

熱解析によるレール断面内 2次元温度分布と曲げモーメントの推定

○ [土] 浦川 文寛 (鉄道総研) [土] 渡辺 勉 (鉄道総研)

Estimation Two-dimensional Temperature Distribution on Rail Cross Section and its Bending Moment by Thermal Analysis

○Fumihiro URAKAWA, Tsutomu Watanabe, (Railway Technical Research Institute)

In order to understand bending moment of rail caused by thermal stress, we calculate temperature distribution on rail cross section under average weather conditions in summer using an analysis model, which we have newly developed. As a result, under the condition that the sunlight and the rail are orthogonal to each other at 14:00, the vertical temperature difference was 3.6 °C between the center of the top surface and the center of the bottom surface; the horizontal temperature difference 0.3 °C between the both sides of rail head, and the horizontal temperature difference 1.4 °C between the both sides of rail base. For this temperature distribution, we confirmed that the vertical bending moment was equivalent to about 10% and the horizontal bending moment was equivalent to about 2% compared to the bending moment due to the passage of the freight train.

キーワード：2次元レール温度分布，曲げモーメント，日射，熱応力，熱解析，軌道座屈

Key Words : 2D rail temperature distribution, bending moment, solar radiation, thermal stress, thermal analysis, track buckling

1. はじめに

夏季の過度なレール温度上昇により発生するレール軸力は軌道座屈の原因となる。レール温度は主に太陽の放射熱（日射）を受けて上昇するため，図1のように太陽側のレールが反対側よりも相対的に温度が高くなり，軸力 P に加え，レールを座屈させるような曲げモーメント M_y が生じることが想定されるが，この曲げモーメントがどの程度発生するかは明らかにされていない。筆者らは，日射等の気象条件から計算したレールの熱収支と熱伝導解析より，解析的にレール温度分布を予測するモデルを開発したが¹⁾，

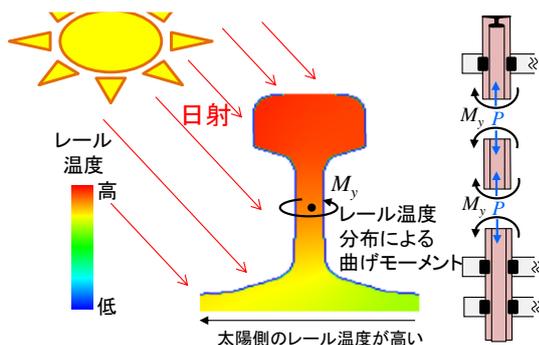


図1 レール断面内温度分布による曲げモーメント

このモデルはレール長手方向の1次元の温度分布のみを対象としていた。本稿では，夏季のレール断面の温度分布とそれに伴い発生する曲げモーメントを把握するため，レール断面内の2次元温度分布予測モデルを開発した。また，夏季の平均的な気象条件下において発生するレール温度分布と曲げモーメントをレールの敷設方向毎に試算した。

2. レール断面内の2次元レール温度分布予測モデル

本モデルは，熱収支モデルは既往研究¹⁾と同じとし，熱伝導解析をレール断面方向の2次元に拡張したものであ

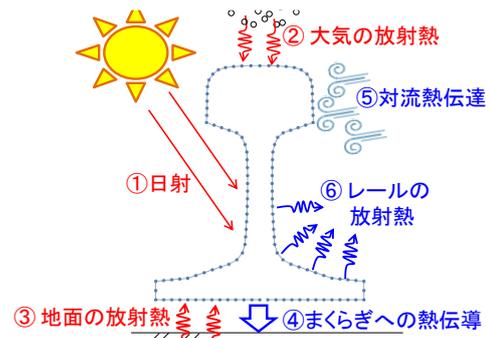


図2 レールの熱収支 (表面メッシュで計算)

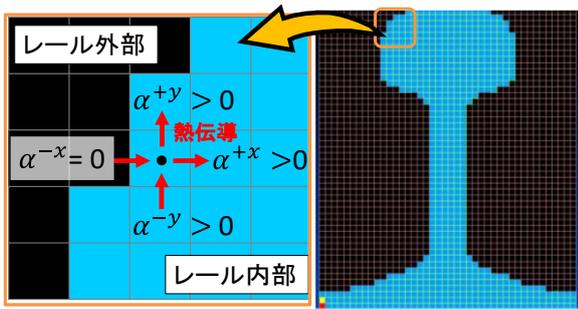


図3 レール断面内の2次元熱伝導解析 (グリッドメッシュで計算)

る。本モデルでは、 y 軸を鉛直方向、 x 軸を水平（レール直交）方向とする。

2.1 レールの熱収支モデル¹⁾

レールが吸収する熱量として、図2に示す、①日射（直達日射、散乱日射、地表面反射日射を含む）、②大気の放射熱、③地面の放射熱をモデル化する。また、レールが排出する熱量として、図2に示す、④まくらぎへの熱伝導、⑤大気への対流熱伝達、⑥レールの放射熱をモデル化する。図2に示すとおり、熱収支計算には、レール表面と日射および大気・地面の放射熱との相対角度を考慮するため、レール表面を周方向に5mm間隔で分割したメッシュ（以下「表面メッシュ」）を使用する。

2.2 レール断面内の2次元熱伝導解析

熱伝導解析では図3に示すメッシュサイズ3mmの正方形グリッドメッシュ（以下「グリッドメッシュ」）を用い、式(1)に示す2次元熱伝導方程式を陽解法で解き、 Δt 後のレール温度分布を任意の時刻まで繰り返して計算する。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{Q^*}{c\rho} \quad (1)$$

ここで、 T : レール温度、 α : レールの熱拡散率 ($=\lambda/(\rho c)$)、 λ : レールの熱伝導率、 ρ : レールの密度、 c : レールの比熱、 Q^* : 単位体積当たりの熱収支を示す。図3のとおり、プログラムの簡略化のためレール外部についてもメッシュ分割するが、レール内部（表面）～外部間の熱拡散率 α をゼロとしており、この間の熱伝導は発生しないため、レール外部のグリッドメッシュは計算上無視される。

3. レール断面内温度分布の試算

レール断面内の温度分布は、レール表面と日射の相対角度を含む、レールと太陽の位置関係が大きく影響する。ここでは、前章で述べたレール断面内の2次元温度分布予測モデルを使用し、夏季（8月1日）の標準的な気象条件下での日中のレール断面内のレール温度分布を、レールの敷設（直交）方向を変えて計算した。

3.1 解析条件

(1) 軌道条件等

レールはJIS 50kgNレール、まくらぎは3号PC、道床は絶乾状態のバラスト道床を対象とした。解析場所は鉄道総研所内試験線（東経139.44度、北緯35.703度）である。南中方向を 0° とし、レールの直交方向 ψ_R を 0° 、 30° 、 60° 、

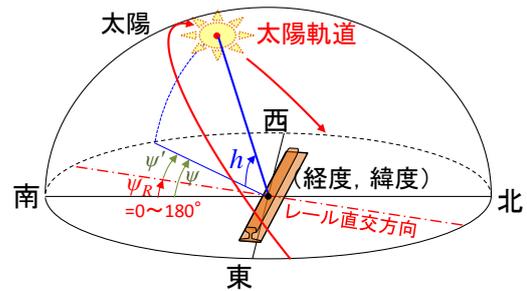


図4 レールと太陽の位置関係

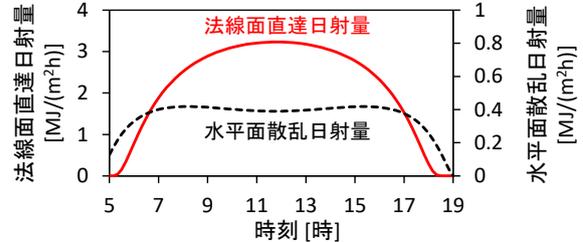


図5 解析に使用した日射量

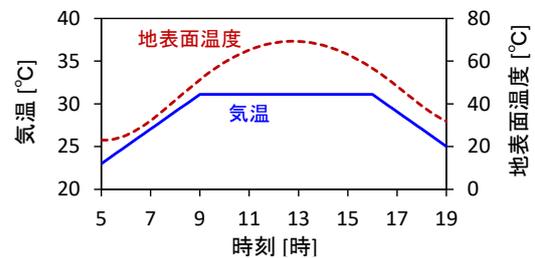


図6 解析に使用した気温と地表面温度

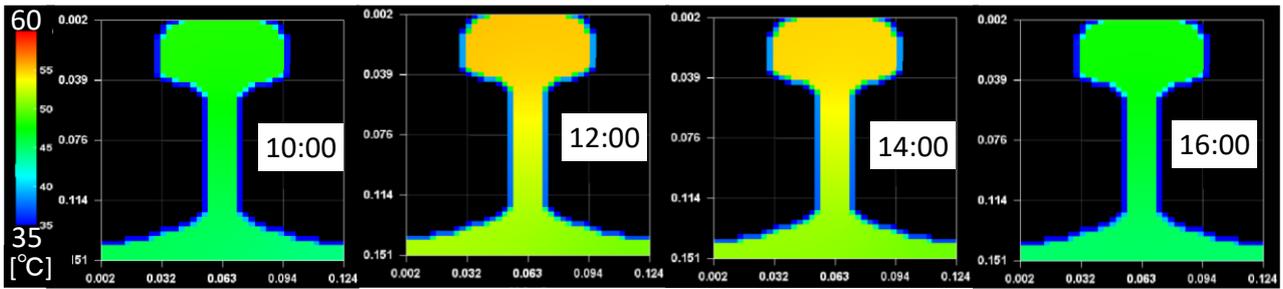
表1 主な解析パラメーター一覧

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	$5.67 \times 10^{-8} / (\text{m}^2\text{K}^4)$
地表面の反射率	ρ_E	0.3
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
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

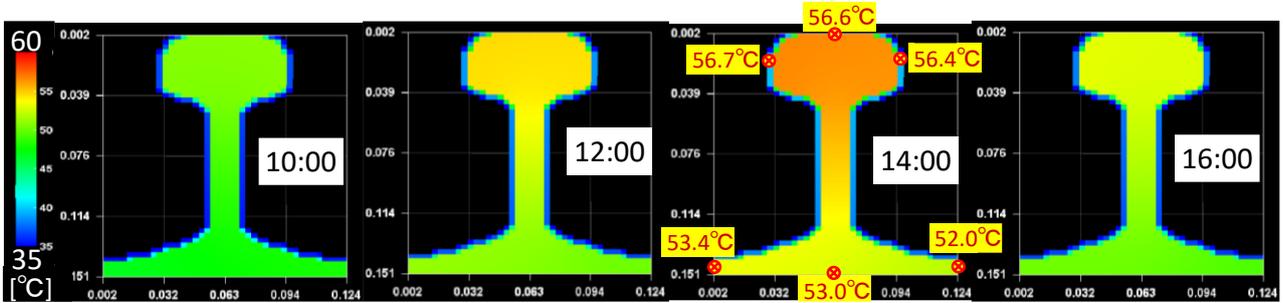
90° 、 120° 、 150° 、 180° に設定した（図4参照）。

(2) 気象条件

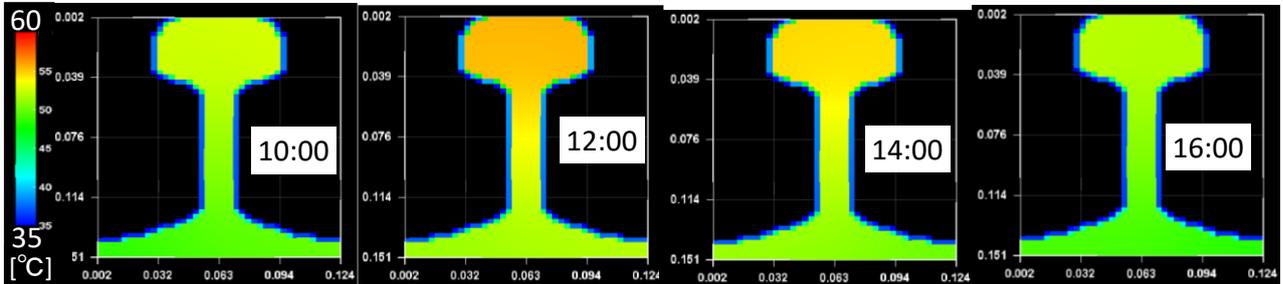
計算日時は8月1日の5時～19時とした（太陽位置に関係する）。日射量は、太陽定数を $4.92\text{MJ}/(\text{m}^2\text{h})$ 、大気透過率を0.67とし、法線面直達日射量をBouguerの式²⁾、水平面散乱日射量をNagataの式²⁾より算出した値（図5参照）を用いた。なお、大気透過率は、館野（つくば）の月別最大値³⁾を参照した。気温は、東京都の日最高値と日最低値の月別年平均値³⁾より、日の出時刻の5時に日最低値（ 23°C ）、9時～16時に日最高値（ 31.1°C ）、20時に再び日最低値まで下がるよう、図6のとおり設定した。風速はレール温度が上がりやすい条件として、時刻によらず 1.5m/s



(a) レール直交方向 $\psi_R=0^\circ$



(b) レール直交方向 $\psi_R=60^\circ$



(c) レール直交方向 $\psi_R=120^\circ$

図7 レール断面内の2次元温度分布の解析結果

(一定)とした。大気放射熱は気象庁の下向き赤外放射の観測値 ψ より $1.55 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{h})$ とした。地表面温度は日射量等から算出した値 (図6 参照) を使用した。

(3) 解析パラメータ

一般的な物性として、表1に示すパラメータを使用した。

3.2 解析結果

(1) レール温度分布

図7(a),(b),(c)にレール直交方向 $\psi_R=0^\circ$, 60° , 120° のレール温度分布の解析結果, 図8にレール温度分布の解析結果の断面平均を示す。図8より, ψ_R によるレール温度の高低は時間帯によって異なるが, 最高レール温度 (断面平均) は $\psi_R=60^\circ$ のにおける 54.8°C が最も高い。 $\psi_R=60^\circ$ の条件でレール温度が最高値に達するのは 14 時頃であるが, この時刻で太陽の方位角 ψ とレール直交方向 ψ_R がおおよそ一致する。 $\psi_R=60^\circ$, 14 時のレール温度分布 (図7(b)左から3番目) は, 水平方向は太陽側 (この図では左側), 鉛直方向は頭部側でレール温度が高くなり, 太陽側の頭部側面で最高温度 56.7°C , 太陽と反対側の底部側面で最低温度 52.0°C となった。鉛直方向の温度差は, 頭頂面中央~底面中央間で 3.6°C , 水平方向の温度差は, 両頭部側面間で 0.3°C , 両底部側面間で 1.4°C 生じた。

(2) レール温度分布に起因する曲げモーメント

レール温度が上昇すると熱膨張により変形しようとする

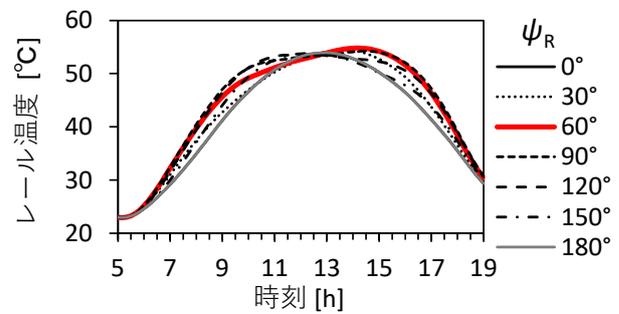


図8 レール温度 (断面平均) の解析結果

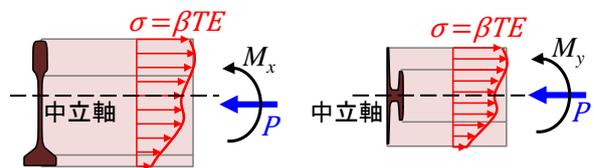


図9 温度応力と曲げモーメントの関係

が, レールは長軸方向の伸縮が拘束されているため, 変形を打ち消す軸力 P と x 軸周りと y 軸周りの曲げモーメント M_x , M_y が発生する (図9 参照)。この曲げモーメント M_x , M_y を, 温度応力 $\sigma=\beta TE$ の中立軸周りのモーメントとのつり合い式 (2), (3) を用いて図10(a),(b)のとおり算出した。

$$M_x = \sum \{E\beta T(y - y_G)\Delta^2\} \quad (2)$$

$$M_y = \sum \{E\beta T(x - x_G)\Delta^2\} \quad (3)$$

ここで、 E : レール鋼のヤング率 (=206MPa), β : レール鋼の線膨張係数 (=11.4 μ /°C), T : レール温度 (前項のレール温度分布を解析結果を使用), y_G : レールの y 方向の中立軸 (50kgN レールでは底面から高さ 74mm), x_G : レールの x 方向の中立軸, Δ : グリッドメッシュのメッシュサイズ (=3mm) を示す。

x 軸周りの曲げモーメント M_x について、最大値は ψ_R により 1279Nm~1458Nm と異なるが、おおよそ 12:30 前後で最大となる等、 ψ_R による日変動の差はあまり見られない (図 10(a)参照)。一方、 y 軸周りの曲げモーメント M_y について、図 10(b)より、約 1 時間~2 時間の間で M_y の正負が逆転する。これは太陽がレールをまたぐ際の変化であり、 ψ_R によってこの時間帯が異なり、かつ M_y が最大となる時刻も 10:00~14:00 と異なる等、 M_y の ψ_R による日変動の差は大きいことが分かる。なお、 M_y の最大値は ψ_R により 74.55Nm~79.16Nm の間を取り、 $\psi_R=60^\circ$ で最も大きくなった。

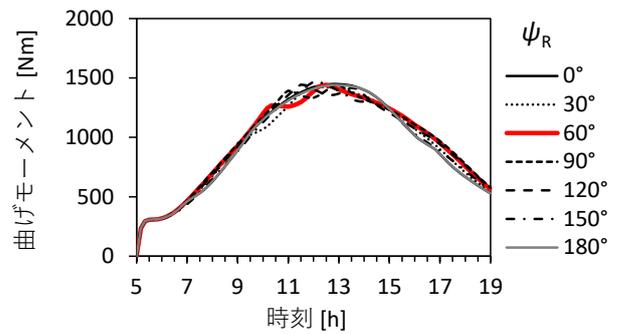
(3) 列車通過時のレール曲げモーメントとの比較

継目やレール溶接のない一般部を輪重約 100kN の貨物けん引車両が通過した際に、レール底部に発生した長軸方向の応力 σ の測定値 (35×10^6 N/m²) から、 x 軸周りの曲げモーメント $M_x^{(列車)}$ を概算した結果、 $M_x^{(列車)} \approx 14,000$ Nm となった。また、横圧により発生する y 軸周りの曲げモーメントについて、設計標準⁵⁾を参考に $800\text{m} > R \geq 600\text{m}$ における変動横圧係数 0.3 を $M_x^{(列車)}$ に乗じ、概算値 $M_y^{(列車)} \approx 4,200$ Nm を得た。レール温度分布に起因する曲げモーメントの最大値は、前述のとおり x 軸周りは 1,400Nm, y 軸周りは 80Nm 程度である。両者を比べると、レール温度分布による曲げモーメントの最大値は、車両通過時の輪重・横圧による曲げモーメントと比較し、 x 軸周りでは 10%, y 軸周りでは 2%程度である。

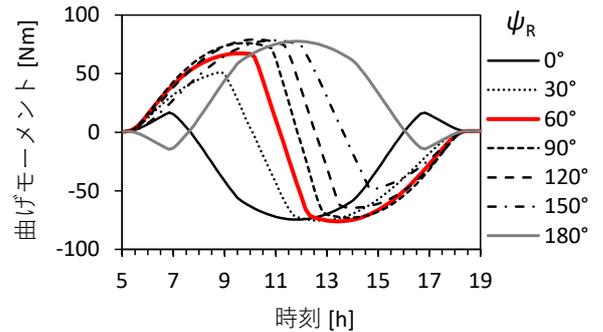
4. まとめ

本稿で開発したレール温度予測モデルを用い、夏季 (8 月 1 日) におけるレール断面内の温度分布とそれに起因する曲げモーメントを、レールの敷設方向毎に解析的に求めた。得られた知見を以下にまとめる。

- レールの直交方向が 60° の条件では、14 時頃にレールと太陽光が直交し、レール温度が日最高値に達した。この時のレール温度分布は、太陽側の頭部側面で最高温度 56.7°C 、太陽と反対側の底部側面で最低温度 52.0°C となった。鉛直方向の温度差は、頭頂面中央~底面中央間で 3.6°C 、水平方向の温度差は、両頭部側面間で 0.3°C 、両底部側面間で 1.4°C 生じた。
- x 軸周り (鉛直方向) の曲げモーメントの日最大値は 1279Nm~1458Nm, y 軸周り (水平方向) の曲げモーメントの日最大値は、74.55Nm~79.16Nm であった。
- 輪重 100kN の貨物けん引車両通過時の応力測定結果か



(a) x 軸周りの曲げモーメント



(b) y 軸周りの曲げモーメント

図 10 断面内レール温度分布から算出した曲げモーメント

ら概算した曲げモーメントと比較すると、レール温度分布に起因する曲げモーメントの最大値は、 x 軸周りでは 10%, y 軸周りでは 2%程度である。

5. 今後の展望

軌道の座屈解析モデルを用いてレール曲げモーメントに関するパラメータスタディを行い、曲げモーメントの座屈安定性への影響を定量化する。その結果を基に、夏季に想定されるレール温度と曲げモーメントの予測値から、座屈安全度分布の詳細かつ定量的な評価法を検討する予定である。

参考文献

- 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.
- 赤坂 裕: 直散分離と斜面日射量の計算, (株)気象データシステム 技術解説 (日射・昼光関係), 2020. (最終閲覧日: 2020 年 6 月 1 日)
https://www.metds.co.jp/wp-content/uploads/2020/05/TE_Radiation_200530.pdf
- 国立天文台 編: 理科年表 2020, 丸善出版, p. 256, 2019.
- “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/kousou/obs_third_div/rad/rad_ir.html
- 鉄道総合技術研究所 編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, 5 章 軌道部材, p. 56, 2012.