

## GIS データを使用した広域レール温度予測法

浦川 文寛\* 渡辺 勉\*\* 木村 成克\*\*\*

## Wide-area Rail Temperature Prediction Method Using GIS Data

Fumihiko URAKAWA Tsutomu WATANABE Shigekatsu KIMURA

In actual tracks, variations in rail temperature and axial force due to the shadow of geographic features are assumed. However, it has not been clarified how these variations affect track buckling stability. In this paper, the rail temperature distribution of the track is calculated in consideration of the shadow of the geographic feature using the rail temperature prediction model. As a result, it is confirmed that the above-mentioned analysis can reproduce the drop of rail temperatures between 10 °C and 15 °C, which corresponds to the rail temperature difference actually observed in shady and sunny areas.

キーワード：レール温度予測，レール温度分布，地物の陰，GIS，軌道座屈，日射量解析

## 1. はじめに

ロングレールの座屈安定性は、有道床軌道の保守管理の面で重要な課題となる。我が国では、想定されるレール温度上昇量と、軌道の剛性と形状から算出される座屈耐力に相当する温度変化量を照査し、座屈安定性を評価している。その際、実軌道においては、地物（地形や建物の総称）の陰によるレール温度・軸力のばらつきが想定されるが、現行では、一定区間内で一様なレール温度・軸力を仮定した管理が行われている。また、座屈耐力の算定に用いる理論式<sup>1) 2)</sup>や、座屈安定性に関する種々の解析<sup>3) 4) 5)</sup>においても、これらのばらつきの影響は考慮されていない。この理由として、日陰は時々刻々と変化するため、これに伴う広域のレール温度と軸力の分布の変化を、実用に耐えうる精度と頻度で把握することが困難なことが挙げられる。実務上はこのようなマクロな評価が主流であるが、日陰のレール温度・軸力の低下を加味して座屈安定性を評価できれば、管理コストの削減に繋がることを期待できる。

一方で、太陽光発電の設計や道路表面の温度管理などの分野では、地物の日陰を考慮した日射量分布を、地理情報システムのデータ（GIS データ）を用いた日射量解析から推定する手法が活用されている<sup>6)</sup>。筆者は、広域のレール温度の分布を把握する手法として、既往研究<sup>7) 8)</sup>を参考に、レール敷設位置における日射量等からレール温度を予測するモデルを開発した<sup>9)</sup>。また、文献 10 で実施した試験線でのレール温度予測試験では、開発した

モデルを使用し、日陰のない箇所の日中の最高レール温度を誤差 2°C 以内で予測することができた。このモデルに、地物の陰を考慮した日射量分布を適用できれば、レール温度・軸力分布を詳細に再現することが可能となるものと考えられる。

そこで本研究では、まず GIS データを使用した日射量解析をレール温度予測モデルに適用し、広域のレール温度分布を地物の日陰を考慮して予測可能な手法を提案する。次に、日中に建物等の日陰と日向が混在する箇所にてレール温度を測定し、日陰箇所でのレール温度の分布特性を把握するとともに、提案手法の妥当性を実証する。

## 2. 地物の陰を考慮したレール温度予測モデル

本章で述べる地物の陰を考慮したレール温度予測モデルとは、文献 9 のレール温度予測モデルにおける日射量の評価に GIS データを用いた日射量解析値を適用し、建物等の陰の影響を考慮可能としたものである。

本稿では、時間軸を  $t$ 、レール長手方向の位置を  $x$  とする。レール温度予測の計算フローを図 1 に示す。まず、GIS データ（地形、建物、線路データ）を使用した日射量解析より、レール敷設位置の日射量（後述する法線面直達日射  $I_{dn}(x,t)$  と水平面散乱日射  $I_{sh}(x,t)$ ）を建物等の陰を考慮して算出する（図 1）。次に、日射量とレールの幾何形状等からレールが吸収する熱流量  $Q_{in}(x,t)$  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  $Q_{out}(x,t)$  をレール温度より求め、熱伝導解析を実施して時刻  $\Delta t$  後のレール温度を算出する。これを任意の日時  $t_M$  まで繰返し、位置  $x$  における  $t_0$  から  $t_M$  のレール温度  $T_R(x,t)$  を計算する。詳細を以下に述べる。

\* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

\*\* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

\*\*\* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室（現 東日本旅客鉄道株式会社）

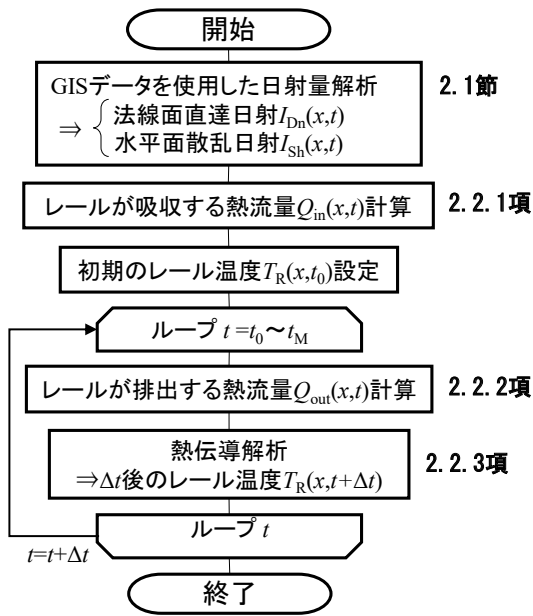


図1 地物の陰影を考慮したレール温度予測モデル

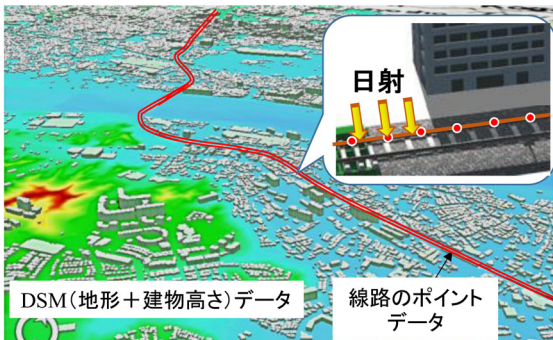
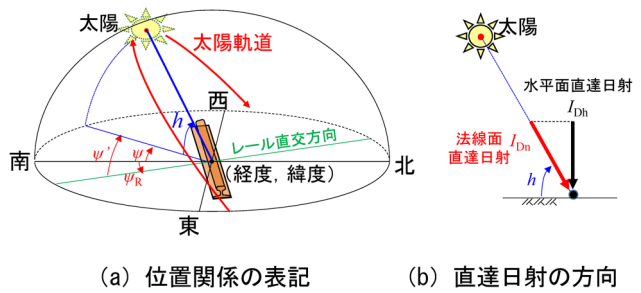


図2 GIS データを使用した日射量解析

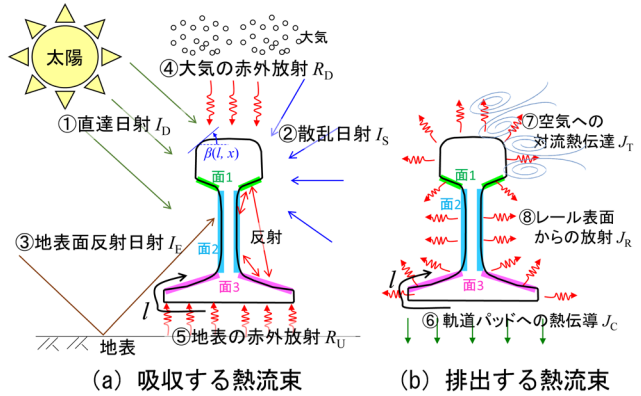
### 2.1 GIS データを使用した日射量解析

日射量の計算には、ArcGIS Spatial Analyst エクステンションの“ポイントの日射量”解析ツールを使用する。同解析ツールでは、DSM データ（建物や樹木の高さを含む数値標高データ）とポイントデータから、ポイントデータ位置における、任意の日時の水平面直達日射  $I_{Dh}(x,t)$  と水平面散乱日射  $I_{Sh}(x,t)$  を算出できる。ここで、直達日射とは太陽光球面から直接地上に到達する太陽放射、散乱日射とは大気成分により散乱・反射して天空の全方向から届く太陽放射の単位面積当たりのエネルギーである。水平面で受けた直達日射と散乱日射をそれぞれ水平面直達日射、水平面散乱日射といい、太陽光線に対して垂直な面で受けた直達日射を法線面直達日射という。また、水平面と太陽光の成す角度  $h(x,t)$ （太陽高度、図3(a)）は、ポイントデータの位置（経度、緯度）と日時から分かるので、次式を用いて水平面直達日射  $I_{Dh}(x,t)$  を法線面直達日射  $I_{Dn}(x,t)$  に変換できる。



(a) 位置関係の表記 (b) 直達日射の方向

図3 太陽とレールの位置関係



(a) 吸収する熱流束 (b) 排出する熱流束

図4 レールの熱収支モデル

$$I_{Dn} = \frac{I_{Dh}(x,t)}{\sin h(x,t)} \quad (1)$$

レール温度予測計算では図2のように、入力するポイントデータに、線路に沿って配置したポイントデータを使用することで、任意の日時  $t$ 、レール敷設位置  $x$  における法線面直達日射  $I_{Dn}(x,t)$  と水平面散乱日射  $I_{Sh}(x,t)$  を求める。

### 2.2 日射量を入力値としたレール温度予測法<sup>9)</sup>

#### 2.2.1 レールが吸収する熱流量 $Q_{in}(x,t)$ 計算

レール表面が受ける熱流束として、図4(a)に示すように、①直達日射  $I_D(l,x,t)$ 、②散乱日射  $I_S(l,x,t)$ 、③地表面反射日射  $I_E(l,x,t)$ 、④大気赤外放射  $R_D(l,x,t)$ 、⑤地表赤外放射  $R_U(l,x,t)$  を考慮する。①～⑤をそれぞれ式(2)～(6)より算出する。

$$I_D(l,x,t) = CS(l,x,t)I_D(x,t) \cdot (\sin h(x,t) \cos(l,x) + \cos h(x,t) \sin \beta(l,x) \cos \psi'(x,t)) \quad (2)$$

$$I_S(l,x,t) = \frac{1 + \cos \beta(l,x)}{2} I_{Sh}(x,t) \quad (3)$$

$$I_E(l,x,t) = \rho_E \frac{1 - \cos \beta(l,x)}{2} \quad (4)$$

$$R_D(l,x,t) = \frac{1 + \cos \beta(l,x)}{2} R_{Dh} \quad (5)$$

$$R_U(l,x,t) = \frac{1 - \cos \beta(l,x)}{2} \cdot \varepsilon_E \sigma \cdot (T_{GS}(x,t) + 273.15)^4 \quad (6)$$

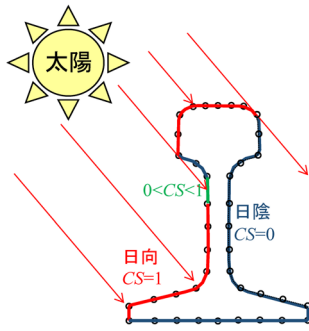


図5 レール表面の日当りを表す定数  $CS$

ここで、 $CS(l,x,t)$ ：レール表面の日当りを表わす定数 ( $0 \leq CS \leq 1$ , 図5),  $\beta(l,x)$ ：レール接平面の水平面からの傾き,  $\psi'(x,t)$ ：太陽とレールの相対方位角 (図3(a)),  $\rho_E$ ：地表面の反射率,  $R_{Dh}$ ：下向き赤外放射,  $\epsilon_E$ ：地表面の赤外線の放射率,  $\sigma$ ：ステファンボルツマン係数,  $T_{GS}(x,t)$ ：地表面の温度 [°C]。

①～⑤の和  $q_{in}(l,x,t)$  にレール表面の放射率を乗じ、レール断面形状  $L_c$  に沿って周回積分し、単位長さ当りのレールが吸収する熱流量  $Q_{in}(x,t)$  を算出する (式(7))。

$$\begin{aligned} q_{in}(l,x,t) &= I_D(l,x,t) + I_S(l,x,t) \\ &+ I_E(l,x,t) + R_D(l,x,t) + R_U(l,x,t) \\ Q_{in}(x,t) &= \oint_{L_c} \epsilon_R q_{in}(l,x,t) dl \end{aligned} \quad (7)$$

### 2.2.2 レールが排出する熱流量 $Q_{out}(x,t)$ 計算

レールが排出する熱流束として、図4(b)に示すように、⑥軌道パッドへの熱伝導  $J_C(l,x,t)$ , ⑦空気への対流熱伝達  $J_T(l,x,t)$ , ⑧レール表面からの放射  $J_R(l,x,t)$  を考慮し、それぞれ式(8)～(10)により算出する。

$$J_C(l,x,t) = -\frac{\lambda_p}{3} \frac{T_R(x,t) - T_a(t)}{2L_p} \quad (8)$$

$$J_T(l,x,t) = \alpha(x,t)(T_R(x,t) - T_a(t)) \quad (9)$$

$$J_R(l,x,t) = \epsilon_R \sigma \cdot (T_R(x,t) + 273.15)^4 \quad (10)$$

ここで、 $\lambda_p$ ：軌道パッドの熱伝導率,  $L_p$ ：軌道パッドの厚さ,  $T_a(t)$ ：気温 [°C],  $T_R(x,t)$ ：レール温度 [°C]。

ただし、式(8)では、既往研究でのレール温度、まくらぎ上面温度、気温の測定結果から導出した換算式 (軌道パッド底面の温度 =  $(T_R(x,t) + T_a(t))/2$ ) を用いている。式(9)のレール - 空気間の熱伝達率  $\alpha(x,t)$  について、文献9では、レール温度が上がりやすい無風条件を想定した自然対流でモデル化したが、本稿では、より広い風速条件下での温度予測に対応するため、強制対流でモデル化する。その際、平板の強制対流の層流熱伝達の実験式<sup>11)</sup>をレールに適用し、式(11)で求める。このモデル化の妥当性については、文献10にて確認している。

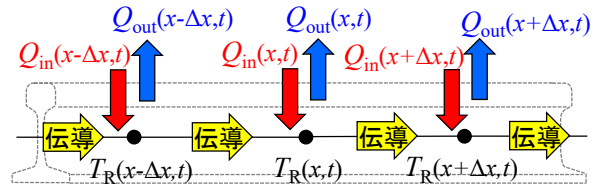


図6 レールの一次元熱伝導解析

$$\alpha(x,t) = 0.644 Pr^{1/3} \left( \frac{v_a(t)}{v \cdot L_R} \right)^{0.5} \quad (11)$$

ここで、 $Pr$ ：空気のプラントル数,  $v_a(t)$ ：風速,  $L_R$ ：レールの代表長さ,  $v$ ：空気の動粘性係数。

⑥～⑧の和をレール断面形状  $L_c$  に沿って周回積分し、単位長さ当りのレールが排出する熱流量  $Q_{out}(x,t)$  を式(12)より算出する。

$$\begin{aligned} Q_{out}(x,t) &= \oint_{L_c} (J_C(l,x,t) + J_T(l,x,t) \\ &+ J_R(l,x,t)) dl \end{aligned} \quad (12)$$

その他、レールの顎部 (図4(a,b)中の面1)、腹部 (図4(a,b)中の面2)、底部上面 (図4(a,b)の面3) については、各面が受けた熱流束 (図4(a)中の①～⑤) の反射熱流束、および各面が放射した熱流束 (図4(b)中の⑧) を他の2面が吸収する熱交換を考慮し、吸収熱流量  $Q_{in}$  と排出熱流量  $Q_{out}$  に補正を加える。詳細は文献9を参照されたい。

### 2.2.3 熱伝導解析

図6のように、レールを一次元線形要素でモデル化し、本節で求めたレールが吸収する熱流量  $Q_{in}(x,t)$  と排出する熱流量  $Q_{out}(x,t)$  を考慮した熱伝導方程式 (式(13)) を陽解法で離散化し、 $\Delta t$  後のレール温度を求める。

$$\frac{\partial T_R(x,t)}{\partial t} = \alpha_R \frac{\partial^2 T_R(x,t)}{\partial x^2} + Q^*(x,t) \quad (13)$$

$$\alpha_R = \frac{\lambda_R}{c_R \rho_R}, \quad Q^*(x,t) = \frac{Q_{in}(x,t) - Q_{out}(x,t)}{A_R c_R \rho_R}$$

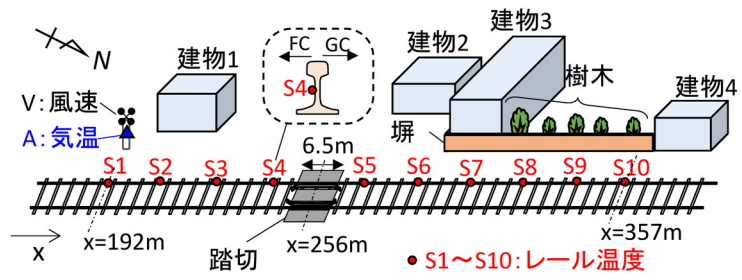
ここで、 $\lambda_R$ ：レールの熱伝導率,  $A_R$ ：レールの断面積,  $c_R$ ：レールの比熱,  $\rho_R$ ：レールの密度。

## 3. 解析手法の妥当性検証のための実軌道でのレール温度予測試験

前述のレール温度予測モデルの妥当性を検証するため、日中に建物等によりレールの一部が日陰となる箇所 (図7(a)) にてレール温度を測定し、予測値と比較した。

### 3.1 試験方法・条件

図7(b)に試験箇所周辺の建物等および測点の配置を示す。線路上の任意箇所を起点 ( $x=0m$ ) とし、レール長手方向を  $x$  軸とする。測定箇所は、ロングレール敷設区間のバラスト軌道である。軌道線形は直線、レールは



(a) 日陰の発生状況 (11時15分, x=300m付近)

(b) 試験箇所周辺の建物等および測点の配置

図7 実軌道でのレール温度予測試験

JIS 60kg レール, まくらぎは3号PCまくらぎ, レール締結装置は板ばね(5形)と線ばね(eクリップ)が混在している。試験日は2019年1月21日で, 当該箇所の日候は快晴であった。当該箇所のレール温度分布を測定するため, 図7(b)に示す10測点(S1~S10)で, フィールドコーナー(FC)側のレール腹部に熱電対(T-FFF(M), 福電社製)を設置し, 10分間隔で温度を測定した。また, レール温度予測に使用するため, ウェザーステーション(Vantage pro 2, DAVIS社製)をS1付近の沿線の, 地面から高さ1mの位置に設置し, 気温と風速を測定した。測定結果は図8に示すとおりで, 測定日の最高気温は10℃, 最大風速は3.1m/sであった。

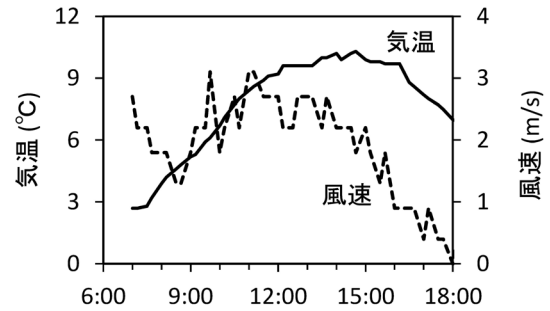


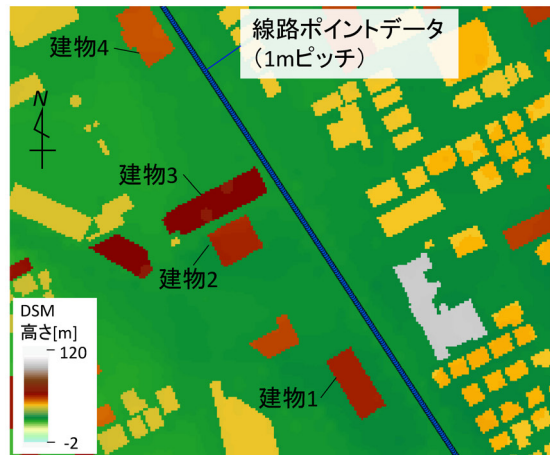
図8 気温・風速の測定結果

### 3.2 レール温度予測の計算方法・条件

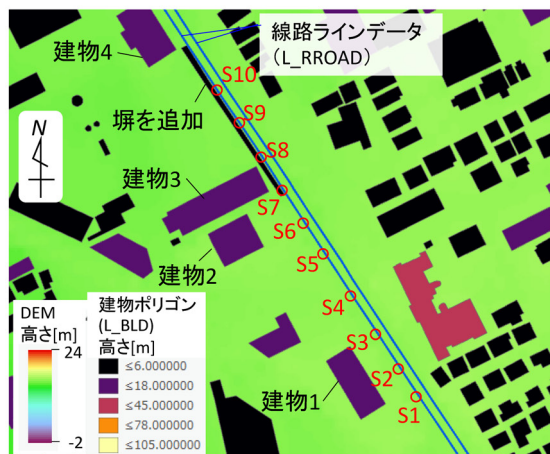
#### 3.2.1 日射量解析

図9(a)に, 日射量解析で使用するDSMデータと線路のポイントデータ, 図9(b)にそれらデータ作成の元データを示す。DSMデータのメッシュサイズおよび線路のポイントデータのピッチは1mである。日射量解析に入力するDSMデータは, 建物ポリゴンデータを標高データに変換し, DEMデータ(建物等の高さを含まない数値標高モデル)に足し合わせて作成した。その際, 建物のポリゴンデータはESRI社のArcGIS Geo Suite 詳細地図のL\_BLDを使用した。また, 図9(b)のように塀のポリゴンデータ(高さ1.5m)をソフトウェア(ArcGIS Pro)の操作画面で, 手動で作成して追加した。DEMデータは, 国土地理院が提供する5mメッシュの数値標高モデル(DEM5A)を1mメッシュに変換して使用した。線路のポイントデータは, 図9(b)に示すように, ArcGIS Geo Suite 詳細地図の線路のラインデータL\_RROADより作成した。

次に, “ポイントの日射量”解析ツールに図9(a)のデータを入力し, 2019年1月21日の日射量を0.25時間間隔で求めた。解析パラメータとして, 大気透過率と散乱率(全天日射のうち散乱する比率)は快晴を想定し, それぞれ0.7, 0.3とした。また, 散乱モデルのタイプは“均質な曇り空”(天空の全ての方向から地球に

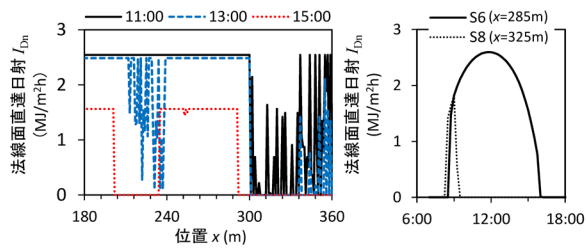


(a) 日射量解析の入力データ (DSM, 線路ポイント)

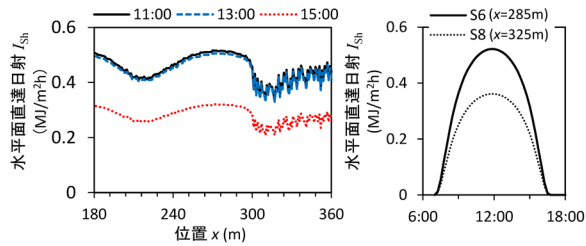


(b) 元データ (DEM, 建物ポリゴン, 線路ライン)

図9 日射量解析用データ (DSM, 線路ポイント) 作成



(a) 法線面直達日射  $I_{Dn}$



(b) 水平面散乱日射  $I_{Sh}$

図 10 日射量解析の結果

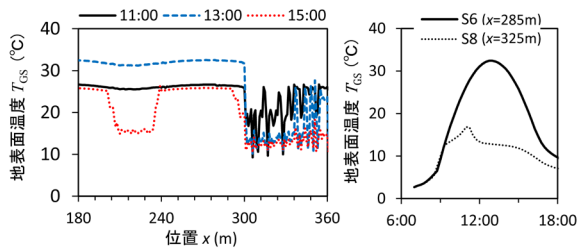


図 11 地表面温度  $T_{GS}$

到達する散乱日射は全て同じ)とした。図 10 に、レール温度測定箇所付近の法線面直達日射  $I_{Dn}$  と水平面散乱日射  $I_{Sh}$  の解析結果をそれぞれ示す。左図は 11:00, 13:00, 15:00 における  $x$  方向の分布、右図は測点 S6 ( $x=285m$ ), S8 ( $x=325m$ ) での時刻歴波形である。図より、 $200m < x < 240m$  と  $290m < x$  では日射量が他と比較して小さい。前者は建物 1、後者は建物 3 と塀による陰が現場で観測された箇所であり、これらの陰による日射量の減少を解析で表すことができた。

### 3.2.2 レール温度の予測計算

前項の法線面直達日射  $I_{Dn}$  と水平面散乱日射  $I_{Sh}$  より、レールが吸収する熱流量を求め、熱伝導解析よりレール温度分布の予測値を算出した。計算に使用したパラメータを表 1 に示す。レール表面の放射率は酸化面を想定して 0.8 とした<sup>12)</sup>。地表面温度について詳細は割愛するが、レール温度同様、日射量から吸収する熱流量と地表で排出する熱流量を求め、地中との熱伝導解析より推定した図 11 を用いた。レールの代表長さ  $L_R$  は、風向等によって種々の値を取り得るが、文献 10 の試験線でのレール温度測定では、 $L_R=0.5m$  とした場合に実測値と予測値が

表 1 レール温度予測計算に用いるパラメータ一覧

項目	記号	値
レール表面の放射率	$\epsilon_R$	0.8
ステファンボルツマン係数	$\sigma$	$5.67 \times 10^{-8}$ W/( $m^2K^4$ )
地表面の反射率	$\rho_E$	0.3
下向き赤外放射	$R_D$	0.8 MJ/( $m^2h$ )
地表面の赤外線の放射率	$\epsilon_E$	0.95
軌道パッド熱伝導率	$\lambda_p$	0.25 W/(mK)
軌道パッド厚さ	$L_p$	0.01 m
レール代表長さ	$L_R$	0.5 m
空気のプラントル数	$Pr$	0.7
レール鋼密度	$\rho_R$	7820 kg/ $m^3$
レール比熱	$c_R$	461 J/(kgK)
レール熱伝導率	$\lambda_R$	50 W/(mK)
レール断面積	$A_R$	0.00775 $m^2$
気温	$T_a$	図8
風速	$v_a$	図8
空気の動粘性係数	$\nu$	14 $\mu m^2/s$

良く一致したためこれを用いた。下向き赤外放射  $R_D$  は、冬季の快晴時の平均的な値を用いた。レールの初期温度は、日の出直前の気温と同じ 2.7°C とした。熱伝導解析の解析時間増分  $\Delta t$  を 0.25 時間 (900 秒)、空間増分  $\Delta x$  を線路のポイントデータピッチと同じ 1m とした。

### 3.3 試験結果

図 12 に、10:00 ~ 15:00 のレール温度分布の測定値と予測値の比較を示す。図より、12:00, 14:00, 15:00 で、測点 S4 と S5 の測定値が、周囲の測点の測定値や予測値との差が大きい。これは、S4 と S5 間の  $x=256m$  の位置に幅 6.5m の踏切があり、この付近で熱収支条件が異なるためと考えられる。その他の箇所のレール温度分布は、測定値と予測値で概ね一致した。測定では、日向のレール温度がピークとなる 14:00 で、建物 1 の陰となる測点 S2, S3 では周囲の日向と比較して約 10°C、建物 3 と塀の陰となる S7 ~ S10 では、周囲の日向と比較してレール温度が約 15°C 低いが、予測値でも、このレール温度分布の傾向をよく再現している。S2, S3, S7 ~ S10 で観測された建物の陰による温度低下 (図 10) は、既往の予測モデル<sup>7)</sup>では再現不可能であったものであり、レール温度予測に建物等の陰を考慮した日射量分布を使用することで、実測との整合性が大幅に向上することが分かった。

以上、提案したレール温度予測モデルの妥当性を現地試験により確認した。

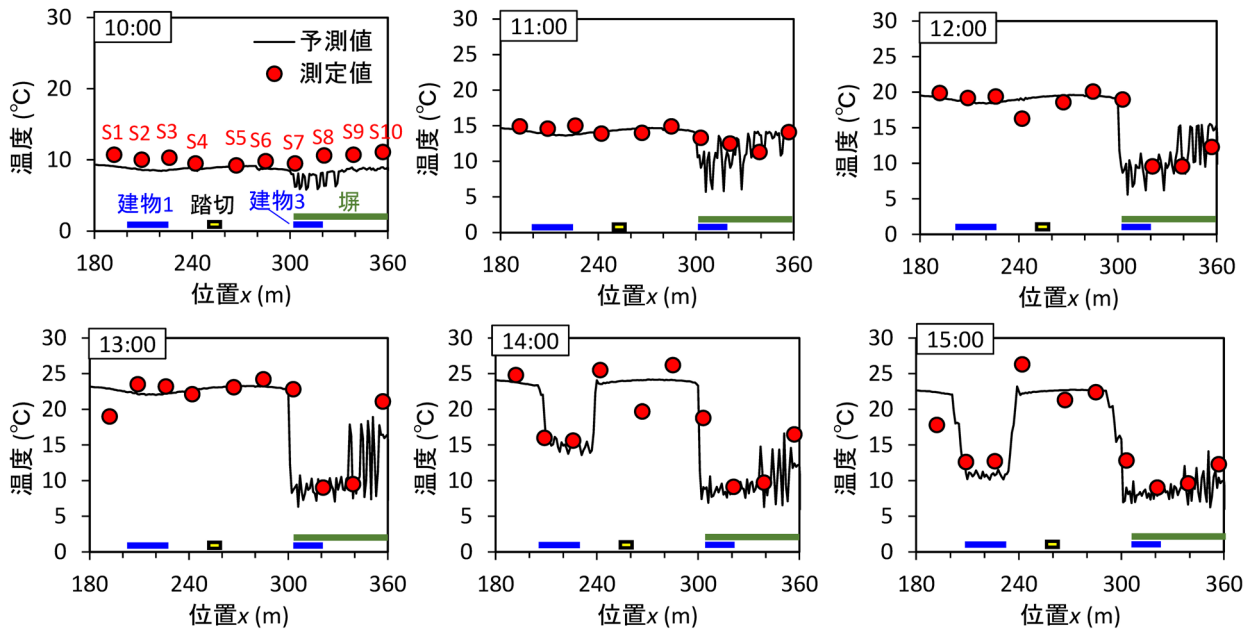


図 12 レール温度分布の測定値と予測値の比較

#### 4. まとめ

建物等の陰の発生状況とそれに伴うレール温度・軸力のばらつきを把握するため、地物の標高データから算出した日射量分布を用いてレール温度分布を予測するモデルを提案し、提案モデルによるレール温度予測値と測定値を比較した。得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 実軌道におけるレール温度の測定値と予測値との比較より、提案したレール温度予測モデルの妥当性を確認した。
- ・ 冬季のレール温度測定では、日中に建物の日陰となる区間で、日向の区間と比較してレール温度が $10^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ 低下した。
- ・ 提案した予測モデルにて、日陰箇所の温度低下を含む実軌道のレール温度分布を再現できた。

#### 文 献

- 1) 沼田実：ロングレールの座屈強さ，鉄道総研技術研究報告 No.721, 1970
- 2) 佐藤吉彦，小林悟：60kg レールを含む各種レールの軌道座屈強さと座屈強さ略算式，鉄道総研技術研究報告 No.759, 1971
- 3) 岩佐裕一，片岡宏夫，柳川秀明：横圧に対する軌道の座屈安定性評価，Vol. 19, No.02, pp.11-16, 2005
- 4) 西宮裕騎，片岡宏夫：座屈発生点を考慮したロングレールの座屈安定性の評価法に関する一考察，鉄道工学論文集，Vol. 20, pp. 9-15, 2016
- 5) 浅沼潔，曾我部正道，後藤恵一，徳永宗正：弾塑性有限変位解析によるバラスト軌道の座屈温度特性値に関する検討，土木学会論文集 A2, Vol. 68, No. 1, pp. 78-91, 2012
- 6) 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
- 7) Y.Zhang, J.Clemenzi, K.Kesler, S.Lee : Real Time Prediction of Rail Temperature, *AREMA 2007 Annual Conference*, Chicago, IL.
- 8) H.Wang, J.Chen, P. N.Balaguru and L.Al-Nazer: Thermal Benefits of Low Solar Absorption Coating for Preventing Rail Buckling, *Proceedings of the 2015 Joint Rail Conference*, March 23-26, 2015, San Jose, CA, USA.
- 9) 浦川文寛：日射を考慮したレール温度予測モデル，鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 J-RAIL, S7-6-4, 2017
- 10) 浦川文寛，木村成克：レール温度予測モデルを用いたレールの敷設方向が温度上昇に及ぼす影響評価，土木学会第 73 回年次学術講演会，VI -859, 2018
- 11) 萩三二：熱伝達の基礎と演習，pp. 51-52, 東海大学出版会，1975
- 12) 萩三二：熱伝達の基礎と演習，p. 77, 東海大学出版会，1975