

# 鉄道の固有現象を解明する

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道



鉄道は、移動する車両と軌道などの地上に固定された設備で構成される独特の輸送システムです。この特徴に起因して、車輪・レール接触のようなほかの交通機関には見られない鉄道固有の現象が存在します。これらの現象は安全性、高速性、快適性、経済性、環境調和性という諸特性に支配的な影響を及ぼすため、鉄道固有現象を解明して、予測、設計、開発などの応用技術につなげることは鉄道における根幹的な課題です。このような認識の下、鉄道総研では鉄道固有現象の解明を基礎研究の重要な柱と位置付け、積極的に推進しています。

## 現象解明の意義

工学的な意味での現象解明とは、少し硬い表現をすれば、「自然科学の体系的な知識を用いて、生起している現象を、因果律（原因と結果の関係）に基づき曖昧さのない形で明確に説明すること」といえるでしょう。現象の発生機構がわかれば、原因を変化させることで、現象を制御できます。また、発生機構を自然科学の法則を用いて数学モデルとして記述することで現象の予測が可能となり、モノの設計や、好ましくない影響を抑制する対策を事前に検討できるようになります。

もちろん現象の完全な解明ができなければ、モノづくりが不可能ということはありません。古来、伝統的に用いられてきた「経験的手法」、すなわち、過去から蓄積された経験にもとづく知識を活用したり、新たに試行錯誤を行って経験的知識を増やすという有力な方法があるからです。経験的手法といっても、設計者、技術者、職人などの個人のセンスや直感に頼る「暗黙知」の方法と、過去に蓄積された観測・実験データから統計的に導かれた経験式（実験式）などの形で整理して、誰でも利用可能とする「形式知」の方法とがありますが、工学の立場では後者の方法が基本です。ただし、近年急速

に進歩している機械学習技術は前者の暗黙知の領域にも踏み込もうとするものであり、今後は工学における経験的手法の有り様も大きく変わっていくかもしれません。

鉄道技術の各分野には、設計などで使われる多くの経験式が存在します。大量の観測・実験データに裏付けられ、長期間に渡り使われてきた実績のあるこれらの経験式は、予測評価のための実用的手段としての確固とした地位を築いています。しかし、経験式の有効性は元の観測データが得られた条件の範囲内でしか保証されていないという点には注意が必要です。経験式は中の仕組みが見えない一種のブラックボックス

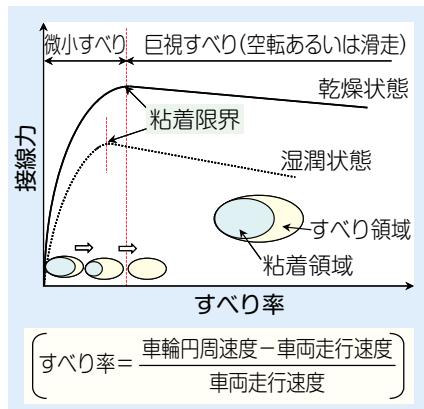


図1 車輪とレールの接触面内のすべり状態と接線力の関係

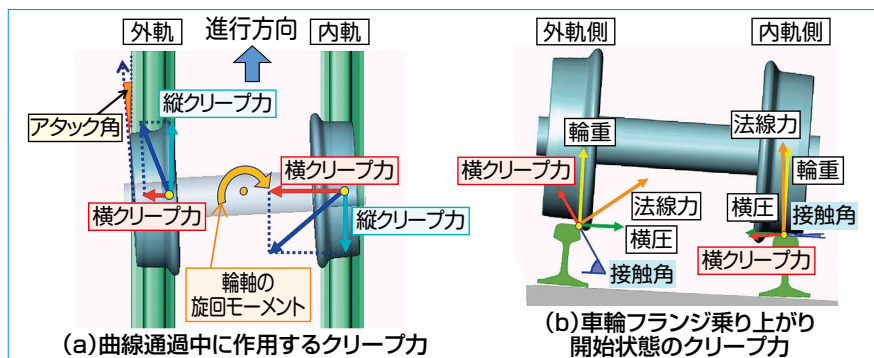


図2 輪軸に作用するクリープ力(微小すべり領域の接線力)

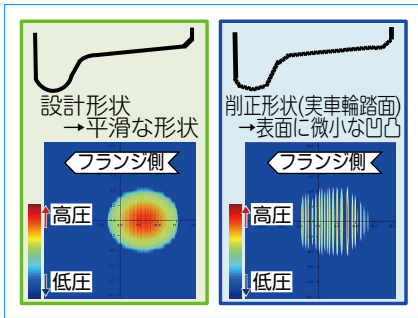


図3 車輪踏面とレール頭頂面間の接触面形状に関する数値解析結果

であるため、元のデータの範囲を外れたときの振る舞いは基本的に予測が困難だからです。これに対し、はじめに述べたような発生機構を科学法則で表現した数学モデルは、仕組みが明らかなホワイトボックスであり、観測データの有無とは関わりなく、適用条件は明確です。このように考えてくると、従来の経験の範囲を超えて技術革新を成し遂げようとするならば、現象解明によってブラックボックスを解消することが最も近道だといえるのではないのでしょうか。

### 車輪・レールの接触現象

一般的な鉄道の最大の特徴は、鉄のレールの上を鉄の車輪が取り付けられた車両が走る点にあります。したがって、鉄の車輪と鉄のレールの間での接触現象は、鉄道の代表的な固有現象といえます。また、この現象は車両の支持、案内、加減速、操舵のすべてに支配的に関わっているという意味で、鉄道の基本問題ということもできます。車輪・レール接触は、機械部品の転がり軸受や自動車のタイヤ・道路面間で起こる現象と同様に、「転がり接触」に分類されますが、スケール、材質、接触部周囲の環境など、さまざまな点で大きく異なります。

鉄道の車輪とレールは硬い鉄でできていますが、力学的な意味での剛体ではありません。したがって、両者の接触部はわずかですが変形し、数学的な

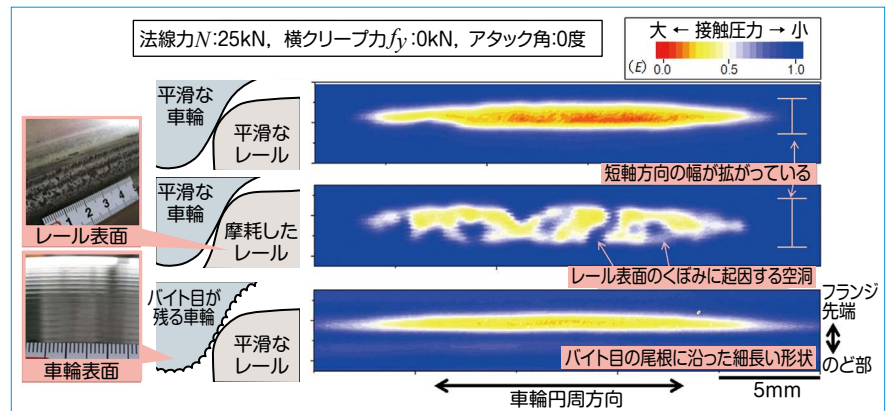


図4 実物大試験機におけるフランジ・レールゲージコーナー接触面の可視化結果

「点」や「線」ではなく、面状になります。ただし、自動車のタイヤの場合とは異なり、接触面は非常に小さく、その面積は数 $\text{cm}^2$ 程度しかありません。数十トンの車両1両を8車輪合計で名刺半分にも満たない面積だけで、支え、走らせ、曲がらせているわけです。また、このような変形があるため、車輪は一見全くすべらずに転がっているように見えていても、接触面内ではわずかにすべる領域が存在していて、そこでは摩擦現象が起きています。粘着・すべり状態と接触面に作用する接線方向の力（「接線力」）の関係を概念的に示すと図1のようになります<sup>1)</sup>が、この曲線で示される関係は、他の摩擦現象と同様、接触部における車輪とレールの表面の粗さ、水などの介在物の条件によって大きく変わります。

車輪・レール接触面の状態、具体的には位置・方向・大きさ・形、面内の粘着・すべり領域と応力の分布から、接触面全体でどれだけの大きさの力がどの向きに作用しているのかが決まります。そして、この接触力が巨視的スケールの挙動である車両の運動に大きく影響します。図2は、乗り上がり脱線開始時における接触面の「法線力」・「クリープ力」と輪重、横圧、接触面の位置・角度の関係を示したものです<sup>2)</sup>（ここで「法線力」は接触力の接触面法線方向成分のこと、「クリープ力」は図1の微小すべり領域におけ

る「接線力」のこと）。乗り上がり脱線開始時には、外軌側はフランジとレールゲージコーナー接触、内軌側は踏面とレール頭頂面接触と両者の接触位置が異なり、接触力が車輪とレールに対して作用する方向が内外軌で大きく異なっていることがわかります。

車輪・レール接触面の力学的な特性に関しては、カルカーによって完成された有名な理論があり、車両運動などの検討で広く使われています。しかし、弾性体や定常性などの種々の仮定に基づいており、実際の鉄道で起こっている現象をどこまで忠実に再現できているかについては必ずしも明らかではありません。その最大の原因は、実際の鉄道車両が走行する際の接触面の詳細な状態を直接測定することが非常に困難な点にあります。しかし、近年のさまざまな実験上の工夫や測定技術の進歩、そして数値解析技術の進展によって、徐々にではありますがこのような困難も克服されつつあります。以下に、総研における近年の取り組み事例を紹介します。

### ・車輪・レール間の接触面形状と接線力特性に関する数値解析<sup>3)</sup>

3次元弾性論の数値解析とカルカーの理論を用いて、接触面の形状とクリープ力の特性を評価しました(図3)。理論解析のみでは正確な取り扱いが困難な、踏面が摩耗した車輪や削正直後の車輪の計算が可能です。

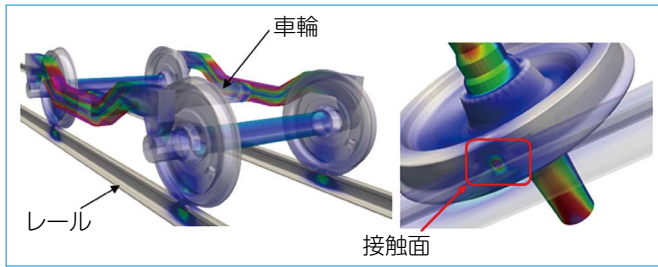


図5 車輪・レールの動的転がり接触の数値解析

表1 車輪・レール接触現象と関係する近年の鉄道総研での研究事例(本文中で紹介した事例を除く)

種々の条件下の車輪・レール間接線力特性の評価 (2009.2)
湿潤時の粘着力に及ぼす表面粗さと温度の影響調査 (2014.12)
走行試験における車輪とレールの接触位置の特定 (2018.6)
分岐器通過時の車輪・トンダレール接触の解析 (2013.5)
巨視すべり領域を活用する滑走制御手法 (2016.11)
踏面ブレーキ車輪の踏面凹摩耗の解明 (2017.8)
レール継目部で発生する衝撃音の振動音響特性の評価 (2016.7)
曲線区間で発生する高周波音の音源解明 (2015.5)
レール転がり疲労層の塑性変形の評価 (2014.6)
レール白色層の発生要因の検討 (2009.10)
レール波状摩耗発生状況の把握 (2015.8)
車両運動解析に基づくレール摩耗の予測 (2017.12)
車輪・レール間の介在物質の分析 (2012.12)
車輪・レール接触による軌道短絡抵抗の推定 (2014.4)

( )内は関連論文を掲載した鉄道総研報告の発行年月

### ・車輪フランジとレールゲージコーナーの接触状態の可視化<sup>4)</sup>

実物大の車輪・レール接触試験機で、超音波を用いた測定手法を用いて、車輪フランジとレールゲージコーナーの静的な接触状態を可視化しました(図4)。接触有無の判定だけでなく、接触圧力(法線方向応力成分)の大きさを定量化することも可能です。

### ・車輪・レール間の動的転がり接触の大規模数値解析<sup>5)</sup>

最小でmmオーダーのサイズのメッシュを用いた大規模有限要素法を用いて、接触面内の応力分布などのマイクロな状態から2軸4輪の1台車レベルのマクロな挙動までを統一的に計算することが可能になりました(東京大学奥田教授らとの共同研究, 図5)。理論的手法では取り扱いの困難な塑性変形や高周波変動を扱うこともできます。

車輪・レール接触現象は、接触力を通して車両の挙動に影響するだけでなく、車輪とレールの摩耗や疲労、車輪・

レール間での騒音発生などにも直接関係します。さらに、接触面は軌道回路の電流や電気鉄道の帰線電流の通過点ともなっており、何らかの原因で電気が流れにくくなると保安上の問題などを引き起こします。このように車輪・レールの接触状態は鉄道のさまざまな問題に密接に関わっており、関連する多くの研究課題があります(表1)。

### 架線・パンタグラフの接触現象

架線・パンタグラフ接触現象は、電気鉄道における代表的な固有現象です。架線のトロリー線とパンタグラフのすり板は互いにすべりながら、その接触部を介して電気を通します。「通電下でのすべり接触」という点では、直流モーターの整流子とブラシの接触などとも共通する現象ですが、機器内部での接触と異なり、架線・パンタグラフの接触部は、走行中、常時振動状態にあり、しかも走行風や自然の風雨にさらされるという厳しい環境に置かれて

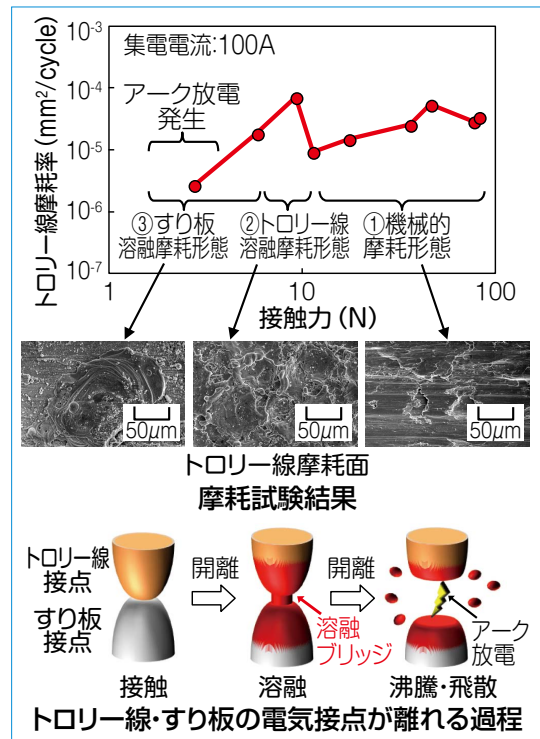


図6 トロリー線とすり板の電氣的摩耗の現象解明

いる点が特徴的です。

架線・パンタグラフ接触現象に関わる重要な課題は、トロリー線とすり板の摩耗対策です。一般に、すべり接触にともなう機械的摩耗は、転がり接触に比べて大きくなりますが、トロリー線とすり板の場合にはこれに離線などによる電氣的摩耗も加わります。基準限度まで摩耗したトロリー線とすり板は交換する必要があります。保守面での大きな負担要因となります。摩耗抑制のためには、摩耗の発生機構を解明することが必要になりますが、摩耗の形態や発生条件はさまざまで、個々に発生機構も異なっていることから、長年の研究課題となってきました。しかし、理論解析の深度化や数値解析・実験技術の進歩により架線・パンタグラフ接触現象の解明は着実に進んできています。

最近の成果としては、集電材料(トロリー線とすり板)の電氣的摩耗の現象解明の深度化<sup>6)</sup>があげられます(図6)。機械的摩耗を制御した環境下で、集電材料の摩耗が再現可能な試験機を製作し、これを用いた試験結果と

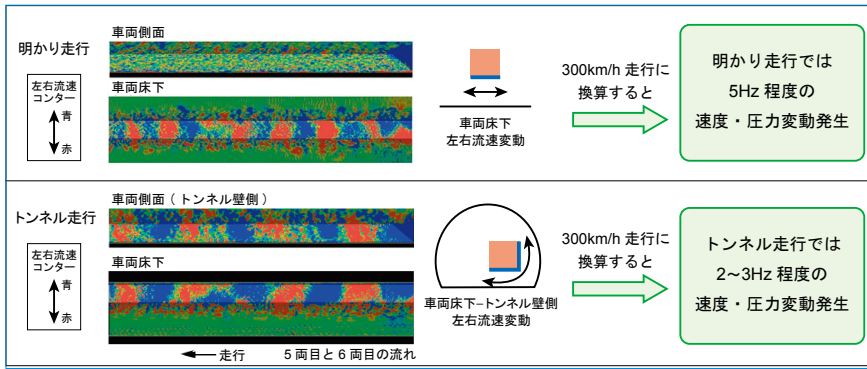


図7 トンネル走行時の中間車両部の空力動揺現象の発生機構

表2 鉄道固有現象の例(車輪・レール接触, 架線・パンタグラフ接触, 列車・トンネル系空力の各現象を除く)

複数のボギー車両が連結された列車の構造に起因する様々な車両の挙動
列車や軌道が長大構造物であることに起因する座屈の現象
列車の繰り返し通過によるバラスト軌道の劣化
地震時の走行車両・軌道・構造物の連成挙動
走行風による雪の舞い上げと車両への着雪・車両からの落雪
高速で相対運動する車両・地上間の情報伝送における電波の伝搬
高速車両のパンタグラフで発生する揚力変動と空力騒音
高速列車の駅部通過時に発生する空力現象

別途実施した集電材料の温度上昇に関する数値解析結果を元に、集電材料が摩耗する形態を条件別に分類できることを示しました。

### 列車・トンネル系の空力現象

空気力学的な観点から鉄道を見るといくつかの特徴があげられますが、とくにトンネルという閉鎖空間を走行する交通機関という点で、航空機や船舶などと異なっています。自動車もトンネル内を走行しますが、移動物体である車両の断面積とトンネルの断面積の比率(閉塞率ともよばれます)は、鉄道の方がはるかに大きく、トンネル走行の影響はより顕著です。

列車・トンネル系の空力問題にはさまざまなものがあり、古くは蒸気機関車の煤煙の問題が深刻でしたが、新幹線の時代になってからは、トンネル内の耳ツン現象(トンネル内圧力変動)とトンネル微気圧波の現象が代表的な問題としてよく知られています。しかし、これら以外にもトンネル内高速走行が関係する空力現象があり、その一

つがトンネル内空力動揺などとよばれる現象です。これは、おもに複線トンネル内を高速列車が走行する際に発生し、列車の中間から後尾にかけて車両が横揺れを起こして、乗り心地が悪化する現象です。過去に顕在化したこの問題は、車両振動制御技術の適用などにより現在は解消されていますが、現象解明の点では課題が残っています。そこで、近年進展の著しい乱流数値シミュレーションの技術を利用して、複線トンネル内走行中の車両まわりの詳細な非定常流れ場を調べました<sup>7)</sup>。その結果、車両床下から近接側トンネル壁面にかけての範囲の領域で、列車の中間から後尾に向かって蛇行するような形態の大規模渦流れが存在することがわかり、これが左右方向の空気力の変動を引き起こすという流れのメカニズムを提示しました(図7)。

### おわりに

鉄道固有といえる現象は、ここまで述べてきたもの以外にも、表2に例を示すように数多く存在します。これら

の鉄道固有現象の多くに見られる特徴として、(1)発生機構が複雑で、関係する要因が多い、(2)現象を測定したり、可視化したりすることが困難、(3)相対的に運動するモノとモノの境界で起こる、(4)ミクロスケールとマクロスケールの現象が相互に影響し合う、(5)力学、電磁気学、熱学、化学、材料科学など複数の学問分野が関係するといった点があげられます。また、車両と軌道、車両と電気といったように、鉄道の技術系統間にまたがる問題となる傾向があります。長い歴史のある鉄道の分野で現在も未解明として残されている鉄道固有現象は、このような特徴を持つ難問ばかりです。しかし、鉄道総研には、鉄道技術の各分野の専門家が集まっているという大きな強みがあります。この強みを最大限に活かし、さらに日々進歩する科学技術の最新の成果を積極的に取り入れることで、鉄道固有現象の解明という鉄道の根幹的な課題に着実に取り組んでいきます。

### RRR

### 文献

- 1) 陳樺：走る基本―粘着とは何か―, RRR, Vol.65, No.7, pp.2-5, 2008
- 2) 土井久代：車輪とレール間のクリーブ力, RRR, Vol.65, No.8, pp.6-9, 2008
- 3) 山本大輔：車輪路面の実測形状に基づく車輪/レール接触特性解析, 鉄道総研報告, Vol.25, No.1, pp.27-32, 2011
- 4) 深貝晋也, 伴巧, 牧野一成, 葛田理仁, 陳樺：超音波を用いた車輪フランジ接触状態の評価, 鉄道総研報告, Vol.28, No.2, pp.29-34, 2014
- 5) 林雅江, 高垣昌和, 相川明, 殷峻, 橋本学, 奥田洋司：車輪・レール間の動的転がり接触解析による車輪フラットの接触挙動評価, 第22回計算工学講演会講演論文集, Vol.22, 2017
- 6) 山下主税：通電下における集電材料の摩耗メカニズム, 鉄道総研報告, Vol.31, No.2, pp.35-40, 2017
- 7) 中出孝次, 佐久間豊：トンネル内を走行する鉄道車両周りの流れのLES, 日本流体力学会年会講演論文集, No.149, 2014