

沿線地物の赤外線量分布の測定及びその夜間レール温度との関係

浦川 文寛* 渡辺 勉 辻江 正裕 (鉄道総研)

Measurement of Infrared Radiation Distribution from Geographical Features along Railway Tracks and its Relation to Nighttime Rail Temperature

Fumihiko Urakawa*, Tsutomu Watanabe, Masahiro Tsujie (Railway Technical Research Institute)

In this paper, we measured infrared radiation, rail temperature, and air temperature at locations where geographic features (mountains or wooded areas) existed on both sides of the rail line and at locations where geographic features existed only on one side of the rail line. Results showed that in areas with few surrounding geographic features, the rail temperature and the air temperature are lower, and the rail temperature tends to be lower than the air temperature at night, because there are less heat inflows of the infrared radiation to the rail from the surrounding geographic features. In this measurement, the difference in the minimum rail temperature due to the amount of surrounding geographic features was about 2 °C at the maximum.

キーワード : 夜間レール温度, 赤外線, 沿線地物, 現地測定, 赤外線量分布の測定装置, レール温度予測 (Nighttime rail temperature, infrared radiation, geographical features along railway lines, field measurement, measurement device of infrared radiation distribution, rail temperature prediction)

1. はじめに

筆者らが開発したレール温度予測モデル⁽¹⁾は、日射等によるレールの熱収支を詳細に計算して昼間のレール温度を予測するものであり、日射のない夜間には対応していない。これは、文献⁽¹⁾のモデルが高温期の軌道座屈防止を主目的としているためであるが、夜間、特に低温期のレール温度はレール破断、及びレール破断時開口量に関係する重要な情報で

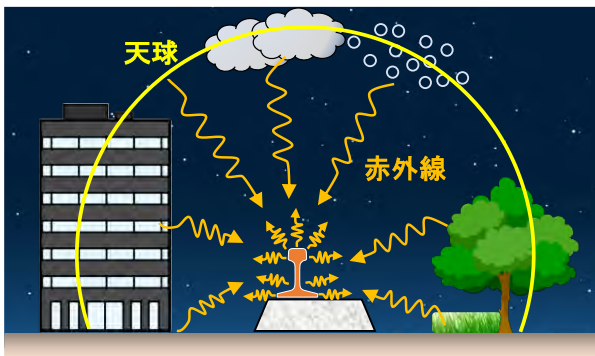


図1 レールが放射する赤外線と周囲から受ける赤外線

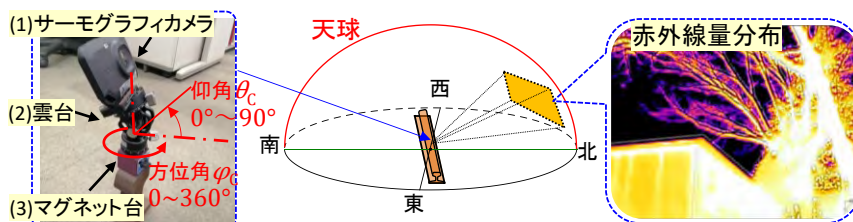


図2 サーモグラフィカメラを使用した天球赤外線量分布の測定装置

ある。

夜間、レールは内部の熱を絶対温度の4乗に比例した赤外線として放射することで、温度が徐々に低下していく(放射冷却)が、同時に、図1に示すとおり、周囲の地物(以下「沿線地物」)や大気、雲等が放射する赤外線を吸収し、レールが放射する赤外線量と周囲から受ける赤外線量がおおよそ等しくなるまでレール温度が低下する。つまり、周囲から受ける赤外線が大きい程、レール温度は下がり難くなる。

この様に、夜間のレール温度は赤外線による熱収支と密接な関係があり、これを予測する上では、沿線地物等からの赤外線量を的確に捉えることが重要である。本稿では、夜間のレール温度予測モデルの検討のため、レールから仰ぎ見た天空の赤外線量分布を簡易に測定可能な装置を試作する。さらに、営業線にて赤外線とレール温度を測定し、赤外線の夜間レール温度への影響について考察する。

2. 赤外線量分布の測定装置

〈2.1〉 測定装置の構成 測定装置は、図2左側と以下に示す(1)~(3)の機器により構成される。

(1) サーモグラフィカメラ : C5⁽²⁾(FLIR システムズ製)

図2右側に示すように、カメラの視野角内(54°×42°)の物体が放射する赤外線量を検出して温度に変換して出力するものである。本稿では出力された温度分布を、後述の方法で赤外線量に再変換する。

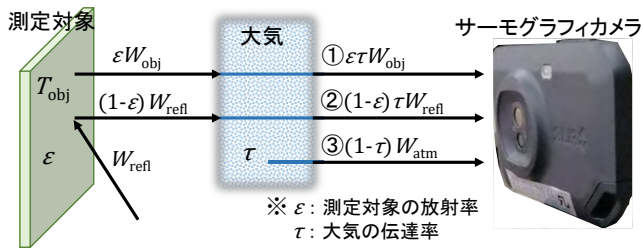


図 3 一般的なサーモグラフィカメラの測定状態⁽²⁾

(2) 雲台 : VH-20(Leofoto 製)

サーモグラフィカメラを天球の全方向 (方位角 φ 方向に $0^\circ \sim 360^\circ$, 仰角 θ 方向に $0^\circ \sim 90^\circ$) に設置可能とするため, 2 方向の回転機構を有する。

(3) マグネット台 : MB-PM(カネテック製)

レール頭頂面上に素早く設置できるよう, V 形の吸着面を有する。

〈2・2〉 測定方法

(1) サーモグラフィカメラのパラメータ設定 図 3 に示すとおり, サーモグラフィカメラが測定対象の方向から受ける赤外線量 W_{tot} は, ①測定対象が放射した赤外線が, 測定対象とカメラ間の大気により減衰して届く $\varepsilon\tau W_{obj}$, ②周囲の物質等が放射した赤外線が測定対象に反射した後, 大気により減衰して届く $(1-\varepsilon)\tau W_{refl}$, 大気が放射する赤外線 $(1-\tau)W_{atm}$ の合計である (式(1)参照)。

$$W_{tot} = \varepsilon\tau W_{obj} + (1-\varepsilon)\tau W_{refl} + (1-\tau)W_{atm} \dots\dots (1)$$

サーモグラフィカメラでは, 種々のパラメータを用いた演算により ① $\varepsilon\tau W_{obj}$ のみを赤外線の測定値 W_{cam} として分離し, $W_{cam} (= \varepsilon\tau W_{obj})$ から物体の温度 T_{obj} を求めているが, 本装置で測定したい赤外線は, ②, ③を含む全赤外線 W_{tot} である。そこで, 測定対象の放射率 $\varepsilon = 1$, 大気の伝達率 $\tau = 1$ とすることで, 式(1)の第 2 項と第 3 項が消え, $W_{tot} = \varepsilon\tau W_{obj} = W_{cam}$ となり, W_{tot} に基づく測定対象の温度がカメラから出力される。本装置のサーモグラフィカメラにおいては, $\varepsilon = 1$ 及び, 測定対象までの距離 $= 0$ とすることで, この設定が可能である。

(2) 測定値の操作方法 レールに 〈2・1〉 の装置を据え付け, サーモグラフィカメラの設置角度 (方位角 φ_c , 仰角 θ_c) を変えて複数の赤外線画像を撮影する。天球の全領域を測定できるよう, 設置角度の設定は, 方位角方向に 45° 間隔で 7 通り ($\varphi_c = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$), 仰角方向に 30° 間隔で 3 通り ($\theta_c = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$) とした 21 通りと, 天頂方向 ($\varphi_c = 0^\circ, \theta_c = 90^\circ$) の合計 22 通りとする。方位角 $\varphi = 0^\circ$ は線路を下り方向に見て直交方向右側とする。

〈2・3〉 データ整理方法 サーモグラフィカメラの出力は, 測定温度 T_{cam} の 22 個のピクセルデータ (JPEG ファイル) である。まず, これらを付属のソフトウェアを用い, T_{cam} の 22 個の数値データ (CSV ファイル) に変換する。次に, ExcelVBA にて作成したプログラムを用い, 22 個の数値デー



(a) 測定箇所①



(b) 測定箇所②(測定箇所①から 300m 下り方)



(c) 測定箇所③ (測定箇所①から 4,400m 下り方)

図 4 測定箇所の周辺状況写真

タを読み込み, 天球を φ 方向と θ 方向に 0.5° 毎に区切った格子の対応する位置に割り当て, 1 つのデータセット (以降「天球ラスタ」) にまとめる。さらに, 式(2)の演算式により, 格子毎に測定温度 $T_{cam(\varphi,\theta)} [^\circ C]$ を赤外線の熱流束に変換し, 赤外線量分布の測定値 $W_{(\varphi,\theta)} [W/m^2]$ を得る。ここで, σ はステファンボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} [Wm^{-2}K^{-4}]$)。

$$W_{(\varphi,\theta)} = \sigma(T_{cam(\varphi,\theta)} + 273.15)^4 \dots\dots\dots (2)$$

3. 営業線での測定試験

〈3・1〉 測定条件

- (1) 測定期間 2021 年 11 月 3 日 ~ 12 月 14 日。
- (2) 測定箇所とその周囲の状況 測定箇所は ① ~ ③ の 3 か所で, 図 4 に測定箇所の周辺状況の写真を示す。測定箇所②は測定箇所①から 300m 下り方で, 左側が山, 右側が

雑木林に面しており (図 4(b)), 比較的日当たりの悪い箇所である。測定箇所①と測定箇所③ (測定箇所①から 4,400m 下り方) は左側が山に面しているが, 右側は道路に面しており, 視界が開けた環境となっている (図 4(a),(c))。

(3) 測定項目/測定機器 測定項目/測定機器は, (a) レール温度/熱電対 (T-FFF(福電製)), (b) 気温/温湿度計 (測定箇所①: TR-72U(T&D 製), 測定箇所②③: Vantage Pro2 (Davis 製)), (c) 赤外線量/長波放射計 (CHF-IR02(クリマテック製)), (d) 赤外線量分布/サーモグラフィカメラである。ただし, 測定項目は箇所毎に異なり, 測定箇所①は(a),(b),(d), 測定箇所②は(a),(b),(c),(d), 測定箇所③は(a),(b)である。

上記(a)~(c)は測定機器を線路に設置して測定期間中に継続して測定し, (d)は 11 月 3 日の早朝のみ測定を実施した。測定機器の設置位置は図 5 に示すとおりである。

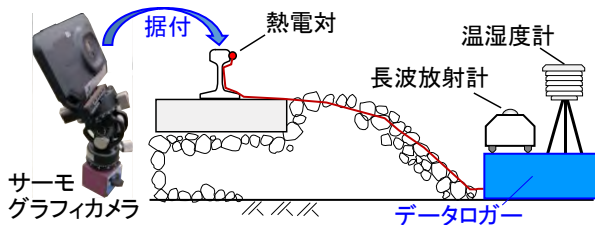


図 5 測定機器の設置位置

〈3・2〉 測定結果

(1) レール温度・気温 レール温度の測定結果を図 6 に示すが, レール温度は概ね日出直前に最も低くなり, 11 月初旬の日最低レール温度は約 10°C であった。その後レール温度は徐々に低下し, 11 月末では日最低レール温度は 5°C 以下となった。線路右側が道路である測定箇所①,③と雑木林である測定箇所②とを比較すると, 測定箇所①,③の方が測定箇所②より日最低レール温度は約 2°C 低い傾向が見られる。また, 気温の測定結果を図 7 に示すが, 気温とレール温度は概ね近い値であり, レール温度ほど顕著ではないが, 測定箇所①,③の方が測定箇所②より日最低気温が低い傾向が得られた。

図 8 に, 夜間の最低レール温度と最低気温の比較を天候別 (晴, 曇, 雨) に示す。同図より, 最低レール温度は最低気温と概ね一致するが, 測定箇所①,③では最低気温より低い傾向が見られ, 特に気温が 4°C 以下の低温ではその傾向が顕著である。

(2) 赤外線量 図 9(a), (b) に, 周囲から放射される赤外線量分布の 2 時ごろと 4 時ごろの測定結果を示す。測定箇所①では線路右側 (方位角 $\varphi = -90^\circ \sim 90^\circ$) に樹木等が存在せず, 道路と河川を挟んで山から赤外線を受けるが, 測定箇所

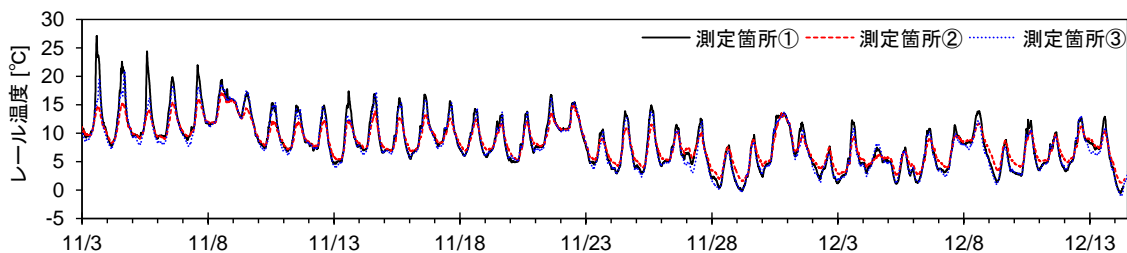


図 6 レール温度の測定結果

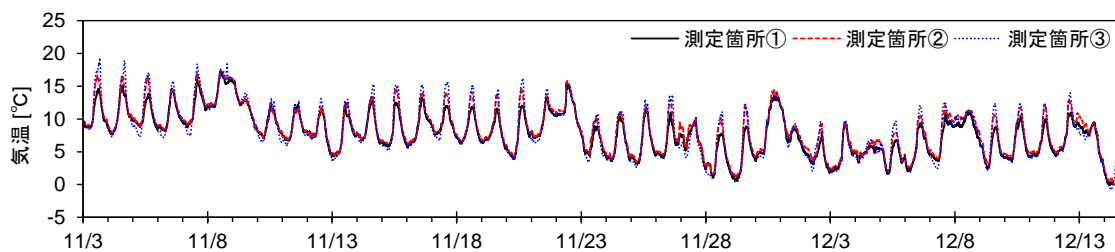


図 7 気温の測定結果

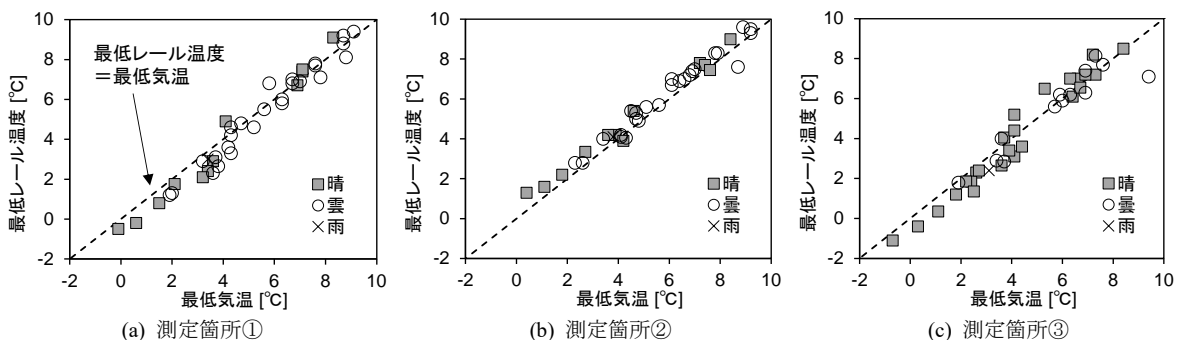


図 8 夜間の最低レール温度と最低気温の比較

所②では近傍の雑木林から赤外線を受けるため、この範囲の赤外線量が大きくなった。測定時間帯で比較すると、2時頃から4時頃での樹木等の沿線地物からの赤外線量の変化は小さいが、空からの赤外線の増加が顕著である。

図9の赤外線分布を積分してレールが受ける赤外線の総量を算定したところ、測定箇所②は測定箇所①の約1.1倍となった(図10)。図6、図7より、測定箇所②の最低気温は 0.4°C 、最低レール温度は 1.3°C であるのに対し、測定箇所①の最低気温は -0.1°C 、最低レール温度は -0.5°C といずれも測定箇所②より高く、かつ最低レール温度が最低気温よりも低い。また、測定箇所①と同様に線路右側に樹木等が存在しない測定箇所③では、最低気温は -0.7°C 、最低レール温度は -1.1°C と、測定箇所①と同じ傾向を示している。

以上より、樹木等の周辺地物が少ない箇所では周辺地物からの赤外線による熱流入が少ないため、多い箇所と比較して夜間のレール温度と気温が低く、かつレール温度が気温よりも下がりやすくなることが分かった。今回の測定箇所は少なくとも線路の片側が山であり、周辺地物の多寡による最低レール温度の差は最大で 2°C 程度であったが、高架橋、河川、平野部の盛土等、周辺の地物がより少ない区間では、この傾向がより顕著に現れることが想定される。

図10にて、測定箇所②の長波放射計の測定結果とサーモグラフィカメラによる測定結果を比較したところ、両者の時刻歴変動は近い傾向が得られたものの、サーモグラフィカメラの測定値は長波放射計と比較して3倍程度大きい結果となった。これは、サーモグラフィカメラの測定結果(温度)の4乗を積分して合計したことによる測定誤差の累積、サーモグラフィカメラの空間分解能の不足等が原因と思われる。この結果より、本稿で試作した赤外線量分布の測定装置は、周囲からの赤外線量分布特性の把握、及びその場所毎・時間毎の比較を行う上では有効であるが、レールが受ける赤外線の総量の測定には適用が難しいことが分かった。

4. まとめ

本稿では、レールから仰ぎ見た天空の赤外線量分布を簡易に測定可能な装置を試作した。さらに、線路沿線の両側に山または雑木林等の地物が存在する箇所と、片側のみ存在する箇所赤外線、レール温度、気温を測定し、両者を比較したところ、以下の結果、知見が得られた。

- ① 周辺地物が少ない箇所では周辺地物からの赤外線による熱流入が少ないため、夜間のレール温度と気温が低く、かつレール温度が気温よりも下がりやすい。
- ② 今回の測定では、周辺地物の多寡による最低レール温度の差が最大で 2°C 程度生じた。
- ③ 試作した測定装置は、周囲からの赤外線量分布特性の把握、及びその場所毎・時間毎の比較を行う上では有効であるが、レールが受ける赤外線の総量の測定には適用が難しい。

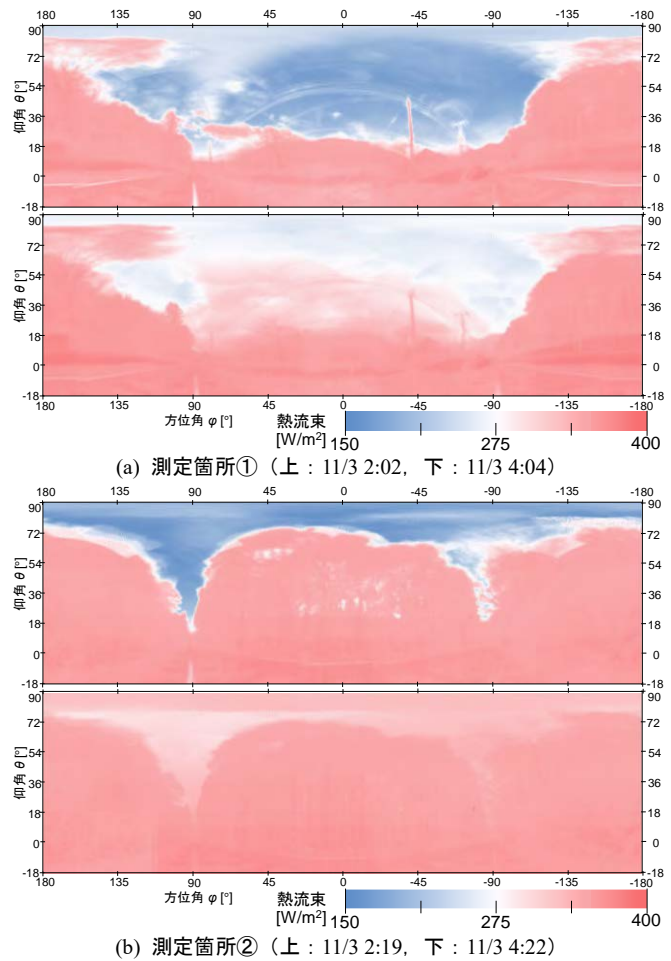


図9 周囲から放射される赤外線量分布の測定結果(天球ラスター)
※ $\varphi=90^{\circ}$: 装置据付レールの下り方向, $\varphi=-90^{\circ}$: 上り方向

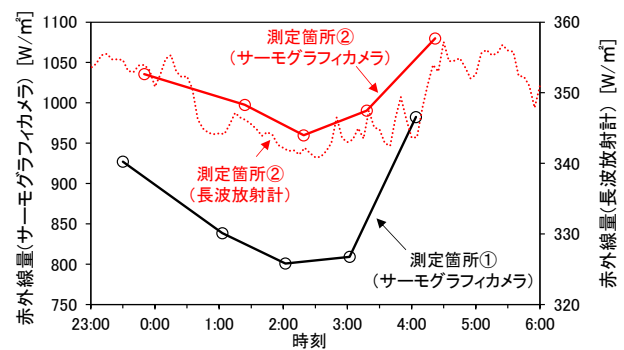


図10 レールが受ける赤外線の総量(11月3日)

今後は、DSM、3D都市モデル等の地物の形状データを用い、レールが受ける赤外線量を推定し、夜間のレール温度を精緻に予測する手法を検討する予定である。

文 献

- (1) 浦川 文寛・渡辺 勉:「地理・気象データを使用した鉄道用レール温度予測法」,土木学会論文集A2(応用力学), Vol.76, No.2, I_553-I_564 (2020)
- (2) FLIR システムズ:「ユーザーマニュアル FLIR Cx シリーズ」, Publ. No. T559918 (2017)