

鉄 道 総 研 報 告

第40巻 第8号

2026年8月

論文

- 車両** 気動車屋根上排気流れの数値流体解析に基づく排気管の改良と車体スス汚損低減
..... 原田夏輝, 野口雄平, 新木悠斗, 宮地徳蔵 (1)
- 施設** 営業線のロングレール区間のふく進量の実態調査とレール軸力の長期測定に基づく中立温度の変化特性
..... 松谷真吾, 西宮裕騎, 玉川新悟, 細見章人 (9)
- 施設** 全球可視要素を用いたレール温度の昼夜・長期連続解析手法
..... 浦川文寛, 渡辺勉 (20)

気動車屋根上排気流れの数値流体解析に基づく
排気管の改良と車体スス汚損低減

原田 夏輝* 野口 雄平* 新木 悠斗* 宮地 徳蔵**

Exhaust Pipe Modifications to Reduce Soot Staining on Vehicle Bodies
Based on Roof-level Exhaust Flow Simulations of Diesel Railcars

Natsuki HARADA Yuhei NOGUCHI Yuto ARAKI Tokuzo MIYACHI

Exhaust gas emitted from diesel railcars can sometimes cause soot staining on surface of car body. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were conducted in this study to investigate the exhaust flow around a car body and to analyze both the causes of soot staining and its countermeasures. Based on the findings from CFD simulations, the exhaust pipes of the actual car were modified. The degree of staining with and without the countermeasure was evaluated based on the image brightness of the car body. As a result, the modified exhaust pipe reduced soot staining on the car body surface.

キーワード：気動車，排気，スス汚損，CFD，画像解析

1. はじめに

国内の非電化路線においては、ディーゼル気動車が広く運用されている。気動車は、ディーゼルエンジンからの排気を、排気管を通じて屋根上に吐出する。図1に示すように、排気管の出口は車間部の屋根上付近に位置することが多い。走行中に排気管から車外に吐出された排気は、走行風により後方へ拡散する。この際、屋根上機器などの障害物が存在すると、排気が車体表面付近に滞留しやすくなる。このような排気の滞留は、車体表面のスス汚損や、車内への排気の流入を引き起こす可能性がある。したがって、屋根上における排気の流れを把握したうえで、排気管や屋根上機器の形状や配置を最適化することが望ましい。

本研究では、実際に運用されている特急型気動車2形式を対象とする。それぞれの形式をA系、B系と呼称する。A系とB系は同一の線区を走行するが、車体のスス汚損度合いは大きく異なる。A系では車体のスス汚損が軽微であるのに対し、B系ではスス汚損が激しく、車体清掃後すぐに表面が黒く汚れてしま

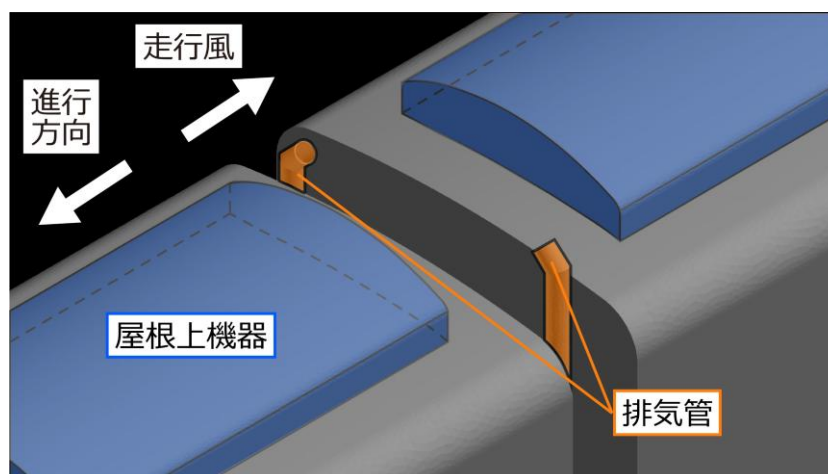


図1 気動車の車間部における排気管の配置の例

* 空力・騒音研究部 車両空力特性研究室

** 空力・騒音研究部 熱・空気流動研究室

うような状態であった。両者の車体形状、編成、運用形態などは類似しており、車体の汚損度合いの違いは、両者の排気管や屋根上機器の形状や配置の違いに起因していると考えられる。

本研究の目的は、B系で生じる車体スス汚損の原因を究明し、その対策について検討することである。まず、A系およびB系を対象として、気動車の屋根上における排気の流れを模擬する数値流体解析（CFD解析）を実施し、屋根上で排気が滞留しにくい排気管形状について検討した。この結果をもとに、現車の排気管形状を改良し、改良前後での車体のスス汚損の低減効果について調査した。

2. 排気流れに関する数値流体解析

著者らは、文献1においてCFD解析を実施し、A系およびB系のそれぞれに対して、排気管から吐出する気流（排気に相当）の車外における分布を評価した。本章では、これらに加えて、B系の排気管を延長する対策について検証した。

2.1 手法

2.1.1 解析対象

CFD解析で用いた車両モデルは、A系およびB系を模擬した2両編成のモデルである。単純化のため、車体の形状は2形式で同一とし、屋根上機器および排気管を変化させた。車体の大きさ（実寸）は幅2800mm×高さ2570mm×長さ20800mmである。床下機器や台車、連結幌などは省略した。車間部には各車両に1本ずつ、合計2本の排気管が設置されている。

車両モデルの条件は、A系条件、B系既存条件、B系改良条件の3条件とした（図2）。なお、すべての条件において、排気管の断面形状は円形（外径140mm、内径120mm）であり、車体妻面から排気管中心ま

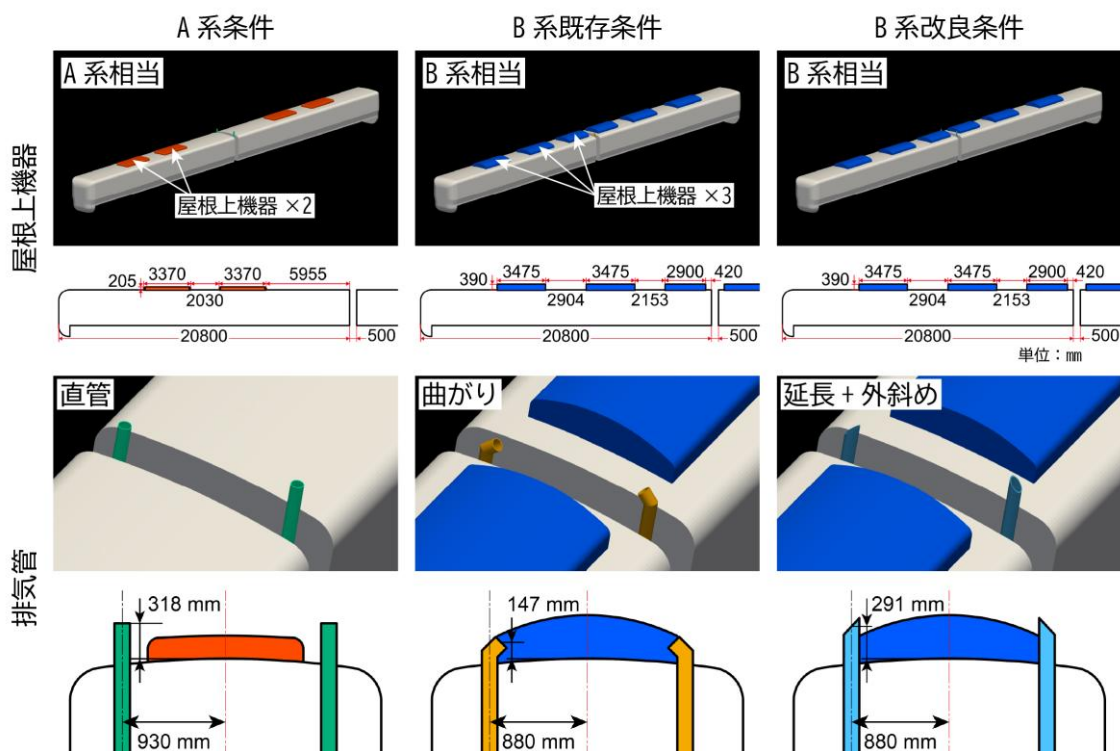


図2 車両モデル

での距離は 100mm である。1 両目の排気管は進行方向に向かって右側、2 両目の排気管は左側に、互い違いになるように配置されている。

A 系条件は、現車の A 系の屋根上機器と排気管をモデル化した条件である。屋根上機器は、1 両につき 2 基であり、その大きさは幅 1400mm×高さ 205mm×長さ 3370mm である。排気管は、鉛直にまっすぐ伸びた形状であり、排気管の車体中央からのまくらぎ方向距離は 930mm である。

B 系既存条件は、現車の B 系の屋根上機器と排気管をモデル化した条件である。屋根上機器は、1 両につき 3 基であり、その大きさは幅 1700mm×高さ 390mm×長さ 2900mm もしくは長さ 3475mm である。B 系条件の屋根上機器においては、厚みが A 系条件よりも大きく、車間部付近に屋根上機器が位置している。排気管は、屋根上で内向きに 45 度折り曲げられており、排気管の直管部の車体中央からの距離は 880mm である。

B 系改良条件は、屋根上機器は B 系既存条件と同じで、排気管の形状のみを変更した条件である。B 系改良条件の排気管は、屋根上機器上面を超える高さに排気管の出口が位置するように、折り曲げ部をなくして直管部を延長し、車両限界に抵触しないように排気管終端部の外側を斜めにカットした形状をしている。

2.1.2 解析手法

汎用の CFD ソフトウェア (Ansys Fluent 17.1) を用いて、非定常・非圧縮性流体解析を行った。CFD における解析条件を表 1 に示す。排気は高温の流体であるため、温度を考慮した解析が必要となる。本解析では、温度差による浮力の影響のみを考慮するブシネスク近似を用いた。本解析では、断熱壁を仮定し、輻射は考慮していないため、排気の高温流体は流体運動 (移流と拡散) によってのみ運ばれる。したがって、本解析では温度分布を排気管から流出する気流の濃度分布とみなすことができる。

明かり区間における走行を模擬した計算を行った。境界条件と計算格子の設定を表 2 に示す。排気管内の断面に流入境界面を定義し、周囲空気より高温の流体を流入させることで、排気の流れを模擬した。なお、すべての流体は空気として扱い、排気の組成は考慮していない。

解析の妥当性を確認するため、CFD で用いた車両モデル形状と類似した形状で縮尺 1/20 の車両模型を用いて、風洞実験を行った²⁾。風洞実験における主流流速は 15m/s であり、代表長さを実車換算 3m としたレイノルズ数は 1.5×10^5 である。流速測定には熱線流速計を使用した。風洞実験においては、排気管および排気管から吐出する排気を含まない、屋根上機器のみの条件に対して流速測定を行ったため、CFD について

表 1 CFD の解析条件

乱流モデル	DDES (Realizable $k-\epsilon$)
浮力	ブシネスク近似
速度と圧力のカップリング	SIMPLE 法
運動量の空間離散化スキーム	有界中心差分法
時間進展	2 次精度陰解法
時間刻み	5×10^{-3} 秒
助走計算の時間	50 秒
統計量の算出時間	50 秒

表 2 境界条件と計算格子の設定

境界条件	車体表面：断熱の壁境界、固定壁 地面：断熱の壁境界、列車速度の移動壁 解析領域側面・上面：対称境界 解析領域入口：速度境界 解析領域出口：自由流出境界 排気管内の断面：速度境界
計算格子	四面体および六面体
車体表面の格子幅	30～60mm
車体 1 層目格子高さ	3mm
排気管内の格子幅	5～10mm
総格子数	約 2700 万

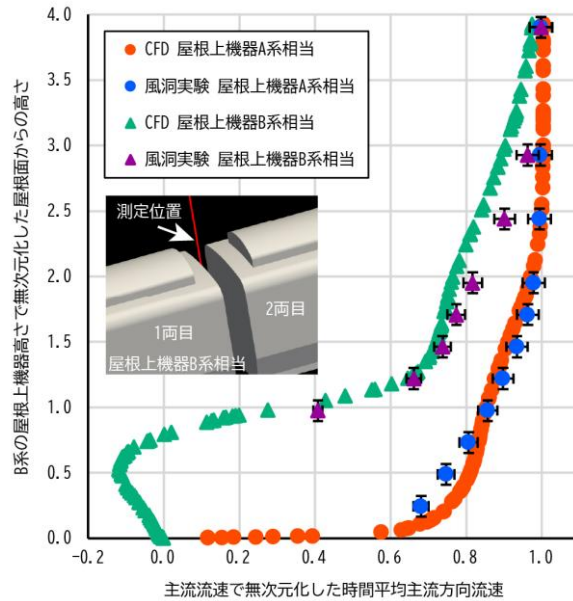


図3 風洞実験およびCFDにおける車間部屋根上流速分布の比較（文献1の図を一部改変）

も同様に排気管・排気を含まない条件の計算を別途実施して比較した。図3に、風洞実験およびCFDにおける、車間部の屋根上付近の流速分布を示す。風洞実験のプロットにおけるエラーバーは拡張不確かさ範囲を表す。流速分布は、風洞実験とCFDでおよそ一致することがわかる。

2.1.3 相似則について

相似則に関して、本解析で考慮する無次元数は、レイノルズ数、リチャードソン数、吐出速度比、の3つである。解析におけるパラメータの値を表3に示す。

列車速度は、解析時間の制約から、現車よりも遅い5m/s（18km/h）とした。レイノルズ数は 1.0×10^6 と現車条件と比較して小さいものの、レイノルズ数の影響が顕著に現れる領域と比べれば十分に大きい値であり、本解析においてはレイノルズ数の影響は小さいと想定される。

排気と周囲空気の温度差は、3Kとした。リチャードソン数は 1.2×10^{-2} である。現車の列車速度を仮に25m/s（90km/h）とし、リチャードソン数をもとに換算すると、本解析での温度差は現車スケールで75Kに相当する。なお、本解析における周囲空気の温度は300Kとした。

現車における、エンジンの排気量、定格回転数、排気管の断面積から排気の吐出速度を概算すると、おお

表3 解析におけるパラメータの値

パラメータ名	記号・定義	本解析における値
列車速度	U	5m/s
排気の吐出速度	V	5m/s
代表長さ	L	3m
排気と周囲空気の温度差	$\Delta\theta$	3K
レイノルズ数	UL/ν	1.0×10^6
リチャードソン数	$g\beta\Delta\theta L/U^2$	1.2×10^{-2}
吐出速度比	V/U	1

※ 定数 ν ：空気の動粘性係数（ $1.5 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ ）， g ：重力加速度（ 9.8m/s^2 ）， β ：空気の熱膨張係数（ $1/300 \text{/K}$ ）

よそ走行速度に等しいオーダーとなったため、本解析では吐出速度比を 1 と仮定し、排気の吐出速度を、今回設定した列車速度と等しい 5m/s とした。

2.2 結果と考察

図 4 に、瞬時温度場の等値面（気流温度が $0.01\Delta\theta$ となる等値面）を示す。先述したように、本解析における温度分布は、排気管から吐出する気流の濃度分布に相当する。A 系条件では、排気管から吐出する気流は大きく拡散せず、線状を保ったまま屋根上流れによって下流へと輸送される。B 系既存条件では、車間部の低速領域に排気が吐出されるため、排気は車間部に滞留するとともに、屋根上では広範囲におよび、屋根表面に纏わりながら下流側に流れていくことが見て取れる。一方で、排気管形状と出口位置を変更した B 系改良条件では、車間部での滞留はほぼなくなっており、屋根上での広がりも B 系既存条件と比較して緩やかである。

この結果から、排気管を延長する対策（B 系改良条件）によって、屋根上における排気の流れを改善し、車体のスス汚損や車内への排気の流入を防止できる可能性があることがわかった。これは、排気管の出口を屋根上機器よりも高い位置に設けたことにより、排気の屋根上機器への衝突や、車間部への滞留を抑制できたことが理由である。

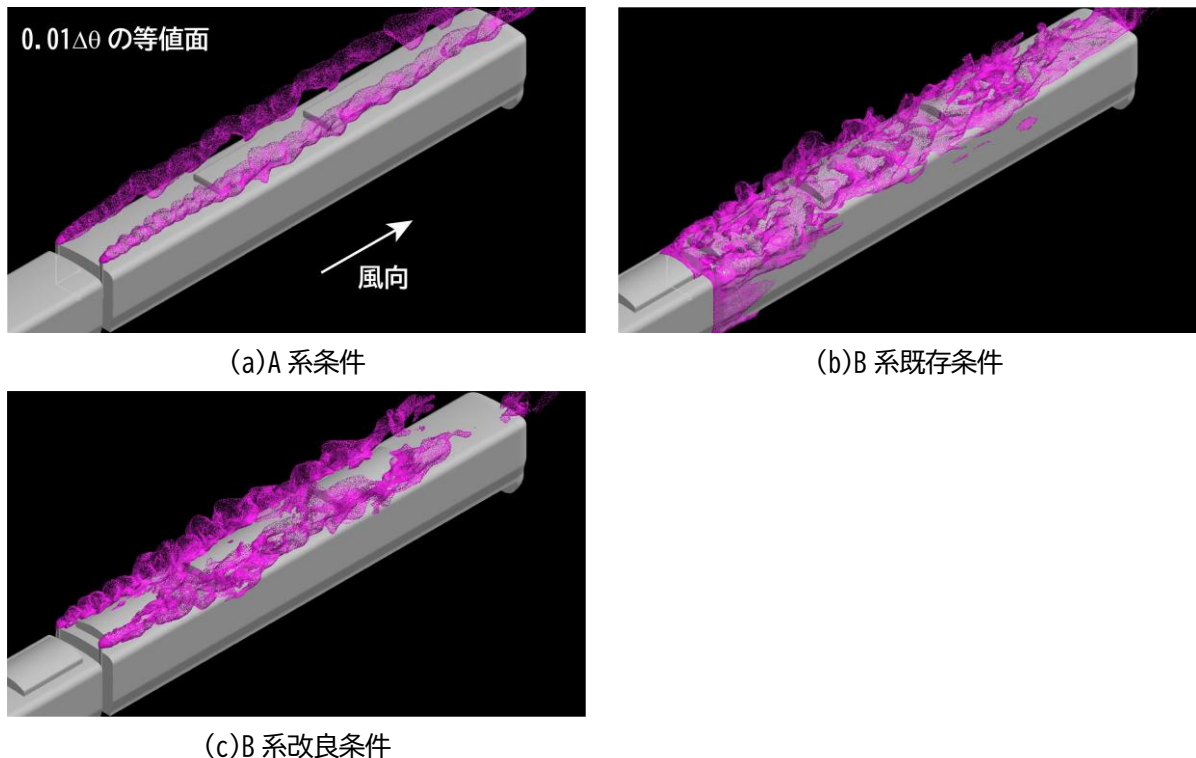


図 4 瞬時温度場の等値面（文献 1 の図を一部改変）

3. 現車試験における車体表面のスス汚損度合いの評価

前章で示した排気管の延長案に従い、現車の B 系の排気管を既存条件（曲がり）から改良条件（延長+外斜め）に変更し、現車試験を行った。本章では、排気管の改良前後における、排気に含まれるススによる車体表面の汚損の度合い（スス汚損度合い）について、画像解析を用いて比較した結果³⁾について述べる。

3.1 手法

営業列車として運用中の B 系車両の外観を定期的に撮影した。対象とする車両は、既存の排気管をもつ B 系 1 編成 3 両（既存編成）と、各車両に対して排気管の改良対策を行った B 系 1 編成 3 両（改良編成）の、計 2 編成 6 両である。各編成の排気管の位置の模式図と、撮影対象面を図 5 に示す。撮影対象面は、2 号車および 3 号車の、車間部妻面に最も近い屋根上機器の車体妻面側の側面である（図 5(a)）。撮影対象面は排気管出口に近く、車体のスス汚損が特に激しい箇所である。画像は約 2 か月間かけて取得した。撮影を開始する前に、図 5(b)に示す撮影対象面の中央付近（20cm×20cm 程度）の汚れをすべて落とした後、当該編成は通常の営業運用に入った。運用開始後は、撮影対象面付近の清掃は行わず、おおよそ 1 週間に 1 回程度の頻度で、デジタルカメラで対象面を撮影した。また、画像の取得と並行して、車両運用パターンも記録し、撮影開始からの総走行距離を取得した。なお、図 5 の編成は、紙面右方向と左方向いずれの向きにも走行する。

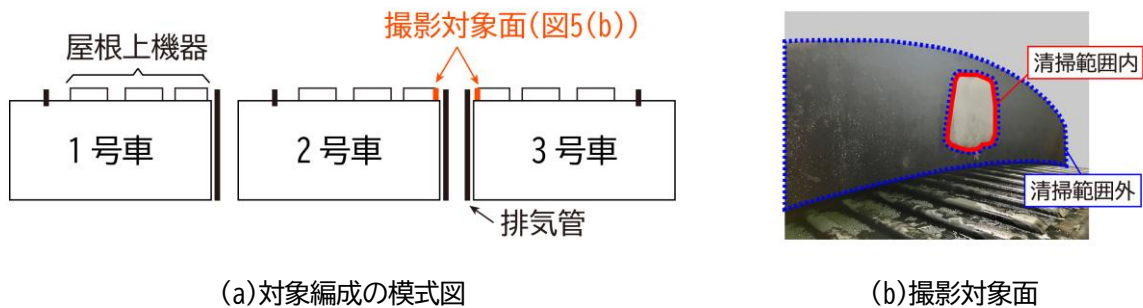


図 5 対象編成の模式図と撮影対象面

取得した画像からスス汚損度合いを定量化する手法について説明する。まず、取得したカラー画像をグレースケール画像に変換した。8bit のグレースケール画像の輝度値は、0 から 255 の値で表され、0 が黒に、255 が白に対応する。今回は単純にこの輝度値を汚損度合いの指標とし、清掃範囲内と清掃範囲外の輝度値の差によって、周囲と比較した汚損度合いを評価した。

汚損度 p および汚損度の変化 Δp の定義は以下の通りである。

$$p = \frac{255 - (g_{in} - g_{out})}{255} = 1 + \frac{g_{out} - g_{in}}{255} \quad (1)$$

$$\Delta p = p - p_{\text{clean}} \quad (2)$$

ここで、 g_{in} は清掃範囲内のピクセルの輝度値の平均値、 g_{out} は清掃範囲外のピクセルの輝度値の平均値である。汚損度 p は、清掃範囲内において、清掃範囲外と比較した汚損の程度を相対的に表す指標である。清掃範囲外と比較して汚損の程度が低い場合（清掃範囲内が白、清掃範囲外が黒の場合）、汚損度 p は 0 に近づき、清掃範囲外と同程度に汚損した場合は 1 に近づく。なお、清掃範囲外は既に汚損が進行しきっており、それ以上汚損が進行しても、輝度値が変化しないと仮定している。また、 p_{clean} は清掃直後に撮影した画像の汚損度であり、汚損度の変化 Δp は、清掃直後と比較して、汚損度合いが時間的にどう変化したかを表す指標である。

清掃範囲内および清掃範囲外の境界（図 5(b)）は、取得したカラー画像を確認しながら、手作業で指定し

た．範囲を選択する際は，日差しが写りこんでいて明るすぎる箇所など，極端な色の部分をなるべく避けるように指定した．なお，過度な逆光により，汚損度が極端な値になる画像については，解析から除外した．

3.2 結果と考察

得られたカラー画像の例として，3号車のカラー画像，汚損度 p ，汚損度の変化 Δp を図6に示す．既存編成では，走行距離2万キロ程度で，清掃範囲内外の色の差がほとんどなくなり，汚損度が1に近づく．一方，改良編成では，清掃範囲内の汚損は，既存編成と比較して進展が遅く，3.5万キロ程度走った時点でも，目立った汚損の進展はみられない．

図6で示した例を含め，撮影を行ったすべての車両（2号車と3号車）の汚損度を図7(a)に，汚損度の変化を図7(b)に示す．既存編成では，走行距離2万キロ程度で汚損度が1に近づき，その後はあまり変化していない．このことから，既存編成においては，2万キロ程度走行することによって，ススの付着がほぼ完

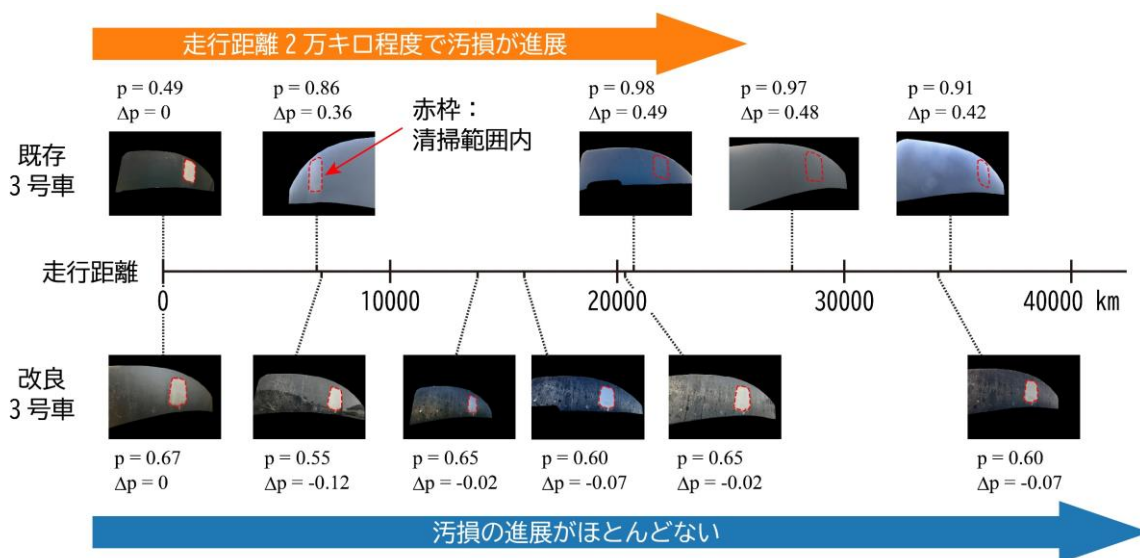
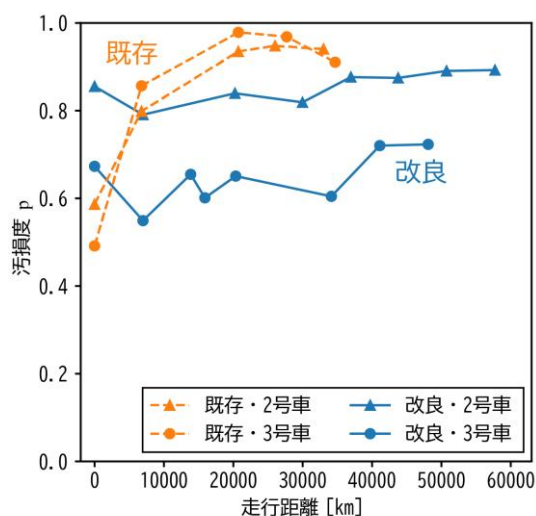
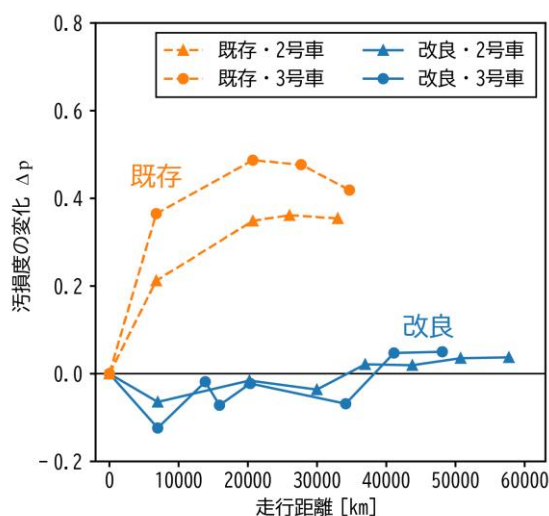


図6 得られたカラー画像の例（3号車）



(a)汚損度



(b)汚損度の変化

図7 汚損度と汚損度の変化

了し、それ以上汚損が進展しない状態になることがわかる。一方で、改良編成では、5万～6万キロ程度走行しても、汚損度はあまり変化していない。なお、改良編成の2号車は、汚損度の値自体は高いが、これは清掃範囲内外いずれも白に近い状態であり、清掃範囲内外の輝度値の差が少なく、式(1)の汚損度の定義上、値が大きくなってしまったことが理由である。改良編成の2号車は、走行距離によって汚損度が上昇することはないため、汚損はあまり進展していないといえる。

改良編成の汚損低減効果は、汚損度の変化(図7(b))からも明白である。既存編成では、汚損度の変化が大きい(汚損が進展する)のに対し、改良編成では汚損度の変化は0に近く、汚損の進展がほとんどない。

以上より、現車試験においても、排気管の改良によって汚損を抑制する効果を確認できた。今回解析の対象とした屋根上機器側面以外の、車体妻面や側面、屋根表面における汚損低減効果は確認できていないが、図4のように排気の流れが改善されたことを踏まえると、車両全体においても同様に排気管の改良によるスス汚損低減効果があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、特定の形式の気動車で生じる車体スス汚損に着目し、その原因と対策について検討した。まず、CFD解析によって屋根上における排気の流れについて調査し、排気管を延長する対策を提案した。続いて、実際の気動車で排気管を延長する対策を行い、対策前後の車体のスス汚損度合いを画像解析によって比較・検証した。その結果、排気管の改良によるスス汚損低減効果を示した。

2章の内容は文献1の内容を和訳・加筆したものである。3章の内容は文献3の要約であり、著作権は公益社団法人土木学会に帰属する。

文 献

- 1) Harada, N., Noguchi, Y., Araki, Y., Miyachi, T., "CFD analysis of exhaust flow for reducing soot stains on railcar body surfaces," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.270, 106359, 2026.
- 2) 新木悠斗, 野口雄平, 原田夏輝, 宮地徳蔵: 風洞実験による車両連結部の上部の流速分布測定, 第30回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2023), No.S2-8-6, 2023
- 3) 原田夏輝, 新木悠斗, 宮地徳蔵: 排気流れによる車体表面のスス汚損度合いの画像による評価, 第30回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2023), No.S2-8-1, 2023

鉄道総研報告
RTRI REPORT営業線のロングレール区間のふく進量の実態調査と
レール軸力の長期測定に基づく中立温度の変化特性松谷 真吾* 西宮 裕騎*
玉川 新悟* 細見 章人**Neutral Temperature Characteristics of Continuous Welded Rail Based on Rail Creeping Surveys and
Long-Term Axial Force MeasurementsShingo MATSUTANI Yuki NISHINOMIYA
Shingo TAMAGAWA Akito HOSOMI

Continuous welded rail management controls rail axial force using its equivalent temperature, taking into account rail creeping and maintenance work. Furthermore, changes in neutral temperature are appropriately updated after resetting. However, track buckling has still occurred, even under such management, suggesting that unexpected rail axial forces may be generated by temporal changes in neutral temperature after resetting. This study analyzed changes in the amount of rail creeping, focusing on the track structures, and measured the axial force and temperature over a long term from the time of long-welded rail installation to understand the variations in neutral temperature characteristics. As a result, the authors confirmed the quantitative impact of the factors contributing to rail creeping and found that the possibility of a large rail axial force occurring due to temporal changes in the neutral temperature after resetting is low.

キーワード：ロングレール，中立温度，レールふく進，レール軸力

1. はじめに

ロングレール敷設時におけるレール温度の設定可能領域は、図 1 に示すように、敷設箇所で予想される最高レール温度と最低レール温度、および夏季の著大通り変位の防止と冬季のレール破断時の開口量を制限する観点から定められている。また、設定可能領域の範囲内から、敷設箇所の状況に合わせて設定した温度を設定温度という。ロングレールは、設定温度でレール軸力が 0 になるように緊張器等により、設定温度と敷設時のレール温度の差に相当するレール軸力を付加した状態で敷設される。このように、現行のロングレール管理では、レール軸力が 0 となるレール温度である中立温度が、ロングレール敷設直後においては設定温度と等しくなることを前提としている。また、敷設後については、レールのふく進や保守作業の投入等により、中立温度が変化することを想定して、現場状況に応じてレールのふく進や保守作業により付加されるレール軸力の温度換算値である換算付加温度を用い、中立温度を適宜更新することによりレール軸力を管理している。一方で、このような管理下でも軌道の著大通り変位は発生しており、輸送障害や補修作業に苦慮している。この原因について、現行のロングレール管理を踏まえると、以下の 2 つの仮説が考えられる。

- (1) レール敷設直後の中立温度と設定温度の不一致
- (2) 敷設後の中立温度の経時変化により想定以上のレール軸力の発生

* 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

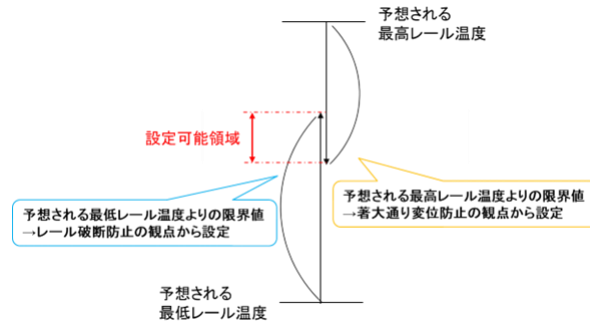


図1 ロングレール敷設時のレール温度の設定可能領域

(1)の仮説について検討するため、緊張器を用いたロングレールの部分的な交換箇所を対象に、ロングレール敷設直後のレール軸力およびレール温度を測定した¹⁾。測定した結果から算出した中立温度と設定温度の差が、設定替えや道床整備が必要となる換算付加温度 3.5°C ²⁾ よりも小さい値であったことを確認した。過去の測定結果³⁾からも、緊張器を用いた設定替えの精度が確認されており、(1)の仮説が問題となる状況は考えにくい。一方で、(2)の仮説について、敷設後の中立温度の経時的な変化については不明な点が多い。

そこで本研究では、ロングレールにおける中立温度の変化特性を把握するため、営業線のふく進量の変化を軌道構造に着目し分析するとともに、ロングレール区間において、レール軸力とレール温度を敷設時から長期間測定した⁴⁾。

2. 営業線のロングレールふく進検査データを用いたふく進の要因分析

本章では、ふく進により中立温度が変化している箇所を網羅的に把握するため、ふく進の要因を整理し、営業線におけるロングレールふく進検査（以下、「ふく進検査」という）で測定したふく進量を用いて、統計的に要因の影響分析を行った。

2.1 分析対象と分析項目

2.1.1 分析対象

分析対象とした線区およびふく進検査の概要を表1に示す。分析対象とした線区は、全区間が複線であり、上下線および左右レールを別々のデータとした結果、ふく進杭（以下、「杭」という）の総数は3798箇所であった。次に、分析対象としたふく進検査は、2014年から2023年に行った定期検査または臨時検査とした。以上の分析対象について、ふく進検査で測定したふく進量を杭毎に確認したところ、検査データに何らかの異常値が含まれている杭（ふく進量が999mm等）が1232箇所、検査回数が5回未満と少ない杭が1322箇所みられたため、検査データに異常値が含まれておらず、かつ検査数が5回以上の杭を分析対象とした。結果、分析対象の杭は1239箇所となった。

2.1.2 分析項目

分析項目を表2に示す。既往の研究⁵⁾では、ふく進が発生しやすい箇所の特徴のひとつとして、列車の制動の影響を受ける箇所が報告されている。そこで、列車の制動の影響を確認するため、列車の制動が多いと想定される駅構内と、その他区間である駅間のふく進量の違いを分析することとした。

軌道構造については、バラスト軌道と直結系軌道の違いによるふく進量の違いを分析することとした。なお、直結系軌道は構造物の温度伸縮による影響範囲を考慮して、無道床橋りょうやスラブ軌道等の直結系軌道区間を含む前後100mの範囲を対象とした。線形については、直線と曲線の違い、曲線半径の大きさ

表1 分析対象の概要

軌道延長	187km287m
単線・複線	複線
検査年	2014～2023 年
検査回数	定期検査 18 回＋臨時検査
ふく進杭の総数	3798 箇所
分析対象のふく進杭の数	1239 箇所

表2 分析項目

分析項目	内容	閾値
駅構内・駅間	駅構内・駅間	-
軌道構造	バラスト軌道・直結系軌道	-
線形	直線・曲線	-
	曲線半径の大きさ	600 m
	曲線の内軌・外軌	-
勾配	勾配の大きさ	5・10 ‰
	下り勾配・上り勾配	-
伸縮継目から杭の距離	伸縮継目から杭の距離	250・500 m
ロングレールの全長	ロングレールの全長	1・2 km

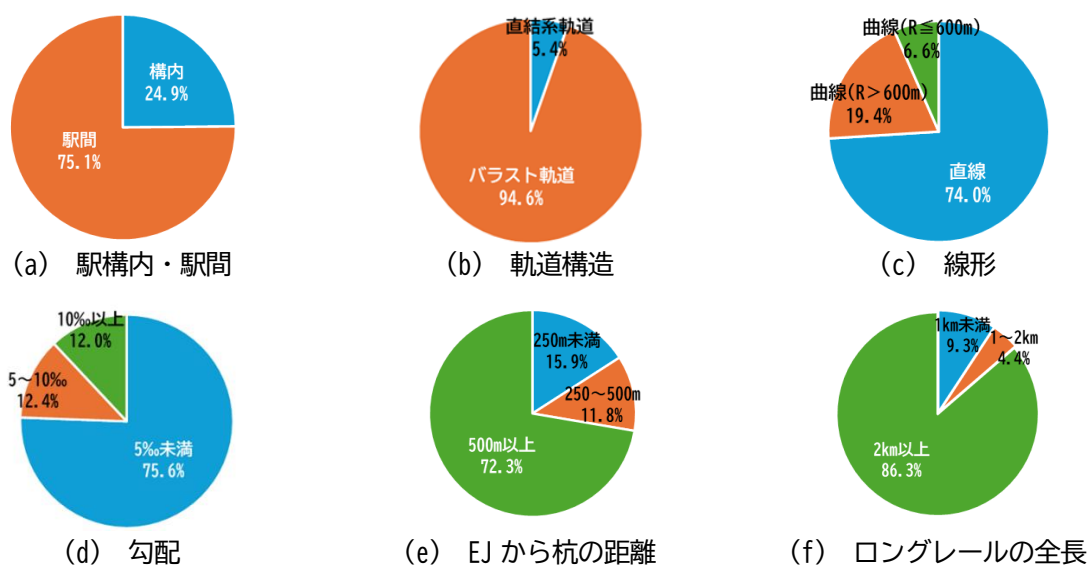


図2 分析対象の杭の位置における各分析項目の割合

および内軌・外軌の違いによる影響を確認するため、直線区間と曲線区間を分けるとともに、曲線区間については、曲線半径 600m を閾値とし、また、内軌・外軌を分けて分析することとした。勾配については、勾配の大きさおよび下り勾配・上り勾配による影響を確認するため、絶対値で 5‰ および 10‰ を閾値とするとともに、勾配が 10‰ 以上の箇所における下り勾配・上り勾配を分けて分析することとした。伸縮継目（以下、「EJ」という）から杭の距離については、可動区間に近い杭の方がふく進が発生しやすいと想定されるため、250m および 500m を閾値とし分析することとした。ロングレールの全長については、ロングレール長が短いほどふく進が発生しやすいと想定されるため、1km および 2km を閾値として分析することとした。

図 2 に各分析項目における杭位置の割合を示す。分析対象の軌道構造は主にバラスト軌道で、直結系軌道は全体の 5.4% であった。線形については、直線は 74.0%、曲線半径が 600m 以下の曲線は 6.6% であった。勾配については、5‰ 未満の箇所は 75.6%、10‰ 以上の箇所は 12.0% であった。EJ から杭の距離については、250m 未満の箇所は 15.9%、500m 以上の箇所は 72.3% であった。ロングレールの全長については、1km 未満の箇所は 9.3%、2km 以上の箇所が 86.3% であった。

2.2 分析方法

ふく進検査で測定するふく進量は、レールに設置したターゲット等が基準とする位置から、レール長手方向へ移動した量を指す。一方で、同一期間における各杭位置でのふく進の変化量を分析に用いるため、今回の分析で用いるふく進量は、同じ杭におけるふく進検査で測定したふく進量の最大値から最小値を引

いた値とした。また、分析対象とした期間にレール交換や設定替えの作業を行っている場合は、作業によるふく進量の変化の影響を除外する必要がある。そこで、作業前後の期間でそれぞれ前述の方法によりふく進量を算出し、算出したふく進量のうち最大の値を用いることとした。分析対象とした杭位置で、ふく進量の大きさ毎に、ふく進量と各分析項目における杭位置の割合を求め、ふく進量と各分析項目の相関性を確認することとした。なお、ふく進量の大きさが 50mm 以下の箇所は、0mm 以上 10mm 以下のように 10mm 毎の分布で、50mm より大きい箇所はまとめて分析することとした。

2.3 分析結果

2.3.1 ふく進量の分布

図 3 にふく進量の分布を示す。図 3 より、ふく進量が 10mm より大きく 20mm 以下の箇所の割合が最も高く、20mm 以下の箇所の割合は全体の 61.0%を占めていた。ふく進量が 20mm より大きい箇所では、ふく進量が増加するにつれて割合が低くなり、50mm より大きい箇所は全体の 2.3%であった。なお、検査データに明らかな異常値を含む杭は分析対象外としているものの、レール交換や設定替え、および基準点の再設置等によるものと考えられる一時的な値の急変が生じているデータも分析対象としているため、実際よりもふく進量が大きく算出されている箇所も含まれていると考えられる。

2.3.2 駅構内と駅間

図 4 にふく進量と駅構内・駅間の関係を示す。図 4 より、ふく進量が 10mm 以下の箇所における駅構内の割合は 33.4%であった。一方で、50mm より大きい箇所では 13.8%であった。分析対象の杭全体における駅構内の割合は 24.9%であることから、ふく進量が小さい箇所で駅構内の割合が高くなる傾向であった。既往の研究より、列車の制動荷重の影響により、駅構内でふく進量が増加する傾向になると予想したが、分析結果では逆の傾向を示しており、このような結果となった要因は特定できていない。

2.3.3 軌道構造

図 5 にふく進量とバラスト軌道および直結系軌道の関係を示す。図 5 より、ふく進量が 10mm 以下の箇所における直結系軌道区間の割合は 2.3%であった。一方で、50mm より大きい箇所では 10.3%であった。分析対象の杭全体における直結系軌道区間の割合は 5.4%であることから、ふく進量の大きい箇所で直結系軌道区間の割合が高くなる傾向であった。この結果は、直結系軌道においては、レール押さえ力がバラスト軌道区間と比較して小さい影響や、下部構造物の温度伸縮による付加軸力の影響等を受けるためと考えられる。

2.3.4 線形

図 6 にふく進量と直線および曲線の関係、曲線区間を曲線半径 600m で分けた場合の関係および曲線区間を内軌・外軌で分けた場合の関係をそれぞれ示す。図 6 (a)より、ふく進量が 10mm 以下の箇所における曲線区間の割合は 20.3%であった。一方で、50mm より大きい箇所では 37.9%であった。分析対象の杭全体

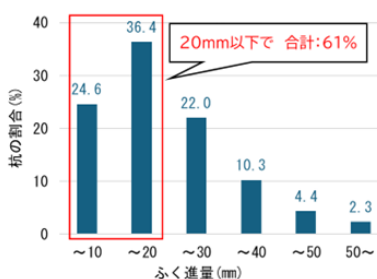


図 3 ふく進量の分布

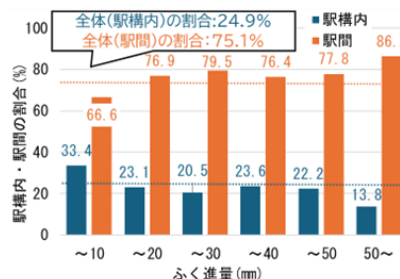


図 4 駅構内・駅間とふく進の関係

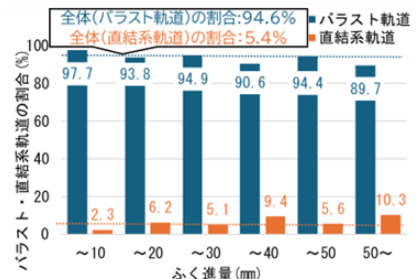


図 5 軌道構造とふく進の関係

における曲線区間の割合は 26.0%であることから、ふく進量の大きい箇所では曲線の割合が高くなる傾向であった。

曲線半径の違いに着目すると、図 6 (b)より、ふく進量が 10mm 以下の箇所では、曲線半径が 600m より大きい曲線および 600m 以下の曲線の割合はそれぞれ 14.1%および 6.2%であった。一方で、50mm より大きい箇所では、それぞれ 27.6%および 10.3%であった。分析対象の杭全体におけるそれぞれの割合は、19.4%および 6.6%であることから、曲線半径の大きさにかかわらず、ふく進量の大きい箇所では曲線の割合が高くなる傾向であり、曲線半径が 600m 以下の曲線で割合がより高くなった。

内軌・外軌の違いに着目すると、図 6 (c)より、ふく進量が 10mm 以下の箇所では、内軌・外軌の割合はそれぞれ 8.2%および 12.1%であった。一方で、50mm より大きい箇所では、それぞれ 24.1%および 13.8%であった。分析対象の杭全体におけるそれぞれの割合は、いずれも 13.0%であることから、内軌・外軌にかかわらず、ふく進量の大きい箇所では曲線の割合が高くなる傾向であり、内軌側で割合がより高くなった。

以上の結果は、曲線区間の内軌側は、特定の条件下で接線力の作用が列車進行方向と同方向に働く⁶⁾ことから、外軌側よりふく進量が大きくなったと考えられる。

2.3.5 勾配

図 7 にふく進量と勾配の大きさの関係および勾配が 10‰以上の箇所の下り勾配・上り勾配の関係をそれぞれ示す。図 7 (a)より、ふく進量が 10mm 以下の箇所では、勾配が 5‰未満および 10‰以上の箇所の割合はそれぞれ 79.3%および 7.5%であった。一方で、50mm より大きい箇所では、62.1%および 31.0%であった。分析対象の杭全体におけるそれぞれの割合は 75.6%および 12.0%であることから、ふく進量の大きい箇所では勾配が 10‰以上の箇所の割合が高くなる傾向であった。

勾配 10‰以上の下り勾配・上り勾配の違いに着目すると、図 7 (b)より、ふく進量が 10mm 以下の箇所では、勾配 10‰以上の下り勾配・上り勾配の割合がそれぞれ 4.3%および 3.3%であった。一方で、50mm より大きい箇所では、それぞれ 17.2%および 13.8%であった。分析対象の杭全体におけるそれぞれの割合は 4.9%および 7.1%であることから、下り勾配・上り勾配にかかわらず、ふく進量の大きい箇所では勾配の大きい箇所の割合が高くなる傾向であり、下り勾配で割合がより高くなった。

以上の結果は、勾配の大きい区間では、列車の力行・制動の影響を受けるためと考えられる。特に下り勾配では制動荷重が上り勾配と比べて大きいことから、上り勾配と比べふく進量が大きくなったと考えられる。

2.3.6 EJ から杭の距離

図 8 にふく進量と EJ から杭の距離の関係を示す。図 8 より、ふく進量が 10mm 以下の箇所では、EJ から杭の距離が 250m 未満および 500m 以上の箇所の割合がそれぞれ 15.1%および 75.1%であった。一方で、50mm より大きい箇所では、それぞれ 31.0%および 62.1%であった。分析対象の杭全体におけるそれぞれの

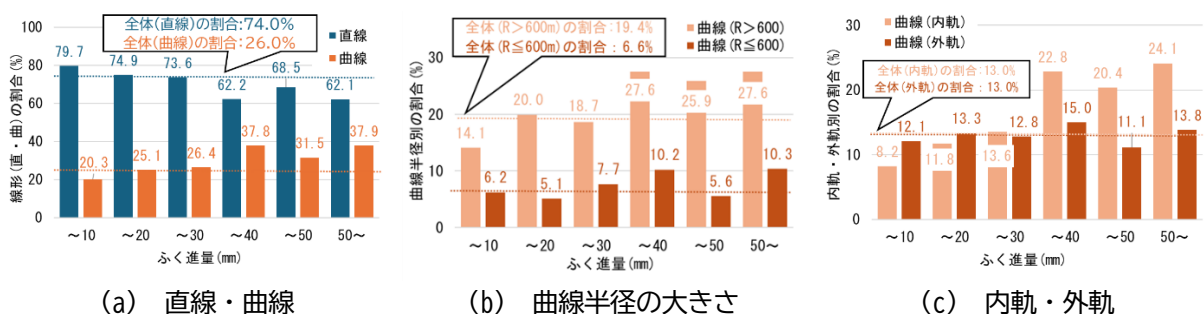


図 6 線形とふく進の関係

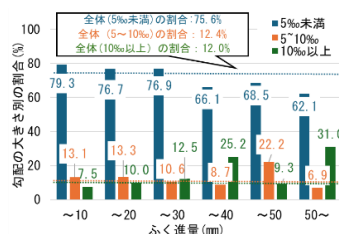
割合は 15.9%および 72.3%であることから、ふく進量の大きい箇所では、EJ から杭の距離が短い箇所の割合が高くなる傾向であった。この結果は、EJ から杭の距離が短い箇所において、可動区間の影響を受けやすいとと考えられる。

2.3.7 ロングレールの全長

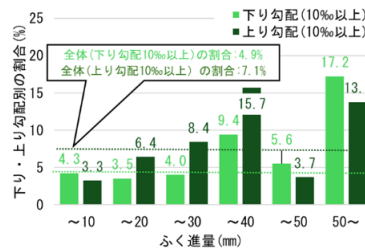
図 9 にふく進量とロングレールの全長の関係を示す。図 9 より、ふく進量が 10mm 以下の箇所では、ロングレール長が 1km 未満および 2km 以上の箇所の割合が、それぞれ 11.8%および 83.9%であった。一方で、50mm より大きい箇所では、それぞれ 13.8%および 82.8%であった。分析対象の杭全体におけるそれぞれの割合は 9.3%および 86.3%であった。ロングレール長が短いほど可動区間の影響を受けふく進しやすいと想定したが、ロングレール長とふく進量に明確な相関性は確認できなかった。この結果より、ロングレール長がふく進に与える影響はその他項目と比較し小さいと考えられる。

2.4 分析項目の影響分析

分析項目のふく進に対する影響を比較するため、図 10 に分析対象とした杭全体での各分析項目の割合に対する、その項目のふく進量が 50mm より大きい箇所の割合の比を示す。分析項目の中で、当該割合が最も大きい項目は、勾配が 10‰以上の箇所であり、分析対象の杭全体での割合と比較すると 2.6 倍程度であった。また、下り勾配・上り勾配の違いに着目すると、下り勾配の方が割合が大きく、杭全体での割合と比較すると 3.6 倍程度であった。一方で、当該割合が小さい項目は、駅構内のみであり、分析対象の杭全体での割合と比較すると 0.6 倍程度であった。その他項目に着目すると、EJ から杭の距離が 250m 未満の箇所、直結系軌道区間、曲線区間およびロングレールの長さが 1km 未満の箇所の順で、ふく進量が 50mm より大きい箇所での割合が大きかった。



(a) 勾配の大きさ



(b) 下り勾配・上り勾配(10‰以上)

図 7 勾配とふく進の関係

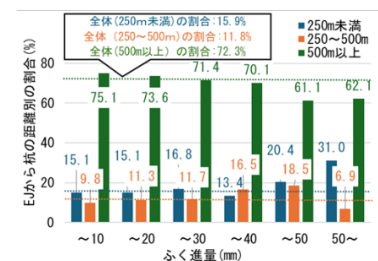


図 8 EJ から杭の距離とふく進の関係

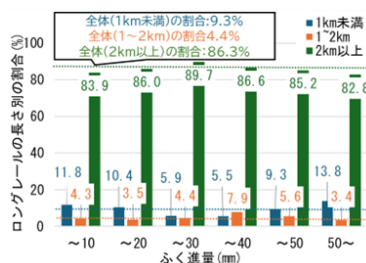


図 9 ロングレール全長とふく進の関係

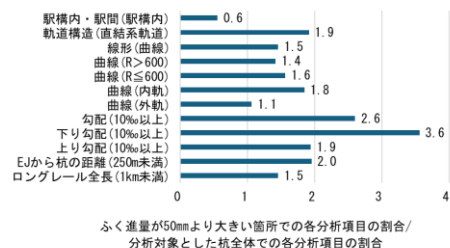


図 10 分析項目のふく進に与える影響の大きさ

3. ロングレール軸力の長期計測

ロングレールにおける中立温度の経時変化特性の把握を目的に、建物の日陰や無道床橋りょうの介在が

ない直線区間のロングレールを対象に、営業線で約2年間、レール軸力とレール温度を長期計測した。

3.1 現地試験の概要

表3に現地試験箇所の概要、図11に測定項目と測定位置、図12に測定器の設置状況をそれぞれ示す。レール軸力およびレール温度は、それぞれレールに設置したひずみゲージおよび熱電対を用いて測定した。また、レールのふく進量は、各測点に設置された杭等の不動点を基準に、レールに設置したターゲットがレール長手方向に移動した量を測定した。

試験箇所の選定にあたっては、特異な敷設条件のない以下のような特徴を有する一般的なロングレールを対象とした。

- ・全区間直線かつバラスト軌道であること
- ・レール締結装置種別が極力統一されていること
- ・踏切や無道床橋りょう等の構造物の介在がないこと
- ・建物の日陰がかからないこと
- ・EJから十分離れた400m以上の不動区間であること

上記のような箇所を選定した理由は、ふく進により中立温度を変化させる外的要因は前章のとおり多数考えられ、試験箇所において外的要因が多いとそれぞれの影響の評価が困難と考えたためである。また、レール軸力が0の状態を精度良く求める観点から、レール交換前にひずみゲージ設置が可能な箇所を選定した。なお、記載のキロ程は起点方のEJを0kmとして換算した値で示す。

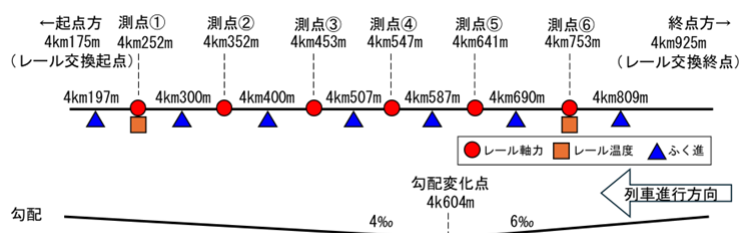


図11 現地試験の測定項目と測定位置

表3 現地試験箇所の概要

ロングレール全長	11km227m
ロングレール交換区間	4km175m～4km925m
ロングレール設定温度	30℃
線形	直線
勾配	－4‰・6‰(勾配変更点 4km604m)
軌道構造	50kgN レール、PC まくらぎ3号、5形レール締結装置
道床種別	バラスト
近傍の構造物	なし
走行車両	通勤型、特急型、機関車、貨車

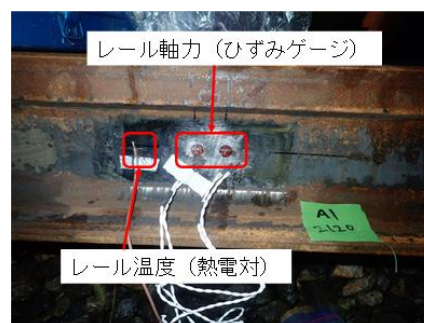


図12 測定器の設置状況

3.2 試験結果

試験期間中に、測定機器の故障により全測定点での欠測が2回生じた。測点④および測点⑥では、上記に加え個別の不具合により、それぞれ欠測が1回生じた。また、測点③では板ばねの近傍にひずみゲージが配置されたため、レール交換時のレール締結装置の再締結によりひずみ値に顕著な変化がみられたため、ひずみゲージの貼り直しを実施した。

図13にレール軸力とレール温度の関係を示す。なお、本試験では、レール軸力の算出は、以下の式(1)に

より実施した。レール軸力の算出にあたっては、ロングレール敷設前に測定したひずみのダイレクト値をレール軸力が0の状態における測定値と仮定している。また、式(1)の変動ひずみはロングレール敷設後のダイレクト値から敷設前のダイレクト値を差し引いた値を示す。

$$P = \Delta\varepsilon \frac{2}{K_s} \frac{1}{2(1+\nu)} EA \times 10^{-6} \quad (1)$$

P : レール軸力 (kN)

$\Delta\varepsilon$: 変動ひずみ ($\mu\varepsilon$)

K_s : 使用したゲージのゲージ率=2.08

ν : ポアソン比=0.3

E : レール鋼のヤング係数 (kN/mm²)

A : レール断面積 (mm²)

また、レールが軸方向に完全に拘束されている理想的な条件下では、レール軸力とレール温度の変化量の関係は以下の式(2)で表すことができる。

$$P = -EA\beta\Delta t \quad (2)$$

β : レール鋼の線膨張係数=1.14×10⁻⁵ (1/°C)

Δt : レール温度の変化量 (°C)

式(2)より、50kgN レールの場合、レール温度に対するレール軸力の変化は、 $EA\beta=15.08$ kN/°Cとなる。一方で、本試験で用いたひずみゲージでは、ひずみ量に対するレール軸力の感度は0.49kN/ $\mu\varepsilon$ 程度であり、ひずみゲージの貼付け精度、リード線の長さの違いおよび湿度による絶縁抵抗の減少等が精度に影響すると考えられる。そこで、レール軸力とレール温度の傾きは、式(2)によらず、測定点毎の測定結果より、最小2乗法による線形近似を用い算出することとした。図13(a)より、測点①の中立温度は30°C±4°Cであり、設

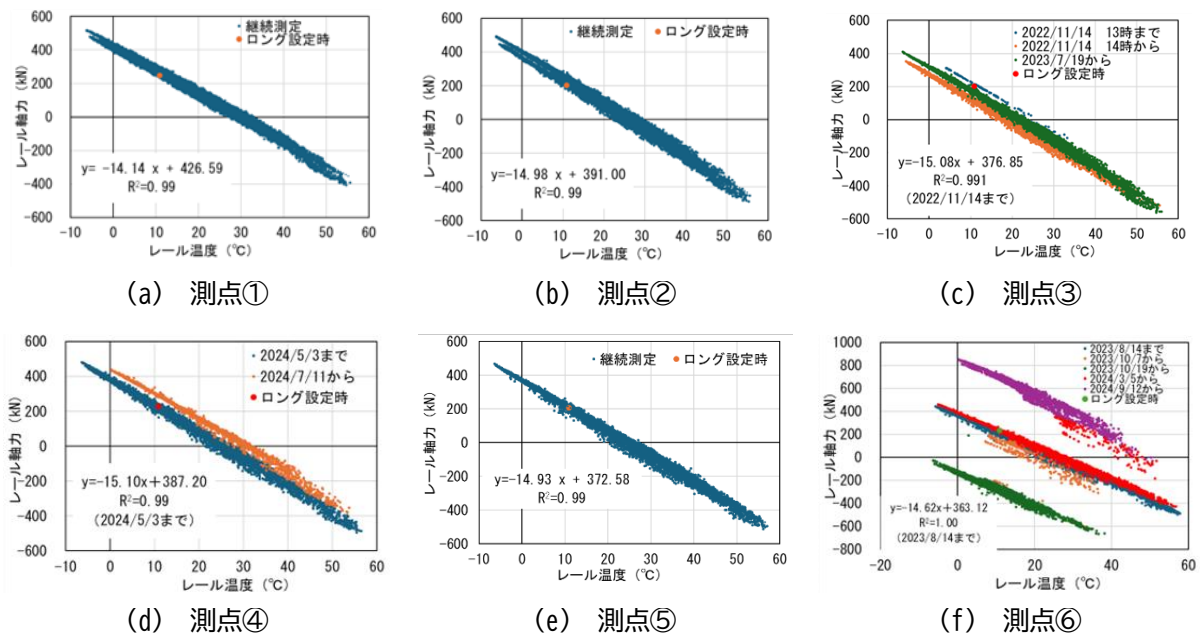


図13 レール軸力とレール温度の関係

定温度と同程度だった。図 13 (b)より、測点②の中立温度は $26^{\circ}\text{C}\pm 4^{\circ}\text{C}$ であり、設定温度より低い傾向がみられた。図 13 (c)より、測点③は前述の不具合により、測定値がシフトしている傾向がみられ、シフト後の中立温度は $20^{\circ}\text{C}\pm 4^{\circ}\text{C}$ であり、設定温度より低い傾向であった。図 13 (d)より、測点④についても不具合の復旧前後で値がシフトしていた。この影響を除けば、中立温度は 30°C 程度であり、設定温度と同程度であった。図 13 (e)より、測点⑤の中立温度は $24^{\circ}\text{C}\pm 4^{\circ}\text{C}$ であり、設定温度より低い傾向がみられた。図 13 (f)より、測点⑥は不具合の復旧の前後で値がシフトしていた。それ以外の時期においてレール軸力とレール温度の関係をみると、概ね線形の範囲にある傾向がみられた。

図 14 に、各測点における中立温度の経時変化を示す。なお、中立温度は、以下の式(3)より算出した。

$$T_n = \frac{P}{EA\beta} + T_d \quad (3)$$

T_n : 中立温度 ($^{\circ}\text{C}$)

T_d : レール温度の測定値 ($^{\circ}\text{C}$)

図 14 (a),(b)より、測点①②の中立温度は、長期的にみて概ね上昇傾向にあり、測定期間中に約 4°C の上昇がみられた。図 14 (c)より、測点③の中立温度は、前述の不具合により、レール締結装置の再緊締によるひずみ値の変化を受け、中立温度が急変している。その後は長期的にみて上昇傾向であった。図 14 (d)より、測点④の中立温度は、測点①②③と同様に上昇傾向であるが、不具合の影響を除いた増加量は $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 程度

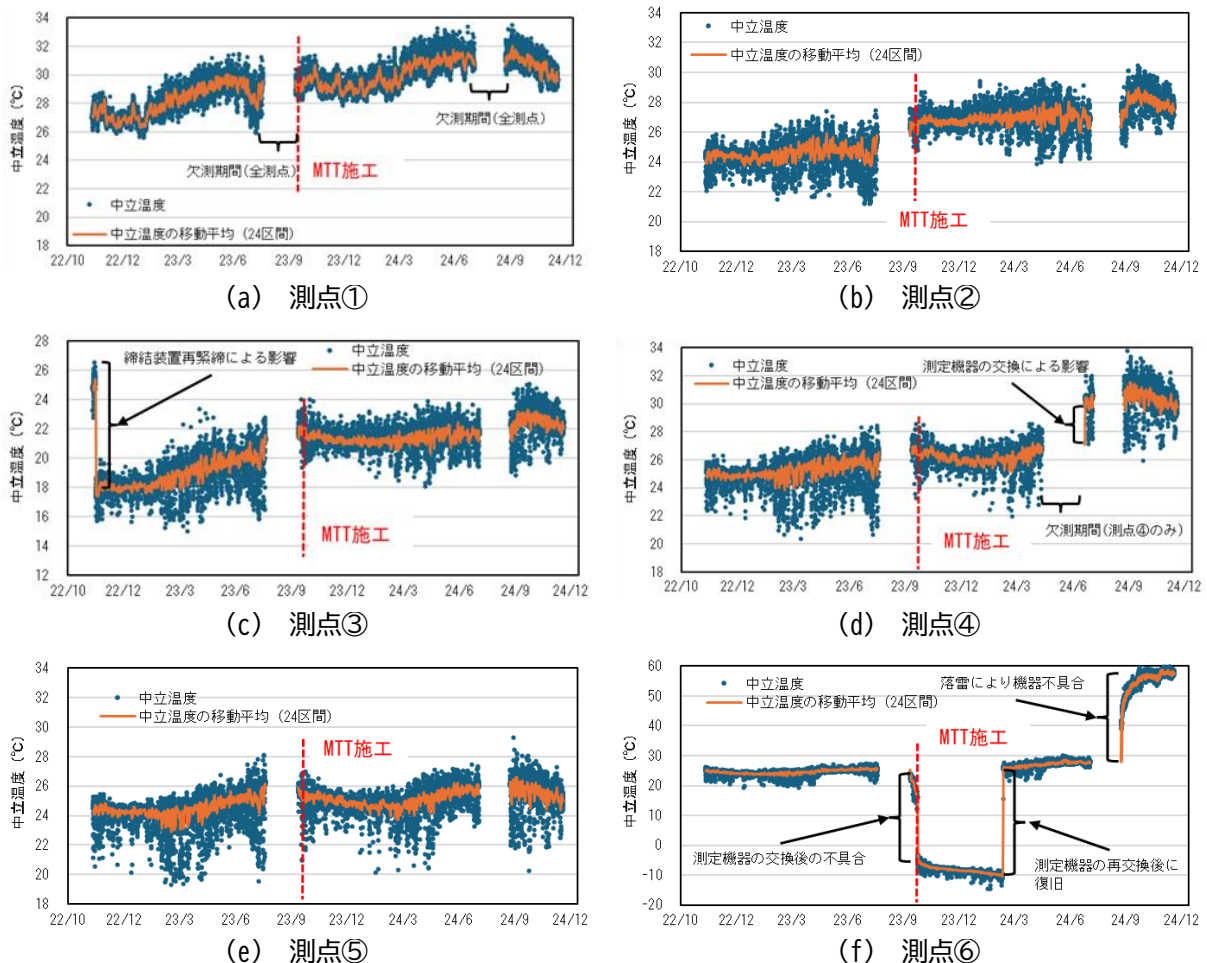


図 14 各測点の中立温度の変化

と測点①②③より小さい傾向であった。図 14 (e)より、測点⑤の中立温度は、平均値 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 程度の範囲で増減を繰り返す傾向がみられた。図 14 (f)より、測点⑥の中立温度は、不具合による復旧の前後で急変しているものの、それ以外の期間では変化が少なく、安定した傾向がみられた。

以上の結果より、中立温度の経時変化の傾向を確認すると、測点①②③④では増加傾向であったが、測点⑤⑥では明確な傾向がみられなかった。このような結果となった理由として、測点④付近は、図 11 で示すように列車進行方向からみて 6‰の下り勾配から 4‰の上り勾配への勾配方向が変化する箇所であり、測点①②③は上り勾配区間であることから列車の力行の影響を受けた可能性があるが、他に裏付ける結果は得られなかった。また、全測点において中立温度が低下する傾向がみられなかったことから、今回の検討した条件では、中立温度の経時変化により、想定を上回るレール軸力が発生する可能性は低いと考えられる。

次に、保守作業による中立温度の変化を確認すると、測点③では、前述の不具合によりレール交換時のレール締結装置の再緊締によるレール応力の増加により、見かけ上の中立温度は急変したが、それ以外の測点においては変化がみられなかったため、レール締結装置の再緊締が及ぼす中立温度への影響は小さいと考えられる。また、マルチプルタイタンパ（以下、「MTT」という）によるつき固め作業が 4km130m から 4km975m のロングレール交換の全範囲にわたって実施されたが、施工前後で中立温度は測点⑥以外では顕著な変化はみられなかった。測点⑥においても、測定機器の再交換後の中立温度が、MTT 作業前の中立温度と同程度となったことから、MTT 作業が及ぼす中立温度への影響は小さいと考えられる。以上の結果は、試験箇所が直線区間のため、保守作業によるレール軸力の変化が小さかったものと考えられる。そのため、線形等の条件が異なる箇所では結果が異なる可能性があることは留意が必要である。

図 15 にレールのふく進量の推移およびレール軸力の測定位置におけるレールの伸縮量を示す。なお、図中のふく進量に記載の矢印はふく進方向を表しており、レールの伸縮量は収縮側を正とし記載している。レール軸力の測定箇所におけるレール伸縮は、測定点により伸縮方向が異なっており、測点①③では収縮側で、測点②⑤⑥では膨張側で、測点④は収縮側および膨張側を繰り返すように推移していた。この結果より、中立温度の経時変化とレールの伸縮方向の関係は、測点①②③④では、前述のとおり中立温度の経時変化は増加傾向であったが、レールの伸縮方向は測点により方向が異なっていた。特に、測点②では中立温度が減少する膨張側で推移しており逆の傾向であった。測点⑤⑥では、前述のとおり中立温度の経時変化に明確な傾向はみられなかったが、レールの伸縮方向はいずれも膨張側で推移していた。

以上の結果のとおり、中立温度の経時変化とレール伸縮方向の傾向が一致しない箇所が確認された。理由として、ふく進量の測定誤差の影響も想定されるが、ふく進量 1mm が中立温度 0.88°C 相当であることを考えると測定誤差のみが原因である可能性は低いと考えられる。その他の理由として、局所的な範囲で中立温度の変化が生じており、今回実施したふく進測定ではその変化をとらえられなかったことも可能性として考えられる。

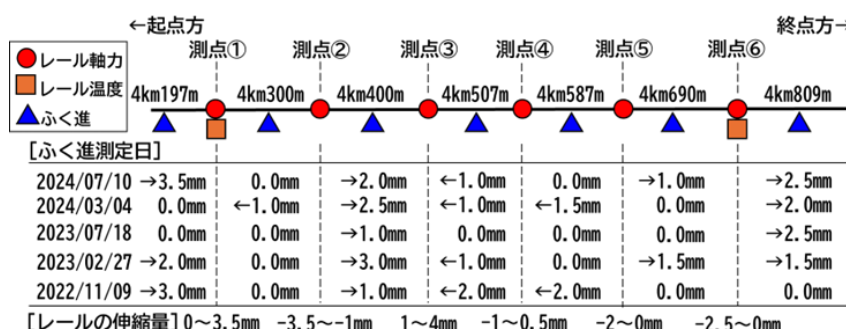


図 15 各測点のレールふく進量とレールの伸縮量

4. まとめ

本研究では、中立温度の変化特性を把握するため、営業線のふく進量の変化を軌道構造に着目し分析するとともに、ロングレールのレール軸力とレール温度を敷設時より長期間測定した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 駅構内および駅間、軌道構造、線形、勾配、EJ から杭の距離およびロングレールの全長を分析項目とし、ふく進量との相関性を確認した結果、ふく進量が大きい箇所において、直結系軌道区間、曲線区間、10%以上の勾配箇所および EJ から杭の距離が 250m 未満の箇所の割合が高くなることを確認した。
- (2) 今回検討した条件および分析項目では、ふく進に与える影響は、勾配の大きさが 10%以上の箇所、EJ から杭の距離が 250m 未満の箇所、直結系軌道区間、曲線区間、ロングレールの全長が 1km 未満の箇所の順で大きいことがわかった。
- (3) レール軸力およびレール温度を長期測定した結果、測定箇所において中立温度は増加側に化する傾向であった。また、MTT 作業等の保守作業に起因する中立温度の変化の可能性が低いことがわかった。ただし、今回の測定では中立温度の変化傾向を把握したものの、軌道構造等との関係性については未解明な点も多く、体系化には今後の検証や追加の測定が必要となる。

文 献

- 1) 佐藤弘規, 西宮裕騎, 玉川新悟: 緊張器を用いたロングレール敷設直後の中立温度の評価, 土木学会全国大会 第 78 回年次学術講演会, VI-540, 2023
- 2) 玉川新悟, 西宮裕騎, 太田晋一, 中野哲弥: 冬季低温時の道床交換作業が急曲線ロングレールのレール内方変位とレール軸力の変化に及ぼす影響, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.889, 2020
- 3) 柏谷賢治: 磁気レール軸力計とその適用法, 新線路, Vol.49, No.3, pp.23-25, 1995
- 4) 松谷 真吾, 西宮 裕騎, 玉川 新悟, 細見 章人: 営業線のロングレール軸力の長期計測とふく進量の実態調査に基づく中立温度の変化特性, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.29, No.1, pp.57-64, 2025
- 5) 宮本俊光, 渡辺偕年 編: 線路-軌道の設計・管理, p539, 1980
- 6) 片岡宏夫, 岩佐裕, 大塚孝, 渡部弘信, 佐古武彦: まくらぎ直角変位の発生メカニズムと抑制策, 鉄道総研報告, Vol.22, No.8, pp.17-22, 2008

全球可視要素を用いたレール温度の
昼夜・長期連続解析手法

浦川 文寛* 渡辺 勉*

Long-Term Continuous Day-and-Night Analysis of Rail Temperature
Using an All-Sphere Visible Element

Fumihiko URAKAWA Tsutomu WATANABE

This paper proposes a method for long-term, continuous day-and-night analysis of rail temperature. The method is based on a weakly coupled framework that combines detailed thermal evaluation of solar and longwave radiation with heat conduction analysis, using an all-sphere visible element. Atmospheric attenuation of longwave radiation and reflected radiation from surrounding objects is modeled using the Lambert-Beer law, with absorption coefficients adjusted for seasonal water vapor conditions. Validation against field measurements showed that the RMSE of the analyzed rail temperature ranged from 1.4 °C to 2.5 °C in summer and 1.6 °C to 2.1 °C in winter.

キーワード：レール温度解析，軌道座屈，日射，地物の長波放射，熱伝導解析，全球可視要素

1. はじめに

主要な鉄道線路の多くで，レール同士を溶接してつなぎ，継目をなくしたロングレールが用いられている。ロングレールでは，レール継目でのレール伸縮を吸収する機能がなくなるため，温度応力によって大きな軸力が発生する。これにより，高温時（夏季の昼間）は軌道座屈，低温時（冬季の夜間）はレール破断の危険性が高まる。これらは脱線につながる重要な事象であり，鉄道事業者は，過去のレール温度の測定値から想定される年間の最高レール温度と最低レール温度を予測し，高温時と低温時の両方で著大な軸力が生じないように，レールの中立温度（軸力がゼロとなる温度）を所定の範囲で保持している。また，レール温度計を数 km～数十 km の間隔で設置して温度を常時監視し，夏季においてレール温度が高温となった場合は，巡回や運転規制（徐行，運休）等の処置をとる等，軌道座屈対策に多大な労力を費やしている。

レールは昼間に日射を受けて温度が上昇し，夜間に放射冷却によって温度が低下する。その際，周囲の地物（建物，樹木など，地上にある物体の総称）による日陰は昼間の温度上昇を抑制し，地物が発する長波放射は夜間の温度低下を緩和させる。筆者らは，レール温度を前記地物の影響を含めて詳細に予測し，レール軸力を効率的に管理するため，文献 1 にて日射量評価に基づく昼間のレール温度解析手法，文献 2 にて周辺地物の長波放射評価に基づく夜間のレール温度解析手法を開発した。前者は夏季の最高レール温度と昼間の温度変化の予測，後者は冬季の最低レール温度の予測を目的としており，いずれも昼と夜の解析を半日単位でしか解析できず，長期の解析には対応していない。既往研究における最高レール温度の予測では，過去の統計データから夏季の代表的な気象条件を設定して半日程度の解析を行い，レール温度が高い場所を軌道座屈の危険箇所として抽出した¹⁾。しかしながら，レール温度は太陽との相対角度や日陰が強く影響し，かつそれらは太陽の日周・年周運動によって変化するため，設定した気象条件と解析日が，全ての場所に対してレール温度が年間の最高値となる条件とは限らない。レール温度の長期間の連続解析が可能となれば，レール温度の上昇を隈なく把握できるとともに，過去の推定レール温度とその統計から，軌道

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

座屈に対する場所毎の安全性をより詳細に評価できる。

レール温度の長期間の連続解析には、日射と周辺地物の長波放射を同時にモデル化し、昼と夜のレール温度解析を連続して行う必要がある。既往研究における日射のモデル化¹⁾では、一般的な日射量解析³⁾と同様、DSM (Digital Surface Model; 地物の高さを含む標高のメッシュデータ) から地物の形状を取得し、受熱面 (ここではレール) から見て水平面より上の半球内で可視領域 (空が見える角領域) を定義し、日射による放射熱を角領域で計算していた。一方、長波放射のモデル化²⁾では、道路表面の温度予測における手法⁴⁾を踏襲し、DSM のメッシュ毎に長波放射を計算していたが、この方法では計算量が膨大となり、長期の解析への対応が難しい。そこで、地物を受熱面であるレール表面から見た球面に投影し、長波放射と日射を角領域で同時に計算する。その際、レールの複雑な 3 次元形状に対応するため、日射のモデル化における半球を、水平面から下の領域まで拡張する。本稿ではこれを「全球可視要素」と呼び、全球可視要素を用いた詳細な熱評価と熱伝導解析の弱連成による、レール温度解析手法を新たに提案する。また、既往のレール温度測定結果と比較し、解析精度を検証する。

なお、本稿は文献 5 の要部を抜粋して再構成したものである。

2. 全球可視要素を用いたレール温度解析手法

2.1 解析モデルの概要

2.1.1 モデルの構造

節点配置について、図 1 に示すとおり、GIS の線路データを用いて軌道中心節点 i_x ($=1, 2, \dots, n_x$) を下り方向 (線路の起点から終点に向かう方向) におおよそ 1 m 間隔で与える。さらに、軌道中心から軌道直交方向に所定の距離 d_R 離れた位置に左レールと右レールの温度解析節点 i_{xRl} , i_{xRr} を設置する。さらに、温度解析節点 i_{xRl} , i_{xRr} がレール底部中心となるような仮想断面を与え、その周囲に熱収支計算節点 i_{sRl} ($=1, 2, \dots, n_{sRl}$) , i_{sRr} ($=1, 2, \dots, n_{sRr}$) を配置する。なお、本研究はレール長手方向の一次元温度解析であるため、温度解析節点の断面内位置による影響は小さく、節点定義の簡便さを考慮してレール底部中心を採用している。ここで、レールは絶対温度の 4 乗に比例する長波放射 R_G を放出し、反対側のレールはその長波放射を吸収して温度が変化する。このように、左右のレール温度は相互に影響を及ぼすため、本解析では左右レールの温度解析を同時に行い、片側のレール温度の解析結果を、反対側のレールの吸収熱計算に反映させる。本稿の記述のルールとして、左レール、右レールに関するパラメータ等に対しては下付きの「 Rl 」, 「 Rr 」を添えて両者を区別する。また、左右レールの両方を指す、あるいは両方に共通するパラメータ等に対しては下付き「 R 」を添える。

座標系について、図 1 に示すとおり、線路の長手方向を局所座標系の x 軸とし、下り方向を $+x$ とする。線路の直交方向を y 軸とし、下り方向を見て左側を $+y$, 右側を $-y$ とする。また、鉛直方向を z 軸とし、上

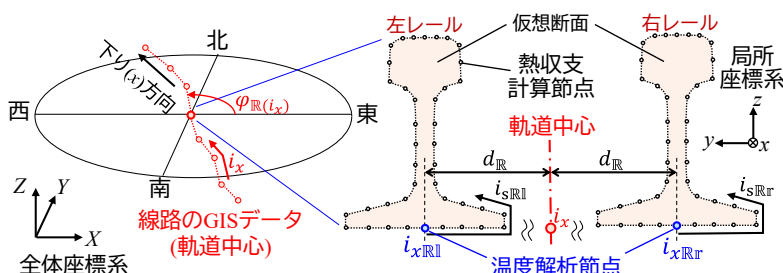


図1 線路のGISデータに基づく解析モデルの構造

向きを $+z$ とする。また、全体座標系は使用する GIS データに準じ、東西方向を X 軸（東向きを $+X$ ）、南北方向を Y 軸（北向きを $+Y$ ）、鉛直方向を Z 軸（上向きを $+Z$ ）とする。 X 軸から東→北→西回りの方位角を φ 、 Z 軸からの天頂角を θ とする。レールの敷設方向、つまり位置 i_x における局所座標系の全体座標系に対する方位角を $\varphi_{R(i_x)}$ とする。

2.1.2 計算概要

本モデルは、レールの初期温度 $T_{R(t_0, i_{xR})}$ を設定した後、表面の熱収支（吸収熱－排出熱）を時刻 t 毎に算出し、それを入力値としたレール長手方向の熱伝導方程式を陽解法で解いて Δt 後の温度分布を計算する。これを指定時刻まで繰り返す。この基本的な計算手法は既往のレール温度解析モデル¹⁾²⁾と同じだが、図2(a)に示す日射および長波放射による吸収熱のモデル化に、図2(b)に示すレール表面上の点 i_{sR} から全方位を見た先にある地物または空の配置（本稿では「可視要素」と呼ぶ。）を単位半径の3次元極座標系で表した全球可視要素 $E_{V(\varphi, \theta)}$ を用いている点が既往研究と異なる。

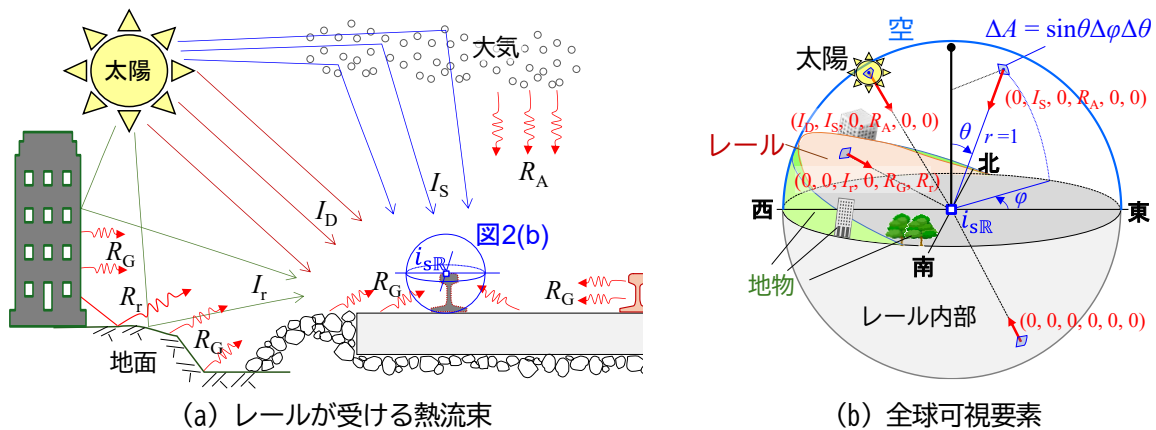


図2 全球可視要素を用いたレール表面 i_{sR} が受ける熱流束のモデル化手法。ここで、 I_D : 直達日射、 I_S : 散乱日射、 I_r : 地物表面の反射日射、 R_A : 大気の長波放射、 R_G : 地物の長波放射、 R_r : 地物表面の反射長波放射。

2.2 全球可視要素の算出方法

全球可視要素は、可視要素を方位角 $\varphi = 0 \sim 2\pi$ 、天頂角 $\theta = 0 \sim \pi$ の全角領域に対して $\Delta\varphi$ 、 $\Delta\theta$ 毎に定義し、 $\Delta\varphi$ 、 $\Delta\theta$ はいずれも 1° とする。また、全球可視要素は、全てのレール表面、つまりレール片側当たり、レール長手方向の温度解析節点数 n_{xR} ×仮想断面の節点数 n_{sR} 個必要である。そのため、軌道延長が長大となった場合、全球可視要素を全レール表面で1つ1つ計算すると計算量が膨大となる。ここで、レールの同一仮想断面上の2点間の距離は、JIS 60kg レールで最大約0.2mと、レールからレール以外の地物までの距離と比較して小さい。よって、レール表面 i_{sR} から見たレール以外の地物の配置は、 i_{sR} によってほぼ変化しない。また、レールの長手方向と左右レールの相対距離はミリメートル単位で整備されているため、レール表面 i_{sR} と他のレール表面上の点との位置関係は、位置 i_x によらず同一と考えて良い。

そこで、全球可視要素の計算では、図3に示すとおり、まず、レール表面上の1点（本モデルでは温度解析節点 i_{xR} ）からレール以外の地物を見た全球可視要素を E_{V1} とし、これを i_{xR} 毎に求める。次に、レール表面 i_{sR} からレールのみを見た全球可視要素を E_{V2} とし、これを i_{sR} 毎に求める。さらに、 E_{V2} をレールの敷設方向を表す方位角 $\varphi_{R(i_{xR})}$ だけ回転させ、 E_{V1} に重ね合わせることで、レール表面 i_{sR} からレールを含む地物を見た全球可視要素を得る。この手法を用いることで、 $n_{xR} \times n_{sR}$ 個の全球可視要素を得るための計算数量を $n_{xR} + n_{sR}$ 回に削減できる。なお、図3および以降に全球可視要素を描写する際、本来は球面である全球可視要素を、横軸を方位角 φ 、縦軸を天頂角 θ とする2次元平面直角座標で表示する。そのため、水平面（ $\theta =$

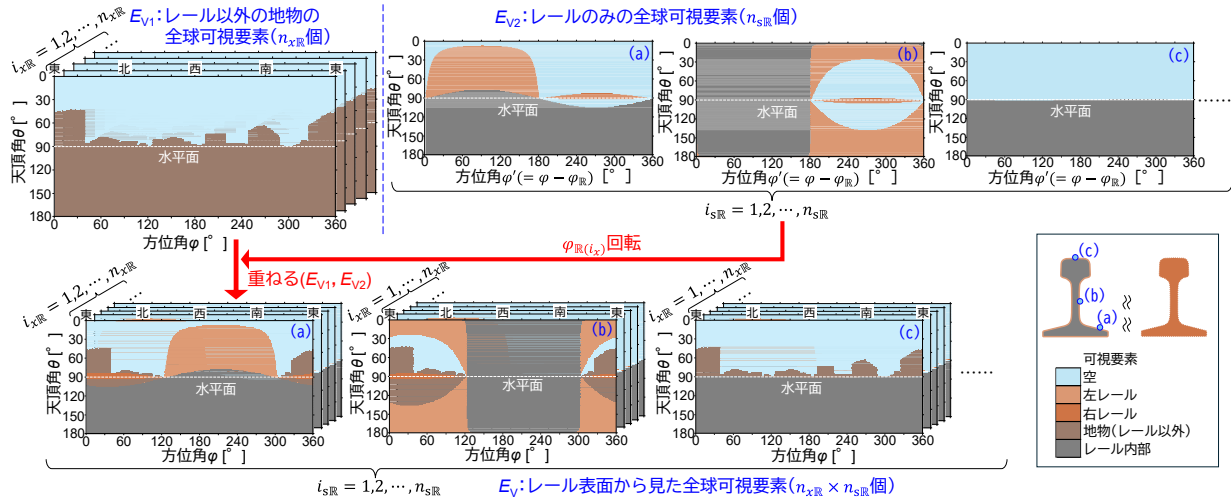


図3 2つの全球可視要素(E_{V1} , E_{V2})の重ね合わせによる、レール表面から見た全球可視要素 E_1 の算出方法

90°) から遠ざかるほど、描写する形状に歪みが生じることに注意されたい。

全球可視要素 E_{V1} , E_{V2} の算出方法を以下に述べる。

2.2.1 レール以外の地物の全球可視要素 E_{V1}

全球可視要素 E_{V1} は、レール以外の地物の形状を DSM から取得して算出する。その際、図4に示すとおり、温度解析節点 i_{xR} から見た水平距離 R_{max} (1 km 程度) 以内、方位角 $\varphi \pm \Delta\varphi / 2$ の範囲内の DSM を抽出する。さらに、 i_{xR} から見た地物の最大仰角 h_{max} を計算し、 h_{max} より上では可視要素は「空」、 h_{max} より下では可視要素は「地物」とする。これを全方位 φ に対して行うことで、 E_{V1} を得る。

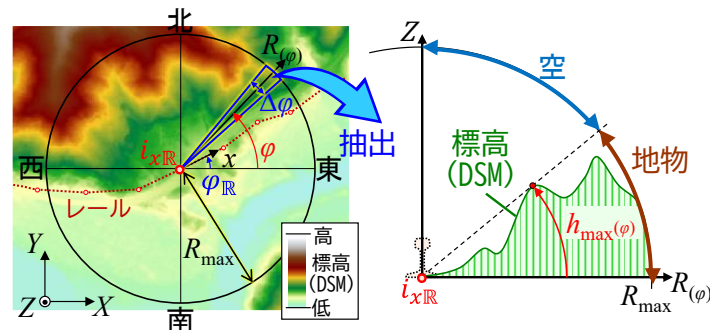


図4 レール以外の地物の全球可視要素 E_{V1} の算出方法

図5に示す DSM を用い、実軌道における全球可視要素を試算する。図5中の T1~T11 は、既往研究^{1) 2)}にて実施したレール温度測定試験の測点であり、図5の DSM は国土地理院が提供する基盤地図情報の一つである 5m メッシュの DEM (Digital Elevation Model; 建物等の地物を含まない地表面の標高メッシュデータ) に、建物の高さを加算して作成したデータである。

図6に、測点 T2, T4, T9 からレール以外を見た全球可視要素 E_{V1} の計算結果、および各測点のレール頭頂面にサーモグラフィカメラを設置して測定した周囲の地物の配置²⁾を示す。図6上図のサーモグラフィカメラの測定結果では、建物等の地物が存在する方向からは放射熱が高いため、白~赤色で描写される。図6(a), (b)より、測点 T2 と T4 では、算出した全球可視要素 E_{V1} は、図5の DSM に含まれない電架柱、踏切設備を除き、実際の建物の配置をよく再現していることが分かる。図6(c)より、測点 T9 から見て建物3が存在する方位角 φ は、実測(図6(c)上図)では $\varphi = 220^\circ \sim 290^\circ$ であるのに対し、算出した E_{V1} (図6(c)下図)では $\varphi = 190^\circ \sim 290^\circ$ である。両者に差が生じている箇所は建物3から張り出した階段部分であり、この張

り出し幅を DSM (図 5) と実物 (航空写真) とで比較したところ, 前者の方が大きかった. よって, 測点 T9 における建物 3 に関する E_{V1} の誤差は, 使用した建物データの精度が原因と思われる. また, 図 5 の DSM は, 図 6(c)上図の $\varphi = 180^\circ$ 付近に見られる樹木と塀を含まないため, E_{V1} の計算結果 (図 6(c)下図) にも反映されていない. これら以外の建物等の配置は, 計算と測定で概ね一致する.

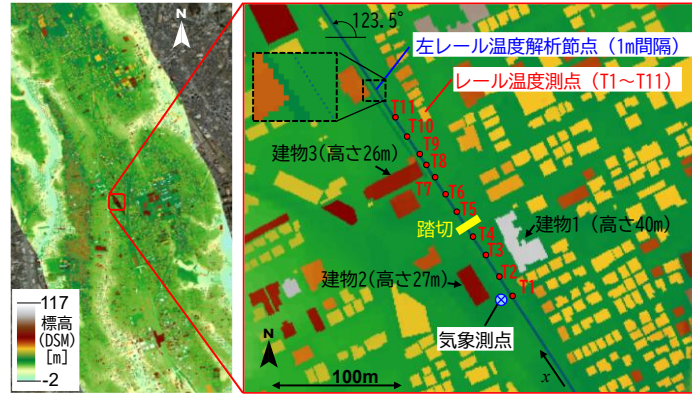


図 5 実軌道でのレール温度測定試験¹⁾²⁾におけるレール温度・気象測点とその周囲の DSM

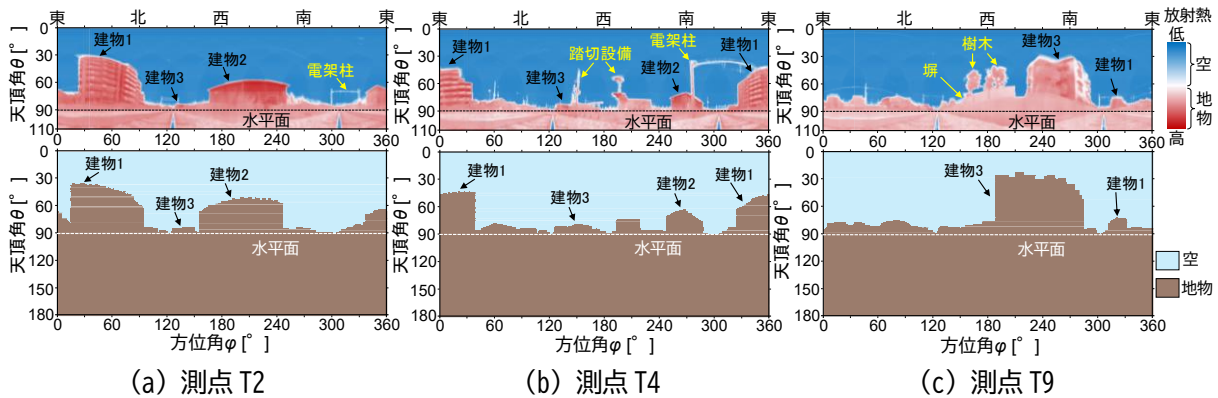


図 6 実軌道 (図 5) でのレール以外の地物の全球可視要素 E_{V1} の計算結果 (下図) とサーモグラフィカメラによる周辺地物配置の測定結果 (上図) の比較

2.2.2 レールのみの全球可視要素 E_{V2}

全球可視要素 E_{V2} を計算する際は, 図 7 に示すとおり, レールの仮想断面の節点配置を用い, 左右レールを x 方向に $\pm 100\text{m}$ の長さを持つ平面の集合でそれぞれモデル化する. そして, レール表面 i_{sR} から (φ, θ) 方向への視線を表すベクトル $\vec{d}$ と平面 j_s の交差判定を行い, $\vec{d}$ と交差し, かつ i_{sR} から交点までの距離 s が最も短い平面 j_s を (φ, θ) 方向の可視要素とし, 交差する平面がない場合は可視要素を「空」とする. これを全ての (φ, θ) 方向に対して行うことで, E_{V2} を得る. この交差判定には, Tomas Möller のアルゴリズムによるレイと三角形の交差判定法⁶⁾を用いる.

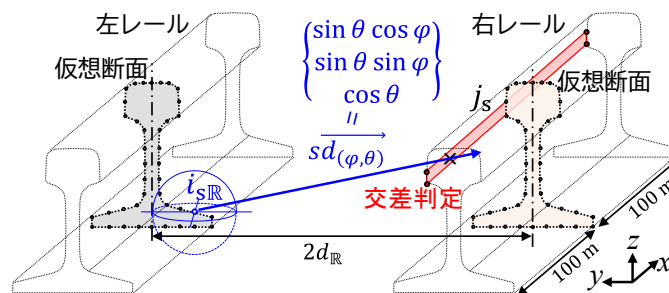


図 7 レールのみの地物の全球可視要素 E_{V2} の算出方法

図 8 に、図 5 の試験箇所と同様、JIS 60kg レールが軌間 1067 mm (レール中心間距離 $2d_R = 1.14$ m) で設置された軌道に対し、左レール右側の底部上面、腹部、顎部、および頭頂面における全球可視要素 E_{V2} を算出した結果を示す。さらに、図 8(a), (b) を $\varphi_R = 123.5^\circ$ 回転させて図 6(b) に重ね合わせ、図 5 の測点 T4 の左レール右側の底部上面と腹部における全球可視要素 E_V を算出した結果を図 9(a), (b) に示す。図 9(a) より、左レール右側の底部上面からでは、軌道の左側に位置する建物 2 と建物 3 は左レールの腹部等の背後に隠れることが分かる。また、図 9 には 8 月 1 日の太陽位置を 1 時間ごとにプロットで示しており、太陽位置に対応する可視要素が「空」となる時間帯は日向を意味する。図 9(a) より、左レール右側の底部上面では 8 時 30 分頃から 11 時 30 分頃まで日向となり、図 9(b) より、腹部では 9 時頃のみ日向となることが分かる。

このように、提案手法により算出した全球可視要素 E_V にて、実際の建物配置とそのレールの 3 次元形状との競合を再現でき、かつレール表面各部における日向/日陰を詳細に判別できることを確認した。

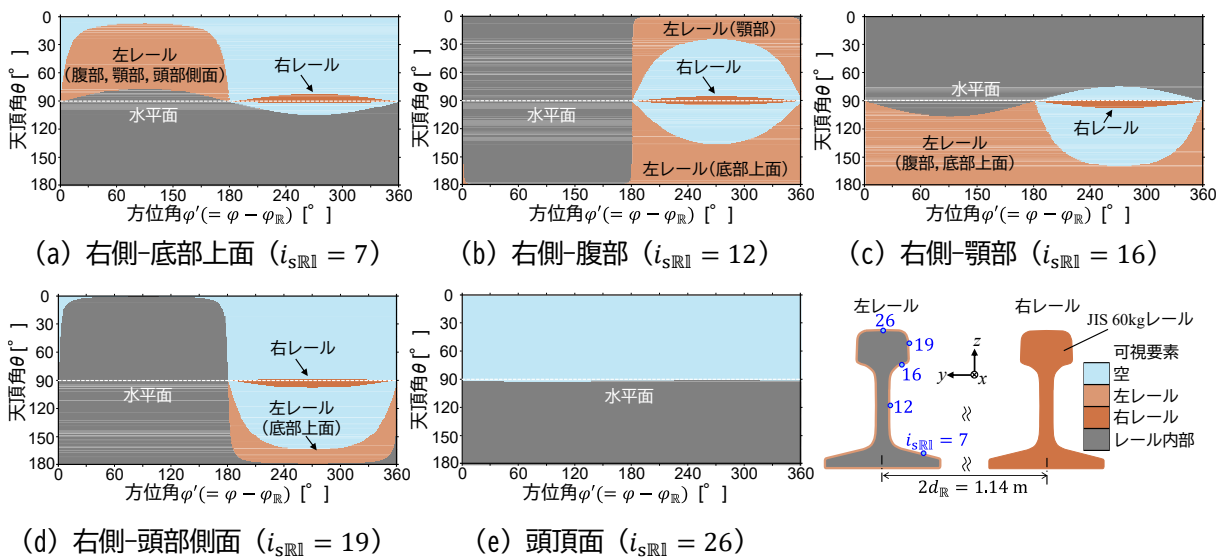


図 8 在来線軌道 (JIS 60kg レール, 軌間 1067 mm) の左レールにおける、レールのみの全球可視要素 E_{V2} の計算結果

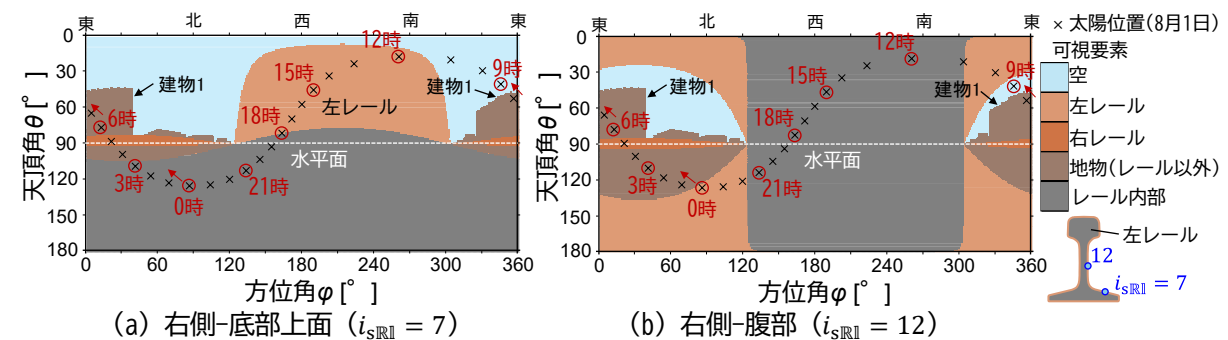


図 9 測点 T4 (図 5) の左レールにおける全球可視要素 E_V の計算結果と太陽位置の比較

2.3 レールの吸収熱

レールが吸収する主要な熱流束として、太陽が発する短波長の放射熱 (日射), および大気や周辺の地物が発する長波長の放射熱 (長波放射) がある。本モデルでは図 2(a) に示すとおり、レール表面 i_{sR} が受ける日射として、直達日射 I_D , 散乱日射 I_S , 地物表面反射日射 I_r , i_{sR} が受ける長波放射として、大気の放射熱 R_A , 地物の放射熱 R_G , および地物表面反射放射熱 R_r を考慮する。図 2(b) に示すとおり、可視要素が「空」でかつ太陽がある方向からは (I_D , I_S , R_A), 太陽がない方向からは (I_S , R_A), 可視要素が地物の方向か

らは (I_r, R_G, R_A) の熱流束を受け、レール内部からの熱流束はゼロとする。このように、「空」以外の領域で直達日射と散乱日射をゼロとすることで、地物による日陰を再現できる。ここで、日射の遮蔽や反射は地物だけでなく雲によっても生じ、雲量の増加によって直達日射 I_D は減少し、日射が大気で反射して地表に届く散乱日射 I_S は増加する。また、大気の放射熱 R_A も雲量の増加に伴い増加する。その結果、一般的に、雲量が多い程昼間のレール温度は低くなり、夜間のレール温度は高くなる。本解析モデルでは入力する I_D, I_S, R_A に、地表付近での気象観測値等、雲の影響を含む値を適用することでこれを考慮する。

日射に対してはレール表面 i_{sR} の日射吸収率 ε_{IR} を、放射熱に対しては長波放射率 ε_{RR} をそれぞれ乗じて i_{sR} 毎に合計し、さらに表面 i_{sR} の面積 a を乗じてレール断面の周方向で合計した次式より、熱伝導解析節点 i_{xR} の吸収熱 $Q_{INR}(i_{xR})$ を得る。

$$Q_{INR}(i_{xR}) = \sum_{i_{sR}=1}^{n_{sR}} a \varepsilon_{IR} (\Sigma_{\varphi, \theta} I_D \Delta A + \Sigma_{\varphi, \theta} I_S \Delta A + \Sigma_{\varphi, \theta} I_r \Delta A) + \sum_{i_{sR}=1}^{n_{sR}} a \varepsilon_{RR} (\Sigma_{\varphi, \theta} R_A \Delta A + \Sigma_{\varphi, \theta} R_G \Delta A + \Sigma_{\varphi, \theta} R_r \Delta A) \quad (1)$$

ここで、式(1)の各種熱流束は時刻 t および (φ, θ) の関数であり、これを $\Omega_{(t, \varphi, \theta)}$ とする。表面 i_{sR} が受ける熱流量の計算は、 $\Omega_{(t, \varphi, \theta)}$ を全球可視要素 E_v における (φ, θ) の全領域で数値積分することを基本的な考え方とするが、 (φ, θ) の数値積分を時刻 t 毎に行うと計算量が膨大となる。そこで、本モデルでは、表面 i_{sR} が受ける熱流量 $\Sigma_{\varphi, \theta} \Omega \Delta A$ を、 $\Omega_{(t, \varphi, \theta)}$ を時刻 t に関する項 $W_{(t)}$ と (φ, θ) に関する項 $G_{(\varphi, \theta)}$ に分離した式(2)より求める。この場合、 (φ, θ) の数値積分は、 $G_{(\varphi, \theta)}$ に対して熱伝導解析（時刻 t に関する計算）の前に 1 回行えば良い。

$$\Sigma_{\varphi, \theta} \Omega_{(t, \varphi, \theta)} \Delta A = W_{(t)} \Sigma_{\varphi, \theta} G_{(\varphi, \theta)} \Delta A \quad (2)$$

なお、式(2)の $W_{(t)}$ は日射量等の気象条件と地物の温度、 $\Sigma_{\varphi, \theta} G_{(\varphi, \theta)} \Delta A$ は吸収熱計算のための各種パラメータ $F_{skyR}, g_{rDR}, g_{rSR}, g_{GR}, g_{RA}$ に該当する。各種熱流束の定式化等の詳細は文献 5 を参照されたい。

2.4 空気による長波放射の減衰のモデル化

2.4.1 ランベルト・ベールの法則に基づく減衰のモデル化

地上の常温の物体が発する波長 10 μm 前後をピークとする長波放射は、二酸化炭素等の所謂温室効果ガスや水蒸気に吸収されやすいため、長波放射は空気を通してつれてその強度が減少する。図 2 のモデルにおいて、地物が存在する方角からレールが受ける長波放射は、地物の長波放射 R_G と反射長波放射 R_r であり、図 10 のように、両者の和 $\Omega_{R(0)} (=R_G+R_r)$ が距離 D の空気を減衰しながら通過してレールに到達する場合を考える。ランベルト・ベールの法則によると、媒質中を強度 Ω の光が微小距離 dD 進む時、光の強度 Ω の減少 $-d\Omega$ は、光の強度 Ω 、進んだ距離 dD 、および媒質の濃度に比例する。地物からの長波放射が空気中を進む際の減衰がこれに従うならば、距離 D の空気を通過する前後の長波放射の比 $\Omega_{R(D)}/\Omega_{R(0)}$ は式(3)となり、これを透過率 τ_Ω と定義する。

$$\tau_\Omega := \frac{\Omega_{R(D)}}{\Omega_{R(0)}} = e^{-\xi D} \quad (3)$$

ここで、 ξ は空気の長波放射に対する吸光係数であり、これが大きいほど長波放射が減衰しやすく、透過率 τ_Ω が小さくなる。

本モデルでは、 ξ を入力パラメータとし、 (φ, θ) 方向の地物までの距離 $D_{(\varphi, \theta)}$ を 2.4.3 項のとおり求め、

長波放射の透過率 τ_Ω を式(3)より (φ, θ) 毎に算出する。これを地物の長波放射 R_G と反射長波放射 R_r に乘じることで、減衰をモデル化する。ここで、光の減衰特性は波長 λ によって異なるため、吸光係数 ξ を λ 毎に設定し、レールに到達する長波放射を λ 毎に算出しなければならない。しかしながら、実レール周囲の地物が発する長波放射を、波長 λ に対する強度分布まで含めて把握することは現実的ではない。そこで、本稿では工学的な実用性を鑑み、吸光係数 ξ を、常温の物体が発する長波放射の波長帯域内では λ によらず一定とする。さらに、 ξ には実レール温度を再現可能な値をパラメータスタディにより同定した値を適用する。なお、空からの長波放射に対しては、地表面付近で観測した下向き赤外放射 R_D を参照しているため減衰を与えない。

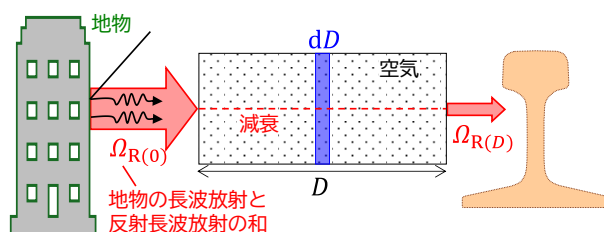
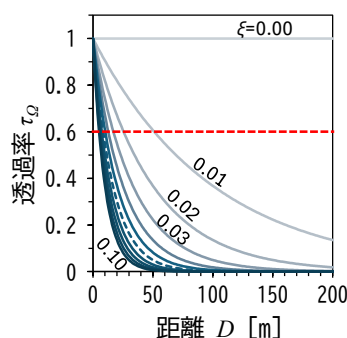


図 10 地物～レール間の空気による長波放射の減衰

2.4.2 長波放射の透過率 τ_Ω の下限値

式(3)で定義する透過率 τ_Ω 、吸光係数 ξ 、距離 D の関係を図 11(a)に示すが、 $\xi = 0.03$ の場合、レールから地物までの距離 D が 150 m で透過率 τ_Ω がほぼゼロ、つまり地物が存在する方向からの長波放射がゼロとなる。しかしながら、実際には地物～レール間の空気も長波放射を放出するため、空気による地物～レール間の減衰を与えるならば、空気が放出する長波放射も同時にモデル化しなければ実現象との整合性が取れない。地物～レール間の空気の長波放射の総量を、その途中の減衰を含めて正確にモデル化することは難しいため、本モデルでは、地物～レール間の距離 D が十分に長い場合、空気の長波放射は大気の下向き赤外放射 R_D とほぼ等しくなると仮定する。そして、距離 D が十分に長い場合、地物からの長波放射に透過率 τ_Ω を乗じた値が大気の下向き赤外放射 R_D におおよそ一致するよう、透過率 τ_Ω に下限値を設定する。

地物の温度 T 、空気の透過率 τ_Ω 、および減衰を考慮した地物の長波放射 $R_G (= \varepsilon \sigma (T + 273.15)^4 \tau_\Omega)$ の関係を図 11(b)に示す。なお、 ε は地物表面の放射率であり、ここでは地物表面の反射を含む長波放射を概算するため、 $\varepsilon = 1$ とした。気象庁つくば高層気象台における 2023 年の下向き赤外放射の観測値は、7 月と 8 月の平均で 1.51 MJ/(m²h)、1 月と 2 月の平均で 0.97 MJ/(m²h)である。また、夏季のレール温度は約 60 °C、冬季のレール温度は約 30 °Cまで上昇し、地物も同程度まで上昇すると考え、透過率 τ_Ω を乗じた地物の長波放射が下向き赤外放射と概ね等しくなる τ_Ω の下限値として、図 11(b)より 0.6 を選定する。例えば、 $\xi = 0.03$



長波放射 [MJ/m ² h]	表面温度 T [°C]							
	-10	0	10	20	30	40	50	60
1	0.98	1.14	1.31	1.51	1.72	1.96	2.23	2.51
0.9	0.88	1.02	1.18	1.36	1.55	1.77	2.00	2.26
0.8	0.78	0.91	1.05	1.21	1.38	1.57	1.78	2.01
0.7	0.69	0.80	0.92	1.06	1.21	1.37	1.56	1.76
0.6	0.59	0.68	0.79	0.90	1.03	1.18	1.34	1.51
0.5	0.49	0.57	0.66	0.75	0.86	0.98	1.11	1.26
0.4	0.39	0.45	0.52	0.60	0.69	0.79	0.89	1.01
0.3	0.29	0.34	0.39	0.45	0.52	0.59	0.67	0.75
0.2	0.20	0.23	0.26	0.30	0.34	0.39	0.45	0.50
0.1	0.10	0.11	0.13	0.15	0.17	0.20	0.22	0.25
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(a) 距離 D ・吸光係数 ξ と透過率 τ_Ω の関係(式(3)) (b) 透過率 τ_Ω ・地物の温度 T と地物の長波放射 R_G の関係

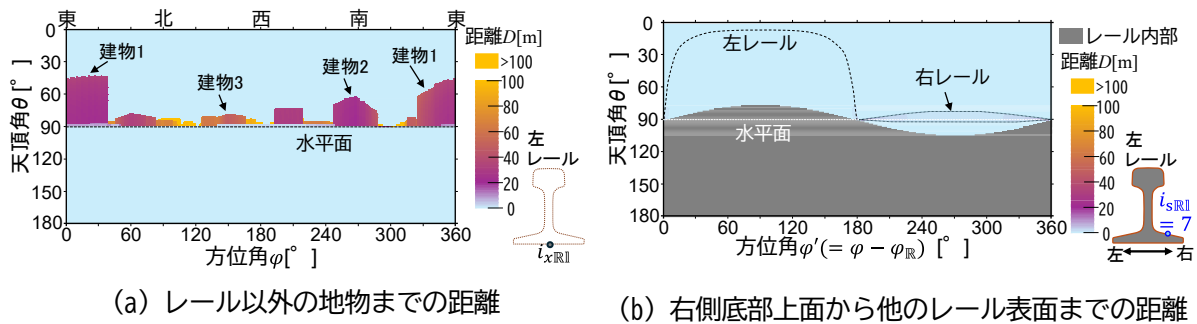
図 11 各種パラメータと空気の透過率 τ_Ω の関係

の場合、レールから地物までの距離 D が 17 m 以上では τ_D を 0.6 とする（図 11(a））。

2.4.3 地物までの距離 D の算出方法

距離 $D_{(\varphi,\theta)}$ については全球可視要素と同様、レール温度解析節点 i_{xR} からレール以外の地物を見た場合、表面 i_{sR} からレールのみを見た場合でそれぞれ算出する。前者については全球可視要素 E_{V1} と同様、 i_{xR} からの水平距離 $R_{\max}$ 以内、方位角 $\varphi \pm \Delta\varphi / 2$ の範囲内の DSM を抽出し（図 4）、 i_{xR} と DSM 間の距離 D を天頂角 θ 毎に計算する。これを全方位 φ に対して行う。後者については全球可視要素 E_{V2} を計算する際、 i_{sR} から他のレール表面までの距離 s （図 7）を求めているのでこれを参照する。

図 12 に、図 5 の測点 T4 の左レールから地物までの距離 $D_{(\varphi,\theta)}$ の計算結果を示す。同図において、計算アルゴリズムの都合上、可視要素が「空」の方向に対して距離 $D_{(\varphi,\theta)}$ は 0 となるが、前述のとおり空からの長波放射には減衰を与えないため、この値は解析に影響しない。



(a) レール以外の地物までの距離

(b) 右側底部上面から他のレール表面までの距離

図 12 測点 T4（図 5）の左レールから (φ, θ) 方向の地物までの距離 $D_{(\varphi,\theta)}$ の計算結果

2.5 レールの排出熱

排出熱は、まくらぎへの熱伝導 J_C 、空気との対流熱伝達 J_T と軌道表面からの放射熱 J_R を考慮し、これらをレール断面の周方向で合計した次式より、熱伝導解析節点 i_{xR} の排出熱 $Q_{OUTR}(i_{xR})$ を得る。

$$Q_{OUTR}(i_{xR}) = \sum_{i_s=1}^{n_s} a(J_C + J_T + J_R) \quad (4)$$

排出熱の定式化等の詳細は文献 1, 2 を参照されたい。

2.6 熱伝導解析

式(5)に示す 1 次元熱伝導方程式を陽解法で解き、時刻 t におけるレール温度 $T_{R(t,i_{xR})}$ から、 Δt 後の温度 $T_{R(t+\Delta t,i_{xR})}$ を求める。 $c_R, \rho_R, A_R, \lambda_R$ はそれぞれレールの比熱、密度、断面積、熱伝導率である。

$$\frac{\partial T_R}{\partial t} = \frac{Q_{INR}(i_{xR}) - Q_{OUTR}(i_{xR})}{c_R \rho_R A_R} + \frac{\lambda_R}{c_R \rho_R} \left(\frac{\partial^2 T_R}{\partial x^2} \right) \quad (5)$$

2.7 解析の計算フロー

本章 2.3 節～2.6 節で述べた、レールの吸収熱、空気による減衰、排出熱、および熱伝導解析の計算フローを図 13 に示す。2.3 節で述べたとおり、吸収熱計算における (φ, θ) 方向を含むパラメータ $F_{skyR}, g_{rDR}, g_{rSR}, g_{GR}, g_{rAR}$ 、および長波放射が空気を通過する際の透過率 τ_D を時刻 t のループ前に計算することで、 (φ, θ) と t に関する多重ループを回避し、計算負荷を軽減している。さらに、レール長手方向 i_{xR} のループを

並列化することで、計算時間の短縮を図っている。

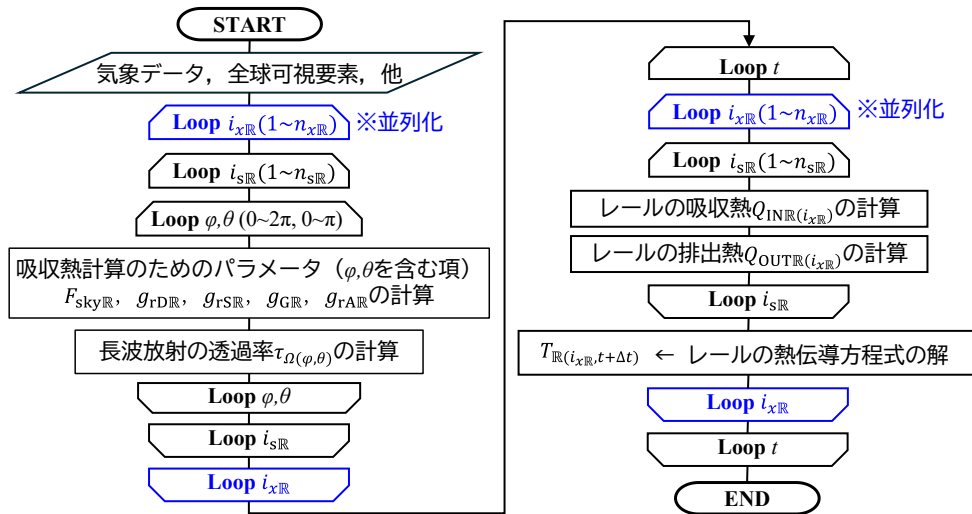


図 13 レールの吸収熱, 排出熱, 熱伝導の連成解析の計算フロー

3. 実軌道でのレール温度の測定結果との比較による解析精度検証

ここでは、既往研究^{1) 2)}で実施した夏季と冬季の実軌道でのレール温度の測定結果と、前章で述べたモデルによる解析結果を比較し、解析精度を検証する。

3.1 測定条件

測定箇所は、ロングレール敷設区間のバラスト軌道であり、周囲の建物等の配置は図 5 に示すとおりである。軌道線形は直線、レールは JIS 60kg レール、まくらぎは 3 号 PC まくらぎが使用されている。夏季の試験日は 2019 年 8 月 2 日から 8 月 6 日の 5 日間で、天候はいずれも晴天であった。冬季の試験日は 2022 年 12 月 8 日から 2023 年 1 月 20 日で、当該期間に降雪はなく、降雨が発生したのは 12 月 13 日, 18 日, 22 日の 3 日間であった。当該箇所のレール温度分布を測定するため、夏季は図 5 に示す T1~T7, T9~T11 の 10 測点、冬季は夏季測点に T8 を加えた T1~T11 の 11 測点で、左レールの左側のレール腹部に熱電対を設置し、10 分間隔で温度を測定した。また、T1 付近の沿線の、地面から高さ 1 m の位置にウェザーステーション (Vantage pro 2, Davis 社製) を設置し、レール温度解析に使用する気象要素 (日射量, 気温, 風速) を 10 分間隔で測定した。レール敷設方向 φ_R は 123.5° である。

3.2 解析条件

解析に使用する地理データは、図 5 に示す DSM と線路データ (レール温度解析節点) である。また、夏季の解析に使用する気象データを図 14 に示す。同図の日射量, 気温, 風速は前節のウェザーステーションの測定値である。ただし、ウェザーステーションの日射量測定値は、水平面で受けた直達日射と散乱日射の和であるため、図 12 には、Erbs モデル⁷⁾を用いて日射量測定値を直達日射と散乱日射に分離した値を記載している。下向き赤外放射 R_D は当該箇所から最も近い気象庁観測所の観測値である。

計算に使用する主なパラメータを表 1 に示す。レール表面の放射率は、頭頂面 (幅 30 mm) では照り面を想定して 0.2, その他は酸化面を想定して 0.8 とする^{1) 2)}。解析の時間増分 Δt は 600 秒とする。また、2.4.1 項で述べたとおり、透過率 τ_Ω を導入した解析モデルを用い、吸光係数 ξ を 0~0.05 まで変化させるパラメー

タスタディを行い，夏季と冬季の実測レール温度を再現可能な ξ を同定する。

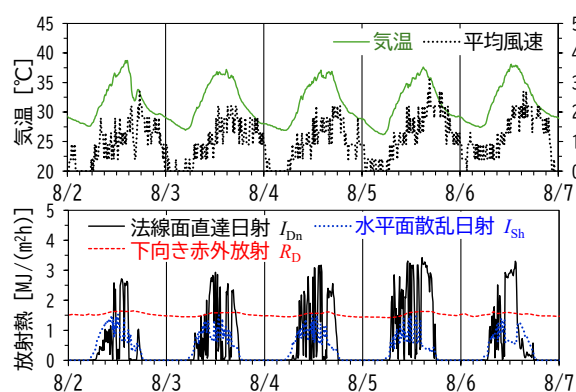


図 14 夏季の解析に使用する気象データ¹⁾

表 1 レール温度解析に用いる主なパラメーター一覧

項目	値
レール表面の 日射吸収率 ε_{IR} / 長波放射率 ε_{RR}	頭頂面：0.2 / 0.2 頭頂面以外：0.8 / 0.8
レール以外の地物の 日射吸収率 ε_l / 長波放射率 ε_R	水平より上：0.8 / 0.8 水平より下：0.8 / 0.8
軌道パッド熱伝導率 λ_P	0.25 W/(mK)
軌道パッド厚さ L_P	0.007 m
レール鋼密度 ρ_R	7820 kg/m ³
レール比熱 c_R	461 J/(kgK)
レール熱伝導率 λ_R	50 W/(mK)
レール断面積 A_R	0.00775 m ²
レール温度 T_R → 地物表面温度 T_G の変換係数	水平より上 F_{TU} : 0.9 水平より下 F_{TL} : 1.1

3.3 解析結果

3.3.1 夏季試験

夏季の測定結果と解析結果の比較として，測点 T2，T9 の時刻歴を図 15，8 月 4 日と 8 月 5 日の夜間（5 時）と昼間（14 時）レール長手方向の分布を図 16 に示す。図 15(a)に示すように，吸光係数 $\xi = 0$ （空気による減衰がない場合）において，左右を建物 1 および建物 2 に挟まれた測点 T2 では，レール温度の解析値は測定値よりも高い傾向を示し，特に日射を受けない夜間の最低レール温度は，測定値に比べて約 5 °C 高くなった。吸光係数 ξ が増加するにつれてレール温度は低下し，解析値が測定値に近づくことが確認できる。図 15(b)に示す測点 T9 では，レールが西日を受ける 8 月 3 日から 5 日の 15 時から 18 時の時間帯において，解析値が測定値を上回っている。これは，T9 付近の西側に樹木や塀が存在し（図 6(c)上図），これらが西日を遮蔽することで実際のレール温度が低下しているのに対し，解析では樹木および塀をモデル化していないため，レール温度が過大に評価されたためであると考えられる。また，夜間の最低レール温度については，T2 と同様に解析値が測定値よりも高いものの， ξ の増加に伴ってレール温度の解析値が低下し，測定値に近づく。

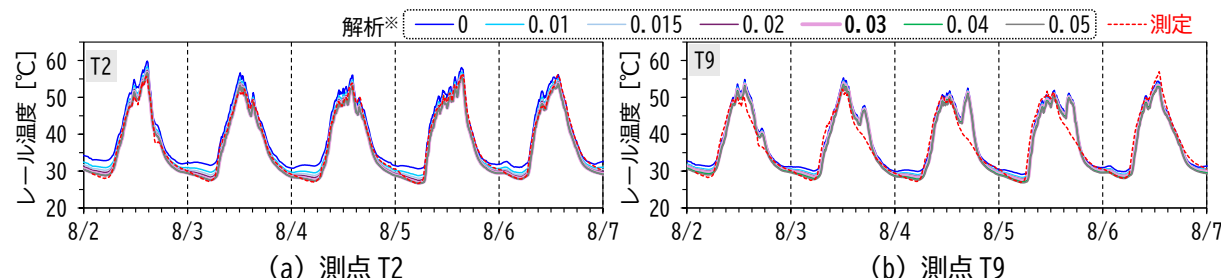


図 15 夏季試験のレール温度の測定値と解析値の比較（時刻歴値）※凡例の数値は吸光係数 ξ

昼間のレール温度分布について，図 16(b)，(d)に示すように，測点 T9 付近の 14 時の測定結果では，周囲と比較してレール温度が約 10 °C 低い。これは，建物 3 による日陰の影響と思われる，解析でもこれを含む実際のレール温度分布を概ね再現できている。一方，図 16(a)，(c)に示す夜間のレール温度分布では，吸光係数 $\xi = 0$ の場合，解析値は測定値よりも高い傾向を示すが，吸光係数 ξ が増加するにつれてレール温度は低

下し、解析値が測定値に近づき、解析精度が向上することが分かる。

実測値を再現する ξ として、測点 T2 およびその周囲における夜間のレール温度差（図 16(a), (c)）に着目し、測定結果と解析結果が概ね一致する $\xi = 0.03$ を選定する。

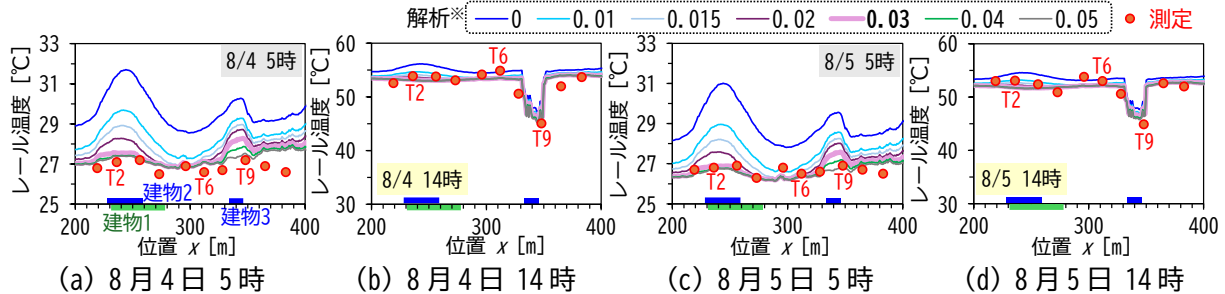


図 16 夏季試験のレール温度分布の測定値と解析値の比較 ※凡例の数値は吸光係数 ξ

3.3.2 冬季試験

冬季の測定結果と解析結果の比較として、測点 T2, T9 の時刻歴を図 17 に示す。また、試験期間中にレール温度が最低値となった、2022 年 12 月 24 日および翌 25 日の 5 時と 14 時におけるレール長手方向の温度分布を図 18 に示す。図 17(a)に示すように、夏季と同様、左右を建物 1 と建物 2 に挟まれた測点 T2 では、夜間のレール温度の解析値は測定値よりも高くなった。また、図 17(b)より、解析で考慮していない樹木と塀に近接する測点 T9 では、昼間のレール温度の解析値が測定値よりも高くなった。

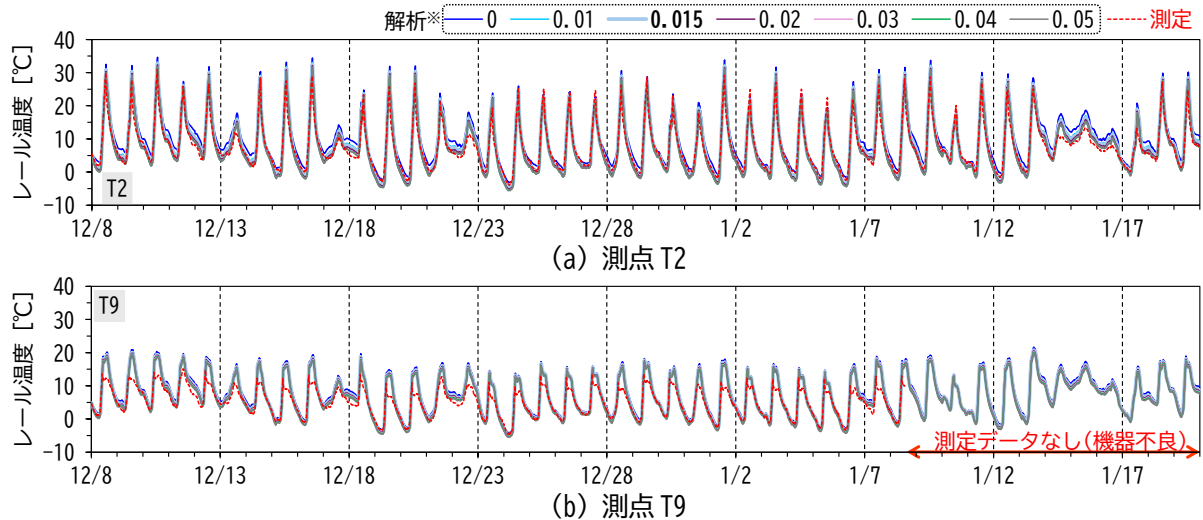


図 17 冬季試験のレール温度の測定値と解析値の比較（時刻歴値）※凡例の数値は吸光係数 ξ

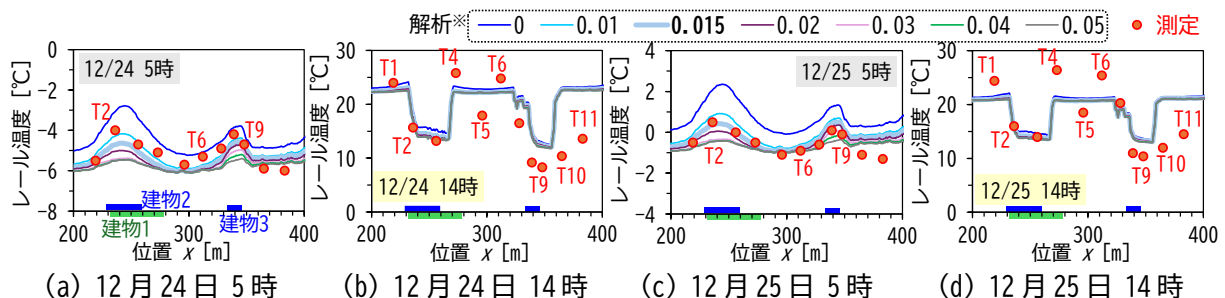


図 18 冬季試験のレール温度分布の測定値と解析値の比較 ※凡例の数値は吸光係数 ξ

昼間のレール温度分布の測定結果について、図 18(b), (d)に示すように、建物による日陰の影響により、14 時では建物 2 付近および建物 3 付近の測点において、周囲と比較してレール温度が約 15 °C低い。夏季の測定結果と比較すると、日陰によるレール温度低下の範囲および低下量はいずれも大きい。これは冬季の方が太陽高度が低く、日陰が広範囲に及ぶためである。解析においても、建物 2 付近および建物 3 付近でレール温度が低下するなど、実際のレール温度分布の傾向を概ね再現できている。ただし、測定結果では、14 時における測点 T5, T10, T11 のレール温度は、日向に位置する測点 (T1, T4, T6) と比較して低い値を示しているが、解析では同様の挙動は再現されていない (図 18(b), (d))。これは、この時間帯において、測点 T5 では踏切設備、測点 T10 および T11 では樹木や塀など、解析で考慮していない地物による日陰の影響が測定値に現れたためと考えられる。

図 17 および図 18 より、夏季と同様、吸光係数 ξ の増加とともにレール温度が低下するが、冬季では ξ が大きい場合は測定値との差が大きくなる。夏季と同様、測点 T2 とその周囲の夜間のレール温度差が実測と解析で概ね一致する ξ を図 18(a), (c)より選定したところ、 $\xi = 0.015$ であった。夏季と冬季の吸光係数 ξ の差について、気温と相対湿度の測定値から求めた体積絶対湿度 H_v 、つまり空気中の水蒸気量を算出したところ、夏季の H_v は約 20 g/m³ であるのに対し、冬季の H_v は約 5 g/m³ と低かった。2.4.1 項で述べたとおり、長波放射の減衰は媒質の濃度に比例するため、空気中の水蒸気量が冬季よりも夏季の方が多いため、夏季の吸光係数 ξ が冬季よりも大きくなった原因と思われる。この結果は実現象に即した妥当なものと考えられる。ただし、前述のとおり、吸光係数 ξ は光の波長 λ によって異なるが、本稿ではこれを λ によらず一定とした。そのため、今回同定した ξ の値が、他の現場や気象条件下でも一般的に適用可能かの検証が必要と考え、これについては今後の課題としたい。

3.4 解析精度の評価

夏季の吸光係数 ξ を 0.03、冬季の ξ を 0.015 とした場合の、解析値の測定値に対する RMSE (Root Mean Square Error; 2 乗平均平方根誤差)を表 2 に示す。同表より、測点 T1~T7 の RSME は、夏季では 1.3 °C~2.5 °C、冬季では 1.6 °C~1.9 °Cである。これに対し、測点 T8~T11 の RSME は、夏季では 2.2 °C~2.8 °C、冬季では 2.7 °C~4.8 °Cと、測点 T1~T7 と比較して誤差が大きくなった。これは、本稿では樹木や塀をモデル化しておらず、これらに近接する測点では日陰の発生状況が実現象と異なるためである。今回の解析では、地物の形状のモデル化に、DEM に建物の高さを加算した値を用いたが、市販のメッシュサイズが 0.5 m~1 m 程度の高分解能の DSM を用いることで、樹木のモデル化が可能である。塀などの幅の狭い構造物は DSM によるモデル化が難しいが、これについては、設置区間、線路中心からの離隔、高さ等から平面でモデル化して全球可視要素を別途求め、全球可視要素 E_{v1} と E_{v2} の間に挿入することで、解析に導入できる。電架柱、踏切、防音壁等の小規模な鉄道用の設備も同様の方法でモデル化が可能である。

表 2 レール温度の解析値の測定値に対する RMSE (単位: °C)
※夏季の吸光係数 ξ を 0.03、冬季の ξ を 0.015 とする

時期	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
夏季	1.31	1.37	1.57	1.78	2.08	1.88	2.46	-	2.80	2.16	2.65
冬季	1.78	1.94	1.62	1.65	1.93	1.59	1.82	3.17	2.70	4.80	3.79

3.5 1 年間の長期連続解析時の解析時間の推定

前節の冬季の解析 (延長 0.58 km, 43 日間) は、一般的なオフィス用 PC (プロセッサ: Intel® Core i7-13700, 実装 RAM: 16.0GB) を用いて行い、その際の計算時間は 0.056 時間であった。これを基に、延長 100 km の

軌道に対し、1年間の長期連続解析を行った場合の計算時間を推定したところ、約16時間となった。なお、レール長手方向の節点間隔 Δx は1m、時間増分 Δt は600秒である。この計算時間は、1章で述べた、太陽の日周・年周運動を考慮した通年の最高レール温度の把握等、種々の分析を行う上で、十分に実用に供すると思われる。

以上、提案した手法により、レール温度の昼夜・長期連続解析を、実用的な精度と計算時間で行えることを確認した。

4. まとめ

本稿では、レール温度の昼夜、長期間の連続解析を行うため、全球可視要素を用いた日射と長波放射に関する詳細な熱評価と熱伝導解析の弱連成による解析手法を提案した。得られた結果、知見を以下にまとめる。

- ・ 全球可視要素とは、受熱面から見た周囲の地物の配置を単位半径の3次元極座標系上で表すもので、これにより、実際の建物の配置とそのレールの3次元形状との競合を再現できることを確認した。
- ・ 解析値と実測値を比較した結果、空気中の水蒸気が多い夏季では吸光係数 ξ を0.03、水蒸気が少ない冬季では ξ を0.015とすることで、レール温度分布が実測値に概ね一致した。
- ・ 解析値の測定値に対するRMSEは、本稿の解析では考慮していない樹木や塀付近の測点を除き、夏季では1.3℃～2.5℃、冬季では1.6℃～1.9℃であった。

本稿では、レール温度の軸力への直接的な影響に着目したが、日陰と日向の温度差によってレールが長手方向に局所的に塑性移動し、中立温度 T_0 が変動し得ることが報告されている⁸⁾。今後は、提案手法にてレール温度の長期間の履歴を定量化し、 T_0 の変化を含めた詳細なレール軸力の評価法の検討を行う。また、提案した全球可視要素による吸収熱のモデル化手法は、屋外の部材・構造物に汎用的に使用できるため、PCまくらぎ等のコンクリートの凍害予測にも活用したい。

文 献

- 1) 浦川文寛, 渡辺勉: 地理・気象データを使用した鉄道用レール温度予測法, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.76, No.2, pp. I_553-I_564, 2020
- 2) 浦川文寛, 渡辺勉: GIS データを使用した夜間の鉄道用レール温度予測法の開発, AI・データサイエンス論文集, Vol.4, No.3, pp.425-434, 2020
- 3) Esri, Modeling solar radiation, available from < <https://desktop.arcgis.com/ja/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/modeling-solar-radiation.htm> >, (accessed on 12 June, 2025)
- 4) 齊田光, 藤本明宏, 福原輝幸: 熱収支法による広域路面温度予測モデル—乾燥路面の路線温度分布予測—, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.69, No.1, pp.1-11, 2013
- 5) 浦川文寛, 渡辺勉: 全球可視要素を用いた鉄道用レール温度の昼夜・長期連続解析手法, 土木学会論文集特集号 (応用力学), Vol.82, No.15, 論文ID: 25-15062, 2026
- 6) Möller, T., Trumbore, B., “Fast, Minimum Storage ray-triangle intersection,” Journal of Graphics Tools (JGT) Vol.2, Issue 1, pp.21-28, 1997.
- 7) Erbs, D. G., Klein, S. A., Duffie, J. A., “Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation,” Solar Energy, Vol.28, Issue 4, pp.293-302, 1982.
- 8) 高木柚子, 阿部和久, 紅露一寛: 建物の日陰の移動がレール中立温度に及ぼす影響, 土木学会論文集, Vol.80, No.15, 23-15007, 2024

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8号

2026年8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. 8

Aug. 2026

PAPERS

Exhaust Pipe Modifications to Reduce Soot Staining on Vehicle Bodies Based on Roof-level Exhaust
Flow Simulations of Diesel Railcars

.....N.HARADA, Y.NOGUCHI, Y.ARAKI, T.MIYACHI (1)

Neutral Temperature Characteristics of Continuous Welded Rail Based on Rail Creeping Surveys and
Long-Term Axial Force Measurements

.....S.MATSUTANI, Y.NISHINOMIYA, S.TAMAGAWA, A.HOSOMI (9)

Long-Term Continuous Day-and-Night Analysis of Rail Temperature Using an All-Sphere Visible
Element

.....FURAKAWA, T.WATANABE (20)

