

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

(公財) 鉄道総合技術研究所

正会員 ○浦川 文寛

(公財) 鉄道総合技術研究所

正会員 木村 成克

1. はじめに

筆者らは既往の研究にて、夏期の最高レール温度および日中の温度変化を精度良く予測するため、レールと太陽の相対位置から定まる日射条件や気温等からレール温度を予測するモデルを提案した。本稿では、提案したモデルを用い、レールの敷設方向が温度上昇に及ぼす影響を定量的に評価する。また、試験線にてレール温度測定試験を行い、予測モデルの精度検証を行う。

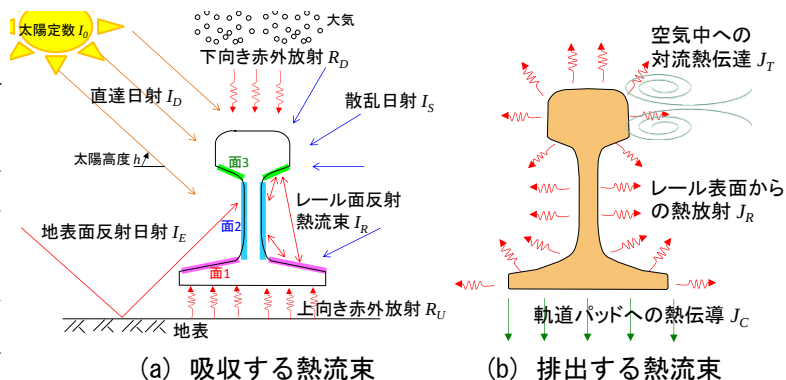


図1 レールの吸収熱モデル

2. レール温度予測モデル

レール温度上昇に及ぼす影響評価には、文献1)で提案したレール温度予測モデルを用いる。本モデルによるレール温度予測の手順は、まずレールの位置座標からレールと太陽の相対位置を求め、日射とレールの幾何形状等からレールが吸収する熱流量を計算する。次に、レールが排出する熱流量をレール温度より求め、熱伝導解析を実施して Δt 後のレール温度を逐次算出し、レール温度の時空間分布を予測するものである。レールが吸収する熱流束として、図1(a)に示す、直達日射 I_D 、散乱日射 I_S 、地表面反射日射 I_E 、下向き赤外放射 R_D 、上向き赤外放射 R_U 、およびレール面反射熱流束 I_R を考慮する。レールが排出する熱流束として、図1(b)に示す、軌道パッドへの熱伝導 J_C 、空気中への対流熱伝達 J_T 、およびレール表面からの熱放射 J_R を考慮する。

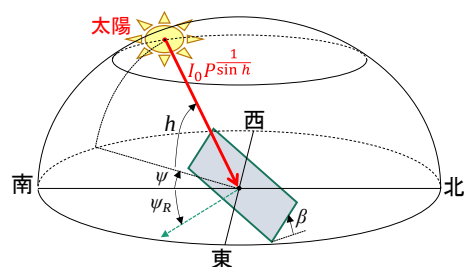


図2 傾斜面が受ける直達日射

3. レールの敷設方向と熱収支の関係

前章の熱収支モデルで、レール敷設方向が直接関係するのは直達日射 I_D である。図2の様に、法線面直達日射量 I_{Dn} は Bouguer の式に従うと仮定すると、水平面から β 傾いた平面が受ける直達日射 $I_D(\beta)$ は次式となる。

$$I_D(\beta) = I_0 P^{\sin h} (\sin h \cos \beta + \cos h \sin \beta \cos(\psi - \psi_R)) \quad (1)$$

ψ_R は法線ベクトルの方位角であり、これをレール表面に適用すると Ψ_R はレール直角方向に相当し、 $\Psi - \Psi_R = 0^\circ, 180^\circ$ は太陽光とレールが直交する状態を示している。 β が 0° に近いレール底部上面と頭頂面では式(1)の右辺第1項が、 β が 90° に近いレール腹部と頭部側面では第2項が支配的となる。また、レール敷設方向が影響するのは、 Ψ_R を含む第2項のみである。式(1)の右辺第2項、および第1項+第2項を 50kgN レールの断面形状に沿って周回積分し、直達日射によりレール(長さ1m)が吸収する熱流量を図3の通り $\Psi - \Psi_R$ ごとに求めた。ここで、 $\Psi - \Psi_R$ は $-180^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で値をとり得るが、レールの対称性より、 $0^\circ \sim 90^\circ, 0^\circ \sim -90^\circ, -180^\circ \sim -90^\circ, 180^\circ \sim 90^\circ$ の直達日射は等しいため、図3では $0^\circ \sim 90^\circ$ の値のみ示す。図より、レール敷設方向が影響する第2項の吸収熱

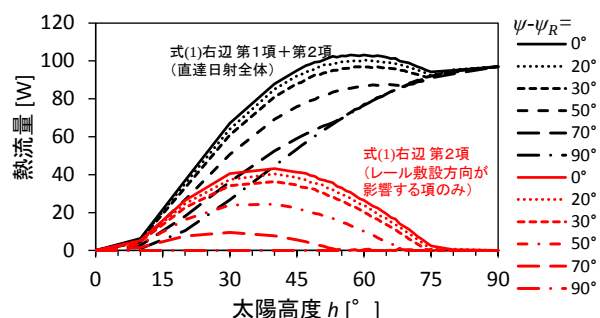


図3 直達日射よりレールが吸収する熱流量

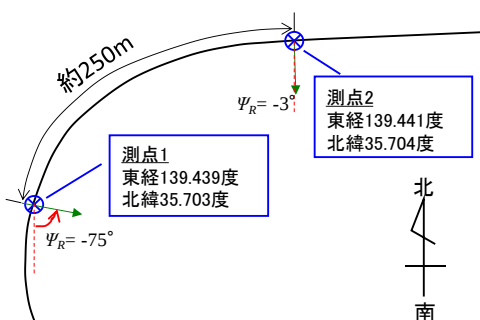


図4 レール温度測定箇所

キーワード：直達日射、レール温度、レールの敷設方向、レール温度予測、太陽高度、太陽方位

連絡先：〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 (公財) 鉄道総研 軌道構造 TEL 042-573-7275

流量は $\Psi - \Psi_R = 0^\circ$ で最も大きく、また、 $h = 40^\circ$ 付近でピークとなる。式(1)の右辺第1項は h とともに増加するため、第1項を含む直達日射全体では、 $\Psi - \Psi_R = 0^\circ$ 、 $h = 58^\circ$ で最大値をとる。レールと太陽の位置関係がこれを満たす日時・場所ではレールの吸収熱量が大きくなり、温度が上昇しやすいと思われる。

4. レール温度予測試験

図4の様に、レールの敷設方向が南北に近い測点1、東西に近い測点2に対し、太陽高度が異なる7月と9月の中で天候が良好であった7/9と9/18を試験日に選び、日中のレール腹部温度を熱電対で測定した。軌道はバラスト軌道で、50kgN レール、PC コンクリート製まくらぎが使用されている。各測定日の気温と風速は図5に示す通りである。

図6にレールと太陽の位置関係、図7にレール温度の測定値および予測モデルによる予測値を示す。7/9について、測点1では9:40に太陽光とレールが直交し ($\Psi - \Psi_R = 0^\circ$)、その時の太陽高度 h が 57.5° と、前章で示した直達日射による吸収熱量が最大となる条件と一致する (図6(a))。これにより、9:40の時点でレール温度測定値は 52°C まで上昇し、測点2と比較して 9°C 高くなった (図7(a))。一方、測点2では正午付近で $\Psi - \Psi_R = 0^\circ$ となり、レール温度は 51°C でピークとなるが、正午付近では h が 75° を超え、 $\Psi - \Psi_R$ の影響はほぼゼロとなるため (図3)、測点1とのレール温度差は 1°C と小さい (図7(a))。図7(b)より、9/18のレール温度の測定値について、正午付近の太陽高度が 57° まで下がり、この時間帯で $\Psi - \Psi_R = 0^\circ$ となる測点2が前章の条件を満たすようになり、測点2のレール温度は 54°C と、測点1よりも 4°C 高くなった。

レール温度の測定値と予測値の比較について、図7(a)、(b)より、最高レール温度については誤差 2°C 以内で予測することができた。一方、レール温度の経時変化について、測点2では比較的良好に一致するものの、測点1では風速が大きい7/9の17時頃と9/18の9時頃では予測値が測定値よりも低い傾向が見られる。これら時間帯の風は概ね南向きで (図5)、レールは測点1では平行、測点2では直角に近い状態で風を受け、測点間で対流熱伝達による排出熱量に差が生じると思われるが、現状のモデルでは、風向の影響は考慮されていない。これが測点1での予測値の誤差の原因と考えられ、今後はCFDや実験を通じて検討を進める予定である。

5. まとめ

本稿では、レール温度の既往の研究で提案したレール温度予測モデルを用い、レールの敷設方向を含む太陽とレール位置関係で、レール温度が上昇しやすい条件を示した。試験線でのレール温度測定結果では、提示した条件下でレール温度が高くなることを確認した。また、試験線の測定結果と予測モデルによる予測結果を比較したところ、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。

参考文献

- 1) 浦川文寛：日射を考慮したレール温度予測モデル，J-Rail2017，2017。
- 2) (株)気象データシステム：直散分離と斜面日射量の計算，MDS 技術解説（日射・昼光関係），2014。

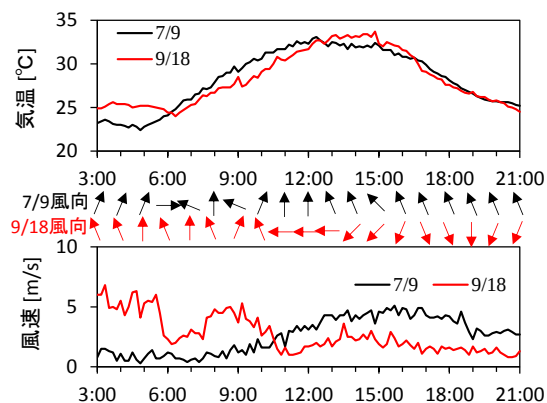
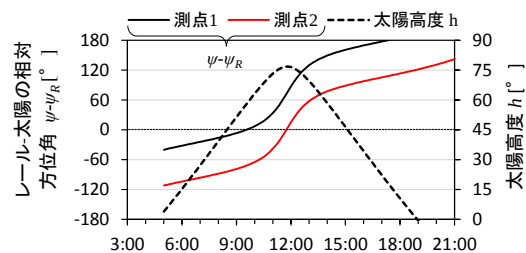
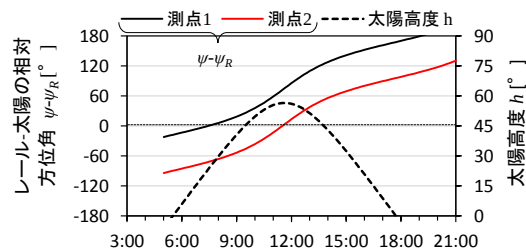


図5 気温・風速・風向（上向きが南）

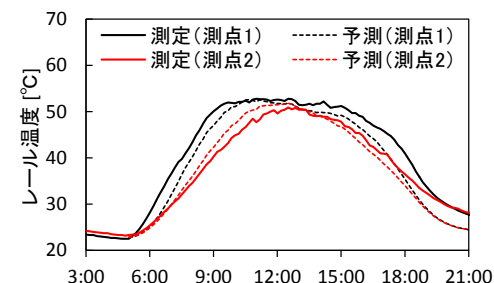


(a) 7/9

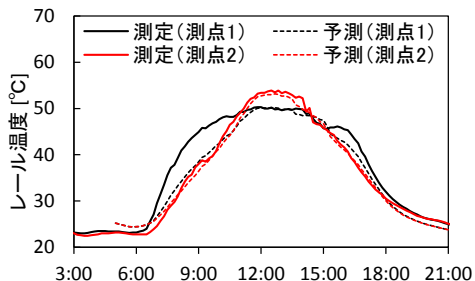


(b) 9/18

図6 レールと太陽の位置関係 ($\Psi - \Psi_R$, h)



(a) 7/9



(b) 9/18

図7 レール温度の測定結果と予測結果