

# 鉄道システムの測定技術

鉄道力学研究部  
部長 石田弘明

## 1. はじめに

鉄道では、現場管理・検査，走行試験による機能確認，研究開発のために様々な測定が行われている。これらのうち，本講演では研究開発を目的とした鉄道のダイナミクスに関わる最近の測定技術を紹介する。精度の良い測定は，現象解明や解析モデルの検証に重要かつ必要不可欠なものであり，鉄道総研では解析・評価法とともに測定法の開発を重要な研究開発課題の一つと位置付けている。なお，鉄道のダイナミクスに限っても図1のように多くの測定項目がある。そこで，特に本発表では，架線・パンタグラフ系，車輪・レール系の接触問題を取り上げ，トロリ線の変位，摩耗量とパンタグラフの離線測定，車輪／レール間の摩擦係数と真実接触面積の測定法について報告する。これらのように二つの物体が接触しながら移動し互いに力を及ぼし合う現象やその接触部で起きている現象は，鉄道固有現象の代表的なものであり，鉄道の安全性，快適性，環境との調和，メンテナンスに深く関わっている。そのほかの図1に赤字で示した測定技術については，別に詳しい報告を行う。

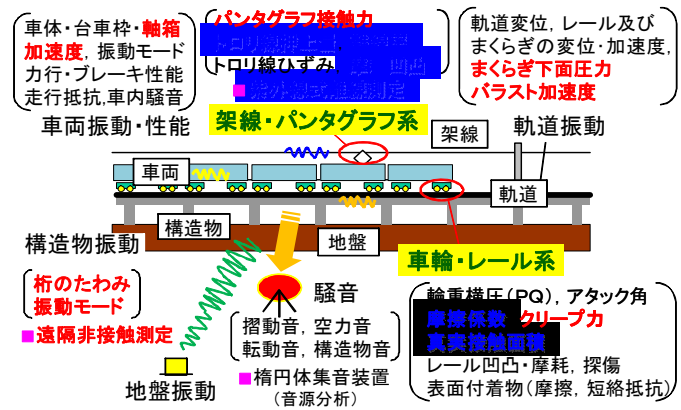


図1 鉄道のダイナミクスと主な測定技術

## 2. 架線・パンタグラフ系の相互作用

架線とパンタグラフの接触集電においては，トロリ線の破断防止は勿論のこと，安定した電力供給のための集電性能向上が重要な課題である。したがって，架線・パンタグラフ系では，トロリ線ひずみ，トロリ線押上量，パンタグラフ接触力，離線率，トロリ線高さや摩耗量や凹凸などが主な測定項目となる。パンタグラフの接触力や離線は，走行中の車上から測定する方法と地上から測定する方法があるが，本稿ではトロリ線の摩耗予測を目的とした地上からの測定法を紹介する。接触力測定については，次の講演 No.2 を参照されたい。

### (1) トロリ線押上量（変位）

パンタグラフはその接触を保つため，すり板を一定の力（静押上力）でトロリ線に押し付けており，この力が作用するトロリ線の一点はパンタグラフにより押し上げられる。このトロリ線の上下変位を押上量（静押上量）という。さらに走行時には，パンタグラフに揚力が生じたり，パンタグラフのしゅう動（すべり摩擦）と移動によりちよう架線やトロリ線に波動が生じるため，トロリ線の動的な上下変位（動押上量）は静押上量より増加する。トロリ線押上量の測定では通常，ワイヤ式の変位計やビデオ撮影による画像処理を用いた測定法を採用しているが，ここでは異方倍率レンズを使った架線撮影の例を紹介する。図2に垂直方向の倍率が水平方向の倍率の80倍の異方倍率レンズを用いて，パンタグラフ通過時の架線を線路外から撮影した例を示す。本撮影例は画面水平方向が45mに対して，垂直方向が300mmとなっており，パンタグラフは縦方向に

引き伸ばされ、線のように写っている。このように垂直方向に拡大して撮影することにより広範囲の架線の振動が視覚的に把握できるため、現象の理解に役立つだけでなく、ハイスピードカメラで撮影した結果を画像解析することによりトロリ線の動的挙動を定量的に測定することも可能となる。精度は、ハイスピードカメラの空間分解能や時間分解能の性能に依存し現状では他の測定法より劣るが、水平方向に連続的に測定した押上量データを使用して空間方向の差分を計算することによりトロリ線のひずみ（曲率）を、パンタグラフ近傍のトロリ線の傾斜などからハンガの軸力や通過するパンタグラフの接触力を各々測定することができる。

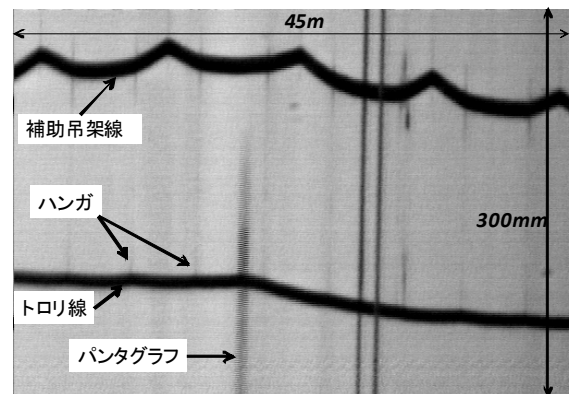


図2 80:1 異方倍率レンズによる撮影画像

### (2) トロリ線凹凸（摩耗残存径）

レーザー変位計の投光部と受光部を左右に設置してレーザー光の帯を作り、トロリ線で影になる部分を測定する（図3）。二組の透過型レーザー変位計を用いてトロリ線に非接触で測定するため、測定車の振動の影響を受け難く、精度良いトロリ線凹凸（摺動面と小弧面それぞれの静高さ）の測定が可能である。なお、センサヘッド部分には、レーザー光の帯の範囲からトロリ線が外れないよう、トロリ線高さに合わせて上下に移動する機構が取り付けられている。

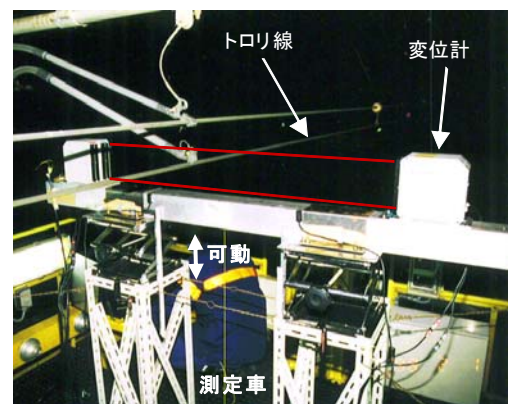
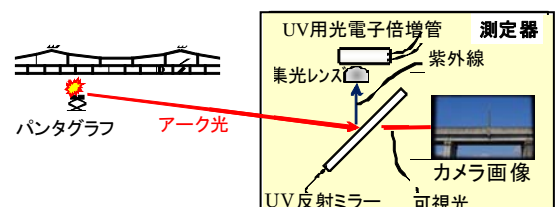


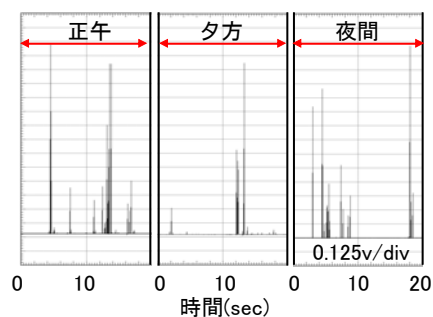
図3 トロリ線凹凸測定器

### (3) 地上からの離線測定

離線は通常、車上からパンタグラフの電圧、電流やアーク光を基に測定しているが、本稿では、線路外から容易に様々な列車の測定ができる地上からの離線測定法を紹介する。従来は可視光式の離線測定器を使用してきたが、太陽光のない夜間にはしか測定を行うことができないという問題点があったため、最近、紫外線検出式の実用的な地上離線測定装置を開発した（図4(a)）。この装置は、アーク光のうち特定の波長の紫外線をUV反射ミラーで反射し、受光素子（光電子増倍管）に入射して電圧に変換するものである。紫外線以外の波長の光はUV反射ミラーを透過してカメラに入射するため、画角の確認も同時に行うことができる。図4(b)に示すとおり、この装置を用いれば、日中でも精度良く離線を測定することが可能となる。



(a) 測定装置の概念図



(b) 測定結果例

図4 紫外線検出式地上離線測定装置

## 3. 車輪・レール系の相互作用（転がり接触）

鉄道は車輪がレール上を転がるという現象から成り立っている。空転・滑走、脱線、蛇行動や

軌道破壊など車両・軌道のダイナミクスに限らず、構造物や地盤の振動もまた、その源は車輪とレールの転がり接触にある。しかし、高速で移動する接触部の様子を観察したり、接触部に働く力を直接測定することは一般に非常に難しい。ここでは、転がり接触に起因した車輪・レールに働く力や接触状態の測定法について述べ、これまで取り組んできた現象解明の一端を紹介する。

### (1) 輪重・横圧測定

車両が走行した際に車輪とレールの間に働く輪重・横圧は、車輪板部のひずみから求める方法やレールのウェブとフランジのひずみから求める方法が採用されてきたり。いずれも箔ひずみゲージを貼付してブリッジ回路を組み、測定したひずみに、予め検定した荷重とひずみの関係を適用して力に換算する。車輪で輪重・横圧を測定する方法には、間欠法、連続法のほか、車輪周上の接触位置に応じた演算処理を行うことで輪重・横圧の連続値を得る新連続法<sup>2)</sup>と呼ばれるものなどがある。

### (2) 輪軸のアタック角測定

曲線軌道を通過するときや輪軸が蛇行したときに、車輪とレールはアタック角と呼ばれる相対ヨー角を持つ。このアタック角を車上から測定する方法として、鉄道総研では、画像処理を利用した手法<sup>3)</sup>を開発し、構内脱線走行試験の際に使用した。この測定では、まず2台のCCDカメラを台車枠の測定車輪を挟む前後の位置に取り付け、レールを垂直に見下ろして撮影した画像からレール・台車枠の相対ヨー角を求める。さらに台車枠・軸箱の相対ヨー角を前後変位から算出して、二つの相対ヨー角の和を取ることでアタック角を算出する。また、JR東海でも画像処理によるレール・台車枠の相対ヨー角、台車枠・軸箱の相対ヨー角、ジャイロセンサによるヨー角速度と走行速度から求めた曲線半径を用いてアタック角を算出する装置が開発され、営業線で実測した貴重なデータが報告されている<sup>4)</sup>。

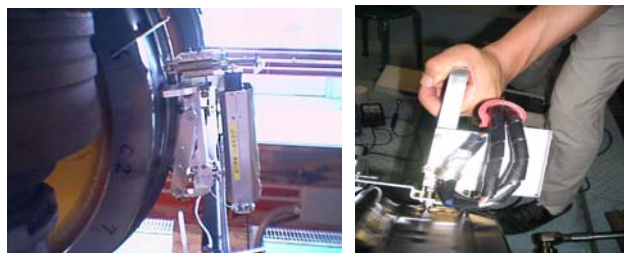
### (3) 車輪／レール摩擦係数測定

車輪とレールの接触部における摩擦係数を直接測ることは困難であるため、車輪、レールそれぞれの表面の摩擦係数を専用の装置で測定し、表面の粗さや付着物、温度・湿度などが摩擦係数に及ぼす影響を調べている。レールについては、レール表面摩擦係数測定器（レールトリボメータ）が開発されており、現在、さらに電気抵抗測定機能等も付加したレール表面摩擦係数測定評価システム（トライボエース：図5）が実用化されている。これらの装置では、直径 $\phi 20\text{mm}$ の鋼製ベアリング球2個を下面に固定したウェイトをレール頭頂面上に載せ、このウェイトをレール長手方向に引っ張ったときの引張力をロードセルで測定して摩擦係数を算出する。ウェイトの質量は、最大接触圧が実車の車輪とレールと同じになるように調整されている。車輪については、レールトリボメータのようにウェイトを車輪周に沿って滑らせ摩擦係数を求めるのが困難なこと、車輪フランジや踏面及びフランジの横方向（車軸方向）の摩擦係数も測定したいことなどから、鉄道総研は新たに車輪・レール摩擦係数測定装置（ $\mu$ テスト：図6）を開発した。現在、現場で簡易に測定できるよう操作性を向上した $\mu$ テストライトも使用している。これらの装置は、直径 $\phi 20\text{mm}$ の鋼製ローラを一定荷重で被測定面に押し付け、車輪軸に巻き付けたワイヤを引っ張って車輪を回転させたときの回転トルク（ワイヤ引



図5 レール表面摩擦係数測定評価システム(トライボエース)

張力)を測定し、摩擦係数を算出するものである(図7)。ローラの自重キャンセル機構を組み込み、プーリ等の回転摩擦抵抗を演算時に除去することで、様々な姿勢で測定しても精度の良い値が得られるように工夫が施されている。



(a) μ テスタ (b) μ テスタライト

図6 車輪・レール摩擦係数測定装置 (μ テスタ, μ テスタライト)の本体

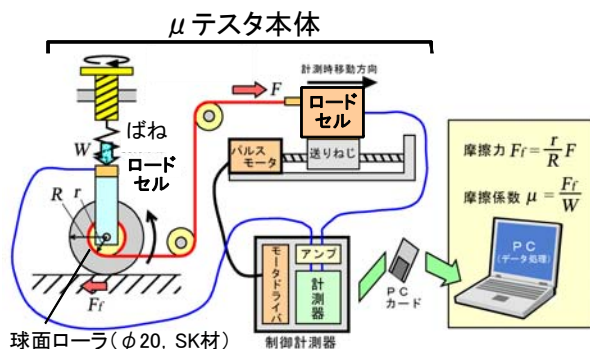


図7 車輪・レール摩擦係数測定装置の構成

#### (4) 車輪／レール真実接触面積測定

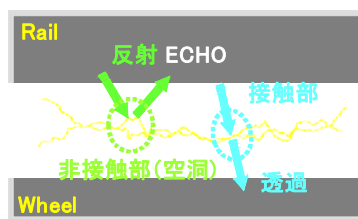
車輪とレールの表面には、図8に示すような微細な凹凸(粗さ突起)がある。雨天時など両者の接触面に水が介在する場合等には、金属同士が接触している部分と水が介在している部分の割合によって、車輪とレール間に働く接線力の大きさが変化すると考えられる。接触面において粗さ突起が接触する面積の合計を真実接触面積という。鉄道総研では、まだ実験室レベルではあるが、イタリアのカリアリ大学と共同で超音波による真実接触面積測定法の開発を進めている。これは接触面内に空洞があると超音波が反射することを利用し(図9(a))、超音波探触子を接触面に沿って移動させてエコーの反射強度から真実接触面積の割合を求め



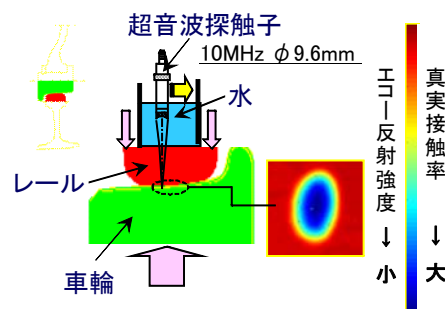
図8 接触面の荷重分担(水潤滑)

#### 4. おわりに

接触に関わる現象を中心に主として鉄道総研が最近開発した測定法の一部を紹介した。センサや計測技術の発達が、かつて困難であった測定を可能にして



(a) 測定原理



(b) 測定装置と測定結果例

図9 超音波による真実接触面積測定

きている。例えば、走行中の車輪とレールの接触位置など、今でも把握できていない情報の測定法が開発されれば、鉄道固有現象の理解や評価精度がさらに向上すると期待される。

#### 【文献】

- 1) 運輸省監修, 鉄道総研編: 在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説, 研友社, 1993
- 2) 石田弘明, 松尾雅樹, 手塚和彦, 植木健司: 鉄道車両の新しい輪重, 横圧, 脱線係数連続測定法(測定装置の開発), 機論 C, Vol.63, No.614, pp.97-103, 1997
- 3) 宮本岳史, 池田宏樹, 古川敦, 土井久代, 石田弘明: 曲線通過中の輪軸アタック角測定, 鉄道技術連合シンポジウム J-Rail2002 講演論文集, pp.97-100, 2002
- 4) 上林賢治郎, 臼井俊一, 坂上啓, 新村浩, 岡田信之: 画像処理を用いた輪軸アタック角測定法, 鉄道技術連合シンポジウム J-Rail2001 講演論文集, pp.633-636, 2001