鉃道総研報告





公益財団法人 鉃道総合技術研究所

台車キャビティの隅部丸み付けによる 台車部空力音の低減メカニズムに関する数値解析

兎内 龍也* 宇田 東樹*

Numerical Analysis on Mechanism of Aerodynamic Noise Reduction in Bogie Area by Rounding Corners of Bogie Cavity

Tatsuya TONAI Toki UDA

Aerodynamic noise radiated from running high-speed trains is attracting attention from the environmental point of view. Bogie areas are known to be the main sources of the aerodynamic noise. Rounding the four corners of the bogie cavity has been proposed as a measure to reduce bogie aerodynamic noise, and wind tunnel tests have confirmed its effectiveness. However, detailed flow fields around bogie area have not been identified and the mechanism of noise reduction by such measures remains unclear. In this study, numerical analyses on the flow field near the bogie area were conducted to investigate the changes in the flow field caused by the proposed measure and to discuss the reduction mechanism.

キーワード:高速鉄道、台車部、空力音、騒音低減、数値流体力学

1. はじめに

鉄道車両の高速走行時に発生する空力音は沿線環境に おける課題の一つとなっている。この空力音は、走行速 度が増加するにつれて、環境基準評価点における全体騒 音への寄与が大きくなり、営業列車の速度向上などの際 に沿線騒音が環境基準を超過する原因となる可能性があ る。また、空力音の100Hz以下の低周波成分や20Hz 以下の超低周波成分(圧力変動)は、建具のがたつきや 心理的な圧迫感を発生させることがあり、沿線の住環境 に影響を与える可能性がある。

新幹線の高速走行時に発生する空力音の主な発生源の 一つは台車部とされる。台車部から発生する空力音(以 下,台車部空力音)が全体騒音に対して占める割合は, 320km/h 走行時には約3割とされ,360km/hまで増速 した場合には約4割まで増加すると試算されている¹⁾。 営業列車の速度向上を行うためには,台車部空力音を低 減させる必要がある。

台車部空力音を低減させる方法として、地上設備側への対策と車両側への対策が考えられる。コスト面を考慮 すると、車両側への対策を実施する方が望ましい。車両 側への対策として、跳ね上げ材や台車キャビティの隅部 丸み付けなどのように台車部の形状を変更する対策が提 案されており、風洞試験によってその効果が確認されて いる²⁾。しかし、台車部空力音が低減するメカニズム(以 下、低減メカニズム)については明らかにされていない。

* 環境工学研究部 騒音解析研究室

低減メカニズムを明らかにすることで,台車部空力音の 低減対策の深度化が期待できる。

本研究では、台車部空力音の低減対策による低減メカ ニズムを明らかにすることを目的とし、数値シミュレー ションを実施した。本報告では、風洞試験で有効性が確 認された隅部丸み付け形状を解析対象として、隅部丸み 付け形状の有無による流れ場の変化を調査し、低減メカ ニズムについて考察した。第2章で隅部丸み付け形状の 概要、第3章で数値シミュレーションによる低減メカニ ズムの解析についてそれぞれ述べる。

2. 隅部丸み付け形状

隅部丸み付け形状の概要を図1に示す。隅部丸み付け 形状は、台車キャビティ(台車を格納するための直方体 形状の空間)の四隅を埋めて丸みを付けた、台車部空力 音に対するシンプルな低減対策である。台車部における 安全性やメンテナンス性を損ねず実車に搭載可能な形状



図1 隅部丸み付け形状

1

文

論

として提案されたいくつかの低減対策のうちの一つで, それらの中で最も実用化の可能性の高い形状である。丸 み付け部の半径は,実車寸法で700mmである。

台車部空力音の低減に対する隅部丸み付けの有効性 は、過去に複数回にわたって実施された風洞試験で確認 されている²⁾。表1は隅部丸み付けによる空力音の変化 量である。過去の風洞試験の結果を空力音と圧力変動の それぞれに対する代表的な周波数で整理したものであ り、値が小さいほど空力音が低減されていることを表す。

しかしながら、風洞試験により有効性が示されている 一方で、隅部丸み付けによる台車部空力音の低減メカニ ズムの詳細は明らかになっていない。この理由として、 台車部付近の流れ場全体の情報を実験的に取得すること が困難であることが挙げられる。すなわち、台車部付近 の流れ場は非常に複雑であり、また、台車キャビティ内 が狭隘であるため流れ場を乱さずに流速、圧力分布等を 測定することが非常に難しく、風洞試験や現車試験で流 れ場に関する多点計測を実施することが難しいというこ とが理由となる。台車部付近の流れ場全体の情報を取得 し、隅部丸み付けなどの台車部空力音低減対策を実施し た場合の流れ場の変化から低減メカニズムが明らかにな れば、低減対策の更なる深度化が期待される。

一般的な空力音の低減メカニズムとして,流速の低減 と渦運動の変化の2点が考えられる。1点目の流速の低 減は,空力音のパワーが流速の6-8乗に比例するため, 流速を低減すれば空力音の低減につながることに由来す る。2点目の渦運動の変化は,空力音源が渦の非定常運 動であることに由来する。隅部丸み付けにおいては,大 きな流速の変化は期待されず,渦運動の変化による空力 音の低下によるところが大きいと考えられる。次章では, 隅部丸み付けによる渦運動の変化について着目し,解析 をすすめる。

3. 数値流体力学に基づく低減メカニズムの解析

隅部丸み付け対策による台車部空力音の低減メカニズ ムを明らかにするには、数値シミュレーションの活用が 有効であると考えられる。本章では、非定常3次元圧縮 性 Navier-Stokes 方程式に対する、数値流体力学に基づ く数値シミュレーションにより、台車部付近の流れ場を 解析した結果と考察について述べる。

3.1 解析モデル・解析条件

図2に解析モデルを示す。解析対象は実車同様の寸法 の車体と車体中心部に設けられた1つの台車部である。 解析領域は直方体領域であり、その中に台車が一つ設け られた一様断面の車体とレールが含まれる。台車は計算 コスト削減のため、台車部空力音に影響を与える主要構 成要素のみを抽出した形状とし、台車枠,輪軸,主電動 機,歯車装置,空気ばねを模擬した構造で構成した。台 車キャビティは直方体を基本形状とし、台車キャビティ の両側面に側カバー(フルカバー相当)がある形状とし た。計算は基本形状と隅部丸み付け形状の2ケースにつ いて実施した。

図3にレール方向に垂直な断面(台車中心位置)にお ける計算格子生成時のドメイン,および境界線上の最大 格子間隔を示す。車両床下の領域においては最大格子間 隔が12.5mmであり,軌道中心から遠ざかるにつれて最 大格子間隔を拡大させた。空間を伝わる音波の最大周波 数は,最大格子間隔の値を用いて以下のように推定でき る。空間的な音波の伝搬の解像にあたり一波長あたり8 点程度の格子を確保する必要があるため、車両床下にお いては3.4kHz(=340m/s÷(12.5mm×8))以下の音波 を解像できると考えられる。同様に,軌道中心から2.7m 離れた位置(最大格子間隔75mm)では550Hz(= 340m/s÷(75mm×8))程度の音波まで解像できると考

表 1 隅部丸み付けによる台車部空力音の変化量 (単位 dB)²⁾

圧力変動 [Hz]			空力音 [Hz]			
< 16	25	50	250	500	1000	2000
-0.8	-0.1	-0.3	-0.3	-0.4	-0.3	0.1



(a) 解析領域全体







まくらぎ中心から2.7m



図3 計算格子生成時のドメインと境界線上の最大格子 間隔

えられる。

計算条件は、360km/h(=100m/s)で走行する列車を 想定して設定した。主流マッハ数が 0.3 程度であるため、 支配方程式は圧縮性 Navier-Stokes 方程式とした。乱流 モデルには LES (Large Eddy Simulation) を用い, サブ グリッドスケールモデルは標準 Smagorinsky モデルを 用いた。運動方程式に関して、移流項の離散化スキーム は2次精度中心差分と1次精度風上差分を混合比8:2 (一部5:5) とし,時間積分法は Crank-Nicolson 法を 適用した。流入条件として, 流入面に対して垂直に, 解 析領域内部に向かって一定速度100m/s,流出条件とし て,流出面で一定圧力 1.0×10⁵Pa をそれぞれ与えた。 固体表面上では Spalding 則を適用し、地面とレールに は主流と同じ向きに移動速度100m/s, 輪軸には100m/s 走行時相当の回転速度をそれぞれ与えた。地面とレール の移動や輪軸の回転は風洞試験では再現が困難な条件で あるため、この点においても数値計算を実施する利点が ある。解析領域の遠方境界となる上面と側面には Free Slip 条件を適用した。時間刻み幅は 2×10⁻⁶s とした。

3.2 台車部付近の流れ場

本節では、台車部付近の基本的な流れ場として、基本 形状と隅部丸み付け形状の2ケースで共通している傾 向について述べる。ここでは、Q値に基づく渦の可視化 結果と、台車表面上の圧力変動のRMS (Root Mean Square,実効値)を示す。Q値は速度勾配テンソルの第 2不変量を表し、正のQ値は渦の強さを表す^{例えば3)}。正 のQ値に対して等値面を描くことで、渦の分布を可視 化することができる。

図4に台車部付近の渦の分布の時系列変化(3ms刻 み)を示す。Q=10,000の等値面を描画して渦の分布と した。全体的な傾向として,渦が台車キャビティの前縁 から放出され,主流に沿って移流する様子がわかる。放 出される渦はまくらぎ方向に長い横渦であり,100Hz 程度の放出周波数(後述)で周期的に放出される。放出 された渦は時間経過とともに下流に向かって移流し,台 車各部(車輪,主電動機,歯車装置など)に衝突して変 形する。その後,台車キャビティの後縁に到達するまで に渦は変形を繰り返し,台車キャビティの後縁を通過し た後に,次第に渦が消失する。上記の傾向は基本形状, 隅部丸み付け形状ともに共通している。一方,各図を詳 細に比較すると,側カバー付近の渦の分布に違いが見ら れる。これらについては次節で詳しく述べる。

図5に基本形状の台車キャビティ前縁の軌道中心位 置で取得した速度変動の各方向成分のパワースペクトル 密度を示す。約100Hzのパワースペクトル密度におい て,主流方向速度vと鉛直方向速度wにはピークが認 められる一方で,まくらぎ方向速度uにはピークが認め



(a) 基本形状

(b) 隅部丸み付け形状

図4 台車部付近の渦の分布の時系列変化(Q=10,000, 主流方向速度で色付け, 3ms 刻み)

られない。このことから,約100Hzのvとwの周期的 な速度変動は,台車キャビティの前縁から放出される横 渦に起因するものと推測される。

図6に基本形状の台車表面上の圧力変動のRMSを示 す。ここでは平均速度に基づく表面上流線も併せて示し ている。各統計量は0.2秒間で算出した。圧力変動の RMSが大きい箇所が台車表面上に局所的に出現してお り、①上流側の主電動機、②下流側の主電動機、③下流 側の歯車装置、④下流側の車輪、⑤台車キャビティ後端、 ⑥側カバー端部、⑦台車枠(実車の下流側軸箱位置に相 当)に局在している。流線を見ると、これらの位置では よどみ点となっていることがわかり、移流する渦が衝突 する位置であると考えられる。なお、圧力変動のRMSが 大きくなっているこれらの位置は、過去の風洞試験^{4,5)}で 確認された台車部空力音の発生箇所と概ね一致している。

一方で,必ずしもよどみ点で圧力変動の RMS が大き くなっているわけではない。すなわち,上流側の車輪や, 上流側の歯車装置の表面上にもよどみ点がみられるが, これらの位置においては圧力変動の RMS は大きくなっ ていない。これらの位置は、台車キャビティ前縁から放 出された直後の渦が衝突する位置であると考えられる。

以上の傾向を総合的に考慮すると, 空力音が発生する



図5 速度変動のパワースペクトル密度(台車キャビティ 前縁の軌道中心位置で取得)



図 6 圧力変動の RMS(単位 Pa)

箇所は,一度台車各部等との衝突などによって乱れた渦 が,再度台車各部に衝突している箇所と考えられる。

3.3 隅部丸み付けによる流れ場の変化

隅部丸み付けを実施した時の渦の運動の変化は側カ バー付近に現れた。そこで、図7にQ=10,000とした時 の側カバー付近における瞬時渦分布の比較を示す。可視 化範囲は、図2(b)に示す軌道中心面から1.1mオフセッ トした位置における断面である。図7(b)の隅部丸み付 け形状においては、上流側隅部から周期的に放出される 渦が、比較的その形状を保ったまま下流に移流している ことがわかる。一方で、図7(a)の基本形状においては、 上流側の隅部から周期的に放出される渦に加えて、それ らの渦の間に副次的に出現する渦が存在する。副次的に 発生する渦の個数は、周期的に放出される渦の間に1つ か2つである。どちらの形状においても、隅部から周期 的に放出される渦の間隔は概ね等しいため、副次的に発 生する渦が存在する基本形状の方が. 隅部丸み付け形状 に比べて渦同士の間隔が狭くなる。このため、基本形状 においては渦同士の干渉が生じ、結果として下流側隅部 付近で渦が細かく変形していると考えられる。隅部丸み 付けを実施した場合には、渦の副次的な発生、およびそ れに伴う渦の変形を抑制する効果があると考えられる。

より強い渦の分布を見るために描画するQ値をさら に増加させ、Q=250,000とした時の側カバー付近にお ける瞬時渦分布を図8に示す。図8の各形状における 渦分布は図7に示した渦分布とそれぞれ同時刻のもの であり、図8の方がより渦芯に近いところが描画されて いる。図8(a)の基本形状においては、上流側の隅部付 近で渦が存在する一方で、図8(b)の隅部丸み付け形状 においては上流側の隅部付近に強い渦が存在しないこと がわかる。このことから、隅部丸み付けを実施した場合 には、上流側隅部から放出される渦の強さを低減させる 効果もあると考えられる。

3.4 隅部丸み付けによる台車部空力音の低減メカニズ ムに関する考察

3.2 節で,一度乱れた渦が台車各部に衝突して空力音 が発生すること,また,3.3 節で隅部丸み付けによって, 側カバー付近の渦の変形が抑制されること,隅部から放 出される渦の強さが低減することが考えられた。これら を併せて考慮すると,側カバー付近を移流する乱れた渦 は台車部の下流側の隅部に衝突して空力音源となってい る可能性が考えられ,ここで発生する空力音が隅部丸み 付けによって低減されると推測される。このため,隅部 丸み付けによって渦の変形が抑制されることで下流側の 隅部に衝突する渦の乱れが低減し,結果として台車部空 力音の低減に貢献しているものと考えられる。







(b) 隅部丸み付け形状

図7 瞬時渦分布の比較(Q=10,000, 主流方向速度 で色付け)



(a) 基本形状



(b) 隅部丸み付け形状

図8 瞬時渦分布の比較(Q=250,000, 主流方向速 度で色付け)

4. まとめ

台車部空力音の低減対策の一つである台車キャビティ の隅部丸み付け形状に対して、低減メカニズムを明らか にするために数値解析を実施した。台車部付近の流れ場 の基本的な事項として、台車キャビティの前縁から、ま くらぎ方向に長い横渦が周期的に放出され、主流に沿っ て, 台車各部に衝突して変形を繰り返しながら移流し, 最終的に台車キャビティの後縁を通過した後に次第に渦 が消失することがわかった。この渦の放出周波数は 100Hz 程度であった。また、台車表面上の圧力変動の RMS が大きくなっている位置が, 過去の風洞試験によっ て得られた台車部空力音の音源分布と概ね一致している ことが確認された。さらに、隅部丸み付けによって、側 カバー付近の渦の変形が抑制されること、隅部から放出 される渦の強さが低減されることが確認された。上記を 併せて考慮すると,下流側の隅部が音源となって発生し ている台車部空力音が、隅部丸み付けによって低減され ていると考えられる。

文 献

- 1) 飯田雅宣:高速化のための沿線環境の評価・対策, RRR, Vol.72, No.7, pp.44-47, 2015
- 2) 公益財団法人鉄道総合技術研究所 主要な研究開発成果
 (2022 年度) 26. 高速走行する列車における台車部空力音・ 圧力変動の低減対策: https://www.rtri.or.jp/rd/seika/2022/
 3-26.html(参照日: 2023 年 12 月 14 日)
- 3) 日野幹雄:乱流の科学--構造と制御--,朝倉書店,2020
- 4) 宇田東樹,北川敏樹:音響透過板を用いた台車部空力音の 測定および評価手法,鉄道総研報告, Vol.34, No.3, pp.29-34, 2020
- 5) 宇田東樹, 北川敏樹:鉄道車両の台車部空力音に関する音 源探査手法および低騒音対策の検討,日本機械学会論文集, Vol.86, No.888, p.20-00025, 2020

地絡検知用電力ネットワーク
 モニタリングシステムの基礎検証
 赤木 雅陽* 近藤 稔**
 今村 謙汰** 河村 裕介*** 流王 智子***

Development of Prototype Current Monitoring System for Detecting High-resistance Earth Faults in DC Traction Power Supply Systems

Masataka AKAGI Minoru KONDO Kenta IMAMURA Yusuke KAWAMURA Satoko RYUO

In DC 1.5 kV traction power supply systems for electrified railway, it is difficult to detect high-resistance earth faults using only electrical measurements installed in traction substations. On the other hand, utilizing the current data of both substations and vehicles, methods for detecting fault based on Kirchhoff's law have been proposed for the past 30 years. The recent rapid progress in the fields of telecommunication technology leads to increasing the possibility of realizing this method. Therefore, we have developed a prototype of current monitoring system for traction power supply systems which can distinguish the fault current with about 100 amperes by combining this method with telecommunication technology.

キーワード:高抵抗地絡,キルヒホッフの電流則,高精度時間プロトコル,時刻同期,統合分析プラット フォーム

1. はじめに

直流き電回路は,主に電車線及びその支持物,レール を用いて列車へ電力供給する構成となっている。ここで 電車線と支持物が接触した場合,その故障電流は支持物 の接地抵抗(通常数Ω~数+Ω程度)やレール漏れ抵 抗を介して変電所に戻ることから,その故障電流が平常 時の電気車電流よりも小さくなる(以下,「高抵抗地絡」 と呼ぶ)¹⁾。この性質ゆえ,高抵抗地絡を変電所にある 既存の故障検知リレー(例えば電流変化に基づくΔI型 故障選択継電器)単独で判別するのは困難であり,その 検知は長年の課題である。

直流き電回路における高抵抗地絡を電力部門のみの枠 内で検知するためにこれまで種々の手法が検討されてき た^{1) 2) 3)}。例えば電車線側に放電ギャップ装置や保護線 などを新たに敷設することで故障検知する方式²⁾が提案 されたが,国内では施工コストや保全上の課題で部分的 な導入に止まっている。一方隣接変電所と通信しながら 変電所からの供給電流(地上電流)のみを監視し,統計 的な重み付けにて地絡検知する方式が提案され,ある程 度の故障電流検知感度(100~500 アンペア程度)が得 られた¹⁾が、臨時列車などへの対応は困難だった。また 故障点におけるアーク電圧の変化に伴い地上電流に生じ る数十 Hz 帯の揺らぎ成分を櫛形フィルタで抽出するこ とにより、変電所保護リレーの小規模な改良のみで地絡 検知する手法³³も提案されたが、小電流領域の検知感度

などの課題により実用化には至っておらず、これらの課

題を解決し得る新たな取り組みが求められてきた。

一方,列車の集電電流(車上電流)と地上電流とをキ ルヒホッフの電流則に基づいて照合し,その差分がある 閾値を超過したことをもって故障検知とする概念が以前 から存在している⁴⁾⁵⁾。この地絡検知手法は電気学会技 術報告において「将来の保護システム」として提言⁴⁾ されたが,本手法では電力需給の同時同量性を踏まえ移 動体である列車から電流データを時刻情報付きで伝送す ることが必須となる一方で,その当時は具現化するため の要素技術(例えば後述する車上地上間の情報伝送技 術)が未熟であったことから具体的なシステム構成の提 案までには至らなかった。しかし,近年の情報通信技術 の進展に伴い本手法の実現可能性が高まってきた。

そこで鉄道総研では、キルヒホッフの電流則に基づく 車上・地上間での電流値照合により地絡検知を実現する べく、車上電流・列車の位置・地上電流などを時刻情報 付きデータとして取得し一元化する、電力ネットワーク モニタリングシステムのプロトタイプを構築した。所内 試験線にて列車の走行試験を行い、時刻情報付き電流 文

論

 ^{*} 電力技術研究部 き電研究室
 * 車両技術研究部 駆動システム研究室

^{***} 情報通信技術研究部 通信ネットワーク研究室



⁽a) ある電力供給区間における変電所と列車での電流分布 (b) 地絡発生時における電流合算値の特徴

図1 車上電流合算値と地上電流合算値との照合による地絡検知の模式図

データがデータサーバに自動的に格納され,地絡模擬故 障発生時には故障電流に相当する電流値が車上・地上電 流値の照合結果(差分)として正しく把握できることを 確認した。また,電流照合と地絡判定を自動化するべく 地絡検知アプリケーションを開発し,1列車・1変電所 という基礎的な条件において所定の地絡判定動作を確認 した。本稿では,開発したシステムの概要と要素技術に ついて述べたのち,検証試験の結果を報告する。

2. 電力ネットワークモニタリングシステム

2.1 電流照合による地絡検知手法の原理

電気回路には、回路網上の任意点において電流の流入 出の総和は0になるというキルヒホッフの電流則があ る。この法則を、変電所から電力供給される区間を走行 する全ての列車の車上電流と地上電流を常時監視・照合 する前提にて直流き電回路に当てはめると、設備が正常 であれば車上電流合算値と地上電流合算値との差分(電 流照合値)は0になるはずである。一方、もし電流照合 値が0でない状態が発生したならば、図1の模式図に 示すように地絡に伴う故障電流分が勘定されていないこ とになる。そこで、電流照合値がある閾値以上になった ことをもって当該電力供給区間で地絡が生じたと判断す ることができる。

この際,列車位置を元に車上電流の合算処理を逐次行 う必要があるが,パンタグラフ離線時などにおける列車 のΔI変化量⁶⁾を考慮すると,取得する電流データには ミリ秒レベルでの時刻同期が求められる。加えて,電車 線エアセクション箇所の通過などを考慮しつつ電力供給 区間に在線する列車本数を適切に管理するためには,少 なくとも数秒単位の頻度で列車位置を常時把握する必要 がある。

2.2 電流照合に関する要件

変電所に設備されている電流センサは負荷電流及び短 絡故障に伴う数千アンペアの電流を計測することを想定 した設計となっている。直流高抵抗地絡に伴う故障電流 は通常数百アンペア以下と小さいため、故障電流の検知 感度を高めるためには、車上・地上とも高精度な電流セ ンサの適用に関する検討も必要である。また、照合演算 に用いる各電流値は同一時刻にてサンプリングするとと もに、個々のサンプル値に同一時刻であることが担保さ れている高精度なタイムスタンプを付与する必要がある。

2.3 車上地上間の情報伝送技術に関する要件

電力ネットワークモニタリングシステムを実現するた めには、列車に設置した電流センサで取得した電流測定 データや列車の位置情報を、走行中の列車から地上に伝 送する手段が必須となる。近年の情報通信技術の進展に 伴い、移動体の情報伝送手段として無線LANや無線ア クセスシステムなど自営で構築・運用できる無線通信シ ステム、あるいはLTE や 5G などの公衆網が、高速大 容量の情報伝送手段として利用可能となっている。しか し、それぞれに伝送品質や構築・運用にかかるコストが 異なることから、要求仕様に応じて通信技術を適切に選 択する必要がある。

本報告で着目する直流き電回路における高抵抗地絡検 知手法では,前述したように数秒単位の頻度で,列車で 計測した電流測定データや列車位置の情報を伝送する必 要がある。したがって,直流き電回路の高抵抗地絡検知 において許容される車上地上間の情報伝送遅延は数秒以 内となる。

2.4 電力ネットワークモニタリングシステムの構成

1章で示した「将来の保護システム」に最新の情報通 信技術を適用することにより,新たに「電力ネットワー クモニタリングシステム(以下,本システム)」を提案 する。2.1節~2.3節で述べた内容に鑑みると,本シス テムには以下の要素技術が必要といえる。

- (1) 高精度な電流センサ(車上/地上用)
- (2) 電流データに高精度時刻情報(タイムスタンプ) を付与可能な電流計測システム



図2 電力ネットワークモニタリングシステムの構成

- (3) 列車が在線する電力供給区間を判別する機能
- (4) 車上及び地上の電流計測システムから後述のデー タサーバまで,数秒以内に伝送可能な通信機能
- (5) 列車の集電電流(車上)と変電所の供給電流(地上) データを常時収集し監視・照合するデータサーバ, 及び地絡検知結果を表示するアプリケーション

これらを具体的なシステム構成として総合的にまとめたものを図2に示す。各要素技術の詳細については3 章以降にて述べる。

電力ネットワークモニタリングシステムに おける要素技術の検討

3.1 電流計測システム用時刻同期技術

前述した電力ネットワークモニタリングシステムを具 現化するにあたっては,通信回線における伝送遅延など を考慮しつつ,複数地点の電流値(全ての列車の集電電 流と変電所の供給電流)を正確に取得するべく,各々の 電流計測システムにて時刻を同期する技術が必須となる。

時刻同期に使用可能な技術として PTP(Precision Time Protocol,高精度時刻プロトコル)があり、標準化が進 んでいる⁷⁾ため、今回開発する電力ネットワークモニタ リングシステムでは PTP を用いて時刻同期を行う。以下 に PTP と関連技術について概説する。

3.1.1 PTP

PTP はコンピュータネットワークにおける時刻同期 用プロトコルの一つであり、2008 年に米国電気電子学 会(IEEE) にて IEEE 1588-Ver.2 が策定された⁸⁾。本方 式ではマスター機器とスレーブ機器とでタイムスタンプ などの情報を双方向に授受しながらスレーブ機器の時刻 を合わせこむことから従属同期型と呼ばれており、マイ クロ秒レベルの精度が期待できる⁷⁾。なおネットワーク 上での時刻同期用プロトコルとしてはソフトウエアベー スの NTP (Network Time Protocol) が広く用いられて いるが、NTP では伝送遅延などからミリ秒レベルの精 度が必ずしも確保できない場合がある。集電電流の測定 に当たっては高い時刻同期精度を確保しておくことが望 ましいため、本報告では PTP を採用する。

3.1.2 GNSS と基準時刻

時刻同期においては、何を基準時刻とするかを決める 必要がある。一般的に PTP では正確な原子時計を搭載 した GNSS (例えば米国が運用中の Global Positioning System: GPS に代表される)から配信される UTC (協 定世界時)の時刻情報を時刻の基準とする。

3.1.3 GM

GM (GrandMaster Clock) は PTP による時刻同期手法 において、受信した GNSS 信号を元にネットワーク上で 高精度な時刻の配信を行う役割 (マスター機能)を持つ。 本報告で適用した GM は UTC に対して 15 ナノ秒以下の 精度を有しているほか、上空衛星数の不足やトンネル通過 などの影響で一時的に衛星との接続が失われた場合にも 日差マイクロ秒オーダーで自立的に高精度なタイムスタン プを付与可能な機能 (ホールドオーバ)を有している。

3.2 電流計測システムの概要

3.2.1 電流計測システム本体の構成

2.4 節で提案した内容及び前節で述べた時刻同期技術 を踏まえると、本報告における電流計測システムには以 下の機能を有する必要がある⁹。

- PTPのスレーブ機器として動作をし、マスター機器である GM と時刻同期する機能
- (2) 電流センサのアナログ信号出力を A/D 変換してデ ジタル信号にする機能
- (3) 電流データに高精度時刻情報(タイムスタンプ)を付与する機能
- (4) 列車位置を検知するため GNSS 座標データを取得 する機能(車上のみ)
- (5) 電流データの保存機能, イーサネット通信機能
- (6) 外部のサーバからの要求に応じて測定結果を送信 する機能

本報告の電流計測システムは、PTP に対応した可搬 形の汎用データ収集装置(DAQ: Data AcQuisition)と GM などを用いて上記機能を満たすような構成で試作し た。(4)項で述べた列車位置を検知する機能以外に大き な差異の生じる機能が存在しないことを踏まえ、本報告 での電流計測システムは車上用/地上用で共通の設計と した。図3に試作した電流計測システムのうち DAQ 部 分の外観を示す。

電流計測システムは連続で稼働する運用方法を基本と し、電源が入ると測定を自動で開始し、電流データの出 カファイルは指定の周期(例えば10秒毎)で子サーバ (NAS)や後述する統一形式データサーバへ自動収集 される。また、測定データのフィルタ処理(5Hzのロー パス設定)やサーバ側への送信データ量などを勘案し記 録周期は0.2秒と設定した。

3.2.2 GPS 座標データの取得機能

電力ネットワークモニタリングシステムでは,列車が どの電力供給区間内に在線しているかを把握する必要が ある。一部の振子制御システムを搭載した列車では在線 位置を把握しているケースもあるが,一般にはそういっ



図3 電流計測システム(DAQ部分)

た手段が無い場合が多い。そこで,簡易に列車位置を把 握する手段として,GPS 座標データ(緯度・経度・高度) と速度を測定する小型 GPS/航法センサを付与した。

なおここで得られる GPS 座標データは,別途開発し た変換アルゴリズムとの連携を通じ,鉄道総研所内試験 線のキロ程情報(約650m分)に変換できる構成とした。

3.3 電流センサの選定

列車が数千アンペアの負荷電流を取得する中で故障電 流の検知感度を高めるためには、車上・地上とも高精度 な電流センサの導入が望ましい。特に、個々の電流セン サでは測定確度を満足していても、当該電力供給区間全 体として電流を合算し数十秒にわたって照合した際には 個々の電流センサの特性の違いが積算されて数百アンペ アの誤差になる可能性があり、測定精度向上のため電流 センサ出力の特性把握が重要となる。

その一方で,地上用のセンサについてはき電回路での 短絡故障を検知するべく短絡故障電流(通常数千~2万 アンペア程度)への過電流耐量が必要であるほか,電流 センサの出力特性は設置箇所の温度や隣接配線との離隔 など周囲環境により左右される場合があるため,センサ の選定や構成にあたって留意が必要である。

ー般に直流用の電流センサには、電流に比例して電線 周囲に生じる磁界についてホール素子(ホール式)や ファラデー効果(光ファイバ式)を用いる手法、シャン ト抵抗を用いる手法が適用されている。そこで鉄道用と して国内外で用いられている電流センサについて、線形 性、温度特性などの観点から技術動向調査を行った結果 を表1に示す。

			地絡検知への適用性に関する調査項目							
電流センサ 種別	用途	定格電流の例	線形性	温度 特性	セン サ 寸法	短 縦 縦 電 へ 耐 量	主回路 との 絶縁 確保	隣接回路 からの 電磁的 影響	設備 コス ト	総合 判定
開ループ	地上用	供給電流及び			0	0	0		0	0
	(※現用)	短絡故障電流:20(kA)				_	_		_	(採用)
W-NE	車上用	集電電流: 2000 (A)		\bigtriangleup	0	×	0		0	×
閉ループ	地上用	供給電流 : 10 (kA) 短絡故障電流 : 非対応	0	0	×	×	0		×	×
ホール式	車上用	集電電流:1000~2000(A) 短絡故障電流:対応不要	0	0	0	×	Δ	Δ	0	〇 (採用)
シャント 抵抗式	地上用	供給電流:60(kA) 短絡故障電流:100(kA)	0			0	×	0		Δ
	車上用	集電電流: 2000 (A)	0	0	\triangle	×	×	0		×
光ファイバ式	地上用	供給電流:4000(A) 短絡故障電流:100(kA)	0	\bigtriangleup	0	0	0	0	×	Δ

表1 電流計測技術の動向と地絡検知への適用性の調査⁹⁾

凡例 ○:良好, △:留意点有り, ×:不適

調査の結果,それぞれの電流センサには一長一短が有 り,特に地上用については全ての調査項目で秀でた電流 センサは見受けられなかった。車上用としては線形性 (傾き)及び無負荷時の低オフセット出力などを始め多 くの面で閉ループ型ホール式電流センサが優れた特性を 有しているほか,地上用としては開ループ型ホール式電 流センサが安価でかつ既に普及している面で優位性を有 する¹⁰⁾。過渡的な変化に対する応答特性については各電 流センサともミリ秒レベル以下の遅延であり良好な特性 が得られている¹⁰⁾。

ここで、代表的なホール式電流センサにおける線形性・ 無負荷時のオフセット特性について具体的に調査した結 果を表2,図4に示す。直流定電流源から供給される0 ~50アンペアまで線形に増加するような電流に対する 出力特性を評価した結果、各電流センサとも線形性(傾 き)はほぼ1であり、無負荷時のオフセット出力につい ても数アンペア以内と小さな値に収まっていた。これら の出力特性は数百アンペアでの通電試験(4章で述べる 試験列車走行に対応する電流領域)においてもほぼ同等 となっていた¹⁰⁾。一方、一般的な通勤線区で用いられる 10両編成列車による負荷電流(例:3000アンペア)を 想定した場合の誤差を導出した結果、地上用の開ループ 型については約45アンペアとやや大きな値となり、大 電流を供給する変電所に開ループ型を適用する場合は何 らかの補正が望ましいことも分かった¹⁰⁾。

これらに鑑み本報告では,地上用の電流センサとして は短絡故障電流への対応や主回路との絶縁確保,設備コ ストの面に秀でており現用機種でもある開ループ型ホー ル式電流センサを,車上用の電流センサとしては短絡故 障電流への耐性こそないものの線形性・温度特性及びセ

評価			600A 通電時	3000A 通電時
対象	線形性	オフ	の想定誤差	の想定誤差
の	(傾き)	セット	(2 両編成	(10 両編成
型式			相当)	相当)
開ループ	0.983	+6.1 (A)	-4.1 (A)	-44.9 (A)
閉ループ	1.005	-1.1 (A)	+1.9 (A)	+13.9 (A)



図4 開ループ型ホール式電流センサの線形性特性

ンサ寸法や設備コストに秀でた閉ループ型ホール式電流 センサを選定することとした。

3.4 通信ネットワークおよびデータサーバの構成3.4.1 通信ネットワークの構成

車上用電流計測システムで取得されたデータは車両部 門で所有する子サーバへ,地上用電流計測システムで計 測されたデータは電力部門で所有する子サーバへ蓄積さ れる。なお,子サーバは両部門とも地上に設置されてい る。そのため,計測システムから子サーバまでの通信ネッ トワークが必要となる。

電流計測システムからサーバへは、毎秒数キロバイト で蓄積された計測データを数秒以内で送信する必要があ ることから、数十 kbps 程度の通信速度が要求される。 また、前述したとおり、列車位置を数秒間隔で把握する 必要がある。そのため、列車からデータサーバへの通信 では、対象線区全線で遅延が数秒以内であることが要求 される。

上記の要求を踏まえ、本システムの試験用プロトタイ プでは、鉄道総研の所内試験線沿線に、図5に示す構成 で通信ネットワークを構築した。変電所の子サーバから 親サーバへの通信には、鉄道総研の所内試験線沿線に敷 設されている光回線網を使用した。また、列車から地上 の子サーバへの無線通信には、5GHz帯無線アクセスシ ステムを使用した。所内試験線全線で通信可能とするた め、無線アクセスポイントを図5に示す3か所に設置 した。なお、使用した製品には、瞬時に無線アクセスポ イントを切り替える機能が備わっており、切替時におけ る伝送遅延が発生しにくいという特徴がある。

3.4.2 データサーバ

現状,鉄道分野では部門毎に独自のシステムが構築さ れているため,自部門のデータのみを用いて解析するこ とが多い。したがって,データ形式や位置表現などはシ ステム毎に定義がされている。一方,本システムでは車 両や運輸など他部門のデータも用いた系統横断的な解析



図5 通信ネットワークの構成

が求められる。しかし,前述した通り,部門ごとにデー タ形式などが異なるため,現状では子サーバに蓄積され たデータを横断的に扱うことが困難である。そこでデー タサーバには,鉄道総研で別途開発中の,複数部門のデー タを一元管理できる統合分析プラットフォーム¹¹⁾にあ る統一形式データサーバ(以下,親サーバ)を活用した。 なお,子サーバと親サーバ間は光回線により接続されて いる。

具体的には、まず車上・地上それぞれで取得したデー タは、一旦子サーバに蓄積される。次に、子サーバに蓄 積されたデータは、統合分析プラットフォームに伝送さ れ、統合分析プラットフォーム内で共通のデータ形式・ 位置表現に変換後、統一形式データサーバ(以下、親サー バ)に集約される。

電力ネットワークモニタリングシステムの 動作検証試験

4.1 電流計測システムのデータ伝送機能実証試験

電流計測システムと通信システムを組み合わせた際に おける電流データ伝送機能などを実証するため,1列 車・1変電所という基礎的な条件において鉄道総研所内 試験線で試験列車を走行させ,車上用・地上用の2台の 電流計測システムにそれぞれ無線及び光回線の通信機能 を付加して,親サーバに蓄積されたデータをオフライン で検証した。

試験列車走行時の電流値データ(2両編成・5ノッチ 力行で最高速度 40km/h 条件) を評価したところ, 図 6 に示す通り車上・地上それぞれの電流計測システムで測 定した正確なタイムスタンプ付き電流データが所定の周 期で親サーバに格納され、同時刻のデータとして両者を 照合可能であることを確認した。また、車上・地上それ ぞれの電流値が数アンペア以内の精度で一致することを 確認した。次に、通信ネットワークの安定性を確認する ため、車上からデータサーバ機器室へ向けてパケットサ イズ 1024Byte のデータを, 試験列車走行時を含めて約 5時間送信し、車上からデータサーバ機器室までの通信 状況について評価試験を実施した。この評価試験におい て、伝送遅延時間の最頻値は0.6ミリ秒、90%値は2.3 ミリ秒であり、2.3節で述べた最大許容遅延時間(数秒) 内に収まることが分かった。また、このときの伝送速度 の最頻値は 1.1Mbps であり、3.4.1 項に示した数十 kbps を満たすことが分かった。なお、本試験では、5GHz帯 無線アクセスシステムの最大スループットを 1Mbps に 設定していたが、全線にわたってその性能が十分得られ ていたことが分かった¹²⁾。

以上より,今回構築した通信ネットワークにより,走 行中の列車を含めた複数地点の電流値を取得・伝送可能



(b) 電流照合値と故障電流実測値との比較

図7 地絡模擬試験による電流照合機能の評価結果

であることが実証できたといえ,電力ネットワークモニ タリングシステムに必須となるデータ伝送機能を実現で きる見通しが得られた。

4.2 地絡模擬故障試験による電流照合機能の検証

地絡発生により電流照合値が0でない状態において は、モニタリングシステム側の電流照合値と実際の故障 電流値とが一致する必要がある。そこで、変電所に地絡 模擬回路(電車線支持物アークを想定)と地絡時の故障 電流を実測する電流センサを仮設し、4.1 節と同様の列 車走行試験中に約 100 アンペアの地絡模擬故障を発生 させて電流データを収集した。

図7に分析結果を示す。変電所の電流センサで取得し た地上電流データから無負荷時オフセット出力分を除去 すると,電流照合値と故障電流の実測値はよく一致して いた。また,地絡時の不安定なアークで故障電流が変動 した状態においても電流照合値は電流変動傾向に追随し ており、電流照合値を詳細に算出することができた。

5. 地絡検知アプリケーションの開発

5.1 地絡検知アプリケーションの設計

4章までは、親サーバに格納された電流データをオフ ラインでグラフ化・分析処理を行ってきた。しかし、営 業線での地絡検知に際しては列車の在線区間判定も含め リアルタイムなデータ処理が求められる。そこで統合分 析プラットフォーム上に専用の地絡検知アプリケーショ ンを構築した。

4.2 節で示したように、アークを伴う故障電流は過渡 的に数十アンペア変化する場合がある。また電車線設備 におけるアークでは設備の溶融量でその損傷が評価され る¹³⁾ことから、一時的な電流急変で地絡判定が停止し ないよう、電流照合値を時間積分した結果である電荷量 により評価の安定化を図ることが望ましい。そこで指定 の電流閾値と指定期間の積を地絡判定の閾値とし、電流 照合値の積算結果(差分積算値)と比較照合することで 地絡判定する設計とした。なお、差分積算値は 0.2 秒毎 に指定期間分のカウント・更新を繰り返す仕様とした。

地絡検知アプリケーションには,これまで述べてきた 要素技術を踏まえ下記の内容を実装した。

- (1)指定された電力供給区間における各電流計測シス テム(車上・地上)の電流データを逐次統合する 機能
- (2)加減乗除処理機能などを呼び出して地絡判定用の 電流照合値(車上と地上の差分)を演算する機能 及び関連する波形グラフを表示する機能
- (3)指定した期間における電流照合値の積算結果(差 分積算値)をもって地絡判定演算する機能

なお各電力供給区間に在線している列車の列車番号な どを逐次確認し反映する機能は別途開発する予定である。

5.2 地絡検知アプリケーションの動作検証

開発した地絡検知アプリケーションにおける地絡検知 演算機能などの確認を目的として,4.2節で示した模擬 地絡試験時の電流データを用いて動作検証を行った。

本検討では列車走行中に発生した約100アンペアの地 絡模擬故障を早期に検出するべく,地絡判定閾値の設定 を2400クーロン (⇒電流閾値80アンペアと指定期間30 秒の積,グラフ表示上は5サンプル/秒を加味し12000 とする)とし,同閾値を超過する場合に地絡検知判定と した。図8に地絡判定閾値と差分積算値の推移をグラフ 表示した例を示す。

今回の検証データでは地上電流と車上電流との間に約 100 アンペアの差分が生じているが、この閾値条件では 25 秒後に地絡判定されることを確認した。また本手法



図8 地絡判定閾値と差分積算値のグラフ表示例

では故障電流が大きいほど早期の検知が期待できる。な お検知感度のさらなる向上については,後述する複数変 電所・複数列車対応に伴う電流センサ増加時の誤差の蓄 積傾向把握も含め検討の深度化を進めて行く予定である。

6. まとめ

本研究では、既存手法では困難であった100アンペ ア程度の小さな故障電流の地絡を検知するべく、変電所 の供給電流・列車の集電電流・列車の位置(GPS 座標) を高精度時刻情報付きデータとして取得する電流計測シ ステムを試作した。また、統合分析プラットフォーム上 にこれらデータを一元的に分析する手法を開発し、基礎 的な電力ネットワークモニタリングシステムを所内試験 線に構築して検証試験を行い、以下の成果を得た。

- (1) PTP(高精度時刻プロトコル)及び時刻同期に対応した電流計測システムを試作した。
- (2) 無線・光回線及びモニタリングシステムの電流デー タ伝送機能を介して電流データなどが統一形式 データサーバに自動的に格納されることを確認した。
- (3)列車走行中に地絡模擬故障を発生させ、データサーバに格納された電流データ及び故障電流の実測値を分析したところ、電流照合値(車上と地上の電流差分)と故障電流実測値とがよく一致することを確認した。また、電流照合と地絡判定を自動化するべく地絡検知アプリケーションを開発し、1列車・1変電所という基礎的な条件において所定の地絡判定動作を確認した。

今後の取り組みとして、電力ネットワークモニタリン グシステムを複数変電所・複数列車へ対応させるべく、 各列車の電流計測システムで得られた GPS 座標を電力 供給区間 ID と紐づけし、各電力供給区間における列車 在線情報をリアルタイムに更新可能とする。また、列車 が電車線エアセクション箇所を通過する際には電力供給 区間 ID を遷移させ、故障電流の誤った演算を抑止する 処理を新たに導入するべく、引き続き開発を進めていく。

文 献

- 長谷伸一,奥井明伸,関島志郎,菅井俊一,赤木雅陽,木 村高志:回線電流に基づく高抵抗地絡検出装置の開発,鉄 道総研報告, Vol.21, No.10, pp.11-16, 2007
- 2) 森本大観:直流き電回路の高抵抗地絡保護への取り組みと 課題, JREA, Vol.60, No.10, pp.15-19, 2017
- 3)森本大観,樋口靖展,赤木雅陽:大電流のアークを伴う直流高抵抗地絡の検出手法,鉄道総研報告, Vol.34, No.9, pp.41-46, 2020
- 4) 電気学会直流電気鉄道における保護技術調査専門委員会: 直流電気鉄道における保護および保護協調に関する調査, 電気学会技術報告, No.542, 1995
- 5) 堀紘彰, 宇佐美進, 島田喜明:電流差分検出による高抵抗 地絡検出装置の検証, 令和2年電気学会全国大会, 5-175, 2020
- 小西武史,伊東和彦,今村英樹:VVVF 制御車に適した直 流変電所保護手法の基礎検討,鉄道総研報告,Vol.32, No.4, pp.5-11, 2018
- 7) 岩間司:ICT 社会を支える時刻同期技術, 情報処理,

Vol.57, No.1, pp.52-57, 2016

- "IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems," IEEE Std 1588TM-2008, 2008.
- 9)赤木雅陽,横内俊秀,近藤稔:高精度時間プロトコルに対応した直流電流計測システムの基礎検討,令和4年電気学会全国大会,5-137,2022
- 10) 赤木雅陽, 生出珠之助, 吉井剣, 森本大観: 直流回路用電 流センサの線形性特性・オフセット特性評価, 令和3年電 気学会産業応用部門大会, 5-24, 2021
- 11)流王智子,河村裕介,赤木雅陽,近藤稔,太田佑貴:鉄道 向け統合分析プラットフォーム,第60回サイバネ・シン ポジウム論文集, No.404, 2023
- 12)赤木雅陽,緒方隆充,横内俊秀,今村謙汰,河村裕介,流 王智子,近藤稔:高精度時間プロトコルに対応した直流電 流計測システムの実証試験,令和5年電気学会全国大会, 5-187,2023
- 13)木村高志,菅井俊一,奥井明伸,長谷伸一:直流き電用コンクリート柱地絡模擬試験,平成17年電気学会全国大会, 5-210,2005

パン	流れの タグラ)バイ ラフ舟	パス手 支え部	法によ 3の空力	:る 音低減
光用	剛*	天野	佑基*	阿久津	真理子**
長尾	恭平*	真柄	勇*'	** 若材	▶ 雄介#

Aerodynamic Noise Reduction of Pantograph Head Support by Applying Flow Bypass Technique

Takeshi MITSUN	ЛОЛ	Yuki AMAN	NO	Mariko AKUTSU	
Kyohei NAGAO	Isamı	1 MAKARA	Yus	uke WAKABAYAS	ΗI

Reduction of aerodynamic noise emitted by a pantograph is an important challenge to reduce environmental impact and increase the speed of high-speed trains. In previous studies, a method for reducing aerodynamic noise has been proposed by applying porous material to pantograph head support covers. In this study, a new practical method is proposed to achieve the same aerodynamic noise reduction effect as using porous material. On the basis of a wind tunnel test result, it is clarified that the new method can reduce aerodynamic noise to almost the same extent as using porous material.

キーワード:パンタグラフ,舟支え部,空力音,多孔質材,流路,流れのバイパス手法

1. はじめに

新幹線の更なる高速化を実現するうえで,沿線騒音の 低減,特に列車速度の6乗から8乗に比例して増加す る空力音の低減が重要な課題となっている。新幹線車両 の構成機器のうち,パンタグラフは主要な空力音源のひ とつとなっており,特に舟体・舟支え部(図1)につい てはその寄与が大きいことがわかっている。

このうち、架線とのしゅう動を担う舟体は、空力音の 低減だけでなく揚力特性の安定化、すなわち対向風の風 向変化やすり板摩耗に起因する形状変化に対して揚力特 性が大きく変化しないこともまた必須の要件となってお り、現在では主に後者の要件から図2(a)に示すよう な矩形を基本とした形状(以下,現用舟体と記す)が舟 体の断面形状として用いられている。これらの事柄を踏 まえ、過去の研究ではCFD解析と形状最適化手法を組 み合わせた手法を用い、一方向走行を前提として空力音 の低減と揚力特性の安定化を両立する舟体断面形状¹⁾が 提案されているほか、その断面形状を基本として追従機 構を実装した多分割平滑化舟体が開発されている²⁾³⁾(図 2(b),図3)。

また,舟体・舟支え部の空力音低減においては,舟体 と舟支え部の流れの干渉を制御することも重要であり,



図1 新幹線パンタグラフの構成





図3 舟体・舟支え部の空力音低減策

文

論

^{*} 鉄道力学研究部 集電力学研究室

^{**} 環境工学研究部 騒音解析研究室

^{***} 元 鉄道力学研究部 集電力学研究室

[#] 東日本旅客鉄道株式会社

過去の研究においては、なびき方向での走行を前提とし たうえで、舟体の設置位置を上流側にオフセットさせる ことで流れの干渉を緩和する改良舟支えや、舟支え部の 頂点カバーに多孔質材を適用する空力音低減策が提案さ れている³⁾ (図 3)。これらの空力音低減策のうち,多孔 質材の適用については、部材の形状や構造を大きく変更 することなく部材の表面性状のみを変更する対策である ことから、適用が容易な対策であると言える。また、多 孔質材はその構造の特徴から接着取付が必要となるが. 現車適用に際しては、その取り付け強度に問題が無いこ とも確認がなされており4),実用化に向けて一定の目途 が立った技術であると考えられる。しかしながら、多孔 質材は、飛来物が衝撃した際に多孔質構造が潰れるなど の変形を生じる場合があり、接着取付のため多孔質部分 のみの交換を行うことも困難であるといった課題があ る。そのため、多孔質材に代表される部材表面性状の改 良による空力音低減手法の実用化を推進するうえでは, 部材強度や保守性の向上が必須であり、場合によっては 多孔質材によらない新たな手法も必要となると考えられ る。そこで、本研究では、多孔質材と同様の原理による 空力音低減作用を実現し,かつ,部材強度や保守性など を向上可能な実用的な代替手法として流れのバイパス手 法を提案し、風洞試験において空力音低減効果の確認を 行った。

2. 多孔質材の代替手法

多孔質材とは、図4に示すような無数の気孔を有する 部材であり、空力音低減においては隣接する気孔同士が 連通した構造のものを適用する必要があることがわかっ ている。また、多孔質材による空力音低減効果は、吸音 などの音響的な作用ではなく、多孔質材表面において生 じる自然な流れの流入・流出に伴って流れ場が安定化す る流体力学的な作用によって得られることが解明されて いる⁵⁾。そのため、多孔質材の作用を別の手法で実現す るためには、部材表面の圧力差に応じて自然な流れの流 入・流出が生じるような構造を設けることが重要となる。

本研究では、図3に示した金属多孔質材付き頂点カ バーのような舟支え部への適用を想定し、多孔質材の代 替手法として、舟支え部の上面側稜角部に流路を設けて 流れを上面から側面へとバイパスさせる手法を提案し た。図5(a)に本手法の概要図を示す。本手法では、 舟支え部の上面側稜角部のうち、流れがよどんで圧力が 上昇する上面側と、流れが剥離して圧力が低下する側面 側とを流路で接続し、上面側から側面側への自然な流入 出流れを生じさせることを狙っている。

供試体には、現用の頂点カバーをまくらぎ方向に 10mm ずつ拡幅したうえで、稜角部に流路を設けた部材



図4 多孔質材







を着脱可能な構造の頂点カバーを使用した。流路を適用 する領域は,幅W=10mm,高さH=10mm,稜線方向 の長さL=128.5mmを基本とした。流路は,図5(b)に 示すように,稜角部の上面に垂直な「方向①」と側面に 垂直な「方向②」の2方向に設けることを基本とし,一 部の試験では稜線に平行な「方向③」の流路を追加した。

風洞試験の概要

風洞試験は,新幹線用実機パンタグラフを供試体として,鉄道総研の大型低騒音風洞(開放型計測部,吹出口3m×2.5m,最大風速111m/s)において実施した。風洞試験の実施状況を図6に示す。舟体には図2(b)および図3に示した多分割平滑化舟体²⁾³⁾を搭載し,パンタグラフの設置方向はなびき方向とした。試験風速は100m/s(360km/h)であり,試験時のレイノルズ数は舟





(b) 舟体・舟支え部図6 風洞試験の実施状況

支え部の左右方向幅を代表長さとして算出すると 6.5×10⁵である。なお、本試験では舟支え部の空力音評 価を主目的としており、それ以外の部位からの放射音は 極力小さいことが望ましいことから、多分割平滑化舟体 のねじ穴や可動用の隙間部は全て塞いだ状態で試験を実 施することを基本とした(図6(b))。

空力音測定はパンタグラフ全体が気流にさらされる条 件下で実施し、パンタグラフの側方斜め下位置に設置し た無指向性マイクロホンにより空力音を評価した。ここ で、無指向性マイクロホンの設置位置は、流れ方向につ いては舟体中心位置から356mm上流側,左右方向につ いては舟体中心位置から 5m 側方, 高さ方向については 舟体上面から 2.6m 下方位置に設定した。騒音レベルは 空力音測定波形に対して 1/3 オクターブバンド周波数分 析を実施し、A特性補正を施して算出した。オーバー オール値については、舟支え部の寄与が支配的となる周 波数帯として 400Hz 以上の周波数帯から算出したパー シャルオーバーオール値(以下, POA 値)で評価する ことを基本とした。また、暗騒音に相当する条件として、 舟体・舟支え部との流れの干渉の影響が生じないよう舟 体を取り外した条件での試験を実施しており、必要に応 じて空力音測定結果にその結果を併記する。



流路

(c) 流路



(d)多孔質

図7 舟支え部の試験条件



4. 風洞試験結果

4.1 流路の適用効果と内部流路の構成の影響

はじめに、図7に示す4種類の舟支え部の試験条件 を設定し、流路の適用効果および内部流路の構成の影響 を確認した⁶⁾。本検討では,現行の舟支え部の頂点カバー (図7(a),以下「現行」)に対して,頂点カバーを左 右方向に 10mm ずつ拡幅した状態 (図7(b),以下「拡 幅」)および、「拡幅」に対して稜角部に流路を設けた状 態(図7(c),以下「流路」)に加え,空力音低減効果 の比較対象として,「拡幅」に対して稜角部に樹脂製多 孔質材(イノアック社製モルトフィルタ MF-13)を適 用した条件(図7(d),以下「多孔質」)の空力音測定 を実施した。ここで、「流路」については、直径 2mm の円形流路を中心間距離 4mm ピッチで配置したが、流 路の設置方向は図8に示す3通りの条件を設定した。 具体的には、流路の設置方向を方向①と方向②の2方向 とした「2軸」(図8(a))と、「2軸」に対して方向③ の流路を追加した「3軸」(図8(b)),および方向③の 流路を 6mm × 6mm の矩形断面とした「中空」(図 8 (c)) の3条件を設定した。いずれの流路条件についても、流 路を設けた部材は3Dプリンタにより製作したものを使 用した。また、多孔質材の外形寸法は、稜角部を構成す るパーツの分割の制約により、流路の適用領域よりもや や大きい W=10mm, H=16.7mm, L=139.1mm (各記 号の部位は図5(a)参照)とした。

本検討の空力音測定結果を図9に示す。POA 値の比 較図(図9(a))を参照すると、「現行」と「拡幅」の頂 点カバーのPOA 値はほぼ同等であり、頂点カバーを拡 幅したことによる空力音への影響は小さいことが確認で きる。これを踏まえて、「現行」を基準として各種流路 を適用した場合のPOA 値を比較すると、0.6~0.7dBの 空力音低減効果が認められ、内部流路の構成による空力 音の差異も小さいことが確認できる。しかしながら、「多 孔質」の場合にはPOA 値が 0.9dB 低減していることか ら、流路を適用したことによる空力音低減効果は多孔質 材を適用した場合と比べると若干小さいことがわかる。

次に,空力音のスペクトルの比較図(図9(b))に着 目すると、「現行」に対して各種流路を適用した条件では、 400Hz~8kHzにかけての広い周波数帯にわたって騒音 レベルが低減しているものの、各周波数帯における空力 音低減効果は「多孔質」と比べると若干小さいことが確 認できる。なお、POA 値に大きな影響を及ぼすレベル ではないものの、12.5kHz帯に着目すると、内部流路の 構成によって差異が見られ、方向③の流路を省略した「2 軸」では若干のピーク音が認められる一方で、方向③の 流路を追加した「3軸」や「中空」ではピーク音が発生 していないことが確認できる。「2軸」の場合に発生し た12.5kHzの弱いピーク音は、その発生周波数に風速 依存性がないことを別途確認しており、音波の波長の 1/4 (6.8mm) が流路の深さ 8mm と概ね一致することか ら, 流路の深さを 1/4 波長とする気柱共鳴音であると考 えられる。また、このピーク音は方向③の流路を設ける ことで低減可能であることも推察される。



図 9 流路の設置方向による空力音の比較(風洞試験, 360km/h)

4.2 流路の形状および開口率の影響

前節の検討結果から,頂点カバーの稜角部に流路を設 けることで空力音を低減可能であるものの,空力音の低 減量は多孔質材を適用した場合と比べると小さいことを 確認した。その要因として,舟支え部上面から側面への 流れの流入出の流量が十分ではないことが考えられる。 そこで,流入出の流量を増加させることを目的として, 流路の断面形状や大きさを変更した場合の空力音低減効 果について調査を行った⁷⁾。

図10に流路の開口条件を示す。本検討では、内部流路の構成を前節の「3軸」(図8(b))と同一としたう えで、流路の中心間距離を4mmに固定し、前節に記載 した直径2mmの円形流路(図10(a)、以下「円形 (2mm)」)に対して、流路の断面積を1辺2mmの正方 形とした場合(図10(b)、以下「正方形(2mm)」)、お よび、これら流路の直径および1辺を3mmに拡大した 場合(図10(c)(d)、以下「円形(3mm)」および「正 方形(3mm)」)の計4条件を設定して試験を実施した。 いずれの流路条件についても、流路を設けた部材は3D プリンタにより製作したものを使用した。なお、比較対 象とした「現行」および「多孔質」については、前節と 同一条件とした。

空力音測定結果を図 11 に示す。図 11 (a) は流路の開 口率に対して POA 値をプロットしたものであり,開口 率は稜角部上面の流路の適用領域(10mm×128.5mm) に対する流路の総開口面積により算出している。本図よ り,流路の開口率が大きくなるほど POA 値が減少する 傾向が認められ,本検討で評価したなかでは,開口率を 35% 程度とすることで多孔質材を適用した場合と同程度 の空力音低減効果が得られることが確認できる。

空力音のスペクトルの比較図(図11(b))を参照す ると,前節と同様に流路の適用によって400Hz~8kHz にかけての広い周波数帯にわたって騒音レベルが低減し



ており,開口率が大きい「円形 (3mm)」および「正方 形 (3mm)」では「多孔質」とほぼ同等の空力音低減効 果が得られることが確認できる。

なお,同程度の断面寸法の円形流路と正方形流路とで は,開口率の違いに伴って POA 値や空力音のスペクト ルに若干の差異が認められる以外は大きな違いはなく, 空力音低減効果は流路の断面形状には大きくは依存しな いと考えられる。

4.3 実機仕様の試作機の空力音低減効果

前節までの検討結果を踏まえ,実機仕様の空力音低減 デバイスとして,図12に示すデバイスを製作し,その空 力音低減効果を確認した⁸⁾。本デバイスは,部材強度を 考慮して厚さ10mmのアルミ製の板材に流路を設けるこ とで構成しており,流路の設置領域は前節までの検討と 同様に幅W=10mm,高さH=10mmとしているが,稜 線方向の長さについては加工上の制約からL=121.5mm



図 11 流路の開ロパターンによる空力音の比較(風洞 試験, 360km/h)



図 12 実機仕様の空力音低減デバイス

鉃道総研報告 Vol.38, No.10, 2024

と若干縮小している。流路の設置方向は、4.1節の結果 から空力音低減効果に大きな影響を与えないことを確認 していることから、部材の加工性を考慮して「方向①」 と「方向②」の2方向のみから流路を設置する2軸タイ プを選定した。また、流路の大きさ・形状は、4.2節の 結果から35%程度の開口率を確保する必要があること から、直径3mmの円形流路を中心間距離4mmピッチで 配置した。本デバイスは頂点カバーに共締めすることで 設置できる構造となっており、検修時等には当該デバイ スのみを取り外して検査・交換等が行えるため、接着取 付が必要な多孔質材と比べて保守性も向上している。ま た、質量は左右合わせて約300gであり、上枠の等価質 量に対して十分小さく、集電性能には大きな影響を及ぼ さないと考えられる。

空力音低減効果の評価においては、3種類の舟体・舟 支え部条件に対して本手法を適用し、その空力音低減効 果を過去の研究で開発した金属多孔質材付き頂点カ バー³⁾ (図 3, 多孔質材の設置領域は幅 W=10mm, 高さ *H*=40mm,稜線方向の長さ*L*=140.3mm)と比較した。 舟体・舟支え部の条件は、舟体・舟支え部がともに現用 品である「条件1」、「条件1」に対して舟体のみを多分 割平滑化舟体に変更した「条件 2」、「条件 2」に対して 改良舟支えを適用した「条件3」の3条件とした。いず れの条件についても、頂点カバーの基本条件は現行の頂 点カバーとした。なお,多分割平滑化舟体および改良舟 支えは過去に提案されたもの(図3)から外形状等を若 干変更した改良品⁹⁾を使用した。また、本節では、実走 行時のパンタグラフの空力音を評価することを目的とし て,多分割平滑化舟体の舟体要素間の隙間部については, 可動性を考慮してアルミテープではなく柔毛材³⁾を適用 して塞いだ条件としたほか、全体音は POA 値ではなく OA 値により評価した。これらにより、前節までの検討 結果と比べて空力音低減効果は若干小さい値となる。

空力音測定結果を図 13 に示す。本図より,いずれの 舟体・舟支え部条件に対しても,提案したデバイス(流 路)を適用することで 630Hz以上の広い周波数帯にわ たって空力音が低減している様子が確認できる。本デバ イスによる OA 値の低減量は 0.3~0.4dB であり,多孔 質材の空力音低減効果 0.4~0.5dB よりも若干小さいも のの,ほぼ同等の空力音低減効果が得られると言える。 なお,OA 値に与える影響は小さいものの,12.5kHz 帯 において本デバイスの適用により弱いピーク音が発生し ている様子も確認できる。このピーク音は 4.1 節におい て確認された 2 軸タイプの流路構成特有の気桂共鳴音 であると推測され,4.1 節の検討よりも流路の開口率を 増加させた本節の検討においては,流路を通過する流量 が増加したことに伴ってピーク音が顕著に発生したもの と考えられる。



図 13 実機仕様の空力音低減デバイスによる空力音低減効果(風洞試験, 360km/h)

以上より,提案したデバイスは,12.5kHz帯に弱い ピーク音が発生するものの,様々な舟体・舟支え部条件 に対して多孔質材を適用した場合とほぼ同等の空力音低 減効果が得られることを確認した。

5. まとめ

本研究では、多孔質材の空力音低減メカニズムに基づ き、その作用を実現したうえで、部材強度や保守性を向 上させた実用的な代替手法として、部材の稜角部に流路 を設ける手法を提案し、その空力音低減効果を風洞試験 において確認した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 舟支え部の上面と側面を接続するように流路を設 けることで空力音が低減する。
- (2) 流路の設置方向については、上面と側面にそれぞれ垂直な方向に流路を設ける2軸タイプと、稜線方向の流路を追加した3軸タイプとで空力音低減効果に大きな差がないことを確認した。ただし、2軸タイプについては、流路の深さ方向の寸法に関係した気柱共鳴音と推測される弱いピーク音が発生する。
- (3) 流路の開口率については、本研究で評価したなかでは、開口率を35%程度とすることで多孔質材と

概ね同等の空力音低減効果が得られる。

(4) 実機仕様の空力音低減デバイスとしてアルミ板に 流路を設けたデバイスを開発し、その空力音低減 効果を評価した結果、代表的な3種類の舟体・舟 支え部条件に対して、多孔質材と概ね同等の0.3~ 0.4dBの空力音低減効果が得られることを確認した。 本手法は多孔質材に替わる実用的な空力音低減策として パンタグラフUMにも様々な哭機や部材にも適用可

て,パンタグラフ以外にも様々な器機や部材にも適用可 能な手法であると考えている。

文 献

- 吉田和重,鈴木昌弘,池田充:揚力特性および低騒音性を 考慮した舟体形状最適化の基礎検討,鉄道総研報告, Vol.19, No.9, pp.23-28, 2005
- 2) 臼田隆之,小林樹幸,山下義隆,光用剛,長尾恭平,若林 雄介:多分割舟体の追従機構と揚力補償手法,鉄道総研報 告, Vol.34, No.8, pp.5-10, 2020
- 光用剛,臼田隆之,平川裕雅,磯野達志,長尾恭平,若林 雄介:平滑化舟体と舟支え部の改良によるパンタグラフの 空力音低減,鉄道総研報告, Vol.34, No.8, pp.11-16, 2020
- 4) 平川裕雅, 光用剛, 臼田隆之, 嵯峨信一:パンタグラフの

低騒音化に向けた金属製多孔質材の氷塊衝撃試験,第26回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019),2019

- 5) 高石武久, 末木健之:多孔質材貼付による空力音低減に関 する数値解析, 日本機械学会論文集, Vol77, No.773, pp33-42, 2011
- 6)光用剛,平川裕雅,阿久津真理子,小林樹幸,若林雄介: パンタグラフ舟支え部の空力音低減を目的とした多孔質材の代替手法の検討,第31回環境工学総合シンポジウム 2021,2021
- 7) 光用剛, 天野佑基, 阿久津真理子, 小林樹幸, 若林雄介:

多孔質材の代替手法によるパンタグラフ舟支え部の空力音 低減効果に関する検討,第32回環境工学総合シンポジウ ム2022,2022

- 8) 光用剛, 天野佑基, 阿久津真理子, 長尾恭平, 真柄勇, 若林雄介: Reduction of aerodynamic noise from pantograph head support by applying flow bypass technique to replace porous materials, International Workshop on Environmental Engineering 2023 (IWEE 2023), 2023.

文

論

集電材料の凝着摩耗形態と焼付き摩耗形態の遷移メカニズム

根本 公紀* 山下 主税*

Transition Mechanism between Adhesive Wear Mode and Seizure Wear Mode of Current Collecting Materials

Koki NEMOTO Chikara YAMASHITA

In electric railways, measures to reduce wear of current collecting materials such as contact wires and contact strips are required to reduce the maintenance costs of current collecting materials based on the wear mechanisms. The authors have so far clarified that there are four mechanical wear modes of current collecting materials. However, the transition mechanism between adhesive wear mode and seizure wear mode has not been explained. In this paper, in order to elucidate the mechanism, the authors developed a model for analyzing contact temperatures considering the number of contacts. Using the developed model, the number of contacts was estimated by comparing analytical and experimental results. It shows that the number of contacts of seizure was less than that of adhesive wear. It was also clear that the transition to seizure occurs when the surface pressure exceeds the hardness of the material.

キーワード:摩擦熱,熱伝導解析,摩耗形態,接点温度,接点数,硬さ

1. はじめに

トロリ線やすり板などの集電材料は,集電時にしゅう 動することで摩耗し,その摩耗率によって交換頻度が決 定されている。そのため,メンテナンスコスト削減のた め集電材料の摩耗抑制が望まれている。

従来,集電材料の摩耗について,離線時のアーク放電 が主要因とされる電気的摩耗と,凝着摩耗が主要因とさ れる機械的摩耗に大別して考えられてきた^{1)~4)}。しかし, 従来の考え方では説明できていない現象も残されてお り,集電材料の摩耗に関する研究の深度化が求められて いる。

近年,集電材料の摩耗について,摩耗の発現要因の摩 耗形態に着目し,摩耗メカニズムの深度化を進める研究 が行われている。山下らは,電気的摩耗について,電気 的摩耗形態は3種類存在し,それらは集電材料の溶融に より遷移することを明らかにした⁵⁾。さらに,接点の温 度分布の解析および定式化により電気的摩耗形態の遷移 条件をマップ化した⁶⁾。このように,摩耗形態を細分化 し,接点温度の測定と解析を組み合わせて摩耗形態の遷 移現象を説明することで,未解明であった現場の現象を 明らかにできる可能性がある。

筆者らは,集電材料の機械的摩耗について,実験時の 接点温度を測定可能な試験機を用いて,トロリ線を模擬 した銅円盤と鉄系焼結合金すり板試験片との摩擦実験を した⁷⁾⁸⁾。その結果,機械的摩耗形態は4種類存在し, 各形態を「凝着摩耗形態」,「焼付き摩耗形態」,「アブレ シブ摩耗形態」、「軟化流動摩耗形態」と考察した。そし て、摩擦熱起因の接点温度上昇による材料の軟化によっ て、アブレシブ摩耗形態や軟化流動摩耗形態が発現する ことを明らかにした。しかし、凝着摩耗形態と焼付き摩 耗形態については、どちらの摩耗形態も材料が軟化しな い条件で発現しており、それらの遷移条件は材料の軟化 だけでは説明できていない。従来、無潤滑条件における 焼付きの発現メカニズムとして、片当たりや摩耗粉の噛 みこみなどによる接点数の減少が一つの要因だと報告さ れている⁹。前報告⁷¹⁸⁹では、実験時の接点数を正確に 測定・推定できず、凝着摩耗形態から焼付き摩耗形態へ の遷移現象が接点数の減少によるものかは不明であった。

そこで,前報告⁷⁾⁸⁾で焼付きと考察した摩耗形態の妥 当性検証およびその遷移メカニズム解明のため,本論文 では,回転摩耗試験機で測定された接触力や摩擦力を活 用し,銅円盤と鉄系焼結合金の接点数を考慮した摩擦熱 による接点温度上昇解析を行い,実際に測定された接点 温度と解析上の接点温度を比較することで,実験時の接 点数を推定した。さらに,接点数から1接点あたりの面 圧を推定することにより,凝着摩耗形態と焼付き摩耗形 態の遷移メカニズムを検討した。

2. 接点数を考慮した接点温度上昇の解析手法

2.1 前報告の実験条件を考慮した解析モデルの検討

前報告^{7) 8)}では,図1に示すように,回転させたトロ リ線を模擬した銅円盤に,すり板材料である鉄系焼結合 金の角型の試験片を押し当てることでしゅう動してい た。接触状態として,見かけの接触面積は10mm×

^{*} 電力技術研究部 集電管理研究室

10mm=100×10⁻⁶m²としており,片当たりなどを防ぐ ため,摩耗実験の前にならし運転を行っていた。接点温 度については,ゼーベック効果を利用し熱起電力を測定 する熱電対法でしゅう動中の接点温度を推定しており, 試験片への熱の蓄積の影響をできるだけ排除するため, しゅう動時間は 60s 未満と短時間のしゅう動としていた。

熱電対法で測定される温度は,見かけの接触面ではな く真実接触面における温度であり,真実接触点が複数存 在する場合は,それぞれの最高温度を平均した値が出力 される。また,前報告⁷⁷⁸⁰の実験におけるしゅう動時間 は短く,連続的なしゅう動による試験片への熱の蓄積の 影響が少ないため,真実接触点の温度上昇は主に摩擦熱 に起因するものと考えられる。

そこで本論文では、1つの真実接触点を対象とした解 析モデルを用い、見かけ接触面積内に存在する接点数で 摩擦力を除することで、摩擦熱を均等に分担させること と仮定した。熱の蓄積を考慮しないため、摩擦熱を入力 する時間は1つの接点の相対滑り時間とした。

2.2 解析モデル

本論文では汎用有限要素法解析ソフト(ムラタソフト ウェア製 Femtet)を用いて,非定常熱伝導解析を行った。 本報告で用いる解析モデルの概略図を図2に示す。従来 の摩擦熱による1つの接点の温度上昇を解析した報 告^{10) 11) 12)}では,接点を円柱と仮定した解析モデルが用い られている。本報告もこれらにならい円柱接点モデルと し,後述する接触境界層以外の部分をバルクと表現する。

両接点への摩擦熱の入力について、従来は摩擦熱を熱 流束として各接触面に入力するものが多く、その分配率 は半々とする、あるいは熱伝導率などの物性値によって 分配率を決定するなど一意に定まってはいない^{10) 11) 13)}。 そこで本論文では熱分配を考慮しなくてよいモデルとす るため、接触境界に銅円盤とすり板の混合物を接触境界 層として作成し、摩擦熱を接触境界層に入力した。接触 境界層として用いる混合物の材料パラメータは銅円盤お よびすり板の平均値と仮定し、それぞれ次の式で算出した。

$$\rho_{\rm B} = \frac{\rho_{\rm C} + \rho_{\rm S}}{2} \tag{1}$$

$$\lambda_{\rm B} = \frac{2\lambda_{\rm C}\lambda_{\rm S}}{\lambda_{\rm C} + \lambda_{\rm S}} \tag{2}$$

$$c_{\rm B} = \frac{c_{\rm C} + c_{\rm S}}{2} \tag{3}$$

ここで, *ρ* は密度 [kg/m³], *λ* は熱伝導率 [W/(m・K)], *c* は比熱 [J/(kg・K)] であり, 添え字の B は接触境界層, Cは銅円盤, Sはすり板を示す。

接触境界層に入力する摩擦熱 Q[W] は次の式で求め, 解析時間中連続的に前述の接触境界層に入力した。なお, 摩擦仕事は音の発生や接点の破壊にも消費され,100% 摩擦熱に変換されるわけではないと考えられる。そこで, 1 接点に入力する摩擦熱を摩擦仕事に熱変換率として η を乗じたものとし,摩擦仕事が摩擦熱以外に消費される ことも考慮した。本研究では考慮ができていない接点の 軟化の影響,合金層の生成や移着物の影響,接点形状に よる誤差や接触の仕方による誤差なども,この熱変換率 ηに含まれている可能性がある。

$$Q = \eta \, \frac{\mu N \nu}{n} \tag{4}$$

ここで, μは摩擦係数, Nは接触力 [N], vはしゅう動
 速度 [m/s] である。それぞれ前報告^{7) 8)}の実験結果(図
 3)を用いた。nは接点数であり, Lim, Ashbyによっ
 て提唱されている次の式¹⁰⁾を用いて算出した。

$$n = {\binom{r_0}{r_a}} {\binom{N}{A_0 H_0}} \left(1 - \frac{N}{A_0 H_0}\right) + 1$$
 (5)¹⁰

ここで、 r_a は真実接触点の半径 [m]、 r_0 は見掛けの接触半径 [m]、 A_0 は見掛けの接触面積 [m²]、 H_0 は軟らかい方の材料(ここでは銅円盤)の硬さ [Pa] である。 r_a は模擬トロリ線の断面プロファイを測定し、その空間周波数から算出し、 r_0 はすり板試験片の見掛けの接触面積 $A_0 = 100 \times 10^{-6}$ m²を円と仮定した場合の半径として算出した。







解析時間は1つの接点の相対滑り時間*t*[s]とし,次の式のように算出した。

$$t = \frac{2r_{\rm a}}{v} \tag{6}$$

境界条件は、銅円盤バルクの上端およびすり板バルク の下端の温度を外気温である 298K とし、その他の面は



図3 しゅう動条件と摩擦係数の関係⁷⁾⁸⁾

摩擦熱 Q,W	式(4)
摩擦係数 μ	実験結果
接触力 <i>N</i> , N	実験結果
しゅう動速度 <i>v</i> ,m/s	実験結果
接点数 n	式(5)10)
真実接触点の半径 ra,m	64×10 ⁻⁶
見かけの接触面積 A ₀ , m ²	100×10 ⁻⁶
見かけの接触半径 r ₀ , m	5.6×10 ⁻³
銅円盤のビッカース硬さ H ₀ ,Pa	980×10 ⁶
(硬さ(Hv)から換算)	
接触時間 t,s	式(6)
バルク端温度, K	298
熱変換率 η	$40 \sim 80\%$

表1 解析条件

表	2	物	'牛'	値
	_			

	銅円盤	すり板	境界層
密度 $ ho$, kg/m^3	8910	6910	7910
	361 (293 K)	20.0 (293 K)	37.9 (293 K)
熱伝導率 λ,	337 (573 K)	19.3 (573 K)	36.5 (573 K)
W/(m • K)	• K) 312 (873 K) 18.5 (873 K)		34.9 (873 K)
	286 (1173 K)	17.7 (1173 K)	33.3 (1173 K)
	394 (293 K)	491 (293 K)	443 (293 K)
比熱 c,	416 (573 K)	576 (573 K)	496 (573 K)
J/(kg • K)	440 (873 K)	666 (873 K)	553 (873 K)
	464 (1173 K)	756 (1173 K)	610 (1173 K)

断熱条件とした。また,真実接触点での接触は完全な接触であるものとし,各材料同士の接触熱抵抗は0として 計算している。解析パラメータをまとめたものを表1 に,解析に用いた銅円盤,すり板および接触境界層の物 性値を表2に示す。

また、本論文で接点温度として解析結果から出力する 値は、接触境界層の最高温度とした。これは、前報告^{7) 8)} で接点温度を推測するために計測される熱起電力は、理 論的には接点の最高温度と電位測定点の温度との差に応 じて生じるためである。

解析モデルのサイズに関するパラメータ,具体的には バルク高さ,接触境界層厚さおよび接触境界層のメッ シュー辺の長さについて,事前の検討により解析結果の 精度に影響を及ぼさない範囲を求めた¹⁶。そして,解析 モデルの精度の確保および解析時間の短縮の観点から, バルク高さを400µm,接触境界層厚さを0.2µm,接触 境界層のメッシュー辺の長さ0.1µmとして計算を行った。

結果および考察

3.1 実験結果と解析結果の比較

接点の温度上昇量と実験条件の関係について,前報 告⁷⁾⁸⁾の実験結果と2章のモデルで熱変換率ηを40%~ 80%と変化させたときの解析結果を図4に示す。図中 縦軸の接点の温度上昇量*ΔT*[K]は,実験時の試験片の 熱起電力測定点の温度上昇の影響を取り除いた接点温度 上昇量であり,次式のように求めた。

$$\Delta T = T - T_0 \tag{7}$$

ここで、*T* は接点温度であり、図 4(b) においては前報 告^{7) 8)} で測定された熱起電力波形の平均値より算出した 接点温度、図 4(c) ~ (g) においては解析結果の接触 境界層の最高温度を用いた。 T_0 は熱起電力測定点の温 度であり、図 4(b) については、前報告^{7) 8)} のしゅう動 前の銅円盤およびすり板の電位測定点温度の平均値、図 4(c) ~ (g) については、バルク端温度である 298K を 用いた。

熱変換率 η が増加することで,接触境界層での発熱量 も増加し,接点の温度上昇量が増加する。η を同定する 指標として,実験結果と解析結果の誤差δを次の式で算 出した。

$$\delta = \sum (|\Delta T_{\rm A} - \Delta T_{\rm T}|/T_{\rm T})/D \tag{8}$$

ここで、 ΔT_{A} は解析による接点の上昇温度 [K]、 ΔT_{T} は 実験による接点の上昇温度 [K]、 T_{T} は実験による接点



30 N

凝着摩耗

60 N

80 N

図4 接点上昇温度としゅう動条件の関係⁷⁾⁸⁾¹⁶⁾

温度 [K], Dはデータ数である。摩耗形態ごとの全条 件のデータを用いて、各摩耗形態の誤差を式(8)で求め、 それらの平均を求めることで全データの平均の誤差を計 算している。

ηを40~80%としたときの摩耗形態別の誤差δを図5 に示す。なお、全摩耗形態の平均の誤差は、ηが40% の時に 0.29, 50% の時に 0.19, 60% の時に 0.15, 70% の時に 0.18, 80% の時に 0.29 と, η が 60% の時に最も 誤差が少なかった。摩耗形態によって誤差が少ない ŋ が 異なるが、上述したように接点の軟化や合金層など考慮 していない要素があり、それらの影響が表れたものと考 えられる。

従来, 接点を円柱と仮定した解析モデルで摩擦熱に起 因する接点温度上昇を解析する際に、摩擦仕事から摩擦





図6 熱伝導理論計算モデル¹⁶⁾

熱への熱変換率は 100% と仮定して解析されることが多 いが^{10)~13)},本論文では 60% が最も実験結果と近い値 となった。この値は解析モデルの形状にも依存すること が考えられるが,今後は摩擦仕事と摩擦熱を同一視せず, 熱変換率にも着目することが必要と考える。

3.2 解析結果の理論的な整理

解析結果から接点数を推定するためには,接点数の情報を含む入力摩擦仕事と接点温度の関係を明らかにする 必要がある。そこで,熱伝導理論に基づくアプローチに よる解析結果の整理を検討する。熱伝導理論に基づくア プローチをするため,本論文で用いた図2に示す解析モ デルを簡略化し,図6に示すような,半無限固体に対し て,表面に一定の熱流束が与えられる理論モデルを考え る。表面に与える熱流束を q₀ [W/m²] としたときの, 半無限固体の熱流束が与えられる面からの距離 x[m], 時刻 t[s] における温度 T_{xt}[K] は次式で表される¹⁴。

$$\frac{\lambda(T_{x,t} - T_{i})}{q_{0}\sqrt{\alpha t}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^{2}}{4\alpha t}\right) - \frac{x}{\sqrt{\alpha t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)$$
(9)

ここで, *T*_i は半無限固体の初期温度 [K], λ は半無限固 体の熱伝導率 [W/(m・K)], α は半無限固体の熱拡散 率 [m²/s] である。この理論モデルは,熱流束に対する 深さ方向の温度変化を論じるため,その他の方向は無限 としている。一方,本論文の解析モデルは有限固体であ るが,円柱側面の境界条件を断熱とすることで,理論モ デルと同様,深さ方向のみ温度が変化する。また,解析 モデルの入熱面積は有限であるが,熱流束にすることで 入熱面積を無視することができ,式(9)に準ずる考察が 可能と考える。解析モデルでは銅円盤とすり板が接触し た状態で接触境界層に熱を入力しているが,銅円盤側と すり板側を別々に分けて考え,熱的に相互作用しないモ デルとする。

解析モデルにおいて,1接点に流入する熱流束 q₀は,次式で表される。

$$q_0 = \beta Q / A_{\rm r1} \tag{10}$$

ここで、 β は銅円盤あるいはすり板の熱分配率、Qは式 (4)で表される一点当たりの摩擦熱、 A_{rl} は πr_a^2 で求めら れる真実接触点一点の面積である。解析モデルにおける 接点温度は接触界面における温度であるため、x=0お よび式 (10)を式 (9) へ代入して整理すると、接点温度 $T_{0,t}$ および接点の温度上昇量 $\Delta T_{0,t}$ は次式となる。

$$T_{0,t} = T_{\rm i} + \frac{2\sqrt{\alpha t}}{\lambda\sqrt{\pi}}\beta\eta \frac{\mu N\nu}{nA_{\rm r1}}$$
(11)

$$\Delta T_{0,t} = T_{0,t} - T_{\rm i} = \frac{2\eta\beta\sqrt{\alpha}}{r_{\rm a}^2\lambda\pi\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\mu N\nu}{n}\sqrt{t}$$
(12)

式 (12) において、 λ 、 α は材料定数、 β 、 r_a は接触条件に よって決定する定数、 η は解析時に設定した摩擦仕事の 熱変換率で定数である。よって、 $2\eta\beta\sqrt{\alpha}/r_a^2\lambda\pi\sqrt{\pi}$ は定数 であり、接点の上昇温度量は、一点当たりの摩擦仕事お よび接触時間の平方根に比例すると推測される。

そこで,式(12)の変数部分を次式のEと定義した。

$$E = \frac{\mu N v}{n} \sqrt{t} \tag{13}$$

熱変換率 60% で解析した接点の温度上昇量図 4(e) を, E で整理したものを図 7 に示す。図 7 より,接点の温度 上昇量と E の関係は,発現した摩耗形態によらず比例 関係を示した。この比例関係は,次式で表され,

$$\Delta T_{\rm A} = 1206.7E\tag{14}$$

決定係数は 0.9999 となり,非常に高い相関を示した。 式(14)の比例定数の定量的検証を行う。銅円盤およ



図7 接点上昇温度と時間を考慮した摩擦仕事の関係¹⁶⁾

びすり板のそれぞれについて,比例定数 *C*_c, *C*_s は式 (12) から次式で表される。

$$C_{\rm C} = \frac{2\eta\beta_{\rm C}\sqrt{\alpha_{\rm C}}}{r_{\rm a}^2\lambda_{\rm C}\pi\sqrt{\pi}} \tag{15}$$

$$C_{\rm S} = \frac{2\eta\beta_{\rm S}\sqrt{\alpha_{\rm S}}}{r_{\rm a}^2\lambda_{\rm S}\pi\sqrt{\pi}} \tag{16}$$

摩擦熱は,銅円盤およびすり板に分配されるため,それ ぞれの分配率の関係は次式で表される。

$$\beta_{\rm C} = 1 - \beta_{\rm S} \tag{17}$$

銅円盤およびすり板の真実接触点 1 点の温度は、どち ら側の接触面でも等しいため、比例定数 $C_c \ge C_s$ は等 しいと考えられる。この関係に、式 (15)~(17) を代入し、 β_c について解くと、次式で表される。

$$\beta_{\rm C} = \frac{\lambda_{\rm C} \sqrt{\alpha_{\rm S}}}{\lambda_{\rm C} \sqrt{\alpha_{\rm S}} + \lambda_{\rm S} \sqrt{\alpha_{\rm C}}} \tag{18}$$

式 (18) に室温時の材料物性値を代入すると、 β_c は 0.81, β_s は 0.19 と計算される。これらを式 (15), (16) に代入 すると、 $C_c = C_s = 1200.4$ となり、解析結果の 1206.7 と 整合した。以上より、理論的モデルと接触境界層や熱変 換率を設定した本研究の解析モデルの結果が整合したこ とで、本解析モデルは半無限固体の熱伝導理論計算モデ ルに即していることが明らかになった。そして、接点数 の情報を含む摩擦熱と接点温度の曲線が得られたため、 接点温度から入熱条件 (E) を予測することができる。

本研究で,解析結果の定量的検証に単純化した理論計 算を用いることができた理由として,実験におけるしゅ う動時間が1分程度であり,しゅう動による銅円盤とす り板のバルク温度の上昇を考えなくてよい条件であるた



図8 接点上昇温度と時間を考慮した摩擦仕事の関係 (実験結果:凝着摩耗と焼付き)¹⁶⁾

めと考えられる。もし、バルク温度が上昇し、初期温度 である式(11)中の*T*_iが銅円盤とすり板で異なる場合、 表面温度が等しい条件を今回用いた単純な*C*_c=*C*_sとい う条件で表すことができなくなり、熱分配率や比例係数 が求められなくなると考える。そのため、実フィールド に近い条件に適用するためには、理論計算のみでは接点 温度を推測できず、解析モデルを用いる必要があると考 えられる。

3.3 凝着摩耗形態と焼付き摩耗形態の発現メカニズムの解明

3.2 節にて,解析による接点の温度上昇量と E が比例 関係となることを用いて,実験時の接点数を再計算し, 凝着摩耗形態と焼付き摩耗形態の遷移メカニズムを検討 する。

焼付き摩耗形態と凝着摩耗形態について,接点の温度 上昇量の実験結果(図4(b))とEの関係を図8に示す。 図8より,凝着摩耗形態は接点の温度上昇量とEがお およそ比例関係となり,解析結果と同様の傾向を示した。 一方,焼付き摩耗形態は,比例関係とはならず,解析結 果よりも接点の温度上昇量が大きい方向にずれている実 験条件が多く見られた。

焼付き摩耗形態の発現時に,接点の温度上昇量が大き い方向にずれたのは、実験時のEが解析時に用いたEより大きいためと考えられる。その要因として、① 実 験時の接点数nが解析時に用いた式(5)¹⁰⁾で推定したも のより少ないこと、② 真実接触面積が想定よりも小さ く熱流束 q_0 が想定よりも大きいこと、③ 熱変換率 η が 焼付き摩耗形態では60%よりも大きいこと、④ 接触時 間tが想定よりも長いこと、が考えられる。①の実験時 の接点数が解析時に用いた式(5)¹⁰⁾で推定したものより 少ないことについて、無潤滑条件下の焼付き摩耗形態の 遷移条件のひとつとして、摩耗粉の噛みこみや片当たり などによる接点数の減少が提唱されている⁹⁾。本論文で 用いた接点数の推定式(5)¹⁰⁾では、これらの現象を考慮



図9 接点数推定結果¹⁶⁾



図 10 面圧推定結果¹⁶⁾



図 11 測定された接点温度⁷⁾⁸⁾

できていないため、焼付き摩耗形態発現時の実際の接点 数は解析で用いた接点数より少なかった可能性は考えら れる。②の接触面積が想定よりも小さく熱流束が想定よ りも大きいことについて、焼付き時の現象として、接触 面積の拡大が報告されている⁹⁾。よって、その反対の接 触面積の減少が生じることは考えづらい。③の熱変換率 が想定よりも大きいことについて、摩擦実験において焼 付き摩耗形態発現時にスティクスリップが発生していた と報告している⁷⁾。そのため、他の摩耗形態よりも振動 や音が激しく発生しており、もし熱変換率が想定と異 なっていても、今回の仮定とは反対の熱変換率が小さく なる状態であったと考えられる。また、ηが摩耗形態ご とに決定していると仮定すると、傾きが異なるだけで温 度上昇量とEが比例関係になると考えられるが、図8 のように、焼付き摩耗形態では温度上昇量とEが比例 関係になっていない。④の接触時間が想定よりも長いこ とについて、接触時間は式(6)で求めており、しゅう動 速度は実験時の設定値であることから、接触時間が長く なる条件は、接触半径が想定より大きくなる場合である。 接触半径が大きくなる条件では、発熱源である接触境界 層の面積が増加し、発熱密度が小さくなるため、今回と は反対に接点温度は低くなる。以上より、実験時の焼付 き摩耗形態におけるEが想定より大きくなる要因とし て、実験時の接点数が想定よりも少ないことが有力であ ると考える。

そこで,解析結果の接点の温度上昇量とEが比例関 係となることを用いて,実験時の接点数を逆算する。実 験結果が熱変換率 60% の解析結果と整合し,接点の温 度上昇量の実験結果と時間を考慮した摩擦熱が式(14) で表されると仮定する。式(13),式(14)から,接点数 n で解くと,実験時の接点数 n_Tは次式で求められる。

$$n_{\rm T} = 1206.7 \frac{\mu N v \sqrt{t}}{\Delta T_{\rm T}} \tag{19}$$

式(19)で求めた実験時の接点数を図9に示す。また, 式(19)で求めた接点数を用いて接点1点当たりの面圧 を算出したものを図10に示す。この図より,摩擦熱が 100W以内の条件における凝着摩耗形態と焼付き摩耗形 態の境界は面圧約900MPaであり,本実験で用いた銅 円盤の硬さ980MPaと同等であった。Goddardらの報 告¹⁵⁾では,焼付き摩耗形態の発現条件を,次式で示し ている。

$$\frac{N}{n_{\rm T}A_{\rm r1}} = H \tag{20}$$

ここで、A_{rl} は真実接触面積、Hは材料の硬さであり、 真実接触点の面圧が材料の硬さを超えた時に急激に塑性 流動し焼付きが発現することを意味する。ただし、図 10 において 100W 以上の条件では、摩擦熱が増加する につれて焼付きにおける面圧が減少する傾向を示した。 焼付き摩耗形態は、第1章で述べたように平均的には接 点温度は銅円盤の軟化点以下であり、銅円盤は平均的に は軟化しない条件で発現する摩耗形態である。しかし、 図 11^{7) 8)} に示すように焼付き摩耗形態発現時の平均 +3×標準偏差で計算している統計的最高接点温度は銅 円盤の軟化点を超えるものもあり、瞬間的に接点が軟化 しているものと考えられる。接触力やしゅう動速度が増 加し、摩擦熱が増加すると、平均的な接点温度が上昇す るため,統計的最大接点温度も上昇し,接点温度が軟化 点を超える確率は増加している。そのため,摩擦熱が増 加すると銅円盤側の接点が軟化する確率が増加し,硬さ に一致する面圧が減少したものと考えられる。

以上の実験結果に基づく解析結果より,凝着摩耗形態 と焼付き摩耗形態の境界条件は,真実接触点の面圧が銅 接点の硬さを超えるか否かであり,式(20)で示される 理論からも前報告で焼付きと考察した摩耗形態の妥当性 が示されたものと考える。

本研究により,焼付き摩耗形態の発現に寄与するパラ メータは面圧と材料の硬さであることを示した。これよ り,今後,面圧の増加しにくいパンタグラフ構造やすり 板形状の考案および材料の硬さの調整による摩耗形態制 御など,摩耗低減対策の策定に貢献可能と考えられる。 また,本研究により,理論的な熱伝導現象や摩耗形態の 遷移現象を再現できる接点温度上昇解析モデルを構築す ることができた。これより,今後は,ジュール熱による 温度解析との統合やバルク温度を考慮した解析を行うこ とで,実フィールドの集電材料の接点温度を計算し,摩 耗形態の推測および摩耗低減対策の検討をしていく予定 である。

4. まとめ

本論文では,前報告で未解明であった,凝着摩耗形態 と焼付き摩耗形態の遷移条件を明らかにするため,接点 数を考慮した接点温度解析モデルを構築し,解析結果と 実験結果を比較した。その結果を以下に示す。

- (1)トロリ線とすり板への熱分配を考慮しなくてよいモデルとして、接触面境界に銅円盤とすり板の混合物である接触境界層を作製したモデルを構築した。また、摩擦仕事の熱変換率としての係数を考慮した結果、これを60%としたときに、解析結果と実験結果との誤差が最も小さくなった。
- (2)接点の温度上昇量の解析結果と摩擦仕事に時間の平 方根を乗じたものの間に、比例関係があることを明 らかにした。
- (3)実験で測定した接点温度と解析による接点温度が整合するように接点数を改めて算出し、1点当たりの面圧を推定した。その結果、焼付き摩耗形態の発生メカニズムは、接点数が減少し、1点当たりの面圧が銅接点の硬さを超えることであることを示した。

(本稿は文献 16 をもとに内容を加筆・修正したもので ある。)

文 献

- 1)岩瀬勝:パンタグラフ集電と摩耗(Ⅲ),鉄道技術研究報告, Vol.217, 1961
- 河野彰夫,大藪英雄,曽田範宗:集電用材料の摩耗に及ぼ す離線アークの影響(第1報),潤滑, Vol.27, No.4, pp.283-287, 1982
- 河野彰夫, 大藪英雄, 曽田範宗:集電用材料の摩耗に及ぼ す離線アークの影響(第2報), 潤滑, Vol.27, No.7, pp.527-532, 1982
- 4) S.G. Jia, P. Liu, F.Z. Ren, B.H. Tian, M.S. Zheng, G.S. Zhou: Sliding wear behavior of copper alloy contact wire against copper-based strip for high-speed electrified railways, Wear, Vol.262, No.7-8, pp.772-777, 2007.
- 5)山下主税,足立幸志:集電材料の摩耗形態および遷移条件 に及ぼす通電電流の影響,トライボロジスト, Vol.58, No.7, pp.496-503, 2013
- 6)山下主税,足立幸志:集電材料の摩耗形態マップ,トライ ボロジスト, Vol.62, No.2, pp.129-136, 2017
- 7)根本公紀、山下主税:集電材料の摩耗形態遷移に及ぼす摩 擦熱の影響、トライボロジスト、Vol.67, No.7, pp.496-506, 2022
- 4)山下主税,根本公紀:摩擦熱に起因するトロリ線とすり板の機械的摩耗形態の分類,鉄道総研報告,Vol.35, No.12, pp.11-16, 2021
- 9) 笹田直:摩耗, 養賢堂, 2008
- S.C. Lim, M.F. Ashby: Wear Mechanism Maps, Acta Metallurgica, Vol.35, No.1, pp.1-24, 1987.
- 織田修,藤井保和:しゅう動速度がトロリ線の摩耗に及ぼ す影響についての若干の試験結果と考察,潤滑, Vol.29, No.1, pp.66-71, 1984
- 12) 岡林邦夫,川本信,梶本努:耐熱性アルミニウム合金の摩擦面温度について,軽金属, Vol.26, No.3, pp.116-123, 1976
- 13) 山本雄二:摩擦面の温度上昇, 潤滑, Vol.27, No.11, pp.789-793, 1982
- 14) 日本機械学会: 伝熱工学, 丸善出版, 2005
- J. Goddard, H. Wilman: A theory of friction and wear during the abrasion of metals, Wear, Vol.5, No.2, pp.114-135, 1962.
- 16) 根本公紀、山下主税:銅円盤と鉄系焼結合金すり板の接点 温度上昇解析による凝着摩耗形態と焼付き摩耗形態の遷移 メカニズムの解明、トライボロジスト、Vol.69、No.4、 pp.301-311, 2024

輸送障害時における列車混雑情報案内の有用性調査に基づく情報提供条件の設定法

辰井	大祐*	田中	峻一*
國松	武俊*	武内	陽子*

Information Provision Conditions Based on the Survey of the Usefulness of Guidance on the Train Congestion during Train Traffic Disruption

> Daisuke TATSUI Shunichi TANAKA Taketoshi KUNIMATSU Yoko TAKEUCHI

Passengers' interests in train congestion have been growing up. In our previous research, we confirmed that passengers tend to be interested in both highly congested trains and low congested trains during train traffic disruptions. Therefore, we conducted a Web-based survey to understand the usefulness of providing information on the predicted train congestion. As a result of the survey, we obtained conditions for providing information during train traffic disruptions. In this paper, we describe an overview of the Web questionnaire, the results of the analysis, and the method of setting conditions for providing information that passengers are highly interested in, during traffic disruptions.

キーワード:混雑情報、輸送障害時、情報提供条件、有用性調査、アンケート

1. はじめに

昨今,新型コロナウィルス感染症が感染法上の第5類 の感染症に移行したことに伴い,電車の混雑が徐々に新 型コロナ前に近い状況に戻ってきており,鉄道における 混雑情報への関心も高まっている。特に,輸送障害時に は,通常とは異なる混雑状況となるため,適切なタイミ ングでの列車混雑情報の案内に対するニーズは高いと考 えられる。

これまで,筆者らは,旅客の混雑情報への関心の高さ を定量的に把握するため,輸送障害時に旅客が経験,も しくは見た駅や列車の混雑状況を示すソーシャルメディ ア上の投稿を分析した。その結果,輸送障害時には乗車 率が高い列車だけでなく,乗車率が低い列車に関する投 稿数も多い傾向があることを確認した¹⁾。一方で,当該 列車と後続列車との乗車率の差や列車間隔といった具体 的な条件ごとの列車混雑情報の案内の有用性の把握まで には至らなかった。

そこで,乗車率が低い列車と高い列車に着目し,輸送 障害時に比較的乗車率が低い後続列車の混雑情報を提供 した場合などの有用性について,Webアンケートを用 いた調査を実施した²⁾。本稿では,Webアンケートの概 要と分析結果について述べ,これらを踏まえて,有用性 のある列車混雑情報案内の情報提供条件の設定法につい て述べる。

2. 研究背景と目的

鉄道事業者は、車両重量の変化(応荷重データ)や、 デプスカメラの計測データなどから算出推定した乗車率 等をもとに、混雑情報を旅客に提供している³⁾⁴⁾。

しかし,現状の混雑情報の提供は,旅客による自発的 な情報取得行動を前提としている。具体的には,旅客自 らがアプリなどを操作し,個別列車の混雑情報画面にア クセスする必要があり,それらの操作が困難な旅客も存 在する。一方で,発車標など全ての旅客が確認できる媒 体に,各列車の混雑情報を全て全て表示し,都度更新す るとなると,列車の種別や行先,停車駅,時刻などの他 情報も必要になり情報過多となるため,混雑情報が目立 たず旅客に伝わりにくい。

これらの課題の解決策として,筆者らは,情報提供の 仕方に着目して,行動変容につながる情報提供の方法の 開発を目指している。具体的には,1本見送ると空いた 列車が到着するなど,旅客に有用と考えられる場面のみ に限定して,駅構内における一時的なテロップや案内放 送など,より目立つ媒体や方法で,旅客に混雑情報を提 供する「効果的な列車混雑情報の提供手法」の検討を進 めている。この提供方法を実現するためには,前後の列 車間隔や乗車率の差など,旅客が混雑情報を有用と考え る具体的な場面を明らかにする必要がある。 文

論

^{*} 信号技術研究部 運転システム研究室

そこで、本研究では、Webアンケートを用いて旅客 にとって混雑情報の有用性が高いと感じる場面を調査し た。そして、分析結果に基づき、有用性のある列車混雑 情報案内の情報提供条件の設定法を提案する。

列車混雑情報の有用性評価のための Web ア ンケート

3.1 概要

輸送障害時における列車の混雑情報が,旅客にどの程 度有用であるかを調査するため,対象路線を日常的に利 用し,かつ,輸送障害時の鉄道利用経験がある851人 を対象にWebアンケートを実施した。文献1で示した 「乗車率が高い列車だけではなく,乗車率が低い列車へ の関心も高い可能性がある」との分析結果を踏まえ,乗 車率が高い列車と低い列車に着目した設問に加えて,乗 車率に差がある状況を含む下記の混雑情報提供場面を想 定した質問を設定した。

- ・高い乗車率が当面継続する場面
- ・乗車率の低い列車がしばらく後に到着する場面
- ・先発列車より後続列車の乗車率が高い場面
- ・一定時間後に乗車率の低い列車が到着する場面

それぞれの場面について, 混雑状況の継続時間, 先発 列車や後続列車の乗車率, 後続列車が発車するまでの時 間などを変化させ, 混雑情報を提示した。乗車率は 25%から225%まで, 25%刻みの9段階として, 混雑 状況の説明文(表1)と図(図1)を併記して質問を行っ た。本研究では, 9段階の混雑区分のうち, 高い混雑区 分3つ(175, 200, 225%)を高い混雑状況, 低い混雑 区分3つ(25, 50, 75%)を低い混雑状況とし, 調査 分析を行った。

また,被験者に対しては,普段の利用状況において, 輸送障害が発生した場合に,駅で正確な列車混雑情報が 提供されることを想定してもらい,列車混雑情報がどの 程度有用と感じるかを,「1:有用でない/2:どちらか と言えば有用ではない/3:どちらともいえない/4: どちらかといえば有用である/5:有用である」の5段 階での回答を依頼した。各段階に対応する1~5の数字 を,本稿では「有用度」と呼ぶ。

なお、調査したい混雑状況の組合せが多数あるため、 回答者1人当たりの設問数を減らして回答率を高める ことを目的として、各混雑情報提供場面については、 851人の回答者を101~112人の8グループに分け、グ ループごとに異なる混雑状況の組合せを提示して回答を 依頼した。また、各回答者に対して往路と復路の両方に ついて回答を依頼することで、1設問あたり202~224 件の回答データを取得した。

表1 乗車率に対応した混雑状況の説明文²⁾

乗車率	説明文
25%	全員が座れる程度
50%	立っている人が数人いる
75%	つり革は埋まっていない
100%	ドアの前に6~7人が立っている
125%	車両の中ほどにはまだ余裕がある
150%	肩は触れ合わない程度
175%	肩が触れ合う
200%	長時間のスマホ操作がしづらい
225%	身動きが取れない





3.2 混雜情報提供場面

3.2.1 高い混雑状況が当面継続する場面

高い混雑状況に着目し、何分後まで高い混雑状況が継続する、という情報の有用度を調査した。具体的には、 図2のように、予測される高い混雑状況を提示したうえ で、継続時間を5分、10分、15分、20分、30分に変 化させて有用度の評価を依頼した。

3.2.2 低い混雑状況の列車がしばらく後に到着する 場面

低い混雑状況に着目し、何分待てば乗車率の低い列車 が到着する、という情報の有用度を調査した。具体的に は、図3のように、予測される低い混雑状況を提示した うえで、時間を5分、10分、15分、20分、30分に変 化させて有用度の評価を依頼した。

3.2.3 先発列車より後続列車の乗車率が高い場面

先発列車より後続列車の乗車率が高い場面に着目し, 先発列車の乗車率と後続列車の乗車率を提示し,先発列 車の利用を促すような情報の有用度を調査した。具体的 には,図4のように,先発列車と後続列車の乗車率を提 示し,先発列車の乗車率を25%~200%,後続列車の乗 車率を,先発列車より乗車率が高い50%~225%に変化 させて有用度の評価を依頼した。

3.2.4 一定時間後に先発列車より乗車率の低い列車 が到着する場面

乗車率が低い列車と高い列車の両方に着目し,乗車率 の高い先発列車と,一定時間経過後の乗車率の低い後続 列車を提示し,後続列車の利用を促すような情報の有用 度を調査した。具体的には,図5のように,後続列車ま での時間を3分,5分,10分,15分,20分,30分に 変化させると同時に,先発列車の乗車率50%~225%, 後続列車の乗車率を,先発列車の乗車率より低い25% ~200% に変化させて有用度の評価を依頼した。

4. 平均値に着目した有用度分析

駅のデジタルサイネージなど,不特定多数の旅客が確 認できる情報提供媒体を想定した場合,旅客が感じる平 均的な有用度を把握することが重要と考えられる。そこ で,アンケート結果をもとに,回答者が5段階で評価し た有用度の平均値をもとに分析した。また,本分析では, 有用度の平均値が4以上であれば有用度が非常に高い,2 つの状況同士の有用度の平均値の差が1以上であれば 有用度に差があるとして分析を行う。以降の表では,有 用度の平均値が3.60以上の場合にセルをピンク色で表 示する。

また,混雑情報が有用と感じる選択肢である「どちら かと言えば有用である/有用である」と回答した人の割 合に関しても,分析を実施した。その結果,有用度の平 均値をもとにした分析と同様の傾向となることを確認で きたため,本稿では有用度の平均値の分析結果について 考察する。

4.1 高い混雑状況と低い混雑状況の有用度の比較

3.2.1 項の設問に対して,回答者が5段階で評価した 有用度の平均値を表2に示す。有用度の平均値は2.93 ~3.69の範囲であり,乗車率が高いほど有用度が高く なる傾向や,継続時間が長いほど有用度が低くなる傾向 が確認できる。また,継続時間に対する有用度の平均値 の変動幅は,乗車率175%で0.73(継続時間5分の時 の平均値3.66,30分の時の平均値2.93の差),乗車率 200% で0.68(継続時間5分の時の平均値3.69,30分



図2 高い混雑状況に関する案内の例²⁾



図3 低い混雑状況に関する案内の例²⁾



図 4 先発列車より後続列車の乗車率が高い場面に関す る案内の例²⁾



図 5 一定時間後に乗車率の低い列車が到着する場面に 関する案内の例²⁾

表2 高い混雑状況に関する情報提供の有用度²⁾

有用度の		継続時間					
平均值		5分	10分	15分	20分	30分	
乗	175%	3.66	3.55	3.33	3.11	2.93	
車	200%	3.69	3.63	3.46	3.25	3.01	
率	225%	3.68	3.63	3.55	3.36	3.24	

表3 低い混雑状況に関する情報提供の有用度²⁾

有用度の		継続時間				
平均值		5分	10分	15分	20分	30分
乗	25%	3.99	3.78	3.33	2.91	2.58
車	50%	3.80	3.62	3.22	2.83	2.61
率	75%	3.74	3.56	3.05	2.68	2.40

の時の平均値 3.01 の差), 乗車率 225% で 0.44 (継続時 間 5 分の時の平均値 3.68, 30 分の時の平均値 3.24 の 差)であり, 乗車率が高いほど,継続時間に対する有用 度の平均値の変動幅が小さいことを確認した。さらに, 乗車率 200% 以上かつ継続時間が 10 分以下の条件, ま たは乗車率が 175% かつ継続時間が 5 分の場合に有用度 が 3.60 以上の高い値になるという結果が得られた。

3.2.2 項の設問に対して,回答者が5段階で評価した 有用度の平均値を表3に示す。有用度の平均値は2.40 ~3.99 の範囲であった。表3から,継続時間が長いほ ど有用度が低くなる傾向が確認できる。乗車率が25% と50% の場合は継続時間が10分以下は有用度が高く, 乗車率が75% の場合は,継続時間が5分以下が有用度 が高い結果が得られた。低い混雑状況においては,乗車 率が高くなるにつれ,高い有用度を示す継続時間は短く なる傾向を確認した。また,継続時間に依存して有用度 の平均値が大きく変化することを確認した。継続時間に

対する有用度の平均値の変動幅は,乗車率25%で1.41 (継続時間5分の時の平均値3.99,30分の時の平均値 2.58の差),乗車率50%で1.19(継続時間5分の時の 平均値3.80,30分の時の平均値2.61の差),乗車率 75%で1.34(継続時間5分の時の平均値3.74,30分の 時の平均値2.40の差)である。いずれの乗車率につい ても,有用度の変化が1以上であり,継続時間が5分 と継続時間が30分の状況では有用度に差があることを 確認することができる。さらに,継続時間が15分以上 になると,有用度が低い傾向を確認した。

これらのことから, 混雑情報の有用度は, 乗車率だけ でなく, その乗車率がどの程度の時間, 継続するかによ り, 変化することがわかる。

4.2 先発列車より後続列車が混んでいる場面

3.2.3 項の設問に対して、回答者が5段階で評価した

表4 乗車率が低い先発列車と乗車率が高い後続列 車に関する情報提供の有用度²⁾

有用	度の	後続列車の乗車率									
平均	匀值	50%	75%	100%	125%	150%	175%	200%	225%		
先	25%	3.88	3.90	3.89	3.83	3.87	4.14	4.12	4.07		
発	50%		3.54	3.58	3.72	3.91	3.87	3.96	3.65		
列	75%			3.61	3.68	3.75	3.78	3.84	3.80		
車	100%				3.76	3.79	3.84	3.87	3.85		
の	125%					3.55	3.44	3.51	3.50		
乗	150%						3.45	3.54	3.61		
車	175%							3.60	3.60		
率	200%								3.58		

表5 乗車率が高い先発列車と、3分後の乗車率が 低い後続列車に関する情報提供の有用度²⁾

有	用度の	3分後の空いている後続列車の乗車率							
푸	均值	25%	50%	75%	100%	125%	150%	175%	200%
先	50%	3.79							
発	75%	3.77	3.71						
列	100%	3.96	3.69	3.48					
車	125%	3.86	3.79	3.70	3.69				
の	150%	4.03	4.01	3.86	3.86	3.71			
乗	175%	4.18	4.14	4.01	4.01	3.95	3.58		
車	200%	4.13	4.06	3.95	3.91	3.89	3.46	3.34	
率	225%	4.06	4.04	3.94	3.93	4.04	3.71	3.56	3.48

表6 乗車率が高い先発列車と,5分後の乗車率が 低い後続列車に関する情報提供の有用度²⁾

有月	用度の	5分後の空いている後続列車の乗車率						ži.	
平均值		25%	50%	75%	100%	125%	150%	175%	200%
先	50%	3.48							
発	75%	3.63	3.52						
列	100%	3.69	3.30	3.13					
車	125%	3.81	3.53	3.55	3.38				
の	150%	3.91	3.87	3.70	3.61	3.35			
乗	175%	4.05	3.90	3.73	3.70	3.51	3.20		
車	200%	4.18	4.02	3.91	3.91	3.83	3.40	3.30	
率	225%	4.04	4.04	3.93	3.94	3.95	3.62	3.42	3.35

有用度の平均値を表4に示す。有用度の平均値は3.44 ~4.14の範囲であり、表2や表3と比較して高い傾向 がある。特に、先発列車の乗車率が25%であり、後発 列車が175%の高い乗車率になる場合、4以上の非常に 高い有用度となることが分かった。

また,先発列車の乗車率が100%以下の場合には,先 発列車の乗車率が50%かつ後続列車の乗車率が100% 以下の場合を除いて,有用度が3.60以上である。一方, 先発列車の乗車率が125%以上の場合には,先発列車が 150%かつ後続列車が225%の場合を除いて,有用度は 3.60以下である。

以上から,先発列車の乗車率が100%以下の場合には, 有用度が3.60以上であることが多く,後続列車が比較 的混雑している旨の情報提供は有用であると考えられる。

4.3 一定時間後に乗車率の低い列車が到着する場面

3.2.4 項の設問に対して,回答者が5段階で評価した 有用度の平均値を算出した。先発列車と後続列車の列車 間隔が3分の結果を表5に,5分の結果を表6に,10

表7	乗車率が高い先発列車と,	10 分後の乗車率が
	低い後続列車に関する情報	最提供の有用度 ²⁾

有月	用度の		10分後の空いている後続列車の乗車率								
푸	☑均值	25%	50%	75%	100%	125%	150%	175%	200%		
先	50%	3.34									
発	75%	3.43	3.29								
列	100%	3.40	3.20	3.05							
車	125%	3.51	3.33	3.28	3.30						
の	150%	3.75	3.71	3.60	3.51	3.46					
乗	175%	3.83	3.69	3.61	3.59	3.50	3.22				
車	200%	3.89	3.77	3.67	3.66	3.60	3.08	3.04			
率	225%	3.89	3.80	3.77	3.76	3.55	3.22	3.12	3.01		

表8 乗車率が高い先発列車と、15分後の乗車率が 低い後続列車に関する情報提供の有用度

有月	用度の) 15分後の空いている後続列車の乗車率							
푸	☑均值	25%	50%	75%	100%	125%	150%	175%	200%
先	50%	2.98							
発	75%	3.07	2.92						
列	100%	2.94	2.79	2.70					
車	125%	3.08	2.90	2.94	2.99				
の	150%	3.52	3.42	3.31	3.22	3.19			
乗	175%	3.48	3.40	3.30	3.22	3.20	2.81		
車	200%	3.54	3.45	3.37	3.35	3.31	2.84	2.75	
率	225%	3.67	3.63	3.55	3.64	3.08	2.89	2.75	2.65

表9 乗車率が高い先発列車と,20分後の乗車率が 低い後続列車に関する情報提供の有用度²⁾

有	用度の	20分後の空いている後続列車の乗車率							
푸	⊻均値	25%	50%	75%	100%	125%	150%	175%	200%
先	50%	2.66							
発	75%	2.69	2.60						
列	100%	2.55	2.49	2.39					
車	125%	2.76	2.65	2.70	2.68				
の	150%	3.15	3.13	3.04	3.03	2.98			
乗	175%	3.16	3.09	3.03	3.00	2.97	2.50		
車	200%	3.20	3.11	3.05	3.02	3.01	2.56	2.51	
率	225%	3.36	3.39	3.35	3.35	2.69	2.54	2.47	2.40

表 10 乗車率が高い先発列車と、30分後の乗車率 が低い後続列車に関する情報提供の有用度

1	有用度の	30分後の空いている後続列車の乗車率							
	平均値	25%	50%	75%	100%	125%	150%	175%	200%
労	50%	2.42							
勇	\$ 75%	2.53	2.49						
歹	100%	2.27	2.24	2.19					
車	ī 125%	2.57	2.50	2.52	2.59				
σ.	150%	2.92	2.88	2.84	2.80	2.83			
秉	175%	2.91	2.82	2.79	2.77	2.77	2.25		
車	200%	2.91	2.83	2.78	2.77	2.77	2.43	2.41	
率	225%	3.21	3.22	3.19	3.21	2.37	2.31	2.26	2.27

分の結果を表7に、15分の結果を表8に、20分の結果 を表9に、30分の結果を表10にそれぞれ示す。

まず,列車間隔が情報の有用度に対して与える影響を 分析するため,列車間隔に着目し,全回答の有用度の平 均を比較する。列車間隔が3分,5分,10分,15分, 20分,30分の場合について,それぞれの全回答の有用 度の平均値は3.84,3.81,3.49,3.17,2.87,2.67であっ た。列車間隔が5分以下は有用度が高いが,列車間隔が 10分以上になると,有用度が3.60を下回り有用度が低



図6 先発列車と後続列車の乗車率の差と有用度の平均 値との関係

くなることがわかる。また,有用度の平均は列車の間隔 が増えるにつれ単調に減少しており,先発列車と後続列 車との列車間隔が長くなるにつれて,有用度が低くなる 傾向が確認できる。

次に,表7~表9をもとに,乗車率に注目して有用度 を分析する。表7では,先発列車の乗車率が150%以上 後続列車の乗車率が75%以下であれば,有用度が高い ことが確認できる。表8,表9は一部のケースを除き, 有用度が高いケースがないことが確認できる。

これらの結果から、今回の調査結果では、継続時間が 5 分以内である状況、または継続時間が10分で先発列 車の乗車率が150%以上後続列車の乗車率が75%以下 であれば有用度が高い傾向を確認することができる。

さらに,先発列車と後続列車の乗車率の差に着目した 分析結果を図6に示す。全体的に,乗車率の差が大きい ほど,有用度が高くなる傾向であることがわかる。また, 線形近似を実施した結果,列車間隔が3分を除けば,近 似式の傾きが0.45~0.51の範囲となり,乗車率の差が 変化する量に対して有用度の平均値が変化する量は似て いる傾向があることを確認することができる。

これらのことから, 先発列車と後続列車それぞれの乗 車率と列車間隔が, 混雑情報の有用度に影響することが わかる。

4.4 混雑情報の有用度に関する分析結果のまとめ 本分析により、今回の対象路線における調査では、下 記のような傾向があることを確認した。

- ・高混雑状況においては,乗車率 200% 以上かつ継続 時間が 10 分以下,または乗車率が 175% かつ継続 時間が 5 分の場合に有用度が高い
- ・低混雑状況においては,乗車率が25%と50%の場 合は継続時間が10分以下は有用度が高く,乗車率 が75%の場合は,継続時間が5分以下の場合,有 用度が高い
- ・先発列車より後続列車が混んでいる場合,先発列車 の乗車率が100%以下の場合に有用度が高い
- ・一定時間後に乗車率の低い列車が到着する場合,継
 続時間が5分以内である状況,または継続時間が10
 分で先発列車の乗車率が150%以上後続列車の乗車
 率が75%以下であれば有用度が高い傾向がある

5. 有用度分析結果に基づく混雑情報提供条件 の設定法と例

Web アンケートを用いて有用度を調査し, 閾値を設 定することで,一般に, 混雑情報の有用度が比較的高い 場面に限定して混雑情報を提供することが可能となる。

今回実施した調査結果をもとにすると、一例として、 調査対象路線について、「有用度の平均値が3.6以上」 という閾値を設定し、合致した場合にのみ、混雑情報を 提供する事例を示す。なお、有用度の閾値は、列車本数 や旅客数などの路線固有の状況を考慮して設定する必要 がある。また、予測乗車率は25%刻みのうちで最も近 い値に変換し、先発列車と後発列車の乗車率とみなすこ ととした。たとえば、アンケートの乗車率 50%に相当 するのは、予測乗車率が37.5%~62.5%の列車とした。 先発列車と後続列車の列車間隔に関しては、0~3分以 下をアンケートの3分後に、3分より大きく5分以下を 5分後に、5分より大きく10分以下を10分後に対応付 けることとした。

表 5~8 に示した結果から求めた混雑情報の提供条件 の設定例をそれぞれ表 11~14 に示す。列車間隔が 20 分以上となる場合(表 9 および表 10)においては、混 雑情報提供条件に合致する場面は存在しなかった。なお、 m(分)は先発列車と後続列車の列車間隔、Cp(%)は 先発列車の乗車率、Cs(%)は後続列車の乗車率である。

表11~14に示した[1]~[14]の条件のいずれか に合致する混雑状況があった場合には、「あとm分程度 で比較的空いている列車が到着する見込みです。」とい う混雑情報を提供することで、旅客にとって有用と感じ る可能性を高められると考えられる。 表 11 乗車率が高い先発列車と、3分後の乗車 率が低い後続列車に関する情報提供の 有用度により求めた混雑情報提供条件²⁾

条件 No.	m と Cp と Cs に関する情報提供条件
[1]	0 <m≦3, 37.5≦cp<62.5,="" cs<37.5<="" td=""></m≦3,>
[2]	0 <m≦3, 62.5≦cp<112.5,="" cs<62.5<="" td=""></m≦3,>
[3]	0 <m≦3, 112.5≦cp<137.5,="" cs<112.5<="" td=""></m≦3,>
[4]	0 <m≦3, 137.5≦cp<212.5,="" cs<137.5<="" td=""></m≦3,>
[5]	0 <m≦3, 212.5≦cp,="" cs<162.5<="" td=""></m≦3,>

表 12 乗車率が高い先発列車と,5分後の乗車 率が低い後続列車に関する情報提供の 有用度により求めた混雑情報提供条件²⁾

条件 No.	mとCpとCsに関する情報提供条件
[6]	$3 \le m \le 5$, $62.5 \le Cp \le 137.5$, $Cs \le 37.5$
[7]	3 <m≦5, 137.5≦cp<187.5,="" cs<112.5<="" th=""></m≦5,>
[8]	3 <m≦5, 187.5≦cp<212.5,="" cs<137.5<="" th=""></m≦5,>
[9]	3 <m≦5, 212.5≦cp,="" cs<162.5<="" th=""></m≦5,>

表 13 乗車率が高い先発列車と,10分後の乗 車率が低い後続列車に関する情報提供の 有用度により求めた混雑情報提供条件²⁾

条件 No.	mとCpとCsに関する情報提供条件
[10]	5 <m≦10, 137.5≦cp<187.5,="" cs<87.5<="" th=""></m≦10,>
[11]	5 <m≦10, 187.5≦cp<212.5,="" cs<137.5<="" th=""></m≦10,>
[12]	5 <m≦10, 212.5≦cp<237.5,="" cs<112.5<="" th=""></m≦10,>

表 14 乗車率が高い先発列車と,15分後の乗 車率が低い後続列車に関する情報提供の 有用度により求めた混雑情報提供条件

条件 No.	m と Cp と Cs に関する情報提供条件
[13]	$10 < m \le 15$, $212.5 \le Cp < 237.5$, $Cs < 62.5$
[14]	$10 \le m \le 15$, $212.5 \le Cp \le 237.5$, $87.5 \le Cs \le 112.5$

6. おわりに

輸送障害時の混雑情報提供の有用性を,Webアンケートを用いて調査した。有用性は,乗車率だけでなく,その乗車率が継続する時間や,先発列車と後続列車との列 車間隔の影響も受けることを確認した。また,調査結果の活用例として,列車混雑情報の情報提供条件の設定法 を提案し,設定例を示した。

なお、本稿で用いた乗車率や発遅延の予測は正確で, 誤差は生じない前提としている。しかし実際には、乗車 率や発遅延の予測には誤差が生じるため、予測手法自体 の精度向上も必要である。現在、この予測手法構築に向 けた研究開発にも取り組んでいる。

文 献

- 1) 辰井大祐,國松武俊,武内陽子,横山元紀,田中峻一,青 柳宗之,小西勇介,坂入整:ソーシャルメディア上の混雑 投稿と列車乗車率データとの関係性に関する基礎検討,第 83 回情報処理学会全国大会講演論文集,2023
- 2) 辰井大祐,田中峻一,國松武俊,武内陽子:輸送障害時に おける列車混雑予測案内の有用性に関する調査と分析,情 報処理技術フォーラム講演論文集,2023
- 国土交通省 鉄道局都市鉄道政策課鉄道混雑予測や混雑の 見える化における現状の整理,第1回 鉄道の混雑緩和に 資する情報提供のあり方に関する勉強会:https://www. mlit.go.jp/tetudo/content/001375655.pdf(参照日:2024年 2月1日)
- 4)東京地下鉄株式会社 リアルタイムに実測・予測した号車
 毎の混雑状況を東京メトロ my!アプリで配信します!:
 https://www.tokyometro.jp/news/2021/210901.html(参照日:2024年2月1日)

鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物・令和5年) に基づく桁の試設計 _{鈴木 瞭* 中村 麻美}* 徳永 宗正** 渡辺 健*

Trial Design of the Girder Applying the Revised Standard for Railway Concrete Structures

Ryo SUZUKI Mami NAKAMURA Munemasa TOKUNAGA Ken WATANABE

Based on previous research, the formulas and values in the Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures) have been revised. In this report, we compare RC/PC/PRC girders designed according to the revised standard (published in 2023) with those designed according to the current standard (published in 2004). Consequently, this comparison shows the influence of the updating formulas for the shear strength of RC/PC/PRC members and the revision of the design value for concrete shrinkage and creep, durability, etc. on the design aspects.

キーワード:鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物),桁,試計算,比較

1. はじめに

「鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物)」の通 達(令和4年12月)に伴い,「鉄道構造物等設計標準・ 同解説(コンクリート構造物)」¹⁾(以下,改訂標準)を, 2023(令和5)年1月に発刊した^{2)~5)}。

本稿では、桁の設計に関わる応答値や限界値を, 2004(平成16)年に発刊された設計標準⁶⁾(以下,従前 標準)と改訂標準のそれぞれに基づいて算定し、比較を 行った。なお、桁の設計に関わる改訂内容を図1に示す。

2. 検討概要

表1に、本検討で対象とする桁の諸元を示す。鉄筋コ ンクリート桁 (RC桁),プレストレストコンクリート 桁 (PC桁, PRC桁)は、いずれも複線の在来線もしく は新幹線を支持し、RC桁、PC桁は4主桁、PRC桁は 6主桁である。ここでは、主桁に対する試計算結果を示す。

3. 試計算結果の比較

3.1 鋼材の腐食に関する検討

耐久性に関する検討において,塩化物イオンが供給さ れない場合のかぶりは,従前標準では中性化に関する検 討に従って定めていた。しかし,鋼材の腐食は水と酸素 の供給が支配的な腐食因子であり,水掛かりの影響を考 慮することが重要であることから,改訂標準では,水の 浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討に従って定める⁴⁾。 表2に, 主桁の側面と下面のかぶりの比較を示す。主 桁の側面や下面の水掛かりの程度に応じた区分は常時乾 燥であり,施工誤差は一般に10mmである。水結合材 比 W/B が大きくなると,改訂標準のかぶりは従前標準 よりも小さくなる。

図2の左軸に、耐久性に関する検討における設計曲げ ひび割れ幅 w_d と鋼材の腐食に関するコンクリートのひ び割れ幅の制限値 w_{lim} を、右軸にかぶりを示す。いずれ の桁も $W/B \ge 50\%$ であり、従前標準よりもかぶりが減 少することにより、 w_d および w_{lim} がともに減少する。 w_d / w_{lim} は従前標準よりも多少増加する場合もあるが、 対象とした主桁に対しては、 $w_d / w_{lim} > 1.0$ となることは 無かった。



図1 桁の設計に関わる改訂内容

表1 対象とする単純T形桁の諸元

構造形式	列車種別	線路本数	スパン (m)	主桁数	桁高 (mm)	施工基面幅
			(III)		(11111)	(11111)
DC K	新幹線	複線	18.9	4	2000	10800
KC 111	在来線	複線	19.1	4	1800	9040
PC 桁	在来線	複線	21.0	4	1960	9040
DDC 1/2	新幹線	複線	43.8	6	3100	10800
PRC 1	在来線	複線	35.2	6	2000	10600

^{*} 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

^{**} 鉄道力学研究部 構造力学研究室



表3 収縮ひずみ・クリープ係数の比較

	従前標準			改訂標準		
イベント	プレ導入	桁架設		プレ導入	桁架設	
材齢	4~7 日	28 日	3ヶ月	4~7 日	28 日	3ヶ月
収縮ひずみ(×10%)	200	180	160	360	330	270
クリープ係数	2.7	1.5	1.3	3.1	2.2	1.8

3.2 プレストレス力と応力度の制限

収縮ひずみおよびクリープの設計用値は、無筋コンク リートの断面平均値として、表3に示すように見直され た⁷⁾。いずれの材齢においても収縮ひずみ、クリープ係 数は従前標準と比較して増加する。なお、ここでは、 PC 桁(在来線)、PRC 桁(新幹線)、PRC 桁(在来線) の外桁に対する試計算結果を示すこととし、プレストレ ス導入が材齢4~7日、桁架設が材齢28日または3ヶ月 である。

表4に,有効係数の試計算結果を示す。ここで,有効 係数は,(有効プレストレス力/プレストレス直後のプ レストレス力)であり,プレストレス直後のプレストレ ス力は一定である。表4より,すべての桁で改訂標準に よる有効係数は従前標準による値よりも小さくなる。

図3に、スパン中央におけるコンクリートの縁引張応 力度 σ_{et}の試計算結果を示す。改訂標準および従前標準 のいずれも、永久作用によるコンクリートの縁応力度に ついて、PC 構造では引張にならないように、PRC 構造 では有害なひび割れが生じないように制限している。 PC 桁の縁引張応力度について、桁上縁の圧縮応力が桁 下縁よりも小さいため、桁上縁における縁応力度を示し

表4 有効係数の試計算結果





PC桁(在来線) PRC桁(新幹線) PRC桁(在来線)

図3 コンクリートの縁応力度に関する試計算結果



図4 斜め引張応力度に関する試計算結果

ているが,有効プレストレス力が小さくなることにより 圧縮応力は大きくなるものの,従前標準に対する変化量 は小さい。PRC 桁ではいずれの桁も圧縮応力が小さく なるが,本検討ではいずれも圧縮応力が残存している。

図4に、支点側におけるコンクリートの斜め引張応力 度 σ_{I} の試計算結果を示す。改訂標準および従前標準の いずれも、PC構造では、永久作用および変動作用に対 して σ_{I} を設計引張強度の70%に制限し、PRC構造では、 永久作用に対して σ_{I} を設計引張強度以下に制限してい る。なお、新幹線 PRC構造では、永久作用および変動 作用に対して、 σ_{I} を設計引張強度以下に制限して設計さ れている。いずれの桁においても、従前標準より有効係 数が小さくなったことにより、プレストレス力のせん断 力に平行な成分 V_{psd} が減少したため、従前標準と比較し て斜め引張応力度はわずかに大きくなったが、本検討で はいずれも制限値以内である。

図5に、スパン中央における安全性(破壊)と保守 (損傷)の曲げモーメントに関する試計算結果を示す。 ?i は構造物係数、M_dは設計曲げモーメント、M_{ud}は設計 曲げ耐力(破壊)、M_{yd}は設計曲げ降伏耐力(損傷)で ある。いずれの桁においても、有効プレストレス力の減 少に対し、照査値の変化はほぼ無い。





図 5



図6 せん断耐力に関する試計算結果



図7 せん断ひび割れの試計算結果

3.3 設計せん断耐力

棒部材の設計せん断耐力式において,表5に示すよう に見直された⁴⁾。特にPC, PRC 構造の場合にはプレス トレスの影響の考慮方法が見直されている。

図6に, PC桁(在来線), PRC桁(在来線), PRC桁 (新幹線)の外桁の支点側におけるせん断補強鋼材を用 いない棒部材の設計せん断耐力 V_{cd}とせん断補強鋼材に より受け持たれる棒部材の設計せん断耐力 Vsd の試計算 結果を示す。収縮・クリープの見直しのみを考慮した場 合は,有効プレストレス力の減少に対し,従前標準と改 訂標準で設計せん断耐力に変化はほぼ無い。プレストレ スの影響については、V_{cd}は軸方向力の影響を表す係数 β_n の見直しによりやや増加し、 V_{sd} は $\cot\theta$ (θ : 圧縮スト

表5 せん断耐力の算定

	項目	従前標準	改訂標準		
V _{sd} の上限	$p_{\rm w}$	規定なし	$p_{ m w} \cdot f_{ m wyd} / f_{ m cd} \leq 0.1$ とするのがよい		
プレストレス	V _{cd}	$\beta_n = 1 + 2M_0 / M_u (N_d \ge 0)$	$\beta_{n} = \sqrt{1 + \sigma'_{cg}/f_{vtd}}$ $f_{vtd} = 0.23f'_{cd}^{2/3}$		
の影響	V _{sd}	θ =45°	$\cot \theta = \beta_{\rm h} (36 \le \theta \le 45)$		
Vcd: せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力					
V _{sd} : せん断補強	鋼材により	受け持たれる棒部材の設調	計せん断耐力		

pw: せん断補強鋼材比

β_n:軸方向力の影響を表す係数

Mo:設計曲げモーメント Md に対する引張縁において、軸方向力によって発

生する応力を打ち消すのに必要なモーメント

M_u:軸方向力を考慮しない純曲げ耐力

♂cg: 断面高さの 1/2 の高さにおける平均プレストレス

fwyd: せん断補強鋼材の設計引張降伏強度

fed:コンクリートの設計圧縮強度

θ: 圧縮ストラット角度

表6 コ	ンクリー	ト桁の曲げ剛性の設定方法
------	------	--------------

算定法	RC 桁	PC 桁	PRC 桁
全断面有効剛性	0	0	\bigtriangleup
再載荷時有効剛性	0	0	0
○:適用可能 △:	応答急増領域外の	易合のみ適用可能	

ラット角度)の見直しにより大きく増加する。なお、せ ん断力に関する照査値は小さくなるものの、せん断補強 鉄筋量は、一般に耐久性に関する検討におけるせん断補 強鉄筋の応力度の制限で決定されているケースが多い。

3.4 せん断ひび割れの検討

耐久性におけるせん断ひび割れの検討では,これまで 永久作用による鉄筋応力度の制限値 σ₃₀ が定められてい たが、改訂により、永久作用による引張鉄筋の応力度の 制限値 o_{sl}として,曲げひび割れの検討と同一の制限値 に見直された。

図7に, PRC桁(新幹線), PRC桁(在来線)の外桁 の支点側について、せん断ひび割れの試計算結果として、 せん断補強鉄筋の応力度 σ_{wod} と、その制限値 σ_{sl} を示す。 いずれの桁においても、せん断補強鉄筋の応力度は従前 標準に比べて大きくなっているが、これはプレストレス 力のせん断力に平行な成分 V_{psd} が小さくなったためであ る。一方で、制限値は、常時乾燥(従前標準では一般の 環境)の条件では、 $\sigma_{s12} = 120 \text{N/mm}^2 \text{ から } \sigma_{s1} = 140 \text{N/mm}^2$ に増加した。この結果,応答値と制限値の比は,従前断 面と比べて小さくなったため、せん断補強鉄筋を削減で きる可能性がある。

3.5 コンクリート桁の曲げ剛性および変位・変形量

コンクリート桁の曲げ剛性について, 改訂標準では非 構造部材による剛性寄与と、ひび割れによる剛性低下を 考慮した再載荷時有効剛性の算定法が示された。表6に 適用可能な算定法を桁の種類ごとに示す。RC 桁では, 曲げひび割れによる剛性低下の割合は、実構造物で想定 される荷重レベルでは小さく,非構造部材の剛性寄与分 と相殺されるため、全断面有効剛性を設定できるとして



図8 衝撃係数および短期の変位・変形量の試計算結果

いる。PRC 桁については,曲げひび割れによる剛性低下を想定し,応答急増領域の判定を行い,全断面有効剛 性の適用可能性を判断する。応答急増領域内と判定され, 共振による顕著な動的応答増幅が懸念される場合には, 再載荷時有効剛性を用いる⁸。

図8に、衝撃係数および短期の変位・変形量の試計算 結果を示す。ここでは、表1に示した桁とは異なり、ス パン10mのRC桁(桁高0.67m)、30mのPRC桁(桁高 2.0m)、50mのPC桁(桁高3.33m)を対象とし、いず れも新幹線の複線桁で、列車荷重はH荷重、設計速度は 320km/hである。RC桁、PC桁の衝撃係数は、従前標準 による値と同一であり、変位・変形量は、非構造部材を 考慮し、再載荷時有効剛性を用いて算定することで、従 前よりも小さい値となる。一方で、本検討で対象とした 桁のように応答急増領域内にあると判定されたPRC桁 は、衝撃荷重、変位・変形量ともに従前標準よりも大き い値となる。

4. まとめ

- (1)水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討について、水掛かりの程度に応じた区分の導入により、常時乾燥となる主桁の側面や下面では、かぶりが従前標準による試算結果と比べて小さくなる。このことにより、設計曲げひび割れ幅、制限値ともに小さくなる。
- (2)縁引張応力度について、収縮・クリープの見直しにより、PC桁では従前標準による試算結果から大きな変化はない。PRC桁では従前標準による 試算結果よりも縁引張応力度が大きくなるものの、今回のように圧縮応力が残存する場合もある。
- (3) 斜め引張応力度,曲げモーメントに関する照査値

について、収縮・クリープの見直しによる、PC 桁, PRC 桁ともに、従前標準による試算結果から大 きな変化はない。

- (4) せん断耐力について、プレストレスの影響の考慮 方法の見直しにより、PC 桁、PRC 桁のせん断耐 力は従前標準による試算結果に比べて大きくなる。
- (5) せん断ひび割れの検討について、プレストレスの 影響の見直しにより、せん断補強鉄筋応力度は従 前標準に比べて大きくなるが、制限値の見直しに より、応答値と制限値の比は従前標準による試算 結果に比べて小さくなる。
- (6) コンクリート桁の曲げ剛性について、再載荷時有効剛性を用いて計算すると、RC桁、PC桁では全断面有効剛性による計算結果に比べて変位・変形量が小さくなるが、今回のように応答急増領域内にあると判定された PRC 桁では、従前標準による計算結果に比べて衝撃係数、変位・変形量ともに大きくなる。

文 献

- (公財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同 解説 コンクリート構造物,丸善出版,2023
- 2)田所敏弥,渡辺健,池田学,岡本大:鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造)「第 I 編 基本原則」の概要, 鉄道総研報告, Vol.37, No.11, pp.7-13, 2023
- 渡辺健,池田学,岡本大:鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造)「第 II 編 橋りょう」の概要,鉄道総 研報告, Vol.37, No.11, pp.15-23, 2023
- (コンクリート構造)「第Ⅲ編 コンクリート構造」の
 概要,鉄道総研報告, Vol.37, No.11, pp.25-33, 2023
- 5)池田学,田所敏弥,轟俊太朗,豊岡亮洋:鉄道構造物等設 計標準・同解説(コンクリート構造)「第IV編 支承構造」 の概要,鉄道総研報告, Vol.37, No.11, pp.35-40, 2023
- 6)(財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解
 説 コンクリート構造物,丸善出版,2004
- 7)渡辺健、中村麻美:コンクリートの強度発現を考慮したク リープひずみの算定式および設計用値、鉄道総研報告、 Vol.38, No.1, pp.27-32, 2024
- 8)徳永宗正,池田学:鉄道コンクリート桁におけるひび割れ と非構造部材の影響を考慮した曲げ剛性の算定方法,鉄道 総研報告, Vol.37, No.9, pp.17-24, 2023

鉄道総研報告 監修スタッフ

 ■監修責任者 声谷公稔
 ■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 瀧上唯夫 田所敏弥 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 豊岡亮洋

鉃道総研報告 第38巻 第10号

2024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

©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. 10

Oct. 2024

PAPERS

Numerical Analysis on Mechanism of Aerodynamic Noise Reduction in Bogie Area by Rounding Corners of Bogie Cavity	
······································	(1)
Development of Prototype Current Monitoring System for Detecting High-resistance Earth Faults in DC Traction Power Supply Systems	
······································	(7)
Aerodynamic Noise Reduction of Pantograph Head Support by Applying Flow Bypass Technique •••••••T.MITSUMOJI, Y.AMANO, M.AKUTSU, K.NAGAO, I.MAKARA, Y.WAKABAYASHI	(15)
Transition Mechanism between Adhesive Wear Mode and Seizure Wear Mode of Current Collecting Materials	
······ К.NEMOTO, С.YAMASHITA	(23)
Information Provision Conditions Based on the Survey of the Usefulness of Guidance on the Train Congestion during Train Traffic Disruption	
·······	(31)
RESEARCH REPORT	



RAILWAY TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE