

なじみ過程における車輪／レール接触面の超音波を用いた可視化

深貝 晋也*

Visualisation of Wheel/Rail Contact Area during the Running-in Process using Ultrasound

Shinya FUKAGAI

Margin against wheel-climb derailment decreases if the friction coefficient in the wheel/rail contact is too high. This has been thought to happen more frequently just after wheel machining. We investigate how the friction coefficient changes with evolution of the wheel/rail interface during the running-in. In the experiments, we used a full-scale wheel/rail contact rig and an ultrasonic array transducer mounted in the rail. Using the results of ultrasonic measurements, the stiffness of the contact interface were determined. It is found that the contact stiffness appears to be positively correlated with the friction coefficient. The study leads to recommendation on how to manage wheel to mitigate the problems of wheel-climb derailment.

キーワード：車輪／レール，超音波，接触剛性，なじみ，転がりすべり

1. はじめに

本報告は、Elsevierの許諾を得て、Tribology International, Vol. 149 (2020) 105679¹⁾に掲載された論文の内容を抜粋して含んでいる。

車両の脱線に対する余裕度は、限界脱線係数が高いほど増加するが、これは車輪フランジ部とレール側部間の摩擦係数に依存する。高い限界脱線係数を得るには、摩擦係数を低く抑えることが重要となる。

他方、過去には、車輪削正後の走行距離が比較的短い車両が脱線する事象²⁾³⁾⁴⁾が発生しており、この一因として削正後の車輪フランジ部とレール側部間の摩擦係数が高かった可能性が考えられている。図1に、削正後の車輪を用いて急曲線を繰り返し走行する試験を行った際の車輪フランジの表面形状の変化⁵⁾を示す。削正後の車輪の表面形状および粗さは転動とともに逐次変化しており、前述の摩擦係数が高まる理由としては、削正直後の車輪表面に残存する微小な突起（削正痕）がレールに食い込むためとする考えがある。一方で、削正により車輪表面から付着物や酸化物が取り除かれた清浄面となり金属同士が直接接触するためという考えもある。しかしながら、こうした表面状態の変化（以後、なじみと称す）と摩擦係数の関連については十分に解明されていない。

本稿では、実物大の車輪／レール接触試験機を用いて、繰り返しの転がりすべり試験を行い、摩擦係数が変化する過程を調査した結果について報告する。特に、なじみ過程における車輪／レール間の接触剛性分布の変化を超音波を用いて可視化することにより、摩擦係数変化の要因について調査した。はじめに、過去に十分な実績があ

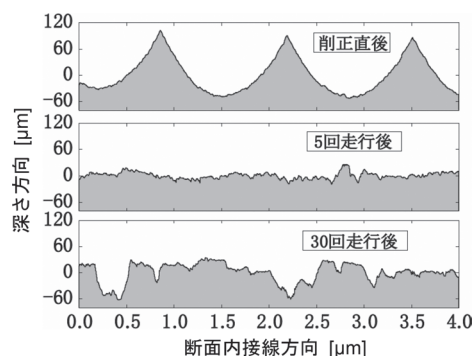


図1 急曲線繰り返し走行時の削正直後の車輪フランジの表面形状変化⁵⁾を改変

る車輪踏面の接触試験機⁶⁾により、微細粗さを有する車輪とレールの接触試験を行い、次いで、車輪フランジの接触が可能な試験機を用いて削正後の車輪の接触試験を行った。なお、鉄道の車輪とレールの間に生じる接線力と法線力の比は特に、接線力係数やトラクション係数等と称されるが、本稿では簡単のため摩擦係数と称す。

2. 超音波測定

音響インピーダンスの異なる物質の境界面では、音波は一部が透過し、残りは反射して返ってくる。空隙がなく完全に密着した界面における超音波の反射率 R は式(1)のように表され、二つの物質の音響インピーダンスの違いに依存する。

$$R = \frac{|z_2 - z_1|}{z_2 + z_1} \quad (1)$$

ここで、 z_1 と z_2 は接触物質の音響インピーダンス（密

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

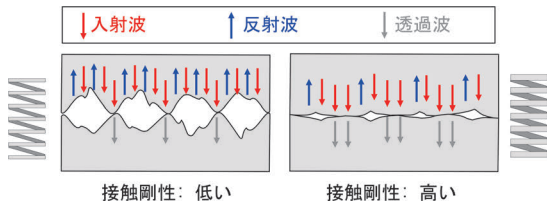


図2 超音波の反射率と接触剛性の関係

度と音速によって決まる値)である。また、 R は0以上の実数として定義される。したがって、接触する二物体の音響インピーダンスが等しい場合、全ての音波がロスなく透過するので反射は生じない ($R = 0$)。一方で気体と固体のように音響インピーダンスが著しく異なる場合、音波は完全に反射する ($R \doteq 1$)。

現実の物質表面は完全な平滑面ではなく、微細な粗さ突起やうねりが存在するため、接触界面には空隙が形成される。超音波の波長が界面の隙間と比較して十分に大きいとしたとき、反射率は接触剛性にも依存する。機械工学事典⁷⁾によると、接触剛性とは、「二つの物体の接触部の剛性」とされており、図2に示すように、二物体の表面がばねを介して接触していると仮定した場合の単位面積あたりの局所的なばね係数と言い換えられる。接触剛性は接触表面の凹凸形状等に依存することが報告されており⁸⁾⁹⁾、なじみ過程においても、表面凹凸の変化等とともに接触剛性が変化すると考えられる。

Schoenbergによれば、超音波の反射率はばね界面モデルを用いて式(2)で表される¹⁰⁾。

$$R = \left| \frac{z_2 - z_1 + i\omega(z_1 z_2 / K)}{z_2 + z_1 + i\omega(z_1 z_2 / K)} \right| \quad (2)$$

ここで ω は超音波の角周波数、 K は接触剛性、 i は虚数単位である。 K は0以上の実数として定義される。

本研究においては、車輪とレールとで同種材料 ($z_1 = z_2 = z$) であるため、式(3)のように簡略化される。

$$R = \frac{1}{\sqrt{1 + (2K/\omega z)^2}} \quad (3)$$

それゆえ、もし反射率を実験的に取得できれば、式(3)により接触剛性を評価することができる。一般的に接触剛性は、荷重の荷重方向の違いにより法線方向と接線方向に区別されるが、本報告においては、特に断りがない場合、接触剛性は式(4)に示す法線方向の接触剛性を指すこととする。

$$K = - \frac{dp}{du} \quad (4)$$

ここで p は法線方向の接触面圧、 u は界面の粗さ突起の頂点の平均線である。

反射率は式(5)に示すように、荷重負荷時の反射波の強度 H と無負荷時 H_0 の反射波の強度の比で表される。

$$R = \frac{H}{H_0} \quad (5)$$

3. 試験方法

3.1 車輪踏面接触試験

図3に車輪踏面接触試験に使用した試験装置および超音波プローブ設置状況の概略図を示す。本試験装置は実物大の車輪を同じく実物大のレールの上に配置し、油圧サーボアクチュエータにより、垂直方向の荷重を最大200kNまで負荷できる。レールが固定されているスライダベッドも油圧サーボアクチュエータにより最高速度100mm/sにより長手方向に移動することが可能である。レールの移動とともに、車輪とレールの間に生じる摩擦により車輪は回転するが、さらにスライダベッド上に配置された油圧サーボアクチュエータがチェーンを介して車輪回転速度をわずかに増加させることにより、車輪/レールに速度差(すべり)およびすべり荷重(最大60kN)を生じさせることが可能である。それぞれの油圧サーボアクチュエータはロードセルを介して動作し、車輪/レールのすべり荷重および垂直荷重の比より、摩擦係数を求めることができる。

超音波プローブはレールの枕木方向に設けた横穴に挿

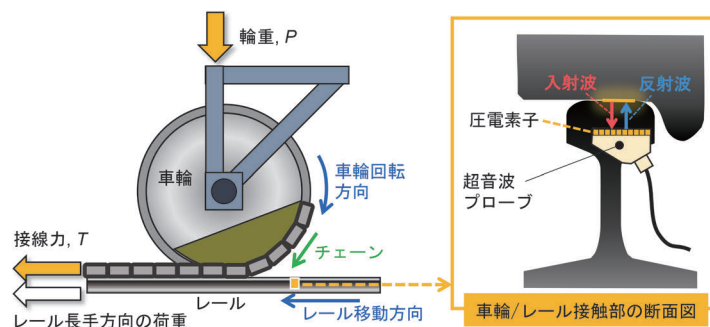


図3 車輪踏面接触試験に使用した試験装置および超音波プローブ設置状況の概略図¹⁾を改変

入して設置した。超音波プローブには64個のピエゾ素子が0.6mmの間隔で一列に配列されている。それゆえ、超音波プローブ直上に車輪を通過させることにより、車輪/レールの接触面をスキャンできる。レール長手方向の空間的な計測間隔は、超音波プローブのスキャン周波数とレールの移動速度により決定される。本試験では、スキャン速度を約14Hz、レール移動速度を10mm/sとしたため、レール長手方向の計測間隔は約0.7mmであった。超音波プローブは、中心周波数が5MHzのものを使用した。

試験レールの長さは約1200mm、試験車輪の直径は約920mmであった。レール頭頂面における車輪との接触位置は、レールの試験機への配置を変えることで二か所選択できる。一か所は車輪/レール接触試験機で意図的に著大な接線力を負荷し、表面粗さが微細であるものの相対的に高くした箇所、もう一か所はサンドペーパーを用いて研磨し、表面粗さを相対的に低くした箇所である。車輪踏面におけるレールとの接触位置は単一であり、表面状態は特に調整しなかった。

表1に試験前のレールと車輪それぞれの二乗平均粗さの5回の測定値の平均値およびそれらの合成粗さを示す。合成粗さ r_c は式(6)により求めた。

$$r_c = \sqrt{r_r^2 + r_w^2} \quad (6)$$

ここで、 r_r および r_w は、それぞれレールおよび車輪の断面接線方向の二乗平均粗さの5回の測定値の平均である。以降、合成粗さが高い組合せ条件を“高粗度”、低い組合せ条件を“低粗度”と称する。

表1 試験前のレールと車輪の断面接線方向の二乗平均粗さ¹⁾を改変

条件	二乗平均粗さ, Rq(μm)		合成粗さ(μm)
	レール	車輪	
高粗度	8.0	1.5	8.1
低粗度	1.2	2.8	3.0

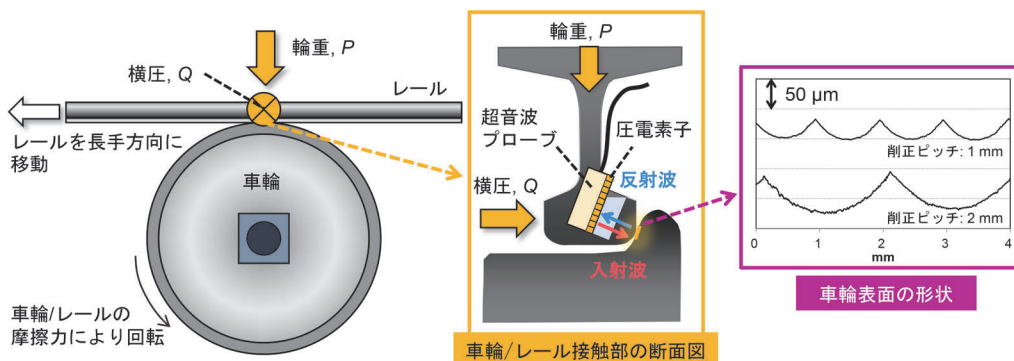


図4 車輪フランジ接触試験に使用した試験装置および超音波プローブ設置状況の概略図

高粗度条件では100回まで、低粗度条件では60回まで繰り返しの転動接触試験を行った。試験前に表面のアセトン洗浄を行った。試験時の輪重は80kN、すべり率は3%、測定時のレール移動速度は10mm/sとした。繰り返し試験の間、摩擦係数と超音波の反射強度の計測を同時に行った。

3.2 車輪フランジ接触試験

図4左端に、車輪フランジ接触試験に使用した試験装置の概略図を示す。この試験機は実物の車輪とレールを上下反転した状態で設置し、レールを油圧駆動することにより車輪と接触させ、垂直、水平、レール長手方向に実車相当の荷重を負荷することができる。また、車輪と接触させた状態で、レールを最速100mm/sで長手方向に移動させることができる。一方、車輪は駆動装置を付帯していないが、レールが長手方向に移動する際に、レールとの摩擦力により回転する。今回の試験では、車輪とレールを接触させた上で繰り返し転動させ、車輪が乗り上がる方向の左右接線力の変化を測定する。超音波プローブは図4中央に示すように、レール内部に設けた切り欠きに挿入した。ピエゾ素子の配列方向がフランジ角度と一致するように切り欠き形状を設計した。供試車輪は削正直後の切削痕が残存するものを用い、削正ピッチは1mmおよび2mmの二種類を用意した(図4右端)。摩擦係数は、図5に示すように輪重および横圧の測定値から、法線力、左右接線力値を式(7)、式(8)から算出し、左右接線力を法線力で除すことにより得る。

$$N = P \cos \alpha + Q \sin \alpha \quad (7)$$

$$f_y = P \sin \alpha - Q \cos \alpha \quad (8)$$

ここで、 N ：法線力、 f_y ：左右接線力、 Q ：横圧、 P ：輪重および α ：接触角(本試験では65度)である。

いずれの削正ピッチの条件においても、120回(往復回数60回)まで繰り返しの転動接触試験を行った。試

験前に表面のアセトン洗浄を行った。試験時の輪重は約23kN、測定時のレール移動速度は5mm/s、アタック角は1度とした。繰り返し試験の間、摩擦係数と超音波の反射強度の計測を同時に行った。

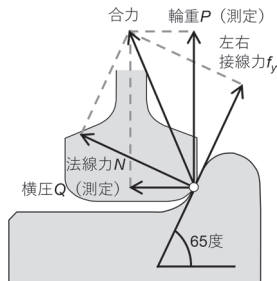


図5 転動回数と摩擦係数の関係

4. 車輪／レールの摩擦係数と接触剛性分布の変化

4.1 微細粗さを有する車輪の踏面接触試験結果

4.1.1 摩擦係数の変化

図6に転動回数の増加にともなう摩擦係数の変化を示す。摩擦係数は超音波プローブ上を通過する際の値を抽出して算出した。摩擦係数は高粗度、低粗度の条件ともに、転動回数とともに増加する傾向があったが、低粗度の条件は高粗度の条件と比較してより早く増加した。また両条件ともに、摩擦係数は約0.5で飽和する傾向があった。

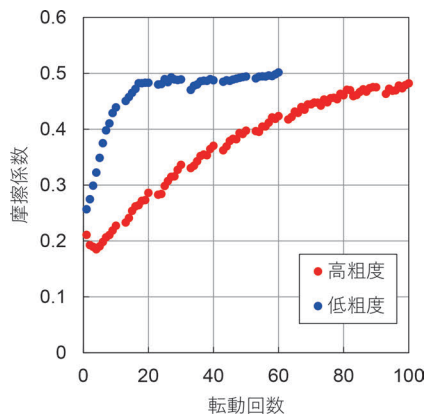


図6 転動回数の増加にともなう摩擦係数の変化¹⁾を改変

4.1.2 接触剛性の変化

繰り返しの転がりすべり試験中、超音波の反射波強度を連続的に測定した。超音波の反射波強度から、式(3)と式(5)により接触剛性 K を算出した。図7に転動回数の増加にともなう車輪／レール接触面内の接触剛性分布の変化を示す。ここで、超音波の反射波強度が10%低下した際 ($R = 0.9$) の接触剛性値を接触／非接触の境

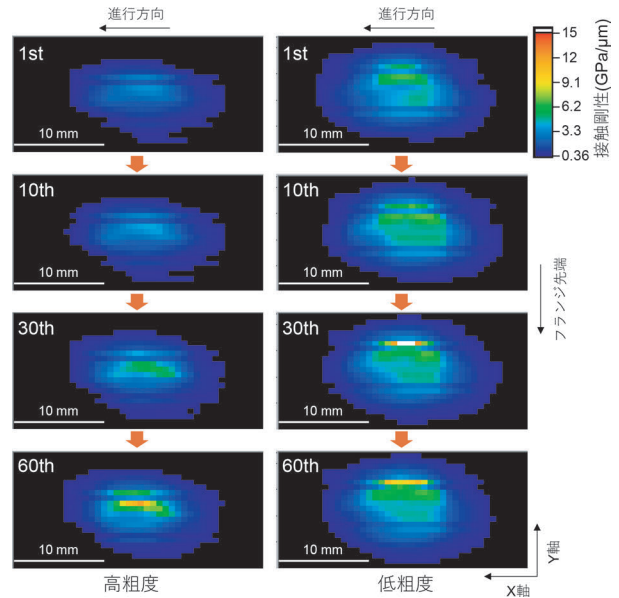


図7 転動回数の増加にともなう車輪踏面の接触面内の接触剛性分布の変化¹⁾

界とみなすしきい値とした。転動回数の増加とともに、接触面内の接触剛性は徐々に増加していた。転動回数の増加にともなう接触剛性の増加傾向は、接触面内で様でなく、接触面の中心に近いほど、増加の幅が大きい傾向があった。これは、接触面圧が高い部分ほど、粗さ突起の変形が著しいためであると考えた。

図8に転動回数の増加にともなう平均接触剛性の変化を示す。ここで、平均接触剛性とは、設定したしきい値を上回る接触面内の接触剛性の面内平均値を意味する。平均接触剛性は転動回数の増加とともに増加し、低粗度の場合は試験開始直後に既に高い接触剛性となっていた。低粗度の場合は摩擦係数も試験開始後早い段階で高い値となっており、両者の傾向は類似していた。

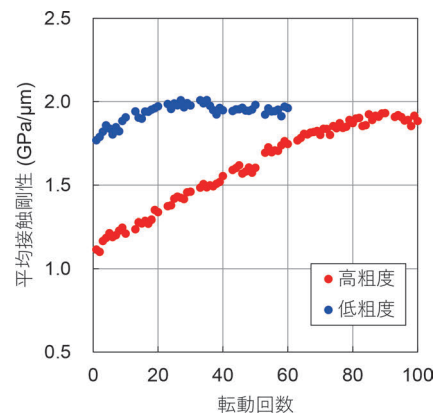


図8 転動回数の増加にともなう面内平均接触剛性の変化¹⁾を改変

4.2 削正痕を有する車輪のフランジ接触試験結果

4.2.1 摩擦係数の変化

図9に転動回数の増加にともなう摩擦係数（左右接触線力/法線力）の変化を示す。ここで、転動回数は往復運動における両方向の試験回数を積算した値である。削正ピッチ1mmにおける摩擦係数は、試験初期では約0.3であるが、転動回数とともに増加するものの、増加傾向は徐々に緩やかになった。削正ピッチ2mmにおける摩擦係数は、試験初期では約0.35であるが、転動回数とともに増加し、転動回数30回目以降では約0.42に漸近した。

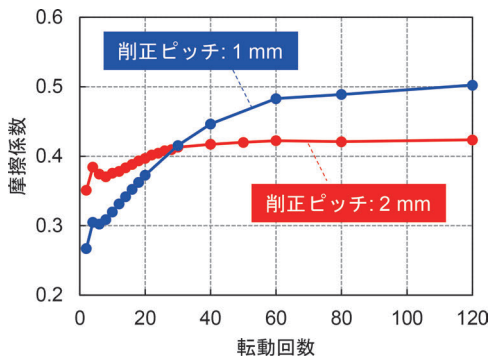


図9 転動回数の増加にともなう摩擦係数の変化

4.2.2 接触剛性の変化

図10に、転動回数の増加にともなう平均接触剛性の変化を示す。ここでは、非接触部の超音波の反射波強度の平均値から3σだけ低下した際の接触剛性値を接触/非接触の境界とみなすしきい値とした。摩擦係数の増加と平均接触剛性の増加の傾向はよく一致しており、転動回数とともに増加し、削正ピッチ1mmにおいては、徐々に緩やかな増加となっていた。削正ピッチ2mmにおいては、試験初期には急激に増加し、転動回数が20回を過ぎたあたりからほぼ一定となっていた。図8と比較すると、平均接触剛性の値が一桁近く高いが、これは接触

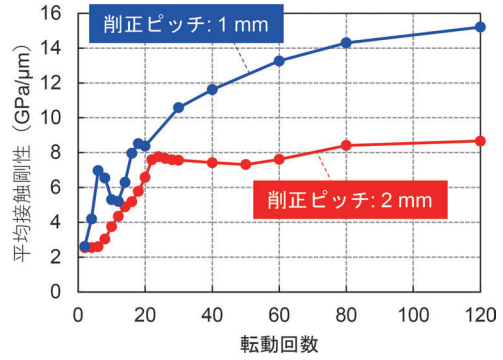


図10 転動回数の増加にともなう面内平均接触剛性の変化

条件（面圧等）の差の他、使用している測定機器の違い、しきい値の取り方の違い等により、検知した接触面積の大きさに差が生じたことが要因である可能性がある。

図11に、削正ピッチ2mmの結果について、転動回数の増加にともなう摩擦係数および接触面内の平均接触剛性の平均値変化を車輪フランジ/レールの接触剛性分布の変化とあわせて示す。接触剛性分布を見ると、転動回数が22回目までに、接触面形状は大きく変化しており、その後転動回数が120回目までは接触面形状に大きな変化は見られない。

4.3 なじみ過程での摩擦係数の増加要因の考察

図12に、車輪削正後の接触状態変化の模式図を示す。本稿で示した二つの実物大試験の結果においては、摩擦係数の上昇は、接触剛性の増加とともに進んでいた。車輪削直後は、表面の不純物が除去され、実車輪の表面状態の中では清浄な状態にあると考えられる。そのため、表面の凹凸が変形し、界面が密着し、接触剛性が増加する（硬化する）とともに、摩擦係数が高い状態となる可能性があると考えた。ヘルツ接触する機械類の運転は、潤滑下で行われることが一般的であり、車輪フランジ/レール側部のように無潤滑下で金属接触面をすべり接触

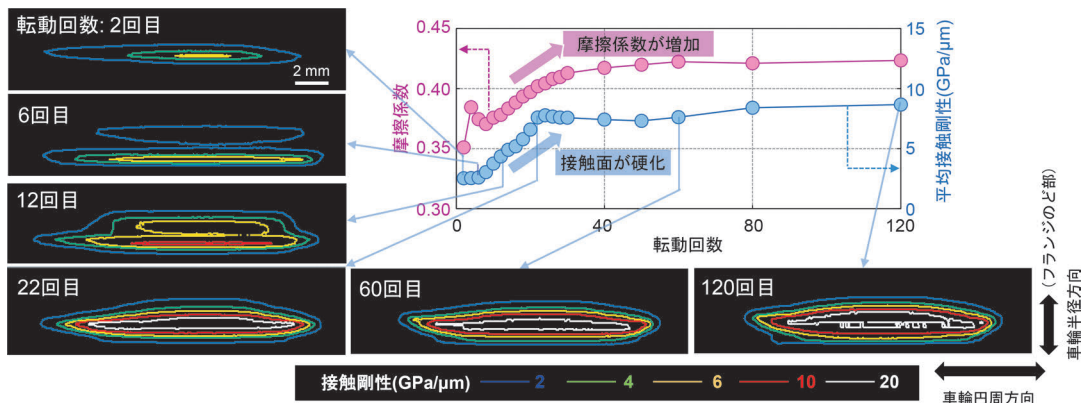


図11 転動回数の増加にともなう摩擦係数、平均接触剛性および接触剛性分布の変化（車輪削正ピッチ：2mm）

させる状態は、こうした意味で特殊と言える。特に同種金属同士の接触は“とまがね”とも呼ばれ、無潤滑では激しい摩擦を引き起こす場合があることが知られている。これを防ぐためにはフランジ部の潤滑を行うことが効果的と考える。

別途実施した小型二円筒試験の結果¹¹⁾では、同様に削正痕の変形とともに、摩擦係数の上昇が見られたが、その後摩耗粉の発生とともに、摩擦係数が低下していた。このことから、車輪とレールの界面が硬化する現象は、表面の粗さが塑性変形により一旦低下し、摩耗粉の発生とともに再度上昇するまでの間が特に顕著であると考えた。

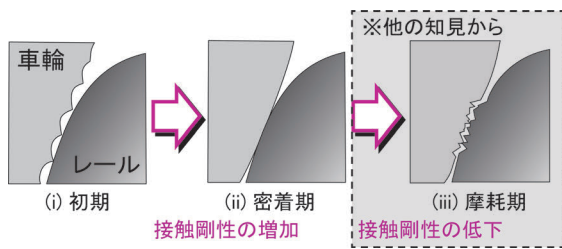


図 12 車輪削正後の接触状態変化の模式図

車輪フランジとレールとの接触回数や接触状態は、個々の車両や走行経路によるため、実車でこの状況が発生する時期を正確に予想することは難しいが、文献5にフランジ粗さ値の変化の一例が示されている。それによると、車輪削正後、曲線通過回数30回目程度までの間に、削正痕が一旦変形（平滑化）し、再度荒れた状態となっており、この間に界面が硬化していた可能性が考えられる。このことから、車輪フランジ部への塗油は車輪削正直後に実施することが効果的と考える。

5. まとめ

二種類の実物大の車輪／レール接触試験機を用いて、車輪とレールを繰り返し転動接触させ、なじみ過程における摩擦係数の変化を調査した。また、なじみ過程における車輪／レール間の接触剛性分布の変化を超音波を用いて可視化することにより、摩擦係数変化の要因について調査した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 接触条件が異なる二種（微細粗さを有する車輪の踏面接触および削正痕を有する車輪のフランジ接触）の試験を実施した結果、いずれにおいても、転動回数の増加とともに摩擦係数が上昇した。また、接触面内の平均接触剛性は摩擦係数と同様の傾向で増加した。
- (2) 削正後の車輪フランジ部においては、表面の凹凸（削正痕）がつぶれて接触面が密着し、接触剛性が増加する（硬化する）とともに、摩擦係数が高

い状態となる可能性があると考えられる。

- (3) 車輪とレールの界面が硬化する現象は、表面の粗さが一旦低下し、摩耗とともに再度上昇するまでの間が特に顕著であると考えられる。このため、車輪フランジ部への塗油を車輪削正直後に実施することが摩擦係数上昇抑制のために効果的と考える。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、シェフィールド大学のロジャー・ルイス教授をはじめとする関係の方々には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) S. Fukagai, et al. "Transitions in rolling-sliding wheel/rail contact condition during running-in," Tribology International Vol.149 105679, 2020.
- 2) 航空・鉄道事故調査委員会：神戸電鉄株式会社有馬線有馬口駅構内列車脱線事故，鉄道事故調査報告書，RA2007-6,2007
- 3) 運輸安全委員会：東日本旅客鉄道株式会社東北線尾久駅構内列車脱線事故，鉄道事故調査報告書，RA2008-02，2008
- 4) R.A.I. Branch, "Rail Accident Report, Locomotive derailment at Ordsall Lane Junction, Salford, 23 January 2013," 2014.
- 5) 土井久代ら：車輪削正後の車輪表面状態の変化と塗油による乗り上がり脱線防止効果，鉄道総研報告，Vol.25, No.8, pp.29-34, 2011
- 6) S.R. Lewis, S. Riley, D.I. Fletcher, R. Lewis, "Optimisation of a railway sanding system for optimal grain entrainment into the wheel-rail contact," Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, Vol.232, pp.43-62, 2018.
- 7) 日本機械学会：接触剛性，機械工学事典「電子版」，2021年8月20日閲覧
- 8) R.S. Dwyer-Joyce, B.W. Drinkwater and A.M. Quinn, "The use of ultrasound in the investigation of rough surface interfaces," J. Tribology. Vol.123, pp.8-16, 2001.
- 9) M.B. Marshall, R. Lewis, R.S. Dwyer-Joyce, U. Olofsson, S. Björklund, "Experimental characterization of wheel-rail contact patch evolution," J. Tribology, Vol.128, pp.493-503, 2006.
- 10) M. Schoenberg, "Elastic wave behavior across linear slip interfaces," J. Acoust. Soc. Am., Vol.68, pp.1516-1521, 1980.
- 11) S. Fukagai, L. Ma, R. Lewis, "Tribological aspects to optimize traction coefficient during running-in period using surface texture," Wear, Vol.424, pp.223-232, 2019.