

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 車輪フランジとレールの接触状態を視る

人間の理解に有用な情報は、大半が視覚から得られると言われていています。これまで直接視ることができなかった状態を可視化することは、予想される現象の視覚による確認が行えるばかりでなく、時にまったく予想しなかった新たな発見へ導いてくれると考えられます。鉄道の車輪とレール、特にフランジとゲージコーナーの接触は、乗り上がり脱線や車輪およびレールの摩耗、騒音などさまざまな問題と密接にかかわっていますが、両者の接触状態の実測については計測の難しさからこれまでほとんど報告がありません。本稿では、この接触状態を可視化するための研究内容を紹介します。



**深貝 晋也**  
Shinya Fukagai  
材料技術研究部  
摩擦材料研究室  
副主任研究員  
【専門分野】車輪/レール境界問題、トライボロジー

## 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持ち、この点で両者は鉄道を構成する基本的な部材であると言えます。そうした中で、車輪フランジはレールゲージコーナー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する機能を果たしています。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（※参照）、車輪およびレールの摩耗および騒音（きしり音）の発生といったさまざまな問題と密接にかかわっています。これらの問題の発生メカニズムをより正確に根源から捉えるためには、現象が生じている接触面の状態を視覚的に捉えることが有効と考えられます。

また、これまでに車輪とレールの接触状態の評価を行うための数値計算モ

デルは数多く提案され、主として車輪とレールの摩耗に関する評価や車両運動シミュレーションなどに応用されてきました。一方で、接触状態の計測については研究報告が希少であり、理論と実験を照合した例はほとんどありません。実現象を把握し、理解することはシミュレーション結果を検証し、その精度を向上させるためにも重要です。

## 車輪とレールの接触面

自動車のゴムタイヤでは、タイヤはたわんでかなり大きい面積で地面と接触しており、乗用車でははがき1枚くらいの大きさといわれています。一方、鉄道車輪とレールの接触面積は指の爪程度と表現されます。ごくわずかな領域ですが、この接触面の形状や大きさがそこに生じる接線力を知る上で不可欠な情報となります。

特に車輪フランジとレールゲージコーナー間の接触面の形状は、車輪踏面とレール頭頂面間と比べて細長の形状となり（図1）、すべりや応力も大きくなることが知られています<sup>1)</sup>。そして、こうした特徴的な接触状態は脱線や摩耗などさまざまな問題の機構に深

### ※ 乗り上がり脱線

車輪フランジがレールに接触したまま脱線するせり上がり脱線のうち、接触点での左右クリープ力が車輪が脱線する方向に作用する脱線形態を乗り上がり脱線と呼びます。

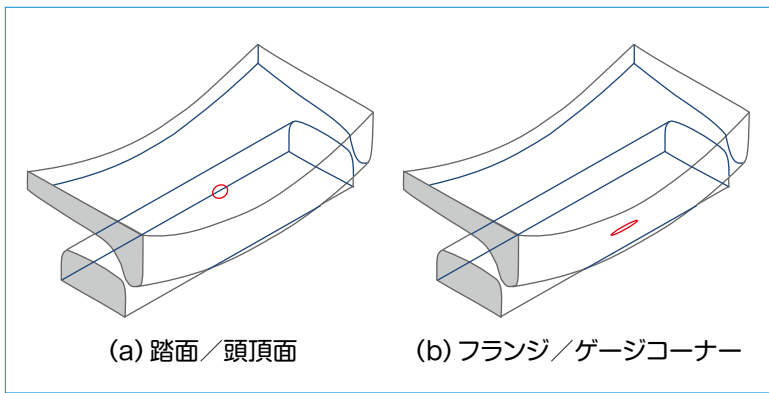


図1 車輪/レール接触面形状のイメージ

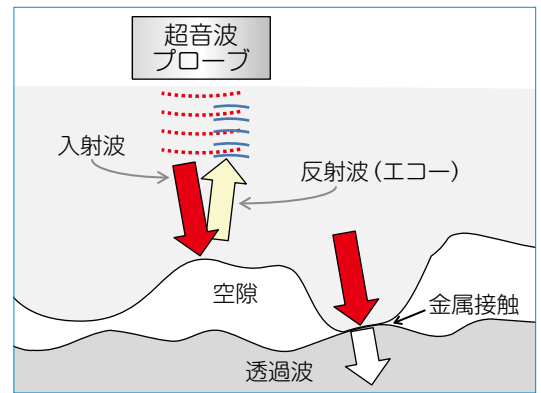


図2 二平面間の接触部

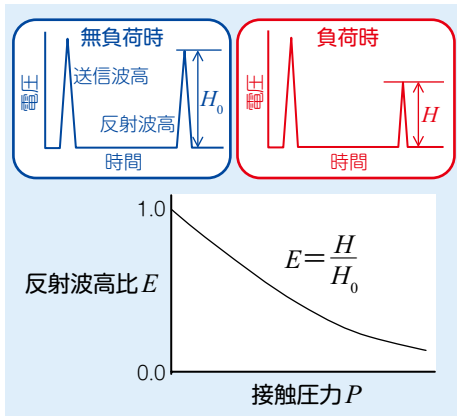


図3 反射波高と反射波高比の定性的な説明

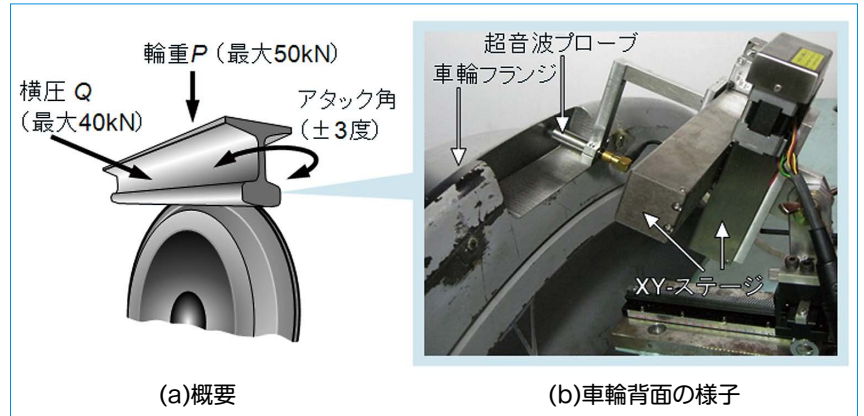


図4 実物大試験機と超音波測定システム

く関連していると考えられます。

車輪とレールの接触状態を測定する方法としては、一般的には薄膜による転写を利用する方法などが採られていますが、この場合は間に別の物質が存在することで接触状態が変化します。一方でその状態を損なうことなく直接測定できる手法として、超音波を利用する方法があります。そこで、実物の車輪とレールを実車相当の荷重で接触させられる大型試験機に、超音波を利用した接触状態の計測システムを付帯させました。本稿では、この計測システムの概要とそれにより可視化した、車輪フランジとレールゲージコーナー間の接触状態について紹介します。

### 超音波を用いた測定法の原理

金属表面はどんなに高精度に仕上げられていたとしても粗さという凹凸が存在します。そのため、清浄な二つの

固体金属平面が接触している場合、接触部は図2に示すように、金属接触部分と空隙部分に分けて考えることができます。そして、この二つの金属が同質（音響インピーダンスが等しい）の場合、金属接触部では音波が透過しますが、空隙部ではほとんどが反射します。

ところで、図2に示した金属接触部分の面積、すなわち真実接触面積(※参照)は接触面に作用する垂直荷重と正の相関があることが知られています。このことは、垂直荷重の増加にともない音波の透過部分が増え、反射部分が減ることを意味します。これが超音波による接触状態評価法の原理です。具体

的には接触界面からの反射波について、無負荷時の反射波高 $H_0$ と負荷時の反射波高 $H$ の比を反射波高比 $E$ とすると、反射波高比と接触圧力の間には負の相関が生じるため、接触部周辺の反射波高比の分布を調べることにより、接触面の形状や接触面内の圧力分布などを評価することが可能になります(図3)<sup>2)</sup>。

### 実物大試験機と超音波測定システム

図4(a)に、本研究で用いた車輪とレールを接触させる試験機を示します。これは、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試験機です。また、アタック角を最大3度まで設定することができます。図4(b)に示すように超音波はこの試

#### ※ 真実接触面積

物体の表面粗さのスケールにおいて、物体表面突起部の弾性変形や塑性変形により形成される接触面積の総和を真実接触面積と呼びます。

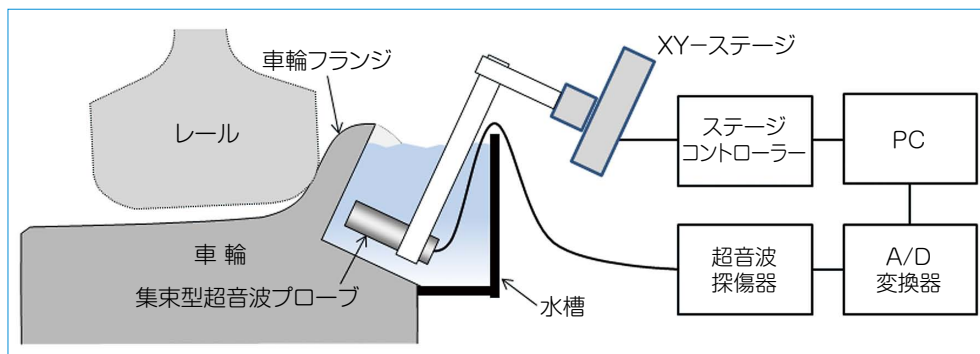


図5 超音波測定システムの概要

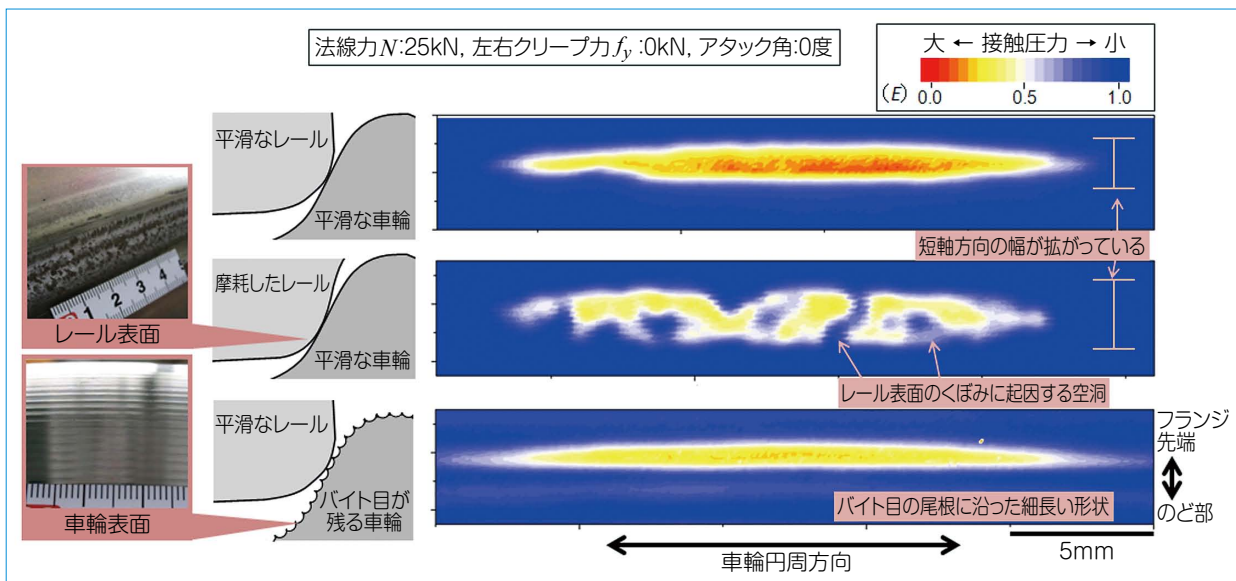


図6 種々の組み合わせにおける接触面形状

験機の車輪側から照射する構造としており、超音波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ています。

図5に超音波測定システムの概要を示します。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ます。焦点型の超音波プローブを車輪フランジ面に対して平行に走査することにより、二次元的な接触面の情報が取得できます。

### 種々の組み合わせにおける接触面形状

平滑な新品形状の車輪、車輪転削(☞参照)にともなうバイト目が残る車輪、

摩耗したレールなどさまざまな種類の車輪とレールを組み合わせで測定した接触面形状を図6に示します。これらの接触面形状を良く見比べると、たとえば新品同士の車輪／レールの組み合わせよりも、レールが摩耗した場合には接触だ円の短軸方向の幅が広がり、長軸方向の幅が狭まっていることがわかります。これは摩耗にともなって、レールゲージコーナー部の曲率半径が大きくなったためと考えられます。また摩

#### ☞ 車輪転削

フランジ摩耗、踏面のフラットなどにより形状が変化した車輪を初期の踏面形状に戻すため、定期的にバイトで削正することを車輪転削と呼びます。

耗にともなってレール表面に形成されたくぼみにより、接触面にも空洞が生じていることが確認できます。一方、バイト目が残る車輪の接触面形状では、反対に短軸方向の幅が狭まり、長軸方向の幅が広がっていることがわかります。これはレールが車輪のバイト目の尾根に沿って接触しているためであると考えられます。

このように、本測定手法を用いることで、車輪およびレールのそれぞれの表面状態や摩耗形状に応じた特徴的な接触面形状を捉えることができました。実際の車輪やレールには表面に微細な凹凸や傷が存在し、また強度などの物性値も一様ではなく、そうしたさまざまな因子まで考慮して計算を行うこと

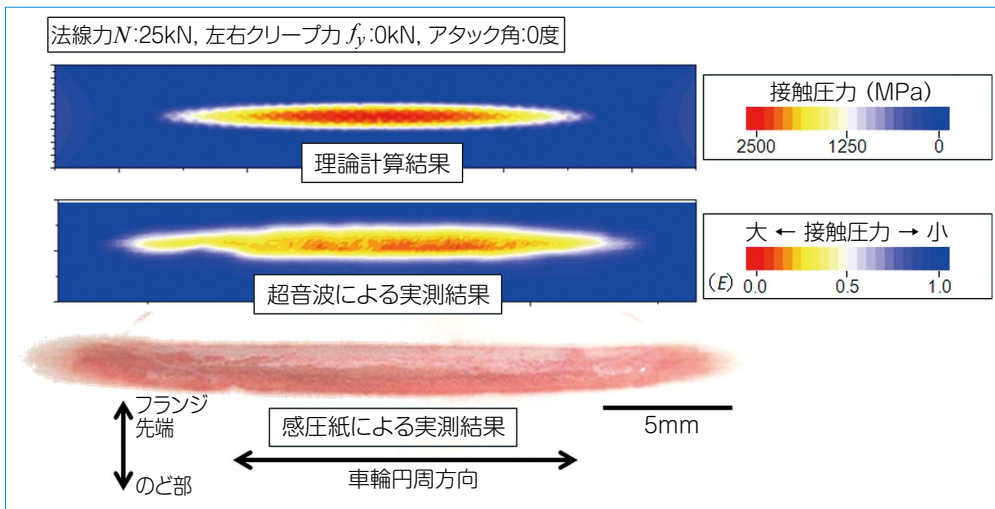


図7 計算結果，超音波および感圧紙による実測結果の比較

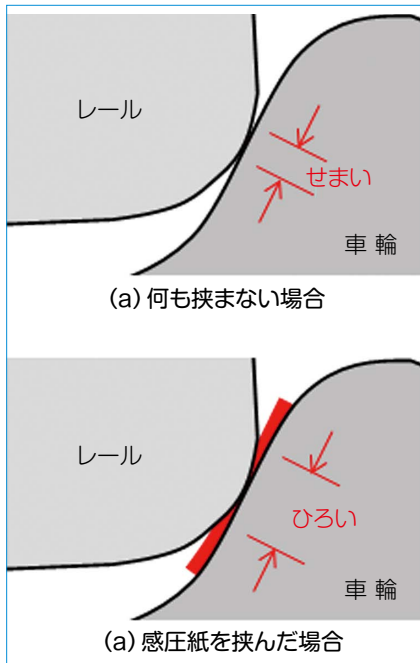


図8 感圧紙の影響

は容易ではありません。こうした点においても実験的に接触状態を測定する意味があると言えます。

### 計算結果や他の手法との比較

超音波により測定した接触面形状を、理論計算による結果および他の手法を用いた実測結果と比較します。ここで、理論計算には弾性変形を仮定した計算法を用い、他の実測手法としては、比較的簡便な接触面の観察ツールとして

普段から使用している感圧紙を用いました。図7に比較結果を示します。まず、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ります。これは図8に示すように、間に挟まれる感圧紙が車輪およびレールよりも格段に軟らかいため、何も挟まないときに比べて接触面積が大きくなるためであると考えられます。一方、超音波による実測結果と計算結果は比較的良く一致しているものの、前者の方がやや大きいことがわかりました。

ここで注意すべき点として、本測定法には実験上、空間分解能の限界があります。このことは接触圧力の分布や接触と非接触の境界を不明瞭にし、接触面形状を実際よりも大きく表わす要因となります。

しかしながら一方で、理論計算と実測の違いとして、計算に使用する物性値やその分布などが、実物とは厳密には異なる点が考えられます。また、計算では考慮されていない塑性変形が実際には生じている可能性も考えられます。図7における理論計算値が示すように接触面の内部では、最大で数GPa程度の高圧力が生じていると考えられます。理論計算では弾性変形を仮定しているため、高圧力下で実際に生じて

いると考えられる塑性変形により、今回測定した接触面積が大きくなっている可能性も考えられます。

どちらの結果がより正しいかといった判断は非常に難しいですが、実測というツールを用意し、別の角度から現象を見ることにより、その理解に有用な情報を提供できると考えられます。

### おわりに

車輪フランジとレールの接触状態における可視化手法とその測定例について紹介しました。ここまで示してきたものは、車輪とレールが静的に接触したときの接触状態を可視化した結果です。現象が生じた瞬間を視覚的に捉えることができれば、接触部での生じる摩擦機構をより深く理解することができると考えられます。今後は車輪が回転する接触状態の動的測定を視野に入れ、現象理解の深度化に努めていきたいと考えています。[RRR]

### 文献

- 1) 木川武彦：車輪フランジの接触と摩耗，潤滑，Vol.28, No.10, pp.721-726, 1983
- 2) 堤正臣：超音波の機械計測への応用，精密機械，Vol.48, No.7, pp.953-958, 1982