## 論文 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

浦川 文寛1・渡辺 勉2・木村 成克3

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.fumihiro.07@rtri.or.jp								
2正会員	鉄道総合技術研究所	鉄道力学研究部	構造力学(〒185-0840 東京都国分寺市光町2-8-38)							
E-mail: watanabe.tsutomu.30@rtri.or.jp										
3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: kimura.shigekatsu.96@rtri.or.jp								

実軌道においては、地物の陰影によるレール温度・軸力のばらつきが想定される.しかしながら、これらのばらつきが軌道座屈安定性にどの程度影響するかは明らかにされていない.本研究では、地物の陰影を考慮したレール温度予測モデルを用いて、実軌道のレール温度分布を地物の陰影を考慮して解析的に求めた.その結果、冬季の日陰となる箇所では、日向と比較して10℃~15℃のレール温度の低下が観測されたが、この温度低下を解析で再現できることを確認した.また、夏季の日陰/日向の混在を想定した軌道の座屈解析の結果、日陰箇所のレール温度低下に伴う軸力の減少により、見かけの座屈発生温度 $T_{14}$ と見かけの最低座屈温度 $T_{12}$ が増加することが分かった.さらに、レール温度予測値より、夏季のモデル線区の $T_{14}$ を試算したところ、日陰箇所で $T_{14}$ が最大2.7℃増加した.

### *Key Words :* track buckling, variation of rail temperature, shadow of geographic features, rail temperature prediction, buckling analysis

#### 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)の陰影によるレール温度・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3%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、座屈安定性を日陰のレール温度・軸力 の低下を加味して評価できれば、管理コストの削減に繋 がることが期待できる.

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、地物の陰影を考慮した日射量分布を地理デ 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.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5%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>7</sup>. また、文献8)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℃以内で予測することができ た.このモデルに、地物の陰影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、まず地物の陰影を考慮した日射量 解析をレール温度予測モデルに適用し、広域のレール温 度分布を地物の陰影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. さらに、座屈解析モデルを用いて、日陰/日向の混在を 想定したレール温度のばらつきに関するパラメータ分析 を行い、ロングレールの座屈安定性とレール温度分布の 関係について考察する.

#### 2. 地物の陰影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影を考慮したレール温度予測モ デルとは、文献7)のレール温度予測モデルにおける日射 量の評価に、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、 地理データ(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Lo<sub>(x,t</sub>)と水平面散乱日射Lo<sub>(x,t</sub>))を建物等の陰を 考慮して算出する(図-2).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<sub>b</sub>(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<sub>a</sub>(x,t)をレール温度より求め、熱伝導解析を 実施してAt後のレール温度を算出する.これを任意の日 時twまで繰返し、位置xにおけるtoからtwのレール温度 Th(x,t)を計算する.詳細を以下に述べる.

#### (1) 地物の陰影を考慮した日射量解析

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."ポ イントの日射量'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 IDH(x,t)と水平面散乱日射 ISH(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)は、ポイントデータの位置(経度、緯度)と 日時より分かるので、次式を用いて水平面直達日射 Ibh(x,t)を法線面直達日射 Ibn(x,t)に変換できる.

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

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<sub>D</sub>(x,t)と水平面散乱日射 I<sub>S</sub>(x,t)を求める.

#### (2) 日射量を入力値としたレール温度予測法<sup>7)</sup>

**図4** に示すとおり、レールが吸収する熱流量 *Q<sub>h</sub>(x,t)*を、 日射、大気の赤外放射、地面の赤外放射から算出する.



図-1 地物の陰影を考慮したレール温度予測モデル



また、レールが排出する熱流量 *Qad*(*x*,*t*)を、軌道パッドへの熱伝導、空気への対流熱伝達、レール表面からの放射から算出し、熱伝導方程式を解いて、レール温度 *T<sub>d</sub>*(*x*,*t*)



を求める.詳細は文献7)に譲り、ここでは、空気への対流熱伝達のモデル化について述べる.

空気への対流熱伝達 $J_n(l,x,t)$ は次式より求める.

$$J_T(l, x, t) = \alpha(x, t) \cdot (T_R(x, t) - T_a(t))$$
(2)

ここで, T<sub>a</sub>(t):気温[°C], 1:レール断面の位置 式(2)のレール-空気間の熱伝達率 a(x,t)について,文献 7) 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 %を レールに適用し,式(3)で求める.このモデル化の妥当 性については,文献 8)にて確認している.

$$\alpha(x,t) = 0.644 P r^{\frac{1}{3}} \left( \frac{v_a(t)}{v \cdot L_R} \right)^{0.5}$$
(3)

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

### 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にて レール温度を測定し,予測値と比較した.

図-7 日射量解析用データ(DSM,線路ポイント)作成

#### (1) 試験方法・条件

図-5 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1月21日で、当該箇所の天候は快晴であった。 当該箇所のレール温度分布を測定するため、図-5 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 lmの位 位置に設置し、気温と風速を測定した.測定結果は図-6 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.

## (2) レール温度予測の計算方法・条件a) 日射量解析

図-7(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-7(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-7(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-7(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.

ポイントの日射量"解析ツールに図-7(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到達する散乱日射は全て 同じ)とした.図-8(a),(b)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  $I_{Sn}$ 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.

#### b) レール温度の予測計算

前項の法線面直達日射  $L_n$ と水平面散乱日射  $L_n$ 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>10</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-9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 8)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  $\Delta t \ composed 0.25$ 時間 (900 秒),空間増分  $\Delta x \ composed x \ composed 0.25$ 時間 (900 じ 1m とした.

#### (3) 試験結果

図-10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



図-9 地表面温度Tas

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	Er	0.8
ステファンボルツマン係数	$\sigma$	5.67×10 <sup>8</sup> W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
地表面の反射率	$ ho_E$	0.3
下向き赤外放射	$R_d$	0.8 MJ/(m <sup>2</sup> h)
地表面の赤外線の放射率	$\mathcal{E}_E$	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 <sup>3</sup>
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	$A_R$	$0.00775  \text{m}^2$
気温	$T_a$	図-6
風速	Va	図-6
空気の動粘性係数	v	14 µm²/s

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℃、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℃



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>D</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 試験により実証した.

#### (4) 夏季のレール温度分布の試算

レール温度予測モデルを用い、本章の試験箇所におけ る、夏季の12:00,13:00,14:00,15:00のレール温度分布 を図-11の通り求めた.その際、太陽の軌道は8月15日の 日周運動を用い、気温は5時~11時が23℃~35℃(2℃/ 時間で増加),11時~15時が35℃,15時~20時が35℃~ 25℃(2℃/時間で減少),風速は常時1.0m/sと仮定した. 図-11より、建物3の陰となる箇所付近で、周囲と比較し て、レール温度が最大22℃低下することが分かった.

#### 4. 日陰のレール温度低下を考慮した座屈解析

本章では、弾性有限変位法を用いた3次元FEM解析モデル<sup>11)</sup>を用い、夏季における日陰のレール温度低下を模擬したレール温度分布を有する軌道の座屈解析を行う.

軌道座屈におけるレール温度の中立温度(レール軸力 がゼロとなる温度)からの変化量と軌道の横変位につい ては、図-12に示す関係があり、本稿では、(A)点におけ る温度上昇量 $T_4$ を「座屈発生温度」、(C)点の温度上昇 量 $T_c$ を「最低座屈温度」と呼ぶ.軌道の座屈強さは一般 に $T_4$ 、 $T_c$ またはこれらに相当するレール軸力で表される. 本章ではレール温度の変化量と、軌道の横変位の関係の



解析結果より,(A)点と(C)点のレール温度変化量を参照 してT<sub>4</sub>,T<sub>c</sub>を求め、レール温度のばらつきの座屈安定性 に対する影響を評価する.その際、本章の解析ではレー ル温度分布が場所毎に異なるため、レール温度の低下が ない場所の温度T<sub>1</sub>を参照し、T<sub>4</sub>とT<sub>c</sub>に対応する温度をT<sub>14</sub> とT<sub>1c</sub>と表記する.ここで、本来、軌道の座屈強さは軌 道の剛性と形状によって定まる特性であり、座屈発生温 度T<sub>4</sub>と最低座屈温度T<sub>c</sub>はレール温度に依存しないが、T<sub>14</sub> とT<sub>1</sub>cはレール温度分布によって種々の値を取る.これ は後述のとおりレール軸力の変化に起因するものであり、 本稿では、レール温度分布により変化するT<sub>14</sub>とT<sub>1</sub>cをそ れぞれ「見かけの座屈発生温度」、「見かけの最低座屈 温度」と称し、座屈発生温度T<sub>4</sub>と最低座屈温度T<sub>c</sub>と区別 することとした.

#### (1) 解析方法

#### a) 解析条件

図-13 に示すように、日陰を想定して周囲よりもレール温度が低下する範囲の温度差 *ΔT* および延長 *L*,ならびに初期軌道変位の中心位置 λをパラメータとする静的座屈解析を行う.ここで、解析上での座屈は、レール温



0

80

60

40

20

0

0

レール温度変化量 r<sub>i</sub>[°C]

0

100

100

(a) case1 ( $\Delta T=15^{\circ}$ C, L=35m)

200

 $I \cdot \lambda = 0m$ 

II :λ=17.5m

-- III:λ=42.5m

- IV · λ=67.5m

200

レール横変位 [mm]

(c) case3 ( $\Delta T=30^{\circ}$ C, L=35m)

-ル横変位 [mm]

解析 ケース		∆T [°C]	T L C] [m]	λ [m]	座屈発生温度 [℃]		先/1/00 最低座屈温度 [℃]	
					$T_{\rm A}$	∆TA	Tc	∆Tc
case0		0	0	0	50.7	-	42.7	-
case1	Ι	15	35	0	59.8	9.1	51.7	9.0
	Π			17.5	57.0	6.3	49.0	6.3
	Ш			42.5	52.4	1.7	44.4	1.7
	IV			67.5	51.1	0.4	43.2	0.5
	Ι	15	70	0	63.4	12.7	55.3	12.6
	Π			35	58.0	7.3	49.9	7.2
Casez	Ш			60	52.7	2.0	44.7	2.0
	IV			85	51.2	0.5	43.2	0.5
	Ι	30	35	0	68.6	17.9	58.1	15.4
00002	Π			17.5	63.3	12.6	54.1	11.4
Cases	Ш			42.5	54.1	3.4	46.1	3.4
	IV			67.5	51.6	0.9	43.6	0.9
	Ι	20	70	0	75.6	24.9	66.3	23.6
case4	Π			35	65.3	14.6	55.8	13.1
	Ш	30		60	54.9	4.2	46.9	4.2
	IV			85	51.8	1.1	43.8	1.1

度上昇に伴い,初期軌道変位が増大して発生するため, 初期軌道変位の中心位置 λ と座屈箇所中心位置は等しい. 解析条件を表-2および図-14,図-15に示す.一般に,ロン グレール管理において,ロングレールを曲線半径に応じ て区分し,区分毎に異なる管理基準を適用している.ロ ングレールのほとんどは,曲線半径 600m~直線の区分 に属しており,ここでは,この区分の最小曲線半径 600mを対象とした. 解析ケースは表-3 に示す,温度条件 $\Delta T \ge L \& cose2$ case0~case4 で,case0 は温度一様条件である.日陰箇所 の温度差  $\Delta T$ は,前章における夏季のレール温度予測結 果では日陰と日向の温度差が最大で 22℃生じており (図-11),これを包含する温度として,15℃,30℃の 2通りを設定した.日陰箇所の延長Lは,建物等の大き さによって異なるが,ここでは35m,70m とした.また, case1~case4 は,初期軌道変位の中心位置 $\lambda$ が,I:レー ル温度が低下する範囲の中心,II:レール温度が低下す る範囲と周囲との境界,III:境界から25m,IV:境界か ら50m となる4条件を各ケースで設定した.周囲よりも レール温度が低下する範囲の温度 $T_2$ については,図-16 に示すように,周囲の温度 $T_1$ が所定の $\Delta T$ に達した時点 から,周囲と同じ速度で温度上昇させた.

0

80

60

40

20

0

0

ノール温度変化量 r,[°C]

0

100

100

(d) case4 ( $\Delta T=30^{\circ}$ C, L=70m)

(b) case2 ( $\Delta T=15^{\circ}$ C, L=70m)

200

I · λ=0m

----- III : λ=60m

200

レール横変位 [mm]

II :λ=35m

- IV ·  $\lambda = 85m$ 

300

レール横変位 [mm]

300

300

300

図-17 レールの温度変化量と横変位の解析結果



#### (2) 解析結果

#### a) レール横変位とレール温度変化量の関係

図-17(a)~(d)に、各ケースにおける座屈発生箇所中心の レール横変位yとレール温度変化量 $T_1$ の関係の、温度一 様条件 case0 との比較を示す.これらの図より、レール 横変位yが 10mm以下の範囲で、座屈発生点(図-12(A)点) を示す温度変化量のピークが明確に表れており、飛び移 り座屈が生じることが分かる.また、初期軌道変位の中 心位置が、レール温度が低下する範囲に近いほどレール 横変位yに対する温度変化量 $T_1$ は大きくなるが、初期軌 道変位の中心位置が 50m程度離れる条件では、レール温 度一様の case0 とほぼ同等の値を示すことが分かる.

#### b) 見かけの座屈発生温度と見かけの最低座屈温度

図-17(a)~(d)の関係より、各ケースの $T_{I4} \ge T_{IC}$ 、および  $T_{I4} \ge T_{IC}$ の温度一様条件 case0 の値からの変化量  $\Delta T_{I4} \ge \Delta T_{IC} \varepsilon$ 表3 の通り求めた.表より、温度低下を付加した case1~case4 の全条件で、温度一様条件 case0 と比較し、 見かけの座屈発生温度  $T_{I4} \ge$ 見かけの最低座屈温度  $T_{IC}$ が 増加し、また、その増加量は  $\Delta T$ 、L が大きく、 $\lambda$ が小さ いほど大きい、今回のケースでは case4-I で増加量が最大 となり、 $T_{I4}$ が 24.9°C、 $T_{IC}$ が 23.6°C増加した.

図-18(a)~(d)に、各ケースで設定したレール温度  $T_R$ 、および  $T_R$ により生じるレール軸力相当の温度  $T_P$ の分布と、  $\Delta T_{14}, \Delta T_{1c}$ との比較を示す.ここで、 $T_P$ は、図-19 に示すレール長手方向の1次元構造解析モデルにレール温度  $T_R$ の分布を入力して求めた、座屈していないレールの軸力 Pに相当する温度である.図-18(a)~(d)より、 $\Delta T_{14}$ は、レール軸力相当の温度  $T_P$ の分布と一致しており、レール 温度の低下による発生軸力の  $T_1$ よりの低下量  $T_1$ - $T_P$ だけ、見かけの座屈発生温度  $T_{14}$ が増加していることが分かる.  $\Delta T_{1c}$ についても、 $\Delta T_{14}$ 同様、レール軸力の温度換算値  $T_P$ の $T_1$ よりの低下量  $T_1$ - $T_P$ と概ね一致するが、温度低下 $\Delta T$ 



図-20 実軌道での見かけの座屈発生温度の試算結果

が大きいcase3-Iでは約3°C, case3-II,case4-I,IIでは約1°C,  $\Delta T_{IC}$ が  $T_{P}$ - $T_{I}$ より小さい.これは、(C)点では、座屈によ り数十メートルの広範囲でレールおよびまくらぎに横方 向と縦方向の変位が生じており、この範囲内の軸力分布 が $T_{IC}$ に影響するためと考えられる

#### 5. 軌道の座屈強さの試算

ここでは、3章の試験箇所を対象とし、軌道の座屈強 さとして、地物の陰影を考慮した見かけの座屈発生温度  $T_{14}$ の分布を試算する.  $T_{14}$ は前章の解析結果を受け、レ ール温度分布を一様と仮定して求められる座屈発生温度  $T_{4}$ と、地物の陰影を考慮したレール軸力分布より算出す る.

3章(4)節で求めた夏季のレール温度予測値を図-19の モデルに入力し、レール軸力の温度換算値TPの分布を 図-20(a)の通り求めた.その際、レールの中立温度は25℃ とした.図-20(a)の赤線は予測日の日最高軸力(温度換 算値)を示しており、日陰によるレール温度低下のない 距離120mでの日最高軸力を基準とし、日最高軸力の低 下量の分布を求めた.さらに、座屈発生温度TAに加算し て、見かけの座屈発生温度TAの分布を図-20(b)の通り試 算した.図-20(b)より、当該箇所では、建物の陰により、 距離230m~400mの範囲で1℃以上、距離325mにおいては 最大2.7℃、見かけの座屈発生温度TAが増加した. 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.また、座屈解析モデルを用い、夏季の日 陰/日向の混在を想定したレール温度のばらつきに関す るパラメータ分析を行った.得られた知見を以下にまと める.

- ・ 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℃~15℃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ることを 確認した.また、予測モデルを用いて、測定箇所 における夏季のレール温度分布を試算したところ、 建物の日陰箇所では、周囲と比較して最大 22℃、 レール温度が低下することが分かった。
- ・ 座屈解析では、日陰等によりレール温度が低下す る全条件で、レール温度の低下がない条件と比較 して、座屈耐力の指標となる見かけの座屈発生温 度*T*<sub>L4</sub>と見かけの最低座屈温度*T*<sub>LC</sub>が増加し、また、 その増加は日陰のレール温度の低下量 *ΔT*,低下す る延長 *L* が大きい程顕著となった.一例として、 *ΔT*=30°C、*L*=70mの条件で、*T*<sub>L4</sub>が最大 24.9°C、*T*<sub>LC</sub>が 最大 23.6°C増加した.
- ・ 座屈解析より、T<sub>4</sub>の増加量はレール温度一様条件 からのレール軸力の温度換算値 T<sub>P</sub>の低下量と一致 することが分かった.これを受け、実軌道の夏季 のレール温度予測値を軸力の温度換算値 T<sub>P</sub>に変換 し、見かけの座屈発生温度 T<sub>4</sub>を試算したところ、

当該箇所の建物の陰となる箇所で,最大2.7℃, T<sub>14</sub> が増加することを示した.

#### 参考文献

- 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.
- 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.
- 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) Y. Zhang, J. Clemenzi, K. Kesler, S. Lee : Real Time Prediction of Rail Temperature, *AREMA 2007 Annual Conference*. Chicago, IL.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 萩三二:熱伝達の基礎と演習, pp. 51-52, 東海大学出版会, 1975.
- 10) 萩三二:熱伝達の基礎と演習, p. 77, 東海大学出版 会, 1975.
- 浅沼潔,曽我部正道,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.

(2019.4.5 受付)

# TRACK BUCKLING STABILITY EVALUATION IN CONSIDERATION OF THE SHADOW OF GEOGRAPHIC FEATURES

#### Fumihiro URAKAWA, Tsutomu WATANABE and Shigekatsu KIMURA

In the actual track, 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 the track buckling stability. In this paper, the rail temperature distribution of the actual track was determined in consideration of the shadow of the geographic feature using the rail temperature prediction model. As a result, it was confirmed that the above-mentioned analysis can reproduce the drop in rail temperatures of 10 ° C to 15 ° C, which is the rail temperature difference actually observed between the shady area by a building and the sunny area. In addition, track buckling analysis with the rail temperature distribution in which the mixture of shady / sunny areas in summer was simulated. Results showed that the apparent critical buckling temperature  $T_{1A}$  and the apparent lowest buckling temperature  $T_{1C}$  increase as the axial force decreases with the decrease in rail temperature at the shaded area. Furthermore, we estimated the  $T_{1A}$  of the actual track in summer using the rail temperature prediction value and showed that the  $T_{1A}$  increases by 2.7 ° C at the shaded area.