

周辺地物からの放射熱を考慮した 夜間のレール温度予測法の開発

浦川 文寛* 渡辺 勉*

Development of Nighttime Rail Temperature Prediction Method
in Consideration of the Radiant Heat from Surrounding Geographical Features

Fumihiro URAKAWA Tsutomu WATANABE

This study proposed a new method capable of predicting the rail temperature distribution in nighttime at intervals of about 1 m by modeling the radiant heat of rail in detail using digital surface model (DSM) and meteorological data. To verify its prediction accuracy, the distribution of rail temperature and radiant heat were measured on an actual track. As a result, the minimum rail temperature was about 2°C high at the measurement points near buildings compared with that at other points due to strong radiant heat. We also confirmed that the proposed method can accurately reproduce the actual rail temperature distribution in nighttime.

キーワード：レール温度予測，軌道座屈，熱収支，地物の放射熱，DSM

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。ロングレールは走行安全性の向上、騒音や振動の低減、乗り心地の向上等、多くの利点を持つ反面、継目部でのレール伸縮を吸収する機能がなくなるため、夏季にレール温度が上昇した際に圧縮のレール軸力が発生し、軌道が水平方向に張り出す、軌道座屈の危険性が高まる。一方、冬季のレール温度低下による引張の軸力はレール破断および破断時開口量の増加の原因となる。いずれも列車脱線につながる可能性のある重要な事象であるが、温暖化によるレール温度の上昇が懸念される昨今では、軌道座屈に対する安全性を確保すること、および人口減少社会に対応するための管理の省力化との両立が喫緊の課題である。ロングレールでは、レール温度 T_R に対するレール軸力 P_R (圧縮を正) は式 (1) より算出される。

$$P_R = EA\beta(T_R - T_0) + \Delta P \quad (1)$$

ここで、 E 、 A 、 β はそれぞれレールの縦弾性係数、断面積、線膨張係数である。 T_0 は設定温度と呼ばれる、レールの中立温度 (軸力がゼロとなる温度) の管理上の目標値である¹⁾。 ΔP はレールのふく進 (長手方向への移動) や低温時作業によって生じる付加軸力である^{1) 2)}。我が国の軌道座屈に対するロングレール管理においては、レール温度が高温となる夏季までに、式 (1) の T_R に夏

季の予想最高レール温度を代入して求めた最大発生軸力と、軌道の剛性と形状から算出される座屈耐力とを照査して座屈に対する安全度の判定を行う。さらに、判定結果に応じ、道床碎石の追加や軌道整備、設定替 (ふく進量を適正值に調整する作業)、夏季特別巡回等の処置を行う²⁾。夏季特別巡回とは、日々のレール温度を常時測定し、レール温度が管理値 (50°C 前後) を超過した際に現場の状態を目視で確認するもので、近年の熱環境下では夏季の晴天時はほぼ毎日、夏季特別巡回が必要となる等、多大な労力を費やしている。式 (1) から明らかなように、設定温度 T_0 を高く設定することで、高温時のレール軸力を低減できる反面、低温時の引張のレール軸力が増加する。そのため、冬季の予想最低レール温度から設定温度 T_0 の上限を定めるとともに²⁾、冒頭で述べたリスクを鑑み、 T_0 は 25°C ~ 30°C 程度とすることが一般的である。

このように、軌道座屈防止のためには高温時だけでなく、低温時のレール温度予測が重要である。前者については詳細な予測法がいくつか提案されているが^{3) ~ 6)}、後者については気温による簡易な予測が行われている。年間の最低レール温度は、地域や標高差による気象条件の違いで大きく変わることは容易に予想される。また、樹木等からの放射熱によって、夜間のレール温度が変化することが報告されている⁷⁾。実務上、上記要因に伴うレール温度の変化を把握することは難しく、予想最低レール温度は線区単位で一律に定めているのが現状である。上記要因を考慮してレール温度の線路長手方向の分布を定量的に予測し、設定温度や遊間を最低レール温度の予測値に応じて最適化することで、軌道座屈に対する安全性

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

の確保、および安全度判定による処置の必要数量の低減といった、管理の省力化を実現できると考える。

レール温度が最高値となるのは夏季の昼間、最低値となるのは冬季の夜間である。道路の温度管理の分野では、道路表面を平面としてモデル化し、日射（太陽の短波放射）および大気と周辺地物（地面、建物、樹木等の総称）の長波放射（以下「放射熱」とする）による吸収熱を、平面との相対角度を考慮して計算し、道路表面の温度を予測している⁸⁾。筆者らは文献3にて、既往研究⁸⁾における日射の評価法をレールの熱収支モデルに適用するとともに、レール長手方向の熱伝導解析を行って、レール温度を予測する手法を開発した。文献3のレール温度予測モデルでは、日射および日射を受けるレールの3次元形状をモデル化することで、日射が支配的となる昼間のレール温度を解析で精度良く再現することができた。一方、放射熱が支配的となる夜間については、周辺地物からの放射熱を後述のとおり簡易にモデル化していたため、レール温度の解析値が実際の値よりも低くなる等、解析精度に問題があった³⁾。本稿では、夜間レール温度の解析精度の向上を目的とし、周辺地物の高さを含む標高データ（以下「DSM：Digital Surface Model」）と周辺地物の温度からレールに照射される放射熱を精緻に計算し、レール温度を予測するモデルを提案した。さらに、実軌道にてレール温度と放射熱を測定し、解析結果と比較することで、提案手法の有効性と解析精度の検証を行った。なお、以降は文献3で開発したモデルを「昼間レール温度予測モデル」、本稿で開発したモデルを「夜間レール温度予測モデル」と呼ぶ。

2. 夜間レール温度予測モデルの詳細

2.1 座標系の定義

本章では時間軸を t 、レール長手方向の位置を l 、レールの断面における周方向の位置を k とする。また、西→東を X 軸、南→北を Y 軸、鉛直上向きを Z 軸とし、 XYZ 座標系の位置を $\{X\} (= \{X, Y, Z\}^T)$ 、 XY 平面上の方位

角を ψ 、仰角を θ と表記する。

2.2 モデルの特徴

夜間レール温度予測の計算フローを図1に示す。まず、GIS (Geographic Information System) データと気象条件からレールが吸収する熱流量 $Q_{IN}(l, t)$ を計算する。さらに、初期のレール温度を指定した後、レールが排出する熱流量 $Q_{OUT}(l, t)$ をレール温度より求め、熱伝導解析を実施して時刻 Δt 後のレール温度を算出する。これを任意の時刻 t_N まで繰り返し、位置 l における t_0 から t_N のレール温度 $T_R(l, t)$ を得る。この計算フローは昼間レール温度予測モデルと同じであるが、レールが受ける放射熱（図2 (a)）のモデル化手法が異なる。昼間レール温度予測モデルではレールが受ける日射を計算する際、レール周囲の地物を DSM でモデル化し、日射（太陽からの短波放射）の地物による遮蔽を考慮している³⁾。一方、放射熱については、地面を地物のない水平面として地面の放射熱を計算しており、地物の放射熱お

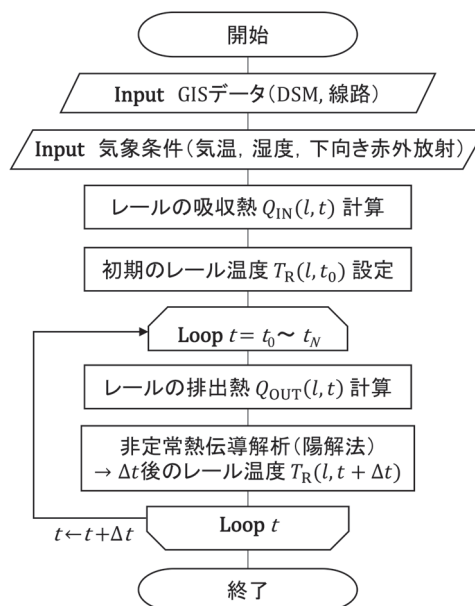


図1 夜間レール温度予測モデルの計算フロー

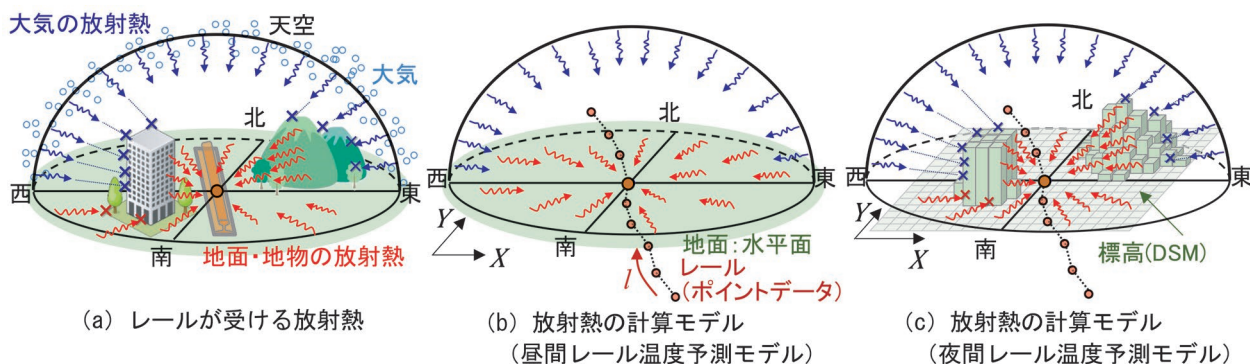


図2 放射熱の計算モデル

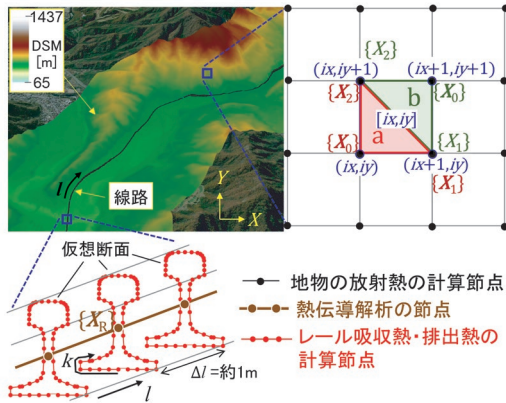


図3 GISデータに基づく解析メッシュ作成

よび地物による大気と地面の放射熱の遮蔽を考慮してない(図2 (b))。このような簡易なモデル化手法が夜間のレール温度予測の誤差要因となっていたため、夜間レール温度予測モデルでは実際の熱環境(図2 (a))を再現できるよう、DSMを用いて地物の放射熱および地物による大気と地面の放射熱の遮蔽を考慮する精緻なモデル化手法(図2 (c))を適用した。なお、当然ながら夜間レール温度予測モデルでは日射はゼロである。

2.3 GISデータに基づく解析メッシュ作成

2.3.1 DSMのラスターデータに基づく地物の要素分割

ラスターデータとは、GISにおいて標高を表す一般的なデータ書式の一つで、セルを格子状に分割してセル毎に値を格納したデータ形式である。図3に示すとおり、 X 方向に $ix(=1, 2, \dots)$ 、 Y 方向に $iy(=1, 2, \dots)$ の節点番号を付与し、DSMのラスターデータの4節点から四角形 $[ix, iy]$ を作成する。さらに、要素を平面として後述の放射熱の計算式を簡略化するため、 $[ix, iy]$ を a, b の三角形要素に2分割する。三角形 a の節点 $0, 1, 2$ は節点 $(ix, iy), (ix+1, iy), (ix, iy+1)$ 、三角形 b の節点 $0, 1, 2$ は節点 $(ix+1, iy+1), (ix+1, iy), (ix, iy+1)$ とする。

2.3.2 レールの3次元形状のモデル化

レールのモデル化については文献3と同様、線路のGISデータに沿って、約1m間隔で熱伝導解析用の節点を配置し、その節点周りに仮想的なレール断面(仮想断面)を付加し、レールの3次元形状を、傾斜を持つ平面の集合として模擬する(図3)。この仮想断面を用いてレール表面による他のレール表面への放射熱の遮蔽を判別するとともに、放射熱とレール表面の相対角度を計算し、吸収熱に反映させる。このような手法を用いることで、既往研究⁶⁾と比較してレール形状の再現精度を確保しつつ、計算コストを大幅に縮減でき、100km程度の広範囲にわたるレール温度分布の計算を可能としている。

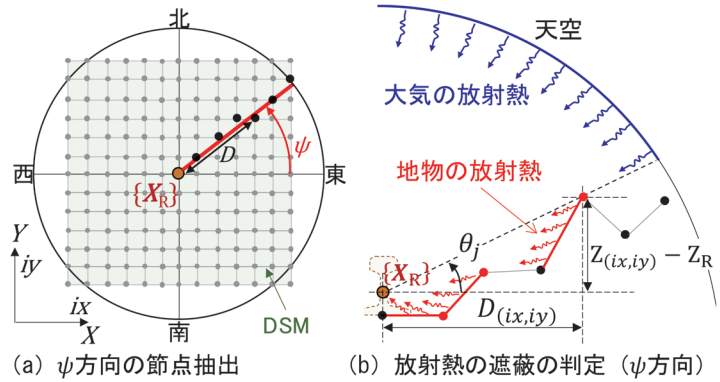


図4 GISデータに基づく解析メッシュ作成

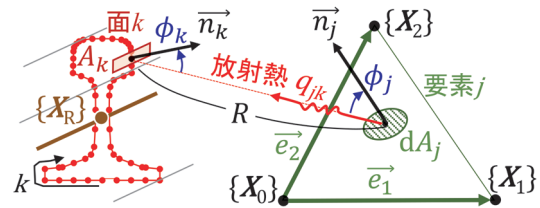


図5 GISデータに基づく解析メッシュ作成

2.4 レールが受ける地物の放射熱の計算方法

2.4.1 放射熱がレールに到達する要素の特定

方位角 ψ 方向について、図4 (a)に示すように、レールから見た ψ 方向の接点(ラスターの中心)を抽出する。次に図4 (b)に示すように、レールから抽出した接点を見た仰角 $\theta_j(=\tan^{-1}\{(Z_{(ix, iy)} - Z_R)/D_{(ix, iy)}\})$ が式(2)を満たす接点(図4 (b)の赤点)とそのレール側の接点を含む要素をレールに放射熱が到達する要素とする。これを全方位($0 \leq \psi < 2\pi$)に対して実施する。

$$\theta_j \geq \max\{\theta_j(D < D_{(ix, iy)})\} \quad (2)$$

2.4.2 地物の放射熱の定式化

図5に示すように、レール表面上の面 k が三角形要素(地物) j から受ける放射熱 q_{jk} を考える。面 k は要素 j に対して十分小さく、面 k 上の位置の影響は無視できると仮定すると、 q_{jk} は次式で表すことができる。

$$q_{jk} = \frac{A_k}{\pi} \sigma \cos \phi_k \int_{\text{要素}j} \epsilon_j T_j^4 \frac{\cos \phi_j}{R^2} dA_j \quad (3)$$

ここで、 A_j, A_k :要素 j , 面 k の面積、 ϵ_j :要素 j の放射率、 σ :ステファンボルツマン係数、 T_j :要素 j の絶対温度、 ϕ_k, ϕ_j :面 k と要素 j を結ぶ線分と各面の法線ベクトル \vec{n}_k, \vec{n}_j の成す角度、 R :面 k と要素 j 上の点を結ぶ線分長である。図5に示す \vec{e}_1, \vec{e}_2 は式(4)で定義される三角形要素 j の2辺のベクトルであり、レールから要素 j 上の点

に向かうベクトル \vec{r} はベクトル \vec{e}_1, \vec{e}_2 を用いて式(5)で表すことができる。

$$\vec{e}_1 := \{X_1\} - \{X_0\}, \quad \vec{e}_2 := \{X_2\} - \{X_0\} \quad (4)$$

$$\vec{r} = s_1 \vec{e}_1 + s_2 \vec{e}_2 + \{X_0\} - \{X_k\} \quad (5a)$$

$$0 \leq s_1 \leq 1, \quad 0 \leq s_2 \leq 1, \quad 0 \leq s_1 + s_2 \leq 1 \quad (5b)$$

ここで、 $\{X_0\}, \{X_1\}, \{X_2\}$ は三角形要素の節点0, 1, 2、 $\{X_k\}$ は面 k の中心の3次元座標である。要素 j の内部で放射率と絶対温度は一樣とすると、式(3)を式(4)と式(5)のベクトルを用いて変形すると式(6)が得られる。

$$q_{jk} = \frac{A_k}{\pi} \sigma \cos \phi_k (2A_j \varepsilon_j T_j^4) \int_0^1 \int_0^{1-s_1} \frac{\cos \phi_j}{|\vec{r}|^2} ds_2 ds_1 \quad (6)$$

要素 j の面積 A_j は式(7)、法線ベクトル \vec{n}_j は式(8)、 $\cos \phi_j$ は式(9)より計算できる。面 k の法線ベクトル \vec{n}_k はレールの方角と形状データから取得でき、 $\cos \phi_k$ は式(10)である。

$$A_j = \frac{1}{2} \sqrt{|\vec{e}_1|^2 |\vec{e}_2|^2 - (\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2)^2} \quad (7)$$

$$\vec{n}_j = \frac{\vec{e}_1 \times \vec{e}_2}{|\vec{e}_1 \times \vec{e}_2|} \quad (8)$$

$$\cos \phi_j = \frac{|\vec{n}_j \cdot \vec{p}|}{|\vec{n}_j| |\vec{p}|} \quad (9)$$

$$\cos \phi_k = \frac{|\vec{n}_k \cdot \vec{p}|}{|\vec{n}_k| |\vec{p}|} \quad (10)$$

式(7)~式(10)を式(6)に代入して要素 j からレールが受ける放射熱 q_{jk} が計算でき、これを前項で特定した全ての要素、レール表面に適用して合計することで、位置 $\{X_R\} (=l)$ のレールが周辺地物から受ける放射熱 $Q_G (= \sum_k \sum_j q_{jk})$ を計算できる。

2.5 レールが受ける大気放射熱の計算方法

大気放射熱の計算には下向き赤外放射 R_D を使用する。下向き赤外放射とは、大気中の雲・水蒸気・二酸化炭素等が天空の全方向から地表面に放射する放射熱であり、地球温暖化の監視のため、気象庁で常時観測されている⁹⁾。計算の際には大気放射熱が天空の全方向で一樣であると仮定し、かつ図4に示す地物による放射熱の遮蔽を考慮し、式(11)にて下向き赤外放射 R_D を補正する。さらに、面 k の面積、補正した下向き赤外放射、お

よびレール表面上の面 k から天空を仰ぎ見る形態係数の積(式(12))より、面 k が受ける大気放射熱を算出する。

$$R_D = \frac{R_D}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} sky(\psi, \theta) \cos \theta d\theta d\psi \quad (11)$$

$$p_k = A_k R_D \frac{1 + \cos \beta_k}{2} \quad (12)$$

ここで、 $sky(\psi, \theta)$ は地物による大気放射熱の遮蔽の有無を表すパラメータであり、図4(b)に示すとおり、 $\theta > \max |\theta_j|$ を満たす天空の領域では大気放射熱がレールに到達するとして1、それ以外では0とする。 β_k は面 k の水平面からの傾斜角である(図6)。位置 $\{X_R\} (=l)$ において、レールの全周にわたって放射熱 p_k を求めてそれらを合計することで、レールが大気から受ける放射熱 $Q_W (= \sum_k p_k)$ を計算できる。レールの吸収熱 Q_{IN} は Q_W, Q_G およびレール表面の放射率 ε_R を用いて次式となる。

$$Q_{IN}(l, t) = \varepsilon_R (Q_G + Q_W) \quad (13)$$

2.6 レールの排出熱と熱伝導解析

レールの排出熱 Q_{OUT} は、軌道パッド(レール底面とまくらぎ上面間に設置する緩衝用ゴムパッド)への熱伝導 J_C 、空気への対流熱伝達 J_T 、レール表面からの放射熱 J_R の合計で、 J_C はレール温度と気温、 J_T はレール温度、気温、風速、 J_R はレール温度の関数としてモデル化する³⁾。夜間のレール温度は気温と軌道パッドの温度をしばしば下回り、その際は空気と軌道パッドから熱を吸収するが、計算上は負の排出熱として処理する。

熱伝導解析では、レールの熱収支($Q_{IN} - Q_{OUT}$)を熱伝導方程式に代入し、 Δt 間の温度変化を陽解法にて逐次計算する。詳細は文献3を参照されたい。

3. 夜間レール温度の解析精度の検証試験

図7(a)の写真のように、建物と近接する箇所にてレール温度とレールが受ける放射熱を測定し、両者を比

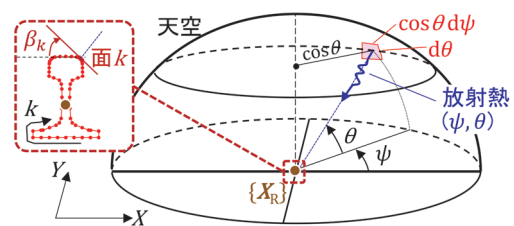


図6 レールが天空の (ψ, θ) 方向から受ける大気放射熱

較した。さらに、夜間レール温度予測モデルに入力する気象要素を測定し、解析で得られたレール温度を測定値と比較し、解析精度を検証した。

3.1 測定条件

図8に試験箇所周囲の地物および測点を示す。試験箇所は、ロングレール敷設区間のバラスト軌道、軌道線形は直線、レールはJIS 60kgレール、まくらぎはPCまくらぎが使用されている。周囲の主な地物として建物1、建物2、建物3がある(図7(a)、図8)。試験日は、2022年12月7日から2023年1月7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日間である。各種測定内容は次のとおりである。

3.1.1 レール温度

当該箇所のレール温度の分布を捉えるため、図8に示す11測点(T1~T11)で、FC(フィールドコーナ)側のレール腹部に熱電対(図7(b)左上、T-FFF(M)、福電社)を設置してレール温度を10分間隔で測定した。

3.1.2 気象要素(気温、風速)

図8に示すように、T1付近の地面から高さ1mの位置にウェザーステーション(図7(b)右、Vantage pro 2、DAVIS社)を設置して気温(A1)と風速(W1)を、T9付近の地面から高さ20cmの位置に温湿度計(図7

(b)左中、LR5001、HIOKI社)を設置して気温(A9)を10分間隔で測定した。

3.1.3 周囲からの放射熱

箇所毎の周囲からの放射熱の差を測定するため、図8に示すように、T2、T6、T9付近に長波放射計(図7(b)左下、CHF-IR02、クリマテック社)を設置し、大気と周辺地物からの放射熱(L2、L6、L9)を10分間隔で測定した。ただし、本測定機の測定値は、機器設置面(ここでは水平面)が受ける放射熱であり、測定感度 U が測定機から見た地物の仰角 θ の正弦に比例($U \propto \sin\theta$)するため、地物の高さが低く、遠方にある程、その地物からの放射熱の測定値が実際よりも小さくなる。そこで、図9に示す、文献7で開発した天空の放射熱分布の測定装置を用いた。本装置は、レール頭頂面にサーモグラフィカメラを据え付けて天空の全領域を複数回に分けて撮影し、得られた熱画像を放射熱に変換して統合することで、天空の全領域の放射熱分布を球面(仰角 θ による測定感度の低下なし)で測定可能である。本装置を用い12月15日の3時から4時の間で、T1、T2、T4~T10の計9測点にて測点から見た天空の放射熱分布を測定した。

3.2 解析条件

図10にレール温度の測定結果を示すが、解析対象日は、試験期間中にレール温度が最低(T11で -6°C)となった12月24日の夜間(0時~7時)とその翌日の25



(a) 試験箇所周囲の状況



(b) 測定機器の設置状況

図7 試験状況の写真

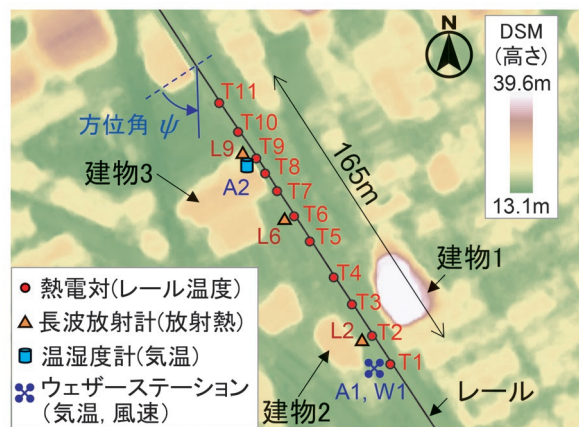


図8 測点とその周囲の地物の配置

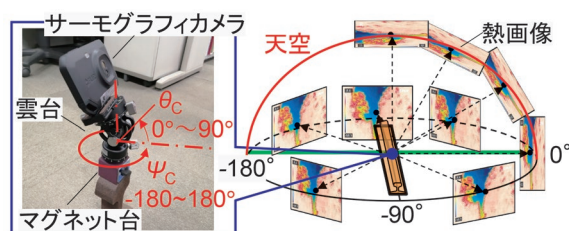


図9 放射熱(球面)分布の測定装置

日の夜間とした。

3.2.1 地理データ

解析に使用した地理データは、図8に示すDSMとレール節点のデータである。DSMはNTT DATA社のAW3D高精細版DSM(0.5mピッチ)を、レール節点はArcGIS Geo Suite詳細地図の線路のラインデータL_RROADに沿って約1m間隔で作成したポイントデータを用いた。

3.2.2 気象データ

レール温度予測に使用する気温と風速データには、図11上に示すウェザーステーションにおける気温(A1)、風速(W1)の測定結果を用いた。図11下は地物と大気の放射熱の合計であり、L6が最も放射熱が小さい。これは、長波放射計を設置した3箇所の中でL6が周囲の建物から最も遠く、地物の放射熱が小さいためである。よって、L6の測定結果には大気の放射熱成分が最も多く含まれると考え、解析時の大気の放射熱にはこれを用いた。

3.2.3 解析パラメータ

レール温度と軸力の予測計算に使用した主なパラメータを表1に示す。レール表面の放射率 ϵ_R は、頭頂面(幅30mm)では照り面を想定して0.20、その他は酸化面を想定して0.75とした¹⁰⁾。地物の放射率 ϵ_j は、地物の標高がレールの標高+0.1mより低い要素は地面を想定して0.95¹¹⁾、その他は樹木等の間隙による放射熱の低下および人工物を想定して0.57(地面の0.6倍)とした。地物の温度は気温の測定値(図11上“A1”)を用いた。時間増分 Δt は10分(600秒)、レール長手方向の空間

増分 Δl は線路のポイントデータ間隔と同じ1mとした。

3.3 試験結果

3.3.1 レール温度と放射熱の測定値の比較

図12にサーモグラフィカメラによる天空の放射熱分布の測定結果を示す。図中の方位角 $\psi=0^\circ$ は南西側の線路直交方向(図8の左下方向)、 $\pm 90^\circ$ は測定レール、 $0^\circ \sim 180^\circ$ はT1側、 $-180^\circ \sim 0^\circ$ はT11側である。図12において、建物、樹木、電架柱等の地物が存在する箇所は放射熱が大きいため白～赤色で、地物が無く大気から放射熱を受ける箇所は青色で示されている。また同図より、建物の窓やベランダ等の凹凸部は、平面部よりも放射熱が大きいたことが読み取れる。T2付近の建物1とT8付近の建物3を比較すると、南側(南西方向)の壁面が線

表1 解析パラメータ

項目	記号	値
レール表面の放射率	ϵ_R	頭頂面: 0.20
		頭頂面以外: 0.75
地物の放射率	ϵ_j	$Z < (Z_R + 0.1m)$: 0.95
		$Z \geq (Z_R + 0.1m)$: 0.57
大気の放射熱	R_D	図11下“L6”
ステファンボルツマン係数	σ	5.67×10^{-8}
地物の温度	T_j	気温と同じ
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

Z: 地物の標高, Z_R : レールの標高

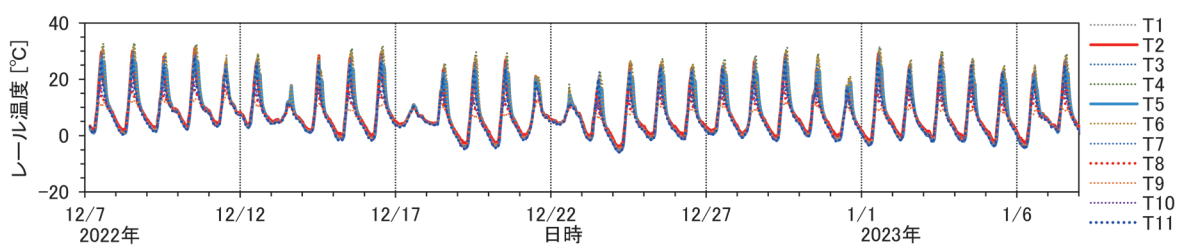


図10 レール温度の測定結果

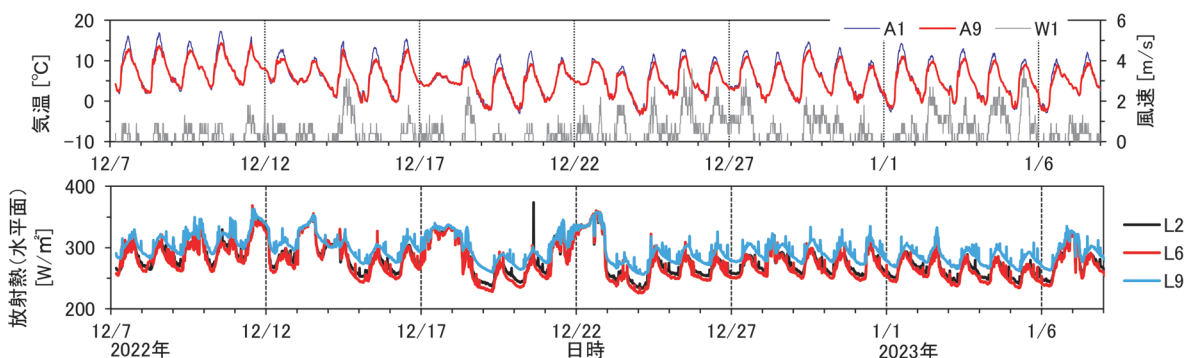


図11 気象要素の測定結果(上: 気温・風速, 下: 放射熱)

路に面している建物1は、ベランダが線路側に張り出しているため(図7(a)),北側(北東方向)が線路に面している建物3よりも凹凸が多く、放射熱も大きく(図12の赤色が濃く)なった。また、建物2の壁面の放射熱は全体的に建物3のそれよりも大きい(図12)。この理由は明確には分からないが、建物2は変電所、建物3は共同住宅であり、建物の用途が異なることによる外壁の放射率や断熱性、壁面温度等の差が関係していると考えられる。

図12の測定結果を天空の全領域で積分し、レールが受ける放射熱を計算した結果と、レール温度との比較を図13に示す。図12,図13より、周囲の建物に近いT2とT8は、他の測点と比べてレールが受ける放射熱が大きく、建物から遠いT5やT11よりもレール温度が約2℃高い等、周辺地物とその放射熱および夜間のレール温度との関係には明確な相関性が見られる。

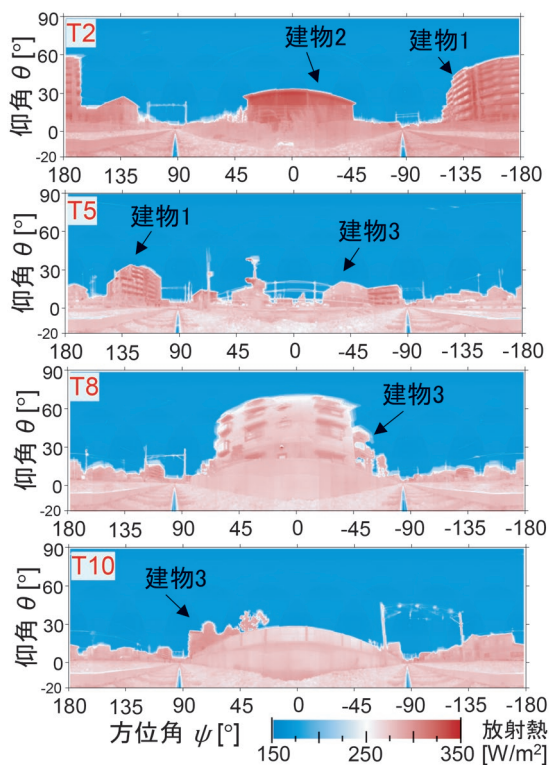


図12 放射熱(球面)分布の測定装置

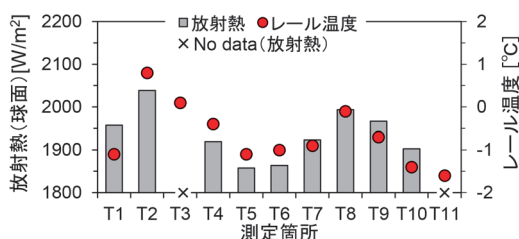
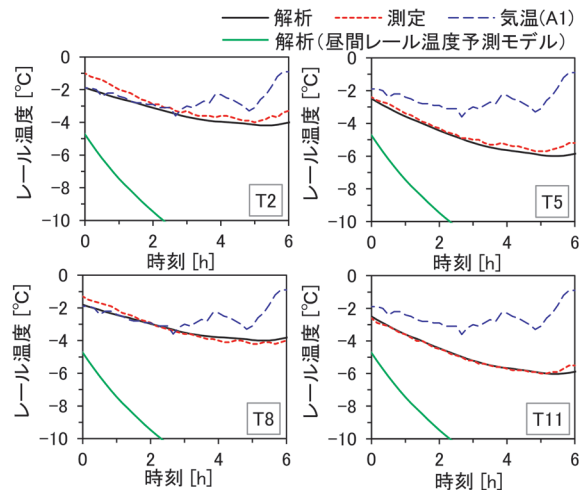


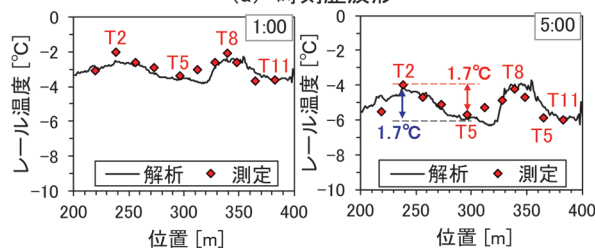
図13 レール温度(12月15日3:30)と放射熱の測定

3.3.2 レール温度の測定値と解析値の比較

図14に12月24日のレール温度の測定値と解析値の比較を示す。図14(a)には気温の測定結果と昼間レール温度予測モデルによる解析結果も記載している。時刻履歴波形について図14(a)より、気温とレール温度の測定値を比較すると、レール温度は5時頃まで下がり続け、T11では-6℃まで低下するのに対し、気温は3時頃には低下が収まり、最低値は-3.5℃と、レール温度と異なる挙動を示した。また、地物の放射熱を考慮しない昼間レール温度予測モデルの解析結果では、3時の時点でレール温度が-10℃を下回る等、測定値との大幅な乖離が見られる。一方、夜間レール温度予測モデルによる解析値と測定値を比較すると、両者は近い値となった。ここで、T8の最低レール温度の解析値は測定値よりも0.2℃高いのに対し、T2では測定値よりも0.3℃低い。これは、前項で述べた建物の形状や用途等に起因する建物毎の放射熱の差を考慮できていないことが原因と考えられるが、解析結果への影響は0.5℃以下と小さい。レール温度分布について図14(b)より、建物に近いT2では建物から遠いT5よりも5時のレール温度が1.7℃高い測定結果が得られたが、解析でも同様の結果が得られており、測定値と解析値がよく一致することが分かる。このように、DSMデータを用いて地物からの放射熱を詳細にモデル化することで、夜間のレール温度



(a) 時刻履歴波形



(b) レール温度分布

図14 レール温度の測定値と解析値の比較(12月24日)

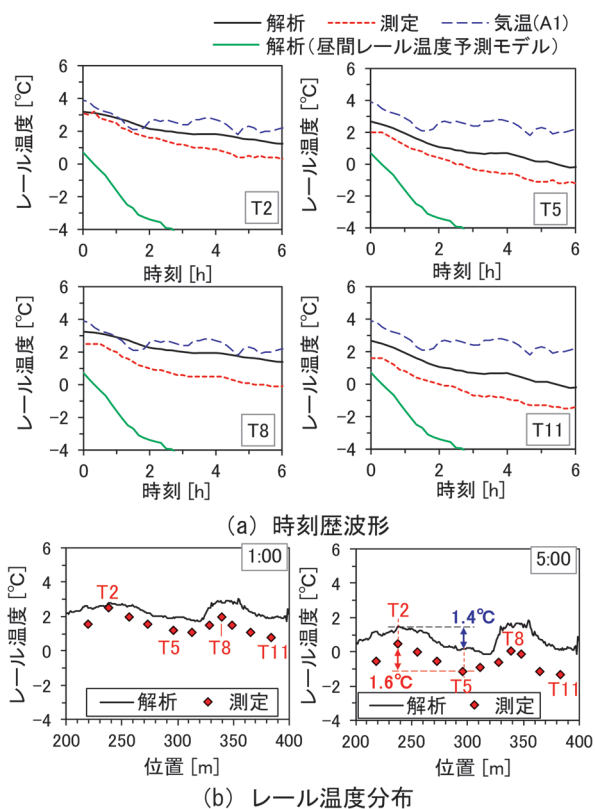


図 15 レール温度の測定値と解析値の比較(12月25日)

の解析精度を既往研究³⁾と比較して大幅に向上させることができた。

図 15 に、12月25日のレール温度の解析値と測定値の比較を示す。図 15 (b) 右より、建物に近い T2 と建物から遠い T5 の 5:00 におけるレール温度の差は測定と解析共に 1.5°C 前後であり、測点間のレール温度差は測定と解析で概ね一致した。しかしながら、夜間レール温度予測モデルの解析値は、昼間レール温度予測モデルと比較すると測定値と近い値が得られたものの、全測点でレール温度の解析値が測定値よりも 1°C ~ 1.5°C 高くなった。

4. 考察

レール軸力管理において重要となる、年間の最低レール温度とその線路長手方向の分布を詳細に予測することを目的とし、DSM データを使用した周辺地物の放射熱のモデル化に基づく夜間のレール温度予測法を提案した。冬季夜間に実線路で行った測定では、建物に近い測点では遠い測点と比較し、レールが受ける放射熱が大きく、かつ最低レール温度が約 2°C 高くなる等、レール温度と放射熱および建物の配置との間に、明確な相関性が認められた。一方、レール温度と気温は異なる挙動を示し、夜間の最低値は気温がレール温度より 2.5°C 高かつ

た。従来、レールおよびその他軌道部材の夜間の温度は気温から推定されることが多いが、これらの結果はレール温度を気温のみから正確に予測することは難しく、地物の放射熱をモデル化する提案手法の有効性を示している。測定した気象条件を提案手法に適用し、レール温度を解析的に求めたところ、測定期間中にレール温度が最低となった 12月24日については、測定値と解析値がよく一致した。ところが翌日の解析では、測点間のレール温度差は解析で再現できたものの、試験箇所の全測点でレール温度が測定値よりも解析値の方が 1°C ~ 1.5°C 高くなった。レール温度分布は、気象条件に起因する広範囲の平均的なレール温度に、地理条件に起因する局所的な変動が重畳する形で現れると考えられる。後者については、測点間の温度差が測定と解析で一致したことから、提案手法にて精度よく再現できることが分かった。一方、前者については、試験箇所全体で同様の解析誤差が生じたことから、気象条件の取得とそのモデル化手法に問題があったと考えられる。これについては今後も検証を続ける予定である。

以上、地理条件に起因する最低レール温度分布の局所的な変動を、提案手法により精度良く算出できることが分かった。今回の試験では、箇所間の最低レール温度の差は最大で 2°C 程度であったが、河川沿いや高架橋上等の周辺地物が少ない箇所と山間部等で路面や樹木が近接する箇所とでは、レール温度差がより顕著となることが予想される。提案手法を用いてこれら最低レール温度差を定量的に予測し、設定温度に反映させることで、夏季の軌道座屈の安全性の向上と、設定替、夏季特別巡回等、レール軸力の増加により必要となる処置の数量の低減が期待される。ただし、今回の試験では、気象条件の取得とそのモデル化手法が原因と思われる解析誤差が見られており、地域や標高等による気象条件差が、最低レール温度に与える影響については引き続き検討を行いたい。また、提案手法では DSM を用いることで建物の細かな形状を簡略化してモデル化し、かつその特性値（放射率、壁面温度）を同一としたが、測定では建物の形状や用途等に起因すると思われる建物毎の放射熱の差が観測された。そのレール温度の解析結果への影響は 0.5°C 以下と小さかったが、提案手法を広く活用するためには、多種多様な構造物、地形、植生等で影響がどの程度生じるかの検証が必要と考える。

5. 結論

レール軸力管理において重要となる、年間の最低レール温度とその分布を詳細に予測することを目的とし、DSM データを使用した周辺地物の放射熱のモデル化に基づく夜間のレール温度予測法を提案した。また、提案

手法の有効性と精度検証のため、実軌道にてレール温度とレールが受ける放射熱を測定し、予測値と比較した。得られた知見を以下に示す。

- ・レール温度と放射熱および建物の配置との間に明確な相関性が認められた一方で、レール温度と気温は異なる挙動を示した。この結果より、レール温度を気温のみから正確に予測することは難しく、地物の放射熱をモデル化する提案手法の有効性を確認した。
- ・建物が近接する測点では他よりも最低レール温度が約2℃高くなる等、地理条件に起因する最低レール温度分布の局所的な変動が観測されたが、提案手法によりこれを精度良く算出できることが分かった。
- ・大気の放射熱、建物の形状や用途に起因すると思われる解析誤差が見られたことから、気象条件のモデル化手法、および多種多様な構造物、地形、植生等の最低レール温度への影響について、引き続き検証が必要である。

文 献

- 1) 玉川新悟, 西宮裕騎, 瀬瀬智也: 低温時のロングレール保守作業制限の見直しの提案, 鉄道総研報告, Vol.36, No.3, pp.11-16, 2022
- 2) 保線工学編集委員会(編): 保線工学(上)第5編-第1章, pp.284-330, 鉄道現業者, 2016
- 3) 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
- 4) Zhang, Y., Clemenzi, J., Kesler, K. and Lee, S. : Real time prediction of rail temperature, Proceedings of the AREMA 2007 Annual Conference, Chicago, IL.
- 5) Bruzek, R., Al-Nazer, L., Biess, L. and Kreisel, L. : Rail temperature prediction model as a tool to issue advance heat slow orders, AREMA 2014 Annual Conference, Chicago, IL.
- 6) Wang, H., Chen, J., Balaguru, P. N. and Al-Nazer, L. : Thermal benefits of low solar absorption coating for preventing rail buckling, Proceedings of the 2015 Joint Rail Conference, San Jose, CA, USA.
- 7) 浦川文寛, 渡辺勉, 辻江正裕: 沿線地物の赤外線量分布の測定及びその夜間レール温度との関係, 第29回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2022), S2-7-2, 2022
- 8) 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
- 9) 気象庁高層気象台 赤外放射観測: https://www.jma-net.go.jp/kousou/obs_third_div/rad/rad_ir.html (参照日: 2023年2月22日)
- 10) 化学大辞典編集委員会 編: 化学大辞典—シー 縮刷版 (4巻), 東京化学同人, p.817, 1963
- 11) 近藤純正編著: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994