

## 超音波を用いた車輪フランジ接触状態の評価

深貝 晋也\* 伴 巧\* 牧野 一成\*\*  
葛田 理仁\*\*\* 陳 樺#

## Evaluation of Wheel Flange Contact Using Ultrasonic Wave

Shinya FUKAGAI Takumi BAN Kazunari MAKINO  
Masahito KUZUTA Hua CHEN

The flange of a wheel has an important function of guiding the vehicle along the rail under considerable friction and lateral force. The frictional behavior in this situation relates to various problems such as flange climb derailment, wear of wheels and rails and noise of flange contact. This paper describes the measurement of the contact area between the wheel flange and the rail gauge corner to help the clarification of the mechanisms of these problems. In this study, an established ultrasonic technique was applied to evaluate the contact area between the wheel flange and the rail gauge corner by using a full-scale contact testing machine. As a result, the contact shape under the various surface conditions was determined. And it is confirmed that the increase ratio of contact area with the normal force is different from the theoretical result.

キーワード：車輪フランジ，レールゲージコーナ，超音波，接触形状，接触面積

## 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<sup>1) 2)</sup>、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測・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、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碎といった問題がある。一方近年、超音波を用いて車輪／レール間の接触状態を測定する研究結果が報告されている<sup>3) ~6)</sup>。超音波による測定では、感圧紙のように第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。しかし

ながら、これらの報告では車輪およびレールから切り出したブロックを用意し、両者を押し当てながら測定しており、実物大の車輪およびレールを用いた報告はされていない。実物大試験機に本測定手法を適用できれば、将来的に車輪転動時の測定など、より実際に即した条件での測定に発展させられる可能性がある。

本稿では、超音波測定システムを付帯した実物大の車輪／レール接触試験機を用いて車輪フランジ／レールゲージコーナ接触状態の評価を行っている。さらに、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の測定結果、法線力を徐々に増加させた際の接触面積の変化および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。反射される割合は反射係数  $R$  として、式(1)のように表わされ、2物体の音響インピーダンスの違いに依存する。

$$R = \frac{P}{P_0} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

ここで、 $P_0$  は入射波強度、 $P$  は反射波強度、 $Z_1$  と  $Z_2$  は

\* 材料技術研究部 摩擦材料研究室  
\*\* 車両構造技術研究部 車両強度研究室  
\*\*\* 鉄道力学研究部 車両力学研究室  
# 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

接触物質の音響インピーダンス（密度と音速による値）である。したがって、もし界面が均一であれば、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全く異なる音響インピーダンスを有する物質間では、超音波は完全に反射する ( $R \approx 1$ )。ここで、探触子に固有の特性や音波の散乱などの、接触圧力以外の因子の影響を低減することを考慮して、無負荷時の反射波高  $H_0$  と負荷時の反射波高  $H$  から反射波高比  $E(=H/H_0)$  を求め、これを評価指標として用いる場合が多く<sup>7) 8)</sup>、本稿でもこれを用いる。一般に反射波高比  $E$  は接触圧力と負の相関がある<sup>7) 8)</sup> ため、反射係数の分布により接触状態が判別できる。

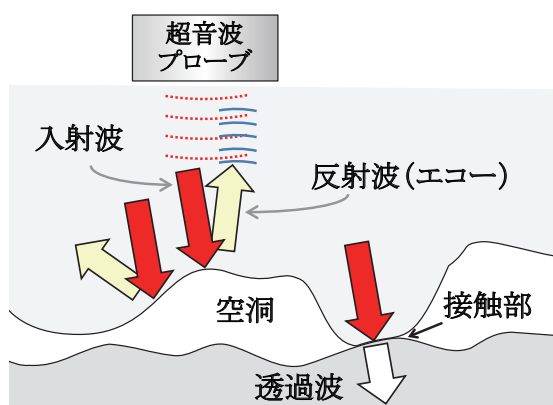


図1 超音波による固体接触部の測定原理

## 2.2 超音波測定システムの構成

図2に測定システムの概要を示す。本システムは集束型超音波プローブ、超音波探傷器、A/D変換器、PCにより構成されている。測定システムは試験機の近くに設置する必要があるため、探傷器にはポータブルタイプ (Krautkramer, USD15s) を用いた。また探傷器の性能および既往研究文献<sup>4)</sup>により高い解像度が報告されている理由から、周波数 15MHz の超音波プローブを使用した。測定する場合、プローブと試験体 (車輪) の間に液体を接触媒質として介在させると超音波が伝達しやすくなる。本試験では接触媒質は水、プローブは水浸型焦点タイプを選択した。プローブ径は 6mm、水中焦点距離

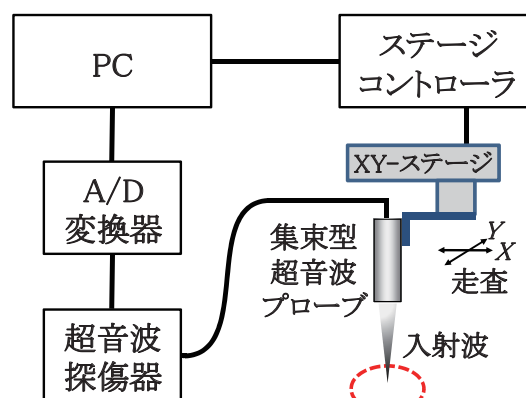
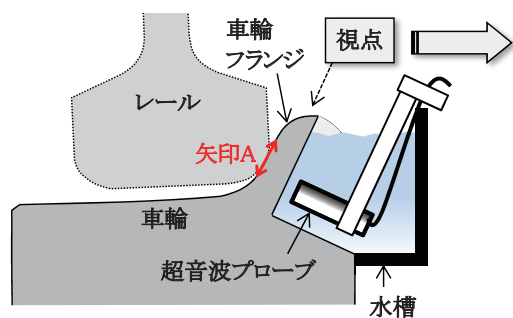


図2 超音波を用いた測定システムの概要

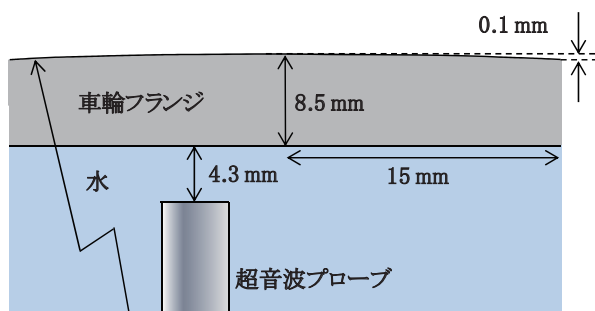
は 39.4mm である。

次節で述べるように、本研究では実物大の車輪/レール接触試験機を用いている。超音波は車輪フランジ背面から照射するが、プローブから測定対象であるフランジ直線部までの距離をできる限り一定とするため、車輪フランジの背面を切欠き加工した。図3はプローブと測定界面の位置関係を示す。車輪フランジの切欠き後の厚さは 8.5mm、水中伝搬距離は 4.3mm とした。接触試験では、レールの位置は車輪のフランジ直線部で接触するように調整した。そのため接触界面において、フランジのど部からフランジ先端方向 (図3左: 矢印A) の半径は無大 (曲率ゼロ) である。一方、車輪の前後方向 (レール長手方向) の半径は、図3右に示すようにフランジ角度を考慮した (通常的車輪半径に対して接触角の余弦で除した) 結果、約 1000mm となる。この車輪前後方向の半径に起因した全測定域 ( $\pm 15$ mm) における車輪厚の変化は、約 0.1mm と小さく、無視できると考えられる。プローブから車輪の切欠き面までの距離 (水中伝搬距離) は、スネルの法則を用いて焦点が絞られる位置を予測した後に、予備試験により入射波強度が最高となる位置を確認し、その位置に決定した。スポット径  $d$  は次式で表わされる。

$$d(-6\text{dB}) = \frac{1.028l_w c_w}{fD} \quad (2)$$

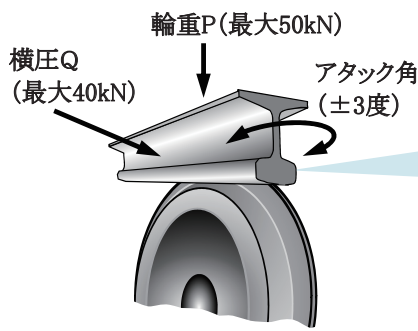


実物大試験機の断面図

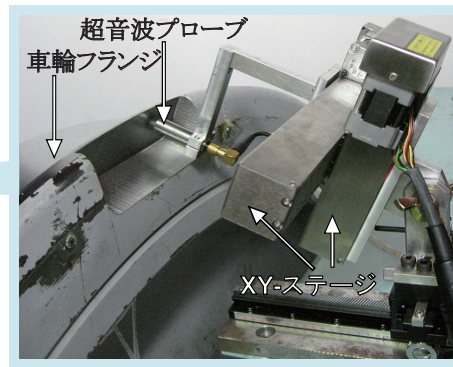


接触角を考慮した車輪半径: 約1000 mm

図3 プローブと測定界面の位置関係



(a) 概要



(b) 車輪背面の様子

図4 車輪／レール接触往復運動ユニットの概要 (a) と車輪背面の様子 (b)

ここで、 $l_w$  は水中焦点距離、 $c_w$  は水中の音速、 $f$  は超音波の周波数、 $D$  はプローブの径である。式 (2) を用いて計算した結果、スポット径は 0.67mm であった。接触面積の 2 次元画像はプローブを 0.1mm 刻みでスキャンすることで得た。最大スキャン速度は 4mm/s であり、1 つの車輪／レール接触形状画像を取得するのに約 7 分を要した。

### 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 (図 4 (a))。また、アタック角を最大 3 度

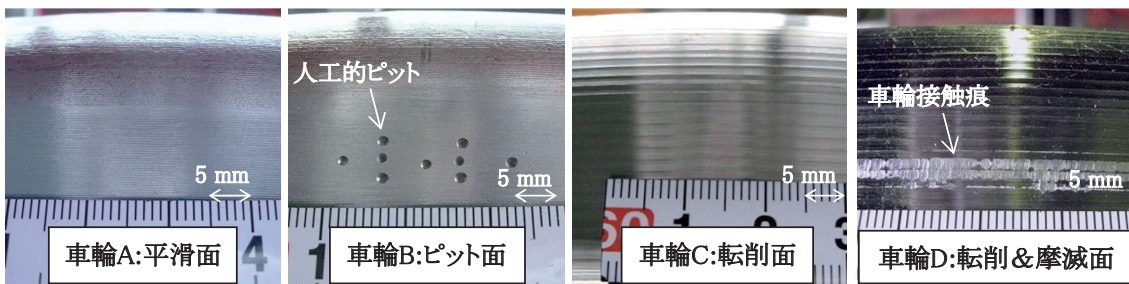
まで設定することができる。既に述べたように、車輪フランジの背面はプローブとフランジの直線部の距離を一定に近づけるため切除した (図 4 (b))。

#### 3.2 試験車輪およびレールの形状

図 5 および表 1 に試験に供した車輪およびレールを示す。供試車輪はいずれも試験用に新たに切削した。踏面形状は修正円弧踏面で、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 (小坂研究所、サーフコーダー SE3500) により表面形状を測定したところ、車輪 C では送り速度 (1.5mm/回転) とほぼ一致する規則的な形状が見られた (図 6) 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、人工的にポンチで「窪み (ピット)」を

車輪フランジ(上:フランジ端部, 下:のど部)



レール  
ゲージコーナ

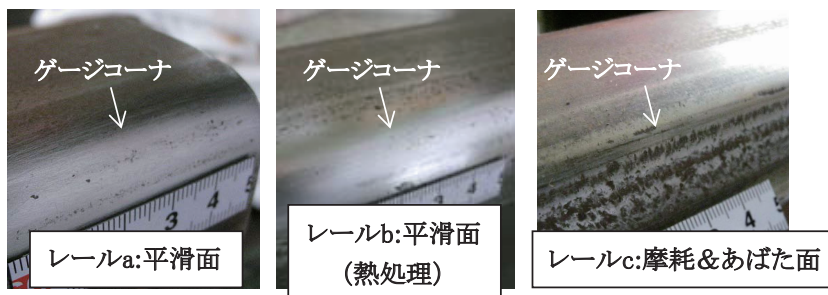


図5 供試車輪およびレールの表面状態

特集：材料技術

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(窪み)面		人工的ピットあり
	C 切削面	1.5	切削痕あり
	D 切削&摩滅面		切削痕摩滅
レール	a 平滑面	-	若干の窪みあり
	b 平滑面(熱処理)		若干の窪みあり
	c 摩耗&あばた面		窪みあり

つけた。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型の新品形状のレールa(普通レール)、b(熱処理レール)、摩耗形状のレールcの3種類を用意した。断面形状測定器(Greenwood engineering, mini prof)により測定したレールの断面形状を図7に示す。レールcは、摩耗にともないレールa、bと比べてゲージコーナ部の曲率半径が大きくなっていることが分かる。レールa、bの表面には、製造過程でできたと考えられるわずかな窪みがあり、レールcの表面には、使用に伴って形成された多数の窪みがある。

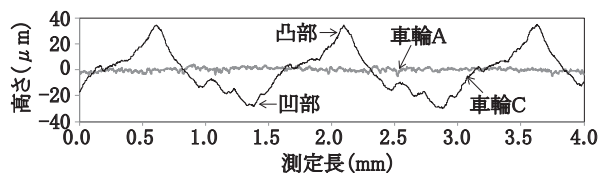


図6 供試車輪の表面形状

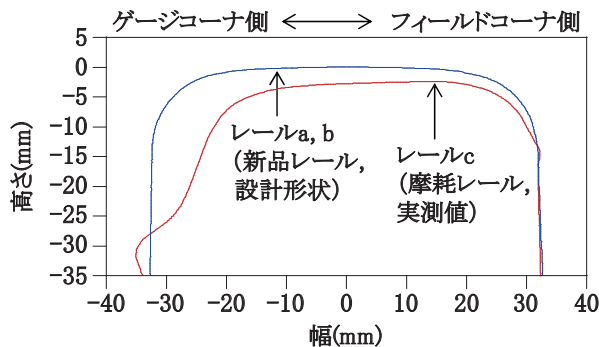


図7 供試レールの断面形状

3.3 接触条件

図8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。試験機は輪重と横圧を負荷できるが、接触面形状に対する荷重影響を明確にするため、輪重および横圧の合力が法線力と同じ方向となるよう調整し、法線力で整理することにした。このとき、左右クリープ力は、無視できるほど小さい。

法線力および左右クリープ力は以下の式により求めた。

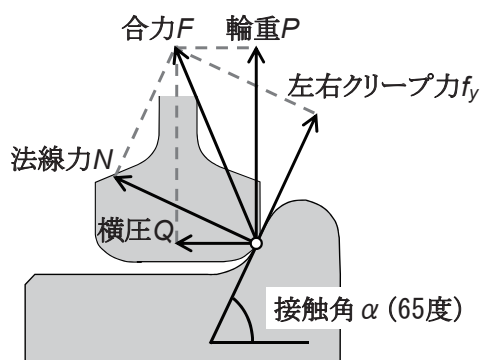


図8 車輪からレールに作用する力

$$N = Q \sin \alpha + P \cos \alpha \quad (3)$$

$$0 \doteq f_y = P \sin \alpha - Q \cos \alpha \quad (4)$$

ここで、 $N$ は法線力、 $f_y$ は左右クリープ力、 $Q$ は横圧、 $P$ は輪重、 $\alpha$ は接触角(フランジ角)で65度一定である。

4. 測定結果

4.1 種々の組合せにおける接触面形状

図9に種々の車輪/レールの組合せにおけるフランジ/ゲージコーナの接触面形状を示す。車輪A/レールa

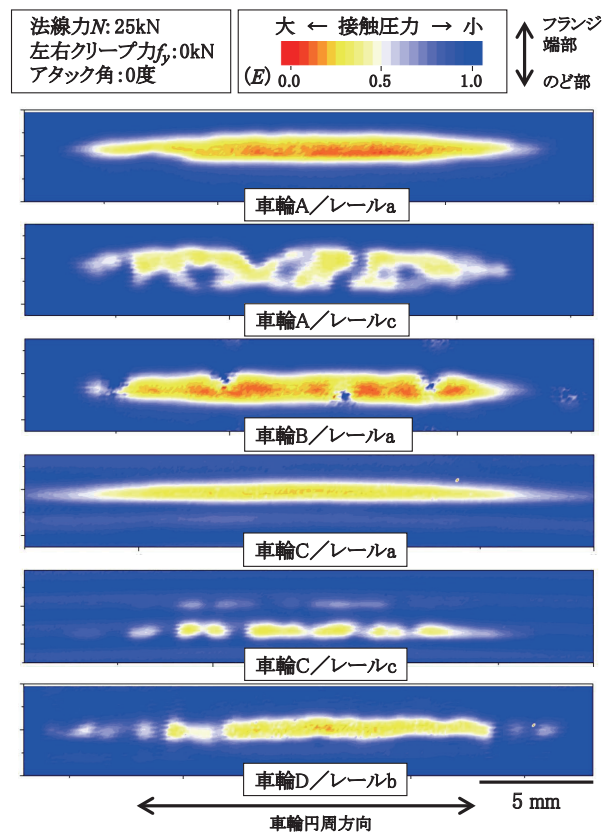


図9 種々の車輪/レールの組合せにおけるフランジ/ゲージコーナの接触面形状

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/c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半径が増大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工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、切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。同条件での別の試番では二山確認されるものもあった。C/cでは、C/aと同様に細長い筋状であるものの、その筋は摩耗レール表面の窪みにより断続的な形状であった。またD/bの組合せでは、車輪切削痕の摩滅にともない、断続的で歪んだ形状であった。

4.2 実測結果と理論計算結果の比較

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（富士フィルム、厚さ：100～120 $\mu$ m、基材：ポリエチレンテレフタレート）を用いた測定結果および計算結果を図10に示す。計算にはカルカーの厳密理論<sup>9)</sup>を用いた。図10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が、これには紙の厚さによる誤差が含まれると考えられる。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。

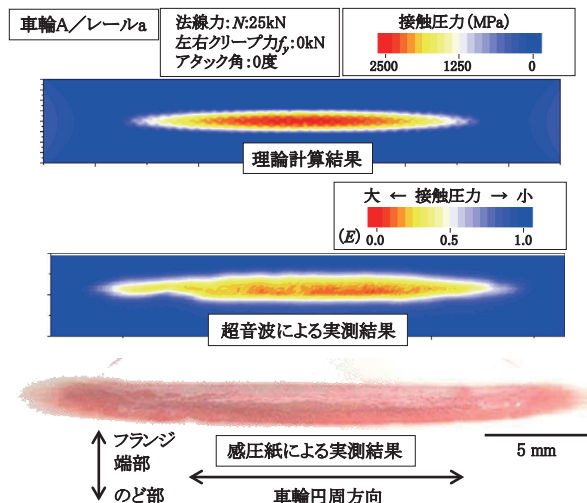


図10 超音波法による測定結果と感圧紙を用いた測定結果および計算結果の比較

5. 接触面積の定量評価

反射波高比Eの分布をもとに接触面積の大きさを定量的に評価するためには、接触部/非接触部の境界を定義

する必要がある。単純に反射波高比Eが低下し始める点を接触の境界とする場合、2.2節に述べたように超音波は0.67mmのスポット径を有しているため、スポット半径分だけ実際よりも接触面積を大きく見積もることになる(図11)。そこで、スポット径の大きさを考慮した接触面積の評価手法を考えた。

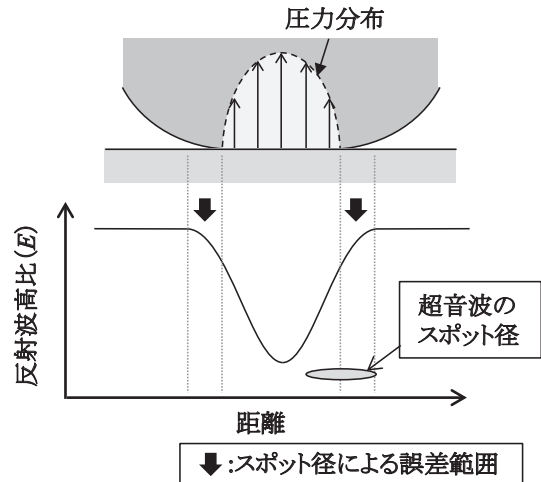


図11 接触面積評価におけるスポット径による誤差の影響

5.1 接触面積の評価手法

はじめに、接触部から大きく離れた明らかな非接触部における反射波高比Eの3 $\sigma$ を算出し、これをバックグラウンド値とする。続いて、バックグラウンド値を下回る領域の内、境界から接触の内部方向に向かったスポット半径分を誤差領域として取り除く。図12に評価手法の一例を概念的に示す。図12ではスポット半径を0.2mm、セル1つの大きさを0.1mm四方としている。水色に示す領域はスポット半径である0.2mm以内であるため誤差領域として切り取り、黄色の領域は接触面積として残す。

実際に算出したバックグラウンド値は0.94であった。スポット半径は0.335mmであるが、測定データの間隔

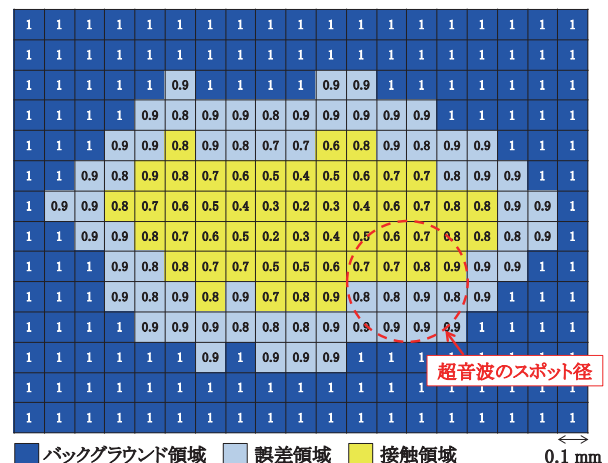


図12 接触面積評価手法の概念図

特集：材料技術

が0.1mm刻みであるため0.3mmとした。ただし、(2)式により算出されるスポット径は反射波強度が半減する(-6dB)までの領域であるため、より厳密にはスポット径がこれよりも大きくなることは注意が必要である。

5.2 法線力と接触面積の関係

図13に車輪A/レールaの組合せの接触面積と法線力の関係について、反射波高比Eの分布から求めた実測結果と、カルカーの厳密理論を用いて算出した理論結果を合わせて示す。法線力Nは5kNから30kNまで徐々に大きくし、このとき接線力 $f_t$ は無視できるほど小さくした。図中の実測値と理論値との間に示す数値は、理論値を100%としたときの実測値と理論値の差の割合である。図13より、測定した全荷重域にわたって、超音波による実測値は理論計算値よりも大きいことが分かる。このことは、接触内部において塑性変形が生じ、その塑性変形域が荷重の増加にともなって広がっていることを示している可能性がある。

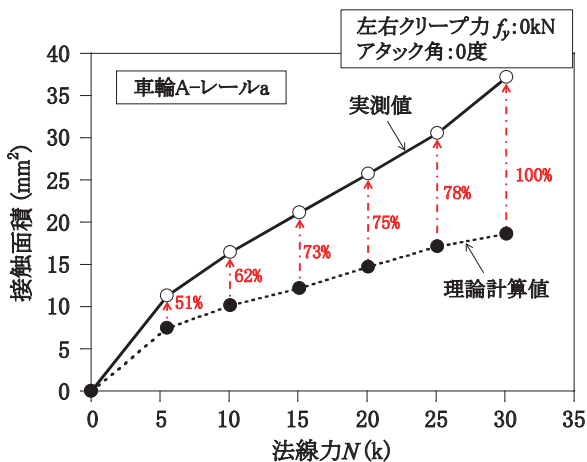


図13 法線力と接触面積の関係

6. まとめ

実物大の車輪/レール接触ユニットに超音波測定システムを付帯させ、車輪フランジ/レールゲージコーナ接触状態の評価を行った。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 切削痕の有無、摩耗の有無など表面状態が異なる種々の車輪/レールの組合せにおいて、接触面形状を測定した結果、それぞれの特徴に応じた接触面形

状が取得でき、その評価手法として有効であることが確認できた。

- (2) 同一の荷重負荷条件において、超音波により測定した接触面積について、感圧紙による測定結果および弾性変形を仮定した理論計算値と比較した結果、超音波による測定結果は、感圧紙の結果よりも小さく、理論計算値よりもやや大きいことが確認できた。
- (3) 接触面積について、超音波による実測値と理論計算値を、超音波のスポット径を考慮してより詳細に比較した結果、測定した全荷重域にわたって、実測値は理論計算値よりも大きいことが、法線力が大きくなるに従いその差が広がることが分かった。

文献

- 1) Ban, T., Kakishima, H., Iida, K., Maebashi, E., Ishida, H. and Ishida, M., "A Study on the coefficient of friction between rail gauge corner and wheel flange focusing on wheel machining", *Proc. of the 14th International Wheelset Congress*, Orlando, U.S.A., October 2004.
- 2) 土井久代, 宮本岳史, 鈴木淳一, 中橋順一, 陳樺, 伴巧: 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
- 3) Pau, M., Aymerich, F. and Ginesu, F., "Distribution of contact pressure in wheel-rail contact area", *Wear*, Vol.253, pp. 265-274, 2002.
- 4) Pau, M., "Ultrasonic waves for effective assessment of wheel-rail contact anomalies", *Proc. of the IMechE Part F, Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol.219, pp. 79-90, 2005.
- 5) Marshall, M. B., Lewis, R., Dwyer-Joyce, R. S., Olofsson, U., and Björklund, S., "Experimental characterization of wheel-rail contact patch evolution", *ASME Journal of Tribology*, Vol.128, pp.493-504, 2006.
- 6) Rovira, A., Roda, A., Marshall, M. B., Brunskill, H., and Lewis, R., "Experimental and numerical modelling of wheel-rail contact and wear", *Wear*, Vol.271, pp.911-924, 2011.
- 7) 水口義久, 吉峯鼎, 小泉堯, 萩原隆徳: 超音波による接触圧力測定 (定量測定法について), 日本機械学会論文集 (A編), Vol.50, No.453, pp.953-958, 1984
- 8) 堤正臣: 超音波の機械計測への応用, 精密機械, Vol.48, No.7, pp. 953-959, 1982
- 9) Kalker, J. J., *Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact*, Kluwer Academic Publishers, 1990.