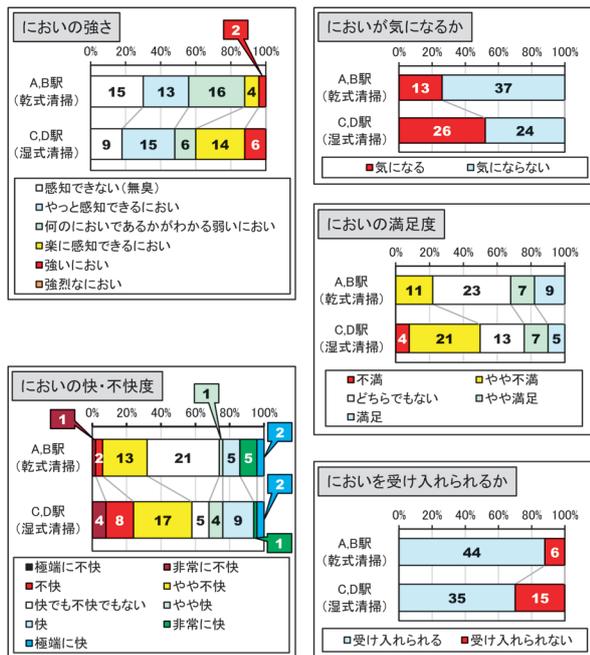


図2 清掃方式による、においに関する評価結果の比較

表12(a)から、相関係数の絶対値が0.4を上回ったのは、予備調査では「においの強さ」「においが気になるか」「においの快・不快度」「においの満足度」というにおいに関する4つの評価項目、およびトイレ全体としての「清潔さ」であり、本調査では予備調査と同じ5つの評価項目に加え、「小便器」「ライニング」「トイレ全体」の清掃状況評価であることがわかった。「小便器」と「ライニング」については、予備調査での相関係数の絶対値が0.3を上回り、他の調査対象設備に比べて大きい数値であった。さらに、いずれの箇所も、小用中に視界に入りやすい箇所でもある。これらのことから、小便器とライニングの清掃状況、およびにおいに関する上記4つの項目に対して、利用者から高く評価されるように改善することで、「再度の利用」を促すことができると考えられた。

一方、表12(b)から、相関係数の絶対値が0.4を上回ったのは、「ライニング」「壁面」「幅木」「個室扉」「換気口」に対する評価項目「水滴・水濡れはあるか」、および「小便器」「グレーチング」「幅木」「個室扉」に対する評価項目「尿汚れはあるか」であることがわかった。これらは、表12(a)に示すにおいの評価項目や「清潔さ」と同様、先行研究<sup>11) 12)</sup>とこれまでの清掃品質評価項目には含まれておらず、駅トイレの清掃品質に対して、利用者から高く評価され、「再度の利用」を促す上で必要な項目であると言える。

また、本調査の結果に対しては、ステップワイズ法による重回帰分析を行い、「再度の利用」に対する影響度も確認した。目的変数は「再度の利用」、説明変数は「再

表12 「再度の利用」との相関 (a) 全3回共通

参照表	評価対象 (設備・におい等)	(予備調査)		(本調査)	
		Kendallの 順位相関係数	度数	Kendallの 順位相関係数	度数
表4	小便器	-0.308*	49	-0.457**	50
	床(小便器まわり)	-0.110	49	-0.360**	50
	床(小便器まわり以外)	-0.141	48	-0.263*	50
	グレーチング	-0.104	49	-0.340**	50
	ライニング	-0.336**	49	-0.418**	50
	壁面	-0.109	49	-0.248	50
	幅木	-0.169	49	-0.275*	50
	個室扉	-0.146	49	-0.385**	50
	換気口	-0.063	49	-0.242*	50
	鏡	-0.104	49	-0.265*	50
	洗面台	-0.041	49	-0.280*	50
	エントランス	-0.182	49	-0.200	50
	トイレ全体	-0.278*	49	-0.533**	50
表8	においの強さ	0.543**	49	0.455**	50
	においが気になるか	-0.508**	49	-0.448**	50
	においの快・不快度	-0.546**	49	-0.479**	50
	においの満足度	-0.614**	49	-0.552**	50
表9	清潔さ	0.388**	49	0.258	50

\*\* 相関係数は1%水準で有意(両側)。

\* 相関係数は5%水準で有意(両側)。

(b) 本調査で追加した評価項目

評価対象 (設備・におい等)	評価項目	Kendallの 順位相関係数	度数
小便器	「水滴・水濡れ」はあるか	-0.314	50
	「尿汚れ」はあるか	-0.435**	50
床(小便器まわり)	「水滴・水濡れ」はあるか	-0.279	50
	「尿汚れ」はあるか	-0.251	50
床(小便器まわり以外)	「水滴・水濡れ」はあるか	-0.219	50
	「尿汚れ」はあるか	-0.316	50
グレーチング	「水滴・水濡れ」はあるか	-0.375**	46
	「尿汚れ」はあるか	-0.412**	46
ライニング	「水滴・水濡れ」はあるか	-0.460**	50
	「水滴・水濡れ」はあるか	-0.417**	50
壁面	「水滴・水濡れ」はあるか	-0.252	50
	「尿汚れ」はあるか	-0.252	50
幅木	「水滴・水濡れ」はあるか	-0.445**	50
	「尿汚れ」はあるか	-0.573**	49
個室扉	「水滴・水濡れ」はあるか	-0.431**	50
	「尿汚れ」はあるか	-0.446**	50
換気口	「水滴・水濡れ」はあるか	-0.470**	50
	「水滴・水濡れ」はあるか	-0.194	50
洗面台	「水滴・水濡れ」はあるか	-0.193	50
	「水滴・水濡れ」はあるか	-0.186	50

\*\* 相関係数は1%水準で有意(両側)。

\* 相関係数は5%水準で有意(両側)。

度の利用」を除く評価項目のうち、相関分析の結果(表12)、相関係数が5%水準で有意ではないことがわかったもの、および清掃状況評価のうちの「トイレ全体」(表4)、「清潔さ」(表9)を除いた全ての評価項目とした。「トイレ全体」と「清潔さ」については、当該の駅トイレを全体として評価したものであり、具体的な箇所を示す指標ではないことから、説明変数から除外した。なお、これらの変数は順序データであるが、ここでは量的データとして取り扱った。その結果、目的変数である「再度

表 13 線形重回帰分析の結果（本調査）  
（目的変数：「再度の利用」）

説明変数	標準化偏回帰係数 ( $\beta$ )	有意確率	VIF
にの満足度	-0.443	< 0.001	1.278
幅木の尿汚れ	-0.415	0.001	1.278

決定係数： 0.540  
自由度調整済み決定係数： 0.519

の利用」に対する影響度が高い説明変数として、「にの満足度」「幅木の尿汚れ」の2つが抽出された。各説明変数の標準化偏回帰係数（以降、「 $\beta$ 」と表記）、有意確率、VIF（Variance Inflation Factors、分散拡大係数）と決定係数、自由度調整済み決定係数を表 13 に示す。

$\beta$  を比較すると、「再度の利用」に与える影響については、「にの満足度」（-0.443）が、「幅木の尿汚れ」（-0.415）よりも大きいと推察された。また、VIF の値がいずれの説明変数についても十分小さいため、説明変数間の多重共線性は認められなかった<sup>15)</sup>。さらに、決定係数が 0.540、自由度調整済み決定係数が 0.519 であり、得られた重回帰式の当てはまりも比較的よいことから、これら 2 つの説明変数が、「再度の利用」を評価するのに適切な変数であると考えられる<sup>16)</sup>。

先述の相関分析の結果（表 12）から、本調査における「にの満足度」と「幅木の尿汚れ」は、Kendall の相関係数がそれぞれ、-0.552、-0.573 と最も「再度の利用」との相関が強い 2 つの評価項目であることがわかる。このことから、データの取り扱い方が順序データと量的データと異なり、単純な比較はできないが、ステップワイズ法によって抽出された「にの満足度」「幅木の尿汚れ」は、利用者の「再度の利用」を促す効果が最も高い指標であることが示唆された。

3.1 節にて、乾式清掃を実施する駅トイレの方が、湿式清掃を実施する駅トイレに比べ、にの満足度に関する 5 つの評価結果が有意に良好であることを示したが、本節にて、「再度の利用」との相関関係が強い評価項目の中に、にの満足度に関する 4 つの評価項目が含まれていることが示されたことと併せて考えると、乾式清掃の導入が、「にの満足度」を改善し、当該の駅トイレを「再度利用したい」と考える利用者の割合を増加させる方策の一つであると考えられる。

#### 4. まとめ

鉄道利用者視点での駅トイレの清掃品質について、利用者の満足度や再利用意向といった意識に影響を及ぼす要因を抽出することを目的として、清掃方式の異なる（乾式・湿式）駅男子トイレを対象に、利用者モニター調査を実施した。その結果を以下に示す。

- 清掃方式の違い（乾式・湿式）による、本調査で行った各評価結果の有意差について、Mann-Whitney の U 検定を用いて検討した。その結果、にの満足度に関する 5 つの評価項目（強さ、気になるか、快・不快度、満足度、許容度）において、乾式清掃トイレの方が湿式清掃トイレに比べて、評価結果が有意に良好であったことが明らかになった。
- 乾式清掃を実施している 2 箇所の駅トイレと湿式清掃を実施している 2 箇所の駅トイレを対象に、全 3 回のモニター調査を行った。このうち第 1 回の調査を「予備調査」、第 2、3 回の調査を「本調査」として実施した。調査の結果については、「再度の利用」と強い相関のある評価項目を相関分析により抽出し、本調査についてはステップワイズ法による重回帰分析でも確認した。その結果、「にの満足度」「幅木の尿汚れ」の 2 つの評価項目が最も「再度の利用」との相関が強いことが確認された。従って、これらの評価項目を反映するような内容を清掃品質評価項目に追加し、これらに対して利用者から高く評価されるような清掃を行うことで、当該の駅トイレを「再度利用したい」と考える利用者の割合を増加させることが可能であることがわかった。
- 「再度の利用」を評価するのに適切な説明変数の一つとして「にの満足度」が抽出され、にの満足度に関する利用者の評価結果について、乾式清掃トイレの方が湿式清掃トイレより有意に良好であった。これらのことから、乾式清掃の導入が、「にの満足度」を改善し、それにより当該の駅トイレを「再度利用したい」と考える利用者の割合を増加させる方策の一つであることが示唆された。

本研究で対象とした駅トイレに対する利用者評価によって、新たな知見は得られたが、今後より一般的な結論を得るためには、さらなる駅トイレを対象に調査を行い、データを蓄積する必要がある。その上で、清掃品質評価の項目の精査・最適化により、利用者が「再度利用したい」と考える快適な駅トイレを提供できるような維持管理の手法に展開することを目指していく。

本稿は、日本建築学会環境系論文集（第 88 巻、第 807 号、pp.421-428、2023.5）<sup>17)</sup> の再掲で、一部に加筆・修正を施した。

#### 文献

- 川崎たまみ、京谷隆、潮木知良、藤浪浩平、早川敏雄：駅構内の空気質に与える微生物の影響評価、鉄道総研報告、

- Vol.22, No.5, pp.35-40, 2008
- 2) 鈴木浩明, 藤浪浩平, 齋藤綾乃, 川崎たまみ, 伊積康彦, 飯野直志: 衛生・清潔に関する利用者意識の実態と要望の分析, 鉄道総研報告, Vol.19, No.1, pp.15-20, 2005
  - 3) 小崎美希, 古賀誉章, 平手小太郎: トイレの環境と印象評価に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.13-14, 2015
  - 4) 高橋晃久, 安井基浩, 池田佳樹, 青山浩之, 山口陽二: 駅男子トイレの臭気抑制に関する調査研究: その1, 諸元把握と印象評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.671-672, 2018
  - 5) 青山浩之, 安井基浩, 高橋晃久, 山口陽二, 池田佳樹: 駅男子トイレの臭気抑制に関する調査研究: その2, トイレ諸元における印象評価結果及び評価項目間の相関分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.673-674, 2018
  - 6) 川崎たまみ, 京谷隆, 潮木知良, 早川敏雄, 亀田暁子, 坂本圭司: 駅トイレの臭気対策に関する研究 (その2) — 駅トイレ床における細菌量とアンモニア濃度の関係 —, 室内環境学会学術大会, pp.60-61, 2012
  - 7) 池田佳樹ほか9名: 駅トイレの清掃方法乾式化に資する基礎研究: その1, 研究概要と清掃方法についての実験室実験による検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.591-592, 2015
  - 8) 池辺健志ほか9名: 駅トイレの清掃方法乾式化に資する基礎研究: その2, フィールド試験による臭気と生菌数評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.593-594, 2015
  - 9) 川崎たまみ, 京谷隆, 潮木知良, 吉江幸子: 清掃方式の違いによる駅トイレ床面の細菌の定量・定性評価, 鉄道総研報告, Vol.35, No.2, pp.35-40, 2021
  - 10) Kawasaki, T., Yoshie, S., Kyotani, T. and Ushioji, T.: Comparison of Microbiomes on Floors of Men's Restrooms, before and after Cleaning with Different Cleaning Methods at Two Railway Stations, Japan Architectural Review, Vol. 5, No.4, pp.633-643, 2022.  
(DOI: <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12285>)
  - 11) 正田浩三, 垣鍔直: 建築物の室内清掃の品質評価指標確立についての検討, 日本建築学会技術報告集, Vol.23, No.54, pp.607-611, 2017  
(DOI: <https://doi.org/10.3130/aijt.23.607>)
  - 12) 杉田洋, 佐藤隆良, 村川三郎, 平賀慎, 大石洋之: 某庁舎における清掃発注仕様の品質評価に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, Vol.71, No.600, pp.153-159, 2006  
(DOI: [https://doi.org/10.3130/aija.71.153\\_1](https://doi.org/10.3130/aija.71.153_1))
  - 13) 公益社団法人東京ビルメンテナンス協会・建築物衛生管理委員会編: 建築物清掃品質評価と仕様書 インспекション入門, 第3版, 2017
  - 14) 石村友二郎, 加藤千恵子, 劉晨: SPSS でやさしく学ぶアンケート処理 (第5版), 東京図書, 2020
  - 15) 石村貞夫, 石村光資郎: 入門はじめての多変量解析, 東京図書, 2007
  - 16) 石村貞夫, 石村光資郎: SPSS による多変量データ解析の手順 (第5版), 東京図書, 2016
  - 17) 京谷隆, 池田佳樹, 大石洋之, 川崎たまみ: 利用者評価の向上を目指した駅男子トイレの清掃状況に対する利用者意識調査, 日本建築学会環境系論文集, Vol.88, No.807, pp.421-428, 2023  
(DOI: <https://doi.org/10.3130/aije.88.421>)

# 熊本市における表層地盤震動の時空間変動評価

津野 靖士\* 是永 将宏\* 小林 怜央\*\* 山中 浩明\*\*

Evaluation of Spatial and Temporal Variation of Site Effects on Superficial Subsurface Structure

Seiji TSUNO Masahiro KORENAGA Reo KOBAYASHI Hiroaki YAMANAKA

We investigated the spatial and temporal variation of site amplification characteristics based on observation data from high-sampling continuous borehole seismic observations and geophysical surveys, as well as using wave propagation theory, to improve the accuracy of earthquake ground motion evaluation. Furthermore, in the vicinity of the observation site at the foot of Mt. Mannichi, where bedrock is exposed, we extracted the relationship between the spatial variation in the epicenter azimuth of site amplification and the irregularly shaped underground structure.

キーワード：表層地盤，地震波速度，地震動増幅，時空間変動，地下水位，不整形，熊本

## 1. はじめに

2016年熊本地震発生直後より熊本平野における地震動特性を評価することを目的として、臨時地震観測が実施されている<sup>1)~4)</sup>。そのうち、熊本駅近傍のボアホール連続地震観測<sup>3) 4)</sup>は1000Hzの高サンプリングでデータ収録を行った特徴を有し、表層地盤の地震波速度や地震動増幅の時空間変動を理解するために非常に効果的な観測点である。本研究では、表層地盤の地盤震動特性の推定精度向上を目的に、高サンプリングのボアホール地震観測・物理探査による実測データおよび波動伝播理論から、地震動増幅の時空間変動特性を明らかにすることを試みた。さらに、熊本駅近傍の観測点周辺は岩盤が露出した万日山の裾野に位置しており、地震動増幅の空間変動と不整形地盤との関係性を抽出することを試みた。

## 2. 観測

地表と地中において連続地震観測データが収録されている熊本駅近傍の臨時地震観測点を対象として、地盤震動特性の時空間変動やその不整形地盤との関係性を検討した。臨時地震観測点 KM04 の位置を図 1 に、周辺の地表地質図を図 2 に示す<sup>5)</sup>。観測点 KM04 は、熊本平野北西端部に位置し、図 2 より第四紀完新世の沖積層堆積物の分布域内にあることがわかる。西側には新生代第四紀更新世の金峰山火山の活動により形成された万日山があり、その火成岩が基盤層を成すものと推測される。ボーリング調査<sup>3)</sup>や微動アレイ調査<sup>6)</sup>の既存結果から、表層地盤の厚さは約 30m と推定されている。図 3 に、

観測点 KM04 に設置された地震計の外観を示す。また、その地点における土質柱状図や N 値、PS 検層結果を図 4 に示す。図中の Vs 700m/s を超える熔結凝灰岩をここでは基盤とする。地表および地中に設置された地震計は、日本航空電子工業社製のデジタル出力サーボ加速度計 (JA-40GA-02) である。センサーの最大計測範囲は ±2G (G: 重力加速度)、感度は 0.510 ± 5%V/(m/s<sup>2</sup>) である。データは地震計本体でデジタル化されており、サンプリング周波数は 1000Hz である。AD 分解能は 32bit である。データは地上部の観測筐体内に設置したコントローラ (白山工業社製: LF-1100R) とデータ収録装置を通じて外付け SSD に送信し、連続的に収録を行った。電源として商用 AC 100V を利用し、停電対策の UPS を介して電源供給を行った。地中地震計設置用のボアホールの掘削深は 43m であり、地表から深さ 42m の位置に地震計を設置した。また、地中地震計のボアホール孔口から約 1.7m 離れた地点に地表地震計を設置した。観測の実施期間は 2017 年 8 月 24 日から 2019 年 2 月 21 日の約 18 か月間である。この間に、主に九州周辺で発生した Mj 3.0 以上の 53 地震のデータが記録された。図 5 に、記録された地震の震央地図を示す。

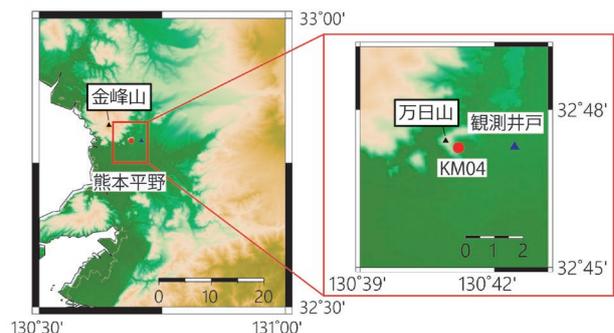


図 1 観測点 KM04 と観測井戸の位置

\* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

\*\* 東京工業大学

### 3. 地震波速度の時間変動特性

#### 3.1 重錘落下を利用したP波速度の時間変動

表層地盤速度の時間変動を検討するため、重錘落下測定と地震観測データから地震波速度を検出し、一般的に



	形成時代	岩石
新第三紀	第四紀 後期完新世	盛り土・埋立地・干拓地
	第四紀 完新世	谷底平野・山間盆地・河川・海岸平野堆積物
	第四紀 後期更新世	デイサイト・流紋岩 溶岩・火砕岩
	第四紀 後期更新世中期～後期更新世後期	段丘堆積物
	第四紀 後期更新世前期	デイサイト・流紋岩 大規模火砕流
	第四紀 後期更新世前期	安山岩・玄武岩質安山岩 大規模火砕流
	第四紀 後期更新世前期	段丘堆積物
	第四紀 後期チバニアン期	非海成層
	第四紀 チバニアン期	安山岩・玄武岩質安山岩 大規模火砕流
	第四紀 チバニアン期	安山岩・玄武岩質安山岩 溶岩・火砕岩
第四紀	更新世 カラブリアン期	玄武岩 溶岩・火砕岩
	新第三紀 中新世 メッシアン期～鮮新世	アルカリ玄武岩・粗面玄武岩 溶岩・火砕岩
	後期白亜紀 セノマニアン期～サントニアン期	汽水成層ないし海成・非海成混合層 礫岩
	後期白亜紀 セノマニアン期～サントニアン期	汽水成層ないし海成・非海成混合層 砂岩
	後期白亜紀 セノマニアン期～サントニアン期	非海成層 泥岩
	後期デボン紀～ペルム紀 シスワラリアン世	珪鉄質片岩 高P/T型広域変成岩 ざくろ石帯
	後期デボン紀～ペルム紀 シスワラリアン世	泥岩片岩 高P/T型広域変成岩 ざくろ石帯
	オルドビス紀～シルル紀	超珪鉄質岩類 黒矽・大陸

熊本平野：沖積低地・阿蘇外輪山の洪積台地  
 熊本平野北部：阿蘇山由来の大規模火砕流堆積物  
 熊本平野北西部：金峰山火山の火山岩類、火砕流堆積物

図2 熊本平野周辺の地表地質図（20万分の1日本シームレス地質図<sup>5)</sup>から抜粋・一部加筆

表層地盤速度を把握するために利用されているPS検層結果と比較した。重錘落下測定は2018年7月30日～2019年2月25日までの約7ヶ月間、ほぼ一定の時刻（朝8時頃）に実施され、合計120回の記録が観測された。測定は、重さ15kgの重錘を1.3mのガイドの高さ（図3右）から自由落下させるものである。図6に、重錘落下測定による地表および地中での上下方向の振動に対する加速度波形を示す。重錘落下測定は上下加振であり、主にP波速度が卓越している。図6(a)は加振してから0.4秒の記録を抜き出した加速度波形である。矢印の位置は初動箇所を示している。黒丸の後続位相は、P波の重複反射波の到来を示し、重複反射波の位相が反転していることがわかる。ここでの重複反射波は、地表と深さ30mの工学的基盤面（図4）を往復している。また、地中で3度目に観測された重複反射波は減衰によって幾つかのピークが確認できなくなっている。図6(b)は、さらに最初の0.11秒を拡大した波形である。



図3 観測点 KM04 の外観（左）と重錘落下装置（右）

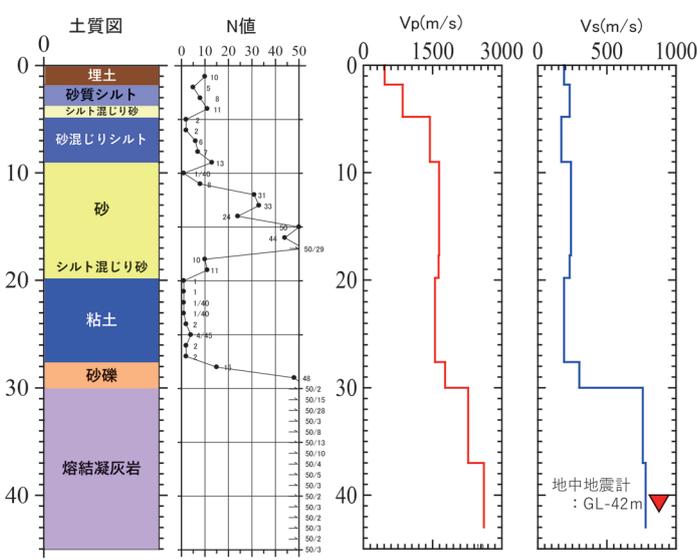


図4 土質柱状図とN値、PS検層結果<sup>3)</sup>

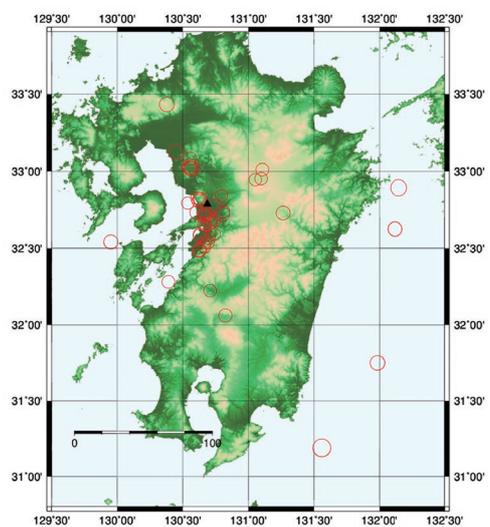


図5 使用した地震の震央位置（図中、○印）

矢印で示した波形の立ち上がりから、重錘落下時のP波の走時差は0.037sであるとわかる。

PS 検層の結果<sup>3)</sup> から求められる地表と地中地震計間におけるP波の平均速度は1482m/sである。図7は重錘落下測定により求められた地表と地中地震計間のP波速度の変動を示している。地表から地中地震計への直達P波の速度は、主に1150m/sから1200m/sの間で推移しており、PS 検層で得られた平均速度1482m/sより2割程度遅くなった。重複反射波同士の時間差から求めた地表と工学的基盤面の間を伝播するP波速度の平均速度においても、PS 検層の結果から求めた速度の理論値より3割程度低下していた。図8は、観測点KM04からやや離れた箇所に設置されている図1で示した観測井戸（アメダス）で観測された地下水位である。地下水位は、2018年9月から10月の間に地表面からやや深くなり、その後は徐々に浅くなっている。地下水位がやや深くなった2018年9月から10月の間においてP波速度に大きな変化はない。10月以降は地下水位が徐々に浅くなるのに対し、P波速度は11月を境にやや遅く

なっている。飽和状態におけるP波速度は乾燥状態より速くなる<sup>7)</sup>が、地下水位が高くなるのに対し、P波速度は遅くなっていた。P波速度が遅くなった理由としては地下水位が浅いシルトなどの不飽和帯の含水比が低下した可能性も考えられるが、今後同様のデータを蓄積するまたは給水実験等により確かめる必要がある。

### 3.2 地震動を利用したP波およびS波速度の時間変動

収録された地震データ（図5）からP波とS波の速度変動について検討する。図9は地震データから求められた地表と地中地震計間までのS波とP波初動の速度を示している。地震波のP波速度は主に750m/sから2000m/sの間で推移し、重錘落下測定で得た結果より速度が大きく、理論値に近いことが確認できる。S波については、PS 検層から求められるS波の平均速度は267m/sであり、P波速度に比べてより理論値に近い値であった。重錘落下データによるP波速度と地震動データによるP波・S波速度の乖離は、P波より波長が短いS波の方が地震動データによる速度にばらつきが見られており、地震動の斜め入射など地震データが空間変動の影響を受けていることが一因であると考えられる。

### 4. 地震動増幅の空間変動

連続地震観測点（KM04）の地中と地表で観測された42個の地震データを利用して、震央方位に対するS波の地表/地中スペクトル比を算出した。図10に、北からの時計回りで算出した震央方位55~85°, 95~125°, 170~200°, 270~300°, 310~340°に対するS波のスペクトル比を示す。なお、NS成分とEW成分のスペクトル比を相加平均したスペクトル比を最終的なスペクトル比とした。図10では、20Hz以上の周波数帯におけるS波のスペクトル比は、他の周波数帯におけるS波のスペクトル比と比較して、ばらつきが大きいことがわかる。図11に、震央方位に対するS波スペクトル比の周波数毎の平均値を示す。この図から、全震央方位において周波数帯20~50Hzのスペクトル比が他の周波数帯のスペ

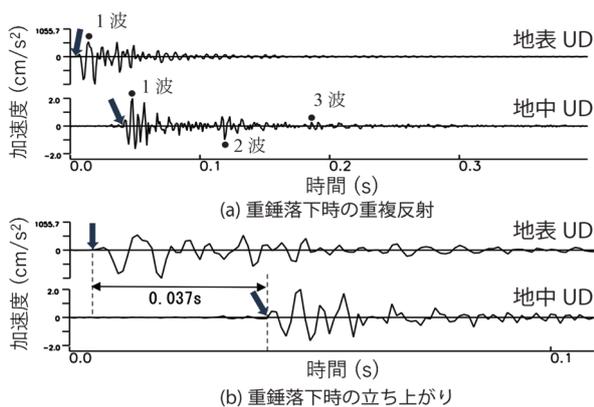


図6 重錘落下試験による上下動成分の加速度波形

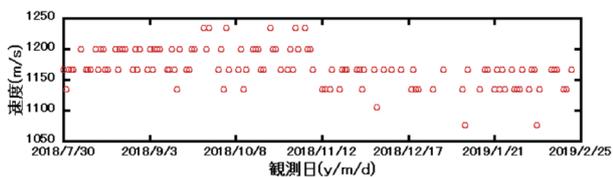


図7 重錘落下試験によるP波速度の時間変動

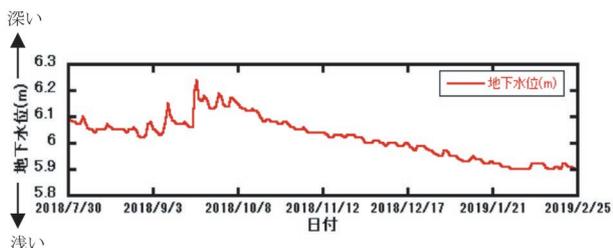


図8 観測点付近（図1の観測井戸）の地下水位

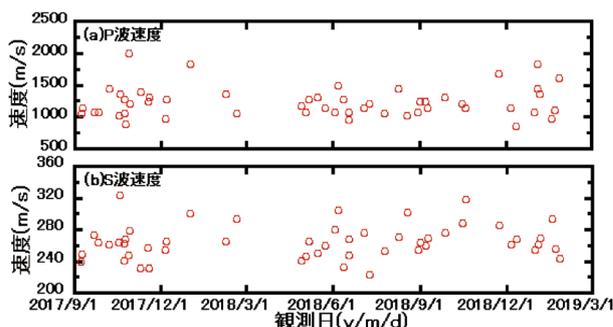


図9 地震波P波速度とS波速度の時間変動

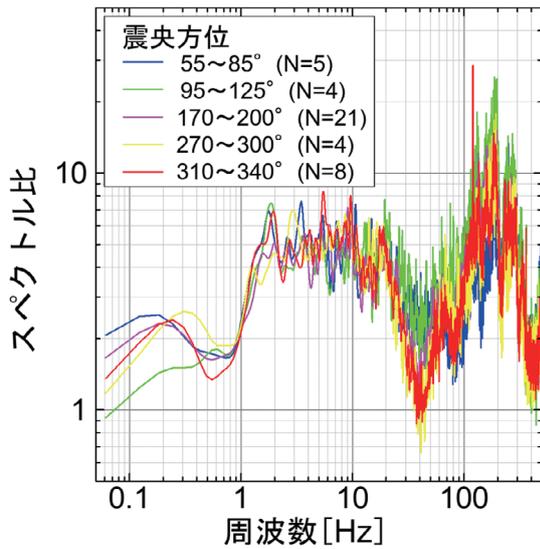


図 10 地震観測点 KM04 の震央方位に対する地表 / 地中 S 波スペクトル比

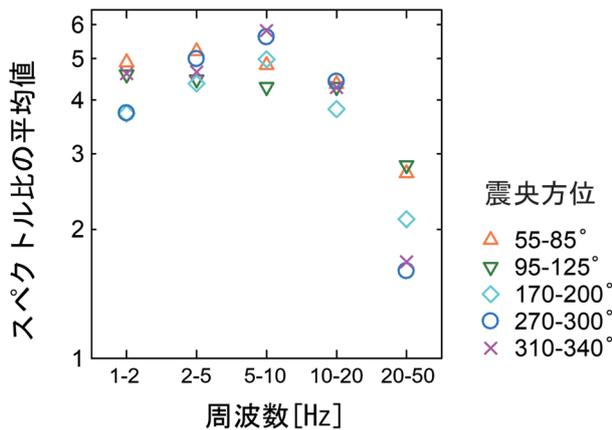


図 11 地震観測点 KM04 の震央方位に対する地表 / 地中 S 波スペクトル比の周波数毎の平均値

クトル比と大きく異なることが明瞭に示されていることがわかる。周波数帯 20~50Hz に対して、南 (170°) ~ 北西 (340°) から入射する地震動は、それ以外の地震動と比較して増幅率が小さいことがわかる。このことは、熊本駅近傍の観測点 KM04 において地震動 S 波を正確に予測するためには、観測点に対する地震動の震央方位を適切に考慮する必要があることを示している。

## 5. 物理探査から推定した S 波速度構造

### 5.1 S 波速度構造

微動アレー探査 (図 12) により得られた上下動成分の観測データに SPAC 法を適用し、レイリーの波位相速度を推定した<sup>6)</sup>。また、表面波探査データには F-K 解析 (MLM 法) を適用して表層のレイリー波位相速度を算

出した。求められた基本モードのレイリー波位相速度を図 13 に示す。山地部 (万日山の A06, A08, A11 および花岡山の A13) では 10Hz 以下の低周波数で位相速度が 500m/s 以上、万日山・花岡山と平地の境界部に位置する A05 では、A06 等と同様に 10Hz 以下の周波数帯域で位相速度が 600m/s 以上となっており、浅部まで高速度層が分布していることが推察できる。一方で、A05 を除く観測点は、A10, A17 では 7~9Hz 以上、それ以外の観測点では 4~5Hz 以上の高周波域で 200m/s 程度の遅い位相速度を示している。さらに平地部の観測点では、4Hz 以上の周波数帯域で境界部の観測点と同様に位相速度が 200m/s 以下となっていることがわかる。

基本モードのレイリー波位相速度に遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた逆解析を適用し、表層地盤の S 波速度構造の推定を行った (図 14)。初期構造として、境界部および平地部の観測点については、KM04 でのボーリングデータ<sup>3)</sup> をもとにした 3 層構造のモデルを仮定して逆解析を実施した。山地部において基盤の深度は浅く、表層近くに分布している。また境界部のうち A05 では山地部の A06 とほぼ同一の構造となっており、表層地形の変化が認められるものの万日山南東端の尾根部に位置していると考えられる。さらに万日山南側境界部の A10, A17 においては周囲の平地部観測点と比較して基盤深度がやや浅く、山地部から基盤面が傾斜して深度が変化している地点に位置しているものと考えられる。

一方、上記以外の境界部と平地部の観測点では、第 1 層が深度約 10m まで、基盤層が深度 30m の付近に位置するほぼ同一の構造が推定された。このことから、万日山・花岡山の東側、南東側においては、山地部から境界部にかけては浅部の S 波速度構造が急変するような構造形体であることが示唆される。なお、境界部および平地部での速度構造は図 4 の KM04 における PS 検層による S 波速度構造の結果とほぼ一致しており、本手法により S 波速度構造が精度よく推定されていることがわかる。

### 5.2 地震動増幅の空間変動と不整形地盤との関係性

求められた微動の H/V スペクトルのピーク周波数を図 12 に示す。ただし、ピーク振幅の値が 2.5 以下の場合には明瞭なピークが見られないものとした。万日山・花岡山山地部および山地部に極めて近い境界部ではピークが明瞭ではない、もしくはやや高周波側の 2~3Hz に緩やかなピークが見られている。一方、平地部および山地部からやや離れた境界部の地点では 1~2Hz 付近にピークがあり、明瞭な違いが見られる。H/V スペクトルからも山地部から平地部にかけて S 波速度構造に急激な変化があることが示唆される結果となった。

図 15 に、熊本駅近傍観測点 KM04 に対して半径

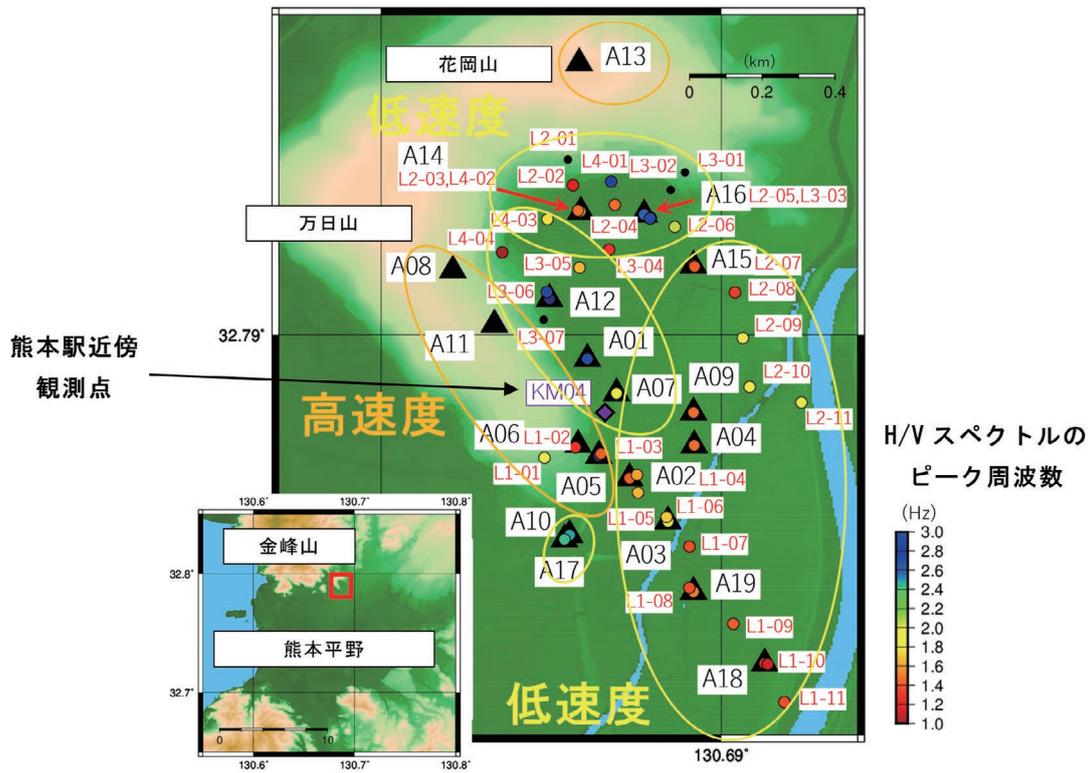


図 12 観測点の位置 (▲: 微動アレー探査の位置, ○: H/V スペクトルの算出位置とピーク周波数)

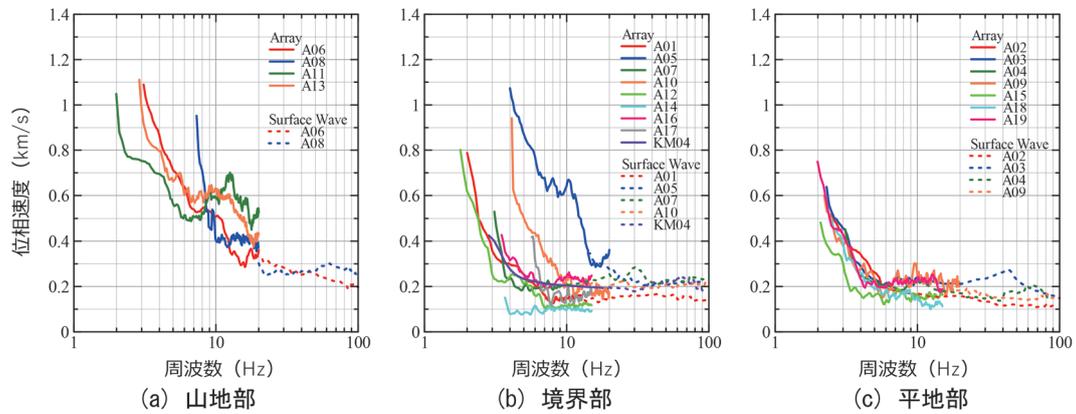


図 13 微動アレー・表面波探査によるレイリー波位相速度<sup>6)</sup>

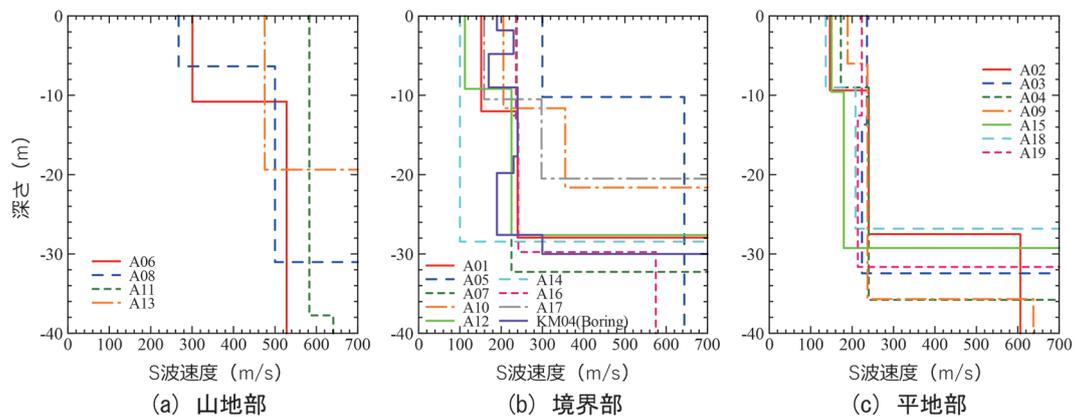


図 14 逆解析により求めた S 波速度構造<sup>6)</sup>

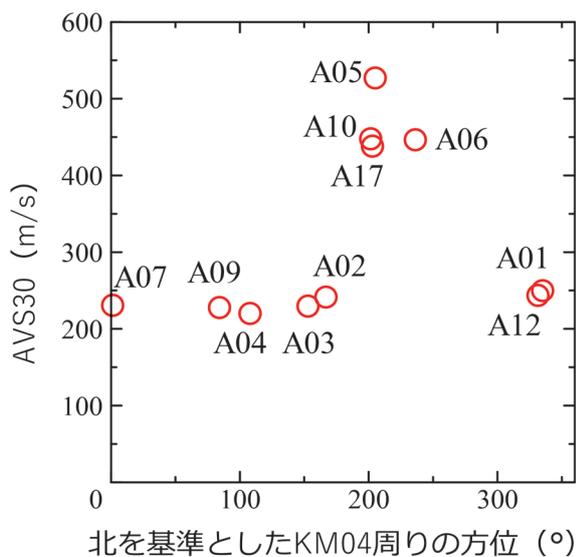


図 15 地震観測点 KM04 回りの方位に対する AVS30 (半径 400m)

400m 以内に位置する探査地点の AVS30 (深さ 30m の平均  $V_s$  値) を示す。KM04 の方位  $200^{\circ}\sim 250^{\circ}$  に位置する A05, A10, A17, A06 地点 (図 12) の AVS30 は、他の地点に比べて 400m/s 以上の AVS30 を示していることがわかる。KM04 の方位  $250^{\circ}\sim 330^{\circ}$  において半径 400m 以内に位置する地点がないため KM04 に対して西～北側に対する AVS30 の変化が分からないものの、図 11 に示されたように地震動の増幅率の変化が大きかった地震の到来方向 (南 ( $170^{\circ}$ )～北西 ( $340^{\circ}$ )) と調和する。本研究の地震データ分析結果と物理探査結果を通じて、熊本駅近傍観測点 KM04 においては、周波数帯  $20\sim 50\text{Hz}$  の地震動 S 波が入射する方向に対する変化率と KM04 回りの表層地盤の AVS30 の変化率が対応する傾向にあることを示した。

## 6. まとめ

表層地盤の地盤震動特性の推定精度向上を目的に、高サンプリングのボアホール地震観測・物理探査による実測データおよび波動伝播理論から、地震動増幅の時空間変動特性について検討した。

熊本駅近傍観測点の高サンプリングの重錘落下測定データから求めた P 波速度は  $1075\sim 1250\text{m/s}$  であり、約 1 割程度の時間変化を確認した。また、地震データから求めた P 波速度は  $750\sim 2000\text{m/s}$  であることを確認し

た。これらの P 波速度の相違を受け、地震動 S 波の地表/地中スペクトル比を用いて震央方向に対する地震動増幅と物理探査から推定した不整形地盤との関係性を検討した。その結果、震央方向が異なる地震動 S 波が表層の不整形地盤に入射することにより周波数帯  $20\sim 50\text{Hz}$  に対して地震動 S 波の増幅が異なることを示した。

本研究の一部は、JSPS 科研費基盤研究 (C) (一般) (20K05039) を受けて実施した。

## 謝 辞

本研究における重錘落下測定の実施にあたり、九州旅客鉄道株式会社の関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

## 文 献

- 1) Tsuno, S., Korenaga, M., Okamoto, K., Yamanaka, H., Chimoto, K., and Matsushima, T., "Local site effects in Kumamoto City revealed by the 2016 Kumamoto earthquake," *Earth, Planets and Space*, 69:37, 10.1186/s40623-017-0622-6, 2017.
- 2) 津野靖士, 是永将宏, 山中浩明, 地元孝輔, 岡本京祐, 山田伸之, 三宅弘恵, 松島健: 熊本平野で展開した臨時地震観測とその地震動特性, 日本建築学会, 第 45 回地盤震動シンポジウム, pp.24-33, 2017
- 3) 是永将宏, 津野靖士: 熊本市万日山近傍でのボアホール地震観測および PS 検層, 日本地震工学会梗概集, B-5-4, 2020
- 4) 小林怜央, 山中浩明, 津野靖士, 是永将宏: 熊本平野北部の鉛直アレイ記録を用いた表層地盤における弾性波速度の時間変動, 日本建築学会, 学術講演梗概集, pp.349-350, 2021
- 5) 産総研地質調査総合センター: 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2, <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (参照日: 2023 年 12 月 8 日)
- 6) 是永将宏, 津野靖士, 山中浩明, 小林怜央: 熊本市万日山近傍での高密度微動探査, 日本建築学会, 学術講演梗概集, pp.333-334, 2021
- 7) Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., and Gardner, L.W., "Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media," *Geophysics*, 21, pp.41-70, 1956.

# 加齢による運転士の作業の負担感の増加と関連する機能

中村 竜\* 佐藤 文紀\* 増田 貴之\*  
北村 康宏\* 藤道 宗人\* 斎藤 綾乃\*\*

## Increased Perception of Workload and Related Cognitive Functions in Drivers with Aging

Ryo NAKAMURA Ayanori SATO Takayuki MASUDA  
Yasuhiro KITAMURA Munendo FUJIMICHI Ayano SAITO

With aging, the physical and cognitive functions generally tend to decline. However, taking appropriate measures, it is possible for elderly train drivers to continue their duties safely and confidently. Therefore, the first step was to obtain fundamental data for examining measures needed to enable senior drivers to continue train driving. Based on a survey result on the perceived burden of train driver's tasks, we identified the tasks that become more burdensome with aging. Furthermore, it was revealed that the increase in burden of these tasks is associated with age-related declines in visual function, attention, decision-making skill and reaction time.

キーワード：高齢化, 乗務員不足, 運転士, 加齢, 注意機能, 視覚機能

### 1. はじめに

日本において、少子高齢化による労働力不足は今後さらに進むとみられており、鉄道事業者にとっても働き手の確保は重要な課題である。その解決策の1つとして考えられているのがシニア社員の活用である。一般に加齢に伴い体力や機能等は変化するが、適切な対策を施せば、安全に安心して業務を継続できる可能性がある。鉄道事業者の業務のうち運転作業に着目した場合、加齢が影響を及ぼす運転士の作業時の負担感やその作業に関連する機能を特定した上で、運用面の工夫やハードによるバックアップ、教育、訓練等により運転士を支援する対策が考えられる。しかし、これまで加齢による体力や機能の変化が運転士の作業にどのように影響するかについて網羅的な調査は行われていなかった。また、加齢により、さまざまな機能が変化するが、すべての変化が運転士の作業に影響を及ぼすとも限らない。

そこで本研究では、加齢に伴い負担感が増加する運転士の作業の特定と、負担感の増加に関連する加齢による機能変化について網羅的な調査を行った。

なお、本研究で検討する運転作業の範囲は、異常時対応を除く通常時の運転士の作業とした。また、シニア運転士および、これに対比する若手運転士は以下のように定義した。

シニア運転士：「55歳以上」の運転士

若手運転士：「運転経験3年以上」<sup>注1</sup>かつ「39歳以

下」<sup>注2</sup>の運転士

注1 新人運転士を対象とした研修が免許取得後3年目で終了し、技術的に一人前であるとみなされているため経験3年以上であれば十分な技術を備えていると判断

注2 加齢の影響の出始める40歳以上を除外

### 2. 加齢に伴い負担感が増加する運転士の作業の特定

加齢によって負担感が増加する運転士の作業を特定するために2つの調査を行った。

#### 2.1 調査

最初に、運転士の作業の負担感調査を実施し、シニア運転士と若手運転士に各作業の負担感の評価を求めた。次に、シニア運転士が若手運転士よりも負担感を統計的に高く評価した作業について、具体的な「大変さ」についてヒアリング調査を実施した。

##### 2.1.1 運転士の作業の負担感調査

2社の鉄道事業者（A社、B社）の計4職場の運転士を対象に、A社は2021年6月、B社は2020年11月に実施した。調査対象者の概要を表1に示す。

表1 負担感調査対象者

事業者	シニア運転士	若手運転士
A社	37名 (平均61.5歳, SD=1.32)	56名 (平均31.4歳, SD=2.93)
B社	35名 (平均61.7歳, SD=1.50)	35名 (平均32.5歳, SD=2.82)

\* 人間科学研究部 安全心理研究室

\*\* 人間科学研究部 人間工学研究室

調査では、評価対象となる作業を提示し、各作業について、どのくらい大変と思うかについて、5段階（1：全く大変ではない～5：非常に大変）の評価を求めた。

評価対象の作業は、運転士の作業内容が整理された先行研究<sup>1)</sup>を参考にして選定したが、内容の網羅性や表現の適切さについては、鉄道事業者（運転士を主管する部署の担当者12名）の確認を受けた。評価対象の作業は運転士が行う通常作業（出勤点呼、出区点検、入区点検、乗務交代、構内運転、信号の確認、時刻表・計器類の確認、速度制御、進路の確認、退勤点呼、踏切支障時の対応、天候不良時の取扱い、到着・発車の取扱い（ワンマン）、その他の作業場面における作業）で、A社では84作業、B社では83作業であった。

各作業に対する負担感の評価について、シニア運転士と若手運転士の平均値の差についてt検定を行った。その結果、A社では84個の作業のうち27個について、B社では、83個の作業のうち34個についてシニア運転士が若手運転士よりも統計的に有意（有意水準5%）に負担感を高く評価した。

### 2.1.2 具体的な大変さに関する調査

負担感調査において、シニア運転士が若手運転士よりも負担感を高く感じている作業の全てが加齢の影響を受けた負担増とは限らない。そこで、シニア運転士の負担感が統計的に有意に高いことが確認された作業（A社27個、B社34個）について、具体的にどのように大変かに関するヒアリング調査を実施し、加齢の影響によって負担感が増加している可能性のある作業を特定した。

調査はA社（2021年10月）、B社（2021年7月）の計3職場の運転士を対象として実施した。調査では、各作業がどのように大変かについて具体的な回答を求め、被調査者の回答に応じて、質問を追加する半構造化面接を行った。調査では、対象者を1～3名の組に分けて実施した。各組の調査所要時間は50～60分であった。ヒアリングの対象者の概要を表2に示す。

## 2.2 調査結果

調査結果を図1に示す。赤字は、運転士の作業の負担感調査と具体的な大変さに関する調査結果から加齢によって負担感が増加すると判定された作業を示す。なお、ヒアリング調査におけるシニア運転士の回答には、長い運転経験の中で環境やルール、手順の変更等によって負

表2 具体的な大変さに関する調査対象者

事業者	シニア運転士	若手運転士
A社	5名 (平均60.2歳, SD = 0.45)	5名 (平均29.8歳, SD = 2.22)
B社	4名 (平均61.5歳, SD = 1.29)	6名 (平均30.7歳, SD = 1.63)

担が増加したというものが複数あった。これらは、加齢の影響により負担感が増加したものではないと考えられる。また、シニア運転士が若手運転士よりも負担感を統計的に有意に高く評価したものの、両者ともに評価値が低い作業も含まれていた。そこで、負担感評価の平均値が3.0以下で、ヒアリング調査で全員が「大変ではない」と回答した作業は加齢による負担感増はないものとして整理した。一方、負担感評価での評価値が3.0以下であっても、ヒアリングでシニア運転士の多くから「加齢とともに負担が増加した」と回答があった作業は、加齢の影響を受けていることが否定できないため、加齢によって負担感が増加するものとして整理した。

## 3. 負担感の増加に関連する機能評価

シニア運転士の作業の負担感の増加に関連する加齢による機能変化の影響を推定するために、エキスパート評価を実施した。

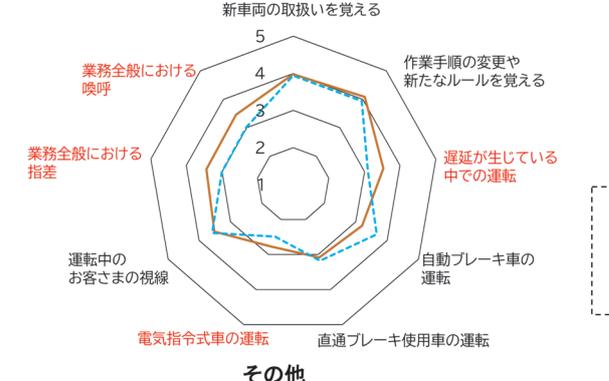
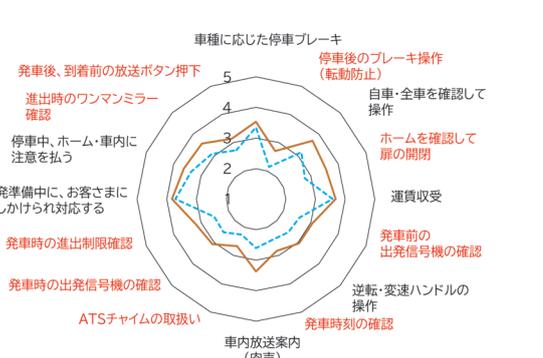
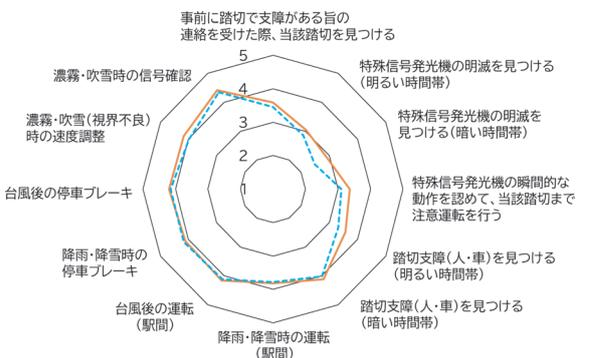
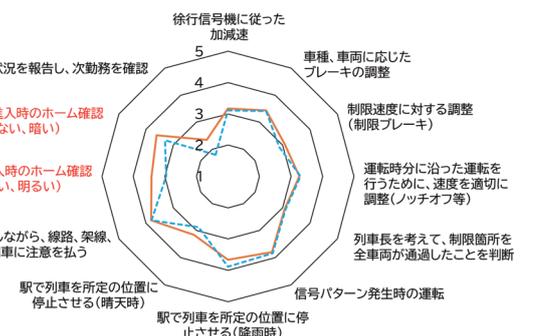
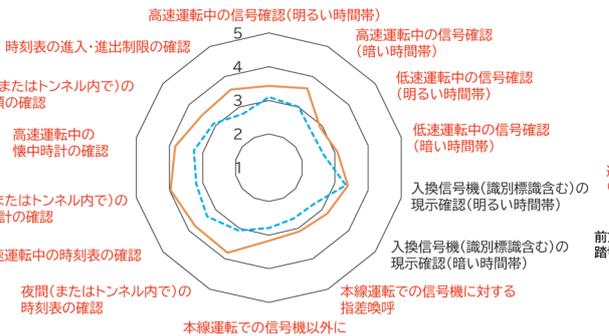
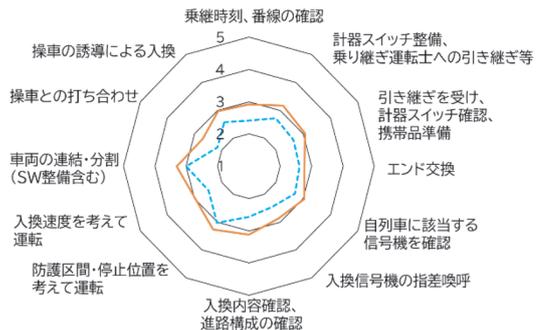
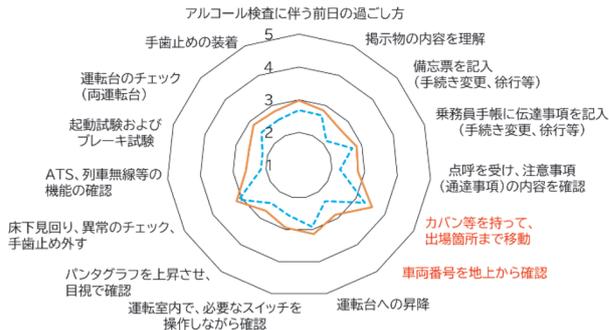
### 3.1 評価項目

具体的な大変さに関するヒアリング調査において、負担感調査で評価項目とした作業の中には、加齢による負担増に影響する機能のエキスパート評価の評価項目として適切ではないものがあることが明らかになった。このような項目については改めて評価項目を設定した。例えば、負担感調査では、「夜間（またはトンネル内で）の懐中時計の確認」および「高速運転中の時刻表の確認」を評価項目としたが、具体的な大変さに関するヒアリング調査では、夜間や高速に限らず、時刻表、懐中時計、計器類の確認は負担が高いことが明らかとなった。そのため、エキスパート評価では、「時刻表の確認」「懐中時計の確認」「計器類の確認」の3つの作業項目を評価項目として設定することとした。最終的に設定したエキスパート評価用の評価項目を表3に示す。

### 3.2 エキスパート評価

調査は、A社B社とも2022年11月と2023年2月に行った。運転作業について十分な知識のある、本社および運転現場社員の計22名（A社：10名、平均37.5歳、SD=5.42、B社：12名、平均42.8歳、SD=4.75）を対象に実施した。加齢に伴って負担感の増加する各作業（表3）に必要な機能に関するエキスパート評価を実施した。

評価対象とする機能（表4）は、加齢の影響に関する先行研究<sup>2)~24)</sup>、運転士を指導する管理者の意見、具体的な大変さに関する調査で得られたシニア運転士の回答、自動車の高齢者講習の検査内容<sup>25) 26)</sup>をもとに、次の基準で選定した。



※1:全く大変ではない～5:非常に大変である  
 ※赤字は、運転士の作業の負担感調査と具体的な大変さに関する調査結果から加齢によって負担感が増加すると判定された作業を表す

図 1 加齢に伴い負担感が増加する運転士の作業

表3 エキスパート評価での評価項目

No.	作業場面	評価項目
1	出区点検	カバン等を持って、出場箇所まで移動
2		車両番号を地上から確認
3	信号の確認	信号確認一般
4		高速運転中の信号確認
5		暗い時間帯の信号確認
6		本線運転での信号機に対する指差喚呼
7		本線運転での信号機以外に対する指差喚呼
8	時刻表・計器類の確認	時刻表の確認
9		懐中時計の確認
10		計器類の確認
11		時刻表の進入・進出制限の確認
12	進路の確認	通過駅に進入する際の、信号機・ホームの状況を確認
13	到着・発車の取扱い(ワンマン)	停車後のブレーキ操作(起動防止)【気動車】
14		ホームを確認して扉の開閉
15		発車前の出発信号機の確認
16		発車時刻の確認
17		ATSチャイムの取扱い(鳴動音・消す動作)
18		発車時の出発信号機の確認
19		発車時の進出制限確認
20		進出時のワンマンミラー確認
21		発車後、到着前の放送ボタン押下
22		その他
23	遅延が生じている中での運転	
24	タブレットの導入(新しいデバイスの導入等)	
25	業務全般における指差	
26	業務全般における喚呼	

- ・ 運転作業に関連する機能
- ・ 加齢の影響を受ける機能
- ・ 鉄道事業者において、対応を取り得るもの

評価者は、あらかじめ評価対象とする機能に関する説明を受けた。調査では、各作業(表3)に各機能(表4)がどの程度関係するかについて、5段階(1:関係しない、2:わずかに関係する、3:少し関係する、4:かなり関係する、5:非常に関係する)での評価を求めた。

### 3.3 評価結果

エキスパート評価結果を表5に示す。表中の黄色のセルは評価の平均値が3.5以上、赤のセルは4.0以上を示している。この結果から、加齢によって負担感が増加する作業には、視覚、判断力、注意、反応時間に該当する機能が特に関係していることが明らかとなった。

視覚は特に「信号の確認」、「時刻表・計器類の確認」の作業場面に該当する作業と、「通過駅に進入する際の、信号機・ホームの確認」、「進出時のワンマンミラー確認」、「高速運転」に関連が高い。これらの作業は目を使った確認作業であり、加齢に伴う視覚機能の低下<sup>2) ~5) 11) 12) 17) 18) 21)</sup>の影響を受けやすいと考えられる。

判断力は、特に「高速運転中の信号確認」、「暗い時間帯の信号確認」、「通過駅に進入する際の、信号機・ホームの状況を確認」、「発車時の出発信号機の確認」、「進出時のワンマンミラー確認」、「高速運転」、「遅延が生じている中での運転」に関連が高い。具体的な大変さに関す

表4 負担感の増加に関連する機能評価で対象とする機能

機能	説明	
視覚	動体視力	動いているものを見る視力
	夜間視力	暗い中で物を見る視力
	調節	対象物にピントを合わせる能力
	色の弁別	色を見分ける
	視野	顔や目を動かさずに見える範囲
	眩光下視力	逆光の中で物を見る、とても明るいものを見る視力
	暗順応	明るいところから急に暗いところに入った時に見えるようになるまでの時間
聴覚	リクルートメント現象	小さな音は聞こえにくい一方で、大きな音はうるさく聞こえる現象
	音の弁別	複数の音や雑音がある中で、必要な音を聞き分ける能力
判断力		状況に応じて適切な判断をする
記憶	ワーキングメモリ	作業や動作に必要な情報を一時的に記憶・処理する能力
	知識	運転に関する知識(訓練、経験等によって得られたもの)
	学習能力	新しい事を覚える能力
注意	注意配分	複数の対象に同時に注意を振り分ける
	注意の切替	連続して次々に注意を移動させる能力
	抑制	集中すべきものがある時に、無関係なものに注意が向くのを抑える
反応時間	物事に気づいてから反応するまでの時間	
機敏性	連続した動作を素早く行う	

るヒアリング調査では、これらの作業で判断を誤ると大きな事故につながることから特に気を付けており負担感が高いという回答が多く得られた。特に高速運転時には、判断の遅れの影響がさらに大きくなることから、加齢とともに判断力の低下を自覚しているシニア運転士の多くが負担を感じているものと考えられる。

注意は、特に「信号の確認」の作業場面に該当する作業、「通過駅に進入する際の、信号機・ホームの状況を確認」、「ホームを確認して扉の開閉」、「発車時の出発信号機の確認」、「進出時のワンマンミラー確認」、「高速運転」、「遅延が生じている中での運転」、「業務全般における指差」に関連が高い。注意は、加齢の影響を強く受けるものの1つであり<sup>2) 6) 7) 22) 24)</sup>、加齢とともに複数の対象に注意を同時に向けることや次々に異なる対象に注意を移動する能力が低下する。これらの作業は、複数の対象を同時に確認したり、確認作業が高頻度で連続したりする作業であり、加齢の影響を強く受けるものと考えられる。

反応時間は、特に「信号の確認」の作業場面に該当する作業、「通過駅に進入する際の、信号機・ホームの状況を確認」、「進出時のワンマンミラー確認」、「高速運転」に関連が高い。反応時間は加齢に伴って長くなる<sup>13) 15) 23)</sup>。特に高速運転時は異常を認めた際に素早く反応することは重要である。また、信号の確認やホームの確認時に異常を認めた場合にも素早い反応が求められる。そのため、加齢に伴う反応時間の遅れを自覚しているシニア運転士は高速運転に対する負担感が高いものと考えられる。

表5 関連する機能に関するエキスパート評価結果

機能	機能の下位分類	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11	
		作業場面	出区点検				信号の確認								時刻表・計器類の確認								
		カバン等を持って出場箇所まで移動		車両番号を地上から確認		信号確認一般		高速運転中の信号確認		暗い時間帯の信号確認		本線運転での信号機に対する指差喚呼		本線運転での信号機以外に対する指差喚呼		時刻表の確認		懐中時計の確認		計器類の確認		時刻表の進入・進出制限の確認	
	評価結果	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
視覚	動体視力	1.68	0.95	1.55	0.86	4.14	1.25	4.82	0.50	4.55	0.86	3.82	1.44	3.36	1.47	2.55	1.37	2.86	1.42	2.91	1.11	2.77	1.34
	夜間視力	1.91	1.19	2.36	1.36	3.23	1.63	3.50	1.71	4.68	0.72	3.00	1.63	2.77	1.48	3.55	1.22	3.59	1.30	3.41	1.22	3.55	1.34
	調節	1.55	0.86	2.64	1.22	4.27	1.16	4.55	0.74	4.32	1.17	3.73	1.24	3.59	1.33	4.27	0.98	4.23	0.97	3.77	1.11	4.05	1.29
	色の弁別	1.50	0.80	2.05	1.05	4.09	1.19	4.41	0.85	3.91	1.34	3.73	1.32	2.86	1.39	3.05	1.09	2.05	1.13	3.23	1.19	2.36	1.09
	視野	2.55	1.18	2.36	1.29	3.91	0.97	4.50	0.67	4.14	1.17	3.73	1.24	3.45	1.10	3.55	1.10	3.00	1.07	3.45	1.01	3.05	1.05
	眩光下視力	1.68	1.04	2.23	1.31	3.82	1.40	4.18	1.18	2.95	1.46	3.59	1.33	3.27	1.20	3.18	1.18	3.09	1.27	2.95	1.05	3.09	1.27
	順応	1.55	0.86	1.82	1.14	3.86	1.21	3.91	1.19	3.50	1.44	3.32	1.29	3.14	1.28	3.32	1.29	3.32	1.39	3.05	1.13	3.05	1.21
聴覚	リクルートメント現象	1.73	0.88	1.59	1.05	2.05	1.13	2.00	1.15	1.77	1.02	2.05	1.09	2.27	1.12	1.41	0.73	1.32	0.72	1.95	1.17	1.36	0.66
	音の弁別	1.91	1.15	1.45	0.96	1.95	1.40	1.86	1.36	1.73	1.20	2.05	1.25	2.32	1.25	1.32	0.65	1.23	0.53	1.95	1.24	1.36	0.66
	判断力	1.82	0.80	1.86	1.17	3.73	1.28	4.36	0.85	4.32	1.21	3.95	1.36	3.59	1.26	3.32	1.25	2.91	1.34	3.90	0.89	3.36	1.05
記憶	ワーキングメモリ	2.00	1.27	2.32	1.17	3.32	1.17	3.45	1.22	3.23	1.34	3.41	1.37	3.36	1.14	3.45	1.18	2.91	1.23	2.86	1.28	3.10	1.48
	知識	1.55	0.74	1.95	1.29	3.36	1.26	3.32	1.36	3.18	1.40	3.18	1.40	3.36	1.29	2.82	1.30	2.14	1.04	3.32	1.25	2.82	1.37
	学習能力	1.41	0.80	1.95	1.21	2.82	1.50	2.82	1.33	2.64	1.40	2.82	1.40	2.82	1.26	2.36	1.09	1.91	0.97	2.95	1.09	2.36	1.14
注意	注意配分	2.41	1.10	2.05	1.13	3.82	1.14	4.32	1.04	4.09	1.23	3.91	1.02	3.82	1.10	3.45	1.37	3.36	1.29	3.36	0.85	3.68	0.99
	注意の切替	2.05	1.09	1.64	1.05	4.18	0.91	4.50	0.60	4.32	0.95	4.09	0.92	3.77	1.15	3.36	1.26	3.09	1.23	3.36	0.95	3.73	0.98
	抑制	2.09	0.92	1.95	1.13	4.18	1.05	3.91	1.27	3.91	1.34	3.95	1.00	3.77	1.11	3.41	1.33	3.18	1.22	3.27	1.20	3.68	0.89
	反応時間	2.27	1.24	1.55	0.80	4.27	0.94	4.64	0.49	4.36	1.09	4.32	0.78	4.05	1.00	3.09	1.27	3.32	1.32	3.23	1.02	3.23	1.15
	機敏性	2.36	1.26	1.73	1.24	3.50	1.14	4.14	1.13	3.77	1.45	3.91	1.06	3.68	1.17	2.77	1.34	2.95	1.46	2.95	1.21	2.82	1.37

表5 関連する機能に関するエキスパート評価結果 (つづき)

機能	機能の下位分類	12		13		14		15		16		17		18		19		20		21	
		作業場面	進路の確認				到着・発車の取扱い (ワンマン)														
		通過駅に進入する際の、信号機・ホームの状況を確認		停車後のブレーキ操作 (転動防止) 【気動車】		ホームを確認して扉の開閉		発車前の出発信号機の確認		発車時刻の確認		ATSチャイムの取扱い		発車時の出発信号機の確認		発車時の進出制限の確認		進出時のワンマンミラー確認		発車後、到着前の放送ボタン押下	
	評価結果	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
視覚	動体視力	4.59	0.80	1.64	0.79	3.09	1.60	2.00	1.38	1.95	1.46	1.91	1.11	2.95	1.59	2.55	1.47	4.05	1.17	1.82	1.10
	夜間視力	3.64	1.36	1.77	0.97	2.68	1.39	2.41	1.33	2.73	1.39	1.77	1.07	2.95	1.46	2.95	1.40	3.59	1.33	1.77	1.07
	調節	4.14	1.04	1.91	0.87	3.36	1.62	3.68	1.36	3.59	1.50	2.18	1.26	3.77	1.27	3.68	1.32	4.09	1.06	1.86	1.04
	色の弁別	3.64	1.36	1.73	0.98	2.41	1.50	3.59	1.33	2.27	1.49	2.32	1.52	3.68	1.29	1.91	1.06	2.91	1.51	1.77	1.07
	視野	4.36	0.95	2.32	1.21	3.82	1.22	3.27	1.16	2.73	1.45	2.50	1.26	3.59	1.10	2.91	1.11	4.09	1.02	2.18	1.18
	眩光下視力	3.91	1.38	1.73	0.77	3.23	1.38	3.14	1.58	2.82	1.50	2.14	1.21	3.36	1.47	2.95	1.46	3.73	1.42	1.55	0.96
	順応	3.82	1.18	1.77	0.87	2.50	1.41	2.55	1.47	2.32	1.36	1.86	1.13	3.05	1.59	2.86	1.46	3.18	1.50	1.64	1.00
聴覚	リクルートメント現象	2.18	1.10	1.73	0.98	1.95	1.21	1.45	0.91	1.36	0.58	4.14	1.17	1.45	0.67	1.18	0.39	1.64	0.95	1.77	0.92
	音の弁別	2.32	1.25	2.00	1.38	2.09	1.27	1.32	0.57	1.23	0.43	3.73	1.32	1.45	0.80	1.18	0.39	1.73	1.03	2.18	1.33
	判断力	4.27	0.98	3.27	1.20	4.00	1.11	3.55	1.10	2.95	1.25	3.68	1.25	4.09	1.02	3.59	1.01	4.18	0.96	2.55	1.18
記憶	ワーキングメモリ	3.27	1.35	2.64	1.40	3.05	1.33	3.32	1.39	2.91	1.48	3.18	1.47	3.14	1.42	3.18	1.26	3.45	1.50	3.14	1.39
	知識	3.18	1.26	2.73	1.24	3.18	1.37	3.32	1.36	2.41	1.26	3.68	1.32	3.27	1.39	3.27	1.16	3.10	1.30	2.50	1.47
	学習能力	2.50	1.06	1.95	0.95	2.09	1.02	2.41	1.33	1.64	0.85	2.55	1.34	2.50	1.26	2.18	1.08	2.14	1.17	1.73	1.08
注意	注意配分	3.95	1.09	3.14	1.42	4.00	0.76	3.64	1.36	3.18	1.26	3.64	1.36	4.00	1.27	3.86	1.08	4.45	0.74	3.05	1.29
	注意の切替	4.27	0.77	3.05	1.36	4.09	0.75	3.55	1.37	3.32	1.29	3.77	1.31	3.95	1.29	3.95	1.00	4.36	1.00	3.09	1.19
	抑制	4.00	0.93	3.41	1.26	4.27	0.88	3.95	1.25	3.32	1.39	3.86	1.21	4.23	0.92	3.95	1.09	4.45	0.86	2.91	1.27
	反応時間	4.27	0.83	2.77	1.45	3.91	0.97	2.73	1.16	2.32	1.13	3.50	1.34	3.68	1.25	3.14	1.28	4.18	0.91	2.45	1.57
	機敏性	3.77	1.31	2.91	1.31	3.50	1.34	2.50	1.22	2.27	1.20	3.50	1.34	3.14	1.31	2.82	1.26	3.41	1.33	2.45	1.47

表5 関連する機能に関するエキスパート評価結果（つづき）

	No.	22		23		24		25		26	
	作業場面	その他									
機能	機能の 下位分類	高速運転		遅延が 生じている 中での運転		タブレット の導入 (新しいデ バイスの導 入)		業務全般に おける指差		業務全般に おける喚呼	
		平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
視覚	動体視力	4.77	0.43	3.55	1.44	2.36	1.40	3.64	1.18	3.32	1.52
	夜間視力	3.73	1.42	3.00	1.54	2.73	1.55	3.73	1.24	3.05	1.40
	調節	4.45	0.91	3.41	1.59	3.45	1.50	3.73	0.98	3.23	1.41
	色の弁別	4.05	1.36	3.41	1.50	3.18	1.65	3.45	1.14	3.00	1.31
	視野	4.55	0.74	3.55	1.50	3.09	1.15	3.50	1.01	2.90	1.30
	眩光下視力	3.95	1.33	3.18	1.62	2.82	1.47	3.68	0.95	2.82	1.40
	順応	3.82	1.37	3.05	1.59	2.95	1.46	3.45	1.01	2.82	1.44
聴覚	リクルート メント現象	2.59	1.40	2.59	1.53	2.50	1.47	2.64	1.09	2.91	1.15
	音の弁別	2.82	1.47	2.76	1.67	2.90	1.48	2.68	1.13	3.09	1.11
	判断力	4.41	0.80	4.05	1.25	3.36	1.43	3.73	1.24	3.23	1.38
記憶	ワーキング メモリ	3.59	1.26	3.82	1.37	3.68	1.29	3.32	1.13	3.00	1.27
	知識	3.32	1.36	3.50	1.44	4.14	1.13	3.18	1.22	3.18	1.05
	学習能力	2.59	1.44	2.82	1.40	4.68	0.57	3.18	1.30	3.05	1.25
注意	注意配分	4.45	0.80	4.18	1.18	3.09	1.48	3.86	0.89	3.55	1.14
	注意の切替	4.41	0.80	4.09	1.19	2.95	1.46	4.09	0.87	3.64	1.18
	抑制	4.14	0.89	3.95	1.33	2.95	1.40	3.71	1.19	3.45	1.34
	反応時間	4.73	0.55	3.64	1.33	3.00	1.41	3.73	1.03	3.55	1.22
	機敏性	4.32	1.09	3.45	1.50	2.95	1.53	3.55	1.06	3.55	1.30

#### 4. まとめ

運転士を対象とした調査から加齢に伴って負担感が増加する運転士の作業を明らかにした。また、加齢によって負担感が増加する作業には、加齢による視覚、判断力、注意、反応時間の加齢による変化が影響していることを確認した。

加齢によって、様々な機能が低下したとしても、それを自覚して確認を徹底すること等によってエラーを防止できる可能性がある。また、医療分野では高齢者を対象とした認知機能訓練による注意機能等の向上効果が確認されている<sup>27) 28)</sup>。これらは、主に認知症患者を対象としたものであるため、そのまま鉄道運転士に適用することはできないが、これらを参考に鉄道運転士用認知機能訓練を開発することができれば、シニア運転士の負担感を軽減できる可能性がある。また、視覚機能は、訓練での回復は難しいため、運転士の負担を軽減するためのハード対策（運転室の明るさの改善等）が有効であると考えられる。

今後は、本研究で明らかとなった加齢による運転士の作業の負担感の増加と関連する機能をもとに具体的な支援対策の開発を目指す。

#### 文献

- 1) 日本鉄道運転協会：「動力車操縦者の身体要件に係る検討委員会」報告書，2003
- 2) 下仲順子編：現代心理学シリーズ14 老年心理学，培風館，1997
- 3) 石口彰：キーワード心理学シリーズ1，視覚，新曜社，2006
- 4) 佐藤真一，高山緑，増本康平：老いの心 加齢と成熟の発達心理学，有斐閣，2014
- 5) 石垣尚男，宮尾克：新しい動体視力計の開発 動体視力の加齢影響と性差，産業医学，36巻，3号，pp.181-182，1994
- 6) 近藤勉：よくわかる高齢者の心理改訂版，ナカニシヤ出版，2010
- 7) 土田宣明：老年期における認識転換の困難—自己調整機能の観点からの検討—，発達心理学研究，第2巻，第2号，pp.99-105，1991
- 8) Baddeley, A.D：Working memory. New York：Oxford University Press, 1996.
- 9) 大田信夫，多鹿秀継：記憶の生涯発達，北大路書房，2008
- 10) 本多芳男：耳の病気の常識，講談社，pp.39-40，1988
- 11) 市川博：老化と目の機能，臨床眼科，35巻，1号，pp.9-

- 26, 1981
- 12) 宮前あつこ：高齢化社会と視環境, 人間工学, vol.25, No.3, pp.163-167, 1986
  - 13) 衣笠隆, 長崎浩, 伊藤元, 橋詰謙, 古名丈人, 丸山仁司：男性(18~83歳)を対象にした運動能力の加齢変化の研究, 体力科学, 43巻, 5号, pp.343-351, 1994
  - 14) 石井利寛：体力とは何か, 労働の科学, 44巻, 2号, pp.8-11, 1989
  - 15) 永田晟：高齢者の健康・体力科学, 不味堂出版, 1995
  - 16) 中央労働災害防止協会：高齢化への対応—設備と作業環境の構築—, 2000
  - 17) グラシヤン, E：快適職場環境をデザインする, 哲学出版, 1992
  - 18) 一般財団法人人間生活工学研究センター：視覚機能計測結果報告書, 2011
  - 19) 本多芳男：耳の病気の常識, 講談社, 1998
  - 20) Schaie, K.W：The course of adult intellectual development, American Psychologist, 49, pp.304-313, 1994.
  - 21) Park, D.C., Lautenschlager, G., Hedden, T., Davidson, N.S., Smith, A.D., & Smith, P.K.：Models of visuospatial and verbal memory across the adult life span, Psychology and Aging, 17, 2, pp.299-320, 2002.
  - 22) Rogers, W：Attention and aging, Cognitive aging: A primer, New York, Psychology Press, pp.57-73, 2000.
  - 23) 江藤文夫, 原澤道美, 平井俊策：手指巧緻動作における加齢の影響, 日本老年医学雑誌, 20巻, 5号, pp.405-409, 2006
  - 24) Zacks, R, & Hasher, L.：Cognitive gerontology and attentional inhibition：A reply to Bruke and McDowd. Journal of Gerontology：Series B Psychological Science and Social Science, 52 (6), pp.274-283, 1997.
  - 25) 警視庁：認知機能検査について, [https://www.npa.go.jp/policies/application/license\\_renewal/ninchi.html](https://www.npa.go.jp/policies/application/license_renewal/ninchi.html) (参照日：2023年11月9日)
  - 26) 上村直人, 藤戸良子, 樫林哲雄：認知症と自動車運転—改正道路交通法と臨床現場での課題—, 高次脳機能研究(旧失語症研究), 40巻, 3号, pp.310-316, 2020
  - 27) Karlene Ball 1, Daniel B Berch, Karin F Helmers, Jared B Jobe, Mary D Leveck, Michael Marsiske, John N Morris, George W Rebok, David M Smith, Sharon L Tennstedt, Frederick W Unverzagt, Sherry L Willis：Effects of cognitive training intervention with older adults: A randomized control trial, The Journal of American Medical Association, 288, 18, pp.2271-2281, 2002.
  - 28) Rui Nouchi, Yasuyuki Taki, Hikaru Takeuchi, Takayuki Nozawa, Atsushi Sekiguchi, Ryuta Kawashima：Reading Aloud and Solving Simple Arithmetic Calculation Intervention (Learning Therapy) Improves Inhibition, Verbal Episodic Memory, Focus Attention and Processing Speed in Healthy Elderly People: Evidence from a Randomized Controlled Trial. Frontiers in Human, Neuroscience, 2016.



# 通勤列車グリーン車需要の価格弾力性の推定

松本 涼佑\*

Estimation of the Price Elasticity of Demand for Green-Car in Commuting Train

Ryosuke MATSUMOTO

The fare of local train Green-car (higher-class car) seats will affect not only its demand, but also that of regular car of the same train. Therefore, it is important to estimate the impact of the price change on the Green-car demand, especially during weekdays' commuting time when the overcrowding is at a high level. This research focuses on a Green-car's two-stage pricing structure where the price jumps by JPY 210 when travel distance exceeds 50 km. Then, this research estimates the price elasticity using regression discontinuity design. The estimation results show that the elasticity is significantly larger than one, which means that the price sensitivity to demand is at a high level. Pricing decisions should be made carefully based on the estimation results of price elasticity and the current overcrowding degree of regular cars and Green-cars.

キーワード：グリーン車, 価格弾力性, Regression discontinuity design, 因果推論, 自然実験

## 1. はじめに

都市圏の普通列車で移動時の快適性を提供するサービスとして、JR 東日本のグリーン車、JR 西日本の A シートのような有料座席サービスがある。新型コロナウイルスの流行をきっかけにテレワークや時差通勤などの新しい働き方の導入が進み、都市圏の普通列車の乗車率が減少した一方で、2023 年 10 月に JR 西日本の大和路線・おおさか東線には快速うれシートが導入され、JR 東日本の中央線にもグリーン車の導入が予定されていることなどから、有料座席サービスのニーズはアフターコロナにおいても少なくないと考えられる。

このような有料座席サービスの料金設定は旅客満足度と事業者収入両方の観点から重要である。例えば、有料座席サービスの料金が現状より安くなると、普通車両の利用者が有料座席サービスの車両にシフトして、有料座席サービスの快適性が下がってしまう。反対に有料座席サービスの料金が高くなると、有料座席サービスの利用者が普通車両にシフトし、普通車両が混雑してしまう。このように有料座席サービスの快適性と普通車両の混雑度は相互に影響しあう。さらに料金設定の増減による事業者収入の増減は、料金の変化割合と需要の変化割合の大小関係によって異なる。以上から、適正な料金設定のための基礎的研究として、有料座席サービスの料金の変化が需要に与える影響を定量化することは重要な課題といえる。このような料金等の価格が需要に与える影響は、需要の価格弾力性という指標を用いて定量化できる。これは価格変化に対する需要の感応度を表す指標で、2.3 節

で後述するが価格が 1% 増加（減少）したときに需要は約何% 減少（増加）するかを示す値と解釈できる。なお、有料座席サービスの適正な導入車両数の検討といった設備投資の観点も重要な研究課題であるが、本研究では適正な料金設定のための基礎的研究を行うこととし、設備投資に関する検討は対象としない。

需要の価格弾力性に基づいて適正な料金設定を検討することは重要であるが、有料座席サービスの中で最も歴史がある JR 東日本のグリーン車の料金設定を振り返っても、消費税増税タイミングでの微調整を除いては過去の料金設定が据え置かれてきたため、最近のデータによる裏付けは必ずしもないといえる。なお、2024 年 3 月 16 日にグリーン料金体系の見直しを実施されたが、あくまで「よりわかりやすい料金体系」と「IC 化やチケットレス化」の推進を目標としている<sup>1)</sup>。

学術的にも有料座席サービス需要の価格弾力性を推定した事例はない。また日本の鉄道運賃を対象に需要の価格弾力性を推定した事例は少数<sup>2) 3) 4)</sup>などがあるが、路線単位で集計されたデータを用いて分析しているなど、いずれもより精緻な分析を行う余地がある。これは、鉄道の運賃・料金が航空運賃とは異なり日によって変動せず、基本的に一定であり、実社会で観測できる事例に限られることに起因する。

このような状況で有料座席サービス需要の価格弾力性を推定するための理想的な方法として、路線や日ごとにグリーン料金をランダムに変化させる社会実験を行うものがある。図 1 に、安い料金パターンと高い料金パターンを設定し、それらを路線や日ごとにランダムに変化させる社会実験を行ったときに得られる結果のイメージを示す。旅客の鉄道利用距離を示す営業キロが長くなれば

\* 情報通信技術研究部 情報解析研究室

なるほど、快適性を求めて有料座席サービスが選択される確率が徐々に高くなると考えられる。このように料金設定が2パターンあると、営業キロと有料座席サービス選択確率の関係を示す曲線も2パターン得られる。そして2パターン間の料金の差と、有料座席サービス選択確率の差の関係を定量化することによって、需要の価格弾力性を推定することができる。しかしこのような社会実験を実現するハードルは非常に高いといえる。

そこで本研究は、社会実験を行わずとも、実社会の営業路線にあたかも実験が行われたような状況を見出すことによって、有料座席サービス需要の価格弾力性を推定することを目的とする。具体的には、混雑が最も激しい首都圏における朝の通勤列車を対象に、グリーン車需要の価格弾力性を推定する。

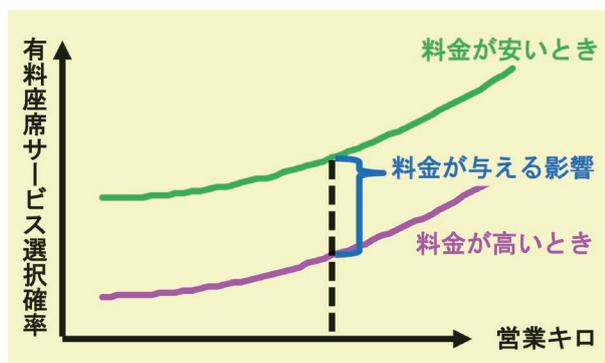


図1 社会実験のイメージ

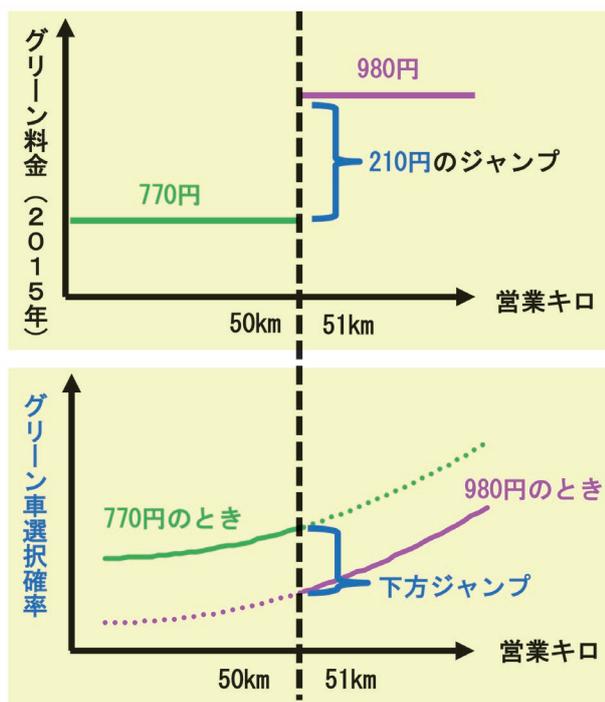


図2 グリーン車需要の価格弾力性の推定イメージ

## 2. 分析手法

### 2.1 分析手法の考え方

本研究はグリーン車の料金（以下、グリーン料金）の体系が階段状であり、ある境界線前後において料金がジャンプすることを、社会実験における料金変化と見立てて分析を行った。図2に、グリーン料金体系の境界線を利用してグリーン車需要の価格弾力性を推定するイメージを示す。

3章で後述する使用データ年次と合わせて2015年の料金体系で説明すると、図2上部のように営業キロ50kmまではグリーン料金は一律770円であるが、営業キロ51kmを境に一律980円に変化し、グリーン料金が210円ジャンプする。ここで営業キロ50kmと51kmの旅客に着目すると鉄道乗車時間はほとんど変わらないにもかかわらず、グリーン料金は異なる状況が発生している。したがって図2下部のように営業キロ50kmまでは営業キロが長くなるにつれてグリーン車の選択確率は徐々に高くなると考えられる一方、グリーン料金が210円ジャンプする営業キロ51kmの境界線では、グリーン車選択確率が下方ジャンプすると考えられる。このグリーン料金とグリーン車選択確率のジャンプの関係を定量化することによって、グリーン料金の変化がグリーン車需要に与える影響、すなわちグリーン車需要の価格弾力性を推定する。なお、営業キロは駅間ごとに小数点第一位まで定められているが、本稿では特に断りがない限り、営業キロは小数点第一位を切り上げた整数値を指す。これはグリーン料金のほか、その他鉄道の運賃・料金の算出でも小数点第一位を切り上げた整数値の営業キロが基準となっているためである。また、グリーン料金は、車内購入か、事前購入か（2024年3月16日以降はSuica購入か、紙のきっぷ購入か）によって異なるが、上記は事前購入の料金を示している。本稿では、通勤旅客は車内料金より安い事前購入料金にてグリーン料金を支払うと仮定して分析を行う。

このように実社会に存在する境界線前後の水準のジャンプを活用して因果関係を定量化する手法はRegression discontinuity design（以下、RDD）と呼ばれる。既述のとおり社会実験を行うことは容易ではなく、また鉄道の運賃・料金は航空運賃とは異なり日によって変動しないことから、それらが需要に与える影響を定量化した事例は少ない。しかし2.2節で後述する条件を満たせば、RDDを用いることによって、社会実験を行った場合と同程度の精度の結果を得られることが期待できる。

### 2.2 RDDの概要と本研究への適用

RDDはある連続変数 $x$ の値が特定の境界線の値よりも低いか高いかによって、別々のグループに割り付けら

れる事象に着目し、その境界線前後にある目的変数 $y$ のジャンプを計測することによって何らかの効果を推定する手法である。そしてRDDを用いて妥当な結果を得るには、目的変数 $y$ 以外の変数は、上記境界線においてジャンプしないという条件がある。

本研究では上記の連続変数 $z$ を営業キロ、目的変数 $y$ をグリーン車選択確率とする。そして営業キロ $z$ が51km未満か以上かによって、グリーン料金が770円か980円となる事象に着目し、営業キロ51km前後のグリーン車選択確率 $y$ のジャンプを計測することによって、グリーン車需要の価格弾力性を推定する。ここで妥当な結果を得るためには、グリーン車選択確率 $y$ 以外の変数（時刻変数や属性変数）には、営業キロ51km前後においてジャンプしないという条件を満たす必要がある。

ここで目的変数 $y$ 以外の変数がジャンプしなければ、連続変数 $z$ とジャンプを表す変数のみを説明変数としたシンプルなモデルで因果関係を推定できることがRDDの強みである。ただしRDDにより推定された結果は、境界線近傍での信頼度の高い結果（内的妥当性）は得られる一方で、境界線近傍以外の場所にどれほど適用できるか（外的妥当性）という議論は常に残ることに注意する必要がある。

### 2.3 本研究におけるRDDモデル式

本研究では、二項ロジットモデルを用いて、各旅客がグリーン車を利用するか、利用しないかを定式化する。二項ロジットモデルとは、2つの選択肢がある状況における選択行動を確率的に定式化するために、一般的に用いられている統計モデルである。本研究におけるRDDモデルを式(1)、および式(2)に示す。

$$y_i^* = \alpha + \beta z_i + \gamma d_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & (\text{if } y_i^* > 0) \\ 0 & (\text{if } y_i^* \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

ここで添字 $i$ は個人を示し、目的変数の $y_i^*$ はグリーン車乗車選択の潜在変数（効用）である。説明変数の $z_i$ は、個人 $i$ がグリーン車運行区間内で乗車した営業キロ（小数点第一位の切り上げを行う前の値）を示し、 $d_i$ は1か0の値をとるダミー変数であり、営業キロが51km以上の場合は1、51km未満の場合は0となる。誤差項の $\varepsilon_i$ は独立で同一のガンベル分布に従うと仮定することによって、二項ロジットモデルとする。 $\alpha$ は定数項の大きさ、 $\beta$ 、 $\gamma$ は各説明変数の重みを示すパラメータである。また式(2)に示すとおり $y_i$ は1か0の値をとるが、個人 $i$ がグリーン車を利用する場合は1、利用しない場合は0となる。また本研究では $d_i$ にかかる $\gamma$ がグリー

ン車需要のジャンプを表すため、最も重要なパラメータであるといえる。

グリーン車選択確率の理論値 $\Pr(y_i=1)$ は、 $y_i^*$ の推定値 $\hat{y}_i^*$ を用いて式(3)のとおり計算できる。

$$\Pr(y_i=1) = \frac{\exp(\hat{y}_i^*)}{1 + \exp(\hat{y}_i^*)} \quad (3)$$

本研究における価格弾力性 $\eta$ は式(3)、および営業キロ51km未満か以上かによるグリーン料金 $p(d_i)$ を用いて式(4)のように表せる。

$$\eta = - \frac{\Pr(y_i=1 | d_i=1, z_i=50.1) - \Pr(y_i=1 | d_i=0, z_i=50.0)}{\{\Pr(y_i=1 | d_i=1, z_i=50.1) + \Pr(y_i=1 | d_i=0, z_i=50.0)\} / 2} \div \frac{p(d_i=1) - p(d_i=0)}{\{p(d_i=1) + p(d_i=0)\} / 2} \quad (4)$$

ここで $p(d_i=0)$ は770円、 $p(d_i=1)$ は980円となる。式(4)の第1の分数項はグリーン車選択確率の変化率、第2の分数項はグリーン料金の変化率を表す。それら変化率を計算するための分母は、Mankiw (2012)<sup>5)</sup>に倣い、変化前後の中間値としている。グリーン車の選択確率の計算では、グリーン料金が980円( $d_i=1$ )となる最小の営業キロ( $z_i=50.1$ )と、グリーン料金が770円( $d_i=0$ )となる最大の営業キロ( $z_i=50.0$ )を基準としている。なお価格弾力性 $\eta$ は先頭に-1を乗じて定義されているため、推定値は正であることが想定される。

価格弾力性 $\eta$ は営業キロ51km近傍で価格が1%増加（減少）したときに、需要が約何%減少（増加）するかと解釈できる。

2.2節で既述のとおり本価格弾力性が正確に計測されるためにはグリーン車選択確率以外の変数がジャンプしないことを満たす必要がある。それらの変数がジャンプしないかの確認は3.3節で行う。

## 3. 分析に用いるデータ

### 3.1 大都市交通センサスの概要

本研究では2015年（新型コロナウイルス流行前のデータ最新年次）における首都圏版の大都市交通センサスの個票データ（国土交通省総合政策局より提供）を用いてRDDモデル式のパラメータ推定を行う。

大都市交通センサスは国土交通省により、鉄道・バスの利用の実態を把握するために5年おきに行われている調査であり、対象地域は首都圏、中京圏、近畿圏である。大都市交通センサスはいくつかの調査からなるが、本研究で主に用いるのは鉄道定期券・普通券等利用者調査の首都圏の個票データである。同調査は2015年の11/17

(火)～11/19(木)の3日間で実施された。

調査票を受け取った旅客はその日の鉄道トリップ3回目までの情報(トリップが4回以上ある旅客は3回目までのトリップと帰宅トリップに関する情報)を記述する。ここでトリップとは、出発地(自宅等)から目的地(勤務先等)までの一連の交通行動であり、帰宅トリップは勤務先から自宅までのようなトリップを指す。それぞれのトリップの目的(通勤、通学、業務、私事、帰宅の5択)、出発地および目的地の情報(住所は町丁目まで)、鉄道経路の情報(利用路線と利用路線ごとの乗車駅、降車駅、列車種別)、およびそれらに対応する時刻(出発地を出発した時刻、列車に乗車した時刻、列車を降車した時刻、目的地に到着した時刻)などを記述する。さらに勤務先の始業時刻や、個人属性として性別、年齢を記述する。なお列車種別は、各駅停車のみ、快速・急行等、有料列車、新幹線の4択で回答する。普通列車グリーン車、通勤ライナー、特急列車はいずれも有料列車として回答されるため、それらが並走している区間で有料列車が回答された場合、乗降駅や時刻などの情報からそれらを区別する必要がある。

### 3.2 分析対象サンプルの選定

通勤定期券の保有者で、移動目的が通勤、勤務先始業時刻が8:00から10:00の旅客を分析対象とする。

普通車両とグリーン車の選択を定式化するため、JR東日本路線のグリーン車運行区間を利用した旅客を分析対象とする。2015年時点でグリーン車が運行していた路線は、東海道本線、東北本線、常磐線快速、総武本線、横須賀線、高崎線、成田線(成田支線)、外房線、内房線、湘南新宿ライン、上野東京ラインである(大都市交通センサスの表記名称と統一)。原則グリーン車価格は一列車につき一度支払う必要があるが、上記のグリーン車運

行区間内では、改札口を出なければ同一方向に乗り継ぐことができる。そのため、モデルの説明変数の営業キロ $z_i$ には、上記区間内で各旅客が乗車した分の営業キロを代入する。

グリーン車運行区間を利用する旅客であっても、バイアスがかかりうる旅客を分析対象外とする必要がある。総武本線の千葉駅以東、常磐線快速、成田線(成田支線)、外房線、内房線では、常時グリーン車が併結されているわけではないため、いずれの時間帯でも普通車両とグリーン車の選択が可能なのではない。そのため、同区間を利用する旅客は分析対象外とする。またグリーン車運行区間であっても通勤ライナーや特急列車が停車するODでは、選択肢にそれらの列車も入りバイアスがかかってしまう。そのためグリーン車運行区間内で乗車した最初と最後の駅を基準に、分析対象時間帯に通勤ライナーもしくは特急列車が停車するODは分析対象外とする。

上記に示した分析対象サンプルにおける移動時刻や個人属性等に関する変数の記述統計を表1に示す。対象営業キロは1～70km、サンプルサイズは17,136であり、不明回答は記述統計量の計算対象から除外している。

### 3.3 RDD 成立条件の確認

2.1節で既述のとおり本研究でRDDが成立するためには、グリーン車選択確率以外の変数が、営業キロ51km前後にジャンプしないことを満たす必要がある。グリーン車選択確率以外の変数の営業キロ別の平均値、およびその近似曲線(2次近似)を図3(a)～(f)に示す。

最初に時刻変数の解釈を行う。(a)始業時刻、および(b)到着時刻は営業キロにはそれほど依存しない傾向が見られた。(c)出発時刻、および(d)乗車時刻は営業キロが長くなるごとに早くなる傾向が見られた。これ

表1 各変数の記述統計

変数名	単位	平均値	標準偏差	最小値	中央値	最大値
営業キロ $z_i$	km	25.3	13.7	1.1	24.7	69.7
営業キロ 51km 以上ダミー $d_i$	なし	5.9%	0.24	0	0	1
グリーン車選択ダミー $y_i$	なし	1.1%	0.10	0	0	1
始業時刻	h:mm	8:56	0:25	8:00	9:00	10:00
出発時刻	h:mm	7:11	0:42	4:00	7:10	9:53
乗車時刻	h:mm	7:28	0:42	4:44	7:28	9:42
降車時刻	h:mm	8:17	0:38	5:25	8:17	10:00
到着時刻	h:mm	8:29	0:37	5:55	8:30	10:00
女性割合 <sup>※)</sup>	なし	29.2%	0.45	0	0	1
年齢	歳	49.7	10.6	18	50	97

※) 旅客が女性であった場合に1、男性であった場合に0をとるダミー変数を用いて計算している

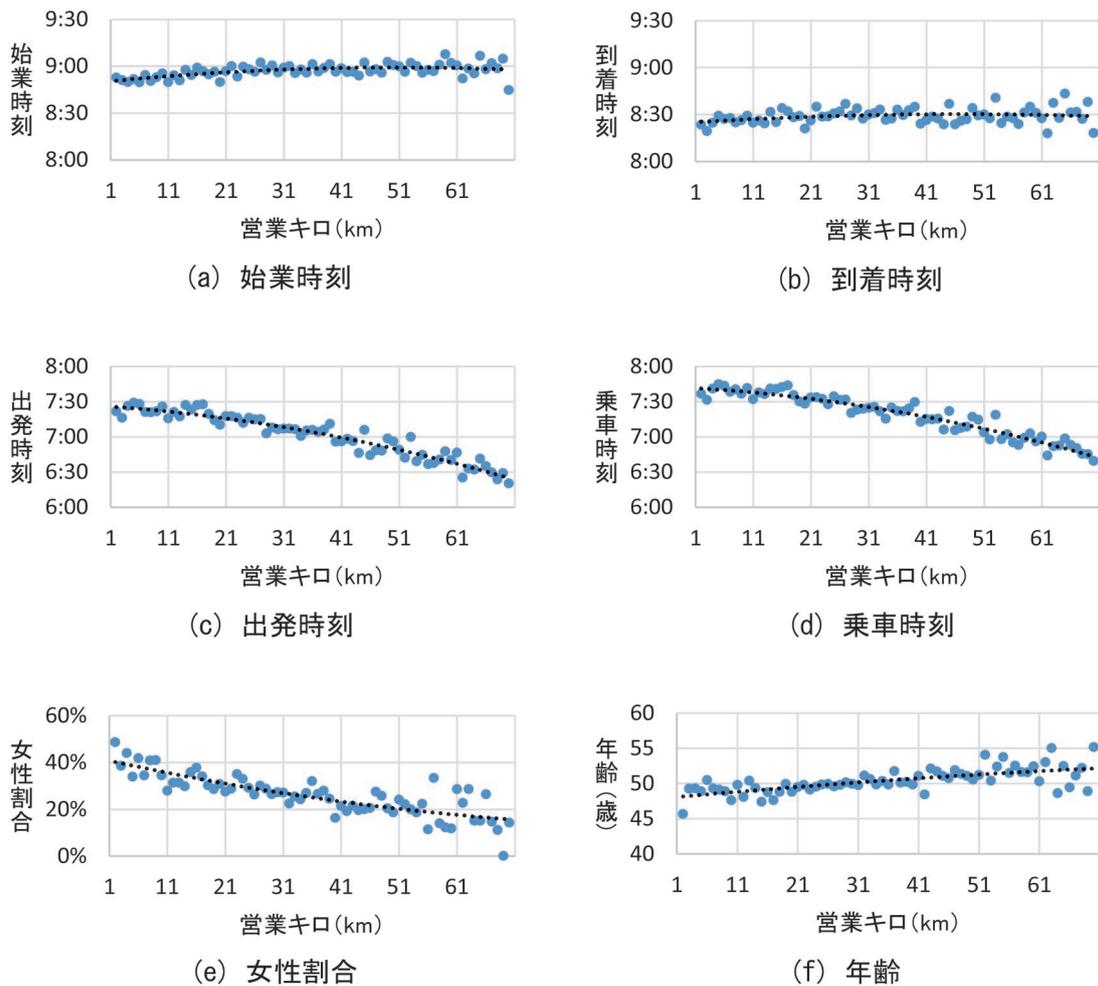


図3 営業キロ別の移動時刻・属性の平均値

は営業キロが長いほど通勤所要時間も長くなり、早く出発・乗車する必要があるためと考えられる。

次に属性変数の解釈を行う。女性ダミーの平均値は(e)女性割合と一致する。女性割合は営業キロが長いほど低くなる関係が見られた。これは、女性は非正規雇用である割合が高く、正規雇用と比較して非正規雇用では転勤が少ない事情や、時間をかけて通勤するメリットが小さい事情が反映されていると考えられる。(f)年齢は営業キロが長いほど高くなる傾向が見られた。これは年齢が高くなるほど、マンションや持ち家に住む割合が高くなり、地価の低い郊外に住む傾向や、引っ越しのコストが高くなる傾向が反映されていると考えられる。

なお、通勤定期の価格は営業キロ1kmごとに増加するが、日本では一般的に通勤定期の費用は勤務先が負担するため、分析の問題とはならないと考えられる。これは通勤手当の非課税枠が1ヶ月あたり10万円(2015年時点)あることに起因する。毎日指定区間内を乗車できるに加えて、毎日グリーン車にも乗車できるグリーン定期があるが、グリーン定期では勤務先負担とはなりにくいとされるため、グリーン定期は考慮しない。

さらにグリーン車利用回数にもよるが、営業キロ51km近傍においては、グリーン定期よりも通常のグリーン車価格を利用した方が費用負担は少ないと想定される。グリーン定期には1ヶ月タイプと3ヶ月タイプがあるが、3ヶ月タイプで平日通勤20日/月と想定した場合、通常の通勤定期の価格を、営業キロ50kmで1,564円/日、営業キロ51kmで2,052円/日上回る(2015年時点)<sup>6)</sup>。したがってグリーン定期はあまり利用されていないと仮定しても差し支えないと考えられる。

上記の考察の限りでは、営業キロ51km前後でのジャンプは観測されなかった。したがって2.2節に示したRDDモデルのダミー変数のパラメータ $\gamma$ は、本研究の想定どおりグリーン料金変化による効用の変化を示していると考えられる。

## 4. 分析結果

### 4.1 モデルパラメータと価格弾力性の推定結果

本研究では(1)1~70km、(2)11~70km、(3)21~70kmの3通りの営業キロの範囲を対象にパラメータ推定

表2 パラメータと価格弾力性の推定結果

パラメータ	対応する説明変数	(1)			(2)			(3)		
$\alpha$	1 定数項	-6.582	(-26.52)	***	-6.382	(-23.49)	***	-5.886	(-16.91)	***
$\beta$	$z_i$ 営業キロ	0.070	(9.57)	***	0.064	(8.09)	***	0.051	(5.18)	***
$\gamma$	$d_i$ 51km 以上ダミー	-1.086	(-3.75)	***	-0.970	(-3.25)	***	-0.712	(-2.20)	**
	対数尤度	-941.2			-923.0			-850.2		
	McFadden の擬似決定係数	0.058			0.041			0.019		
	対象営業キロ	1~70km			11~70km			21~60km		
	サンプルサイズ	17,136			14,717			10,811		
$\Pr(y_i = 1   d_i = 0)$	$d_i = 0$ でのグリーン車選択確率	4.3%			4.1%			3.5%		
$\Pr(y_i = 1   d_i = 1)$	$d_i = 1$ でのグリーン車選択確率	1.5%			1.6%			1.8%		
$\eta$	価格弾力性	4.013			3.647			2.761		

( ) 内は z 値 \*\*\*, \*\*, \* はそれぞれ有意水準 1%, 5%, 10% の下で統計的に有意であることを示す

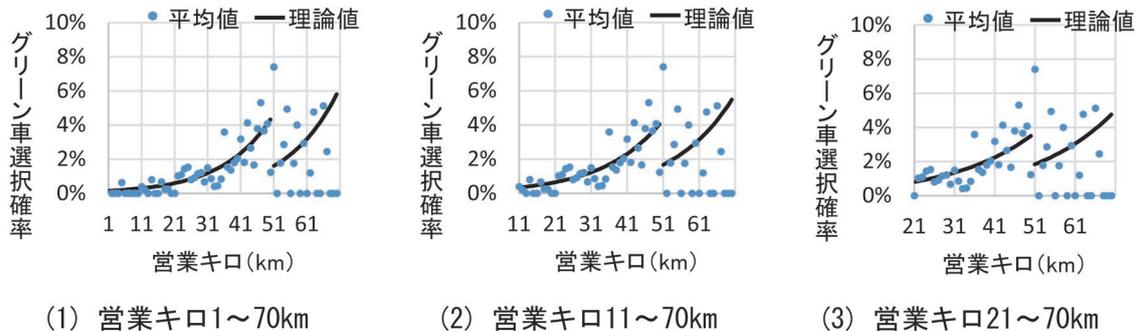


図4 グリーン車選択確率の営業キロ別平均値・理論値

を行い、それぞれに基づいた価格弾力性を算出する。ここで複数の営業キロ範囲を対象にパラメータ推定を行うのは結果の頑健性を確認するためである。なお、統計解析ソフトウェア R (64bit) version 3.6.1 の glm 関数 (generalized linear model: 一般化線形モデル) を用いて最尤法によるパラメータ推定を行った。

モデルのパラメータ推定結果、およびそれに基づいて計算したグリーン車需要の価格弾力性を表2に、各推定パラメータにおける営業キロとグリーン車選択確率の関係を図4に示す。

#### 4.2 考察

推定結果 (1) ~ (3) いずれにおいても、 $\gamma$  は統計的に有意に負の値で推定され、価格弾力性は1を超えていることが分かる。このことから、グリーン料金が210円変化する営業キロ51km前後にはグリーン車需要のジャンプが存在し、その価格弾力性は統計的に有意に1を上回ることが分かった。価格弾力性が1を上回るとは、価格変化による需要の変化率が価格の変化率を上回ることを意味する。さらに価格弾力性の値が1を上回るとは、

価格を安くするとその価格の減少割合よりも需要の増加割合が大きいこと、すなわち価格を安くすると収入が増加することを意味する。

以上から、グリーン車需要は料金に対する感応度が高く、料金を安くすると料金の減少割合以上にグリーン車需要が増加し、料金収入が増加すると解釈できる。このことからグリーン料金施策は、複雑な設備投資を行わずとも、事業者収入の増加に寄与し得ることが分かった。ただし1章で既述のとおり、グリーン料金を過剰に安くするとグリーン車が混雑して快適性を提供できなくなるため、適正なグリーン料金を設定するには、本価格弾力性の推定値、および現状の普通車両とグリーン車の混雑度を比較した慎重な検討が必要である。また、これらは営業キロ51km前後のジャンプから推定された値であるため、上記解釈を営業キロ51km近傍以外の通勤旅客に対してどこまで拡張できるかは追加的な検討が必要である。

営業キロ51km ( $d_i=1$ ) でのグリーン車選択確率は1.5~1.8%と0.3ポイント差で推定された結果と比較して、営業キロ50km ( $d_i=0$ ) でのグリーン車選択確率は3.5~4.3%と0.8ポイント差と広い範囲で推定された。価格弾力性は

2.761~4.013と1.252ポイント差とやや広い範囲で推定された。また営業キロ51km以上に関しては対象となる旅客の数が全体の5.9%（表1中の営業キロ51km以上ダミー $d_i$ の平均値）と少ないため、グリーン車選択確率の営業キロ別平均値にややバラツキがあることが分かる。これらの課題解決に際しては、2015年以外の年次における大都市交通センサスデータや、大都市交通センサス以外のデータを活用することによってサンプルサイズを確保し、より安定した推定結果を得る必要がある。

## 5. おわりに

### 5.1 本研究のまとめ

本研究ではグリーン料金が営業キロ51kmを境にジャンプすることに着目し、RDDを適用することによって、平日朝の通勤におけるグリーン車需要の価格弾力性を推定した。分析の結果、グリーン車需要の価格弾力性は統計的に有意に1を上回る推定値が得られた。このことからグリーン車需要の料金に対する感応度は大きく、またグリーン料金を安くすると、料金の減少割合以上にグリーン車需要が増加し、事業者収入が増加することが示唆された。平日朝の通勤におけるグリーン車の適正な価格設定は、本価格弾力性の推定値、および現状の普通車両とグリーン車の混雑度を比較しながら、慎重に検討する必要がある。本研究の分析結果が、今後のグリーン車を含む有料座席サービスの適正な料金設定や、導入車両数の議論に活用されることを期待する。

以上より、本研究には価格弾力性がやや幅広い値で推定されるなどの課題が残ったものの、鉄道に初めてRDDを適用することによって、鉄道需要の価格弾力性を推定する基盤技術を構築した。

### 5.2 今後の課題

本研究ではデータサンプルの制約もあったため、分析対象を平日朝の通勤時間帯に絞り、また複数の路線をまとめてグリーン車需要の価格弾力性を推定した。しかし実際の価格弾力性は、平日と休日、通勤ラッシュ時と帰宅ラッシュ時、またオフピーク時といった時間帯ごとに

異なり、さらに路線ごとにも異なると予想される。したがって今後の課題としては、他の年次の大都市交通センサスデータや、その他の利用実績データを活用することによってデータ制約の問題を解消し、時間帯や路線ごとに異なる価格弾力性を推定することが挙げられる。これができると、例えばラッシュ時は高くなりオフピーク時は安くなる料金体系や、路線ごとに異なる料金体系など、より柔軟な料金体系の検討が可能となる。

さらに今後の研究はグリーン車需要の価格弾力性の推定に留まらず、実際の普通車両とグリーン車の混雑度の変化を通して旅客満足度と事業者収入両方の観点から適正な混雑水準を達成するグリーン料金設定手法の構築まで拡張することを目標とする。

最後に本稿は『交通学研究』第63号に掲載された論文<sup>7)</sup>の内容を一部修正したものである。

## 文献

- 1) 東日本旅客鉄道株式会社：首都圏の普通列車グリーン車の料金体系を見直します、JR 東日本ニュース、2023.12.15
- 2) 金子雄一郎、福田敦、香田淳一、千脇康信：首都圏における鉄道旅客需要の運賃弾力性の計測、土木計画学研究・論文集、Vol.21、pp.175-181、2004
- 3) 青木亮、須田昌弥、早川伸二：需要面からみた第3セクター鉄道と地方民鉄の分析、交通学研究、No.49、pp.161-170、2006
- 4) 藤田知也：地方圏における鉄道需要に関する一考察 - パネルデータによる実証分析、交通学研究、No.62、pp.45-52、2019
- 5) Mankiw, N. G.: "Principles of Economics" Sixth Edition, Cengage Learning, 2012. (足立英之ら訳：『マンキュー経済学I ミクロ編』第3版、東洋経済新報社、2013)
- 6) 東海旅客鉄道株式会社：旅客営業規則 別表第2号 (2017/11/22時点)
- 7) 松本涼佑：普通列車のグリーン車需要の価格弾力性の推定 - Regression discontinuity design に基づいて、交通学研究、No.63、pp.71-78、2020
- 8) 交通新聞社：マイライン 東京時刻表、18巻、11号、2015



鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

芦谷公稔

■編集責任者

谷村幸裕

■企画・監修

川崎邦弘 長倉 清 日比野有 小方正文

仁平達也 石毛 真 神田政幸 重枝秀紀

桃谷尚嗣 布川 修 新井英樹 福田光芳

松井元英 上半文昭 斉藤実俊 水上直樹

富田 優 小島謙一

鉄道総研報告 第38巻 第6号

2024年6月1日 発行

監修・発行所：公益財団法人 鉄道総合技術研究所

〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

©2024 Railway Technical Research Institute

本誌に関するお問い合わせ先  
総務部広報 電話 042-573-7219

# RTRI REPORT

Vol. 38 No. 6

Jun. 2024

## PAPERS

- Increase of Tangential Force by Ceramic Particles on the Low Adhesion Condition  
..... S.FUKAGAI, T.FURUYA, R.TAKANO (1)
- Fundamental Study on Contact Force Estimation Method of Pantograph/Catenary Systems using Kalman Filter  
..... S.KOBAYASHI, Y.YAMASHITA (7)
- Development of Low Strength Stabilization Method for Fouled Ballasted Tracks  
..... T.KAGEYAMA, T.NAKAMURA, M.HOJO, F.TAJIMA (15)
- Survey on Railway Customers' Consciousness of Cleaning Quality in Men's Restrooms in Railway Stations  
..... T.KYOTANI, Y.IKEDA, H.OISHI, T.KAWASAKI (23)
- Evaluation of Spatial and Temporal Variation of Site Effects on Superficial Subsurface Structure  
..... S.TSUNO, M.KORENAGA, R.KOBAYASHI, H.YAMANAKA (31)
- Increased Perception of Workload and Related Cognitive Functions in Drivers with Aging  
..... R.NAKAMURA, A.SATO, T.MASUDA, Y.KITAMURA, M.FUJIMICHI, A.SAITO (37)
- Estimation of the Price Elasticity of Demand for Green-Car in Commuting Train  
..... R.MATSUMOTO (45)

