

超音波技術を用いた車輪フランジ接触面形状の評価手法

材料技術研究部 摩擦材料研究室
副主任研究員 深貝 晋也

1. はじめに

車輪とレールは車両の支持と、その走行に際しての駆動力、制動力の伝達および案内などの役割をもち、この点で両者は鉄道を構成する基本的な部材である。その中で車輪フランジはレールゲージコーナと擦れ合いながら横方向の力を受け、車両をレールに沿って案内してゆく機能を果たしている。この過程で生じる両者の摩擦挙動は、低速走行時の乗り上がり脱線¹⁾、フランジ直立摩耗とレール側摩耗および騒音（きしり音）の発生といった様々な問題と密接にかかわっている。

本研究ではそのような問題の解決の一助として、車輪／レール間の接触状態を直接的に観察・評価することを目的としている。従来から、当該接触状態の観測は感圧紙によって行われてきたが、紙の厚さによる接触面形状への影響、傾斜接触における滑りによるせん断発色の影響、感圧紙自体の滑りによる位置ずれの影響および高圧力下における感圧紙の破砕といった問題がある。一方、近年車輪踏面／レール頭頂面接触部の観測に、超音波測定法を用いた研究結果が報告されている^{2), 3)}。超音波による測定では、感圧紙のように車輪／レール間に第3の物質を介在させる必要がなく、接触部を直接観測することができる。

本報では、フランジ／ゲージコーナ間の接触面形状を測定するために作製した超音波測定システムを用いて測定した、表面の微細形状が異なる種々の車輪とレールの組合せにおける接触面形状について報告する。また、法線力を徐々に増加させた際の接触面積の変化、理論計算値との違いについても言及する。

2. 超音波による測定方法

2.1 測定原理

超音波による固体接触部の測定原理を図1に示す。超音波プローブから照射された音波の一部は固体接触部を透過し、残りは反射してプローブへ戻ってくる。反射波強度（以下、エコー高さと呼ぶ）は接触面積の増加とともに減少することから、これにより2面の接触状態を推定することができる。

2.2 超音波測定システムの構成

作製した超音波測定システムの構成を図2に示す。一般に、超音波プローブは、プローブと測定物を密接させて測定する直接接触型と、水を介在させて測定する水浸型とに大別できるが、今回は面としての情報を得ることを目的とし、プローブをXY方向に頻りにスキャンさせる必要があるため、水浸型プローブを選択した。また、周波数は測定精度と超音波の減衰量を考慮して15MHzとした。

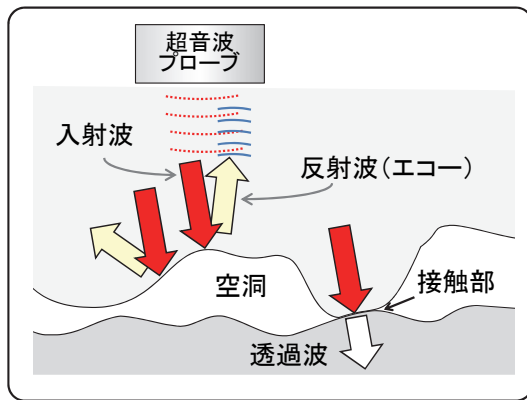


図1 測定原理

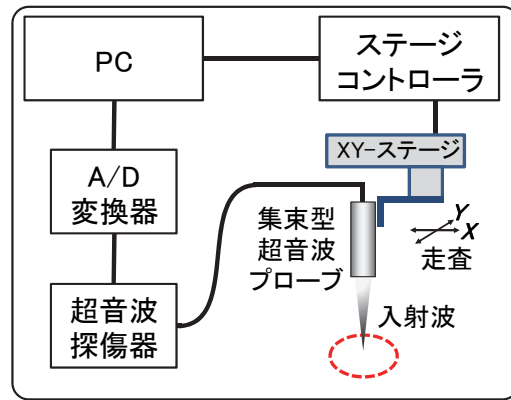


図2 測定システムの概要

3. 実物大試験機による測定

3.1 試験機

車輪とレールを接触させる試験機として、車輪/レール接触往復運動ユニットを用いた。本試験機は、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、輪重方向に最大 50kN、横圧方向に最大 40kN までの荷重を負荷することができる。またアタック角を最大 3 度まで設定することができる。

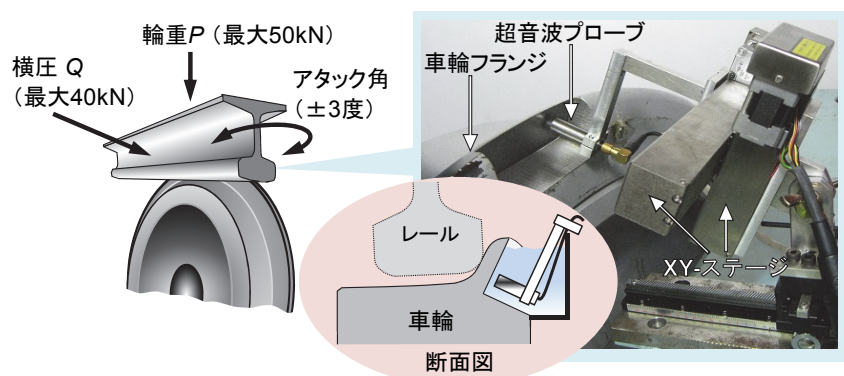


図3 試験機および測定器の設置概況

プローブと接触面までの距離を一定とするため、車輪の背面にはあらかじめ切欠き加工を施し、切欠き側より超音波を照射して測定を行った。またレールの位置は、フランジの直線部と接触するよう調整した (図3)。

3.2 試験条件

表1に試験に供した車輪およびレールの一覧を示す。供試車輪はいずれも試験用に新たに切削 (転削) した。形状は修正円弧踏面形状で、切削の送り速度は車輪 A, B では 0.3mm/回転、車輪 C, D では 1.5mm/回転とした。接触型の粗さ計により表面形状を測定した

表1 供試車輪およびレールの一覧

		供試験体	切削送り (mm/回転)	表面状態
車輪	A	平滑面	0.3	平滑
	B	ピット面		人為的ピットあり
	C	転削面	1.5	切削痕あり
	D	転削&摩滅面		切削痕摩滅
レール	a	平滑面	-	若干の窪みあり
	b	摩耗&あばた面	-	窪みあり

ところ、車輪Cでは送り速度 (1.5mm/回転) と関連した規則的な形状が見られたが、車輪Aにはそのような規則的な形状は認められなかった。また、車輪Bには、長距離走行後の車輪表面にしばしば見られるあばた状の窪みを模擬するため、人為的にポンチでピットを作製した。また、車輪Dは摩耗の過渡的状态を模擬するため、切削面をレールと一度だけ転動・接触させた。一方供

試レールは、50kgN 型の新品レール、摩耗レールの2種類を用意した。新品レールの表面には、製造過程でできたと考えられる若干の窪みがあり、摩耗レールの表面には、使用に伴って形成された窪みが多数ある。

図4に車輪フランジからレールゲージコーナに作用する力を示す。試験機は輪重 P と横圧 Q を負荷できるが、接触面形状に対する荷重影響を明確にするため、 P および Q の合力が法線力 N と同じ方向となるよう調整し、法線力 N で整理することにした。このとき、左右クリープ力 f_y は、無視できるほど小さい。法線力 N は以下の式により求めた。

$$N = Q \sin \alpha + P \cos \alpha \quad (1)$$

$$(0 \cong f_y = P \cos \alpha - Q \sin \alpha) \quad (2)$$

N : 法線力 (kN) , f_y : 左右クリープ力 (kN) ,

Q : 横圧 (kN) , P : 輪重 (kN) ,

α : 接触角[フランジ角※] (度) ※65度一定

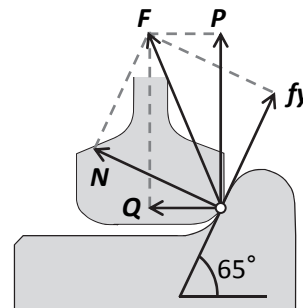


図4 車輪フランジからレールゲージコーナに作用する力

4. 測定結果

4.1 種々の車輪/レールの組合せにおける接触面形状

図5に種々のフランジ/ゲージコーナの組合せにおける接触面形状を示す。車輪A/レールaの組合せでは、接触面形状は円周方向に長い楕円形状であった。楕円左下がやや凹んでいるのは、レール表面の窪みによるものと考えられる。A/bの組合せでは、レールの表面に摩耗にともなって形成された窪みに起因する空洞が確認できた。またこのときA/aの接触面形状と比べて、短軸長さが若干長くなっているが、これは摩耗に伴いゲージコーナ部の曲率が低減したことによるものと考えられる。B/aの組合せでは、フランジにつけた人為的なピットにともなう空洞が確認できた。C/aの組合せでは、転削痕の尾根に沿った細長い筋状の接触面形状が確認できた。これは、同条件での別の試番では2山確認されるものもあった。C/bおよびD/aの組合せでは、C/aと同様に細長い筋状であるものの、その筋は断片的であった。

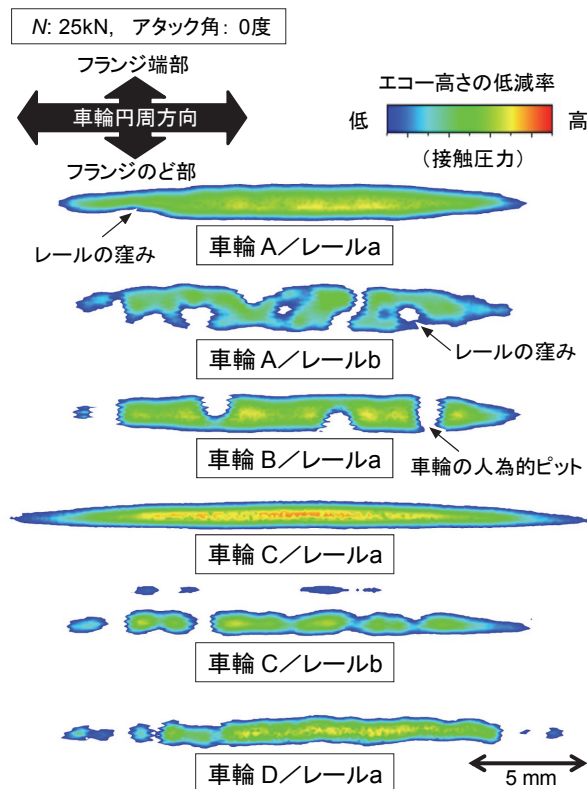


図5 種々のフランジ/ゲージコーナの組合せにおける接触面形状

4.2 感圧紙および理論計算値との比較

車輪A/レールaの組合せについて、超音波法による測定結果と感圧紙を用いた測定結果および計算結果を図6に示す。計算にはカルカーの厳密理論⁴⁾を用いた。図6より、感圧紙による実測結果は超音波による実測結果よりも明らかに大きいことがわかる。これは紙の厚さによる影響

などの感圧紙の問題が現れたためであると考えられる。一方、超音波による実測結果は計算結果よりもわずかに大きいものの、両者は比較的良く一致していた。

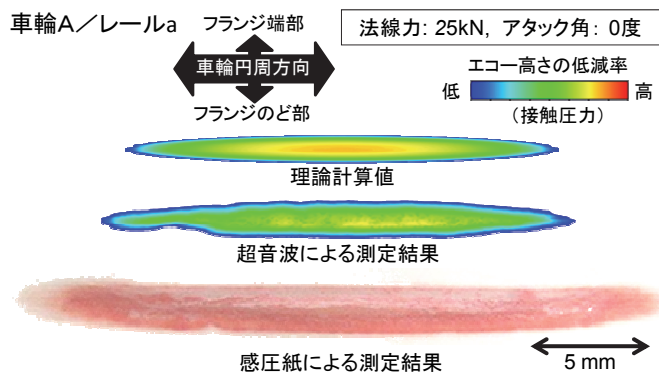


図6 感圧紙および理論計算値との比較

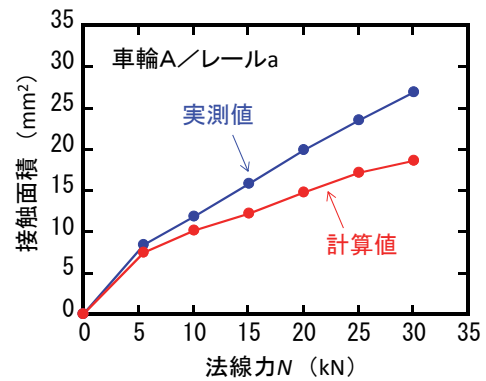


図7 法線力と接触面積の関係

4.3 接触面積の定量評価

図7に車輪A/レールaの組合せにおける接触面積と法線力の関係を計算結果とともに示す。実測値・計算値ともに接触面積が法線力 N とともに増加しており、低荷重域ではその値が良い一致を示している。しかしながら、高荷重になるに従い実測値が計算値を上回り、その差が徐々に大きくなることが分かった。このことは計算結果が弾性接触理論に基づいているためと考えられる。すなわち、接触面積には実際には塑性変形の部分の面積を含んでおり、そのために実測値が計算値よりも大きくなっている可能性が考えられる。他方、接触面形状の評価においては、接触/非接触の境界として、予備試験をもとに一定のしきい値（エコー高さ 30%以上の低減で接触とみなす）を設けているが、このしきい値を接触圧力とともに変化させる必要性や、車輪背面の切欠き加工にともない、接触部がたわみ易くなっていることを考慮する必要性も併せて考えられる。

5. まとめ

本報では、超音波測定システムおよび実物大の車輪/レール接触ユニットを用いて測定した種々の車輪とレールの組合せにおける接触面形状、測定結果の感圧紙および理論計算値との比較、および法線力を徐々に増加させた際の接触面積の変化について報告した。今回は静的接触条件下での測定結果について報告したが、今後は車輪が転動し、前後接線力が働く条件下での測定に取り組む予定である。

文献

- 1) 土井久代ら, 車輪削正後の表面状態と走行安全性に関する研究, 第17回鉄道技術連合シンポジウム, 2010, pp. 629-632.
- 2) M. Pau, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2005, pp. 79-90.
- 3) M. B. Marshall et al., Proceedings of the 14th International Wheelset Congress, Orlando, U.S.A., October 2004.
- 4) J. J. Kalker, Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact, Kluwer Academic Publishers, 1990.