

鉄道固有現象解明のための新しい測定技術

鈴木 康文*

New Measuring Methods for Phenomena Peculiar to the Railway System

Yasufumi SUZUKI

Phenomena caused by elements such as wheel/rail and pantograph/contact-wire, consisting of the railway system reacting each other while train running at a high speed, dynamic response of components around the contact points and phenomena occur at the contact areas are typical and peculiar to the railway system. It is essential to understand these phenomena to investigate the fundamental functions of the railway system such as safety and environmental features. However, in general, it is difficult to observe directly the reactive forces at the contact points. In this paper, we have described the outline of the new measuring methods as recently developed by Railway Technical Research Institute and various problems to be solved for the measuring methods.

キーワード：鉄道固有現象，現象解明，測定技術，車輪／レール，パンタグラフ／トロリ線

1. はじめに

レールと車輪，パンタグラフとトロリ線といった鉄道を構成する要素が互いに接触し移動しながら力を及ぼし合う現象，その力を受けて周辺の要素が動的に応答する現象，また接触部で起きている現象そのものは鉄道固有現象の代表的なものであり，それらを把握することは鉄道の安全，環境など基本特性を検討するうえで重要である。しかしながら，高速で移動する接触部に働く力を直接測定し，接触の様子を観察することは一般には非常に難しい。これまで，接触部周辺の変位やひずみなどの情報から接触部分に作用する力を推定する手法を考案し，現象解明に供してきた。近年のセンサなど計測技術の進展や情報処理技術の向上により，かつては困難であった部分の測定や手法が可能となってきたものもある。

ここでは，主として鉄道総研が最近開発等を行ってきた，車輪／レール，パンタグラフ／トロリ線の接触といった鉄道固有の現象に関わる新しい測定法，あるいは測定法の改善に関する概略，今後の課題等を紹介する。

2. 車輪／レール接触に関わる事象の計測

2.1 輪重・横圧測定

2.1.1 車輪による輪重・横圧測定

車両側から輪重・横圧を測定する方法としては，車輪の板部にひずみゲージを貼付する方法¹⁾がわが国では一般に採用されている。車輪1回転に2回の出力が得られ

る間欠法と連続的に出力が得られる連続法，車輪の全円周上で連続した輪重，横圧出力が得られる新連続法がある。間欠法に比較して感度の低い連続法，新連続法の改善策として，最近開発された極数の多いスリップリングを使用してひずみゲージのブリッジ構成を変更することによりS/N比を上げる方法，エンコーダのパルス数の増加による輪重変動成分の低減法が検討されている。

回転体である車輪にはセンサをつけず，軸ばねあるいは台車枠のひずみにより輪重を，車輪の曲げ変形を台車側に取り付けた非接触変位計で検出することにより横圧を測定する方法²⁾が，(独)交通安全環境研究所等により提案されている。また，前後方向力(接線力)についても軸箱支持リンクのひずみから検出できるとしている。これにより車輪／レールの接触力測定法の耐久性が向上し取扱が容易となるとされている。

2.1.2 レールによる輪重測定

地上側から輪重，横圧を測定する方法としては，レールのウェブで輪重を，レールのフランジで横圧を，それぞれひずみを検出して測定する方法¹⁾が一般に用いられる。レール締結部の中間から100mmずつ離れた断面のせん断ひずみからその地点の荷重を求めるものである。また，ひずみゲージの間隔をまくらぎ間隔近くまで離して貼付し，さらに2箇所ひずみゲージをまくらぎを跨いで貼付し，これらの2つのゲージ組の波形を接続することにより，連続測定を可能とする方法³⁾が(独)交通安全環境研究所等により提案されている。

バラストの動的挙動解析に用いる入力荷重としては，数百Hzの高周波数の輪重変動を考慮する必要がある，このためには，上述の手法では測定が困難と考えられ

* 鉄道力学研究部 部長

特集：鉄道力学

る。そこで、レール頭頂部の衝撃加振試験により加振力とレールの振動加速度との間の伝達関数を求め、列車走行時の同一位置での振動加速度から走行時の高周波輪重変動を推定する手法を検討中である。

2.2 輪軸のアタック角測定

曲線通過中の輪軸のアタック角を車両側から測定する手法としては、テレビカメラを用いて画像処理する方法、車輪からレール上の異なる2点までの水平距離の差を非接触変位計で計測する方法²⁾などが提案されている。鉄道総研では、CCDカメラを用い、画像処理技術を使った比較的簡便な手法⁴⁾を開発した。2台のカメラを前後方向には測定輪軸を中心に対称な位置に、横方向(まくらぎ方向)には外軌レールを垂直に見下ろすことのできる位置に台車枠に取り付ける。アタック角はカメラの取り付け間隔とレール画像の横方向の相対変位差から算出する。ここでは測定対象を曲線区間としており、外軌レールのゲージコーナが常に車輪によって磨かれていることが前提であり、ゲージコーナの光帯を検出することでレールの横方向の相対変位差を検出し、同時に台車枠と輪軸の相対角を測定し、アタック角を算出する。この測定法により、鉄道総研構内での脱線走行試験において輪軸のアタック角測定を行った。

2.3 車輪/レール摩擦係数測定

乗り上がり脱線において、車輪とレール間の摩擦係数は大きな影響を及ぼす。車輪とレールの接触部の摩擦係数を直接測定することは困難であり、車輪、レールそれぞれの表面の摩擦係数を一定の測定装置で計測することになる。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、2000年に起きた旧宮団地下鉄日比谷線脱線事故においても原因調査やその後の実態調査に使用された。また、摩擦係数測定のほか電気抵抗測定機能、滑り速度検出機構などを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)⁵⁾も開発された。車輪に対しては、日比谷線脱線事故後に摩擦係数測定の必要性の認識が高まり測定装置 μ テスタ⁶⁾が開発され、現在では操作性に優れた μ テスタライトが汎用的に使用されている。

2.4 真実接触面積測定

固体同士の接触部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。

真実接触面積を知ることは、車輪とレールの間に水が介在する場合の粘着係数を推定する際に重要となる。湿潤状態での粘着は粗さ突起同士の接触即ち真実接触面積に依存する。弾性流体潤滑理論を用いて粘着係数を推定する際に、現在は、ガウス分布の粗さを仮定し粗さ突起

が接触して支える荷重と水膜が支える荷重を計算するが、そこに計測された真実接触面積を用いることにより、粘着係数の推定精度が向上するものと考えられる。

現在、車輪とレール間の真実接触面積の測定法としては、超音波法⁷⁾を開発しており、静止状態での真実接触面積を求めることは可能となっている。今後、回転状態、更には接線力が作用する状態での測定が課題とされている。また、超音波法よりも精度が高いとされている全反射光法⁸⁾と比較することにより、超音波法の精度の検証を試みている。

2.5 レール表面付着物の分析

車輪とレール間の粘着や短絡現象を検討する際には、そこに介在する物質を明らかにすることが重要となる。特に、錆は湿潤環境下においてレール上に一般的に発生し、それらの現象に大きな影響を与える一つの要素である。多くの場合、分析を要するのは列車の通過がない時間帯に発生した錆であり、また、錆の中には保存により組成が変わってしまうものもあるため、分析は錆が発生している現場で行うことが望ましく、「その場分析」の手法の確立が望まれている。

近年、技術革新により分析装置の小型化が進み、赤外分光法やラマン分光法といった分光分析法をその場で実施できる可能性が拡大してきた。これまでの検討で、ラマン分光法がレール付着物のその場分析法として有望であることが分かってきており⁹⁾、現在、現場での分析法の開発を進めている。

3. 車両/軌道の動的相互作用に関わる事象の計測

3.1 バラスト動的挙動計測

有道床軌道の沈下のメカニズムを検討するためには、まくらぎから荷重を受けたバラストがどのような挙動を示すのかを把握することが重要となる。バラストの中に1軸、あるいは3軸の加速度計を埋め込んだ従来の方式では、バラストが回転してしまうと絶対軸に対する値が不明になることや、回転成分が測定不可などの欠点があった。これに変わって、3軸の加速度計2個をバラストに埋め込み、3方向の並進運動と各軸周りの回転運動を同時測定する「3次元センシングストーン」¹⁰⁾を開発した。センサはピエゾ抵抗型3軸加速度センサでチップ内にプリアンプ、特性のばらつきと温度ドリフトの補正回路を内蔵する、大きさ5mm四方のものである。静止状態での各軸の加速度測定値から重力の向きを求め、絶対軸の加速度値を求めることができる。

このセンシングストーンを用いた測定により、振動減衰が数百Hzの高周波領域で大きいことなどが分かった。

これらの結果は、別途研究を進めているバラストを粒状体として扱った不連続変形法や個別要素法による解析に必要なパラメータの同定の貴重なデータとなる。

3.2 まくらぎ下面圧力計測

バラストへの負荷は、まくらぎ下面の圧力を測定することで直接知ることができる。まくらぎ下面の圧力を測定する手法としては、まくらぎ底面にひずみゲージ式の荷重センサを配置する方法がこれまでに試行されている¹¹⁾。しかし、ひずみゲージ式のセンサは構造上薄く仕上げるのが難しく、センサの厚さ分バラスト厚さが薄くなることや、高周波の測定性能に問題があった。そこで、まくらぎ底面に、耐圧が大きく高周波の動特性に優れた圧電フィルム型荷重センサ（60mm×60mm厚さ4.8mm）を用い、受圧板と合わせて20mm以内に収まるようにし、このセンサユニットを75枚接着した「センシングまくらぎ」¹²⁾を開発している。まくらぎは、配筋構造を改善し、2cm薄型でありながら規格に適合した強度を有し、同じ外形のものとした。これまでの計測で、負荷の増大とともにまくらぎとバラストとの接触点数が増加すること、まくらぎ外縁の方が中央部より接触荷重が大きいことなどが確認されている。

4. パンタグラフ／トロリ線接触に関わる事象の計測

4.1 パンタグラフ接触力測定

4.1.1 パンタグラフによる計測

パンタグラフにおいて接触力を測定する方法として、①接触力の着点をはさんだ舟体の2断面に生じる力（断面力）と慣性力を計測して接触力を求める方法¹³⁾、②接触力変動に対するパンタグラフのインパルス応答関数を予め測定しておき、走行中のパンタグラフの時系列応答とインパルス応答関数との畳み込み積分を行い、接触力を求める方法がある。①の方法は、データ処理が簡便であるうえ、原理が簡潔でノイズの混入に強いという利点があり、一般的に用いられている。断面力測定には、舟体にひずみゲージを貼付しせん断力を計測する方法、舟体を支持するばね力を測定する方法があり、慣性力は複数個の振動加速度計で計測し、舟体の弾性振動の影響を考慮できるようにしている。

この方法では、舟体に働く空気力（揚力）は測定できない。揚力を考慮する必要がある場合には、定常揚力は気流の動圧に比例するので、動圧を測定することにより舟体に作用する定常揚力を推定し、接触力測定値を補正する方法をとっている。

近年、低周波領域において舟体が多く弾性振動モードを有するものが増える傾向にある。この場合、接触力

測定の精度を保つためにはセンサ数を増やす必要があるが、ひずみゲージによる場合には測定点数が多くなり狭い舟体内では配線処理が困難となる。そこで、多点ひずみ計測が可能な光ファイバ（FBG）センサを使用した方法を開発中である。FBGセンサは、光ファイバーのコア部分に屈折率を周期的に変化させた回折格子を形成し、反射、透過光の波長変化からひずみ等を測定するもので、高精度で、多点測定が可能である。

4.1.2 地上からの計測

地上から接触力を計測する方法としては、異方倍率レンズを用いて地上から架線の運動を計測し、パンタグラフ近傍のトロリ線の傾斜から接触力を求める方法が提案されている。この方法は、昼夜を通した常時計測に不向きであるなどの欠点がある。

そこで現在、ハンガ軸力、トロリ線加速度を複数箇所測定し、測定区間両端の張力の鉛直成分やトロリ線の慣性力を求め、これらの力の釣り合いからパンタグラフの接触力を推定する手法¹⁴⁾を開発している。これまでに鉄道総研構内の集電試験装置による試験で本手法の妥当性が検証されている。これにより測定区間を通過する全てのパンタグラフの接触力を測定できる。この接触力測定手法と紫外光式離線測定法、トロリ線凹凸測定手法を組み合わせ、トロリ線の摩耗メカニズムを解明する研究を進めており、また、通過するパンタグラフの異常検知やパンタグラフの定常揚力の測定への応用も検討している。

4.2 パンタグラフ舟体表面の圧力分布、周辺の流れ計測

風洞試験における表面圧力分布の計測には静圧孔による方法が一般的であるが、一度に数十点程度の計測しかできないため、供試体が複雑な形状の場合はその表面圧力分布を詳細に観察することは難しい。新幹線用パンタグラフの揚力、空力音特性には舟体と枠組との結合部で生じる空力干渉が強く影響していることが分かかってきており、このような場合には面分布としての表面圧力分布の計測が必要となる。表面圧力分布の計測に感圧塗料（PSP）による計測法を適用し¹⁵⁾、複雑な圧力場を容易に測定できること、鉄道の速度領域（200km/h～350km/h）でも適用可能であることが確認された。

また、パンタグラフ周りの流れ場の同時多点計測のために粒子イメージ流速計（PIV）¹⁶⁾を使用し、その有効性が確認されている。

4.3 トロリ線凹凸測定

トロリ線の凹凸は、パンタグラフの接触力変動の主な原因の一つであり、これに伴い発生するパンタグラフの異常離線やトロリ線の局部摩耗などをもたらす。トロリ線の凹凸は、パンタグラフ／電車線の動的相互作用を検討する際の基本情報となる。これを連続に測定する方法

特集：鉄道力学

として、保守用車等の作業台に2組の非接触変位計を、トロッコ線を水平に横切るように設置する方法¹⁷⁾がある。2組のセンサ間のトロッコ線傾斜を測定しこれを積分してトロッコ線凹凸を求める方法で、測定車両の上下振動の影響を除去することが可能であるうえ、非接触なので押上等の誤差がないなどの特徴がある。本測定法によるトロッコ線凹凸をもとに接触力変動を求め、電車線架設状態の診断や異常箇所検知等の定量的な評価が可能となっている。今後は、より一般化した装置とすることや、測定速度の向上のためにトロッコ線下方からの測定法を検討する必要がある。

4.4 離線率測定

離線測定の一方式である光学式離線測定は、離線時に発生するアーク光を受光素子で検出するものであるが、昼間は周囲の明るさとアーク光の区別ができず、測定が困難という問題があった。太陽光には含まれず離線アークのみに含まれる波長250nm以下の紫外線に感度を有する受光素子を用いれば、太陽光には反応せず、離線アークのみを検出でき、昼間のアーク光の測定が可能となると期待されている。車上に設置した紫外光式離線測定装置¹⁸⁾でアーク光の検出性能を調査した結果、紫外線センサでも従来の可視光式離線測定装置と同等の検出性能があることが確認された。今後、紫外光式離線測定装置を実車両に搭載して検出性能の確認を行い実用化を目指すこととしている。

5. おわりに

車輪／レール、パンタグラフ／トロッコ線の接触といった典型的な鉄道固有現象の解明に関わる計測技術について、主として鉄道総研が関連している最近の話題、あるいは課題について紹介した。もちろんここで触れたもの以外に鉄道総研の中で行われている関連の計測技術はあり、また国内、さらに海外に目を向ければ様々な計測法がある。

必要とする情報に対応した最適で効果的な計測法は何か。日進月歩の計測技術の進展を常に把握し、改良していくことが必要である。

読者諸兄からのご指導、ご協力をお願いする次第です。

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：在来鉄道運転速度向上マニュアル・解説, pp.67-78, 102-112, 1993
- 2) 松本陽, 佐藤安弘, 大野寛之, 留岡正男, 谷本益久, 陸康思, 佐藤興志：車輪・レール接触に関する各種特性値の測定に関する考察—横圧, 輪重, 接触力, アタック角, 接点点などの実態把握—, 第12回鉄道技術連合シンポジウムJ-Rail2005, pp.359-362, 2005
- 3) レール・車輪接触力学研究会：計測技術とその解析法, 講習会テキスト, pp.29-42, 2006
- 4) 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, 第9回鉄道技術連合シンポジウムJ-Rail2002, pp.97-100, 2002
- 5) 伴巧, 石田誠：レール表面摩擦係数測定評価システムの開発, JREA, Vol.46, No.6, pp.29277-29279, 2003
- 6) 前橋栄一, 飯田浩平, 西山幸夫：車輪およびレールの摩擦係数測定装置 μ テスタの開発, 鉄道総研報告, Vol.20, No.11, pp.23-28, 2006
- 7) 陳樺, 石田誠：車輪／レール間粘着力特性解明へのキーワード-真実接触面積-, 日本鉄道施設協会誌, Vol.43, No.1, pp.26-29, 2005
- 8) 田中智久, 松山聡, 山中力, 桃園聡, 京極啓史, 中原綱光：全反射光を利用した粗さ面すべり接触部の真実接触面積測定, トライボロジー会議予稿集「鳥取」, pp.17-18, 2004
- 9) Yasutomo Sone, Junichi Suzumura, Takumi Ban, Fusayoshi Aoki, Makoto Ishida：An In-situ Spectroscopic Analysis of Rail Surface Contamination, 7th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2006), pp.335-340, 2006
- 10) 相川明, 鷹尾良行, 緒方政照, 名村明, 河野昭子：道床加速速度の三軸測定装置の開発, 第13回鉄道技術連合シンポジウムJ-Rail2006, pp.193-194, 2006
- 11) 名村明, 木幡行宏, 三浦清一：繰返し荷重下におけるまくらぎと道床バラストの相互作用, 第39回地盤工学研究発表会, pp.1071-1072, 2004
- 12) 浦川文寛, 相川明, 名村明：バラスト軌道落錘試験に関する三次元個別要素法解析, 土木学会第62回年次学術講演会講演論文集, IV-267, pp.533-534, 2007
- 13) 池田充, 白田隆之：架線・パンタグラフ間の接触力測定手法の研究, 鉄道総研報告, Vol.14, No.6, pp.7-12, 2000
- 14) 白田隆之, 池田充, 小山達弥, 山下義隆：架線の振動測定によるパンタグラフの接触力推定手法, 鉄道総研報告, Vol.21, No.10, pp.41-46, 2007
- 15) 池田充：感圧塗料によるパンタグラフの表面圧力計測, RRR, Vol.62, No.10, pp.2-5, 2005
- 16) 池田充, 吉田和重, 鈴木昌弘：パンタグラフ舟体の揚力制御の試み, 第10回鉄道技術連合シンポジウムJ-Rail2003, pp.545-548, 2003
- 17) 網干光雄：架空電車線の凹凸精密測定とその評価法, 電気学会論文集D, Vol.124, No.9, pp.871-877, 2004
- 18) 早坂高雅, 清水政利：離線アークの分光測定結果, 平成17年電気学会全国大会, No.5-155, pp.216-217, 2005