

論文 気象予報データを使用したレール温度 予報システムの検討

浦川 文寛¹・渡辺 勉¹

¹正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 軌道力学（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

E-mail: urakawa.fumihito.07@rtri.or.jp

本稿では、レール温度予測モデル¹⁻³⁾と気象予報データ（気温、相対湿度、日射量、風速）を使用し、日中のレール温度の変動を当日の朝に予測する、レール温度予報システムの実現可能性を検討するため、実軌道のレール温度の予測値と測定値を比較し、予測精度を検証した。その結果、気象要素の実測値を使用した場合、夏季の最高レール温度を誤差2.2℃以下、レール温度が最高値に達する時刻、および50℃を超過する時間帯を誤差10分以下で予測可能であり、レール温度予報システムは高い予測精度を有することを実証した。一方で、気象庁あるいは市販の気象予報データを使用した場合については、雲等による局所的な日射量変動の再現精度が低い場合があり、レール温度のピークを捉えることができず、最高レール温度の予測結果は実際よりも最大5℃低くなった。

Key Words : rail temperature prediction, weather prediction data, track buckling, variation of rail temperature, Solar radiation,

1. はじめに

(1) 研究の背景

夏季にレール温度が過度に上昇すると、軌道座屈の危険性が高まる。軌道座屈は脱線に繋がる重要な問題であるため、鉄道会社は数キロから数十キロの間隔でレール温度計を設置してレール温度を常時測定し、管理値を超過する場合は張出警備（夏季特別巡回）や運転規制（徐行、運休）を行う等、その管理に多大な労力を費やしている。

(2) 常時測定に基づくレール温度管理の課題

レール温度の管理値は路線によって異なるが、張出警備は50℃前後、運転規制は60℃前後とするのが一般的である。ここで、図1(a)のようにレール敷設方向が南北と東西とで異なる2箇所でのレール温度を測定した結果を図1(b)に示す。張出警備の管理値を50℃とすると、7月9日の測点1では、50℃を超過する時間帯は9:00～15:30であり、日中の多くの時間帯で張出警備が必要となる。測点2では、50℃を超過する時間帯は11:40～13:30と、測点1と比較して張出警備が必要となる時間は4時間以上短い。日最高レール温度を比較すると、7月9日では測点1が測点2より約1℃高く、9月18日では測点2の方が3℃高い。

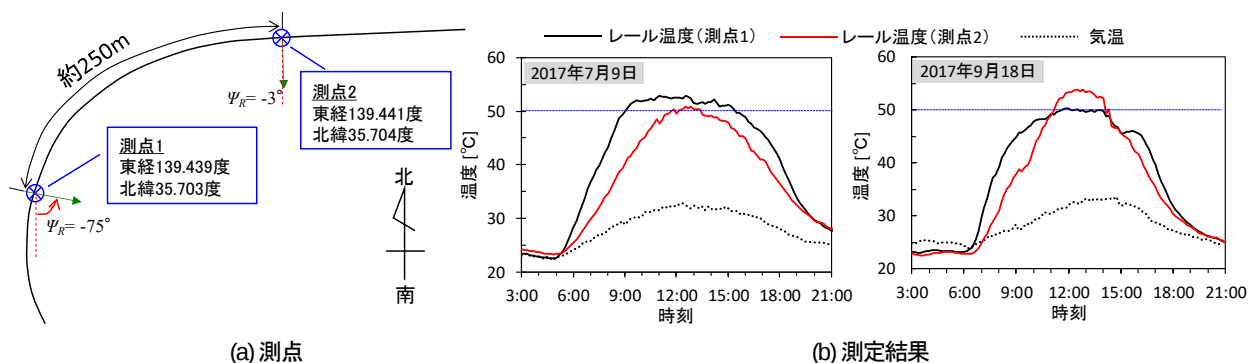


図-1 試験線でのレール温度測定結果

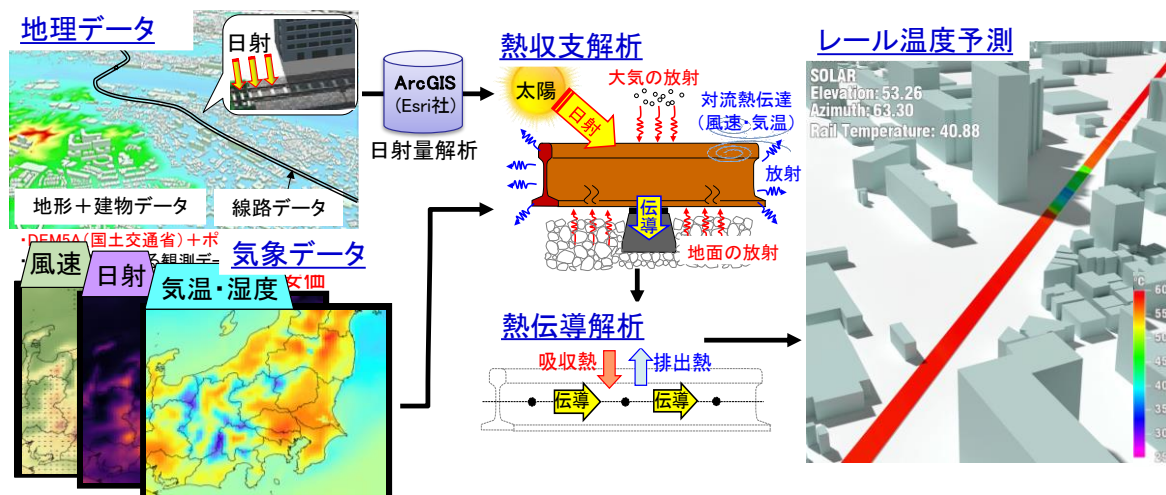


図2 レール温度予測モデル

このレール温度の差はレール表面と太陽光の相対角度により説明できるが、詳細は文献1)を参照されたい。仮に、測点1にレール温度計を設置してレール温度を管理した場合、測点2では9:00～11:40と13:30～15:30に余分に張出警備を行うこととなる。また、9月18日の測点2の13時頃に観測される最高レール温度を捉えられない。一方、測点2にレール温度計を設置した場合、測点1の10時前後と14時前後のレール温度が高い状態を捉えられない。

(3) 研究の目的

上述ようなレール温度の変化を場所毎の差も含めて予測し、レール温度が高い時間帯と場所を限定できれば、安全性の向上と管理コストの削減に繋がることが期待できる。列車運行についても、運転規制が必要な時間帯が予め分かれば、事前にお客様に運転規制のお知らせをしたり、代替輸送を手配したりするなど、利便性の向上にも寄与するものと考えられる。

筆者らは、レールの敷設方向や地物（地形、建物、樹木等の総称）の陰といった地理的要因、および日射量、気温、湿度、風速等の気象条件がレール温度に及ぼす影響を定量化し、レール温度管理に反映させるため、地理・気象データを入力値としたレール温度予測モデル（図-2）を開発した¹³⁾。本モデルは図-2に示すとおり、レールの熱収支解析と熱伝導解析を行い、気象条件（日射量、気温、相対湿度、風速）に対応したレール温度の時空間分布を解析的に求めるもので、これに気象予報等の事前情報を入力すれば、レール温度を事前に予測すること（以降「レール温度予報」）が可能になると考えられる。

本研究では、日中のレール温度の変動を当日の朝に予測する、レール温度予報システムの実現可能性を検討す

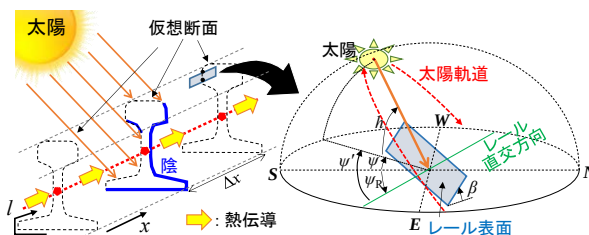


図3 レールの3次元形状の評価法

る。まず、レール温度予測モデルの概要を述べた後、レール温度の実測値と気象要素（気温、相対湿度、日射量、風速）の実測値から予測したレール温度とを比較し、レール温度予測モデルの妥当性を検証する。さらに、レール温度の実測値と、気象予報値（気温、相対湿度、日射量、風速）から予測したレール温度とを比較し、レール温度予報の精度検証を行う。

2. レール温度予測モデルの概要

(1) レールの3次元形状の影響評価法

既往研究において、気象条件からレールの熱エネルギーの収支を計算し、レール温度を予測する手法がいくつか提案されており⁴⁾、そのレール温度予測結果は、日向のレール温度の測定結果と近い値が得られると報告されている⁹⁾。しかしながら、熱収支計算の詳細、特に、熱エネルギーの主要な入力源である日射について、レール表面と太陽光の相対角度やレール自体の陰など、レールの3次元形状の影響は言及されていない。また、日陰の影響についても考慮した事例は報告されていない。

そこで、本モデルでは、既往研究⁴⁾と同様、レールの熱収支からレール温度を予測するが、日射については、レールの3次元形状や敷設方向を考慮してより詳細にモデル化する。具体的には、図-3に示すとおり、線路の地

図データに沿って、熱伝導解析用のノードを配置し、そのノード周りに仮想的なレール断面形状を付加し、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。さらに、模擬した3次元形状と太陽軌道（日時と緯度・経度の関数）により、日射とレール表面の相対角度、およびレール自体の陰を定義し（図-3）、レールの吸収熱量を定式化する。また、図-2のように、地理データを汎用GISソフトウェアのArcGIS（Esri社）に入力して日射量解析を行い、建物等の日陰箇所の日射量の低下を評価する。

(2) 熱収支解析

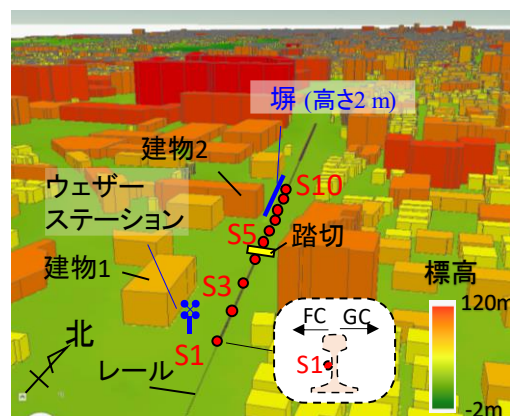
図-2（熱収支解析）に示すように、レールの吸収熱量として、日射（太陽の放射）、大気の放射、および地面の放射を、レールの排出熱量として、まくらぎへの熱伝導、空気への対流熱伝達、およびレールの放射熱を考慮する。入力する気象要素の内、気温はまくらぎへの熱伝導と空気への対流熱伝達、相対湿度は地面の放射、日射量は日射、風速は空気への対流熱伝達に関係する。詳細については文献2,3)を参照されたい。ここで、相対湿度は湿潤状態の地面の、蒸発熱による温度低下を考慮するためのパラメータである。本稿では水捌けの良いバラスト軌道の晴天時のレールを対象としており、相対湿度は解析結果に影響しないため、以降は相対湿度については言及しない。また、本モデルに入力する日射は、直達日射（太陽から地表に直接入射する日射成分）と散乱日射（大気で散乱・反射されて全方位から入射する日射成分）であり、両者で入射熱の定式化が異なるが、日射計による測定値や気象予報における日射量は水平面全天日射量（水平面が受ける直達日射と散乱日射の和）である。そこで、本モデルでは、国際規格ISO 52010⁷⁾でも採用されているErbsモデル⁸⁾を使用し、水平面全天日射を直達日射と散乱日射に分離する。

(3) 熱伝導解析

図-2（熱伝導解析）に示すように、レールを一次元線形要素でモデル化し、レールが吸収する熱流量 Q_{in} と排出する熱流量 Q_{out} を入力値とした熱伝導方程式を陽解法で離散化し、指定する時刻まで Δt 後のレール温度を逐次計算する。

3. レール温度予測モデルの妥当性検証のための実軌道でのレール温度予測試験

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にてレ



S1～S10:レール温度測点

図-4 測点および周辺の建物等の配置（地理データ）

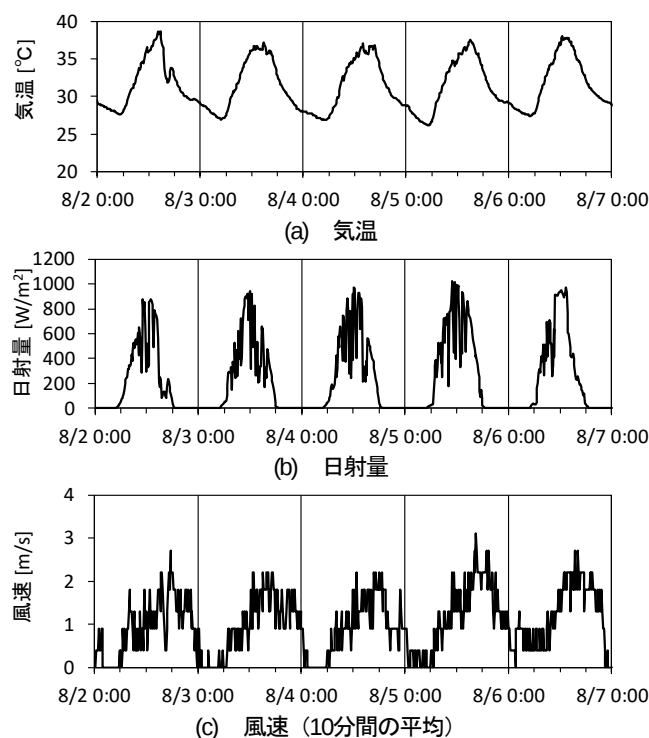


図-5 気象要素の測定結果

ール温度を測定し、予測値と比較した。

(1) 試験方法・条件

図-4 に試験箇所の状況および測点を示す。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 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 8 月 2 日から 8 月 6 日の 5 日間で、天候は晴天であった。当該箇所のレール温度分布を測定するため、図-4 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、S1 付近

の沿線の、地面から高さ 1m の位置にウェザーステーション (Vantage pro 2, DAVIS 社製) を設置し、レール温度予測に使用する気象要素 (気温, 日射量, 風速) を 10 分間隔で測定した。

(2) レール温度予測の計算方法・条件

a) 気象条件

気象条件は、図-5 に示す気象要素の測定結果を使用した。図-5(a) のとおり、試験期間中は最高気温が 35℃ を超す酷暑日であった。図-5(c) のとおり、日射量は正午頃にピークとなり、900W/m² から 1000W/m² 程度まで上昇した。また、同図より日射量が短時間で変動しているが、これは曇による日射が一時的に遮られたためである。風速 (10 分間の平均) は午後に大きくなり、レール温度がピークとなる 14 時前後では 2m/s 前後であった。

b) 解析パラメータ

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は、頭頂面 (幅 30mm) では照り面を想定して 0.2、その他は酸化面を想定して 0.75 とした⁹⁾。地表面温度について詳細は割愛するが、レール温度と同様、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値を用いた。図-6 に、8 月 2 日の測点 S6 と S7 の地表面温度を例示するが、日中では地表面温度が 60℃ 前後まで上昇する。下向き赤外放射 (大気の放射熱) R_d は、8 月の平均的な値¹⁰⁾を用いた。解析時間は日の出時刻の 5 時から 21 時とした。レールの初期温度は、日の出時刻 (5 時) の気温と同じとした。熱伝導解析の解析時間増分 Δt を 10 分 (600 秒)、空間増分 Δx を線路のポイントデータピッチと同じ 1m とした。

c) 陰の発生状況

図-7 に、建物等の地理データ (図-4) から算出した 8 月 2 日の日照時間の分布を示す。図で、日照時間が 10 分より短い箇所は、建物等の陰が生じている箇所であり、13 時頃に S7 付近で陰が生じ、その後は時間の経過とともに、日陰となる範囲が S7~S10 まで広がっていくことが分かる。また、S1~S3 付近では、16 時頃に日陰となった。

(3) 試験結果

図-8(a),(b) に、測点 S6 と S7 のレール温度の測定値と解析値の比較を示す。図-8(a) より、測点 S6 ではレール温度の測定結果は 12 時~15 時の間で最高温度に達する。最高レール温度は 8 月 3 日では解析値の方が測定値より 2.2℃ 高いが、その他の試験日では解析値と測定値の差が 1.5℃ 以下となった。また、測点 S7 のレール温度の測定値は、建物 2 の陰が生じる 13 時頃からレール温度

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	ϵ_R	頭頂面:0.2 頭頂面以外:0.75
ステファンボルツマン係数	σ	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$
地表面の反射率	ρ_E	0.3
下向き赤外放射	R_D	1.55 MJ/(m ² h)
地表面の放射率	ϵ_E	0.95
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
空気のプラントル数	Pr	0.7
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
空気の動粘性係数	ν	14 $\mu\text{m}^2/\text{s}$

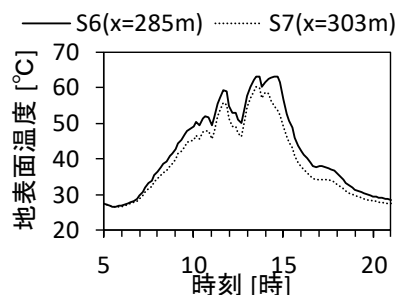


図-6 地表面温度 (8月2日の解析結果)

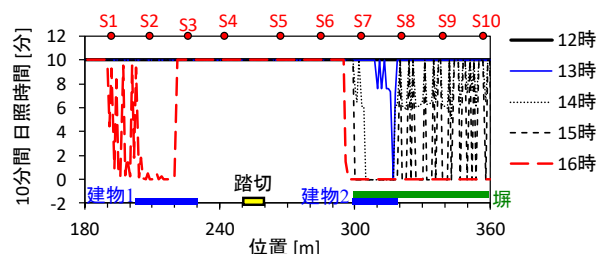
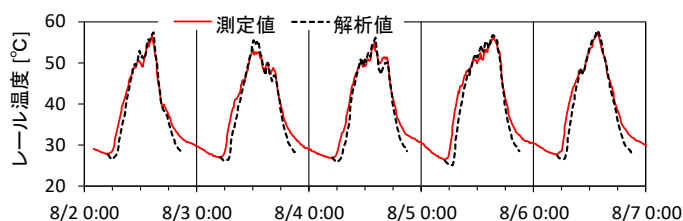
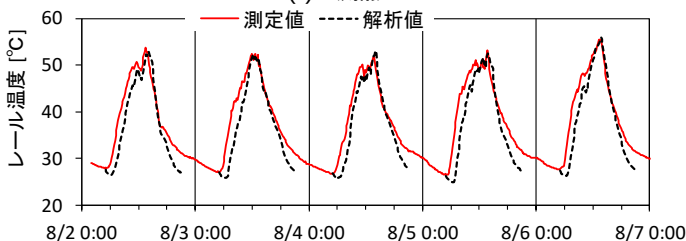


図-7 日照時間分布 (8月2日の日射量解析結果)



(a) 測点S6



(b) 測点S7

図-8 レール温度の測定値と予測値の比較

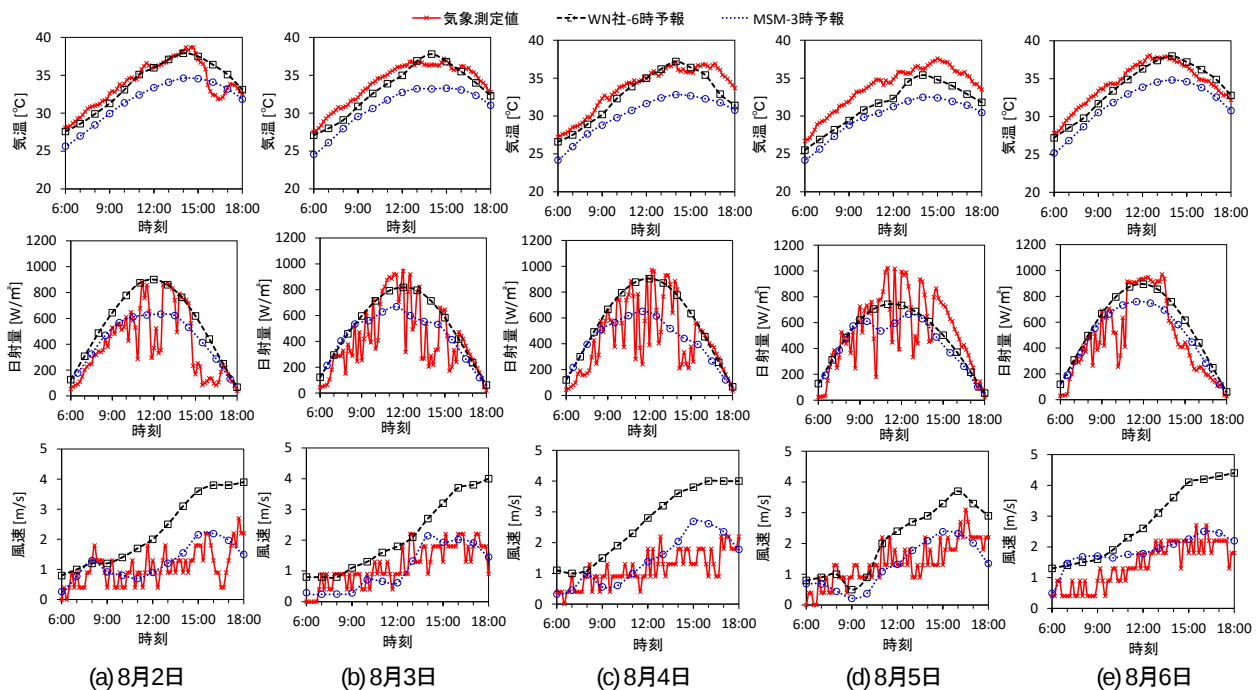


図-9 気象予報データと気象測定値の比較

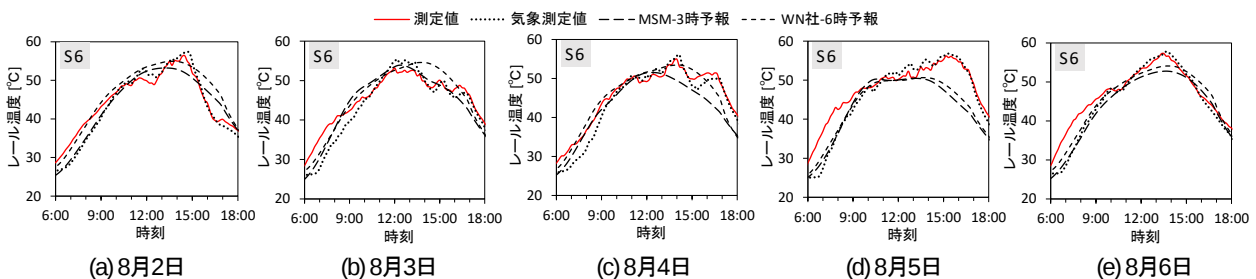


図-10 レール温度の測定結果と予報結果の比較（測点S6）

が下降し、測点S6と比較して最高レール温度は1℃から3℃低下するが、解析においても日陰箇所のレール温度の低下を再現できていることが分かる。

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実証できたので、次章では、本モデルと気象予報値データを使用したレール温度予報の精度検証を行う。なお、18時以降のレール温度は解析値が測定値よりも低い、これは、周辺建物の放射熱等の影響を十分に再現できていないことが原因と考えている。

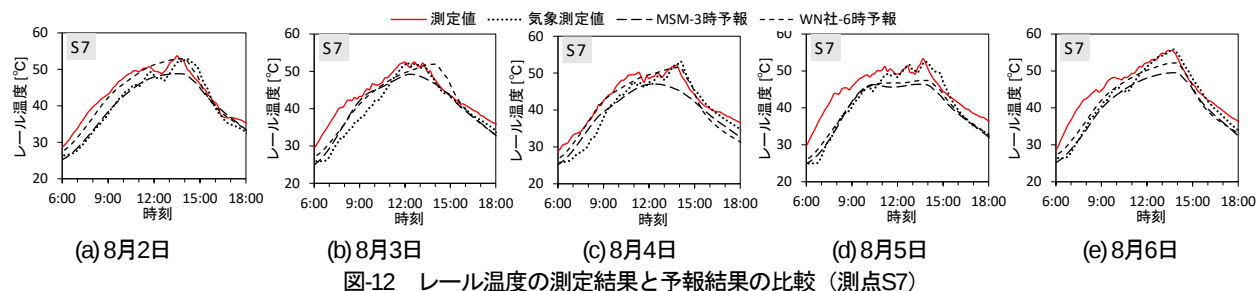
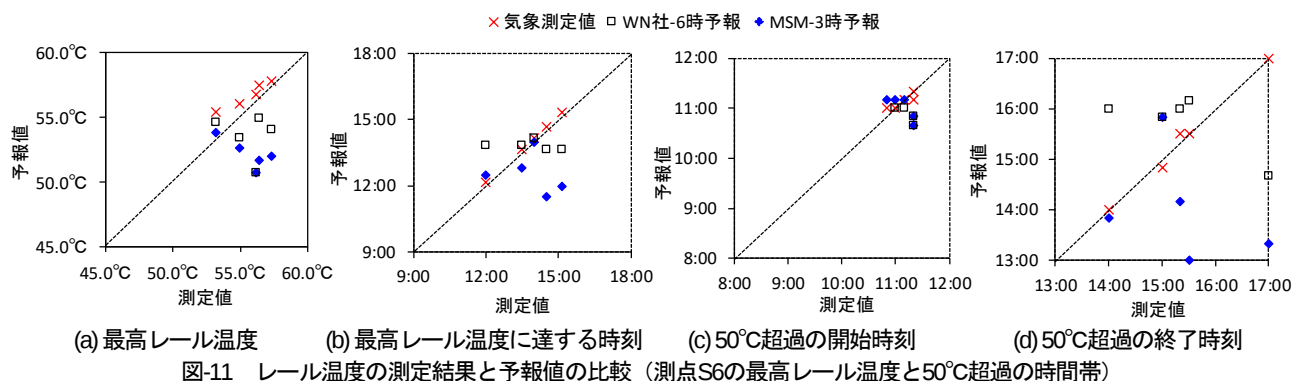
4. レール温度の予報精度の検証

気象庁が配信するメソ数値予報モデル（MSM）¹¹⁾、および㈱ウェザーニューズ（以降「WN社」）の気象予報データをレール温度予測モデルに入力してレール温度予報を行い、3章でのレール温度の測定値と比較した。メソ数値予報モデルとは、大気層中に仮定した3次元の格子点に気温や気圧などの気象要素の初期値を与え、その変化を逐次計算して求めた数値予報データの一つである。予報領域は北緯22.4度～47.6度、東経120度～150度（日

本全域をカバー）、格子サイズは0.05度×0.0625度（およそ5kmメッシュ）で、予報時間は0時間後～39時間後（1時間間隔）である。

(1) 気象予報データ

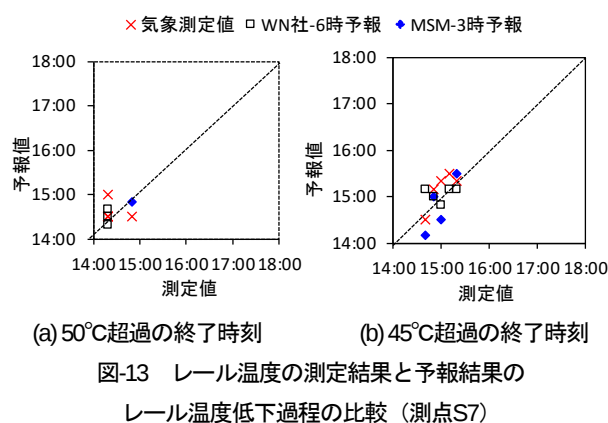
図-9(a-c)に、2019年8月2日から6日の、MSMおよびWN社の気象予報データと測定値の比較を示す。ここで、WN社のデータは当日6時時点での予報値であり、本稿では「WN社-6時予報」、MSMデータは当日3時時点の予報であり「MSM-3時予報」と記載する。また、気象要素の測定値についてはレール温度の測定値との混同を避けるため、「気象測定値」と記載する。図-9より、気温について、WN社-6時予報は気象測定値と近い値で、MSM-3時予報は気象測定値よりも3℃前後低い傾向がある。風速について、風速が高くなる午後では、WN社-6時予報は気象測定値よりも2m/s前後高い傾向があり、MSM-3時予報は気象測定値と近い値である。日射量について、WN社-6時予報は、雲による日射量の低下がない気象測定値と近く、MSM-3時予報は雲による低下を含む気象測定値の平均的な日射量に近い傾向が見られる。



また、8月5日の11時～16時に日射量については、気象予報データよりも気象測定値の方が約 300W/m^2 大きく、気象予報値と実現現象の乖離が大きいことが分かる（図-9(d））。

(2) レール温度の予報結果

図-10(a-e)に、8月2日から6日の測点S6（図-4）におけるレール温度の予報結果と測定結果の比較を示す。また、レール温度予報値を使用して最高レール温度の管理と張出警備を行うことを想定し、日最高レール温度とそれに達する時刻、およびレール温度が 50°C を超過する時間帯の開始時刻と終了時刻を図-10(a-e)から読み取り、レール温度の測定値と比較した結果を図-11(a-d)に示す。レール温度予報結果について、気象測定値を用いた場合、日中のレール温度の変化を概ね再現できた（図-10(a-e)）。また、レール温度の日最高値をレール温度の測定値と比較して誤差 2.2°C 以下、レール温度が日最高値に達する時刻および 50°C を超過する時間帯の開始時刻と終了時刻をそれぞれ誤差10分以下で予測することができた（図-11(a-d)）。図-10(a-e)より、気象予報データを用いた場合、8月5日を除くと、日中のおおよそのレール温度の変動を予測できたが、日射の細かな変動に伴うレール温度のピークを捉えられておらず、最高レール温度は、WN社-6時予報では測定値と比較して 2°C 前後、MSM-3時予報では 4°C 前後低くなった（図-11(a)）。レール温度の 50°C 超過の終了時刻についても、測定値との相関性が見られない。また、日射量の測定値と予報値の差が約 300W/m^2 と大きい8月5日の午後については、レール温



度の予報値と測定値の乖離が顕著となり、レール温度の測定値がピークとなった16時では予報結果が測定値よりも約 10°C 低くなった。

図-12(a-e)に、測点S7におけるレール温度の予報結果と測定結果の比較を示す。また、図-13(a),(b)に、レール温度が 50°C と 45°C を超過する時間帯の終了時刻を示す。ここで、 45°C は座屈の危険性が特に高い箇所に応用される管理値であるが、これを用いたのは、S7ではレール温度の予報値が 50°C を超過しないケースが多かったためである。前述の通り、S7付近では13時頃から建物2の陰が生じ、レール温度が下がり始めるが、気象予報データ（WN社-6時予報、MSM-3時予報）を用いたレール温度の予報結果においても、この時間帯のレール温度の低下過程を再現でき、レール温度の 50°C 、 45°C 超過の終了時刻を誤差30分以下で予測することができた。

以上、沿線の気象測定値を使用した場合、日中の最高レール温度や最高レール温度に達する時刻、およびレー

ル温度の管理値（ここでは 50℃）を超過する時間帯等、レール温度を管理する上で有益な情報を精度良く予測できたことから、正確な気象予報データが得られれば、レール温度予報が可能であることが分かった。ただし、今回使用した気象予報データには、雲による日射量の細かな変動は含まれていないため、それに伴うレール温度のピークを予測できず、最高レール温度の予報値は実際よりも低くなった。日射が遮られる日陰箇所におけるレール温度の低下過程については、今回の気象予報データでも精度良く予測することができた。

5. まとめ

本稿では、既往研究で開発したレール温度予測モデルと、気象予報データを使用し、日中のレール温度の変動を当日の朝に予測する、レール温度予報システムの実現可能性を検討するため、気象要素（気温、相対湿度、日射量、風速）の実測値から予測したレール温度とを比較し、レール温度予測モデルの妥当性を検証した。さらに、レール温度の実測値と、気象予報値（気温、相対湿度、日射量、風速）から予測したレール温度とを比較し、レール温度予報の精度検証を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- ・沿線での気象要素の実測値から、夏季の日中のレール温度を予測し、測定値と比較したところ、日最高レール温度を誤差 2.2℃以下、レール温度が最高値に達する時刻、および 50℃を超過する時間帯を誤差 10 分以下で予測できた。この結果より、レール温度予測モデルの妥当性を実証できた。また、正確な気象予報データが得られれば、レール温度予報システムの実現が可能であることが分かった。
- ・本稿で使用した気象予報データには、雲による日射量の細かな変動は含まれていない。そのため、日射の変動に伴うレール温度のピークを捉えられておらず、最高レール温度は、WN 社-6 時予報では測定値と比較して 2℃前後、MSM-3 時予報では 4℃前後低くなった。また、レール温度の 50℃超過の終了時刻についても、測定値との相関性が見られなかった。
- ・日射が遮られる日陰箇所におけるレール温度の低下過程については、今回の気象予報データでも精度良く予測することができ、レール温度の 50℃、45℃超過の終了時刻を誤差 30 分以下で予測することができた。

6. 今後の展望

レール温度予測モデルについて、様々な気象・地理・

軌道条件下にて予測精度の検証を行い、本モデルが一般的に適用可能であることを確認する。

レール温度予報システムについて、今回使用した気象予報データでは、雲の影響を含む日射量の評価に課題があることが分かった。今後は、今回使用した気象予報データ以外についても検討を行い、実際の気象条件を予測しうる予測モデルを選定する予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 浦川文寛, 渡辺 勉, 木村 成克: 地物の陰影を考慮した軌道座屈安定性評価に関する一考察, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.23, pp.245-252, 2019
- 4) Y. Zhang, J. Clemenzi, K. Kesler, S. Lee : Real Time Prediction of Rail Temperature, *AREMA 2007 Annual Conference*. Chicago, IL.
- 5) Hao Wang, Jiaqi Chen, P. N. Balaguru and Leith Al-Nazer: Thermal Benefits of Low Solar Absorption Coating for Preventing Rail Buckling, *Proceedings of the 2015 Joint Joint Rail Conference*, March 23-26, 2015, San Jose, CA, USA.
- 6) R. BRUZEK, L. AL-NAZER, L. BIESS and L. KREISEL : Rail Temperature Prediction Model as a Tool to Issue Advance Heat Slow Orders, September 28 – October 01, 2014, *AREMA 2014 Annual Conference*, Chicago, IL.
- 7) ISO 52010-1, Energy performance of buildings – External climatic conditions - Part 1: Conversion of climatic data for energy calculations.
- 8) D. G. Erbs, S. A. Klein and J. A. Duffie: Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation, *Solar Energy*, Vol. 28, No. 4, pp. 293-302, 1982.
- 9) 化学大辞典編集委員会（編）：化学大辞典—シー縮刷版（4 巻）, p.817, 1963
- 10) 「赤外放射観測」, 気象庁高層気象台（最終閲覧日：2020 年 1 月 22 日）
https://www.jma-net.go.jp/kosou/obs_third_div/rad/rad_ir.html
- 11) 気象庁予報部「配信資料に関する技術情報 第 500 号～メソ・局地数値予報モデル GPV 及び MSM ガイドの予報時間延長について～」, 気象庁 HP, 2019 年 2 月 20 日更新（最終閲覧日：2020 年 1 月 22 日）
<https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/jyouhou/pdf/500.pdf>

(2020.4.3 受付)

STUDY OF RAIL TEMPERATURE FORECASTING SYSTEM USING METEOROLOGICAL FORECAST DATA

Fumihiro URAKAWA and Tsutomu WATANABE

In this paper, we use a rail temperature prediction model¹⁻³⁾ and weather forecast data (temperature, relative humidity, solar radiation, wind speed) to predict rail temperature during the daytime on the morning. In order to examine the feasibility, the predicted value of the rail temperature on the track was compared with the measured value to verify the prediction accuracy. As a result, it was possible to predict the maximum rail temperature in summer with an error of 2.2 °C or less, the time when the rail temperature reaches the maximum value, and the time zone when the rail temperature exceeds 50 °C with an error of 10 minutes or less, by using the measured value of weather element. These results show that the rail temperature forecasting system has high forecasting accuracy. On the other hand, in the prediction results using the Meteorological Agency or commercially available weather forecast data, the peak rail temperature could not be captured due to inaccuracies of local fluctuations in solar radiation caused by clouds, and the maximum rail temperature was up to 5 °C lower than the actual value.