

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

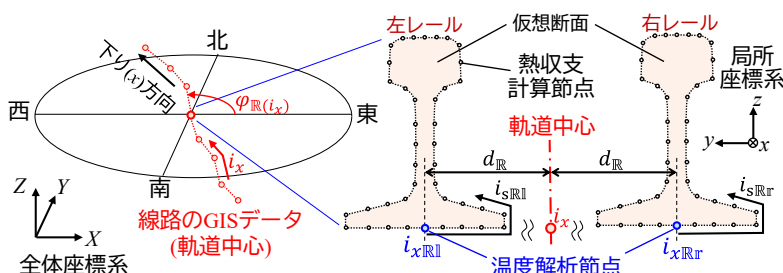


図1 線路のGISデータに基づく解析モデルの構造

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。

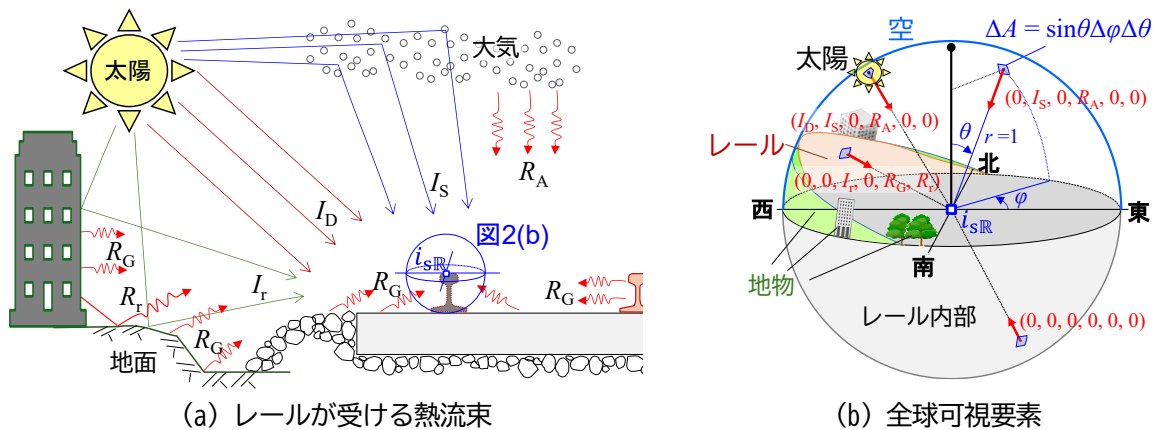


図2 全球可視要素を用いたレール表面 i_{sR} が受ける熱流束のモデル化手法。ここで、 I_D : 直達日射、 I_S : 散乱日射、 I_r : 地物表面の反射日射、 R_A : 大気の大気放射、 R_G : 地物の長波放射、 R_r : 地物表面の反射長波放射。

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（ $\theta =$

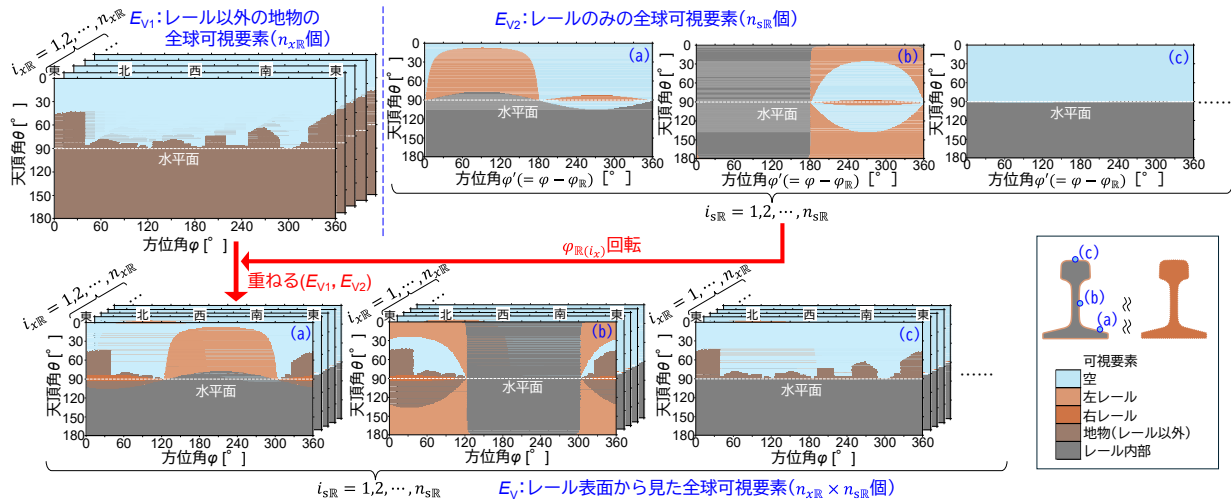


図3 2つの全球可視要素(E_{V1} , E_{V2})の重ね合わせによる、レール表面から見た全球可視要素 E_1 の算出方法

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。

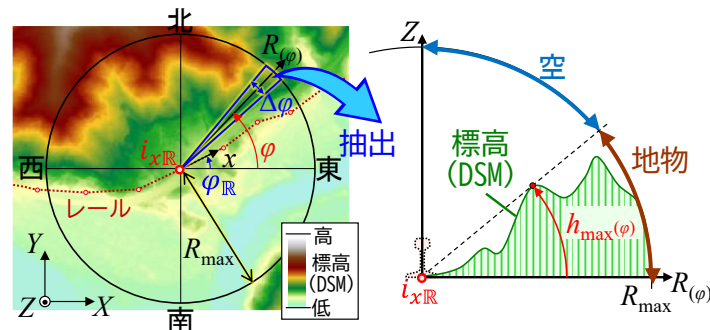


図4 レール以外の地物の全球可視要素 E_{V1} の算出方法

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.

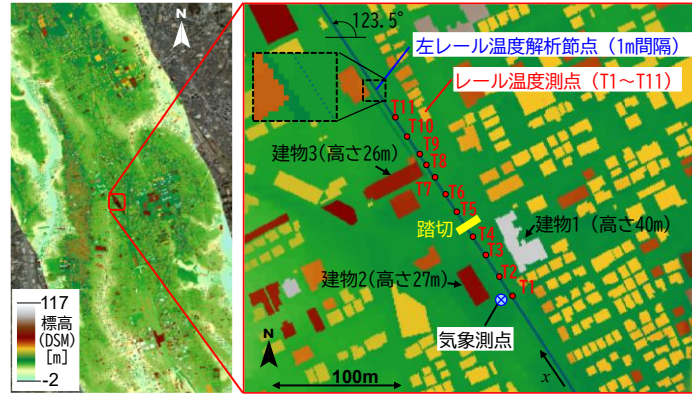


図 5 実軌道でのレール温度測定試験¹⁾²⁾におけるレール温度・気象測点とその周囲の DSM

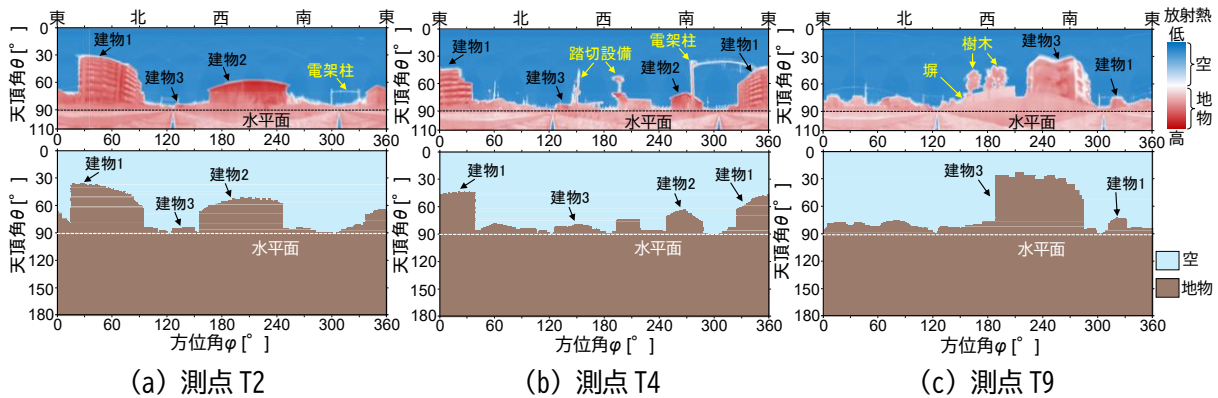


図 6 実軌道 (図 5) でのレール以外の地物の全球可視要素 E_{V1} の計算結果 (下図) とサーモグラフィカメラによる周辺地物配置の測定結果 (上図) の比較

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 ± 100 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.

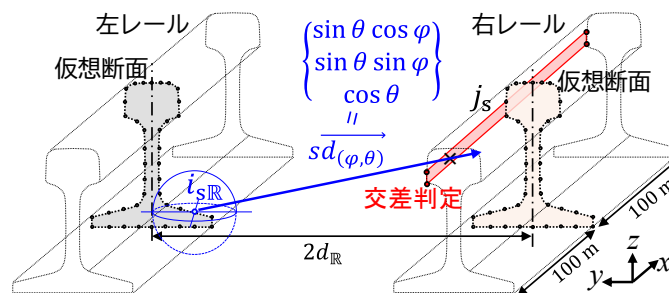


図 7 レールのみの地物の全球可視要素 E_{V2} の算出方法

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。

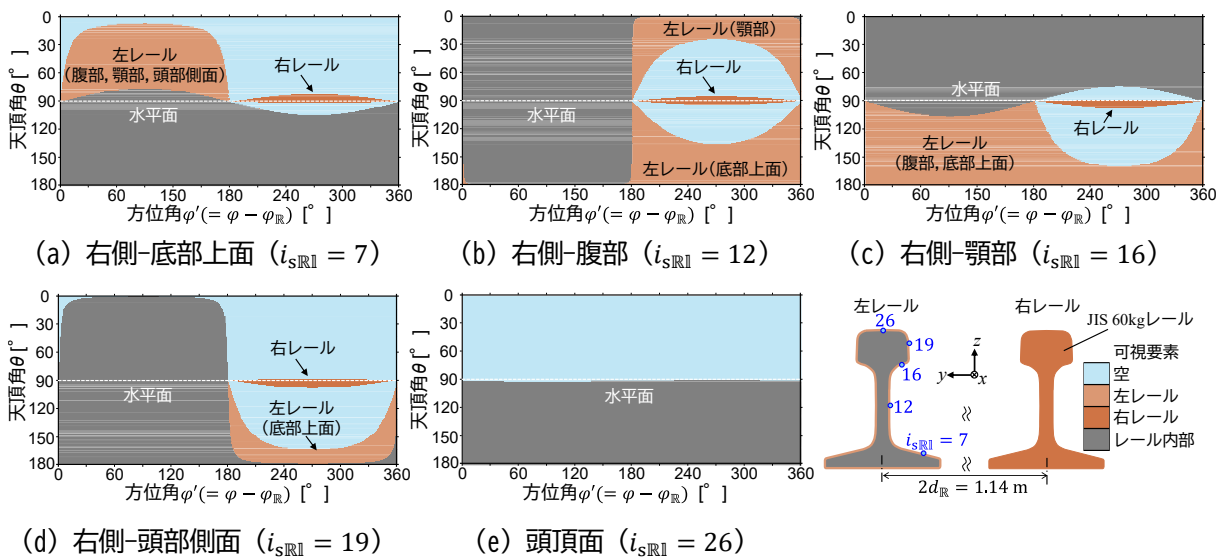


図 8 在来線軌道 (JIS 60kg レール, 軌間 1067 mm) の左レールにおける、レールのみの全球可視要素 E_{V2} の計算結果

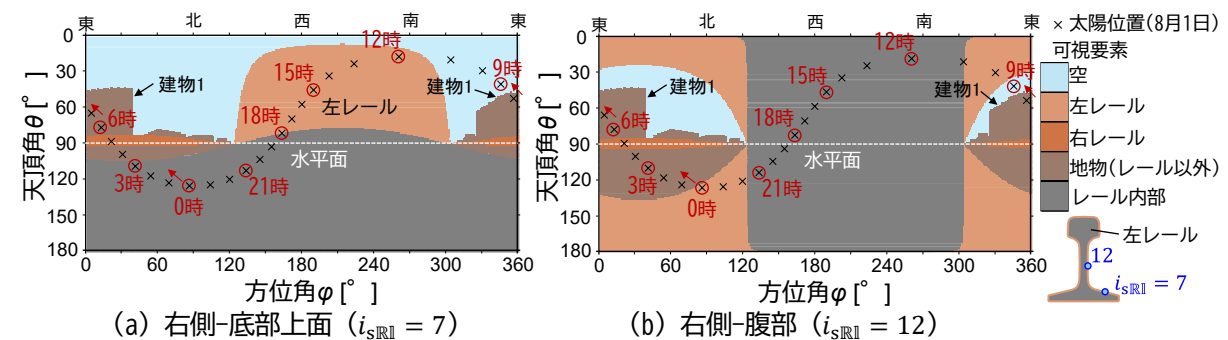


図 9 測点 T4 (図 5) の左レールにおける全球可視要素 E_V の計算結果と太陽位置の比較

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 $F_{skyR}, g_{rDR}, g_{rSR}, g_{GR}, g_{rAR}$ 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。

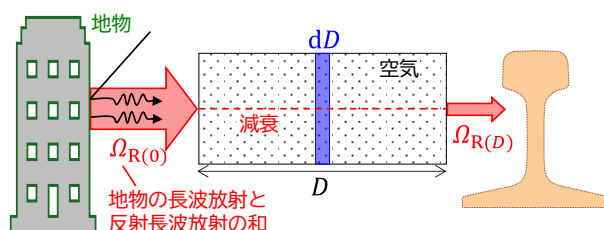
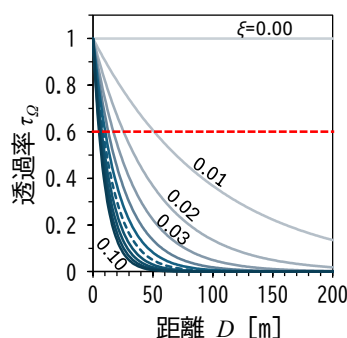


図 10 地物～レール間の空気による長波放射の減衰

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。

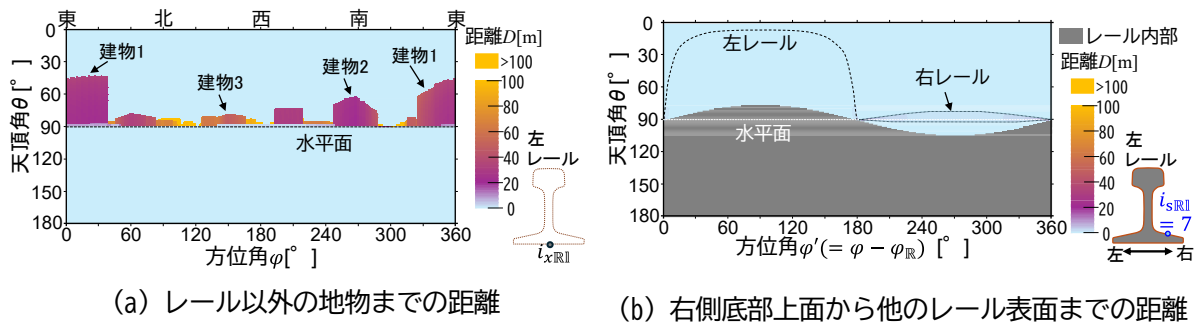


図 12 測点 T4（図 5）の左レールから (φ, θ) 方向の地物までの距離 $D_{(\varphi,\theta)}$ の計算結果

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。

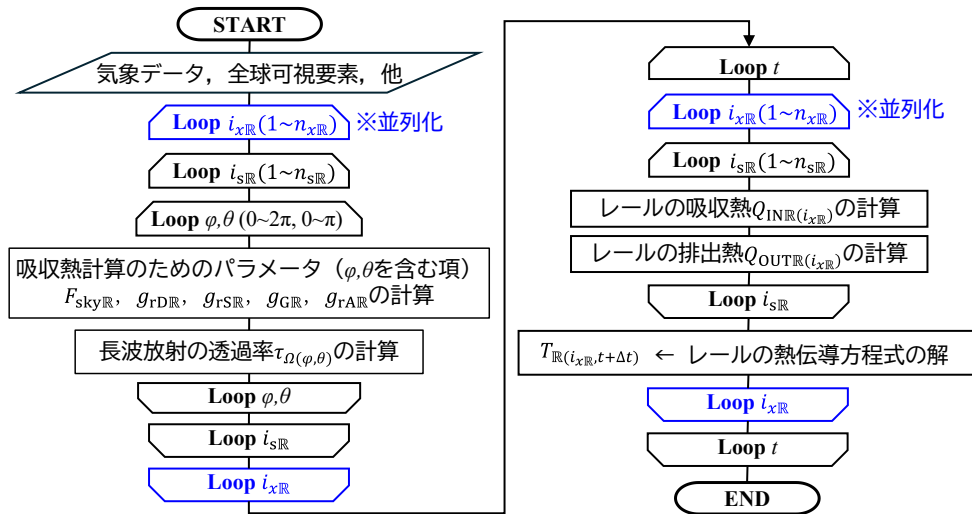


図 13 レールの吸収熱, 排出熱, 熱伝導の連成解析の計算フロー

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。

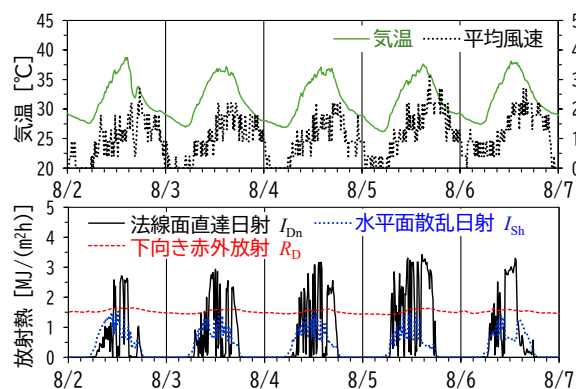


図 14 夏季の解析に使用する気象データ¹⁾

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。

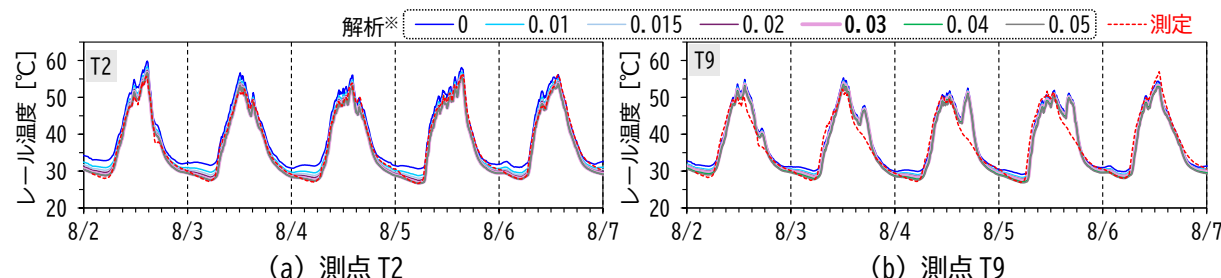


図 15 夏季試験のレール温度の測定値と解析値の比較（時刻歴値）※凡例の数値は吸光係数 ξ

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。

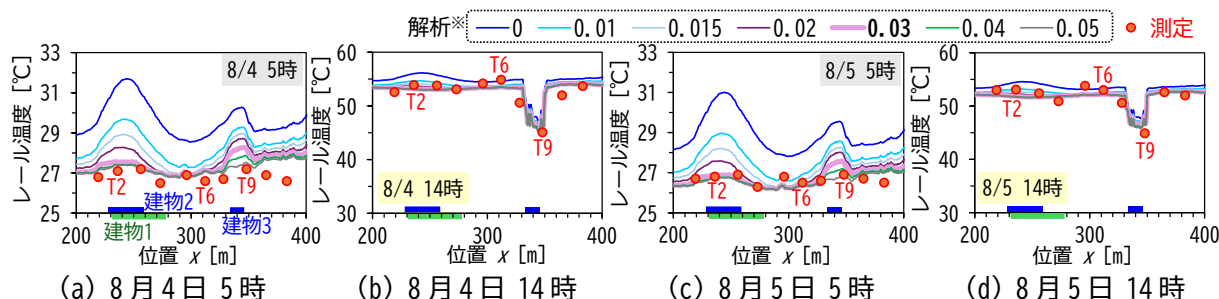


図 16 夏季試験のレール温度分布の測定値と解析値の比較 ※凡例の数値は吸光係数 ξ

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。

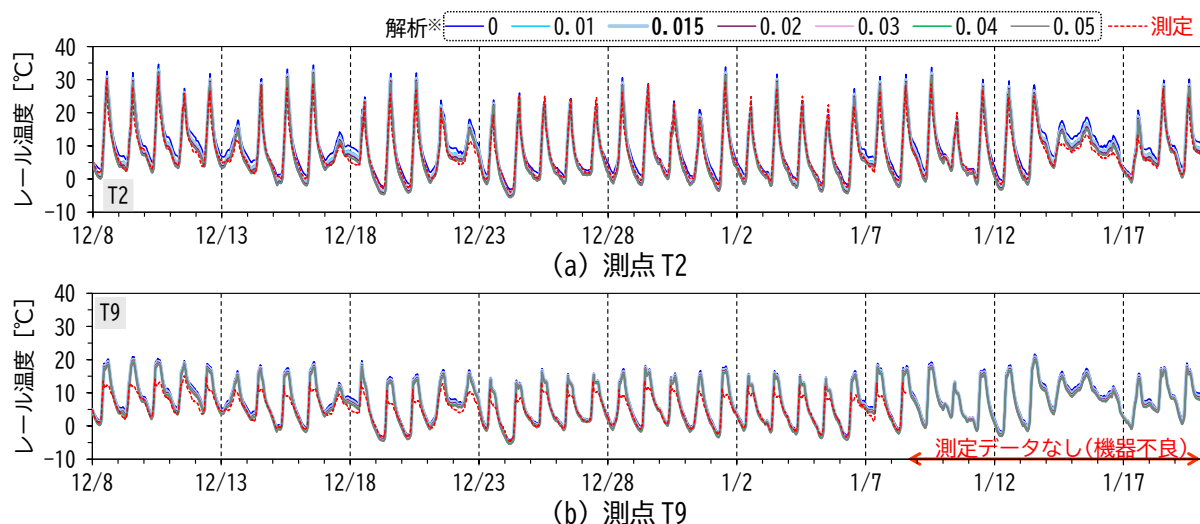


図 17 冬季試験のレール温度の測定値と解析値の比較（時刻歴値）※凡例の数値は吸光係数 ξ

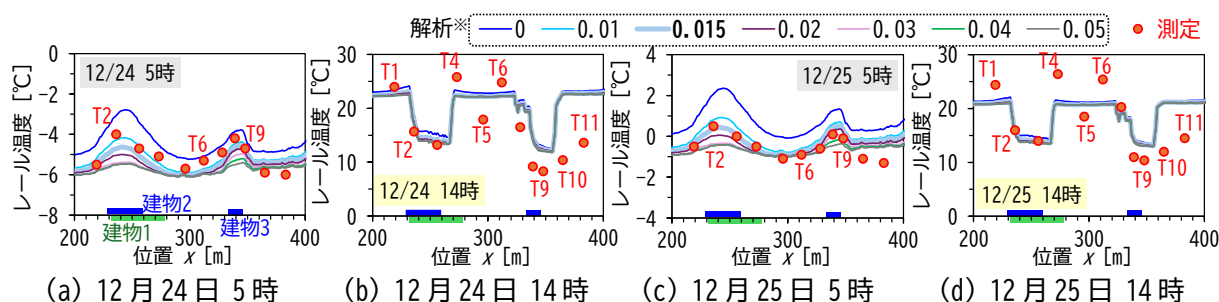


図 18 冬季試験のレール温度分布の測定値と解析値の比較 ※凡例の数値は吸光係数 ξ

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