

サーモグラフィカメラを用いた 車輪とレールの接触位置の特定

山本 大輔*

Locating of the Contact Position between the Wheel and the Rail
by means of Thermos-graphic Images

Daisuke YAMAMOTO

It is necessary to specify the contact position between the wheel and the rail with due accuracy for estimating the dynamic characteristics of vehicles. However, since a camera cannot be mounted close to the rail-head level, to locate the contact position while the vehicle is running was not possible in the previous studies. In this study, in order to locate the contact position between the wheel and the rail, a new method of digitalizing the contact position on a thermal-image is proposed based on the method presented in the Burstow's study, and an experiment in locating the contact position is carried out using an actual coach in the RTRI test line. As a result, we confirmed the contact position between the wheel and the rail with due accuracy while the coach was running under environmental conditions suitable for using the thermos-graphic camera. In addition, this paper describes the usability of our proposal by its application to a previous experiment in derailment.

キーワード：車輪／レール，接触位置，サーモグラフィカメラ，閃光温度，摩擦熱，可視化

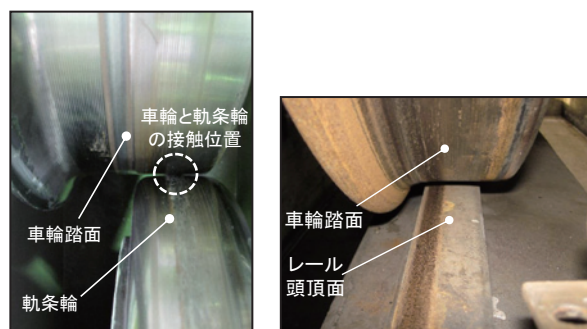
1. はじめに

車両の運動特性を詳細に知るためには、車両に入力される力の一つである車輪とレール間のクリープ力（接線力）を正しく理解することが重要で、そのためには、車輪とレールの接触位置とこれに対応する接触面形状を正確に評価する必要がある¹⁾。このため著者は、接触面形状に着目した車輪とレール間の接線力特性を数値解析及び実験により調査しており、僅かな凹凸であっても接触面に適切な形状でこれを設けると、曲線通過時の横圧を低減する効果が得られることを、実物車両を用いた走行試験により示してきた²⁾。ここで車輪とレールの接触位置に着目する。接線力特性を調査する際に使用される車輪と軌条輪を用いた室内実験では、カメラを接触位置の接線方向に設置することができるため、これらの接触位置を知ることはそれほど難しくない(図1(a))。その一方、営業線などを使用して行う走行試験では、車輪とレールの接触位置を確認するには視線をレール面高さ程度まで下げる必要があるが、この高さは軌道設備との接触の危険があることからカメラを設置することができない。このため、従来の走行試験では、台車に設置された補助排障器の裏など、車両の走行に支障がないレール頭頂面より高い位置にCCDカメラなどを取り付け、走行中にフランジとレールゲージコーナー間の隙間（遊間）を車上

からモニタを通して見ることで、これらの接触の有無を確認していた。このため、接触位置を特定することはできず、当然ながら踏面においてもその接触位置を確認することはできなかった(図1(b))。

これに関して、英国のBurstowらは、サーモグラフィカメラを用いて車輪とレール間に生じる閃光温度（摩擦熱）を観測する方法を提案し、熱画像を映したモニタを通じて車上から目視で確認できることを報告³⁾している。

本稿では、Burstowらの可視化手法を参考に、走行中の車輪とレールの接触位置を目視で把握するのではなく、熱画像を数値化して計算機上で接触位置を特定する手法を新たに提案する。さらに、本手法の有効性を確認するため、所内走行試験で走行中の車輪とレールの接触位置の特定実験を行ったので、その結果について報告する。



(a) 室内実験の場合 (b) 走行試験の場合

図1 車輪とレールの接触位置の見え方の違い

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

2. 車輪とレールの接触位置を可視化する方法

2.1 Burstow らが提唱した車輪とレールの接触位置判別実験³⁾

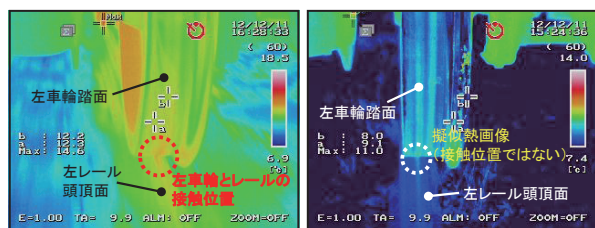
Burstow らは、測定対象物から放射される赤外線放射エネルギーを検出する機能を有するサーモグラフィカメラを鉄道車両の車体床下に仮設し、車輪とレールの接触位置を熱画像として撮影することで、走行中の車輪とレール間に生じる摩擦熱による温度上昇（瞬間的に冷める、以下、閃光温度）の残像を接触位置としてモニタ上で確認する手法を提唱するとともに、走行試験によりその効果の確認を行っている。文献³⁾では、車輪踏面の接触部では非接触部より閃光温度が約2℃高く、車上のモニタからは半径1400mの曲線と分岐器で車輪とレールの接触位置をモニタ上で確認することができたとしている。その一方で、レール頭頂面の汚れや不活性化、鏡面反射等の影響により、その場所に熱源がなくても熱源が存在しているような反応が現れる場合があったと報告している。

2.2 予備実験による性能確認

既報³⁾を参考に、同様の性能を有するサーモグラフィカメラを用いて、同様の手法により性能を確認した⁴⁾。すなわち、レール頭頂面から比較的高い位置にある車体床下にサーモグラフィカメラを設置し、対象とする車輪とレールの接触部付近を進行方向後側から熱画像として撮影し、その熱源の残像（接触位置）をモニタ上で確認した。その結果、既報³⁾で報告された通り、車輪とレールの接触位置と考えられる熱画像（図2(a)）が得られた。また、車輪とレール間にすべりが生じていない停車時にも関わらず、レール面の鏡面反射によると考えられる擬似熱画像（図2(b)）も得られた。

また、ボギー車では、車両が曲線を走行する際、車体と台車の間にヨーイング方向の相対角度が生じるため、車輪とレールの接触位置を車体床下のサーモグラフィカメラで特定する場合、視点角度を補正する方法を別途検討する必要があることなども分かった。

このため本研究では、擬似熱画像による誤判定の影響を軽減するとともに、簡易な構成装置で精度良く車輪とレールの接触位置を特定する構成として、サーモグラ



(a) 曲線走行中 (b) 停車中(擬似熱画像)

図2 サーモグラフィカメラで撮影した車輪とレール

フィカメラを台車枠下の狭い空間に可能な限りレール頭頂面に近い高さで、測定対象車輪に正対する位置に設置することとした。なお、台車の軸箱支持装置の種類によっては、走行時の輪軸は軸ばねのたわみによりヨーイング方向に変位するが、ここでは僅かであるため無視できるものとした。

3. 新たな構成装置による車輪とレールの接触位置特定実験^{4) 5)}

3.1 所内走行試験の概要

鉄道総研の所内試験線（図3）において、供試車両（付随車）をディーゼル動車で牽引する走行試験を行った。走行速度は、10、20、30km/hの3パターンとし赤矢印の方向で試験を行った（以下、車輪とレールの向きは、進行方向に対する左右とする。なお、所内試験線には左曲線しかないため、左が内軌、右が外軌となる）。サーモグラフィカメラによる測定対象は進行方向に対して先頭の輪軸とし、対象車輪の後側から撮影した。なお、踏面ブレーキが動作した際、摩擦熱による車輪踏面の顕著な温度上昇が想定されることから、車両の踏面ブレーキ装置を無効とした。

走行試験中の天候は晴天または曇りで、気温は9.3～22.8℃であった。

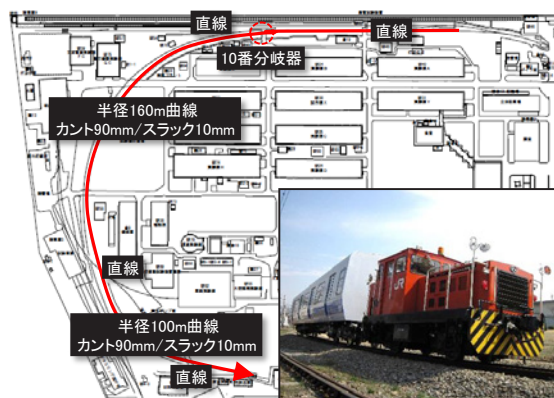


図3 鉄道総研の所内試験線と走行試験の状況

3.2 サーモグラフィカメラ

サーモグラフィカメラの設置状況を図4に示す。本研究では、台車枠下の狭い空間にサーモグラフィカメラを設置することを考慮して、小型・軽量のIRシステム製のAIR32 Professionalを選定した。本機は、車輪とレール間の摩擦熱が測定し易いよう測定温度範囲を20～40℃に狭めた仕様にカスタマイズしている。参考までに、本機の主な仕様を既報³⁾で報告されたカメラの仕様と並べて表1に示す。なお、本機は車輪とレール間の現象解明に用いる測定ツールとしての開発を想定しているため、雨天でない低速走行で使用することを前提としてい

表1 サーマグラフィカメラの仕様

	本研究で選定したカメラ	既報 ³⁾ で使用したカメラ
画素数	320 × 240	320 × 240
測定温度範囲	20℃～40℃	-20℃～120℃(推定)
温度精度	±0.5℃	±2℃または±2%
使用可能環境温度	5℃～40℃	-15℃～50℃
質量	約0.25kg	0.7kg
形状	53 × 81 × 60mm	170 × 70 × 70mm
フレームレート	最大20Hz	最大60Hz
振動・衝撃	なし	2G (IEC68-2-6) 25G (IEC68-2-29)
防塵・防滴	なし	カプセル化 IP40 IEC529

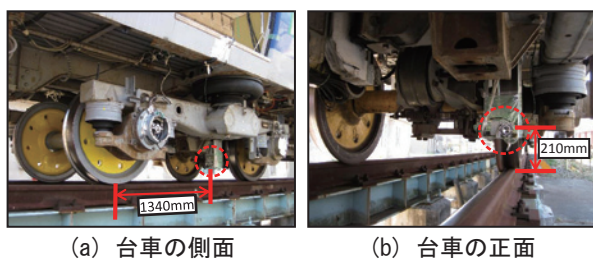


図4 サーマグラフィカメラの設置状況(左車輪の場合)

る。このため、耐振動・衝撃性能及び防塵・防滴性能については特別な対策を行っていない。

3.3 本装置による車輪とレールの接触位置の確認

サーモグラフィカメラにより撮影した車輪とレールの接触位置が実際の車輪とレール間の接触位置と同等であることを確認する。具体的には、車両の運動による影響が生じにくい低速走行時(速度10km/h)にサーモグラフィカメラで撮影した車輪とレールの接触部付近の熱画像と、同一地点付近で車両を一旦停止させ、車輪とレールの接触位置をデジタルカメラで撮影した画像と比較する。左車輪が図5(a)(b)、右車輪が図5(c)(d)である。

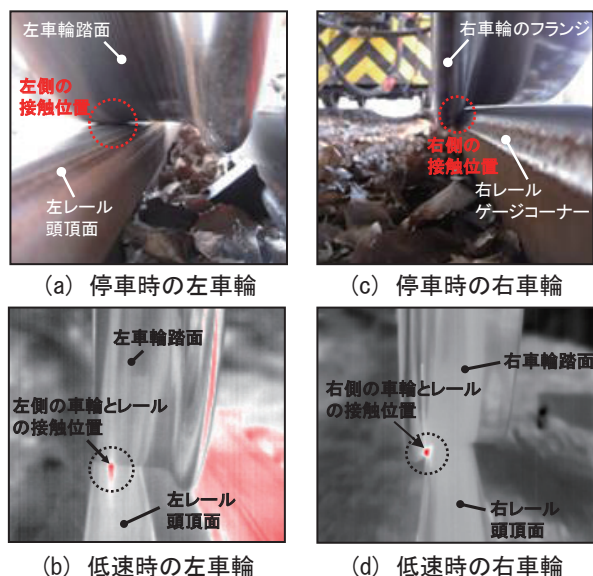


図5 同一地点付近での車輪とレールの接触位置の比較

図5(a)(b)の左車輪の接触位置を比較すると、熱画像とデジカメ写真は表リム面側踏面のおおむね同じ位置で接触している。図5(c)の右車輪では、急曲線を走行していたため、輪軸の車輪半径差が不足したことで車輪踏面がレール頭頂面から離れ、フランジ直線部の中央付近でレールのゲージコーナーと1箇所接触している。一方、図5(d)でもフランジ直線部の中央付近の1箇所に閃光温度が認められ、図5(c)と同様の形態となっている。

以上から、サーモグラフィカメラで撮影した車輪とレールの接触位置は、実際の接触位置と同等と考えられる。

3.4 接触位置の数値化

車輪とレールの接触位置を精度良く特定するため、サーモグラフィカメラで撮影した熱画像を校正し、数値化する。本研究では、くし歯状に5mm間隔で設けた金属製の校正目盛りを製作した。これを車輪とレールの接触位置の真横の車輪リム部に置き、サーモグラフィカメラでこれを熱画像として撮影し、熱画像の画素数と実際の長さの関係から数値化を行った。

3.5 接触位置の探査範囲

3.5.1 左車輪とレール間の探査範囲

左車輪の探査範囲を図6に示す。探査範囲は車輪上のレールとの際に近い部分に設けることとし、表リム面のリム端から40mmの範囲を5mm間隔で細分化した8箇所と、フランジ接触の有無を確認するための1箇所とした。これに加えて、サーモグラフィカメラで日中撮影する際、太陽光の照度の変動が無視できない場合がある。このため、8箇所の探査範囲の直上に約40mmの幅でリファレンス用の探査範囲を1箇所設け、走行中に得られた8箇所の閃光温度の最大値からリファレンス用の探査範囲の平均温度を減算することで影響を軽減している。左車輪とレールの接触位置は、8箇所の閃光温度の中で最も高い温度となる位置と定義した。また、直線を走行するときなど、車輪とレール間に生じるすべりが小さい区間では、8箇所全ての探査範囲で得られた閃光温度に明確な温度差が得られないため、車輪とレールの接触位置を正確に特定することができない。このため、閃光温度が最も高いと判定された探査範囲が、全8箇所の探査

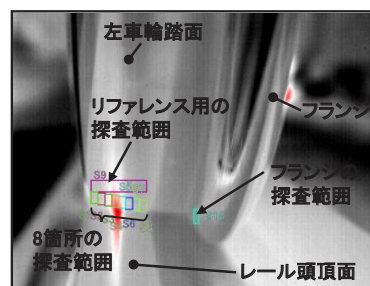


図6 左車輪とレール間の探査範囲

特集：鉄道力学

範囲の最大閃光温度を平均した値より 1°C 以上大きい場合は、車輪とレールの接触位置が正確に特定できたものと判断して解析結果として出力し、それ以外の場合はゼロを出力することとした。

3.5.2 右車輪とレール間の探査範囲

右車輪の探査範囲を図7に示す。ここでは、左車輪のように、車輪上のレールとの際に探査範囲を複数設けて接触位置を精度良く特定するのではなく、輪軸の挙動を把握するため、フランジと表リム面側の踏面にそれぞれ1箇所の探査範囲を設け、これらの探査範囲での接触の有無のみを判定する。なお、右車輪では左車輪のような温度補正を行っていない。

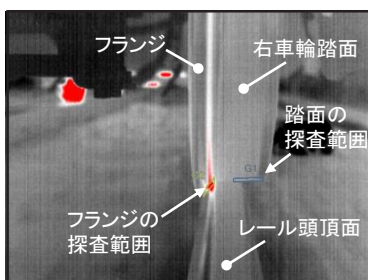


図7 右車輪とレール間の探査範囲

3.6 所内走行試験結果

3.6.1 左車輪とレールの接触位置の特定

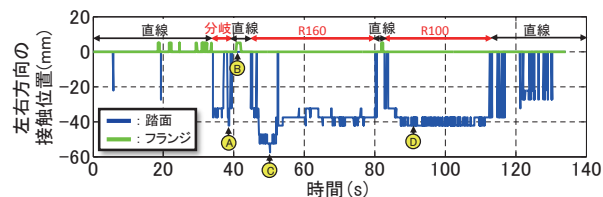
最高速度 30km/h の条件で走行中の左車輪踏面とレールの接触位置を特定した結果を図8(a)に示す。縦軸が車輪踏面の左右方向の接触位置で、図8(b)に示す車輪踏面形状の左右方向位置に対応する。横軸は時間である。なお、図8(a)の青線は踏面の接触位置、緑線はフランジ接触の有無を表している。

走行試験を開始して暫くの間は直線区間を走行する。ここでは車輪とレール間に大きなずべりが生じないため、サーモグラフィカメラで車輪とレールの接触位置を特定できない。その一方で、軌道変位に起因して輪軸が左右に変位した場合(18sec.付近から33sec.付近)には、左車輪のフランジがレールゲージコーナーと数回接触していることが分かる。その後、10番分岐器(A点)に対向で進入し、曲線と見なせるトングレールとリードレールを走行したことで、左右で車輪回転半径差が生じ、左車輪とレールの接触位置は、図8(b)に示す車輪踏面形状の左右方向位置で-35mm付近まで大きく変位する(図9(a))。10番分岐器通過後(B点)では、輪軸が左側に瞬間的に変位して左車輪のフランジがレールと接触している(図9(b))。その後、短い直線区間を通過後、半径160mの入口側緩和曲線付近(C点)では、車輪とレールの接触位置が車輪端部に近い左右方向接触位置で-55mm付近まで大きく変位している(図9(c))。これは、この区間のレール頭頂面の形状が軌間外側に向かって大

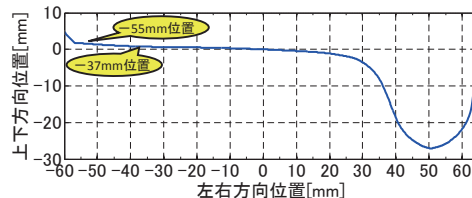
きくなる形状となっているためである。ここで、この特定結果は、本装置を搭載した車両の走行により、レール頭頂面の断面形状が摩耗などによりレール方向で大きく変化した区間を車両上から知ることができることを示しており、軌道の保守軽減への活用が期待できる。

次に、半径160mと100mの両曲線での車輪とレールの接触位置を見ると、ともに左右方向位置で-37mm付近を中心に細かく振動している(図9(d))。曲線半径が異なるにも関わらず、左車輪とレールの接触位置が同程度である理由は、レール頭頂面の形状が両区間で同等であること、スラックが同じであること、そして両曲線とも輪軸の車輪半径差が不足する小さい曲線半径で、右車輪のフランジがレールゲージコーナーに常に拘束された状態で走行する条件であったことにより、車輪とレールの接触位置に明確な差が表れなかったものと考えられる。この傾向は、全ての速度条件において同様であった。

その一方で、本手法は全ての環境条件で安定して接触位置が特定できるわけではなく、測定対象の表面温度が高い条件や温度むらが大い条件などでは、接触部と

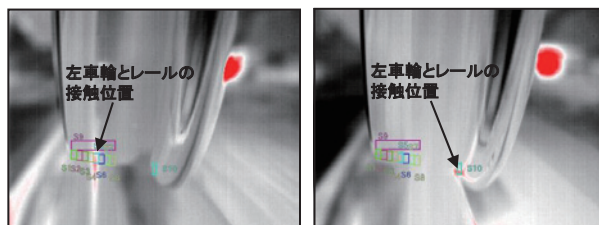


(a) 左車輪のレールとの接触位置



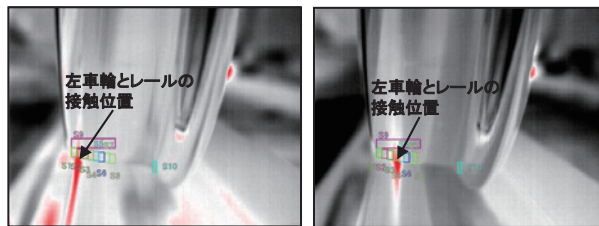
(b) 車輪踏面形状

図8 走行中の左車輪とレールの接触位置



(a) A点での接触位置

(b) B点での接触位置



(c) C点での接触位置

(d) D点での接触位置

図9 各地点での左車輪とレールの接触状況

非接触部のコントラストが小さくなり、その位置を特定できない場合もあった。さらに、図8(a)の120sec.以降で認められる接触位置の変動のように、直線走行中でサーモグラフィカメラが閃光温度を測定しにくい条件にも関わらず、輪軸及び台車の振動によりサーモグラフィカメラの探査範囲内に地表温度が写り込んだことによる誤った判定結果もあった。このように、撮影環境条件を適切にすること及び車輪とレール間に生じる閃光温度以外の熱源を探査範囲に写り込ませないことが、精度の良い接触位置の特定を行う上で重要であり、例えば、地表温度が比較的低温で温度むらが少ない夜間に走行試験を実施するなど、使用時の工夫が必要と考えられる。

以上から、本手法は適切な撮影環境条件においては、車輪とレールの接触位置を精度良く特定できることが分かった。

3.6.2 右車輪とレールの接触位置の判定

最高速度30km/hで走行した場合の右車輪とレール間の閃光温度を図10に示す。緑線がフランジの、青線が踏面の閃光温度をそれぞれ表しており、線路形状ごとにレールとの接触の有無を判定することができる。

左側と同様に、走行試験を開始して暫くはフランジおよび踏面ともに明確な閃光温度の変化は認められない。10番分岐器付近(E点)において、フランジの閃光温度が約30℃まで急激に増加している。これはトングレールからリードレール付近に右車輪が進入し、左右車輪で車輪回転半径差が生じたことに起因するすべりが発生したためである(図11(a))。同分岐器のクロッシング付近(F点)では、温度は低い踏面に閃光温度が認められる。これはレールの欠線部付近で車輪とレールの接触位置がフランジ側から表リム面側に瞬時に移動したときに生じたものである(図11(b))。半径160mと100mの曲線では、曲線半径が小さく車輪回転半径差が得られない条件のため、それぞれフランジがレールのゲージコーナーに常時接触した状態で走行しているが、輪軸が小刻みにヨーイング運動するためフランジの閃光温度の変動が激しい(図11(c)(d))。フランジとレールゲージコーナーの接触位置をモニタ上で確認すると、輪軸のヨーイング運動に同期してフランジ根元からフランジ直線部の中央付近の間で変動している様子が確認された。また、フランジ閃光温度と横圧のそれぞれのピーク位置がおおむね一致していることを確認している。この詳細については、別報⁵⁾に譲ることとする。

以上から、本手法は適切な環境条件においては、左車輪のように精度良く数値化を行わなくても、線路形状ごとに右車輪の挙動を把握することができ、特に、分岐器のようにレール形状の変化が大きい区間を走行する際の接触位置の速い動きも確認できることが分かった。

なお、ここでは右車輪の探査範囲を2箇所としたため、

分岐器付近を通過する際、車輪背面と脱線防止ガードの接触の有無を閃光温度として判定できていないが、フランジ背面に探査範囲を設ければ、これが可能となる。

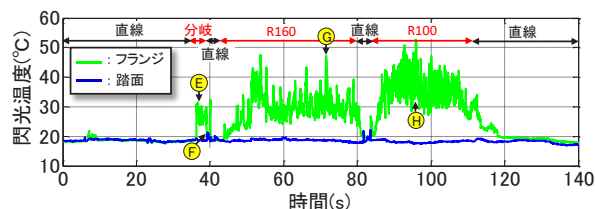


図10 走行中の右車輪とレール間の閃光温度

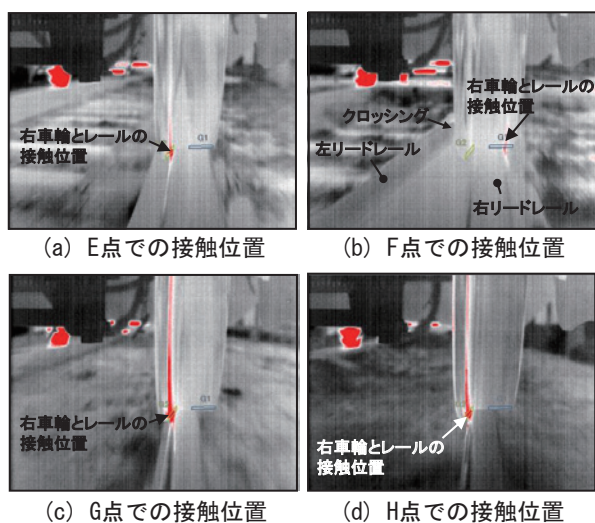


図11 各地点での右車輪とレールの接触状況

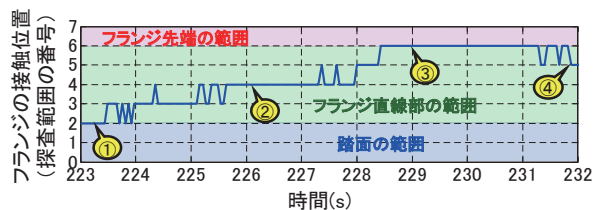
4. 乗り上がり脱線再現試験への適用

鉄道総研の所内試験線で実施された、意図的に脱線しやすい状態に調整した車両を用いた乗り上がり脱線再現試験⁶⁾に、本手法を適用した結果を図12に示す。サーモグラフィカメラの設置角度は異なるが、取付け位置は3章までに記述した走行試験とおおむね同様で、先頭輪軸の右車輪を進行方向後側から撮影した。ここでは、熱画像に対して校正目盛りでの数値化は行わず、フランジ付近に7個の分割した探査範囲を設け、これらの中で閃光温度が最大となる箇所を車輪とレールの接触位置と定義することで、車輪の挙動を把握する。図12に半径100mの出口側緩和曲線を走行中の一例を示す。4秒程度で右車輪がレール頭頂面上に乗り上がり、その後、フランジ先端がレール頭頂面上を走行する状態を3秒程度続け、フランジがレールゲージコーナーからすべり落ちる形態で復線する動きを解析結果と熱画像により理解することができる。右車輪のフランジがレール頭頂面上に乗り上がる際、輪軸の車輪半径差が大きくなることに起因して車輪とレール間の転がりすべり摩擦係数が最も大きく

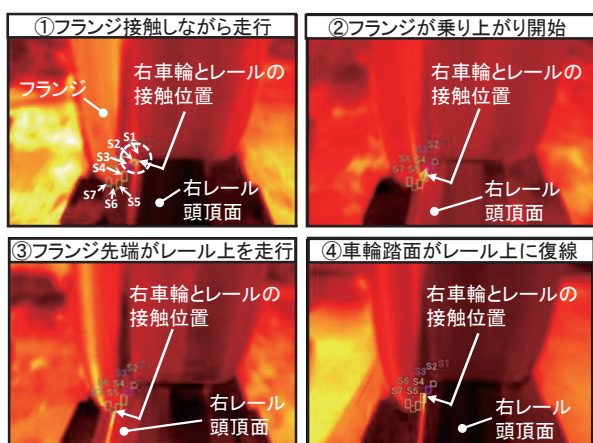
特集：鉄道力学

なる。このため、フランジ先端がレール頭頂面上を走行する時は閃光温度が高く、車輪とレールの接触位置が熱画像上で確認しやすい状況となる。

このように、サーモグラフィカメラを用いることで、車輪とレールの接触位置を特定し車輪の挙動を詳細に把握することができることから、車輪の乗り上がり位置などを把握する必要がある場合など、本手法は CCD カメラを用いた方法に比べて詳細な知見を得ることができる。



(a) 車輪とレールの接触位置の解析結果



(b) 各地点での車輪とレールの接触状況

図 12 フランジ乗り上がり時の接触位置の変化

5. まとめ

本研究では、これまで走行中に確認することができなかった車輪とレールの接触位置を特定する方法として、Burstow らが提唱したサーモグラフィカメラにより接触位置を可視化する手法を参考とし、新たに車輪とレールの接触位置を精度良く特定する手法を提案し、所内走行試験によりその性能を調査した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) サーモグラフィカメラで撮影した熱画像に対して、金属製のくし歯状校正目盛りと画素数の関係から数値化を図り、車輪とレールの接触位置を計算機上で精度良く特定する手法およびフランジと表りム面側の踏面にそれぞれ 1 箇所の探查範囲を設けることで輪軸の挙動を把握することができる手法を新たに提

案した。

- (2) 本提案手法の有効性を調査するため、実物車両を用いた所内走行試験で、車輪とレールの接触位置を特定する実験を行った。その結果、直射日光の影響が小さく、地面や軌道設備、車輪とレールの表面温度が低くかつ温度むらの少ない環境で、かつ車輪とレール間の閃光温度が大きい条件で、車輪とレールの接触位置が精度良く特定できること、さらに輪軸の挙動を把握できることが分かった。
- (3) 本手法を実際の乗り上がり脱線再現試験に適用した結果、車輪がレールに乗り上がる際のフランジとレールゲージコーナーの接触位置を詳細に把握することができ、従来の CCD カメラを使用した方法に比べて詳細な知見が得られることが分かった。

このように本手法は、サーモグラフィカメラの使用環境を適切に選定すれば、乗り上がり脱線再現試験での使用のみならず、様々な研究開発の場面で有益なツールとして活用できると考える。例えば、動力車の動軸を対象とすれば、大きな駆動力や制動力が生じた際の接触位置の摩擦熱の状況を把握することができるため、これらの摩擦傾向の調査にも活用できると考える。

今後は、車輪とレール間の様々な問題に対する解決のため、本手法を確認ツールの一つとして活用する計画である。

文献

- 1) 康琦, 井口雅一, 西村誠一, 谷本益久: 実体鉄道車輪とレールによるクリープ特性実験, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.59, No.559, pp.777-781, 1993
- 2) 山本大輔: 鉄道車両の曲線定常横圧低減のための微小凹凸車輪踏面の開発, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.812, DOI:10.1299/transjsme.2014trans0061, 2014
- 3) Burstow, M., et al.: Understanding wheel/rail interaction with thermographic imaging, Proc. of the 22nd IAVSD Symposium, Manchester, 2011.
- 4) 山本大輔: サーモグラフィカメラを用いた車輪とレール間の接触位置特定方法の妥当性の検証, 第 21 回鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail'14), 土木学会 (2014), S8-1-5
- 5) 山本大輔: サーモグラフィカメラを用いた著大横圧発生位置の簡易推定, 第 24 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-Rail'2017), 土木学会 (2017), JSCM-5
- 6) 飯田忠史, 野崎圭祐, 田中隆之: 空気ばねパンクを考慮した車両走行シミュレーションモデルの構築, 鉄道総研報告, Vol.30, No.4, pp.35-40, 2016