

地形・建物データと気象予報情報からレール温度を予測する

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ります。近年では、我が国でも気温が40℃を超える酷暑を記録するなど、温暖化にともないレール温度は上昇傾向にある一方で、少子高齢化により労働人口と管理費の確保が今後難しくなることから、レール温度管理の精度向上と効率化が望まれています。これを目指す技術として、地理・気象データを活用したレール温度予測システムの開発を進めています。本システムは気象予報値などの事前情報を用いてレール温度を予測するもので、ここでは、その概要と予測精度の検証を行った結果を紹介します。



浦川 文寛
Fumihiro Urakawa
鉄道力学研究部
軌道力学研究室
副主任研究員



渡辺 勉
Tsutomu Watanabe
鉄道力学研究部
軌道力学研究室
主任研究員

はじめに

レール温度が過度に上昇すると、軌道座屈（※参照）の危険性が高まります。軌道座屈は脱線につな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ています。管理値は路線によりさまざまですが、一般にレール温度が50℃を超えると巡回（異常がないか目視で確認）、60℃を超えると運転規制（徐行、運休）を行います。近年は温暖化の影響もあり、夏季の晴天時はレール温度が50℃を超えるため、ほぼ毎日巡回が必要となるなど、多大な労力を費やしています。

図1に示すように、レール温度はレールの方向（太陽光を受ける角度）

や、地物（地形、建物、樹木などの総称）の陰によって異なります。このため、現在の数キロ間隔の温度測定では、局所的な温度上昇を見落とす危険性や、過剰な管理を行う可能性があります。温度観測点間のレール温度を、場所ごとの差も含めて予測し、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つながることが期待できます。また、レール温度上昇による運転規制が必要な時間帯があらかじめわかれば、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と考えます。

※ 軌道座屈（軌道の張り出し）

レールの温度上昇にともないレールに生じた圧縮の軸力により、軌道全体が水平方向に張り出す現象。

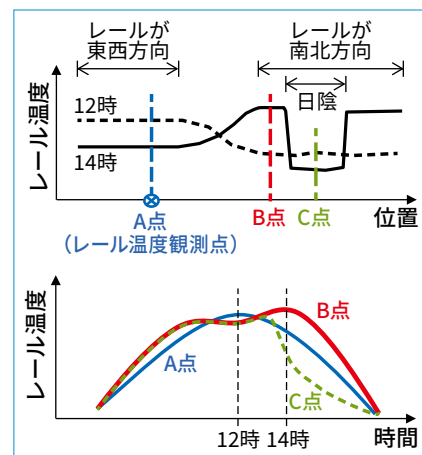


図1 レールの方向・日陰とレール温度の関係の一例

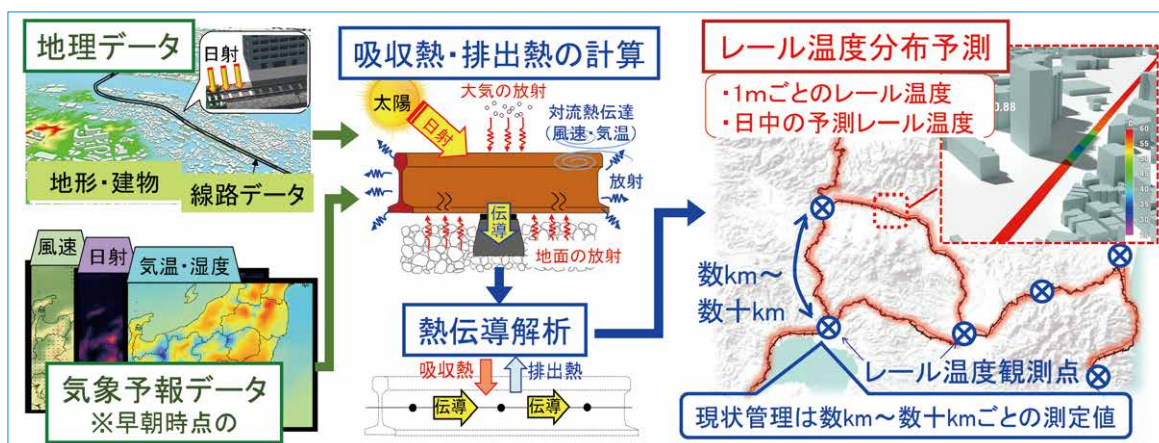


図2 レール温度予測システム

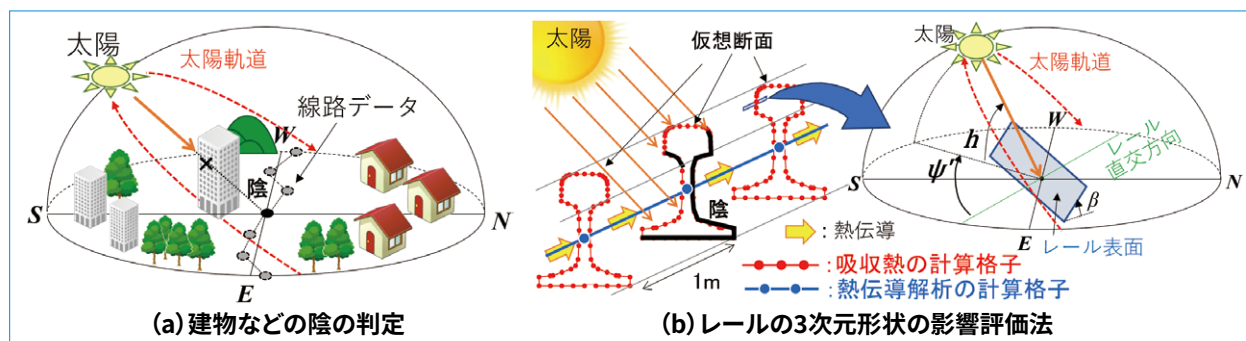


図3 レールが受ける日射量の評価方法

このような背景から、鉄道総研では、地理データと早朝時点の気象予報データから、100km程度の広域のレール温度分布を1mピッチ、10分間隔で解析的に予測する、レール温度予測システム¹⁾(図2)の開発を進めており、ここではその概要を紹介します。

レール温度を予測する際の課題とその解決策

(1) 課題

図2に示すとおり、レール温度予測システムは、地理データと気象データを入力条件とし、吸収熱・排出熱の計算と熱伝導解析を行って、任意の時刻までのレール温度分布を計算するもので、その開発には以下の2つの課題がありました。

①時々刻々と変化する日陰の影響と、これにともなう広域のレール温度分布の変化を把握すること。

②レール温度への影響が大きい、日射(太陽の放射熱)によるレールの吸収熱を正確に計算するためには、mm単

位の計算格子(図3参照)によるレールの3次元形状の再現が必要となります。計算格子が細くなるほど、計算量と計算時間が膨大となるため、mm単位の計算格子を用いた場合、目標とする100km程度の広範囲の解析は実施不可能となります。海外の文献²⁾では、数mmの計算格子でレールを内部まで細かく分割した解析例がありましたが、延長は数m程度まででした。

(2) 解決策

前述の課題①、②を、それぞれ次のとおり解決しました。

- ①図3(a)に示すように、地理データ(線路、建物、樹木など)を使用し、太陽と線路を結ぶ直線上に建物などが存在する場合を日陰と判定します。これを線路のポイントごとに行って日陰となる場所と時間帯を特定し、日射による吸収熱の計算に反映させることで、レール温度分布を建物などの日陰を加味して予測可能なシステムを実現しました。
- ②図3(b)に示すように、熱伝導解析用

の計算格子をレール長手1m間隔とし、その計算格子ごとにレールの仮想断面を配置し、周方向に数mm間隔で分割した計算格子を適用します。この計算格子を用いてレール自体により部分的に生じる日陰を判別するとともに、日射を受ける角度も計算し、吸収熱に反映させます(直角に近いほど、吸収熱が大きい)。このような手法を用いることで、既往研究(レールをすべてmm単位の計算格子で分割した場合)と比較し、レール形状の再現精度を確保しつつ、計算時間を大幅に縮減でき、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ました。

計算格子

数値解析では、物体の形状などの影響を除外して現象を単純化するため、対象とする物体を細かく区切り、区切りごとに計算を行います。この区切りを計算格子とよびます。

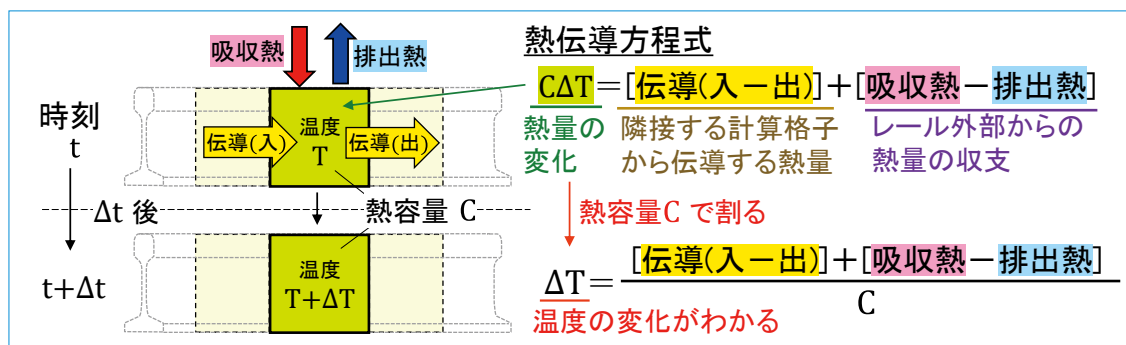


図4 熱伝導解析の計算内容

レール温度予測システムの計算概要

(1) 吸収熱・排出熱の計算

物質の熱は、伝導、対流、放射（ふく射）によって移動します（☞参照）。本システムでは、これらの熱移動に関連する以下の現象（図2中央上段参照）を模擬し、レールの吸収熱と排出熱を各種条件から自動で計算します。

- ① **伝導**：レールとまくらぎ間の熱移動（レールからレールへの熱の伝導は、(2) 熱伝導解析で別途計算）を計算します。一般に、昼はレールの方が高温となるためレールはまくらぎに熱を排出し、夜はまくらぎの方が高温となるためレールはまくらぎの熱を吸収します。
- ② **対流（対流熱伝達）**：レールの近傍の空気は伝導と放射によりレールと熱を交換した後、対流によって移動します。このように、固体と気体（または液体）間では、対流に加えて伝導・放射が複合的に作用して熱が移動します

☞ 熱移動の三原則

- ① **伝導**：物質を介し、熱が暖かい方から冷たい方へ伝わる現象。冷たい物を手で触ると冷たいと感じるのは、伝導により熱が手から奪われるからです。
- ② **対流**：液体や気体の流れに乗って熱が移動する現象。エアコンやファンヒーターは、対流を利用しています。
- ③ **放射（ふく射）**：物質の熱を光（電磁波）として放出する現象。太陽や炎のような高温の物質が放出する光は目で見えますが、私たちの身の周りの低温（600℃以下）の物も目に見えない光（赤外線）を常に放出しています。

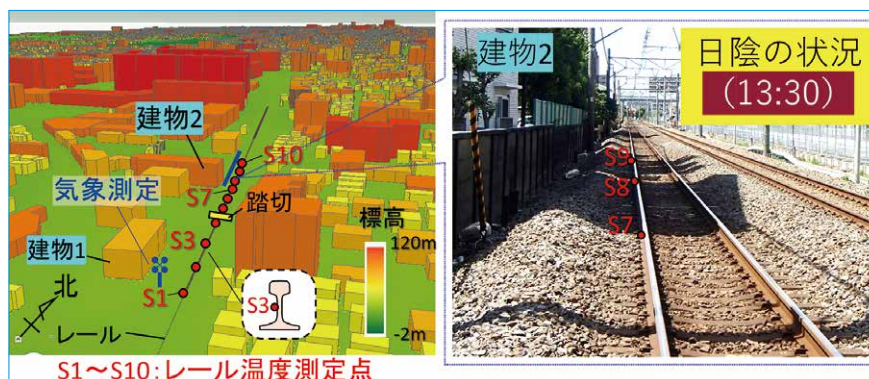


図5 測点および周辺の建物などの配置

が、この現象を対流熱伝達とよびます。一般に、昼はレール温度が気温より高いためレールは熱を排出し、夜は気温より低いためレールは熱を吸収します。風速が大きいほど、対流熱伝達が活発となりますが、無風状態でも暖められた空気が浮力を得て対流するため、対流熱伝達は発生します。

③ **放射**：放射により、レールは熱を排出すると同時に、周囲の物質が排出した熱を吸収します。吸収する熱として、太陽の放射熱（日射）、および大気と地面の放射熱を考慮します。

(2) 熱伝導解析

熱伝導解析では図4に示すように、レールの計算格子（図3 (b) 参照）内の熱量の変化を考えます。時刻 t （現在）の計算格子の温度が T で、時間 Δt 後に温度が $T + \Delta T$ に変化したとすると、計算格子内の熱量の変化は、熱容量（熱を蓄えられる量） C と温度変化の積 $C\Delta T$ で表されます。この熱量の変化 $C\Delta T$ が、隣接する計算格子から伝導する熱量とレール外部から計算格子に移

動する熱量の収支（吸収熱と排出熱の差）の和に等しいという関係を表す式を、熱伝導方程式とよびます。時刻 t のレール温度は計算格子の温度 T を含めてすべてわかっているの、隣接する計算格子から伝導する熱量もレール温度から計算できます。熱伝導方程式の両辺を熱容量 C で割ると、 Δt 後の温度変化 ΔT と温度 $T + \Delta T$ がわかります。この計算をすべての計算格子に行えば、 Δt 後のすべての計算格子のレール温度がわかります。時刻 $t + \Delta t$ のレール温度を使用してさらに Δt 後 ($t + 2\Delta t$) の温度も計算でき、この計算を指定する時刻まで繰り返し行うことで、レール温度の分布を求めることができます。

レール温度の予測精度検証試験

(1) 試験方法

図5に示すとおり、沿線に建物などが並ぶ箇所にて、南側から $S1 \sim S10$ の10測点でレール温度を測定しました。測定日は2019年8月2日で、天候は晴天、図5右側の写真のとおり、測点 $S7 \sim$

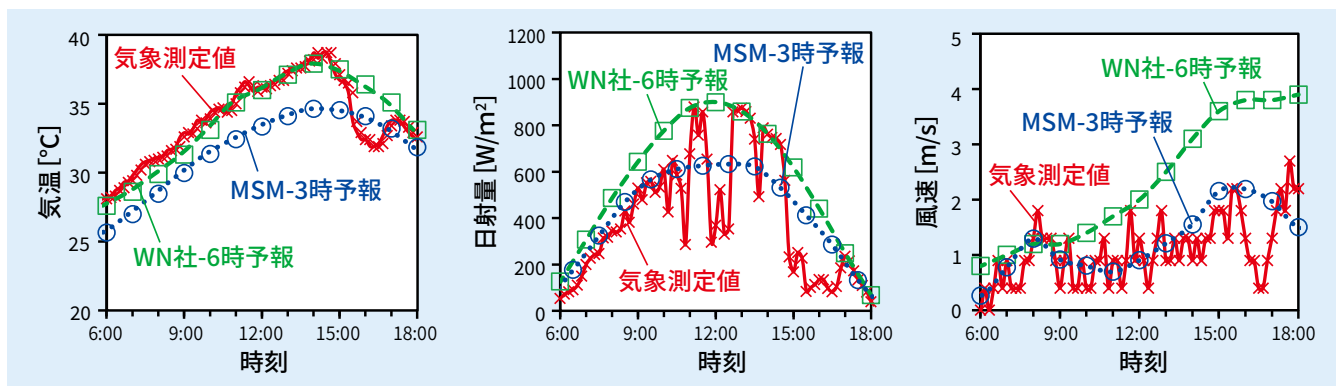


図6 解析に用いた気象測定値と気象予報値

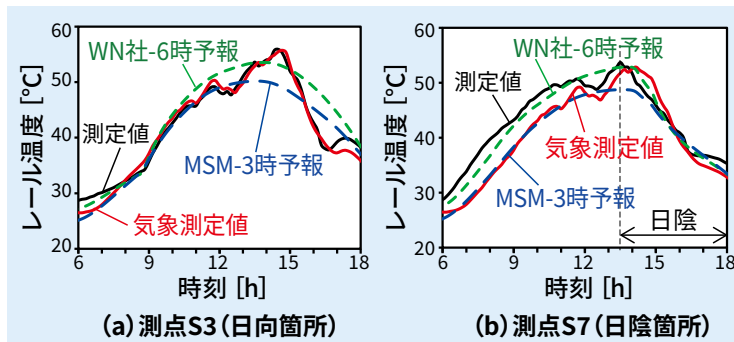


図7 熱伝導解析の計算内容

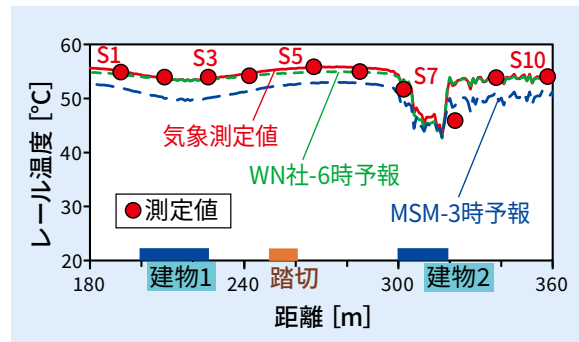


図8 熱伝導解析の計算内容

S10では、13:30以降で建物2などの日陰となりました。図6に示す①気象測定値：測点S1付近での測定値、②WN社-6時予報：(株)ウェザーニューズの6時時点の気象予報値、③MSM-3時予報：気象庁が提供する数値予報の1つである、メソ数値予報(MSM)の3時時点の予報値から、レール温度分布をそれぞれ計算し(「解析値」とします)、レール温度の測定値と比較しました。

(2) 試験結果

図7(a)(b)に、日向箇所(測点S3)と日陰箇所(測点S7)のレール温度の解析値を示します。日向箇所については図7(a)より、「気象測定値」による解析値が測定値とよく一致することがわかります。「MSM-3時予報」による解析値は、12時以降で測定値よりも低い傾向がみられます。また、「WN社-6時予報」による解析では、およそそのレール温度の変動を予測できましたが、日射の細かな変動(図6中央)にともなうレール温度のピークをとらえられておらず、最高レール温度の解析

値が測定値より約2℃低くなりました。日陰箇所(測点S7)については図7(b)より、S7付近では13:30以降に日陰となり、レール温度が下がりはじめますが、「WN社-6時予報」と「MSM-3時予報」を用いた解析でも、この時間帯のレール温度が低下する様子を予測できていることがわかります。

レール温度分布の解析結果は図8に示すとおりで、建物2の陰となる測点S7、S8付近の14時のレール温度は周囲より約10℃低くなりますが、この温度低下を解析でも再現できました。

おわりに

気象予報データ自体の精度に課題がありますが、日中の大まかなレール温度変化や、日陰が生じる場所と時間帯、および日陰でのレール温度の低下量を予測できることがわかりました。今後は、レール温度の予測精度のさらなる向上を図るとともに、配信システムの整備など、鉄道会社が使いやすいシステム構築を目指します。また、レール

温度予測システムを用いれば、今回紹介した短期の温度予測だけでなく、夏の標準的な気象条件下のレール温度、あるいは温暖化により今後レール温度がどれだけ上昇するかといった長期予測も可能です。反射塗料や散水などのレール温度上昇対策の評価³⁾や、過去のレール温度推定による軌道座屈の原因調査に使用した事例もあり、今後はプログラムの活用法についても、検討を進める予定です。【RRR】

文献

- 1) 浦川文寛, 渡辺勉, 木村成克: GISデータを使用した広域レール温度予測法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.4, pp.53-58, 2020
- 2) Hao Wang, Jiaqi Chen, P.N. Balaguru, Leith Al-Nazer: LOW SOLAR ABSORPTION COATING FOR REDUCING RAIL TEMPERATURE, Proceedings of the 2014 Joint Rail Conference, April 2-4, 2014
- 3) 浦川文寛, 渡辺勉: 散水および反射塗料によるレール温度抑制効果の解析的検討, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会, VI-906, 2020