

鉄 道 総 研 報 告

第40巻 第10号

2026年10月

論文

- 車両** コンデンサ自励現象を用いた渦電流ブレーキにおける速度低下およびギャップ拡大時の起動特性
..... 坂本泰明, 浮田啓悟 (1)
- 車両** **施設** 超音波を用いた車輪・レール接触位置の動的測定手法
..... 深貝晋也 (11)
- 車両** **施設** ブレーキ時に生成される車輪フラットの定量的な推定手法
..... 山本大輔, 坂井宏隆 (25)
- 施設** トングレールの際間調整装置の開発と保守省力化を目的とした分岐器ポイントの提案
..... 玉川新悟, 上田将司, 安田新太郎, 細見章人 (36)

技術報告

- 運転** 事故・ヒヤリハット情報等の収集・活用に向けたデジタル技術の導入に関する実態調査
..... 小野間統子, 岡田安功, 藤道宗人, 中村竜 (46)

コンデンサ自励現象を用いた渦電流ブレーキにおける 速度低下およびギャップ拡大時の起動特性

坂本 泰明* 浮田 啓悟*

Startup Characteristics of an Eddy Current Brake Using Capacitor Self-Excitation Phenomenon under Low-Speed and Large-Gap Conditions

Yasuaki SAKAMOTO Keigo UKITA

To explore the potential of electric braking in railway vehicle trailer cars, this study investigates capacitor self-excitation in eddy current brakes (ECBs) with the aim of enabling regenerative braking. While the characteristics under favorable conditions for self-excitation—such as high speeds and small air gaps—have been examined, the behavior under less favorable conditions, including low speeds and large air gaps, remains unclear. This study focuses on analyzing the behavior of the ECB under such less favorable conditions. Anomalous sustained excitation with small currents was observed, deviating from conventional behavior. From experimental and theoretical analyses, this phenomenon is presumed to be caused by the nonlinear magnetic properties of the secondary cores, including initial magnetization and magnetic saturation.

キーワード：コンデンサ自励現象，渦電流ブレーキ，非線形磁気特性

1. はじめに

高速鉄道では、停車直前を除く中・高速走行時の常用ブレーキとして、主に電気ブレーキが使用される。電動機が搭載されていない付随車については、電気ブレーキの一種である渦電流ディスクブレーキ（Eddy Current disc Brake: ECB）が用いられてきた。ECBは非接触で動作するため、機械ブレーキで見られるライニングの摩耗が生じず、その保守作業が不要などの利点を有する。しかし、電力回生ができない、ディスクの発熱が大きい、停電時に使用できないなどの課題が指摘されてきた。

これらの課題を解決するアプローチとして、ECBの電磁石を円弧状のリニア誘導発電機の固定子に置き換え、インバータによる交流励磁により電力回生を可能とする方式が検討された¹⁾。しかしながら、この方式は実用に供されていない。以上の背景から、ECBは近年の車両には搭載されていないのが現状である。電動車の電力回生ブレーキを優先的に使用する前提のもとで、編成中の電動車比率を高めて付随車のブレーキを用いない、または付随車に軸マウントディスクブレーキ（機械ブレーキ）を搭載して電動車の制動力が不足する場合に補助的に用いるなどの方式が採用されている²⁾。

このような状況を踏まえ、筆者らは付随車における電気ブレーキの可能性を改めて追求し、その実用化を目指すため、上記のECBの課題の解決に向けた新しいECBを提案した³⁾。提案したECBは、付随車向けとして構成の簡素化と低コスト化を重視し、コイルとコンデンサの共振による自己励磁、すなわち誘導機におけるコンデンサ自励現象と同様の原理を利用して交流励磁と電力回生を実現するものである。インバータや歯車装置などを用いずに、付随車における簡易的な電力回生ブレーキを実現できる点に特長がある。これが可能になれば、例えば最高速度から付随車を含む全軸で常用ブレーキを負担させるなど、制動方式の選択肢も広がると考えられる。これまでに筆者らは、高速度・小ギャップのようなコンデンサ自励現象の発現条件が十分な状況下における特性を主に明らかにしてきた^{4) 5) 6)}。

* 超電導応用技術研究部 電磁システム研究室

本研究では、提案 ECB の使用可能な速度範囲およびギャップ範囲を把握し、その拡大可能性を検討することを目的として、未検討であった速度低下およびギャップ拡大時のような自励現象の発現条件が不十分な状況下における起動特性を調査した。その結果、高速度・小ギャップの条件下とは異なり、低速度・大ギャップ条件下では初期励磁電流の大きさによっては、所期の励磁状態に至らない場合があることなどを確認した。提案 ECB をより低速域まで、またはギャップを拡大して使用するためには、この挙動のメカニズム解明と対策が不可欠である。本稿では上記の調査結果を報告するとともに、そのメカニズムについて検討する。なお、初期励磁電流の閾値の定量化等は検討対象外とし、稿を改めて論じることとする。

2. コンデンサ自励現象を用いた渦電流ブレーキの概要

2.1 動作原理

本節では、提案 ECB の動作原理について説明する。提案 ECB は、磁界を生成する固定子側（一次側）の鉄心およびコイルと、その磁界と電磁相互作用を行う回転子側（二次側）の鉄心および導体から構成される。この基本構成は従来の ECB と同様である。一次側が形成する磁界中で二次側が回転すると、二次側導体に誘導電流が流れ、その誘導電流が作る磁界と一次側電流との相互作用によってブレーキ力が発生する。提案 ECB は、従来 ECB とは異なり、一次側を 3 相交流で励磁する。これにより、ブレーキ動作と同時に発電電力を得ることが可能となる。以上の基本的な構成および動作原理は、一般的な回転型誘導機と多くの共通点を有する。提案 ECB、従来 ECB、誘導機の基本的な構成・機能の違いを表 1 に示す。

表 1 提案 ECB、従来 ECB、誘導機の比較

項目	提案 ECB	従来 ECB	誘導機（一般的なもの）
固定子 （一次側）	3 相交流励磁の電磁石 （積層鉄心、3 相コイルを円弧状セグメントに配置）	直流励磁の電磁石 （塊状鉄心、直流コイルを円弧状セグメントに配置）	3 相交流励磁の回転機の固定子 （円環・楕円状の積層鉄心のスロット部に 3 相コイル巻線を配置）
回転子 （二次側）	鋼材ディスク （短絡導体を兼ねる円盤状鉄心）	同左	かご型回転子（円形・楕円状の積層鉄心のスロット部に導体棒を入れ、両端を短絡環で接続し、かご型導体を形成）
固定子と回転子の間のエアギャップ	アキシアル方向（回転軸方向） 大（約 12 mm）	同左	ラジアル方向（半径方向） 小（約 1 mm）
誘導電流の流れ方	ディスク表面付近に渦状に流れる	同左	導体に沿ってかご状に流れる
機能	ブレーキ（自己励磁と発電が可能）	ブレーキ（電力供給が必要）	力行、ブレーキ（自己励磁と発電が可能）

次に、誘導機で知られるコンデンサ自励現象の原理について述べる。

- (1) 電動機または発電機として使用された履歴のある回転子鉄心には、微弱な残留磁化がある。外部動力によりその回転子を回転させると、この残留磁化が回転することによって固定子回路（一次回路）に交流電圧が誘起される。
- (2) 上記の交流電圧により一次回路に微弱な交流電流が流れる。この段階までの動作は、永久磁石を用いた同期発電機と同じような原理に基づく。
- (3) 一次回路にコンデンサが接続されている場合、上記の交流電流は、一次回路のコイルとコンデンサの共振周波数において進み電流として流れ、誘導機は励磁され、誘導発電機として動作を開始する。
- (4) 発電電力により電流が増加するが、鉄心の磁気飽和により、電流増加は次第に飽和し、増加割合が抑制される。
- (5) 最終的に、発電電力と回路全体の損失が平衡する電流値に収束し、定常状態に至る。

提案 ECB においても、原理的には上記と同様のコンデンサ自励現象を発現させることができる。しかし、提案 ECB はブレーキ用途を目的としているため、ブレーキ距離に直結する電流の立ち上がり時間を短縮することが重要となる。そこで本方式では、上記 (1) に示した回転子鉄心の微弱な残留磁化 (ECB ではディスクの残留磁化) を用いずに、上記 (3) の交流電流を初期励磁電流として強制的に通流する方式を採用する。具体的には、ブレーキ待機時にコンデンサを直流電源により予め充電しておき、ブレーキ指令時にその電力を用いて初期励磁電流を通流することで、電流の立ち上がりの高速化を図る。この詳細については、2.3 節にて述べる。

2.2 構造および特徴

図 1(a)に提案 ECB の全体構成、図 1(b)に鉄心、コイル、ディスクの主要構造³⁾を示す。台車枠に取り付けた鉄心とコイル (一次側) と、車軸に取り付けた鋼材ディスク (二次側) で構成される。この構成は直流励磁の従来 ECB と同様である。ただし、一次側は 3 相の交流励磁に対応する。一次側は円弧状 (周長約 1 m) に形成され、台車の組み立て時に輪軸、ディスクを分解することなく、その脱着を可能とする。二次側の直径は約 700 mm、回転速度は最大で約 2000 min⁻¹ を想定している。一次側と二次側は、車両動揺による相対変位が発生する。アキシアルギャップ構造のため、ラジアル方向 (鉛直・前後方向) の相対変位に対しては一次側と二次側は接触しない。一方、アキシアル方向 (まくらぎ方向) の相対変位に対しては、約 12 mm のギャップを設けて接触を回避する。ブレーキトルクの目標値は、高速走行時の電動車におけるブレーキ力と同等から半分程度に相当する約 1.6~1.0 kNm を目安とする。

本構造は表 1 に示した誘導機と比較して、二次側が鋼材ディスクである、ギャップが大きい、一次側が円弧状セグメントのリニアモータ形状である、空間高調波が大きい、などの構造的特徴の相違がある。これらの相違があることで、二次抵抗や漏れリアクタンスが誘導機よりも大きくなるなど、電気的特性にも差異が生じる。その結果、所定のブレーキトルクを得るためには、比較的低い共振周波数 (例えば 50 Hz 程度) で一次側を励磁するとともに、高い滑り周波数 (例えば 100~200 Hz) で動作させる必要がある。高い滑り周波数下では、鋼材ディスクにおける表皮効果が顕著となり、鋼材ディスクが持つ非線形磁気特性と相まって、電流の大きさに対するインピーダンスの非線形性が強く現れる。

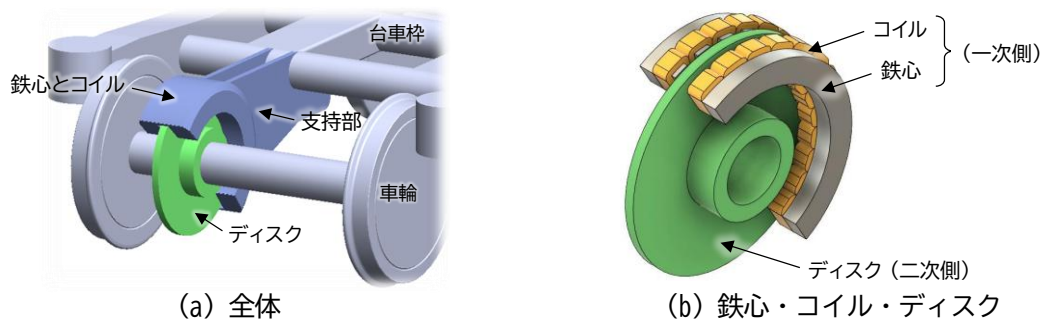


図 1 提案ブレーキの構成例

2.3 回路構成および励磁動作

図 2 に基本的な回路構成を示す。ここでは、デルタ結線で接続されたコンデンサと整流器による構成例を示している。コンデンサの容量は、最高速度時に所定の電圧・電流・ブレーキトルクで動作する共振周波数になるように設定する⁶⁾。共振周波数は速度に依存せずにほぼ一定なので、速度が低下すると滑り周波数が低下する。これに対し、速度に応じたコンデンサの切り替えなどは行わず、設定された共振周波数のままで可能な限り自励現象を継続する。

ブレーキ待機時からの基本的な励磁動作としては、図2中の接触器2が開いた状態で接触器1を閉じてコンデンサを充電し、充電完了後に接触器1を開いて待機する。ブレーキ指令時に接触器2を閉じると初期励磁電流が流れ、自励現象が発生して発電動作が開始される。通流初期には、電流は3相回路内を単相交流のように流れるが、すぐに正相成分が増加し、逆相成分が減衰することで、短時間で正相成分のみの3相交流へ移行する(図3)。発電電力が一次側の損失を上回っていればコンデンサの電圧が増加し、電流も増加する。コンデンサ電圧が直流側の電圧に到達すると、整流器を介して直流側へ電力が回生され、電圧と電流は増加せずに一定値になる。

一方、停電などにより直流側回路を切り離した場合は、電流のさらなる増加により磁気飽和が生じる。この磁気飽和の結果、発電電力と一次側の損失が均衡するようになり、最終的に電圧と電流は一定値に収束する。このように、停電時でも回生を行わずに自己励磁によるブレーキ動作の継続が可能である。

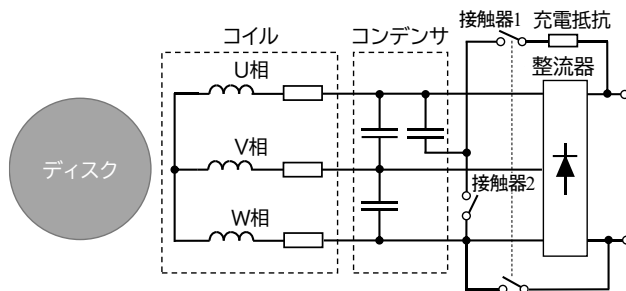


図2 回路の構成例

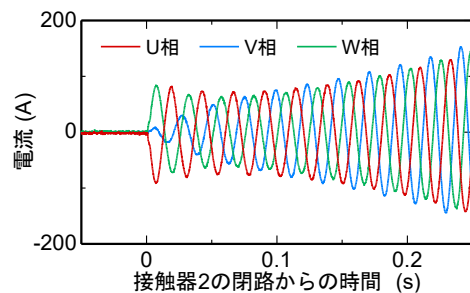


図3 通流初期の電流波形（実験結果例）

2.4 先行研究と課題

コンデンサ自励現象に関しては、一般的な誘導機を対象とした研究が多数報告されている⁷⁾。一方、鉄道車両の渦電流ブレーキに本現象を応用した研究事例はきわめて限られ、リニアレールブレーキを対象とした研究^{4) 5) 6)}が数少ない報告例の一つである。リニアレールブレーキは提案ECBと構造的特徴を共有することから、提案ECBの先行研究として位置づけられる。

本稿の検討前までの調査では、高速度（例：約200 km/h以上）・小ギャップ（例：約10 mm以下）の条件下で、微弱な初期励磁電流からでも自己増幅により励磁電流が磁気飽和レベルまで増大し、コンデンサ自励現象が容易に成立することを確認している。一方、速度が十分に高くない場合やギャップが大きい場合など、自励現象の発現条件が不十分と考えられる状況下については、十分な検討が行われていない。とりわけ、そのような状況下での起動時の特性は未解明であり、提案ECBの適用可能な速度域・ギャップ域の拡大に向けて解明が必要である。

2.5 試験系

本研究では、2.2節で述べた構造的特徴を有する提案ECBについて、供試機における電気特性を測定し、その結果から等価回路（回路定数）を同定して、速度低下およびギャップ拡大時の定数変化等を定量的に把握する。このため、先行研究に引き続き、提案ECBと同様の構造的特徴を持つ既存のリニアレールブレーキ試験機を供試機として用いることとした。図4(a)に試験系の全体構成、図4(b)に拡大写真を示す。一次側は、防護カバーなどを含めて直線形状換算で長さ1.5 m以下、幅125 mm以下、高さ130 mm以下であり、提案するブレーキにおいて想定される寸法に近い。構造は3相集中巻で、磁極ピッチは約200 mm、標準的なギャップは8~10 mm程度、最大で15 mm程度まで拡大可能である。二次側には、円周部の断面形状がレール頭部と同様である鋼製軌条輪を用いている。直径は約1.1 mであり、電動機によって回転する。軌条

輪の外周部に円弧状の一次側が対向配置される。ブレーキトルクは一次側を固定する架台に生じる反力をロードセルで測定した。

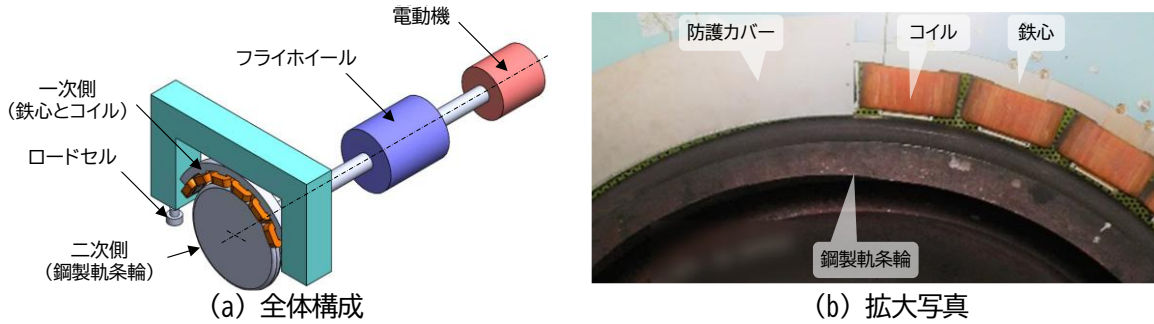


図4 試験系

3. 等価回路および特性図に基づく解析手法

本章では、提案 ECB の解析に用いる等価回路の定式化と、非線形磁気特性を考慮した特性図の構築、ならびに収束条件（安定点）の導出手順を説明する。なお、本章で示す解析手法は、本稿の検討以前に高速度・小ギャップ条件下の検討に用いてきた手法^{5) 6)}と同一である。

3.1 等価回路および非線形磁気特性を考慮した特性図

3.1.1 等価回路

図5に提案 ECB の等価回路（整流器などは除く）を示す^{5) 6)}。提案 ECB は電気機器としては誘導機に類似するが、本研究では以下の理由により、一般的に用いられる T 型等価回路を用いない。

- ・二次側の構造：二次側が無垢の鋼材ディスクであるため、表皮効果と非線形磁気特性の影響が顕著である。そのため、T 型等価回路における励磁リアクタンスおよび二次回路定数が、滑り周波数および電流の大きさに依存する。
- ・巻線構造：集中巻により低次の空間高調波が大きく、トルクおよびエネルギー伝達に影響を及ぼす。そのため、基本波の滑りのみを用いて二次回路抵抗を定量的に表現することが困難である。
- ・モータ構造：リニアモータ構造であるため、端効果の影響を受ける。これにより、励磁リアクタンスと二次回路定数は滑りのみならず速度にも依存する。

以上の点を踏まえ、本研究ではリニア誘導モータの旧来の理論解析^{8) 9)}で用いられる等価回路を準用する。この回路は、一次側と二次側間の複素ポインティングベクトルに着目したものであり、T 型等価回路における励磁回路と二次回路を分離せず、これらを等価二次回路として一括で表現する。表皮効果、空間高調波、端効果を考慮したうえ、速度と周波数の2つのパラメータに基づき等価回路定数を定める。滑りが負で発電状態の場合は、等価二次抵抗 r_{2e} および入力抵抗 r_{in} は負値で表される。

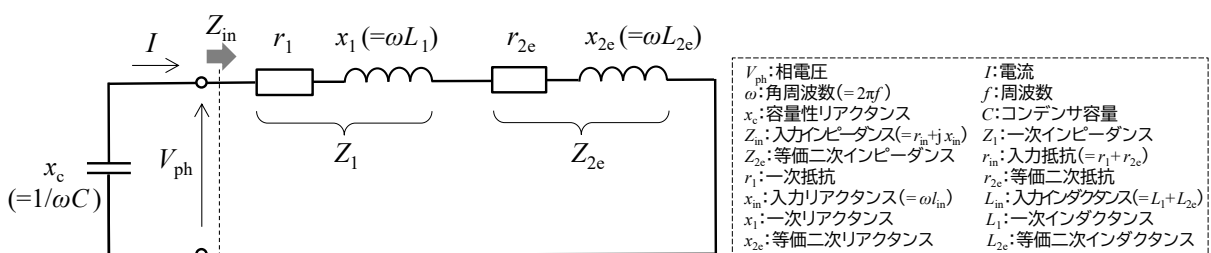


図5 提案ブレーキの等価回路

本研究では非線形磁気特性も考慮する必要があるため、パラメータとして新たに電流を加え、速度、周波数、電流の3つのパラメータに基づき等価回路定数を定める。これらのうち、速度については、ブレーキ力が重視される高速域（約 200 km/h 以上）では等価回路定数の変化が小さいため、本稿の検討前まではあまり議論の対象とされてこなかった。

自励現象が発現して収束状態にあるとき、等価回路定数は共振や電力等のつり合いから次式を満たす。

$$r_{in} = r_1 + r_{2e} = 0 \quad (\Omega) \quad (1)$$

$$\omega(L_1 + L_{2e}) - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad (\Omega) \quad (2)$$

$$V_{ph} = \omega(L_1 + L_{2e})I = \frac{I}{\omega C} \quad (V) \quad (3)$$

3.1.2 非線形磁気特性を考慮した特性図

前述の試験機の等価回路定数などについて、周波数 f と電流 I に対する特性図として整理した結果⁶⁾を図6に示す。本図では、コンデンサ自励現象での動作範囲に限らず、周波数 f と電流 I を強制的に変化させた場合を表している。速度は最高速付近の 300 km/h，ギャップは提案ブレーキとしては小さい 7.7 mm であり、本稿の検討以前に主に対象としてきた、自励現象が発現しやすい条件である。図6より、入力抵抗 r_{in} や等価二次抵抗 r_{2e} が周波数のみならず、電流に対しても非線形磁気特性の影響で変化している様子が分か

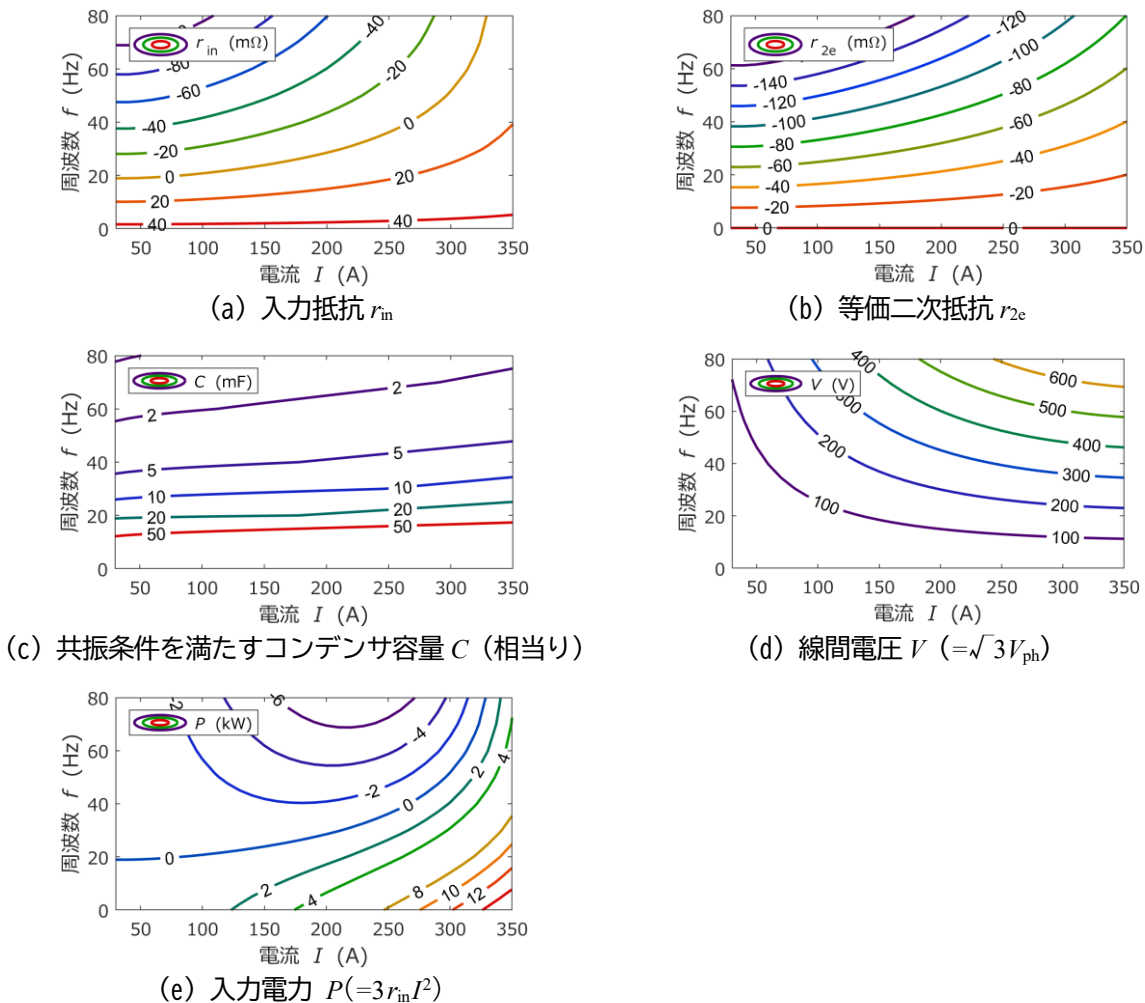


図6 非線形磁気特性を考慮した特性図（速度 300 km/h，ギャップ 7.7 mm）

る。また、同様の非線形磁気特性の影響により、共振条件を満たすためのコンデンサ容量 C も電流に応じて変化している。但し、コンデンサ容量の変化量は大きなものではない。

なお、ここでは省略しているが、一次抵抗 r_1 は周波数の増加に対して曲線的に増加し、電流に対しては殆ど変化しない。一次インダクタンス L_1 は周波数に対して殆ど変化せず、電流の増加に対して鉄心が磁気飽和するまで（約 150 A 以下）は概ね一定であり、飽和後は曲線的に減少する。入力インダクタンス L_{in} と等価二次インダクタンス L_{2e} は周波数に対して殆ど変化せず、電流の増加に対して単調減少する⁶⁾。

3.2 自励現象の発現と収束

自励現象の発現と収束について、容量 5 mF のコンデンサを接続した場合を例に挙げて説明する。本稿では自励現象の基本的な起動特性を議論するため、それとは無関係の整流回路は無視する。図 7(a)に前節の特性図における入力抵抗 $r_{in} = 0$ の曲線と共振条件を満たすコンデンサ容量 $C = 5$ mF の曲線を重ねて示す。直流側回路により初期充電されたコンデンサの電力を用いて初期励磁電流が流れる際、その周波数 f は式(2)に従い、入力インダクタンス L_{in} とコンデンサ容量 C で決定される共振周波数となる。すなわち、動作点は図 7(a)の $C = 5$ mF の曲線上に位置する。このとき、電流 I が領域Ⅰにあれば、入力抵抗 r_{in} が負なので発電電力が生じる。これによりコンデンサ電圧が上昇し、電流 I も増加する。電流 I は増加を続けて領域Ⅱに到達する。領域Ⅱでは入力抵抗 r_{in} が正となるため、前記とは逆に電流 I が減少する。このような動作を経て、最終的に電流 I は $r_{in} = 0$ の曲線と $C = 5$ mF の曲線の交点 A に収束し、式(1)を満足する。

ここで、コンデンサ容量 $C = 5$ mF の曲線上における入力抵抗 r_{in} の挙動を概観するため、周波数 $f = 40$ Hz における電流 I に対する入力抵抗 r_{in} を図 7(b)に示す。収束点 A が満たす条件として $r_{in} = 0$ に加え、収束点 A の近傍における電流 I に対する r_{in} の変化率が正であることが確認できる。

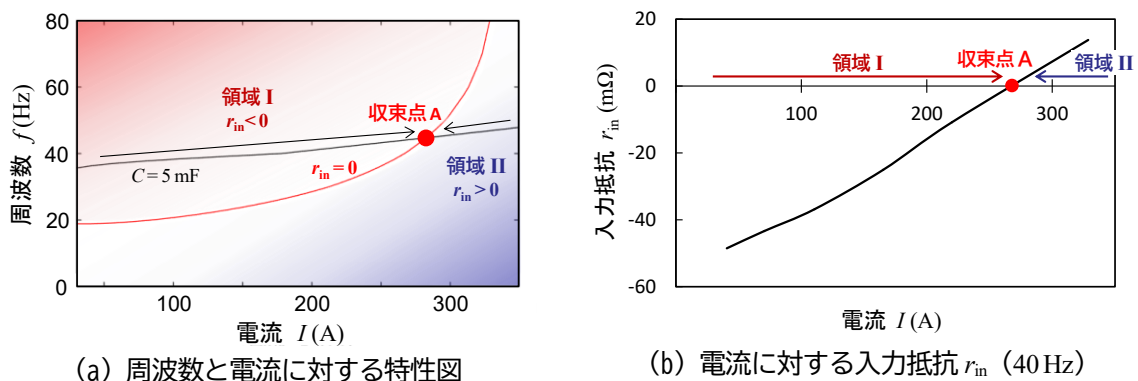


図 7 自励現象の説明（速度 300 km/h、ギャップ 7.7 mm）

4. 速度低下・ギャップ拡大時の起動特性：実験結果と等価回路に基づく考察

4.1 起動時の挙動

前述の試験系において、速度が十分ではない、またはギャップが大きい条件で起動させると、図 8 のような挙動が確認された。これらの挙動は速度が十分に高く、ギャップが小さい条件下では見られなかったものである。同一の速度およびギャップ条件下でも、初期励磁電流の大きさによって挙動が下記の 3 パターンに分かれる場合があることが確認された。すなわち、速度やギャップによっては、収束点が初期励磁電流の大きさに依存することが明らかとなった。この事象は図 7 では説明ができない。

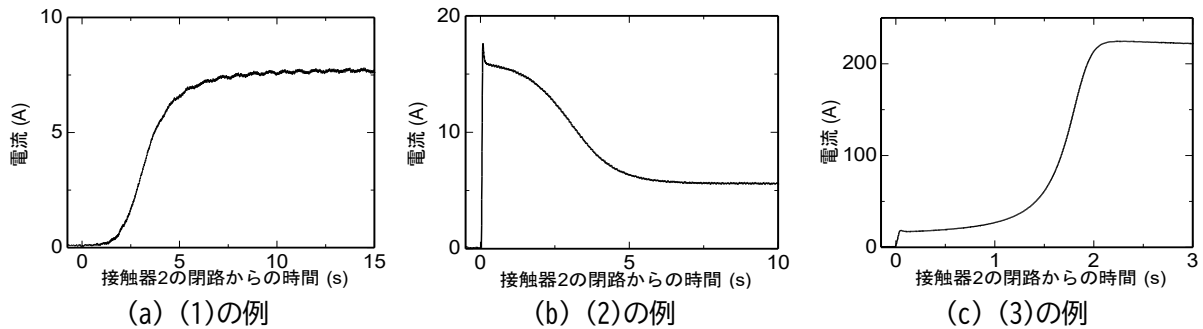


図8 速度が十分ではない場合の起動時の挙動（実効値表示）
（速度 150～160km/h，ギャップ 7.7 mm，コンデンサ容量 6 mF）

- (1) 微小な初期励磁電流を流した場合，電流は僅かに増加し，収束点 A とは異なる小さな値に収束。
- (2) 初期励磁電流が大きくない場合，電流は減少し，収束点 A とは異なる小さな値に収束。
- (3) 初期励磁電流が大きい場合のみ，電流は増加し，収束点 A の大きな値に収束。

4.2 等価回路から見た特性の変化

前節で述べた事象について，等価回路定数を用いて考察する．速度が低下した場合やギャップが拡大した場合について，前出の図 7(b)と同様に，電流 I に対する入力抵抗 r_{in} を実験で取得した結果を図 9 に示す．速度について 5 種類，ギャップについて 2 種類を示している．本図から下記の特徴が読み取れる．

- ・電流 I の増加に対して，入力抵抗 r_{in} の値は「増加→減少→増加」のような挙動を示し，極大値と極小値をそれぞれ 1 回示す曲線となる．
- ・速度が低下するほど，上記の「増加→減少」の挙動が顕著となる．但し，特に速度が低く，かつギャップが大きい条件（図 9(b)の 100 km/h）では当該挙動は弱まる．
- ・速度低下とギャップ拡大により，曲線全体がグラフ内で上方へ移動する．また，ギャップ拡大時は，速度低下に伴う上方への移動がより高速側から現れる．
- ・条件によっては，入力抵抗 r_{in} が零となる電流値が 3 点存在する場合がある．

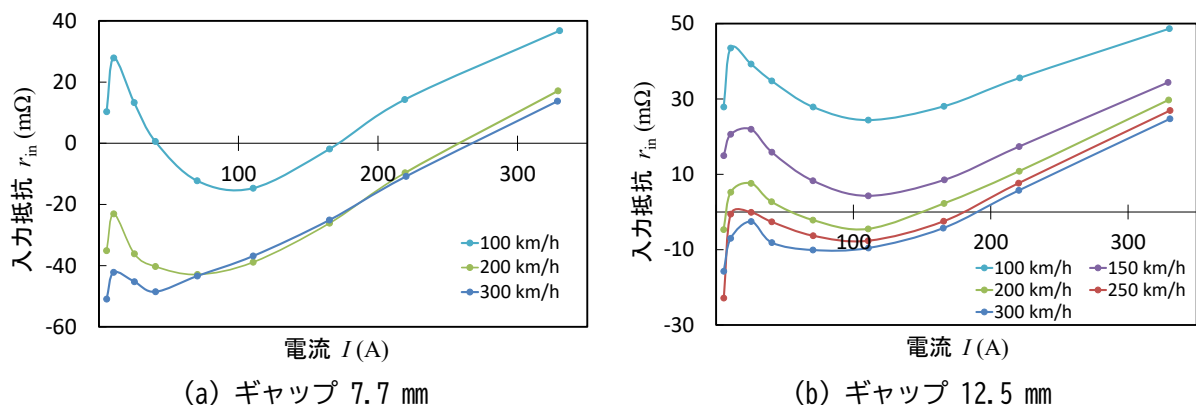


図9 速度・ギャップ変化時における入力抵抗の電流特性（周波数 40 Hz）

図 9(b)における 200 km/h の曲線の拡大図を図 10 に示す．この条件下では，入力抵抗 r_{in} が零となる電流値が 3 点存在している．これにより，初期励磁電流の大きさに応じて収束点が異なる場合がある理由について，以下のよう解釈できる．これは 4.1 節に示した 3 つの挙動パターンと一致する．

- (1) 初期励磁電流が領域Ⅲにあるとき、入力抵抗が負なので、電流は僅かに増加し、収束点 B に至る。
 - (2) 初期励磁電流が領域Ⅳにあるとき、入力抵抗が正なので、電流は減少し、収束点 B に至る。
 - (3) 初期励磁電流が領域Ⅰにあるとき、入力抵抗が負なので、電流は増加し、収束点 A に到達する。
- 速度低下やギャップ拡大で現れた新たな収束点 B は、収束点 A と同様に式(1)を満たすため、動作点となり得る。一方、不安定平衡点 C においても式(1)を満たすが、電流 I に対する r_{in} の変化率が負であるため、不安定点となり動作点にならない。

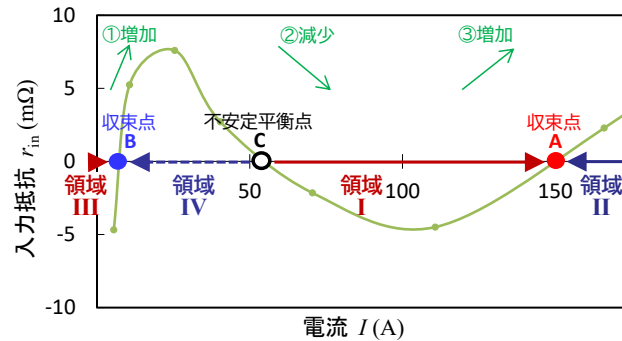


図 10 入力抵抗の電流特性 ～ 入力抵抗が零となる電流値が 3 点存在する場合
(速度 200 km/h, ギャップ 12.5 mm, 周波数 40 Hz)

4.3 二次側の非線形磁気特性による影響

電流 I の増加に対して、入力抵抗 r_{in} が「①増加→②減少→③増加」といった挙動を示すメカニズムについて考察する。このような等価回路定数の電流依存性は、構成部材が有する非線形磁気特性に起因すると考えられる。本ブレーキにおける非線形磁気特性としては、鉄心の磁気飽和、軌条輪表層の初期磁化特性、軌条輪表層の磁気飽和の 3 点が挙げられる。このうち、鉄心の磁気飽和は電流が大きい場合に発電能力を低下させ、入力抵抗を増加させる要因となる。したがって、「③増加」は鉄心の磁気飽和によるものと考えられる。他方、「①増加」と「②減少」は残りの軌条輪表層の初期磁化特性と磁気飽和に起因すると推定される。この仮説を検証するため、前述のリニア誘導モータの理論解析^{8) 9)}を用いて確認を試みた。

図 11(a)に理論解析による入力抵抗 r_{in} の概算値を示す。本図は線形磁気特性を前提とする理論解析において、二次側の比透磁率 μ_r を変化した場合の結果を示している。なお、簡単化されたモデルを扱う理論解析の計算精度には限界があるため、比透磁率 μ_r に依存しない一次抵抗 r_1 の交流損失を補正し、入力抵抗 r_{in} の平均的なレベルを調整している。解析の結果、比透磁率 μ_r が適度に低い場合 ($\mu_r=50$ 程度) に入力抵抗 r_{in} が最小となり、発電能力が最大化されることが分かった。滑り周波数が高い条件下では、二次側の比透磁率 μ_r が適度に低いほうが二次側回路の力率が向上するためと考えられる。図 11(b)に磁界強度 H に対する二次側(レール鋼)の比透磁率 μ_r の測定値¹⁰⁾を示す。磁界強度 $H=1$ kA/m 付近を境として、初期磁化特性と磁気飽和によ

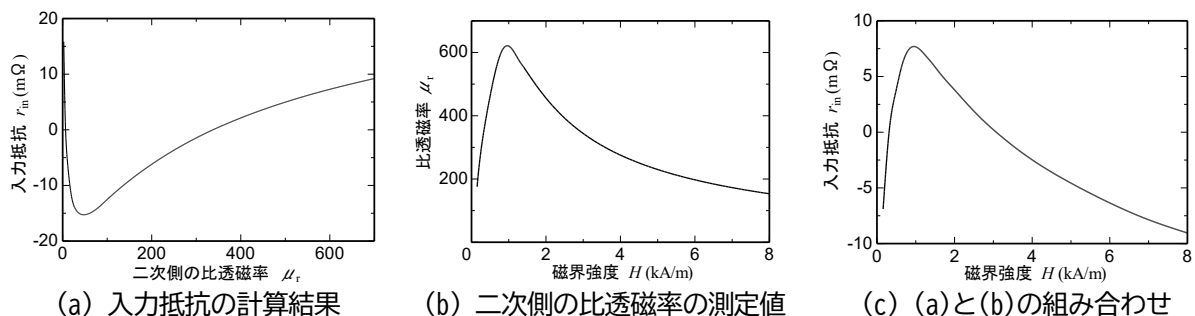


図 11 二次側の非線形磁気特性による入力抵抗への影響 ～ 理論解析による概念検討
(速度 200 km/h, ギャップ 12.5 mm, 周波数 40 Hz)

る比透磁率 μ_r の低下が見られる。図 11(b)の比透磁率 μ_r に図 11(a)の入力抵抗 r_{in} を対応させたものを図 11(c)に示す。図 11(c)は電流 I に対する入力抵抗 r_{in} の挙動を概念的に表現したものである。電流 I と正の相関がある磁界強度 H の増加に伴って入力抵抗 r_{in} の「①増加→②減少」の挙動が現れている。

以上の結果から、入力抵抗 r_{in} における「①増加→②減少」の挙動は、軌条輪表層の初期磁化特性と磁気飽和に起因するものであると推定される。なお、図 9(a)に示すように、この入力抵抗 r_{in} の増減挙動は、高速度・小ギャップの条件下においても生じている。しかしながら、当該条件では入力抵抗 r_{in} の増減が負の領域内に留まっていたため、起動時の電流波形には顕著な影響を及ぼさなかったものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、提案するコンデンサ自励現象を活用した付随車向け電気ブレーキにおいて、自励現象の発現条件が十分ではない速度低下およびギャップ拡大時における起動特性を調査した。その結果、初期励磁電流の大きさに応じて、電流が（１）僅かに増加して小電流に収束、（２）減少して小電流に収束、（３）増加して大電流に収束、のように３つの挙動パターンおよび２つの収束点に分かれる場合があることが確認された。このような挙動が生じる直接的な理由として、電流の大きさに対して、入力抵抗が零を挟んで正負の両側で極大値および極小値を示す特性を有することが明らかになった。さらに、そのメカニズムについて、リニア誘導モータの理論解析を用いて概念的に検討した結果、鉄心の磁気飽和に加え、二次側鋼材の初期磁化特性および磁気飽和に起因するものであると推定された。これらの事象は、自励現象の発現条件が十分に満たされる高速度および小ギャップにおいても内在しているが、入力抵抗が負領域に留まっているので、本稿の検討前までは顕在化しなかったものと考えられる。

今後は、本研究で得られた知見を基に、低速度域やギャップ拡大時でも確実に起動できる最小限の初期励磁電流の推定手法、およびそれに応じた初期充電電圧の設定方法などを検討し、提案 ECB の使用可能な速度範囲およびギャップ範囲の拡大を図る予定である。なお、本稿は起動特性の理解に主眼を置き、初期励磁電流の閾値の定量化等は対象外とした。これらは別稿にて体系的に報告する。

文 献

- 1) 山下誠, 加藤宏和, 石川栄, 高原英明: 新幹線付随車用電力回生ブレーキシステムの開発, 第 42 回鉄道サイバネティクスシンポジウム講演論文集, No.525, 2005
- 2) 望月旭: 新幹線電車のブレーキシステムの経緯, R&M, Vol.19, No.5, pp.44-49, 2011
- 3) 浮田啓悟, 坂本泰明, 佐藤光秀, 水野勉: 鉄道車両用コンデンサ励磁型渦電流ディスクブレーキの検討, 第 35 回電磁気関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集 (SEAD35) 講演論文集, No.OS3-4-4, 2023
- 4) 坂本泰明, 浮田啓悟: リニアレールブレーキに向けたインバータレス励磁方法の開発, 鉄道総研報告, Vol.36, No.6, pp.5-11, 2022
- 5) Ukita, K., Sakamoto, Y., Sato, M. and Mizuno T., "Characteristics of Self-Excited Rail Brake Using Capacitors," IEEJ Transactions on Electrical and Electronic engineering, Vol.18, No.3, pp.463-469, 2023.
- 6) 浮田啓悟, 坂本泰明, 佐藤光秀, 水野勉: 自己励磁形レールブレーキのギャップ変化の諸影響を考慮したコンデンサ容量の選定方法, 電気学会論文誌 D, Vol.144, No.9, pp.654-661, 2024
- 7) M. Godoy Simões, Felix A. Farret, "Modeling and Analysis with Induction Generators 3rd Edition," CRC Press, 2021.
- 8) Nonaka, S. and Fujii, N., "Simplified Two-Dimensional Analysis of Linear Induction Motors," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.23, No.5, pp.2832-2834, 1987.
- 9) 野中作太郎: 片側式リニア誘導モータの等価回路定数と特性計算式の検討, 電気学会論文誌 D, Vol.115, No.3, pp.223-232, 1995
- 10) Sakamoto, Y., Kashiwagi, T., Hasegawa, H., Sasakawa, T. and Fuji, N., "A Study on the Transverse Edge Effect of an Eddy Current Brake with a Solid Steel Secondary," IEEJ transactions on electrical and electronic engineering, Vol.7, No.3, pp.322-328, 2012.

超音波を用いた車輪・レール接触位置の動的測定手法

深貝 晋也*

Dynamic Measurement Method for Wheel-Rail Contact Position Using Ultrasonic Waves

Shinya FUKAGAI

Information on the contact positions between train wheels and rails when travelling through curves is essential for evaluating new wheel and rail profiles, investigating wear and damage, and analyzing the sources and mechanisms of wheel-rail noise. The objective of this study is to dynamically measure wheel-rail contact positions using surface waves. Measurement tests were conducted using a full-scale test machine, a test track, and a train. The reflection position of the surface waves corresponded to the edge of the wheel-rail contact area. This result indicates the usefulness of surface waves as a method for measuring wheel-rail contact positions. Additionally, the study showed that the characteristic differences in contact positions between the leading and trailing axles of a bogie, as well as the two-point contact near the gauge corner of a high rail, can be evaluated using real measurements.

キーワード：車輪・レール，接触位置，超音波，表面波，レイリー波，二点接触

1. はじめに

鉄道車両の輪軸は、車軸とその両端に固定された車輪から構成されており、左右の車輪は一体となって回転する。車輪踏面（レール頭頂面と接触する部位）にはテーパが設けられており、円錐形状をなしている。そのため、車両が曲線を通過する際、内軌（曲線内側のレール）側の車輪接触部の半径は、外軌（曲線外側のレール）側のそれよりも小さくなる。この半径の差が、内軌と外軌の走行距離の差を補償し、その結果、車両は滑らかに曲線を通過することができる。

一般的に、鉄道車両は1台車当たり2軸の輪軸を備え、車体1両には2台車が配置されている。輪軸は、左右の軸箱を介して台車に懸架されており、その変位は制限されている。車両が急曲線を通過する場合、台車のヨー角姿勢により、前側輪軸（以降、前軸と称する）は外軌側に寄る一方、後側輪軸（以降、後軸と称する）は軌道中央付近にとどまる。こうした条件下では、前軸において車輪とレールの間の相対ヨー角（アタック角）が大きくなり、横方向（車軸方向）の接線力が発生し、後軸では左右車輪間の半径差が不足するため、縦方向（車輪回転方向）の接線力が生じる¹⁾²⁾³⁾。こうした接線力は、車輪およびレールに繰り返し作用することにより、その接触部を局所的に摩耗させるほか、損傷を生じる要因となる場合がある⁴⁾⁵⁾⁶⁾。しかしながら、車輪・レール接触位置は、車輪とレールの幾何学形状、車両の運動特性、軌道構造等の様々な要因により変動し、車輪踏面およびレール頭頂面における接線力の負荷履歴は一樣ではない。したがって、車輪・レール接触位置が車輪踏面およびレール面上でどのように変動するかを把握することは、摩耗や損傷の評価において重要である。また、急曲線におけるレール頭頂面の波状摩耗や摩擦音の発生を抑制するために、微量の潤滑材が地上設置型の散布装置によりレール面上に塗布される場合がある。塗布された潤滑材は車輪とレールの間での付着の繰り返しによって、レールの長手方向に展延されていく。したがって、潤滑材の展延挙動も、車輪・レール接触位置の変動の影響を受けると考えられ⁷⁾⁸⁾、その傾向を評価することにより、散布装置の設置位置や数の適正化につながる可能性がある。その他、車輪・レール接触位置

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

は、脱線⁹⁾¹⁰⁾や車輪・レール摩擦音¹¹⁾の発生メカニズムや車輪およびレールの新しい断面形状¹²⁾に関する調査や研究開発においても基本的な情報となるため、その実軌道条件下における分布特性を定量的に把握することは、鉄道システムの安全性および信頼性の向上に寄与するものと考えられる。

車輪・レール接触位置の推定には、数値解析が一般的に用いられている^{13)~20)}。しかしながら、高精度な数値解析に必要な幾何形状や変位量の計測には多大なコストと労力を要し、車両や軌道のわずかな動的变化であっても、接触条件が大きく変化する可能性がある。一方、車輪・レール接触状態を実測により評価する手法は限られているが、次のようにいくつかの方法が報告されている。Andrews²¹⁾は、車輪とレールの間にカーボンシートや普通紙を挿入した上で、静的に接触させることで接触面形状、接触面積を評価した。車輪径や条件による接触面形状の変化を示したほか、車輪表面に残る加工痕（削正痕）が接触面積に与える影響を調査した。Kumar および Rajkumar²²⁾は、走査型電子顕微鏡で一般的に使用されるレプリカテープを用いて同様の評価を行った。彼らは、荷重負荷の繰り返しによって生じる塑性変形や摩耗により、接触面積および接触圧が変化することを示した。また、測定された面積を実際の接触面積に換算するために、テープ厚さごとに異なる補正係数を適用した。Poole²³⁾は、実物大の車輪・レール試験機において、レール頭頂面に多数の孔を配置し、各孔に圧縮空気を供給し、車輪が孔の上を通過する際の圧力変化を監視するという独自の手法により、転がり接触中の車輪とレールの接触面積を評価した。しかしながら、これらの手法はレールに対する複雑な改造や静的な接触等の制約を要し、室内評価への適用に限定される。

現地、現車による測定に関しては、走行車両に赤外線サーモグラフィカメラを搭載し、車輪・レール接触部を撮影する手法が報告されている²⁴⁾²⁵⁾。この方法では、車輪・レール間の摩擦熱による踏面温度の局所的な上昇から接触位置を推定する。また別の手法としては、接触位置の変化にともなって車輪に生じるひずみ分布の違いに着目した例もある²⁶⁾。これらの手法はいずれも、曲線全体にわたって連続的な計測が可能であるという利点を有するものの、測定対象は計測用機器を構成した車輪に限定される。また試験車両の準備や専用機器の仮設が必要であり、手続きや事前準備に多大な労力を要すると考えられる。より簡便な方法として、著者らはフィルム式圧力測定システムを用い、実軌道を走行する車両の各車輪とレールとの接触形状および接触位置の可視化を行った²⁷⁾。しかしながら、フィルムセンサは車輪・レール間に作用する高い接触圧に対して十分な耐久性を有しておらず、長編成列車への適用や繰り返しの測定には制約がある。さらに、外軌ゲージコーナー（GC）では車輪フランジ部との間でせん断力も作用するため適用が困難である。

超音波計測は、車輪・レール接触状態をその場で評価する手法として、有望な方法の一つとして考えられる。この手法では、レールまたは車輪内部に超音波のバルク波を伝播させ、接触部から反射して戻ってくる波の強度（振幅）を測定する。接触部では非接触部に比べて反射強度が低下するなどの現象を利用することで、接触剛性や接触圧分布への換算評価が行われた^{28)~36)}。この手法は、もともと小型の実験室試験を通じて検討され^{37)~39)}、その後、実物大の車輪・レール試験機に適用された^{40)~43)}。しかしながら、接触部に正対する位置に超音波の発振・受振用センサを配置する必要があること、あるいは入射角と反射角が等しくなる位置に、発振および受振用のセンサをそれぞれ配置する必要があるなどの制約が残されている⁴³⁾。これらの制約は、特に接触位置がGCにある場合に問題となり、反射波を捉えることが困難になる。

一方で、表面を伝搬する超音波（以降、表面波とする）が接点において反射する挙動を利用して接触の状態を評価する手法が報告されている⁴⁴⁾。バルク波とは異なり、表面波は物体表面に沿って伝播し、角部を回り込んで進む特性を有する。そこで本研究では、表面波のこうした特性を活用し、実軌道を走行する車両の車輪・レール接触位置を動的に計測する新しい手法の適用を検討した。レール側面に設置したセンサによって、車輪とレールの接触部から反射される表面波を捉えることで、接触位置の計測を可能とした。

初期計測は実験室環境で実施され、その後、実軌道における試験へと適用された。なお、本稿は、ASME の許可を得て、文献 45 を和訳し、論旨を変えずに再構成したものである。

2. 表面波を用いた測定手法

本研究では、従来報告されているバルク波を用いた車輪・レール接触面形状等の測定手法とは異なり、表面波を用いた車輪・レール接触位置の測定を検討した。図 1 に、バルク波および表面波を用いた測定手法の概念的な違いを示す。バルク波とは、材料内部を伝搬する超音波を指す。車輪またはレール内部を伝搬するバルク波の接触界面における反射波の強度を測定することで、接触状態を評価することができる（図 1(a)）。バルク波法を用いて車輪・レール接触面の形状や圧力分布を評価するための室内試験は数多く実施されている³⁸⁾³⁹⁾⁴¹⁾。しかしながら、これらの手法では、接触面に対して超音波を垂直に入射させる必要があり、そのためにはレールに切欠き等の加工を施す必要がある。加工を施さずに測定を行うため、2つのセンサを用いる構成（ピッチキャッチ法）を適用した例も報告されている⁴³⁾。しかしこの方法では、入射角と反射角が等しくなるようにレール頭部下部の位置にセンサを設置する必要があり、測定可能な範囲はレール頭頂面の中央付近に限定される。さらに、レールが摩耗すると測定が困難になる可能性がある。したがって、これらの手法を実軌道へ適用するには依然として課題が残されている。

一方、Ooi および Dwyer-Joyce⁴⁴⁾は、材料表面に沿って伝搬する超音波表面波を用い、接触点からの反射波の強度を測定することで接触状態を評価する手法を報告している。この手法では接触面の詳細な形状や内部状態を評価することはできないが、超音波が表面に沿って伝搬するため、バルク波のような入射角に関する制約を受けない（図 1(b)）。また、表面波が伝搬する範囲がそのまま測定可能領域となるため、レール頭頂面のみならず、車輪フランジ部と接触する GC においても測定可能と考えられる。

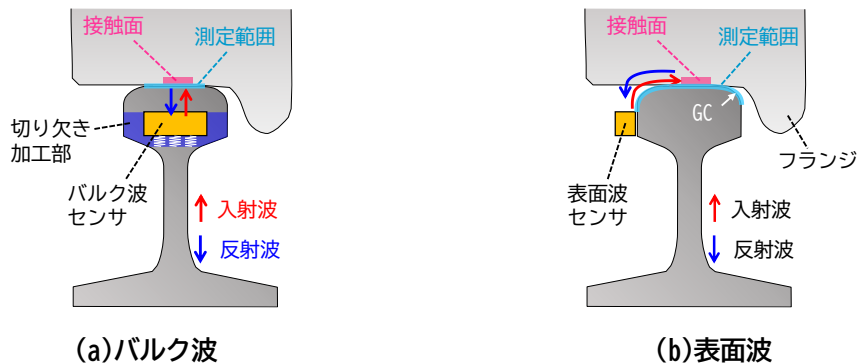


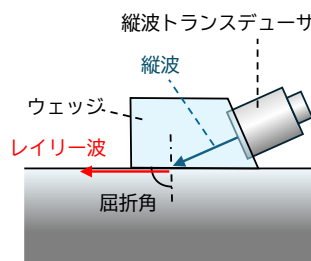
図1 測定手法の概念的な違い：表面波を用いた測定では、レールへの切欠き加工などの機械的処理を必要とせず、広い測定範囲を得ることができる。

図2 に表面波センサの外観および表面波の伝搬イメージ、表1 に表面波センサの仕様をそれぞれ示す。表面波には、レイリー波、表面せん断波、ラブ波、ラム波など、さまざまな種類がある。また一般に、センサの周波数が高いほど信号の減衰が大きくなる。さらに、測定にはより高いサンプリング周波数が必要となり、データ取得システムへの負荷が増大する。一方で、周波数が低い場合にはセンサのサイズが大きくなり、レールへの取り付けが困難となる。これらの要因および既往研究⁴⁴⁾⁴⁶⁾の知見を踏まえ、適用する表面波を2.25 MHzのレイリー波とし、縦波用トランスデューサおよびウェッジを選定した。本トランスデューサには、短パルスの発生を特徴とする減衰材付き圧電コンポジット振動子(MSWQC-BMC 3.5X.25, Baker Hughes Japan Co., Ltd.)を用いた。縦波のモード変換によりレイリー波を励起するため、スネルの法則に基づいて

屈折角が90度となるよう設計したウェッジにトランスデューサを取り付ける構成とした。また、レール頭部側面への設置を可能とするため、接触面積が比較的小さいウェッジを採用した。ウェッジとレールとの密着性を確保して表面波の伝搬を促進するため、レール表面はサンドペーパーで研磨した。さらに、ウェッジとレール間、およびトランスデューサとウェッジ間には、油性カプラント（SH-L, Inspection Technologies and Solution Co., Ltd.）を塗布した。



(a) センサ外観



(b) 表面波（レイリー波）の励起イメージ

図2 表面波センサの構成

表1 表面波センサの仕様

周波数（縦波）	2.25MHz
トランスデューサ外径	6mm
ウェッジの接地面積	11mm×19mm
屈折角	90°

図3に測定に用いた装置構成を示す。カウンタ（PXIe-6612, National Instruments）は、一定間隔で開始信号（パルス信号）を生成・出力し、パルスレシーバの測定を開始させる。この信号の間隔は測定におけるパルス繰返し周波数（PRF）を規定する。パルスレシーバ（JPR-600C 2CH, Japan Probe）は、カウンタから受信した開始信号に同期して測定を開始する。測定開始後、パルスレシーバは表面波センサに励起パルスを出力するとともに、センサからのアナログ信号を受信し、内部アンプで増幅し、バンドパスフィルタを通して必要な周波数帯域の信号を出力端子から出力する。オシロスコープ（PXIe-5114, National Instruments）は、パルスレシーバから出力される開始信号に同期し、パルスレシーバの出力端子からのアナログ信号を所定のサンプリング周波数で8ビットのデジタルデータ（-128～127）に変換する。変換されたデジタルデータはオシロスコープの内部メモリに保存される。保存されたデータは一定間隔でPCに転送され、画面表示やファイル保存などの各種処理が行われる。

3. 測定条件

3.1 実物大試験装置を用いた試験

実軌道における測定に先立ち、実物大車輪・レール接触試験装置を用いて接触位置の室内評価を行った。本試験装置は、実際の車輪およびレールを上下反転させた状態で配置し、油圧により接触・荷重負荷できる構造となっている。レールを長手方向に移動させることで車輪が従動回転し、極低速ではあるが転動状態の車輪とレールの接触位置を評価することができる。装置の詳細性能については既発表文献⁴⁰⁾に示されている。

図4に実物大車輪・レール接触試験装置を用いた試験時の状況を示す。修正円弧踏面⁴⁷⁾形状の車輪およびJIS E 1101 50N形状のレールを使用した。表面波センサは、車輪フランジとの接触を回避するため、レー

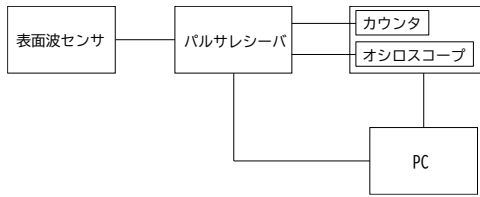


図3 測定に用いた装置構成

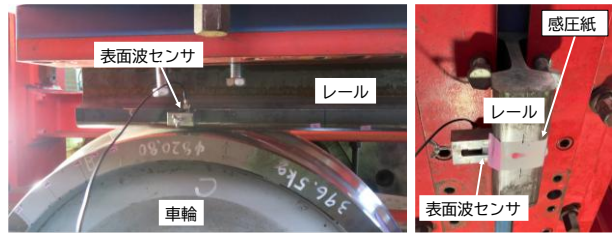


図4 実物大車輪・レール接触試験装置を用いた試験時の状況

ル頭部のフィールドコーナー（FC）側面（GCの反対側の面）に設置した。単独のセンサでの信号取得を可能とするため、超音波による接触位置測定にはパルスエコー法を採用した。垂直荷重 15kN もしくは 30kN を負荷した状態で、レールを秒速数十 mm の極低速で移動させ、車輪がセンサ設置位置上を通過する際の反射強度を測定した。比較のため、感圧紙（プレスケール 超高压用 HHS、富士フィルム）を用いた接触位置測定も実施した。感圧紙による試験では、車輪・レール接触部に感圧紙を挿入し、同じ垂直荷重を負荷した後、車輪を転動させることなく除荷した。上記の表面波および感圧紙を用いた試験を車輪とレールのまくらぎ（車軸）方向の相対位置を変えながら繰り返し行った。

3.2 実軌道での試験

実軌道試験においては、曲線内外軌の FC 側に表面波センサをそれぞれ設置し、試験列車の通過時に車輪・レール接触位置の測定を行った。測定箇所は単線の曲線区間（軌間 1067mm、曲線半径 200 m、カント 105mm、スラック 18mm）内である。レール断面形状は JIS E 1101 50N である。図 5 に測定箇所周辺の線形模式図を示す。試験列車は地点 A と地点 B の間を往復走行した。

図 6 に測定箇所の写真を示す。図 6(a)に示すように、曲線の内軌および外軌の双方に表面波センサを設置した。センサは、実物大試験装置を用いた試験と同様に、いずれもレールの FC 側に設置した。また、図 6(b)に示すように、センサは門型のマグネットホルダの脚部間に配置し、梁部からボルトで押さえつけることで固定した。パルス繰り返し周波数（PRF）は 10kHz に設定し、表面波の伝搬速度は既往研究⁴⁴⁾に基づき 2969 m/s とした。さらに、表面波によりレール上の接触位置を測定した同一箇所に、2 次元レーザセンサ（LJ-V7200, Keyence）を設置した。このレーザセンサは、車輪とレールのまくらぎ（車軸）方向の相対距離を測定するために用いたものである。相対距離は、車輪の反フランジ側リム面および外軌 FC 側面の間の距離とした（図 7）。レール上の接触位置の測定結果と、相対距離を組み合わせることで、車輪踏面上の接触位置を推定することを意図した。サンプリング周波数は 1kHz に設定し、ライン計測の測定ピッチは 0.1 mm とした。

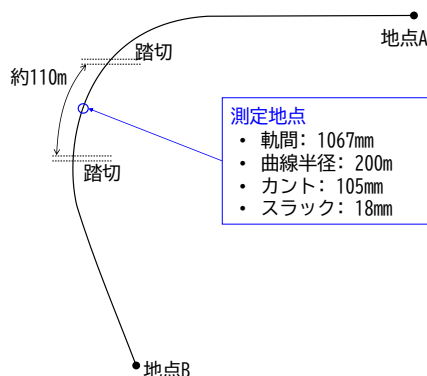


図5 測定箇所周辺の線形模式図

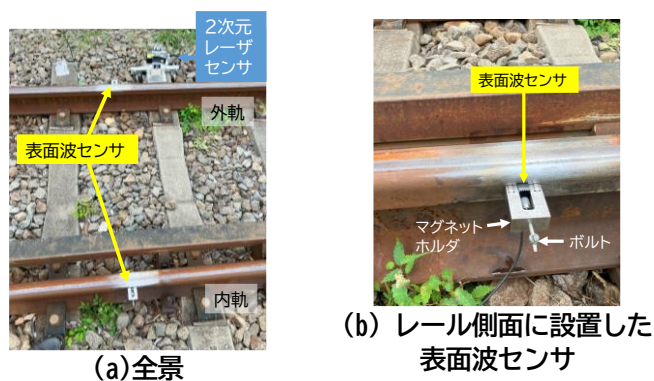


図6 測定箇所の状況

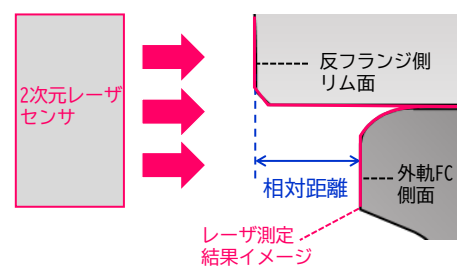
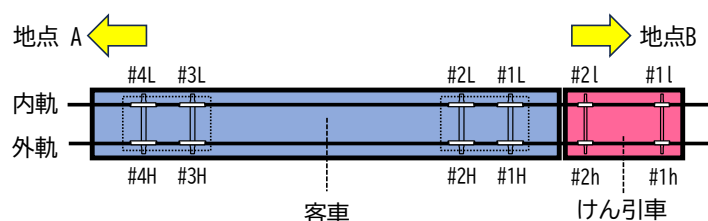


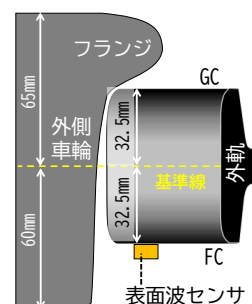
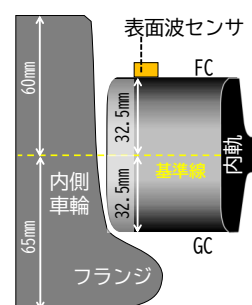
図7 車輪とレールのまくらぎ方向相対距離の測定イメージ



(a) 試験列車の外観



(b) 試験列車の車輪番号



(c) 車輪およびレール各部の名称

図8 試験列車の概要

表2 試験列車の仕様

	けん引車	客車
軸間距離	2.6m	2.1m
台車間距離	-	13.8m

図8に試験列車の概要を示し、表2にその諸元を示す。試験列車は、けん引車と客車の2両編成で構成された。車輪踏面形状は修正円弧踏面⁴⁷⁾である。試験列車の性能および試験線区の制約により、地点Aから地点Bへ走行する際の最高速度は約35 km/hとし、段階的に速度を変えた。一方、B点からA点へ走行する際の速度は約15~20km/hで一定とした。なお、「推進運転」時の速度制限は、「けん引運転」時よりも低く設定されている。

4. 結果と考察

4.1 実物大試験装置を用いた試験

図9に、実物大試験装置を用いて得られた表面波の反射強度のカラーマップを感圧紙による接触面とと

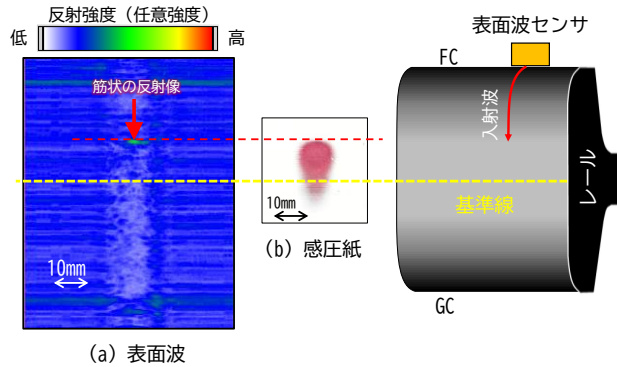


図9 車輪・レール接触位置の表面波による測定結果と感圧紙による観察結果の比較

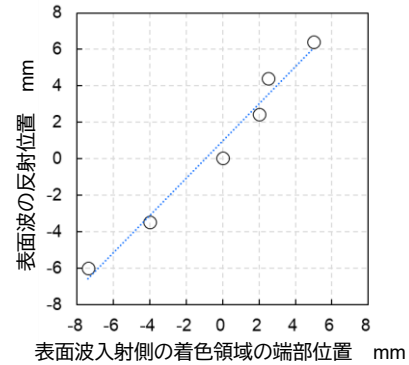


図10 車輪・レール接触位置の感圧紙による観察結果と表面波反射位置の比較

もに示す。ここで「反射強度」とは電圧として測定された信号振幅を指すが、任意に増幅させているため本研究では任意強度としており、以降も同様に扱う。表面波の反射強度を示すカラーマップの横軸は本来経過時間を表しており、図中右から左に向かってデータが取得されている。しかし、装置の移動速度を基に時間データを距離に換算した。この際、縦軸および横軸のスケールは同等となるように調整した。車輪との接触時の測定に先立ち、基準試験片をレールに押し当てることで、断面方向における基準線（レール断面方向の中心線）を決定した。さらに、L字型ゲージをレールに当て、感圧紙上にも基準線を付した。図9において、基準線は破線で示している。

図9(a)では、周囲よりも強度が高い筋状の反射像の位置を矢印で示している。一方、図9(b)では、感圧紙により車輪・レールの接触面が可視化されている。これは、車輪およびレールとの接触により感圧紙の発色層内のマイクロカプセルが破壊され、発色剤が付着することによる。レールの基準線を共通の基準として両者の結果を重ね合わせると、筋状の反射像の位置は、感圧紙における表面波入射側の着色領域の端部に対応していた。図10に、車輪とレールのまくらぎ（車軸）方向の相対位置を変えながら繰り返して得られた結果を示す。横軸は表面波入射側の着色領域の端部位置を示し、縦軸は反射強度のカラーマップから、レール長手方向において特に強度が高い領域を視覚的に抽出した後、レール断面方向距離と強度の二軸グラフからピーク近傍の位置を読み取り、反射位置とした。いずれもまくらぎ方向における基準線（レール断面中心）を0とし、GC側を正、FC側を負として表した。これより、両者の間には概ね比例関係が見られ、差は最大で約2mmであった。

以上の結果から、表面波測定の結果における高強度の反射像は、車輪とレールの接触部の表面波入射側の端部で生じていると考えられた。図11に、車輪・レール接触部からの表面波の反射挙動を推定した概念図を示す。

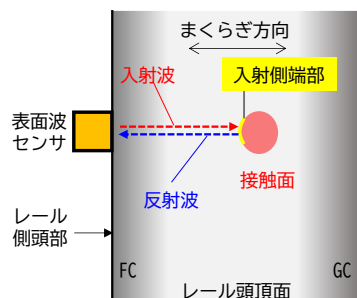
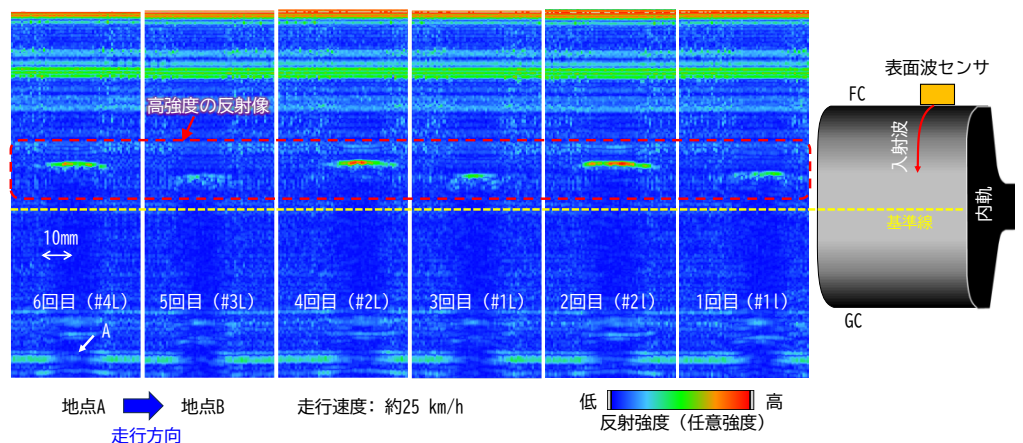


図11 車輪・レール接触部からの表面波の反射挙動を模式的に示した概念図

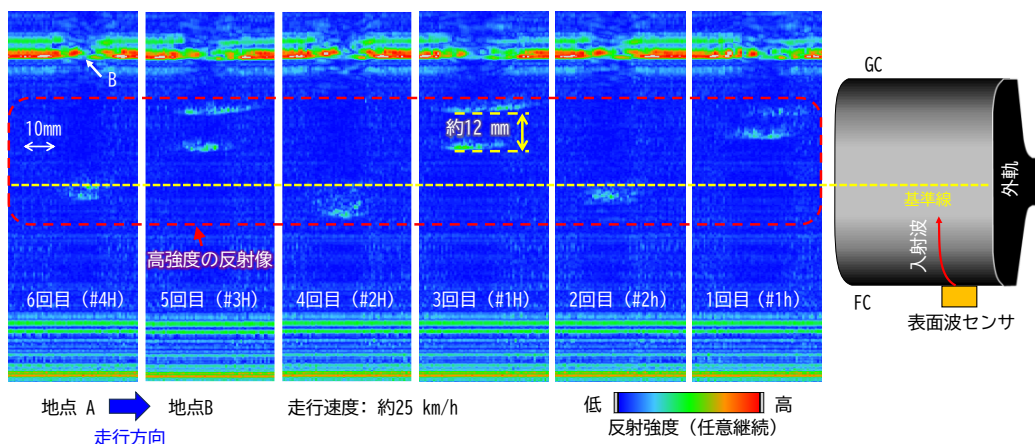
4.2 実軌道での試験

図 12 に、試験列車が地点 A から地点 B へ走行する際（約 25 km/h で走行）の表面波の反射強度のカラーマップの例を示す。カラーマップの横軸は、列車速度を考慮して距離に換算している。実物大試験と同様に、列車通過前に基準試験片を設置して求めた基準線（レール断面方向の中心線）を破線で示している。図 12(a) に示す内軌では、試験列車通過時に 6 つの高強度の反射像（破線枠で囲む）が観測された。これらの反射像が現れる時間間隔は、軸距を走行速度で除して推定される間隔と概ね一致していた。4.1 節に述べたように、表面波の反射位置は車輪とレールとの接触部の位置に対応すると考えられるため、図中の 6 つの高強度の反射像にはそれらが観測された順番とともに、対応する車輪番号を示している。

内軌および外軌のいずれにおいても、GC 近傍の表面凹凸に起因すると考えられる反射像について、6 回の反射像観測時において強度の低下（矢印 A および B で示す）を示した。さらに、内軌の 2 回目、4 回目および外軌の 3 回目、5 回目では、表面波センサが設置された FC 側に凸の緩やかな弧状形状を示し、特に内軌の 2 回目、4 回目ではその中央付近で強度が高くなる傾向が見られた。反射像はいずれも、レール基準線に対してセンサに近い FC 側に観測された。台車（またはけん引車）の進行方向前軸（奇数番号軸）に由来すると考えられる反射像は GC 側に近く、一方で同後軸（偶数番号軸）に由来するものは FC 側に近い位置に現れた。さらに、後軸の方が前軸よりも高い強度を示す傾向があった。図 12(b) に示す外軌においても、試験列車通過時に同様の 6 つの反射像（破線枠で囲む）が観測された。これらの反射像は内軌で観測され



(a)内軌



(b)外軌

図 12 試験列車通過時における反射強度のカラーマップの例（(a) 内軌，(b) 外軌）

たものとほぼ同時に出現した。前軸の車輪に対応する反射像は、レール中心に対して GC 側に近い位置に現れ、一方、後軸の接触位置はレール中央付近（相対的に FC 側寄り）に位置していた。先頭軸の位置が後軸よりも GC 側に寄るという傾向は、内軌の場合と一致している。また、先頭軸の車輪（#1h, #1H, #3H）では、それぞれ 2 本の筋状反射像が観測され、例えば 3 番目の反射像（#1H）では、これら 2 本の筋の間隔は約 12 mm であった。

図 12 に示す反射強度のカラーマップから、レール長手方向において特に強度が高い領域を視覚的に抽出した。その後、レール断面方向距離と強度の二軸グラフからピーク近傍の位置を読み取り、これを反射位置とした。図 13 に、試験列車通過時におけるレールのまくらぎ（横）方向での表面波反射位置を示す。測定された反射位置は、まずレール断面に沿った曲線距離として取得され、その後、実際のレール断面形状に基づいてまくらぎ方向の直線距離に補正した。反射位置は、まくらぎ方向における基準線（レール断面中心）を 0 とし、GC 側を正、FC 側を負として表した。外軌では、進行方向の前軸に対して 2 本の筋状反射像が観測されており、そのうち GC 側のものを破線で囲って示している。

表面波の反射位置の変動傾向は、走行方向によって異なっていた。台車（またはけん引車）内の前軸の反射位置は、後軸よりも GC 側に寄る傾向があり、この傾向は内軌および外軌のいずれにおいても共通していた。その結果、まくらぎ方向における内軌と外軌の反射位置間距離は、前軸の方が後軸よりも小さくなった。一方で、後軸同士の反射位置間距離は前軸よりも大きくなる傾向が見られた。

前軸と後軸の間の変動量は、内軌では約 2.5～5.5 mm、外軌では約 12～32 mm であり、外軌の方が内軌に比べて変動が大きかった。特に、地点 B から地点 A の走行における第 2 台車の後軸に対応する車輪 #1H では、他の後軸と比較して反射位置が GC 側へ寄る傾向が見られた。また、地点 A から地点 B への走行では速度が増加する条件であり、内軌の反射位置には大きな変動は見られなかったが、外軌においては、速度の増加に伴い後軸の反射位置が GC 側へ移動する傾向が見られた。

図 14 に、試験列車通過時における 2 次元レーザセンサの測定結果から算出した、外軌側車輪の反フランジ側リム面と外軌 FC 側面の相対距離を示す。相対距離の変動傾向は走行方向によって異なり、台車（またはけん引車）内の前軸の相対距離は後軸よりも大きい傾向が見られた。特に、地点 B から地点 A 点の走行における第 2 台車の後軸に対応する車輪 #1H では、他の後軸と比較して相対距離が大きくなる傾向が見られた。さらに、地点 A から地点 B 方向の試番について、速度の増加に伴い相対距離が増加（すなわち車輪が曲線外側へ寄る）する傾向が見られた。これらの結果を図 13 と比較すると、車輪が曲線外側へ移動して相対距離が増加するにつれて、内外軌ともに表面波の反射位置が GC 側へ移動する傾向が見られた。

図 13(b) に示す値と、図 14 に示す車輪とレール間の相対距離を加算することで、車輪踏面上における反射位置を換算することができる。図 15 に、車輪踏面へ換算した反射位置を示す。なお本試験では、2 次元レーザセンサによる相対距離の測定は外軌側のみで実施したが、予備的に実施した走行試験においては外軌および内軌の双方で車輪・レール間の相対変位を測定している。その結果、外軌と内軌の相対距離の間に線形関係が得られたため、この関係を用いて内軌側の相対距離を推定した。内軌側車輪では、反射位置は外側面端部付近に位置していたのに対し、外軌側車輪では、前軸においてはフランジ喉部付近、後軸においては車輪基準線からやや外側面寄りの位置に反射位置が存在した。レール上での位置とは異なり、外軌側車輪および内軌側車輪のいずれにおいても、曲線の半径方向に対して同一方向への変位が見られた。一方で、レール上で観測された傾向と同様に、まくらぎ方向における外軌側車輪と内軌側車輪の反射位置間の距離は、後軸よりも前軸の方が小さかった。反射位置の変動範囲は、内軌側車輪で約 7～20 mm、外軌側車輪で約 23～54 mm であり、外軌側車輪の方が内軌側車輪よりも変動が大きい傾向が見られた。さらに、レール上における反射位置の変動範囲と比較すると、外軌側および内軌側のいずれにおいても、その変動

は約2倍に増大していた。また、地点Aから地点Bへ走行する試験（速度増加条件）では、速度の増加に伴い後軸の反射位置が内軌側では反フランジ側、外軌側ではフランジ側へ移動する傾向が見られた。

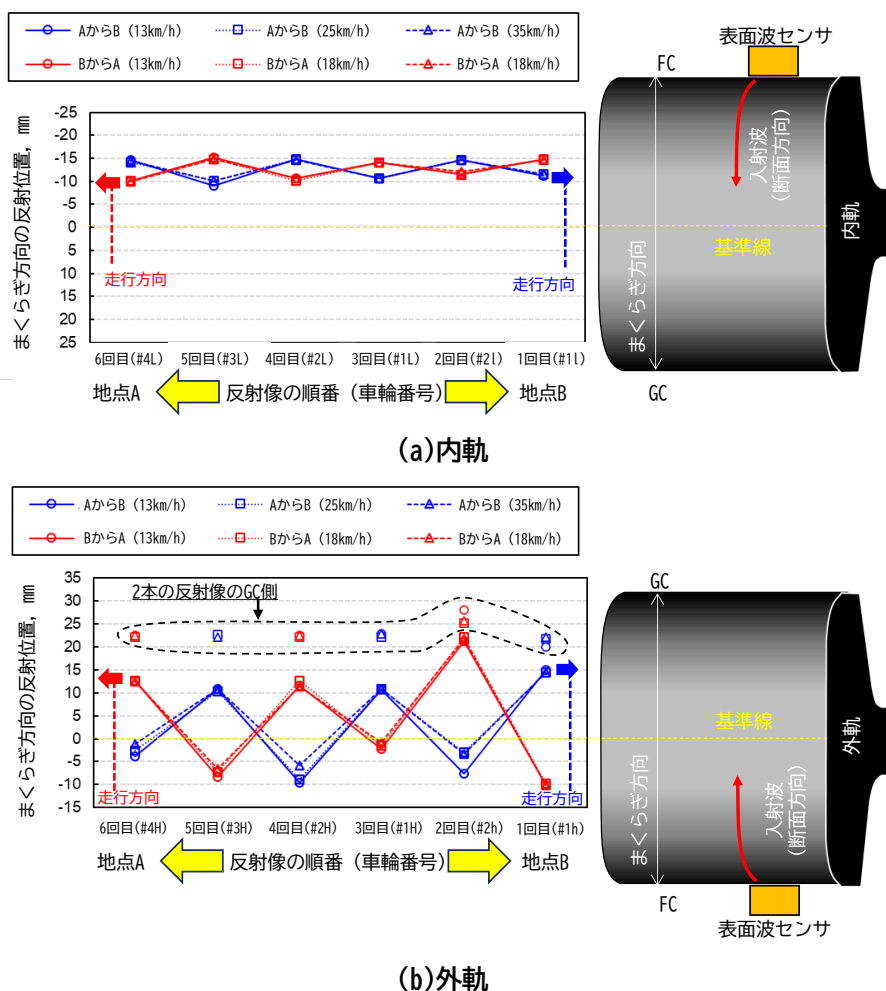


図 13 試験列車通過時におけるまくらぎ方向のレール上の反射位置，基準線を0とし，GC方向を正とした。

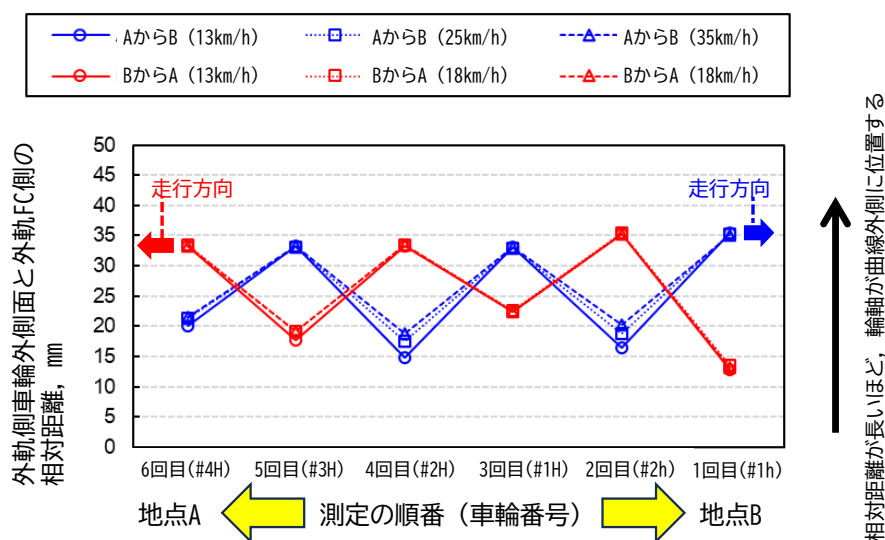


図 14 試験列車通過時における2次元レーザセンサの測定結果に基づいて算出した，外軌側車輪外側面と外軌FC側の相対距離

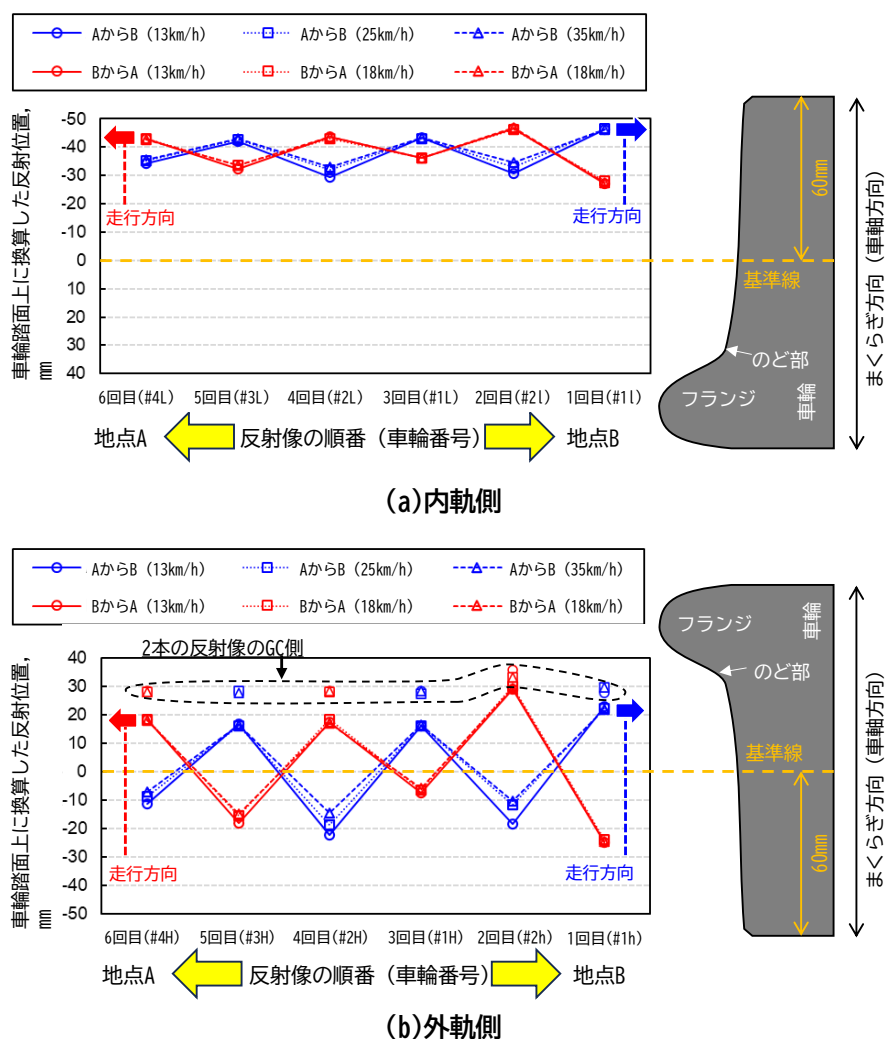


図 15 試験列車通過時における反射位置を車輪踏面上に換算した結果

車輪・レール接触部からの表面波の反射挙動を推定した概念図を図 16 に示す。車輪とレールの接触面の形状は、単純な場合には楕円形であり、より複雑な場合には複数の接触パッチからなる非楕円形状となることが知られている⁴⁸⁾。しかし、いずれの場合でも接触領域の端部は曲線で囲まれている。表面波センサがこの境界の中央付近とほぼ一致する位置にあるときに、図 16 に示すように、表面波センサが境界と正対の状態に近くなり最も高い反射強度が得られた可能性が考えられる。また、境界の中央付近では表面波が入射できる接触領域の端部延長が相対的に長くなり、強度が高くなった可能性も考えられる。レールの GC 近傍の表面凹凸に起因すると考えられる反射像が、筋状反射像が観測された 6 回のいずれにおいても反射強度の低下を示したことは、表面波が車輪・レール接触領域によって遮断されたために生じた可能性が考えられる。

内軌では、前軸よりも後軸で反射強度が高い傾向が見られた。これは、前軸と後軸で形成される車輪・レール間の隙間に起因する断面方向の角度変化や接触領域形状の違いによるものと考えられる。レイリー波の反射強度は、反射源のエッジ角度に依存して変化することが知られている⁴⁹⁾。

図 12 において、外軌の前軸では 2 本の反射像が見られた。この原因を調査するため、次のような検証を行った。試験列車を地点 A から地点 B へ走行させ、車輪#1H が測定位置直前に位置するように一時停止させた。その後、進行方向における車輪#1H の前方の外軌上面に、マーカを用いて黒色帯を記した。続いて、車輪#1H を極低速で通過させ、塗布部に残る接触痕を調査した。図 17 に、車輪#1H 通過後の外軌塗布部の

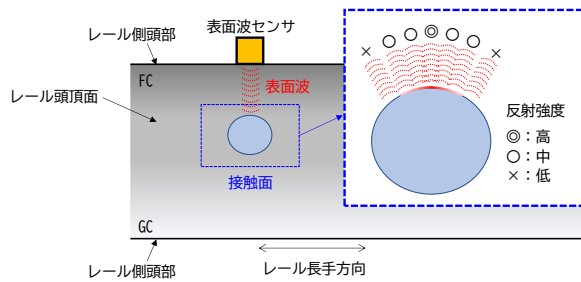


図 16 反射像内に生じる強度差に関する概念図

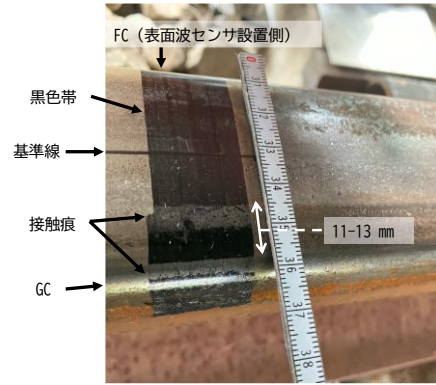


図 17 車輪#1H 通過後の外軌において記した黒色帯の状態

状態を示す。2つに分かれた接触痕が見られ、表面波センサ設置側における接触痕端部間の距離は約 11～13 mm であった。この距離は、図 12(b)における車輪#1H の第 1 および第 2 の反射像（実線および中空プロット）の間隔と概ね一致していた。このことから、外軌の前軸で観測された 2 本の反射像は、車輪・レール接触が 2 点に分離（2 点接触）したことに起因する可能性が考えられる。

地点 A から地点 B への試験走行（この方向のみ速度が変化）では、後軸において速度の増加に伴い接触位置が GC 側へ移動する傾向が見られた。この傾向は外軌および車輪踏面の外軌側・内軌側の双方で確認された。図 14 に示すように、これらの結果は速度の増加に伴って輪軸全体が曲線外側へ移動することによって起因すると考えられる。一方、内軌で接触位置の移動が見られなかったのは、車輪とレールの幾何学的関係によるものである可能性が考えられる。また、前軸では、外軌側におけるレール GC と車輪フランジの接触によって輪軸の移動が拘束されるため、速度の増加によってもレール上および車輪踏面上の接触位置にほとんど変化が生じなかったと考えられる。

なお、表面波は表面汚染物（落葉の膜やレール上の砂の堆積など）や表面凹凸に敏感であるため、これらの影響により表面波が大きく減衰したり、信号応答が乱れたりする可能性がある。したがって、場合によっては測定箇所から汚染物や塑性流動などによる変形部を除去する必要がある。加えて、きしり音などの車輪・レール間の摩擦に起因する振動は本測定のノイズとなり得る。これに対しては測定対象箇所のレール面に微量な潤滑材を塗布するなどの対応が必要となる可能性がある。こうした対策の要否は、接触位置測定の目的に応じて判断する必要がある。

5. まとめ

表面を伝搬する超音波を用いて、実軌道上を走行する車両における車輪・レール接触位置の測定を試みた。その結果を以下に示す。

- (1) 実物大試験装置を用いた試験の結果から、表面波センサにより観測された反射像は、車輪・レール接触領域の端部からの反射に起因することが示唆され、表面波が接触位置測定手法として有効であると考えられた。
- (2) 実軌道における車両走行試験の結果から、表面波の反射像の位置が、前軸か後軸かによってまくらぎ方向に規則的に変化する傾向が見られた。
- (3) 特に外軌における前軸の測定結果では、2 本の反射像が観測された。これは、車輪・レール接触が 2 点に分離する、いわゆる「2 点接触」に起因する可能性が考えられた。

- (4) 今回実施した条件では、単一の表面波センサにより、レール頭頂面からゲージコーナーに至る範囲において、車輪・レール接触位置を測定可能であった。

文 献

- 1) A.Matsumoto, Y.Sato, H.Ohno, M.Tomeoka, K.Matsumoto, T.Ogino, M.Tanimoto, Y.Oka, M.Okano, "Improvement of Bogie Curving Performance by Using Friction Modifier to Rail/Wheel Interface Verification by Full-Scale Rolling Stand Test," *Wear*, Vol.258(7–8), pp.1201–1208, 2005.
- 2) S. L.Grassie, J.A.Elkins, "Traction and Curving Behaviour of a Railway Bogie," *Veh. Syst. Dyn.*, 44(Suppl 1), pp. 883–891, 2006.
- 3) 石田弘明, 宮本岳史, 前橋栄一, 土井久代, 飯田浩平, 古川敦: 急曲線低速走行時の乗り上がり脱線に対する安全性評価手法, 鉄道総研報告, Vol.18, No.8, pp.5-10, 2004
- 4) S.H.Nia, C.Casanueva, E.Stichel, "Fast Wear Calculation for Wheel Profile Optimization," The 10th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Colorado Springs, CO, Aug. 30–Sept. 3, 2015.
- 5) B.Dirks, R.Enblom, M.Berg, "Prediction of Wheel Profile Wear and Crack Growth—Comparisons with Measurements," *Wear*, 366–367, pp. 84–94, 2016.
- 6) K.Karttunen, E.Kabo, A.Ekberg, "Estimation of Gauge Corner and Flange Root Degradation from Rail, Wheel and Track Geometries," *Wear*, 366–367, pp. 294–302, 2016.
- 7) H.Rahmani, D.Gutsulyak, L.Stanlake, B.Stoeber, S.Green, Carrydown of Liquid Friction Modifier," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: J. Rail Rapid Transit*, 236(9), pp. 1124–1134, 2022.
- 8) Z.S.Lee, G.Trummer, M.Harmon, B.White, K.Six, R.Lewis, "Studying the Transfer Mechanisms of Water Based Top-of-Rail Products in a Wheel/Rail Interaction," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: J. Rail Rapid Transit*, 238(2), pp. 164–174, 2024.
- 9) A.Kataori, K.Doi, H.Iijima, S.Momosaki, K.Horioka, "Development of Continuous Measurement Equipment for Angle of Attack and Results of Measurements," *JR East Tech. Rev.*, (19), pp. 46–49, 2011.
- 10) Y.Sato, A.Matsumoto, H.Ohno, Y.Oka, H.Ogawa, "Wheel/Rail Contact Analysis of Tramways and LRVs Against Derailment," *Wear*, 265(9–10), pp. 1460–1464, 2008.
- 11) F.G.De Beer, M.H.A.Janssens, P.P.Kooijman, "Squeal Noise of Rail-Bound Vehicles Influenced by Lateral Contact Position," *J. Sound Vib.*, 267(3), pp. 497–507, 2003.
- 12) J.Gerlici, T.Lack, "Railway Wheel and Rail Head Profiles Development Based on the Geometric Characteristics Shapes," *Wear*, 271(1–2), pp. 246–258, 2011.
- 13) J.B.Ayasse, H.Chollet, "Determination of the Wheel Rail Contact Patch in Semi-Hertzian Conditions," *Veh. Syst. Dyn.*, 43(3), pp. 161–172, 2005.
- 14) O.Polach, "Characteristic Parameters of Nonlinear Wheel/Rail Contact Geometry," *Veh. Syst. Dyn.*, 48(SUPPL. 1), pp. 19–36, 2010.
- 15) Z.Ren, S.D.Iwnicki, G.Xie, "A New Method for Determining Wheel-Rail Multi-point Contact," *Veh. Syst. Dyn.*, 49(10), pp. 1533–1551, 2011.
- 16) X.Yang, S.Gu, S.Zhou, Y.Zhou, S.Lian, "A Method for Improved Accuracy in Three Dimensions for Determining Wheel/Rail Contact Points," *Veh. Syst. Dyn.*, 53(11), pp. 1620–1640, 2015.
- 17) J.Pombo, J.Ambrósio, M.Pereira, R.Lewis, R.Dwyer-Joyce, C.Ariau, N.Kuka, "Development of a Wear Prediction Tool for Steel Railway Wheels Using Three Alternative Wear Functions," *Wear*, 271(1–2), pp. 238–245, 2011.
- 18) A.Keck, C.Schwarz, T.Meurer, A.Heckmann, G.Grether, Estimating the Wheel Lateral Position of a Mechatronic Railway Running Gear with Nonlinear Wheel–Rail Geometry," *Mechatronics*, 73, p. 102457, 2021.
- 19) J.Lai, J.Xu, P.Wang, Z.Yan, S.Wang, R.Chen, J.Sun, Numerical Investigation of Dynamic Derailment Behavior of Railway Vehicle When Passing Through a Turnout," *Eng. Fail. Anal.*, 121, p. 105132, 2021.
- 20) M.Okita, M.Tsujie, Y.Terumichi, "A Study on Prevention Measures for Gauge Corner Cracking," *Int. J. Transp. Dev. Integr.*, 4(3), pp. 252–263, 2020.
- 21) H.I.Andrews, "The Contact Between a Locomotive Driving Wheel and the Rail," *Wear*, 2(6), pp. 468–484, 1959.
- 22) S.Kumar, B.R.Rajkumar, "Laboratory Investigation of Wheel Rail Contact Stresses for U.S. Freight Cars," *ASME J. Eng. Ind.*, 103(2), pp. 246–255, 1981.
- 23) W.Poole, "The Measurement of the Contact Area Between Opaque Objects Under Static and Dynamic Rolling Conditions," *Proceedings of Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems II*, pp. 59–72, 1986.
- 24) M.Burstow, M.Podesta, J.Pearce, "Understanding Wheel/Rail Interaction With Thermographic Imaging," 22nd International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Manchester, UK, Aug. 14–19, pp. 1–6, 2011.

- 25) 山本大輔：サーモグラフィカメラを用いた車輪とレールの接触位置の特定，鉄道総研報告，Vol.32，No.6，pp.23-28，2018
- 26) T.Hondo, T.Tanaka, S.Kuniyuki, M.Suzuki, “Numerical and Experimental Investigations on Cross-Sensitivity Characteristics of Instrumented Wheelset Associated With Longitudinal Force and Lateral Contact Position,” ASME J. Comput. Nonlinear Dyn., 17(5), p. 051011, 2022.
- 27) S.Fukagai, T.Toyama, T.Tanaka, M.Kuzuta, H.Doi, Visualization of Wheel-Rail Contact Area of Running Vehicle Using Film Sensor,” Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: J. Rail Rapid Transit, 236(7), pp. 745–755, 2021.
- 28) K.Kendall, D.Tabor, “An Ultrasonic Study of the Area of Contact Between Stationary and Sliding Surfaces,” Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci., 323(1554), pp. 321–340, 1971.
- 29) H. G.Tattersall, “The Ultrasonic Pulse-Echo Technique as Applied to Adhesion Testing,” J. Phys. D: Appl. Phys., 6(7), pp. 819–832, 1973.
- 30) M.Schoenberg, “Elastic Wave Behavior Across Linear Slip Interfaces,” J. Acoust. Soc. Am., 68(5), pp. 1516–1521, 1980.
- 31) J.Królikowski, J.Szczepiek, “Prediction of Contact Parameters Using Ultrasonic Method,” Wear, 148(1), pp. 181–195, 1991.
- 32) B.W.Drinkwater, R.S.Dwyer-Joyce, P.Cawley, “A Study of the Interaction Between Ultrasound and a Partially Contacting Solid—Solid Interface,” Proc. R. Soc. London. Ser. A Math. Phys. Eng. Sci., 452(1955), pp. 2613–2628, 1996.
- 33) R.S.Dwyer-Joyce, B.W.Drinkwater, A.M.Quinn, “The Use of Ultrasound in the Investigation of Rough Surface Interfaces,” ASME J. Tribol., 123(1), pp. 8–16, 2001.
- 34) S.Biwa, A.Suzuki, N.Ohno, “Evaluation of Interface Wave Velocity, Reflection Coefficients and Interfacial Stiffnesses of Contacting Surfaces,” Ultrasonics, 43(6), pp. 495–502, 2005.
- 35) S.Fukagai, M.Watson, H.P.Brunskill, A.K.Hunter, M.B.Marshall, R.Lewis, “In Situ Evaluation of Contact Stiffness in a Slip Interface With Different Roughness Conditions Using Ultrasound Reflectometry,” Proc. R. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci., 477(2255), p. 20210442, 2021.
- 36) S.Fukagai, M.B.Marshall, R.Lewis, “Transition of the Friction Behaviour and Contact Stiffness Due to Repeated High-Pressure Contact and Slip,” Tribol. Int., 170(Feb.), pp. 107487, 2022.
- 37) R.S.Dwyer-Joyce, C.Yao, R.Lewis, H.Brunskill, “An Ultrasonic Sensor for Monitoring Wheel Flange/Rail Gauge Corner Contact,” Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: J. Rail Rapid Transit., 227(2), pp. 188–195, 2013.
- 38) M.B.Marshall, R.Lewis, R.S.Dwyer-Joyce, U.Olofsson, S.Björklund, “Experimental Characterization of Wheel-Rail Contact Patch Evolution,” ASME J. Tribol., 128(3), pp. 493–503, 2006.
- 39) M.Pau, “Ultrasonic Waves for Effective Assessment of Wheel-Rail Contact Anomalies,” Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: J. Rail Rapid Transit., 219(2), pp. 79–90, 2005.
- 40) S.Fukagai, T.Ban, K.Makino, M.Kuzuta, H.Chen, H.Brunskill, R.S.Dwyer-Joyce, “Using Active Ultrasonics to Measure Wheel-Rail Contact During a Running-in Period,” Int. J. Railw. Technol., 7(3), pp. 1–20, 2018.
- 41) S.Fukagai, H.P.Brunskill, A.K.Hunter, R.S.Dwyer-Joyce, R.Lewis, “Transitions in Rolling-Sliding Wheel/Rail Contact Condition During Running-In,” Tribol. Int., 149, pp. 105679, 2020.
- 42) L.Zhou, H.Brunskill, R.Lewis, M.Pletz, W.Daves, S.Scheriau, Real Time Measurement of Dynamic Wheel-Rail Contacts Using Ultrasonic Reflectometry,” ASME J. Tribol., 141(6), p. 061401, 2019.
- 43) L.Zhou, H.P.Brunskill, R.Lewis, “Real-Time Non-Invasive Measurement and Monitoring of Wheel–Rail Contact Using Ultrasonic Reflectometry,” Struct. Health Monit., 18(5–6), pp. 1953–1965, 2019.
- 44) E.S.Ooi, R.S.Dwyer-Joyce, “The Use of Reflected Rayleigh Waves to Study Rough Contact Interfaces,” Proc. Inst. Mech. Eng., Part J: J. Eng. Tribol., 230(3), pp. 266–280, 2016.
- 45) S.Fukagai, “Dynamic Measurement of Contact Positions Between Wheels and Rails Using Surface Waves,” Journal of Tribology, Vol.147, pp.121501-1-12, 2025.
- 46) J.Chmela, K.Petr, P.Mossoczy, V.Dynybyl, “Experimental Study of Lubrication Film Monitoring in a Roller Bearing by Utilization of Surface Acoustic Waves,” Tribol. Int., 141, p. 105908, 2020.
- 47) S.Koizumi, “Advance in Railway Vehicle Technology and Future Prospects Mainly in Relation to Bogie,” Nippon Steel Sumitomo Met. Tech. Rep., 105, pp. 11–18, 2013.
- 48) J.Piotrowski, H.Chollet, “Wheel-Rail Contact Models for Vehicle System Dynamics Including Multi-Point Contact,” Veh. Syst. Dyn., 43(6–7), pp. 455–483, 2005.
- 49) I.A.Viktorov, Rayleigh and Lamb Waves; Physical Theory and Applications, Springer, New York, 1967.
- 50) H.Brunskill, H.Shackleton, R.Rhodes, A.Hunter, “A Novel Wheel Mounted Sensor Technology for VTI Measurements & Monitoring,” 20th International Wheelset Congress 2023 Proceedings, Chicago, IL, pp. 136–140, 2023.

ブレーキ時に生成される車輪フラットの定量的な推定手法

山本 大輔* 坂井 宏隆*

A Quantitative Method for Predicting Wheel-flat Dimensions Generated during Braking

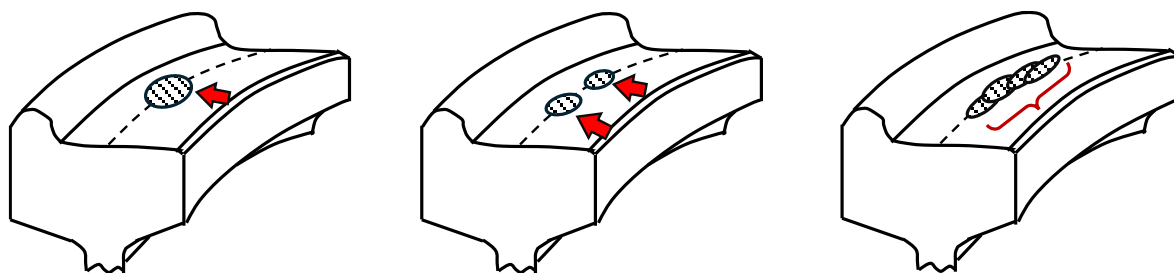
Daisuke YAMAMOTO Hirotaka SAKAI

Wheel flats generated during braking cause noise, vibration, and damage to track infrastructure. However, due to measurement difficulties under severe thermomechanical conditions, their formation and growth mechanisms remain insufficiently quantified. This study proposes a practical method for predicting wheel-flat dimensions based on a one-way coupled analysis that integrates vehicle dynamics and wheel-rail frictional heat analyses. By accounting for temperature-dependent material properties and contact ellipse growth, the proposed method quantitatively predicts wheel-flat dimensions. Validation against field measurements demonstrates good agreement, confirming the method's applicability for evaluating influential parameters governing wheel-flat development.

キーワード：車輪／レール，低粘着条件，踏面損傷，車輪フラット推定手法，片方向連成解析

1. はじめに

鉄道車両において、車輪を減速させる力（以下、制動力）が車輪／レール間の粘着力（接線方向の摩擦力で接線力とも呼ばれる）を超過すると、車輪は滑走状態に移行する。この滑走が進行すると、車輪の回転が停止したままレール上を滑る状態（以下、車輪固着）に至る場合がある。車輪固着が発生すると、車輪踏面のレール接触部に局所的な平坦部を有する擦傷痕が生成することがあり、これにより走行時に周期的な騒音が発生する。さらに、大きな振動加速度を誘起することで、車両の構成部品や軌道への損傷リスクを高める要因となる。このようにして形成された踏面の擦傷痕は「車輪フラット」と呼ばれ、多様な生成形態があることが知られている（図 1 参照）。これに対して、車両に搭載する実用的な再粘着制御装置が開発されたことで車輪フラット発生件数は大幅な減少に転じたが、再粘着制御装置の技術上の性能限界があるため、現在でも車両側と軌道側の双方において車輪フラット抑制に対する要望は少なくない。車輪フラット抑制のためには、その生成メカニズムに基づき対策法を検討することが有効となる。しかし、車輪フラットは偶発的に生じる性質があるため、本線上を走行する営業車両に計測器などを搭載して長期間にわたり



(a) 単一の車輪フラット (b) 斑点状に生成した車輪フラット (c) 細長く生成した車輪フラット

図 1 車輪踏面に生成した多様な車輪フラットの形態（一例）

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

そこで本研究では、車輪フラットの生成メカニズムの解明に資することを目的として、数値解析技術を援用することを考え、車両運動解析と車輪／レール間の摩擦熱解析の 2 つのシミュレータを連成させた車輪フラット推定手法を開発する。そして、車輪フラット推定手法の計算結果に基づき、車輪フラットの生成メカニズムとその成長因子について示す。

2.1 計算コストを低減した実用的な片方向連成計算

ここでは、車輪フラットは騒音や振動加速度の原因となる踏面損傷であり、車両の運動性能そのものに

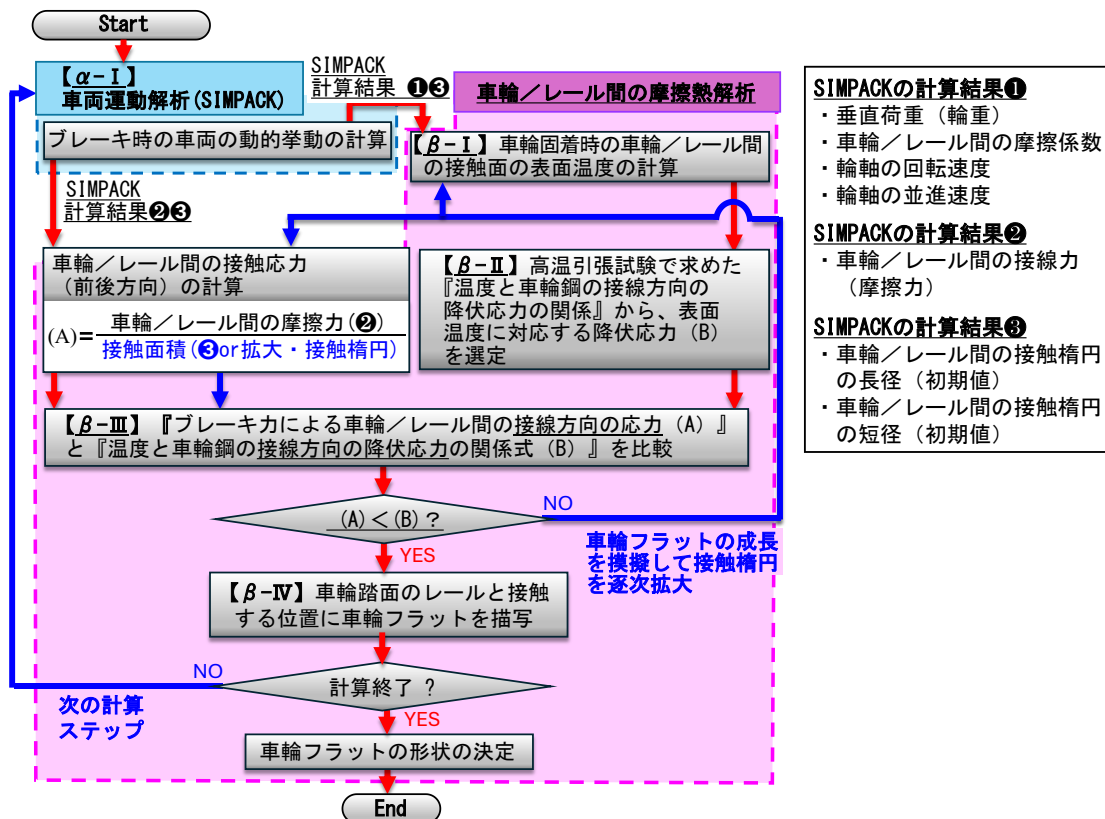


図2 車輪フラット推定手法のフローチャート

大きな影響を与えないことに着目し、車両運動解析で得られた計算結果を車輪／レール摩擦熱解析に一方向に受け渡す“片方向連成解析”により車輪フラットを定量的に評価する実用的な解析手法とした。そして、車輪固着時に車輪／レール間の接触面に集中して入力される摩擦熱によって車輪鋼が軟化し、これが接線力により塑性流動することで接触面の損傷が進展するものと仮定した合理的なモデル化を行った。このような手法とした理由は、3章で後述する有限要素モデルで構築した車輪とレールの接触解析の検討結果などに拠る。車輪フラット推定手法の概要を以下に示す。なお、詳細な導出方法については、文献4を参照されたい。

2.1.1 ブレーキ時の車両挙動を再現する車両運動解析

車両運動解析には、マルチボディダイナミクス理論に基づく汎用ソフトウェア SIMPACK (ver.2019.1) を用い、JR の在来線を想定した1車両の数値解析モデルを構築した(図3)。車両モデルは質量要素ごとに6自由度を付与した剛体モデルとし、ブレーキ作用は全輪軸に対して同一のブレーキトルクを0.1秒間で一斉に印加・解除する条件として与えた。車輪踏面形状とレール断面形状はそれぞれ在来線の基本踏面形状と JIS50kgN レール⁵⁾を採用し、車輪／レール間の接触計算には接線力解析ソルバ“FASTSIM”を適用した。本解析により、①垂直荷重(以下、輪重と記す)、車輪／レール間の摩擦係数、輪軸の並進速度、輪軸の回転速度、②車輪／レール間の前後方向の接線力、③車輪／レール間の接触楕円の長径と短径の初期値(※①②③はそれぞれ図2の矢印で示す計算フローに対応する)を求め、これらを次節で述べる車輪／レール間の摩擦熱解析に一方向に入力する。

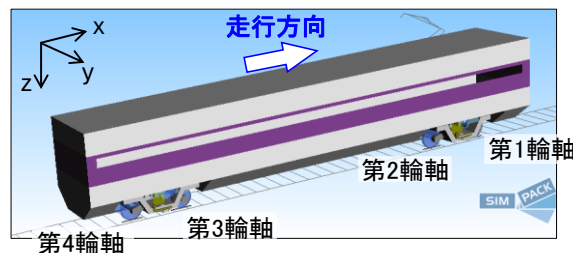


図3 車両運動解析のための数値解析モデル

2.1.2 車輪／レール摩擦熱解析

車輪／レール間の摩擦熱解析では、接触面温度の算定、温度依存性材料特性の導入、および接触面損傷の進展評価を統合的に取り扱う。これらの構成要素を以下に示す。

① 車輪／レール間の接触面温度の計算(図2の【β-I】)

車輪／レール間の接触面で生じる摩擦熱に起因する表面温度の上昇を計算により求める。ブレーキ作用により車輪／レール間の接触面で生じる摩擦エネルギーと、ここに生じる熱対流、熱伝導、熱放射の3つの伝熱過程における熱エネルギーが等価⁶⁾であると仮定し、接触面温度を未知数とする4次方程式を解くことで接触面の表面温度を求める。

② 車輪鋼の温度依存性を考慮した降伏応力の選定(図2の【β-II】)

車輪フラット生成時には、車輪／レール間の接触面の温度は瞬間的に高温(700℃以上)に達し、車輪鋼の降伏応力が低下することが知られている。このため、JIS G0567に準拠した高温引張試験(最高温度1100℃)により温度と降伏応力の関係を取得し、せん断ひずみエネルギー説に基づいて接線方向の力に変換した上で材料特性として実装した。高温引張試験とその試験結果に関する詳細は2.2節で述べる。

③ 車輪／レール接触楕円の拡大則(図2の【β-III】)

車輪踏面形状とレール断面形状はそれぞれ複数の円弧形状の組合せで構成していると考えることができ、

車輪／レール間の接触楕円が摩耗により変形するとき、円周方向と左右方向の曲率半径の違いにより、前後と左右方向に異なる比率で拡大する。本研究では、幾何学的関係に基づき接触楕円の拡大率を定式化し、制動力に起因する接触面に作用する前後方向の応力と温度依存性を有する車輪鋼の降伏応力が均衡するまで接触楕円を逐次拡大して更新する。接触楕円の拡大則の導出方法に関する詳細は2.3節で述べる。

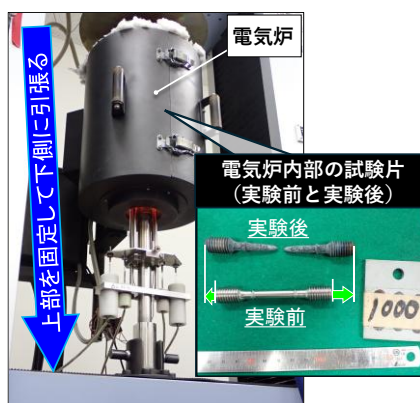
④ 車輪フラットの形状の決定（図2の【β-IV】）

車輪固着後に車輪／レール間の摩擦係数が変動すると、車輪が固着状態から少し回転して再び固着状態となる。このような場合に生成する車輪フラットの形状は、図1(c)のように車輪の円周方向に連なった形態になると推察される。このような多様な車輪フラットの生成形態を数値解析で再現できるようにするため、車輪踏面のレールと接触する位置に車輪フラットを連続的に描写するアルゴリズムを設けた。そして、最終的に求まる一つの楕円形状または円周方向に複数の楕円形状が連なった形態をした総体の外形形状を車輪フラットと定義した。

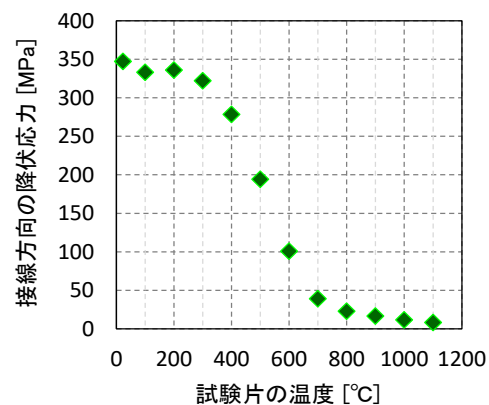
2.2 高温引張試験と高温時の車輪鋼の材料特性

高温引張試験の状況とその試験結果を図4に示す。高温引張試験（図4(a)）では、車輪鋼から切り出した試験片を電気炉内に装着し、炉内を所定の温度まで加熱した。温度が安定した後、試験機の上部に固定した試験片を下方向に引っ張り、破断に至るまでの過程における応力とひずみの関係を計測した。図4(b)の試験結果から、車輪鋼の降伏応力は、300℃未満の温度域においては顕著な差異は認められず、ほぼ一定の値を示している。一方、300℃を超えると降伏応力は急激に低下し、さらに温度上昇に伴い、800℃以上では下限値に漸近する特性を示すことが確認された。

なお、2章で用いた解析手法では、車輪鋼の弾性領域における変位を考慮する必要がないため、材料の硬さを表すヤング率は用いていない。



(a) 高温引張試験の状況



(b) 車輪鋼の接線方向の降伏応力に関する材料特性

図4 高温引張試験とその試験結果

2.3 車輪フラット生成時の車輪／レール接触楕円の拡大則

本計算では、制動力に起因する応力と車輪鋼の降伏応力が均衡するまで、接触楕円を前後と左右に異なる比率で拡大させる。このため、接触楕円の前後方向および左右方向の接触幅と車輪フラット深さの関係を、幾何学的および接触力学的観点から体系的に定式化することを考えた。まず、前後方向については、車輪とレールが接触する前後方向モデル（図5(a)）を考え、車輪半径と接触楕円の前後方向の接触幅に基づく幾何学的関係から“車輪フラットの深さと接触楕円の前後方向の接触幅”の関係式として求めた。な

お、実際には、レールに対して食い込んだ車輪の部分は押し潰されて接触面の形態となる。

次に、左右方向については、図 5 (b) のように、車輪／レール間の接触幾何解析⁷⁾と Hertz の接触理論に基づく解析⁸⁾の 2 つの解析結果を組み合わせることで“車輪フラットの深さと接触楕円の左右方向の接触幅”の関係式を求めた。まず、車輪／レール間の接触幾何解析により、車輪とレールの上下方向相対変位（青色実線）を求めた。そして、Hertz の接触理論に基づく解析では、在来線の基本踏面形状と JIS50kgN レールの組合せで静止輪重 35.56 kN の条件における接触楕円を計算し、その左右方向の接触幅は 7.7 mm となることから、上下方向相対変位と車輪フラット深さを示す赤色実線が交差する区間が 7.7 mm となる上下方向の位置を車輪フラットの無いときの基準位置と定義した。これを基準として、車輪フラットの深さのそれぞれの値に対して、上下方向相対変位が交差する区間がそのフラット深さに対応する車輪フラットの左右方向の接触幅となることから、両者の関係を関係式として纏めた。

最後に、前後方向および左右方向の関係式は、ともに車輪フラット深さを媒介として表現されることから、両式を等置とすることで両方向の接触幅の関係式として導出した。

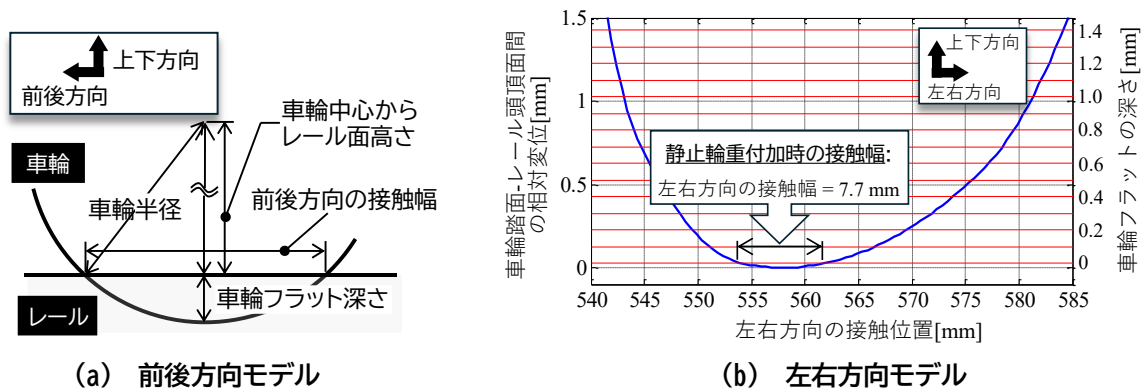


図 5 車輪フラット深さと接触楕円に関する前後・左右方向の接触幅の関係を表す数値解析モデル

3. 有限要素モデルを用いた車輪鋼の熱塑性流動に関する検討

3.1 数値解析モデルと解析条件

車輪フラット生成時に車輪鋼が熱塑性流動する可能性について、汎用ソフトウェア「ADINA (Version 9.8.2)」を用いた検討を行った。数値解析モデルを図 6 に示す。車輪とレールの数値解析モデルは、在来線の基本踏面形状を有する車輪と JIS50kgN レールの頭頂面の一部の組合せとし、最小メッシュサイズは車輪を 0.5mm、レールを 2.0mm とした。それぞれ設計形状を対象にモデル化を行った。静解析の解析種別の下で、静止輪重に相当する荷重で車輪モデルをレールモデルに押し付け、その後、Contact-Slip Load 機能により所定の転動速度に相当する距離 (10mm) だけブレーキによるトルクに相当する接線力を車輪とレール間に作用させながら、車輪の回転を拘束した状態でレール上を滑らせる計算を行った。さらに、その計算により得られた接触面付近の応力分布を基に、車輪全体の初期温度と車輪踏面における塑性流動の有無との関係を評価した。車輪鋼の設定初期温度を 100℃、200℃と 100℃刻みで最大 1100℃までの 11 通り設定し、これに常温 23℃の条件を加えた計 12 通りで評価した。ここでは車輪全体を解析対象とし、初期温度ごとに設定した材料定数（ヤング率と降伏応力）を用いて計算を行った。これらの材料定数は、2.2 節で示した実験結果に基づき同定したものである。なお、車輪／レール間の摩擦係数は、後述する 4.2 節の数値解析の条件にあわせて全ての条件で 0.04 とした。

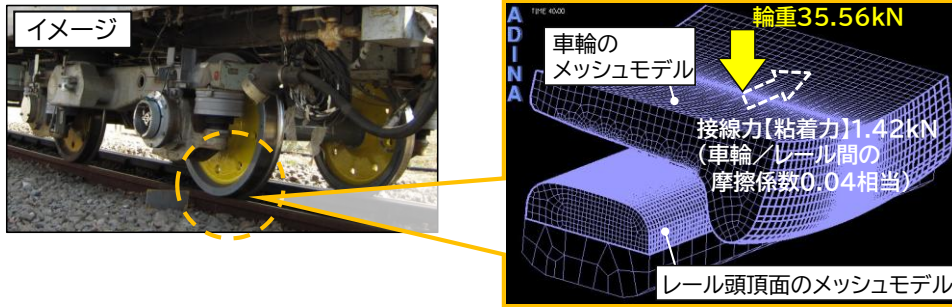


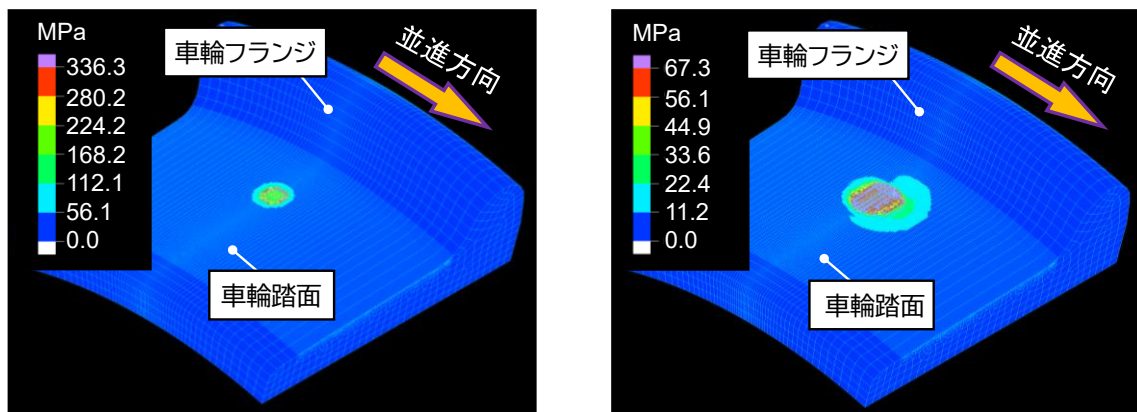
図6 車輪とレールの接触状態を模擬した有限要素モデル

3.2 数値解析結果

車輪が10mm 前後方向に移動した後の車輪踏面部に生じた相当応力分布を図7に示す。図7は車輪鋼の材料定数を500℃および700℃相当とした条件で求めた計算結果で、それぞれ温度条件ごとに車輪鋼の初期降伏応力の値をカラーコンターの赤色と紫色の境目に設定し、紫色の範囲を初期降伏応力の値を超えた“塑性領域”と評価した。

図7(a)の500℃の条件では、車輪が滑った後の車輪／レール間の接触楕円の大きさは前後方向が9.27mm、左右方向が9.58mmで、車輪が滑る前にHertzの接触理論に基づく解析⁸⁾から求めた大きさ（前後方向×左右方向＝9.8mm×8.2mm）に対して両者は概ね一致している。さらに、温度400℃以下の応力分布では認められなかった塑性領域を表す紫色の範囲が僅かに認められる。その一方で、図7(b)の700℃の条件では、車輪の温度上昇により材料定数が低下したことでレールとの接触面積が拡大するとともに、車輪踏面の円周方向に紫色で示す塑性領域も拡大している。そして、ここでは図示しないが、車輪の温度が800℃以上と高温条件になると、その傾向はより顕著となった。

これらの解析結果から考察を行う。車輪踏面に実際にフラットが生成した部位を対象に金属分析を実施した結果⁹⁾によると、車輪鋼のA₁変態温度を超える高温状態となった後に急冷却した際に認められる金属組織が確認されていることから、車輪滑走から固着時に車輪鋼が700℃以上という高温状態になることは妥当と考える。そして、このような高温条件下では、2.2節で述べたように、高温状態となると車輪鋼は軟化する性質があるため、車輪／レール間の摩擦係数が小さい条件でもそのときの接線力（粘着力）の大きさによっては車輪踏面の接触面近傍が押し流される形態で塑性変形すると考えられる。これに対して、図7(b)では、車輪鋼が高温状態となりその材料定数が小さくなったことで接触面積が拡大しており、さ



(a)温度 500℃の場合

(b)温度 700℃の場合

図7 有限要素モデルを用いた解析結果

らに、車輪鋼が 700℃の時に対応する降伏応力を超過する紫色の範囲も前後方向が 18.19mm、左右方向が 18.67mm まで拡大している。この解析結果は、高温状態となり軟化した車輪鋼をレールとの間の接線力が押し流したことを定性的に示すものと考えられ、高温状態の金属の摩耗量はその温度が 200℃程度以下の場合のときと比べて極端に大きくなるとする知見¹⁰⁾とも合致している。

これらの計算結果から、車輪フラットが摩耗係数を適用して評価する一般的な摩耗現象ではなく、車輪のレールとの接触部で生じる熱影響に起因する塑性流動を伴う擦傷現象であることが分かった。そして、接触面温度に応じて車輪鋼の機械的特性を変化させながら車輪フラットの大きさを推定する本提案手法が妥当であることが分かった。

4. 車輪フラット推定手法の妥当性評価

車輪フラット推定手法の妥当性を検証するため、営業車両で計測された車輪フラット生成時の状況を数値解析上で再現し、その計測値と計算値の比較を行う。過去の調査結果によると、車輪フラットの大きさとこれが生成した時の走行距離、車輪部位などの情報を纏めた報告が多くある。しかし、車輪フラット推定手法の妥当性を検証するためには、車輪フラット生成時の車両の走行速度や減速度、軌道周辺の環境に関する情報が必要となるが、これらについて纏められたものは熊谷らの報告¹¹⁾以外には認められない。このため、文献 11 を数値解析上で再現することにより、車輪フラット推定手法の妥当性の検証を行った。

4.1 営業車両の計測値

文献 11 によると、在来線通勤形車両（車両自重 284.5kN）に仮設した簡易計測装置で計測した車輪フラット生成時の計測値は表 1 と記されている。なお、車輪フラットが生成した時の車輪／レール間の摩擦係数は記録されていないが、上記の記録日とは異なる日に、営業車両とは異なる試験車両を用いた追加調査を実施しており、車輪フラットが生成したときと同様の環境条件を模擬して車両からレール面上に散水を行いつながりながら計測した車輪／レール間の摩擦係数は平均 0.06 程度で、最小値は 0.04 であったと記されている。

表 1 簡易計測装置で計測した車輪フラット生成時の記録¹¹⁾

車輪フラットの大きさ	35mm(前後方向)×20mm(左右方向) ※第 4 輪軸のみに生成
車輪固着時の並進速度	51km/h から 25km/h で再粘着するまでの約 10 秒間
列車の減速度	0.76m/s ²

4.2 数値解析結果と計測値の比較による車輪フラット推定手法の妥当性の検証

営業車両の車輪フラット生成時の挙動を再現するため、静止輪重 35.56kN の在来線車両を対象に車両運動モデルを作成し、ブレーキ初速度 58km/h、ブレーキトルク 3000Nm（全軸同一）の設定条件で車両運動解析を行った。計算では、図 3 の輪軸配置においてブレーキ作用時に第 4 輪軸のみ滑走状態とするため、車輪／レール間の摩擦係数の設定値を第 4 輪軸のみ 0.04 一定とし、その他の輪軸は 0.09 一定とした。なお、車輪踏面形状とレール断面形状はそれぞれ設計形状の在来線基本踏面形状と JIS50kgN レールとし、軌道変位は考慮しない。車輪フラット推定手法により求めた車輪フラット生成前後の第 4 輪軸の計算結果を図 8 に示す。

図 8 (a) では、計算開始 2 秒後にブレーキトルク 3000Nm が輪軸に作用し、これにより、車輪／レール間の接触面で作用する接線力（車輪／レール間の摩擦係数と輪重の積で求まる値）より制動力の方が大き

い状態となったことで、輪軸の並進速度（青線）に対してその回転速度（緑線）が急激に小さくなる車輪滑走が生じている（図中の灰色網掛けの範囲）。そして、輪軸の並進速度が51.6km/hとなったときに輪軸の回転速度がゼロとなる車輪固着状態となり、これ以降は車輪の回転が停止した状態でレール上を滑っている。車輪が固着した瞬間から約10秒後（計算開始13.4秒付近）の輪軸の並進速度は24.2km/hで、車体の減速度は図8（b）より 0.76m/s^2 となることが分かる。これらは表1に示したとおり営業車両で得られた計測値と同等の値で、車両運動解析が適切に再現できていることを示している。なお、実際の走行時の記録では、計算開始13.4秒付近より後では車輪が再粘着して車輪が固着状態から回転状態に戻ったとなっているが、車両運動解析では車輪を固着状態のまま計算を継続している。

ブレーキトルクの作用時には車体が前傾するため、ボギー構造を有する鉄道車両では、図3の輪軸配置において輪重は大きい順に第1輪軸、第3輪軸、第2輪軸、第4輪軸となる。このため図8（c）では、ブレーキトルクの作用とともに輪重が定常的に減少していることが分かる。図8（d）では、ブレーキトルクにより作用する車輪／レール間の制動力に抗するため、車輪／レール間の摩擦係数0.04に応じた1.42kN程度の前後方向の接線力が作用していることが分かる。なお、図8（c）と図8（d）の2.5秒付近などの衝撃的な波形は、車輪フランジがレールと衝突した時に生じた波形である。車輪が滑走から固着状態となると左右方向のクリープ力がゼロとなり、輪軸は左右変位に対する復元力を失う。同時に、同一台車内の前後輪軸に作用する左右クリープ力の差異が輪重変動により大きくなるため、台車にヨーイング方向のモーメントが作用する状態となる。特に、前後台車のそれぞれ後位輪軸が車輪滑走・固着状態となると、図8（e）のように輪軸は左右方向に大きく変位する挙動を示すことがあり、車輪フランジがレールと衝突することで衝撃的な横圧が生じる。横圧は輪重にも影響を及ぼすため、図8（c）のように同時に輪重にも衝撃的な変動が生じ、これにより車輪／レール間の接触面形状も瞬間的に大きさが変化するので接線力にも衝撃的な波形が表れている。

次に、車両運動解析の計算結果を車輪／レール間の摩擦熱解析に受け渡すことで、ブレーキ時の車両挙動を評価し車輪フラットの大きさを推定する。

図8（f）から、ブレーキトルクの作用により車輪が滑走すると、車輪／レール間の表面温度は初期値 25°C から 1000°C 以上まで急激に上昇することが分かる。車輪滑走中には車輪は回転を継続しているので、車輪のレールとの接触位置は円周方向に時々刻々と変化する。すなわち、灰色網掛け範囲では車輪とレールが接触している時にはその接触面は瞬間的に高温状態となり、これらが離れるとその温度は急激に低下する。また、車輪滑走中には車輪の回転によりレールとの接触時間は極短時間となり熱量は小さいため、車輪踏面にフラットは生成しないと考えられる。過去の現車試験の経験からもこの仮説は妥当と考えられる。その一方で、灰色網掛け範囲より後方の範囲では、車輪が固着状態となり、車輪の回転が停止した状態でレール上を滑るため、摩擦エネルギーが車輪踏面の一箇所に集中的に輸入される状況に変化する。このとき、図8（f）から車輪とレールの接触部では最高温度 1454°C の状態が継続する状態となるが、図4（b）で示したように、車輪鋼は 300°C 以上で降伏応力が急激に低下すること、さらに、ブレーキトルクの作用により車輪／レール間の接触面では接線方向の応力が作用しているので、後者が大きい場合には、車輪／レール間の前後方向の接線力によりその間の接触面の表面が押し流される熱塑性流動の形態で車輪／レール間の接触楕円が拡大すると考えられる。すなわち車輪フラットが生成することを意味する。この過程を表す結果が図8（g）と図8（h）となる。車輪固着時の車輪フラットの接触幅（前後方向×左右方向）は左車輪が $33.3\text{mm} \times 20.1\text{mm}$ 、右車輪が $31.6\text{mm} \times 20\text{mm}$ と、左車輪の方が若干大きいほぼ同等の大きさとなっている。左車輪の車輪フラットの方が大きい理由は、第4輪軸が -9mm 付近まで左右変位しておおむね定常状態となったことで、左車輪の輪重が右車輪の輪重と比べて大きくなったためである。そして、営業車両で

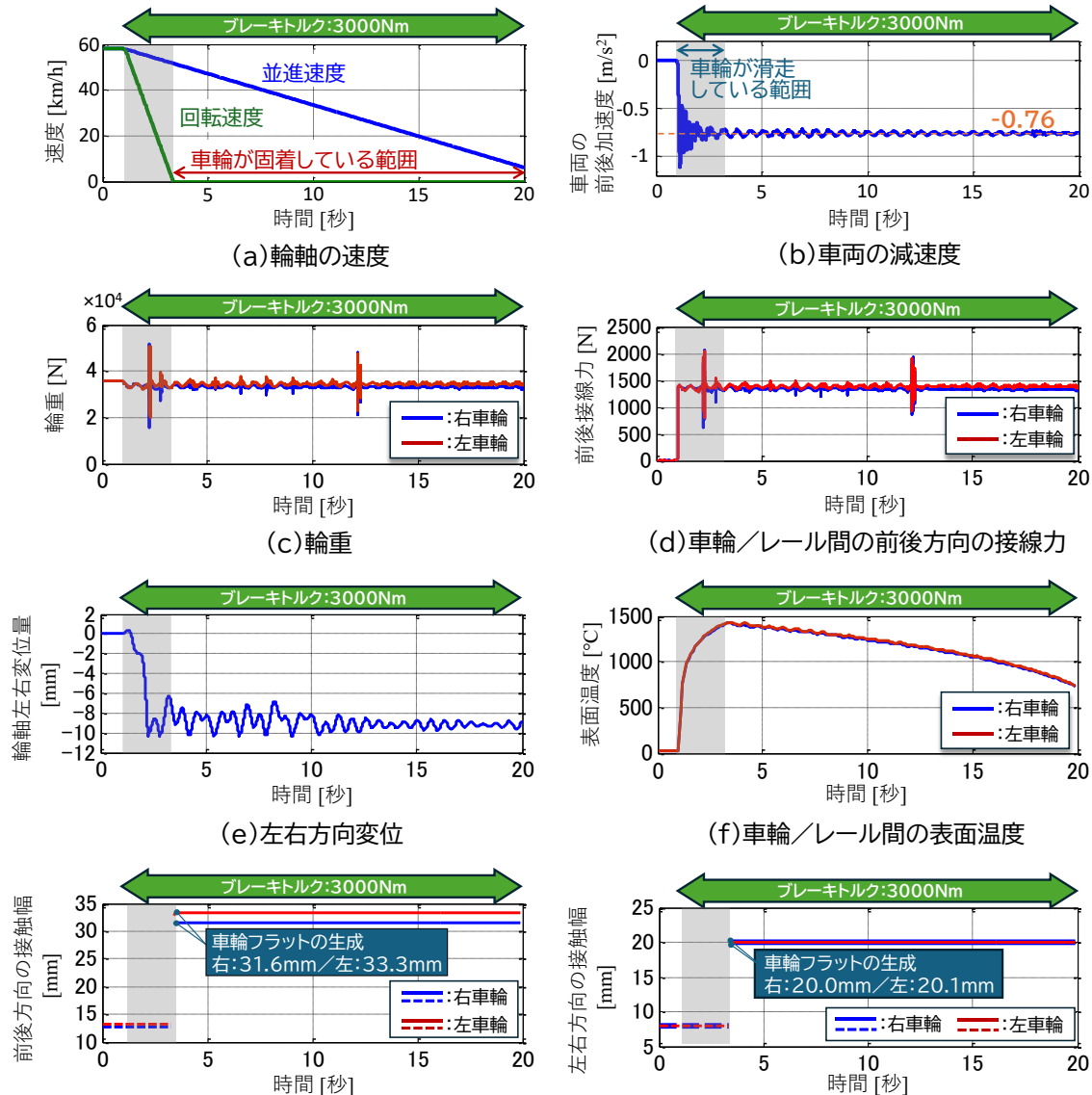


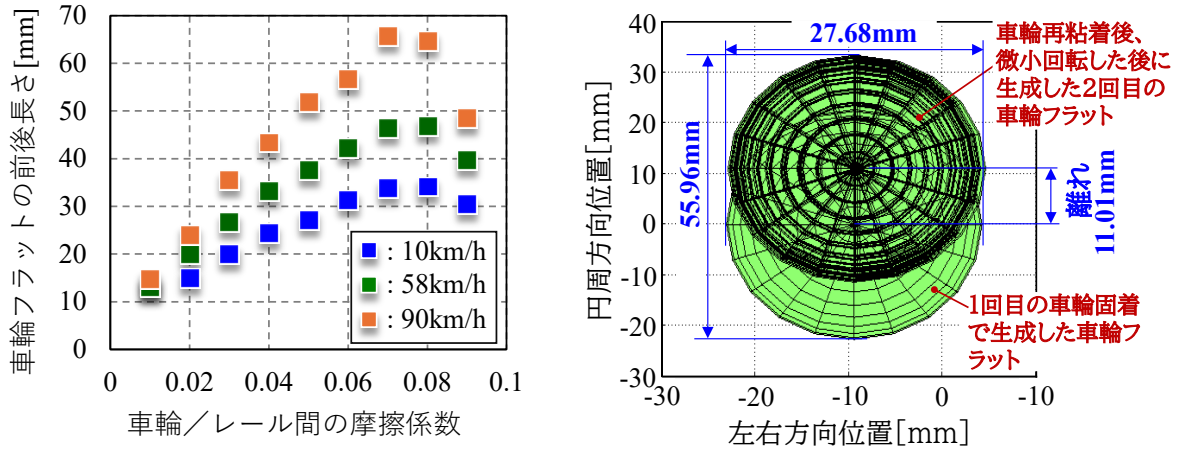
図8 車輪フラット生成時の第4輪軸の挙動(数値解析結果)

計測された車輪フラット形状(前後方向×左右方向で35mm×20mm)と比較すると、左車輪の推定値は面積比で約4.4%、長さ比で約4.9%の誤差で、本提案手法により車輪フラットの大きさを良好な計算精度で推定できている。

以上より、営業車両で車輪滑走時の状況を計算機上で再現することにより、本提案手法の妥当性を確認した。その結果、車両の速度と減速度を再現した車両運動解析では、ブレーキの作用による車両減速時の速度および車体の減速度が良好に一致することを確認した。そして、車両運動解析の一部の計算結果を用いて実行した車輪／レール間の摩擦熱解析では、営業車両で計測した車輪フラットの大きさに対して、面積比で約4.4%、長さ比で約4.9%の小さな誤差でその大きさを推定できることが分かった。

4.3 車輪フラットを拡大する影響因子

車輪フラットの大きさを定量的に評価することができる本手法により、ブレーキ初速度と車輪／レール間の摩擦係数の2つの影響因子が車輪フラットの前後長さに及ぼす影響について検討した。計算条件は前



(a) ブレーキ初速度と車輪フラットの前後長さの関係 (b) 前後方向に拡大した車輪フラット

図9 ブレーキ初速度と車輪／レール間の摩擦係数が車輪フラットの拡大に及ぼす影響（計算結果）

節と同様で、計算結果を図9(a)に示す。

図9(a)から、車輪／レール間の摩擦係数をパラメータとした場合、車輪フラットの前後長さが最大となる条件があることが分かる。特に、車輪フラットの前後長さは、ブレーキ初速度に拠らず車輪／レール間の摩擦係数が0.08付近で最大となり、これより大きくなると逆に小さくなっている。これは車輪／レール間の摩擦係数が大きくなると車両の減速性能が向上し、車輪固着時の車両の並進速度が低下するためである。また、ブレーキ初速度が90km/hでも生成する車輪フラットの最大長さは65.8mmで、一般的な保守の基準値である75mm未満の値となることが分かった。

これらの計算結果から、同一のブレーキ初速度でも車輪／レール間の摩擦係数が異なる場合には、車輪フラットの前後長さは異なる大きさとなることが分かった。なお、軌道不整の程度、車輪とレールの接触状態の違い、さらに、車輪フランジがレールと衝突した際に生じる著大輪重が大きい場合には、車輪／レール間の摩擦係数の変化に対して車輪フラットの大きさは非線形的に変化することがあり、このような場合には車輪フラットはさらに拡大することを付記する。

次に、車輪／レール間の摩擦係数が変動することで、車輪が固着状態から少し回転して再び固着状態となる。このような計算条件の場合について検討した結果を図9(b)に示す。車輪／レール間の摩擦係数は0.04を基準とし2秒間だけパルス状に0.22まで大きくした。緑色の範囲が車輪フラットの生成範囲を示しており、車輪固着時に生成した2つの車輪フラットの一部が車輪の円周方向で重なり、最終的には車輪の円周方向に長いフラットとなっている。このような車輪フラットの生成形態は図1(c)とも定性的に一致している。

このように、車輪フラット推定手法を用いることにより、ブレーキ初速度の違いにより生成する車輪フラットの大きさを定量的に評価できることを示した。さらに、実際の計測値が存在しないため定量的な比較はできないが、現実想定される程度の車輪／レール間の摩擦係数の変動により、鉄道現場で認められる多様な生成形態の車輪フラットを計算機上で再現できることが分かった。

5. まとめ

本稿では、車輪フラットの生成メカニズムの解明に資することを目的として、ブレーキトルク作用時の車両の動的挙動を把握する車両運動解析と、車輪／レール間の接触面表面の温度計算と車輪フラットの成

長を再現する車輪／レール間の摩擦熱解析をそれぞれ開発し、これら二つのシミュレータを連携した片方向連成解析により、ブレーキ時に車輪がレール上で固着したときに生成する車輪フラットの大きさを定量的に評価することができる解析手法を提案した。そして、本提案手法の妥当性を確認するため、営業車両の走行状態を計算機上で再現し、実測値と本提案手法による推定値を比較した。その結果、車輪／レール間の摩擦係数を実物車両の走行区間で計測された最小値 0.04 とした場合、実測した車輪フラットの大きさに対し、本提案手法により求めた車輪フラットの大きさは面積比で約 4.4%、長さ比で約 4.9% の良好な精度で推定できることが分かった。そして、車輪フラットの大きさを定量的に評価することができる本手法により、車輪フラットを拡大させる影響因子について検討した結果、ブレーキ初速度および制動力が同一であっても、車輪フラットの大きさは車輪／レール間の摩擦係数に依存して極大値を示すことが分かった。加えて、本手法により、実際に確認された多様な車輪フラットの生成形態を計算機上で再現できることを確認した。

最後に、本研究では、従来は偶発的と考えられてきた車輪フラットの生成メカニズムに対して、車輪フラット推定手法の開発により定量的・体系的に把握できるようになった点が大きな成果である。今後は、本手法を基盤として車輪フラットの生成メカニズムを深度化するとともに、車上から車輪／レール間の摩擦係数を把握する技術の検討を並行して進める計画である。これにより、制動力を維持しながら車輪フラットの生成を抑制するブレーキ制御システムの実現を目指す。一方、実用面では、現状、再粘着制御装置の導入可否に関する基準が明確でないという課題がある。これに対し、本手法を用いて走行試験前に再粘着制御装置による滑走抑制効果を定量的に評価することで、当該装置の導入判断に係る根拠を明確化できる。

文 献

- 1) Naeimi, M., Li, S., Li, Z., Wu, J., Petrov, R., Sietsma, J. and Dollevoet, R., "Thermomechanical analysis of the wheel-rail contact using a coupled modelling procedure", *Tribology International*, Vol.117, pp. 250-260, 2018.
- 2) Wang, X., Dong, W., He, Q., An, B., Ding, H., Wang, P., Wang, W., and Huang, J., "Nonlocal thermomechanical coupled analysis of wheel-rail contact using a peridynamic model", *Wear*, Vol.528-529, DOI: 10.1016/j.wear.2023.204954, 2023.
- 3) Asih, A. M. S., and Kapoor, K. D. A., "Modelling rail wear transition and mechanism due to frictional heating", *Wear*, Vol.284-285, pp.82-90, 2012.
- 4) 山本大輔: 鉄道車両の車輪フラット形状を推定する数値解析手法, 日本機械学会論文集, Vol.91, No.951, DOI: 10.1299/transjsme.25-00067, 2025
- 5) 日本機械学会編: 鉄道車両のダイナミクス—最新の台車テクノロジー—, 電気車研究会, pp.241-244, 1996
- 6) Lewis R, and Dwyer-Joyce RS. "Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol.218, No.6, DOI: 10.1243/1350650042794815, 2004.
- 7) 例えば、谷藤克也: 新幹線電車の摩耗車輪とレールの接触 (幾何学的接触による車輪有効こう配の分析), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.54, No.497, pp.305-311, 1988
- 8) Kalker, J.J.: *Three-dimensional elastic bodies in rolling contact*, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1990.
- 9) 木川武彦: 鉄道車両のフラットの生成ならびに剥離に関する研究, 鉄道総研報告, 特別号, No.1, pp.28-43, 1995
- 10) 川本信, 曽根匠, 岡林邦夫: 炭素鋼の摩耗特性と摩擦面温度の関係, 日本金属学会誌, Vol.37, No.3, pp.357-363, 1973
- 11) 熊谷則道, 長谷川泉, 川口清: 車輪滑走およびフラット発生メカニズム—フラット発生状態と粘着係数—, 鉄道総研報告, Vol.5, No.7, pp.33-41, 1990

トングレールの隙間調整装置の開発と 保守省力化を目的とした分岐器ポイントの提案

玉川 新悟* 上田 将司**
安田 新太郎** 細見 章人**

Development of Gap Adjustment Device between Switch Rail and Stock Rail, and Proposal of a Turnout Point to Reduce Maintenance Labor

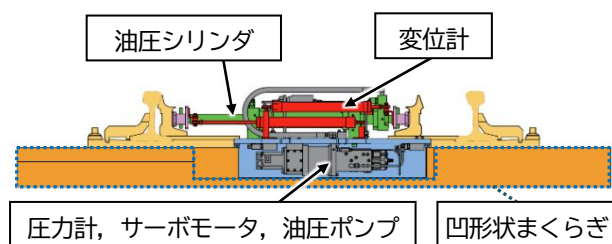
Shingo TAMAGAWA Masashi UEDA
Shintaro YASUDA Akito HOSOMI

The aim of this study is twofold: to develop a gap adjustment device for use between the switch rail and the stock rail, and to propose a new turnout structure that contributes to reduced maintenance efforts. The authors designed and produced adjustment devices that adjust the gaps between the switch rail and the stock rail expanding and contracting after switching. The developed devices were installed on a turnout, and a series of performance tests were conducted. As a result, we confirmed that the devices enable automate the inspection and adjustment of gaps. A running test involving a vehicle passing over the turnout also confirmed that the devices functioned normally during and after the vehicle's passage.

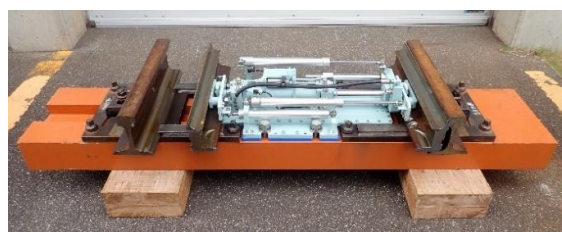
キーワード：分岐器，ポイント，転換装置，隙間調整装置，トングレール

1. はじめに

現在，分岐器のトングレールの転換と鎖錠には，電気転てつ機が一般的に用いられている¹⁾．電気転てつ機は，電気を動力としたモータでトングレールを転換し，転換後の状態を機械的に鎖錠したうえで，鎖錠や開通方向等の状態を出力する機能をもつ．国内で広く使用されているNS形やTS形の電気転てつ機¹⁾を採用した分岐器のポイントでは，まくらぎ間に設置された転てつ棒や控え棒が保線作業に支障してバラストのつき固めが不十分となるため，軌道の弱点箇所の一つとなる．また，分岐器の検査や調整，トングレールの転換不能に伴う修復等の線路内作業には多大な労力を要しており²⁾，将来的な労働力不足への懸念も踏まえ，更なる分岐器の保守省力化・省人化が望まれている．これまでに鉄道総研では，図1に示すように，電動油圧アクチュエータを用いてトングレールを転換させるための装置（以下，転換装置）を開発している^{3) 4) 5)}．転換装置は，トングレールの先端に敷設した凹形状のまくらぎにその一部を埋め込む形で設置し，トングレールの位置と転換圧力を常時モニタリングするものである．既設の電気転てつ機を転換



(a) 転換装置の構成



(b) 転換装置の外観

図1 開発した転換装置⁵⁾

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室

** 元 軌道技術研究部 軌道構造研究室

装置へ置き換えることで、バラストのつき固め不能箇所の解消や、基本レールとトングレールの隙間の常時監視、転換不能の事前検知の実現を図っている。転換装置は、トングレールの先端付近に設置し、設置箇所のトングレールと基本レールの隙間の監視と調整が可能なものであるが、ポイントの隙間の検査と調整作業は、トングレールの全長にわたり実施する必要があるため、転換装置の設置だけでは、隙間の検査と調整作業を自動化することはできない。

以上を踏まえ、本研究では、転換装置に加え、トングレールの隙間の検査範囲に複数台設置して隙間を調整する装置（以下、隙間調整装置）を開発することで、バラストのつき固め不能箇所の解消や、転換不能の事前検知、隙間の検査と調整作業の省力化を実現した分岐器ポイントを提案することを目的とする。

本稿では、隙間調整装置を設計・製作するとともに、試験用ポイントおよび試験線に敷設し、分岐器の保守省力化に向けて実施した一連の検討結果を示す⁵⁾。

2. 保守省力化を実現する分岐器ポイントの提案

2.1 分岐器ポイントの構成

図2に本研究で提案する分岐器の構成を示す。この分岐器は、既存の電気転てつ機を転換装置に置き換え、控え棒を複数台の隙間調整装置に置き換えることで、次の観点から保守の省力化を図ったものである。

- ① トングレールと基本レール間の異物の検知や転換不能の事前検知を可能とする
- ② トングレールと基本レール・止め金具の間の隙間の検査と調整作業を省力化する
- ③ バラストのつき固め不能箇所を解消する

上記の①～③を達成するため、分岐器を構成する転換装置と隙間調整装置には、次節に示すコンセプトを設定した。なお、上記の止め金具とは、図3に示すように、トングレールと基本レールの間に設置し、列車走行時に両レール間の間隔を保持する金具である。

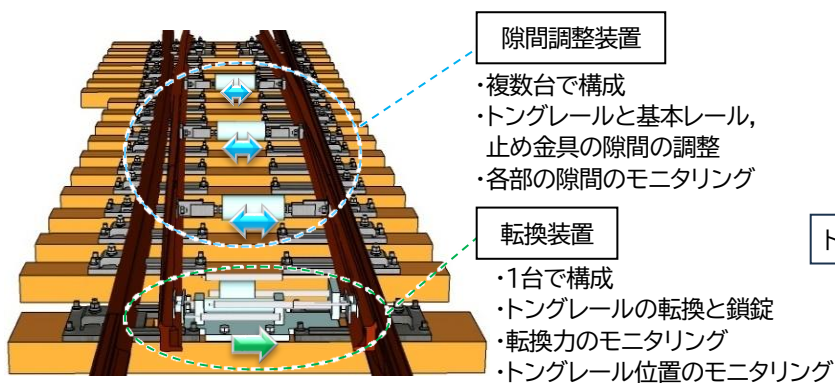


図2 転換装置と隙間調整装置を設置した分岐器の構成

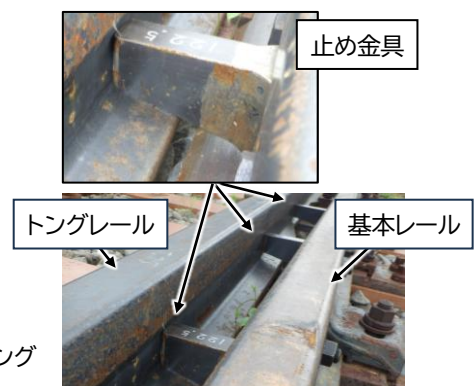


図3 止め金具の例

2.2 転換装置と隙間調整装置のコンセプト

転換装置のコンセプトは、以下の通りである。

- (a) 分岐まくらぎ上に設置が可能
- (b) トングレールの位置と転換力のモニタリングが可能
- (c) 分岐まくらぎから取り外しが可能
- (d) 既存の電気転てつ機との置き換えが可能

上記の(a)は、分岐まくらぎ上に転換装置を設置することで、電気転てつ機で使用する転てつ棒を撤去し、

転てつ棒やフロントロッド箇所におけるバラストのつき固めを可能にすることを目的としている。(b)は、隙間の検査の省力化と、異物介在の検知、および床板の摩擦増加に伴う転換不能の事前検知を目的としている。(c)は、定期的なオーバーホールを想定し、容易に設置と撤去が可能なことを目的としている。(d)は、既設の分岐器への適用を可能とし、広い普及効果を図ったものである。

一方で、隙間調整装置のコンセプトは、以下の通りとした。

- (e) 既設の分岐まくらぎ上面の寸法に収まるスペースで設置が可能
- (f) トングレールと基本レールおよび止め金具の隙間のモニタリングが可能
- (g) 複数台が同期して伸縮が可能

上記の(e)は、既設の分岐まくらぎの幅230mm よりも小さいスペースで、左右のトングレールに直接固定することで、控え棒を撤去し、当該まくらぎ前後のバラストのつき固めを可能にすることを目的としている。また、専用の分岐まくらぎへの交換を不要とし、転換装置を複数台設置するよりも低コスト化を図ったものである。(f)と(g)は、接着の検査と隙間の調整作業の省力化を目的としている。

3. 隙間調整装置の仕様検討

3.1 隙間調整に必要な力の把握

隙間調整装置の設計に先立ち、装置に必要な载荷能力を把握するため、12 番分岐器の試験用ポイントを用いて、トングレールと基本レールおよび止め金具箇所の隙間を無くすために必要な力を測定した。図4に測定試験の状況を示す。载荷点は、控え棒から分岐器前端にまくらぎ1本目の位置(载荷点A)および控え棒から分岐器後端にまくらぎ5本目の位置(载荷点B)の2パターンとし、それぞれの位置で2回ずつ载荷した。本試験では、ジャッキ1体を载荷点AもしくはBの左右のトングレール間に設置し、油圧ジャッキを伸ばすことで、両トングレールの腹部を軌間外側へ载荷した。荷重は、油圧ジャッキと治具の間に設置したロードセルにより測定し、载荷点Aではトングレールと基本レール、载荷点Bではトングレールと止め金具の隙間が0mmとなった際の荷重を隙間調整に必要な力として整理した。本試験は、载荷点以外における左右のトングレールの力の伝達を防ぐため、控え棒を撤去した状態で行った。また、床板への塗油が無い状態で行った。

図5に隙間調整に必要な力の測定結果を示す。本試験では、トングレールと基本レールの隙間を無くすためには、2.1kN~2.3kN、トングレールと止め金具の隙間を無くすためには、3.4kN~3.5kNの力が必要であった。ここで、本試験結果は、床板とトングレールの塗油状態や各部の隙間量に影響を受けると考えられる。このため、隙間調整装置の载荷能力は、本試験結果に余裕を持たせ、5kNを目標とした。

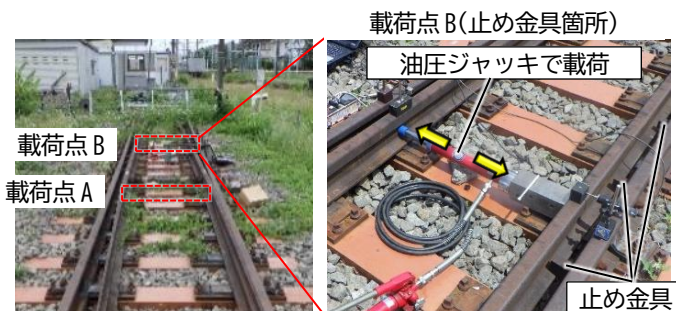


図4 測定試験の状況

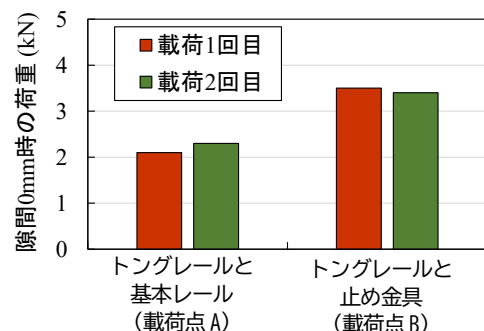


図5 隙間調整に必要な力の測定結果

3.2 隙間調整装置の設計

前章のコンセプトと前項の試験結果に基づき、隙間調整装置を設計した。図 6 に設計した隙間調整装置の概要を示す。隙間調整装置は、装置の両端を左右のトングレールに固定し、駆動部が伸縮することで、各部の隙間を調整するものである。目標とした载荷能力 5kN を発揮するため、駆動部には、電動機械式のアクチュエータを採用した。本アクチュエータでは、サーボモータの回転をマイタギアにより鉛直軸まわりの回転に変換し、さらにウォームギアとウォームホイールにより、まくらぎ長手方向の軸まわりの回転に変換することで、ボールねじ軸を回転させている。また、ボールねじナットをシリンダの内筒側に固定し、並進運動へ変換することで、シリンダを伸縮させる機構としている。また、本機構はウォームホイールからウォームギアを逆回転させることができないセルフロック機能を有している。このセルフロック機能により、トングレールから受ける反力によって装置が伸縮することを防止している。また、トングレールと基本レール・止め金具の隙間が通常数 mm 程度であることを踏まえ、これに対して十分な調整機能を持たせるように、シリンダのストロークは最大で $\pm 20\text{mm}$ とした。なお、駆動部は、サーボモータが駆体からはみ出すような形状をしているものの、まくらぎの幅に収まっており、かつ、駆動部の重量バランスに起因して連結バーが軸まわりに回転しないことを確認している。

図 7 にトングレールと基本レール・止め金具の隙間を測定するための変位計と、トングレールと隙間調整装置の継手構造を示す。変位計は、基本レールを固定点とし、トングレールの変位を測定することで、両者の隙間を測定するものである。変位計としては、接触式の他、レーザー、もしくは、渦電流と超音波センサを組み合わせた非接触式を検討した。このうち、本研究では、変位計の動作の確実性を重視し、接触式を採用して製作することとした。なお、変位計の設置箇所では、基本レール締結用座金のボルトの緩みをまくらぎの側面から確認することは可能であるものの、ボルトの締め直しの際には、変位計の取り外しが必要となる。トングレールと隙間調整装置の継手部は、左右レール間の電気絶縁性を確保するため、絶縁材を介してボルトで固定する構造としている。また、トングレールの転換動作に追従し、継手部に曲げが作

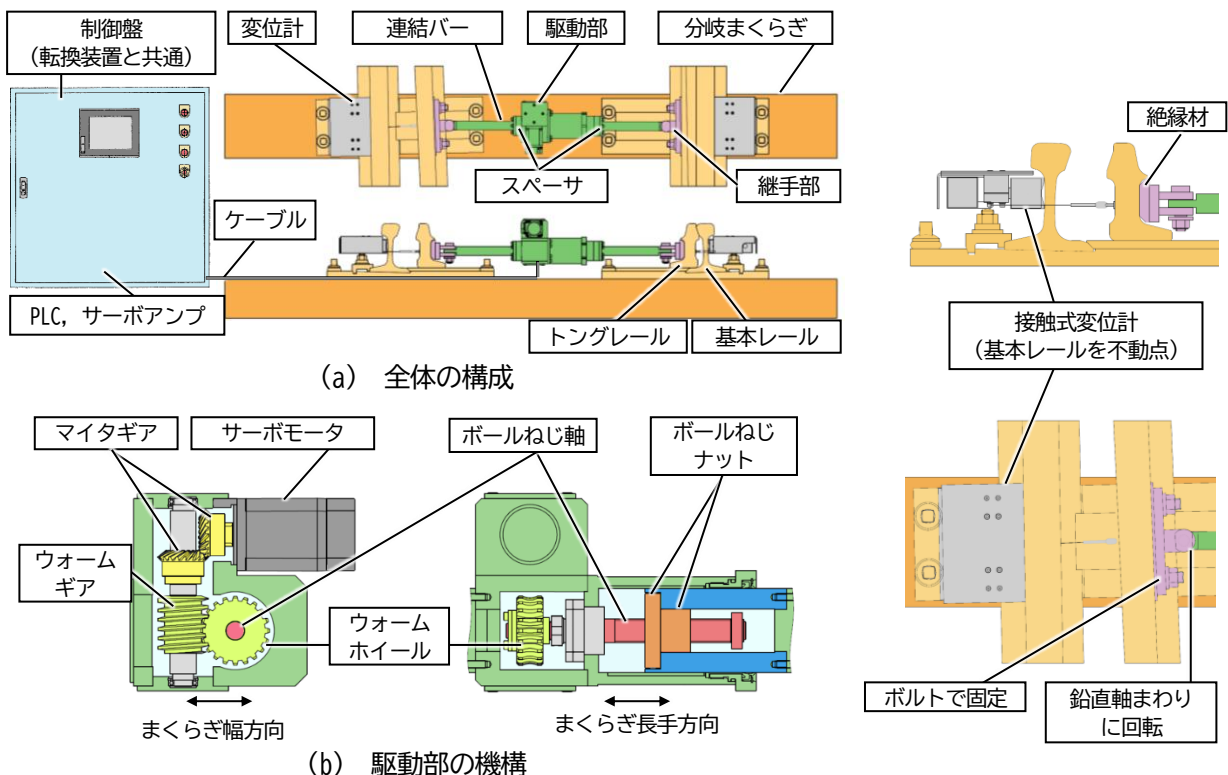


図 6 設計した隙間調整装置の概要

図 7 接触式変位計およびトングレールと装置の継手構造

用することを防止するため、鉛直軸まわりに回転可能な構造としている。さらに、連結バーと駆動部の間のスペーサを付け替えることで、伸縮前の装置の全長が任意に設定可能であり、ポイントの任意の分岐まくらぎ上に設置可能としている。隙間調整装置は、転換装置と同じ制御盤にケーブルで接続し、制御盤内のPLCによって、自動で動作するものとした。

3.3 隙間調整装置の配置

ポイントにおける隙間の検査範囲は、トングレールの先端からトングレールの曲げ点までの範囲、および、止め金具の設置箇所に分かれている。また、隙間の検査基準値は、トングレールの先端から 500mm の範囲で 1mm、それ以外の箇所では 3mm とし、これを超過した場合には、隙間の調整作業を行っている。

ここで、図 8 に示す 12 番分岐器の弾性ポイントのように、転てつ棒および控え棒が 1 本の構造の場合、人手による従来の隙間の調整作業は、次のような手順で行われる⁶⁾。まず、フロントロッド、控え棒、転てつ棒を取り外し、トングレールが各部材からの拘束を受けない状態にしたうえで、作業員の経験に基づき、隙間の状況に応じてバールでトングレールを基本レールに押し付け、トングレールの先端から曲げ点までの隙間を調整する。つぎに、止め金具箇所に隙間がある場合、トングレール後端の固定部の調整式座金でレール位置を調整する。さらに、転てつ棒、控え棒の順番にボルトで手締めし、その長さを微調整するとともに、車輪のフランジが通過するための隙間であるフランジウェイ幅（以下、FW 幅）の確保を確認する。その後、フロントロッドを取り付け、転てつ棒と控え棒を所定の緊締トルクで締結し、各部の隙間の状態と FW 幅を確認し、良好であれば調整を終了する。

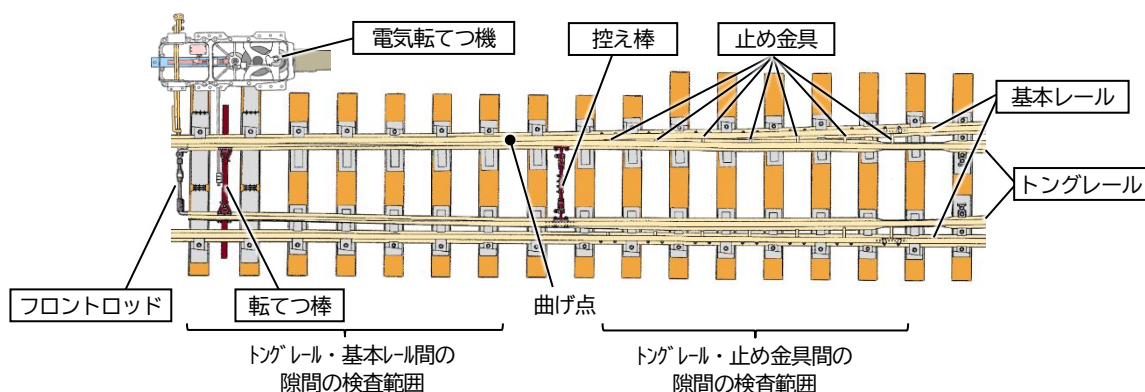


図 8 12 番分岐器の弾性ポイント

以上の隙間の調整作業を大別すると、①フロントロッド・転てつ棒によるトングレール先端の調整、②バールによるトングレール先端から曲げ点までの範囲の調整、③控え棒による曲げ点近傍の調整と最小 FW 幅の確保、④調整式座金による止め金具設置範囲の調整となる。ここで、①については、転換装置によるトングレール位置と転換圧力の監視によって隙間が無い状態を確保する。このため、隙間調整装置は、②～④の隙間の調整を行う役割とし、それぞれ②、③、④の範囲に概ね均等に最低 1 台ずつ設置するのが妥当であるとする。また、ポイントの基本レールの締結装置は、座金とレールプレスの 2 種類が概ね交互に敷設されるものの、基本レールとトングレールの隙間を測定する前述の変位計の設置箇所は、基本レールの腹部に支障しない座金の敷設箇所に限定される。

以上を踏まえ、隙間調整装置の配置は、図 9 に示す位置が妥当であると判断し、以降の検討を進めることとした。

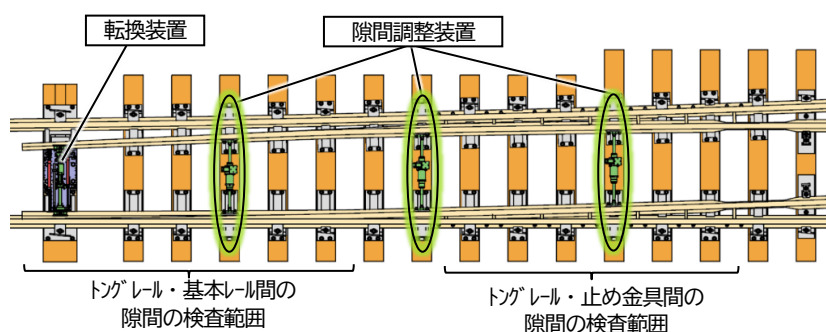


図9 隙間調整装置の配置 (12 番分岐器の弾性ポイント)

3.4 隙間調整装置の制御方法

隙間調整装置は、FW 幅の確保を前提としたうえで、隙間を無くすために伸縮させる必要があるため、図10に示す制御方法を考案した。本方法は、転換装置による転換が終了した後に隙間調整装置が動作を開始するものである。隙間調整装置の左右に設置した変位計の測定値と、この測定値に対する許容値の差を各装置が伸縮する量（以下、調整量）とし、3台を同時に伸縮させるものである。

3台の隙間調整装置は、それぞれ、サーボモータのトルクが上限に到達するか、シリンダのストロークが

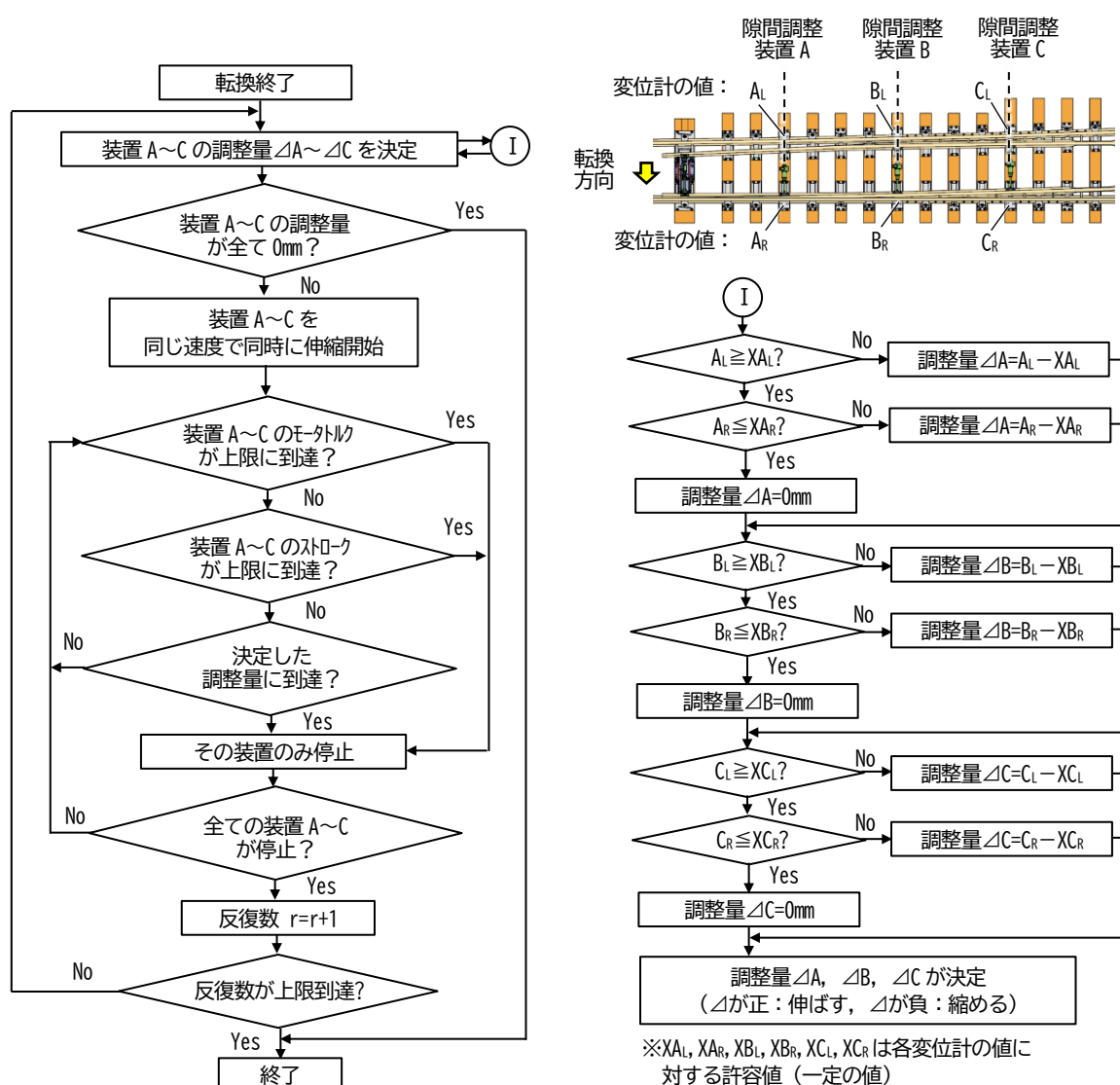


図10 隙間調整装置の制御方法

上限に到達するか、もしくは決定した調整量に到達した場合にその装置のみ停止する。3 台がすべて停止すると、再度、変位計の測定値と許容値を比較して、各装置の調整量を決定し、伸縮を再開し、同様にトルクとストロークの上限、調整量の到達により各装置を停止させる。この動作を反復し、3 台の装置の調整量がすべて 0mm になるか、もしくは反復数が 10～20 回程度を目安とする上限回数に到達した場合に、隙間調整の動作を完了させるものとした。反復数に上限を設定したのは、変位計の測定値が許容値と厳密に一致せずに、反復が完了しないことを懸念したためである。

上記の制御方法では、反復中に 3 台中のある装置が停止した場合でも、その他の装置の動作の影響により再度調整する必要が生じた場合には、伸縮動作が可能となる。3 台の隙間調整装置は、シリンダのストロークが±20mm 確保できる中立位置を記憶しており、転換する際には、転換直前に、一度中立位置に戻るようになっている。これにより、隙間調整開始前において、常に十分な調整量を確保することができる。

4. 隙間調整装置の製作と性能確認試験

前章の設計に基づき、隙間調整装置 3 台を製作するとともに、試験用ポイントおよび所内試験線の分岐器に敷設し、性能確認試験を行った。

4.1 製作した隙間調整装置

図 11 に製作した隙間調整装置を示す。隙間調整装置を設置したまくらぎは、一般的な分岐まくらぎである。また、製作した 3 台の隙間調整装置は、設置する箇所を左右トングレール間の距離に応じて、連結バーと駆動部の間のスペーサの長さが異なるものの、それ以外の部品はすべて同じものである。

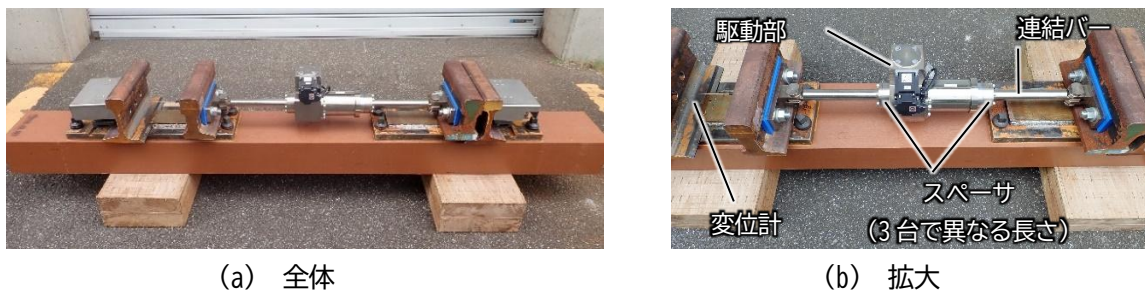


図 11 製作した隙間調整装置

4.2 試験用ポイントへの敷設と隙間調整機能の確認試験

前節で製作した隙間調整装置と転換装置⁵⁾を 12 番分岐器の試験用ポイントに敷設し、一連の機能確認を行った。図 12 に現行の電気転てつ機を敷設した状況と、電気転てつ機と控え棒を撤去し、転換装置と隙間調整装置を敷設した状況を示す。敷設前後の状況を比較すると、まくらぎの間に位置していた転てつ棒と控え棒が撤去され、まくらぎ上に設置した装置に置換したことで、バラストのつき固め不能箇所が解消されていることが分かる。

転換装置による転換後に、隙間調整装置 3 台を前章の制御方法で動作させた。図 13 に動作状況を示す。また、図 14 に各隙間調整装置の転換側と反転換側に設置した変位計の値を示す。変位計の値は、転換・反転換側ともに、トングレールと基本レールの隙間が広がる方向を正としている。隙間調整時における転換側の変位計の値の収束に対する許容値は 0.5mm とし、前述した隙間の検査基準値（トングレール先端から 500mm の範囲で 1mm、それ以外で 3mm）以下の値とした。また、反転換側の変位計の許容値は 72.5mm と

し、確保すべき最小 FW 幅である 70mm 以上の値とした。これらの許容値は、前章の制御方法で示した図 10 の $XA_L \sim XC_R$ に相当するものであり、転換側の変位計の値が 0.5mm を下回り、かつ、反転換側の変位計の値が 72.5mm を上回った場合に、調整量が 0mm となり、隙間調整装置が停止することを意味している。

図 14 より、各変位計の値はいずれも減少しており、装置 A～C が伸長していることが分かる。転換側の変位計の値は、すべて許容値 0.5mm を下回り、各装置の設置箇所の隙間が減少していることが分かる。また、反転換側の変位計の値は、許容値 72.5mm 以上であり、必要な FW 幅 70mm を確保していることが分かる。

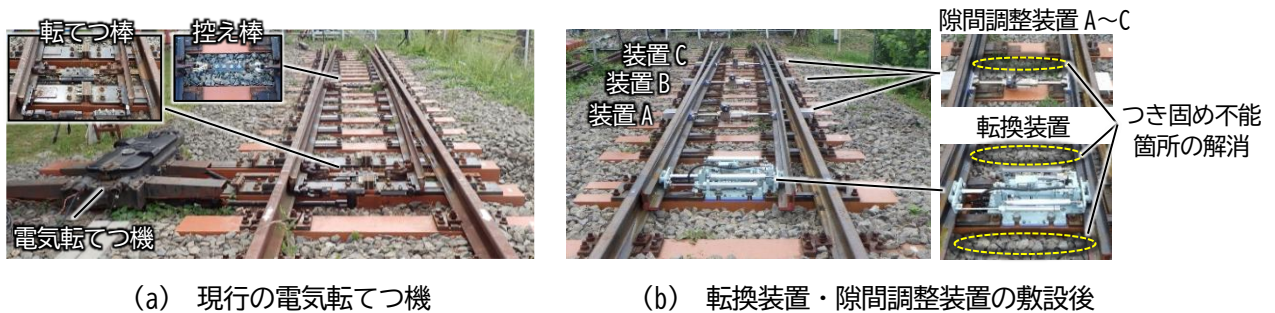


図 12 転換装置と隙間調整装置の敷設前後の状況 (12 番分岐器・試験用ポイント)

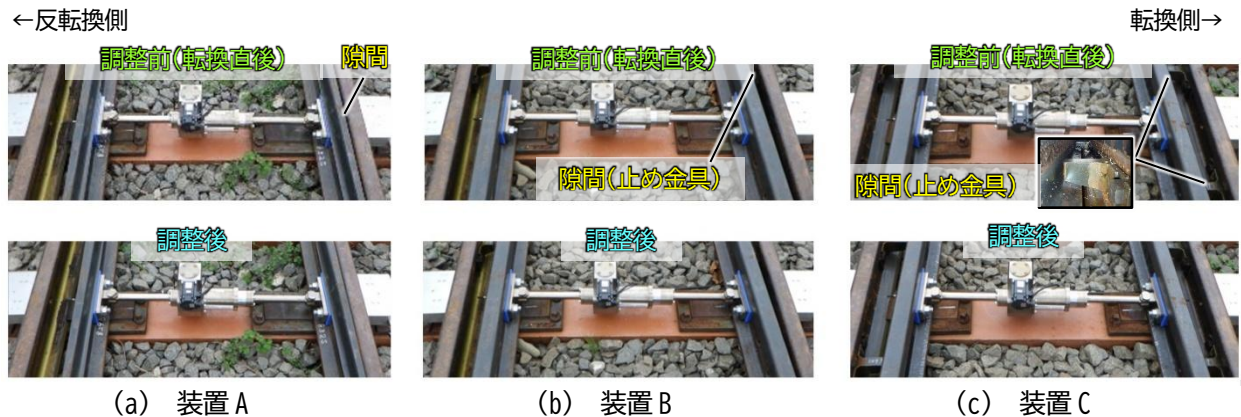


図 13 伸縮動作による隙間の調整前後の状況

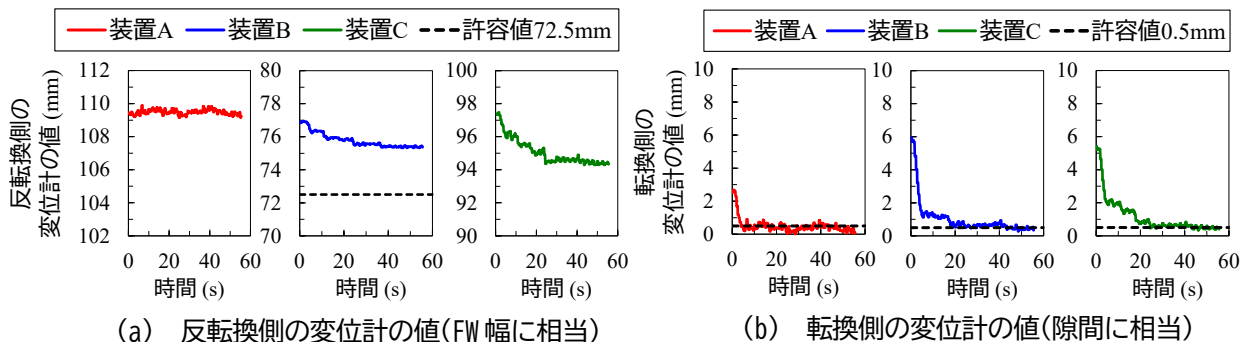


図 14 隙間調整装置の各変位計の値

つぎに、各部の隙間の状態が変化した際に、本装置の隙間調整機能が有効か否かを確認するため、床板への塗油の有無や、止め金具の隙間を変化させた条件を設定したうえで、上記と同様に、転換後に隙間調整装置 3 台を自動伸縮させる試験を行った。本試験では、隙間の検査基準値を超過する条件を設定するため、設計寸法から 2 mm 短い止め金具と、厚さ 1 mm と 2 mm の鋼板を組み合わせることで、止め金具の長さを

設計寸法の+1 mm～-2 mm の範囲で変化させた（図 15）．また，図 16 に示すように，隙間の調整前後の状態，各部の隙間を隙間ゲージにより測定した．

図 17 に隙間調整前後における各部の隙間の測定結果を示す．図中には，隙間の検査基準値を示している．図 17 より，床板の塗油の有無や止め金具の隙間を変化させたすべての条件において，全測点の隙間を検査基準値内に調整できていることが分かる．

以上より，開発した隙間調整装置は，各部の隙間を調整するうえで有効なものであることが分かる．また，本装置を設置したポイントは，転換動作を行う都度，検査範囲の隙間を自動で基準値内に調整することで，年間に最大 4 回実施している隙間の検査と調整作業を自動化することが可能であると考えられる．

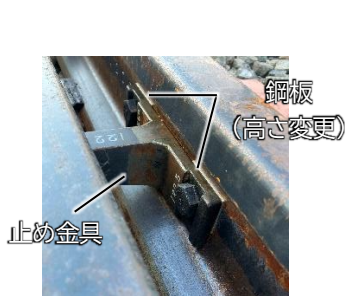


図 15 止め金具の高さ調整

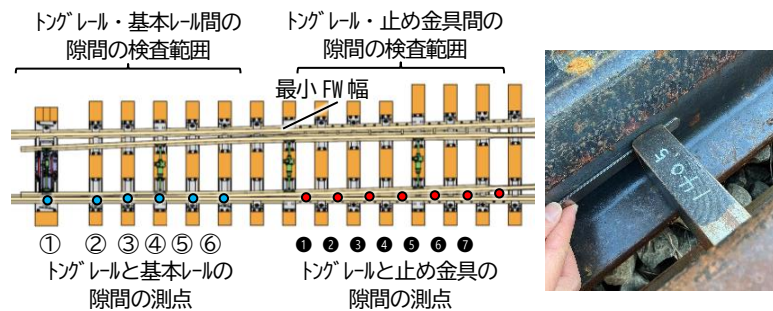


図 16 隙間の測点と測定状況

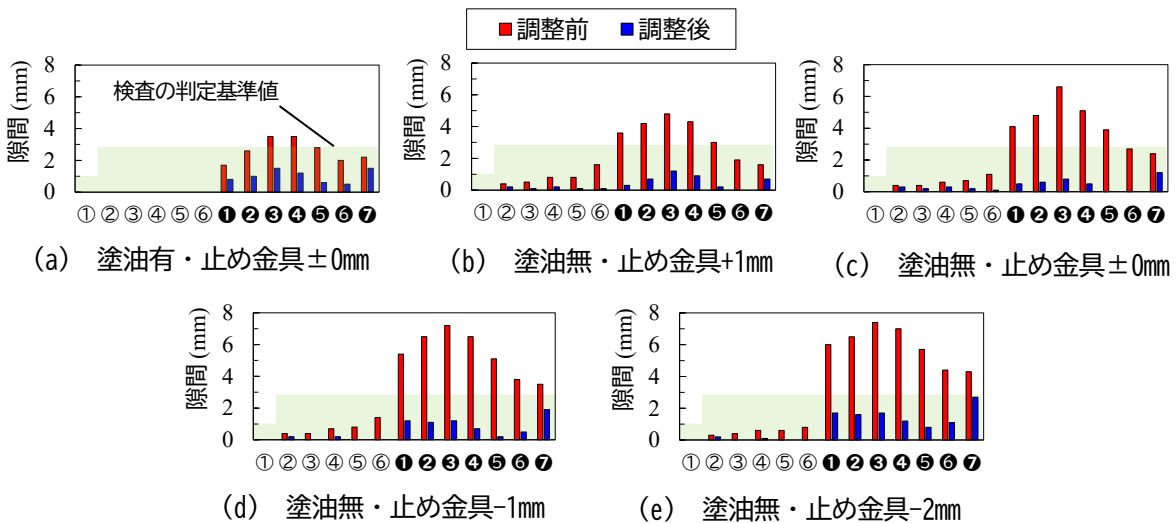


図 17 隙間調整装置による調整前後の隙間の測定結果

4.3 試験線への敷設と車両走行試験

開発した隙間調整装置と転換装置を所内試験線の 60kg レール用 8 番分岐器の弾性ポイントに敷設し，分岐器上を試験車両が走行した際の装置の異状の有無を確認した．図 18 に両装置を敷設した分岐器の状況を示す．開発した隙間調整装置を 8 番分岐器に適用するにあたり，装置を取り付ける位置の左右トングレール間の距離が 12 番分岐器とは異なるため，前述の連結バーと駆動部の間のスペーサの長さを変更している．その他，転換装置の構成や隙間調整装置の制御方法等は前節までと同じである．所内試験線における動作確認の結果，8 番分岐器においても，隙間調整装置は，各部の隙間を検査基準値内に調整可能なことを確認した．

図 19 に試験車両が走行した際の状況を，図 20 に車両が基準線側を通過した際の転換装置および隙間調

整装置の出力値を示す。走行試験の結果、車両通過時に転換装置が出力する転換圧力、トングレール位置および隙間調整装置が出力する変位計の値に変動は認められず、車両通過後の各装置の動作にも異状は認められなかった。



図 18 所内試験線の 8 番分岐器への敷設状況



図 19 車両走行時の状況

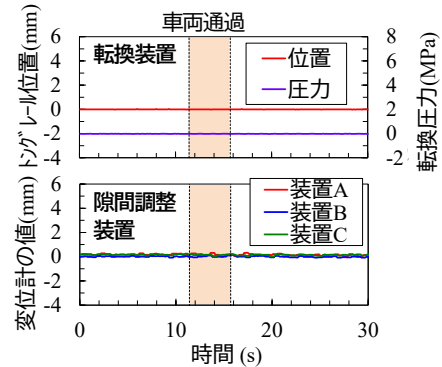


図 20 車両通過時の出力

5. まとめ

本研究では、転換後にトングレールの位置を多点制御して基本レールおよび止め金具との隙間を調整する隙間調整装置を開発するとともに、本装置を分岐器のポイントへ敷設し、一連の性能確認試験を実施した。得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) 左右のトングレールに固定して伸縮することで、トングレールの転換後に各部の隙間を調整する隙間調整装置を設計・製作した。本装置は、隙間の調整に必要な力を低コストかつ省スペースで実現するため、サーボモータとボールねじでシリンダを伸縮させる機構とした。また、トングレールと基本レール・止め金具の隙間に基づき伸縮動作を繰り返すことで、隙間調整装置 3 台が自動で隙間を調整する制御方法を考案した。
- (2) 開発した隙間調整装置を試験用ポイントに敷設して動作確認を行った結果、各部の隙間が検査基準値内に調整可能なことを確認した。また、隙間調整装置を所内試験線の分岐器に敷設し、試験車両が通過した際に装置の出力値に異常がないことを確認した。

文 献

- 1) 潮見俊輔：電気転てつ機，RRR，Vol.76，No.8，pp.30-33，2019
- 2) 塩田勝利，及川祐也，潮見俊輔，押味良和：軌道材料および電気転てつ機のモニタリング情報を用いた分岐器の状態検知に関する基礎検討，第 21 回鉄道工学工学シンポジウム論文集，pp.67-74，2017
- 3) 玉川新悟，清水紗希，及川祐也，山本智之：分岐まくらぎに内蔵したレール転換装置の開発，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.76，No.2，pp.398-400，2020
- 4) Tamagawa, S., Shimizu, S. and Yasuda, S., Rail switching device for turnout using electrohydraulic actuator and its performance tests, Proceedings of the Sixth International Conference on Railway Technology (2024), pp.1-12.
- 5) 玉川新悟，上田将司，安田新太郎，細見章人：トングレールの転換・隙間調整装置の開発と保守省力化を実現する分岐器ポイントの提案，日本機械学会論文集，Vol.91，No.951，2025
- 6) 湯ノ口洋平：弾性ポイントの密着・接着調整手順，新線路，Vol.73，No.2，pp.56-57，2019

事故・ヒヤリハット情報等の収集・活用に向けた
デジタル技術の導入に関する実態調査

小野間 統子* 岡田 安功* 藤道 宗人* 中村 竜*

Study on the Introduction of Digital Technology for Collecting and Utilizing
Accident and Near-Miss Reports

Noriko ONOMA Yasunori OKADA Munendo FUJIMICHI Ryo NAKAMURA

Railway operators are increasingly using digital methods to collect information on accidents and near-misses, although such data are rarely disclosed. To promote the widespread adoption of digitalization, this study surveyed implementation cases through questionnaires and interviews. The investigation identified the types and prevalence of digital technologies, and operational practices, as well as their benefits. This paper reports on the current status of adoption, practical approaches, and effects revealed through these surveys.

キーワード：事故情報，ヒヤリハット情報，デジタル技術，調査研究

1. はじめに

鉄道事業者は、国土交通省が定める運輸安全マネジメント制度に基づき、自主的かつ積極的な輸送の安全の取組を推進し、構築した安全管理体制を PDCA（Plan, Do, Check, Action）サイクルによって継続的に改善することにより、輸送の安全性の向上を図っている。具体的な進め方の参考例等を示す国土交通省が発行するガイドライン¹⁾では、安全管理体制の構築・改善を図るためのベースの1つとして、事故、ヒヤリハット情報等の収集・活用を明示している。

近年では、労働人口減少や IT 技術の進展等を背景に業務のデジタル化が進み、航空分野では AI 技術を使用した事故調査の研究開発が始まりつつある²⁾。鉄道分野でも事故、ヒヤリハット情報の収集は、デジタル化が進められ^{3) 4)}、導入されているデジタル技術は、膨大な情報の収集・活用を可能とするデータベースの開発⁵⁾など大規模なものから、Excel などの汎用ソフトを用いたものもあると考えられる。事故、ヒヤリハット情報等を収集・活用するためにデジタル技術の導入を検討する鉄道事業者にとって、他の事業者で既に導入されている事例は有益な情報になり得るが、このような情報は公開されていないことが多い。

そこで、本研究では、事故、ヒヤリハット情報等の収集・活用に向けたデジタル技術の導入（以降、「デジタル技術の導入」）を促進することを目的として、AI 技術から汎用ソフトまで、様々なデジタル技術の導入に関する実態調査を行い、収集した情報や事例を共有することとした。具体的には、まず、アンケート調査を行い、鉄道事業者におけるデジタル技術の導入の実態を定量的に把握した。次に、ヒアリング調査を行い、デジタル技術の導入事例（デジタル技術の詳細、導入時の工夫・効果・課題等）を整理した。本稿では、これらの結果を報告する。

2. アンケート調査

2.1 調査目的

事故、ヒヤリハット情報等の収集・活用には、現場での情報収集、分類や分析、対策の策定実施、情報の

* 人間科学研究部 安全心理研究室

周知等、様々なフェーズがあり、フェーズにより導入されているデジタル技術の種類や導入割合等が異なる可能性がある。ここでは鉄道事業者におけるこれらの実態を全体的かつ定量的に把握することを目的とした。

2.2 調査内容

2.2.1 事故、ヒヤリハット情報等の収集・活用フェーズ

事故、ヒヤリハット情報等の収集・活用の取組のうち、調査時点においてデジタル技術導入の可能性が考えられる取組をいくつかのフェーズに区切って調査することとした。フェーズの区切り方と各フェーズの定義は、国土交通省の「事故、ヒヤリ・ハット情報の収集・活用の進め方～事故の再発防止・予防に向けて～（鉄道モード編）」⁶⁾を参考とし、表1の通りとした。

表1 事故、ヒヤリハット情報等の収集・活用の各フェーズの定義

フェーズの名称	定義
①報告・収集	発生した事故、ヒヤリハット情報等の報告や収集を行うこと
②集約	報告・収集された事故、ヒヤリハット情報等をそれぞれ紙媒体または電子媒体を用いて1箇所にまとめること
③分類	集約した事故、ヒヤリハット情報等を収集している情報の内容（対象、場所、原因等）に応じて分類、整理すること
④リスク評価	集約・分類した事故、ヒヤリハット情報等を影響や結果の重大性等により評価すること
⑤傾向分析	集約・分類・リスク評価した事故、ヒヤリハット情報等について、多発する事故、ヒヤリハットの内容、場所、時間帯等の傾向をグラフ化等によって把握すること
⑥原因分析	集約・分類・リスク評価した事故、ヒヤリハット情報等について、重要な事故、ヒヤリハットの事例を取り上げ、原因分析をなぜなぜ分析、4M4E分析、特性要因図等によって行うこと
⑦展開・周知	集約あるいは傾向分析・原因分析まで行った事故、ヒヤリハット情報等を口頭もしくは紙媒体・電子媒体を用いて社内展開すること

2.2.2 調査項目

各フェーズで導入されているデジタル技術については、選択肢を設定して回答を求めた。選択肢は、鉄道・航空・自動車・海事分野における事故、ヒヤリハット情報等の収集・活用に関する公開情報、運輸安全取組事例等⁷⁾を参考に設定した。なお、導入されているデジタル技術を調査するだけでなく、デジタル技術以外に用いられている手段を調査することは、デジタル技術の導入における課題を考察する上で有用であると考えられる。そのため、国土交通省の「事故、ヒヤリ・ハット情報の収集・活用の進め方～事故の再発防止・予防に向けて～（鉄道モード編）」⁶⁾を参考にデジタル技術以外の手段も選択肢として設定した。

「①報告・収集」、「⑦展開・周知」については、情報の経路が複数考えられる。そこで、「①報告・収集」は、「現場社員から安全管理部門」の他に、「現場社員から現場管理者」、「現場管理者から安全管理部門」の経路についても回答を求めた。「⑦展開・周知」は、「安全管理部門から現場社員」の他に、「安全管理部門から現場管理者」、「現場管理者から現場社員」の経路についても回答を求めた。なお、表1で定義したフェーズのうち、「③分類」は対象、場所、原因等による分類、「④リスク評価」は影響や結果の重大性に基づく評価と定義したが、これらは、いずれも集約した個々の情報等の分類作業であるため、「③分類」と「④リスク評価」は1つの調査項目（「③④分類・リスク評価」）として設定した。

最終的にアンケート調査で用いたフェーズと、各フェーズで設定した選択肢を表2に示す。アンケート調査では、表2に示した各フェーズで用いられている手段について、選択肢を用いて回答を求めた（複数選択可）。事故情報とヒヤリハット情報では回答が異なる可能性があるため、それぞれの情報について、回答を求めた。質問項目は、例えば、事故情報の「②集約」フェーズについての場合、「“事故情報”の『集約』の方法についてお尋ねします。会社全体の“事故情報”はどのように集約していますか?」と尋ねた。

2.3 調査方法

調査対象者は（公財）鉄道総合技術研究所鉄道技術推進センター会員の鉄道事業者の安全部門の担当者とした。アンケート調査はWeb上で2022年10月から11月にかけて実施した。

2.4 調査結果と考察

2.4.1 回答状況

117事業者から121件の回答を得た。回答数が回答事業者数を上回ったのは、事業者によっては、複数の部署から回答があったためである。複数の部署から回答があったものは1事業者の回答として統合し、最終的に117事業者を分析の対象とした。回答率は70.1%であった。回答事業者の鉄道技術推進センターの会員種別内訳を表3に、社員規模内訳を表4に示す。

表2 各フェーズで用いている手段の選択肢（抜粋）

フェーズ	選択肢
①報告・収集	(ア) システム・フォーム・ポータルサイト・アプリ等 (イ) メール (ウ) 対面 など
②集約	(ア) 共有データベース（社内サーバー・クラウド上等） (イ) データファイル（Excel等）に手入力 (ウ) 紙 など
③④分類・リスク評価	(ア) システム・ソフトウェア・アプリ等 (イ) 手作業 (ウ) グループ討議・会議・委員会などで議論 など
⑤傾向分析	(ア) システム・ソフトウェア・アプリ等 (イ) 表計算ソフト等（Excel等）を用いて実施 (ウ) 手作業 (エ) グループ討議・会議・委員会などで議論 など
⑥原因分析	(ア) システム・ソフトウェア・アプリ等 (イ) 表計算ソフト等（Excel等）を用いて実施 (ウ) 手作業 (エ) グループ討議・会議・委員会などで議論 など
⑦展開・周知	(ア) システム・ソフトウェア・ポータルサイト・アプリ等 (イ) DVD・ビデオ等 (ウ) ディスプレイ・モニターに投影 (エ) メール (オ) ニュースの配信（電子媒体） (カ) ニュースの配信（紙媒体） (キ) 会議・委員会 など

注1) 下線は、デジタル技術に該当する手段を示す。

注2) 選択肢の「データファイル（Excel等）」はデータを蓄積するソフトウェアを、「表計算ソフト等（Excel等）」はデータ分析を行うソフトウェアを示す。

表3 回答事業者の会員種別内訳（N = 117）

会員種別	回答事業者数（社）	回答事業者全体に占める割合（%）
JR	5	4.3
公営地下鉄	8	6.8
大手民鉄	11	9.4
第三種鉄道事業者	3	2.6
中小民鉄等	90	76.9

表4 回答事業者の社員規模の内訳（N = 117）

社員規模	回答事業者数（社）	回答事業者全体に占める割合（%）
100名未満	42	35.9
100名以上～500名未満	50	42.7
500名以上～1,000名未満	6	5.1
1,000名以上～5,000名未満	14	12.0
5,000名以上	5	4.3

2.4.2 各フェーズにおけるデジタル技術の導入状況

各フェーズにおけるデジタル技術の導入状況の回答を集計した結果を図1、各フェーズで用いられている主な手段を表5に示す。事故、ヒヤリハット情報のいずれかにおいてデジタル技術を導入していると回答した事業者は、「①報告・収集」、「②集約」、「⑦展開・周知」が比較的多く、「③④分類・リスク評価」、「⑤傾向分析」、「⑥原因分析」が比較적少なかつた。

事故、ヒヤリハット情報のいずれかにおいてデジタル技術を導入している事業者が比較的多い「①報告・収集」、「②集約」、「⑦展開・周知」は、情報を伝達及び集約するフェーズである。「①報告・収集」で求められる要件は、特別な知識等を必要とせず誰でも情報を迅速かつ手軽に伝達できることであると考えられる。これを満たすデジタル技術として、「メール」や「システム・フォーム・ポータルサイト・アプリ

等」が用いられていた。「②集約」で求められる要件は、大量の情報を手間をかけずに集約できることであると考える。これを満たすデジタル技術として、「データファイル（Excel 等）」や「共有データベース」が用いられていた。「⑦展開・周知」で求められる要件は、迅速に情報を伝達できること、及び文章だけでなく写真や図等の豊富な情報を伝達できることであると考えられる。これを満たすデジタル技術として、「メール」や「システム・ソフトウェア・ポータルサイト・アプリ等」が用いられていた。

事故、ヒヤリハット情報のいずれかにおいてデジタル技術を導入している事業者が比較的少ない「③④分類・リスク評価」、「⑤傾向分析」、「⑥原因分析」は、情報を分類・評価し、分析するフェーズである。

「③④分類・リスク評価」で求められる要件は情報を定められた基準等に従って分類し、作業状況等を踏まえてリスク評価すること、「⑤傾向分析」で求められる要件は発生傾向をグラフ化等により分析すること、「⑥原因分析」で求められる要件はなぜなぜ分析等により原因を深掘りすることであると考えられる。これらは、従来、人の知識・経験や分析スキルに基づいて行われており、今回の調査でも、「③④分類・リスク評価」、「⑤傾向分析」、「⑥原因分析」の各フェーズで、人による手段である「手作業」及び「グループ討議・会議・委員会などで議論」が比較的多く用いられていた（表5）。これらのフェーズでデジタル技術の導入が比較的進んでいない背景として、求められる要件を人に代わって満たすことができるデジタル技術の開発・普及が、2022年の調査時点では十分に進んでいなかったことが一因として考えられる。

一方、デジタル技術として、「⑤傾向分析」と「⑥原因分析」では「表計算ソフト（Excel 等）」、また「③④分類・リスク評価」、「⑤傾向分析」、「⑥原因分析」では少数ながら「システム・フォーム・ポータルサイト・アプリ等」を用いているとの回答が得られた（表5）。ただし、これらのデジタル技術が分類・評価や分析そのものを実行する機能を有しているのか、あるいは、これらの機能を持たず、分類・評価や分析を人が実施する際のツールとしてデジタル技術が用いられているのかは、アンケート調査のみからは判明しなかった。このような具体的内容については、次のヒアリング調査で把握することとした。

以上より、デジタル技術の導入が進んでいるフェーズと進んでいないフェーズが存在し、従来、人の知識・経験や分析スキルに基づいて行われてきた分類・評価や分析のフェーズでは導入が進んでいないことが明らかになった。また、各フェーズで用いられているデジタル技術の種類等を定量的に把握した。次に、導入されているデジタル技術について、より詳細に把握するためのヒアリング調査を実施した。

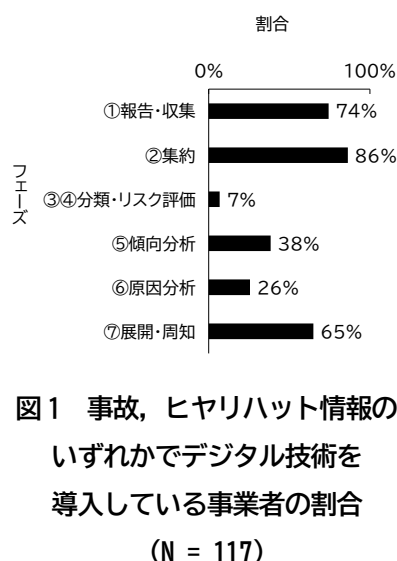
表5 各フェーズで用いられている主な手段

フェーズ	用いられている主な手段
①報告・収集	メール（事故 34.2%, ヒヤリ 23.9%） システム・フォーム・ポータルサイト・アプリ等（事故 18.8%, ヒヤリ 20.5%） 対面（事故 89.7%, ヒヤリ 77.8%）
②集約	データファイル（Excel 等）（事故 70.9%, ヒヤリ 70.9%） 共有データベース（事故 35.0%, ヒヤリ 26.5%） 紙（事故 46.2%, ヒヤリ 46.2%）
③④分類・リスク評価	システム・ソフトウェア・アプリ等（事故 6.0%, ヒヤリ 3.4%） グループ討議・会議・委員会などで議論（事故 59.8%, ヒヤリ 60.7%） 手作業（事故 56.4%, ヒヤリ 42.7%）
⑤傾向分析	表計算ソフト（Excel 等）（事故 33.3%, ヒヤリ 29.9%） システム・ソフトウェア・アプリ等（事故 4.3%, ヒヤリ 2.6%） グループ討議・会議・委員会などで議論（事故 65.0%, ヒヤリ 58.1%） 手作業（事故 39.3%, ヒヤリ 33.3%）
⑥原因分析	表計算ソフト（Excel 等）（事故 23.1%, ヒヤリ 17.1%） システム・ソフトウェア・アプリ等（事故 2.6%, ヒヤリ 1.7%） グループ討議・会議・委員会などで議論（事故 70.9%, ヒヤリ 65.8%） 手作業（事故 40.2%, ヒヤリ 29.1%）
⑦展開・周知	メール（事故 19.7%, ヒヤリ 15.4%） システム・ソフトウェア・ポータルサイト・アプリ等（事故 13.7%, ヒヤリ 13.7%） 社内研修・集合教育（事故 35.9%, ヒヤリ 23.9%） 会議・委員会（事故 35.0%, ヒヤリ 29.1%）

注1) 下線は、デジタル技術に該当する手段を示す。

注2) 「事故」は事故情報、「ヒヤリ」はヒヤリハット情報を示す。

注3) 「報告・収集」はデジタル技術が最も導入されている「現場社員から現場管理者」の経路の結果を、「展開・周知」はデジタル技術が最も導入されている「現場管理者から現場社員」の経路の結果を掲載した。



3. ヒアリング調査

3.1 調査目的

鉄道事業者におけるデジタル技術の導入事例（デジタル技術の詳細、導入時の工夫・効果・課題等）に関する具体的内容を収集し、整理することを目的とした。

3.2 調査内容

主な調査内容は、「使用しているデジタル技術の内容」、「導入や運用上の工夫」、「導入による効果」、「導入や運用の苦勞・今後の課題」等であった。

3.3 調査方法

デジタル技術の導入に関する幅広い事例を収集するために、アンケート調査の結果から、以下の鉄道事業者 10 社をヒアリング対象として選定した。

- ・ アンケート調査で、「③分類」、「④リスク評価」、「⑤傾向分析」、「⑥原因分析」の中の複数のフェーズにおいてデジタル技術を導入していると回答した鉄道事業者
- ・ 導入可能なデジタル技術は、事業者規模により異なる可能性があるため、大小様々な規模の事業者さらに、ヒアリング調査を進める中で、ヒアリング対象の複数社より参考事例として回答のあった 1 社にも追加で調査を依頼したため、最終的なヒアリング対象の鉄道事業者は 11 社であった。

ヒアリング調査は、事前に送付した調査内容に従い、回答内容に応じて適宜質問を追加する半構造化面接法で実施した。ヒアリング実施者は鉄道総研職員 2～3 名、ヒアリング対象者は 1～5 名であった。なお、1 社については日程が折り合わずヒアリング調査が実施できなかったため、質問項目をメールにて送付して回答を得た。ヒアリング調査は、2023 年 4 月～11 月に実施した。

3.4 調査結果と考察

ヒアリング対象事業者における導入事例を表 6 に示す。例えば、A 社では、「①報告・収集」、「②集約」、「⑦展開・周知」のフェーズで社内ネットワークシステムが導入されており、その効果として、情報を即時に共有可能であることが挙げられた。ヒアリングで収集できた内容（導入しているデジタル技術、導入時の工夫・効果・課題）のうち、表 6 では代表的なものを抜粋して掲載した。導入可能なデジタル技術は、事業者規模により異なる可能性があるため、表 6 には事業者規模も掲載した。

アンケート調査の結果（図 1）より、「①報告・収集」、「②集約」、「⑦展開・周知」はデジタル技術を比較的導入しやすいフェーズであると考えられ、これからデジタル技術の導入に取り組む事業者にとっては、まずこれらのフェーズへの導入を検討することが有効な選択肢になり得る。これらのフェーズで導入されているデジタル技術は、社内ネットワークシステム（A 社、B 社、D 社、E 社、I 社(1)、K 社）、インターネット上にデータを保存・管理するサービスであるオンラインストレージ（C 社(1)(2)）、アプリケーション（F 社、G 社、I 社(2)、J 社）、ポータルサイト（H 社）、メール（C 社(1)）等であった。これらのデジタル技術を導入した効果として、例えば社内ネットワークシステムでは、報告件数の増加（B 社、D 社、K 社）、情報を即時に共有可能なこと（A 社）、報告者の負担軽減（E 社）、情報の一元管理（I 社(1)）等が挙げられた。

一方、アンケート調査の結果（図 1）、デジタル技術の導入が比較的進んでいなかった「③分類」、「④リスク評価」、「⑤傾向分析」、「⑥原因分析」のフェーズのうち、「③分類」では、表計算ソフト（B 社）、

社内ネットワークシステム（E 社，I 社(1)，K 社），アプリケーション（F 社）が導入されており，例えば E 社では，報告者がプルダウン選択により事故種別等を分類していた．「⑤傾向分析」では，表計算ソフト（B 社，C 社(1)，D 社），社内ネットワークシステム（E 社，I 社(1)），アプリケーション（F 社，J 社）を用いて，データ集計やグラフ作成等が行われていた．「④リスク評価」では，K 社において対策の優先度を自動分類する「AI 分類」が導入されていた．なお，デジタル技術が分類・評価や分析そのものを実行する機能を有する事例は，K 社の「AI 分類」の一例のみであった．

以上より，デジタル技術の導入に関する幅広い事例を収集することができた．一方で，デジタル技術が分類・評価や分析そのものを実行する機能を有している事例は一例のみであり，限定的であった．

表 6 ヒアリング対象事業者で導入されているデジタル技術の詳細と工夫・効果・課題（一部抜粋）

事業者	対象とする情報	対象とするフェーズ	導入されているデジタル技術	工夫・効果・課題
A ¹	事故	①報告・収集 ②集約 ⑦周知・展開	技術 社内ネットワークシステム 詳細 グループ会社が社内ネットワークシステムに事故速報を入力する（①②）と，グループ本社も確認可能となる（⑦）	効果・グループ全体に情報を即時に共有可能 課題・社内ネットワークシステムには分析の機能がないため事故原因の分析に活用できない
B	ヒヤリハット	①報告・収集 ②集約 ③分類 ⑤傾向分析 ⑦展開・周知	技術 表計算ソフト（マクロ機能で入力・処理等を自動化），社内ネットワークシステム 詳細 社員が入力・閲覧可能な社内サーバー上に，マクロ機能を持つ表計算ソフトのファイルを配置．社員は「入力シート」にヒヤリハット情報・改善提案等を入力し（①③），それに対して安全担当部署が対応部署や対応の進捗等を入力（②③）．その他に，報告内容をフィルタリングして表示する（⑤⑦）「一覧シート」，キーワードに一致する報告を表示する（⑤⑦）「検索シート」がある	工夫・ヒヤリハットは，追加調査が必要な場合があるため，報告者の氏名の入力を必須化する一方，改善提案等は，報告のハードルを下げるため無記名も可 効果・システム導入前よりヒヤリハット等の情報が多く集まるようになった（導入前は年間 30～40 件，導入後は年間 150 件以上） ・報告者は自身の報告内容への対応状況の確認が可能 課題・マクロのメンテナンスはほぼ不要だが，バグ発生時は市販の参考書で学習し，本社安全担当部署が対応
C (1)	事故	①報告・収集 ②集約 ⑤傾向分析	技術 メール，表計算ソフト，オンラインストレージ ² 詳細 現場管理職が事故情報を 1 件 1 ファイルの「入力用ファイル」に入力し，指令にメール送付（①）．指令は指令情報や遅延情報を追記し，ファイルを本社安全担当部署と指令間で共有するオンラインストレージに保存（①）．本社安全担当部署は，「入力用ファイル」のデータを集約し（②），表計算ソフトのピボットテーブル機能を使って集計表やグラフを作成（⑤）	工夫・「入力用ファイル」のテンプレートに入力すると，運輸局報告用シートに自動転記され，入力負担を削減 ・「入力用ファイル」のテンプレートは表計算ソフトの VBA は使用せず関数だけで作成し，VBA の知識がなくとも容易に作成可能 課題・システム導入から現在までに蓄積された報告件数が多いにもかかわらず，気象条件や発生場所・時間帯等の発生傾向の分析は，現状は困難
C (2)	ヒヤリハット	①報告・収集 ②集約 ⑦展開・周知	技術 オンラインストレージ ² ，表計算ソフト 詳細 各現場の管理職が社員の日報に記載されたヒヤリハット情報を社員からの聞き取りをもとにオンラインストレージ上の表計算ソフトの「入力シート」に入力（①②）．「入力シート」に入力すると，セル参照により，各現場で用いる「指示用シート」と指導担当の管理職が参照する「指導用シート」に自動で転記（②⑦）．本社安全担当部署及び各現場の管理職は他箇所の入力内容をオンラインストレージ上で閲覧可能（⑦）	工夫・本社安全担当部署が，各現場の既存の報告様式を確認した上で，全箇所の報告様式の共通項目を網羅した「入力シート」のフォーマットを作成 ・現場での入力の手間が一度で済むように，本社安全担当部署が「入力シート」の入力内容を他シートに自動転記可能なセル参照を設定 効果・インターネット上にデータを保存・管理するため，社内サーバーや，別のサブスクリプションサービスよりも費用を抑えて各箇所との情報共有化を実現 課題・入力を担う管理職の育成
D	ヒヤリハット	①報告・収集 ②集約 ⑤傾向分析 ⑦展開・周知	技術 表計算ソフト，社内ネットワークシステム 詳細 ヒヤリハット情報を報告する際，表計算ソフトのファイルのフォーマットに 1 件 1 シートで記入（①）．PC を貸与されている本社技術系部署では，社員が共有フォルダ内に保存されたファイルに直接入力（①②）し，各自閲覧（⑦）．また本社の別部署では表計算ソフトのセル参照機能を使って集計やグラフ作成を実施（⑤）	効果・無記名式にしたことや表計算ソフトのファイルに入力することにしたことにより報告件数が増加 課題・社員に不信感を持たれないように報告の原文のまま会議に諮っているが，原文が説明不足だと，理解しにくくなってしまうため，ヒヤリハットの発生箇所の写真掲載が多くなる
E	事故・ヒヤリハット	①報告・収集 ②集約 ③分類 ⑤傾向分析 ⑦展開・周知	技術 社内ネットワークシステム 詳細 事故報告書，ヒヤリハット・気がかり，乗務報告書，運転状況報告書，通達等を報告・共有するシステムを導入．報告者はプルダウン形式で必要事項を入力（①②）し，事故の種別等の分類も行う（③）が，分類の最終判断は上長が行う（③）．入力情報を反映して運転状況報告書が作成され，承認者の承認後に公開範囲に該当する社員が閲覧可能（⑦）．職種によって閲覧できる報告書は異なり，また閲覧権限に応じて個人情報部分にはフィルターがかかって閲覧不可となる．集計作業を行うための CSV ファイルの出力が可能（⑤）	効果・プルダウンでの入力のため，報告者の負担が少ない ・踏切情報（キロ程等）や車両の編成データ（車号），関係者人事情報（所属，経験年数等）は，別途データベースを読み込み自動入力 ・事故は類似事例の報告内容を，コピー＆ペーストで入力もでき，時間短縮につながる ・CSV 出力機能により，管理職やシステム管理者が事故情報の傾向をすぐに確認できるので効率的 課題・システム管理者が全ての報告に対して差異対応や現場からの問合せ対応をしており，対応が属人化している ・作成を外注したシステム会社しか分からない部分について質問を受ける場合もあり対応に苦慮

表 6 ヒアリング対象事業者で導入されているデジタル技術の詳細と工夫・効果・課題（一部抜粋・続き）

事業者	対象とする情報	対象とするフェーズ	導入されているデジタル技術	工夫・効果・課題
F	ヒヤリハット	①報告・収集 ②集約 ③分類 ⑤傾向分析 ⑦展開・周知	技術 ノーコード・ローコード開発ツール ^{3,4} で作成したアプリケーション 詳細 個人のスマートフォンまたは現場の共用PCを用いて、「投稿用アプリケーション」から投稿（①②③）、「閲覧用アプリケーション」から投稿内容を閲覧（⑦）。分析は各現場で行うことを想定し、本社安全担当部署は収集した情報を区分ごとに集計し、全体の傾向を把握している（⑤）	工夫・同じ内容を間違って複数回投稿することを防ぐために、投稿後に「投稿受領」メールを自動送信 効果・現場管理職と本社安全担当部署の情報収集・集約の負担が減少 ・時間や場所の制限なく投稿・閲覧が可能 ・グループ会社を含む全社員に情報を即時に共有可能 課題・投稿件数がシステム導入前よりも減少。理由はシステムの周知不足、点呼時等で報告済みの可能性 ・現場管理者に自職場投稿のメール通知を設定したいが、投稿者のメールアドレスが表示され匿名性が損なわれるため未設定
G	ヒヤリハット	①報告・収集 ②集約 ⑦展開・周知	技術 ローコード開発ツール ⁴ で作成したアプリケーション 詳細 貸与されたタブレット端末から投稿（①②）。投稿内容は、所属（必須）、氏名（任意）、発生日時・天候、発生状況・内容等の情報の他に、タブレット端末で撮影した写真の添付投稿も可能。閲覧はタブレット端末または管理者は業務用PCから可能（⑦）	効果・従来は事業所のPCから入力する必要があったが、本システムの導入により時間と場所の制限が解消 ・費用を抑えてシステム開発を実現
H	事故・ヒヤリハット	⑦展開・周知	技術 ポータルサイト 詳細 サブスクリプションサービスのファイル・情報共有サービスを利用してポータルサイトを作成。一定以上の重要度の事故情報、ヒヤリハット情報を展開・周知（⑦）	効果・全社員へ情報を即時に共有可能 課題・業務委託会社はポータルサイトにアクセス不可のため、別途展開する負担は依然として残っている ・社員にタブレットを配布しているが、ポータルサイトの閲覧数が伸び悩んでいる
I (1)	事故・ヒヤリハット	①報告・収集 ②集約 ③分類 ⑤傾向分析 ⑦展開・周知	技術 社内ネットワークシステム 詳細 社内ネットワークに接続されている各社員や部署のPC端末から、入力（①②）や閲覧（⑦）を行う。主に現場管理職が入力し（①②）、その後指令が不足情報を追記・修正（①）、さらに本社担当者が入力し（①③）、本社担当者がシステムへの入力内容を確認する（③）。現場、支社、本社から各権限の範囲で情報の閲覧が可能（⑦）。BIツール ⁵ またはExcelに出力して集計（⑤）	工夫・駅や踏切の設備の情報（ホームドア、CPライン、非常停止ボタン等）は、駅名や踏切名を参照して自動入力 ・報告が必要な情報（安全・安定輸送が阻害されたもの）は選択肢（プルダウン）で入力可 ・運輸局に報告する必要がある事故事象については局報告用のフォーマット（2号様式）で出力する機能あり 効果・各現場が入力できるようにしたこと、これまで本社で把握できなかった軽微な事象も記録に残る ・従来はFAXやPDFでやり取りしていた状況報告書をシステムによって一元管理可能 課題・BIツールがシステムに組み込まれているが細かい集計には対応していない
I (2)	事故	⑦展開・周知	技術 アプリケーション 詳細 本社安全担当部署が、全社員が所持するタブレット端末のアプリケーションに一定レベル以上の重大な事故・事象の情報をプッシュ通知で配信。配信された件名のリンクをタップすると、事象の詳細（速報）を閲覧可能（⑦）	工夫・配信は本社安全担当部署の担当者が行うが、配信業務はマニュアル化されており、新任の担当者でも容易に実施可能 効果・本社安全担当部署の負担を増やすことなく全社員に効率的かつ適時に事故事象情報を配信可能となった
J	ヒヤリハット	①報告・収集 ②集約 ⑤傾向分析 ⑦展開・周知	技術 ノーコード・ローコード開発ツール ^{3,4} で作成したアプリケーション、コミュニケーションツール 詳細 職場内のヒヤリハット情報の報告・共有を目的に、職場でアプリケーションを独自開発。運転士・車掌は、会社貸与のタブレット端末からヒヤリハット情報を投稿可能（写真や動画等のファイルも添付可能）（①②）。新規投稿は、コミュニケーションツールの当該職場専用チャネルに自動通知され、ヒヤリハットの内容等が閲覧可能（⑦）。集計作業を行うためのCSVファイルの出力が可能（当該職場のアプリ管理者のみ）（⑤）	工夫・フォーマットに従って入力するだけで直観的に投稿可能なインターフェースとした ・行路番号に数字の半角全角が混在すると検索しづらいため、数字入力は専用キーボードを画面上に表示 ・投稿者氏名は、アプリ管理者用画面のみ確認可能。投稿者の選択によりアプリ管理者にも匿名化する機能あり ・ダイヤ改正前に投稿された投稿は改正後は「過去投稿」に自動移行し、過去情報の旨を注意表示 効果・投稿件数が年間約30件から約100件へ増加（乗務員約230名） ・乗務中を除き、執務時間や執務場所の制限なく投稿・閲覧が可能
K	ヒヤリハット	①報告・収集 ②集約 ③分類 ④リスク評価 ⑦展開・周知	技術 社内ネットワークシステム、AI分類 詳細 社員がヒヤリハット情報を入力し（①③）、箇所長が確認すると、全内容が本社安全担当部署に報告され（②）、個人情報等を伏せた内容が全社員に公開される（⑦）。本社安全担当部署担当者は内容を確認し、適切な部署に回答作成を依頼し、集約後2週間以内にシステム内に回答（対策）を提示（⑦）。リスク評価は、本社安全担当部署がシステムからCSVファイルを出力し、「AI分類」を実施（④）。「AI分類」は、過去の報告内容を学習して「速やかに対策を実施すべき事項」であるかを自動分類。「速やかに対策を実施すべき事項」とされたものは、経営会議を経て本社回答（対策）がシステム内に掲示される（⑦）	工夫・報告内容に対する本社回答が記載されている経営会議資料をシステム内で閲覧可能に改修 効果・報告件数の増加及び事故の減少（システム導入後の報告件数は年間1万1000件超） ・報告者は自分の報告内容への対応状況の確認が可能 ・過去の報告内容や対策のデータを調べやすくなった ・箇所長が自箇所の報告内容を参考に対策を立案可能 ・「AI分類」により、本社安全担当部署担当者の作業は約4割軽減 課題・会社から全社員に貸与されているスマホで報告ができるようシステムのアプリ化を検討中

注1) 事業者名のセルの色は社員数規模を示しており、■色は「100名未満」、■色は「100名以上～500名未満」、■色は「1,000名以上～5,000名未満」、■色は「5,000名以上」を示す。

注2) オンラインストレージは、インターネット上のファイルサーバー等でデータを保存・管理するサービス。

注3) ノーコード開発ツールは、プログラミング知識を必要とせずにアプリケーションを作成できるツール。

注4) ローコード開発ツールは、必要最小限のプログラミングコードでアプリケーションを作成できるツール。

注5) BIツール（“Business Intelligence tool”の略）は、膨大なデータから必要な情報を抽出、分析、可視化するツール。

4. おわりに

本研究では、事故、ヒヤリハット情報等の収集・活用におけるデジタル技術の導入を促進することを目的として、デジタル技術の導入に関する実態調査を行い、収集した情報や事例を共有することとした。

まず、アンケート調査により、鉄道事業者におけるデジタル技術の導入実態を定量的に把握した。その結果、情報を伝達及び集約するフェーズである「①報告・収集」、「②集約」、「⑦展開・周知」では、デジタル技術を導入している事業者が比較的多かった。一方、従来、人の知識・経験や分析スキルに基づき、情報の分類・評価や分析が行われてきた「③④分類・リスク評価」、「⑤傾向分析」、「⑥原因分析」のフェーズでは、デジタル技術を導入している事業者が比較的に少なかった。

次に、ヒアリング調査を行い、鉄道事業者におけるデジタル技術の導入事例（デジタル技術の詳細、導入時の工夫・効果・課題等）を整理した。デジタル技術を導入している事業者が比較的多い「①報告・収集」、「②集約」、「⑦展開・周知」は、これからデジタル技術の導入に取り組む事業者にとって、まずこれらのフェーズへの導入を検討することが有効な選択肢になり得る。これらのフェーズでは、社内ネットワークシステム、インターネット上にデータを保存・管理するサービスであるオンラインストレージ、アプリケーション、ポータルサイト、メール等が導入されていた。デジタル技術を導入した効果として、例えば社内ネットワークシステムでは、報告件数の増加、情報の即時共有、報告者の負担軽減、情報の一元管理等が挙げられた。今後は、「③分類」、「④リスク評価」、「⑤傾向分析」、「⑥原因分析」のフェーズで求められる分類・評価や分析を人に代わって実行する機能を有したデジタル技術の開発・普及が期待される。

今回、社員数 100 名未満～5,000 名以上の幅広い規模の事業者を対象にヒアリング調査を行ったことによって、現場単位で取り組める事例から全社的な導入事例まで多くの情報を得ることができた。各事例では、デジタル技術の詳細の他に、導入時の工夫・効果・課題を整理しており、今後デジタル技術の導入を検討する事業者の検討材料となれば幸いである。

（本稿は、（公財）鉄道総合技術研究所鉄道技術推進センター会員が閲覧可能である報告書を基に、内容を加筆・修正した。）

謝 辞

本研究のアンケート調査、ヒアリング調査の実施にあたり、（公財）鉄道総合技術研究所鉄道技術推進センター会員の鉄道事業者の皆様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) 国土交通省：運輸事業者における安全管理の進め方に関するガイドライン～輸送の安全性の更なる向上に向けて～，2023
- 2) 中西美和：事故調査と AI，人間工学，Vol.61，No.3，pp.154-159，2025
- 3) 中島啓二，志田研吾，永木亨典，中村健太，下条将太，川上史也：乗務報告書の電子化によるペーパーレス化，運転協会誌，Vol.64，No.2，pp.18-22，2022
- 4) 片桐厚：乗務報告書のアプリ化およびデータ利活用，JREA，Vol.66，No.11，pp.47450-47453，2023
- 5) 岡田健太郎，石田博文，佐々木久伸：安全マネジメント統合システムの導入，JREA，Vol.61，No.6，pp.42293-42296，2018
- 6) 国土交通省：事故、ヒヤリ・ハット情報の収集・活用の進め方～事故の再発防止・予防に向けて～（鉄道モード編），2019
- 7) 小野間統子，岡田安功，藤道宗人，宮地由芽子：リスク情報の収集・活用におけるデジタル技術導入段階評価指標の試作，第 36 回日本リスク学会年次大会，2023

鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

曾我部正道

■編集責任者

小島謙一

■企画・監修

川崎邦弘	重枝秀紀	石毛 真	武内陽子
坪川洋友	渡辺信行	田所敏弥	根津一嘉
桃谷尚嗣	布川 修	福田光芳	平井 力
半田和行	池田 学	宇田東樹	遠藤広晴
富田 優	豊岡亮洋		

鉄道総研報告 第40巻 第10号

2026年10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

©2026 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. 40 No. 10

Oct. 2026

PAPERS

- Startup Characteristics of an Eddy Current Brake Using Capacitor Self-Excitation Phenomenon
under Low-Speed and Large-Gap Conditions
.....Y.SAKAMOTO, K.UKITA (1)
- Dynamic Measurement Method for Wheel-Rail Contact Position Using Ultrasonic Waves
.....S.FUKAGAI (11)
- A Quantitative Method for Predicting Wheel-flat Dimensions Generated during Braking
.....D.YAMAMOTO, H.SAKAI (25)
- Development of Gap Adjustment Device between Switch Rail and Stock Rail, and Proposal of a
Turnout Point to Reduce Maintenance Labor
.....S.TAMAGAWA, M.UEDA, S.YASUDA, A.HOSOMI (36)

RESEARCH REPORT

- Study on the Introduction of Digital Technology for Collecting and Utilizing Accident and Near-Miss
Reports
.....N.ONOMA, Y.OKADA, M.FUJIMICHI, R.NAKAMURA (46)

