

特集：鉄道固有技術に関わる実験・計測技術

鉄道固有現象に関わる実験・計測技術

上半 文昭*

Technology for Experiment/Measurement to Clarify Phenomena Specific to Railway System

Fumiaki UEHAN

Railway system is composed of many sub-systems such as overhead contact lines, vehicles, tracks and structures, which interact with each other and show complex dynamic behaviors. In order to clarify the phenomena specific to railways caused by the complex behaviors, Railway Technical Research Institute has developed its own experimental technologies and measurement technologies. In this paper, first, as examples of our experimental technologies, we introduce three newly developed large-scale test facilities. Secondly, some of our measurement techniques for condition monitoring of tracks and structures are explained. Finally, we present the outlook for our future R&D policies to be implemented by effectively combining experiment/measurement technologies and numerical simulation techniques.

キーワード：高速パンタグラフ試験装置，高速輪軸試験装置，低騒音列車模型走行試験装置，センシング，モニタリング，デジタルツイン

1. はじめに

図1に示すように、鉄道はそれぞれが複雑な機構を有する電車線構造、車両、軌道、土木構造物などで構成されるシステムであり、それらが相互に作用して生じる列車の乗り心地や走行性、設備の劣化・損傷、騒音・振動、自然災害による被害などの複雑な鉄道固有現象の解明と対策が常に望まれている。

鉄道総研では、これまで、高度なシミュレーション技術¹⁾と独自の実験・計測技術を両輪として、鉄道固有現象の解明に取り組んできた(図2)。本報告では、鉄道固有現象解明のための実験・計測技術について紹介するとともに、実験・計測技術と数値シミュレーションの効果的な連携による今後の技術開発の展望を示す。

500kNの試験体を震度7レベルの地震動で加振できる大型振動試験装置⁴⁾などである。さらに、鉄道車両の高速化などの環境変化を鑑みて、2020年度に新たに3種類の大型試験装置を新設したので、以下にその概要を紹介する。

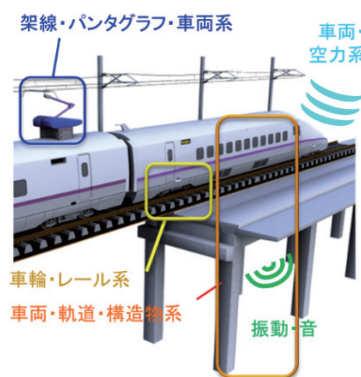


図1 鉄道システムと構成要素の相互作用

2. 鉄道固有現象に関わる実験技術

2.1 鉄道固有現象解明を目的とした試験装置

鉄道総研では、架線、パンタ、車両、軌道、構造物などの構成要素が相互に作用して生じる鉄道固有の諸現象の解明を目的として、様々な試験装置を開発してきた。具体的には、2台車分の軌条輪を用いて実車両の500km/hまでの模擬走行試験を実施できる高速車両試験台²⁾、最大風速400km/hでの実機パンタグラフや車両模型などの空気力学・騒音特性を評価できる大型低騒音風洞³⁾、並びに構造物、軌道、車両台車など最大重量



図2 鉄道固有現象の研究体制

* 鉄道力学研究部長

2.2 高速パンタグラフ試験装置

高速走行環境下でのパンタグラフのトロリ線追随性能や集電性能の評価、トロリ線とパンタグラフすり板の摩擦現象の解明などを目的として、図3に示す高速パンタグラフ試験装置⁵⁾を開発した。この装置は、実機パンタグラフを上下加振（最大10Hz、±35mm）可能な架台に設置し、その上方の回転円盤にトロリ線を固定して、回転円盤を高速（最高速度500km/h）回転しながら、上下（最大27.8Hz、±100mm）、左右（最大5Hz、±300mm）方向に加振することで、トロリ線としゅう動しながら高速走行するパンタグラフの状態を模擬できる。また、ACまたはDCで最大600V、1,000Aの通電性能を持ち、環境雰囲気制御装置によって、試験室内の環境を温度-20℃から40℃、湿度10%~90%に制御することができる。今後、本装置と数値シミュレーションを組み合わせたハイブリッドシミュレーション手法を適用し、本装置をパンタグラフやすり板の開発・性能評価、事故原因の解明などに活用する。

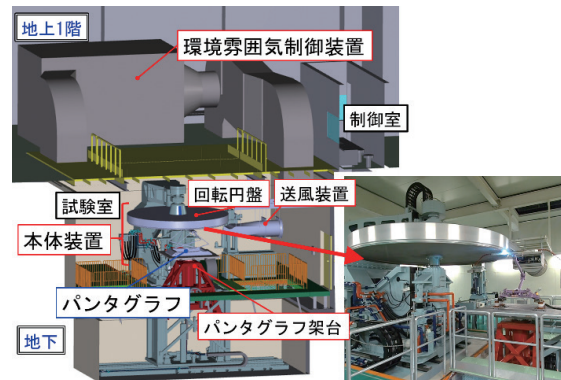


図3 高速パンタグラフ試験装置

2.3 高速輪軸試験装置

高速走行する車両の車輪、車軸、台車部品などの耐久性評価や損傷メカニズムの解明を目的として、図4に示す高速輪軸試験装置を開発した。この装置は、レールを模擬した軌条輪を高速回転させることで、車体の荷重と動揺を模擬する荷重枠を搭載した台車が、最高500km/hでレール上を走行する状態を再現できる。軌条輪の上下加振（最大±15mm）で軌道の上下変位を、荷重枠の加振（上下、左右とも最大±100mm）で車体動揺を再現して、台車に発生する荷重を模擬することができる。また、加減速時に輪軸に作用するトルクも模擬できる。今後、輪軸・軸受、その他台車部品等の性能・耐久性評価、故障原因の究明などに活用する。

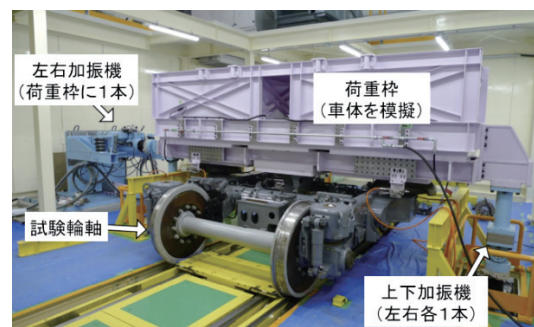


図4 高速輪軸試験装置

2.4 低騒音列車模型走行試験装置

高速走行する車両周りの空気の流れや乱れを精緻に再現して、車両が発する空力音や車両・構造物への作用に関わる現象解明を行うことを目的として、図5に示す低騒音列車模型走行試験装置を開発した。この装置は、縮尺1/20の実形状車両模型を、発射用の回転輪装置を用いて高速走行（編成長2.5で400km/h、編成長7.5mで350km/h）させることができ、車両と地面の相対運動、車両先端形状の三次元特性、編成長の影響などを評価することができる。測定区間は壁面・天井に吸音材を貼付して半無響室化しており、低周波数領域を含めた空力音響特性が評価可能である。今後、列車通過時に生じる空力音や作用荷重の発生メカニズムの解明、トンネル微気圧波の低減策の検討、数値シミュレーション技術の検証・開発用データの取得などに活用する。

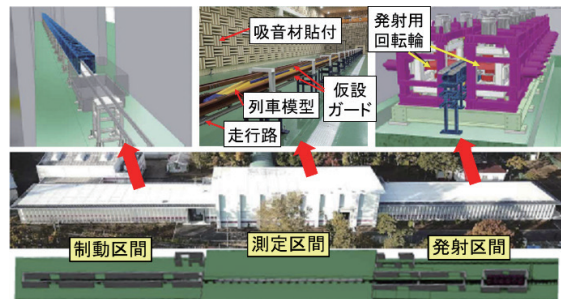


図5 低騒音列車模型走行試験装置

3. 鉄道固有現象に関わる計測技術

3.1 ダイナミクスに着目した軌道・構造物の計測技術

鉄道固有現象を把握するためには、鉄道の構成要素の複雑な相互作用を含む動的現象を効果的に計測する技術が必要である。鉄道総研では、高度なベンチ試験の実現や、実鉄道フィールド情報の効果的な把握のために種々の計測技術の開発に取り組んできた。前章において、車両周りのベンチ試験技術について紹介したので、本章では、実線区における地上設備の状態監視を目的とした、計測技術の開発事例を紹介する。

軌道や構造物は、鉄道列車からの連行荷重の動的な作用を受けて徐々に状態が変化し、劣化や損傷による性能低下が生じる。鉄道の維持管理を効率化するためには、設備の状態監視により、トラブルや故障の予兆を捉えて、

事前かつ効率的に対処する必要がある。この状態基準保全を実現するためには、高度なセンシング・モニタリング技術の開発、適用が不可欠であり、鉄道総研では、軌道や構造物の振動特性に着目した独自の状態監視技術の開発に取り組んでいる。

3.2 軌道の状態把握

3.2.1 道床振動加速度の無線モニタリング

バラスト軌道の道床沈下の要因解明を目的として、加速度センサを用いた道床の振動測定が実施される。この振動測定作業を効率化するとともに、ケーブル類の保守作業への支障を解消するために、道床振動加速度センサの無線化に取り組んでいる⁶⁾。Wi-SUN モジュール（無線通信ユニット）を搭載した3軸加速度測定システムを構築し、図6に示すようにバラスト、まくらぎ、バラスト止めなどの多くの遮蔽物に囲まれた環境下においても、振動データの無線伝送が可能であることを確認した。このような無線センサ計測技術を発展させることで、将来的に軌道各部の状態監視を効率化できるものと期待している。

3.2.2 コンクリートまくらぎの検査技術

プレストレストコンクリートまくらぎ（PCまくらぎ）は、古いものは導入後50年を迎えており、ひび割れなどの損傷が顕在化しつつある。そこで、数値データに基づく定量的な評価によって目視検査の精度を補完するために、PCまくらぎの打音検査技術を開発した⁷⁾。ひび割れ等の損傷が発生するとまくらぎの剛性および固有振動数が低下する。そこで、図7の要領で、ハンマでまくらぎを衝撃加振し、その振動に伴って発生する打音を測定することでまくらぎの固有振動数を推定する。そ

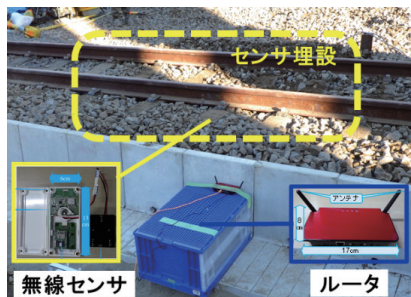


図6 道床加速度の無線モニタリング

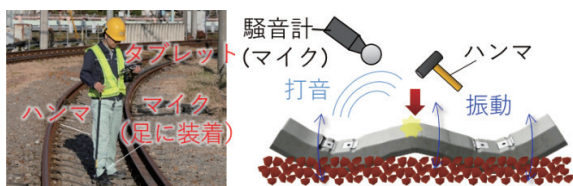


図7 PCまくらぎの打音検査技術

の際に、損傷に対する感度が高く、まくらぎの支持状態の影響を受けにくい3次モードの振動・打音を活用することで、検査精度を高めている。現状は、作業員が徒歩巡回して行う検査形態であるが、機械化した車両搭載型装置の開発などによって検査の効率化が期待できる。

3.3 構造物の状態把握

3.3.1 橋りょう振動の加速度モニタリング

列車通過時の橋りょうの振動は、車両の乗り心地や走行性、橋りょうの劣化・損傷などの評価に用いられるため、様々な測定・評価技術が検討されてきた（図8）。鉄道総研では、橋りょうに加速度計を取り付けて行ってきた加速度計測・評価手法の高度化に取り組み、無線センサを用いて巡回によるデータ収集を省略するとともに、加速度測定データから、たわみ（変位）やコンクリート橋内部の鉄筋応力を推定するアルゴリズムを開発した。本技術によって、小型で常設可能な加速度センサを用いてモニタリングを行い、橋りょうの性能を定量的に評価して、補修・補強の要否を判断することが可能となった。

3.3.2 橋りょう振動の非接触センシング

遠隔位置からの非接触測定によって、高所や線路近傍でのセンサ設置を省略し、測定の効率化、安全化を図る手法が検討されてきた（図8）。この結果、レーザードップラー振動計に、風などによる振動計の揺れの影響を補正する機能を加えて、屋外での構造物振動測定を高精度化した非接触振動測定システム「Uドップラー」が開発され⁸⁾、たわみや固有振動数を指標とした橋りょう、高架橋などの検査に用いられている。また、映像内の任意の多点の振動を同期測定することができる、ビデオカメラを用いた動的画像計測システムを新たに開発した⁹⁾。今後、常時微動などの微小振動を高精度に測定できるレーザー計測と、列車通過時振動などを多点同期測定できるビデオ計測の長所を活かして、橋りょうの検査や状態監視の高度化に取り組む計画である。

3.3.3 車上計測による共振発生橋りょうの検出

構造物の動的挙動を、走行する車両から把握する技術の開発にも取り組んでいる。列車の高速化や橋りょうの劣化に伴って、列車の連行荷重による加振振動数と橋りょうの固有振動数が近づくことにより、共振による大きな振動が構造物に生じる場合があり、共振発生橋りょうの早期検出が課題となっている。そこで、図9に示すように列車の先頭車と最後尾車の加速度計測を車上でを行い、共振による最後尾車両通過時の揺れの増大を検出することで、共振発生橋りょうを検出可能とした¹⁰⁾。多数存在する構造物すべてにセンサを設置することは困難であるが、これを省略することができる車上計測による構造物特性の計測技術は、今後、構造物の状態監視の主役になるものと期待している。

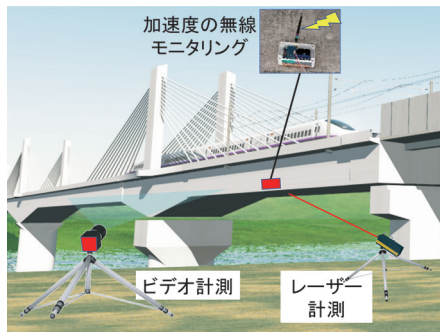


図8 橋りょう振動の計測技術

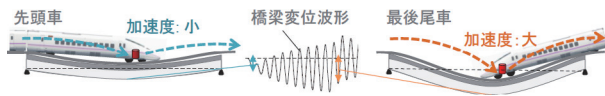


図9 車上計測による共振発生橋梁の検出技術

4. 実験・計測技術のこれからの役割

実験・計測技術は、実際の鉄道フィールドで生じる様々な現象の再現・把握に不可欠であり、今後も、鉄道固有現象の解明、事故原因の究明、検査・評価の基準策定、事故や災害への対策法提案などで重要な役割を果たす。

今後は、実験技術と数値シミュレーション技術との連携をより強めて、実験装置と数値シミュレーションを組み合わせて実現象をより忠実に再現するハイブリッド実験／シミュレーション技術の向上、鉄道総研独自の実験技術で創出した基礎・検証用データによる数値モデルの改良、数値実験室（数値シミュレーションによる仮想実験装置）との連携による大型試験装置の運用効率化などを進める計画である（図10）。

計測技術は、鉄道デジタルツインにおける実際の鉄道フィールド情報の提供システムへと発展させる。鉄道総



図10 実験・計測技術とシミュレーションの連携

研では、コンピュータ空間上に鉄道を再現する「バーチャル鉄道試験線」の開発に取り組んでいる¹⁾。このバーチャル鉄道試験線を、状態監視データとほぼリアルタイムに関連づけることで、実際の鉄道路線を忠実に再現する力学モデルとしてのデジタルツインに発展させたい。より進化させたセンシング・モニタリング技術とデータ通信技術を用いて、実鉄道フィールドで生じる設備劣化や事故の予兆を早期に捉え、バーチャル鉄道試験線上でのシミュレーションで状態を評価してリアル空間の鉄道に対処方法を伝達するシステムを構築することによって、鉄道のメンテナンス効率化や安全確保を実現したいと考えている。

5. まとめ

鉄道固有現象の解明に向けて鉄道総研が開発する、最新の大型試験装置と、実鉄道フィールドの状態把握・監視を目的とした軌道・構造物の振動測定技術について紹介した。ここで紹介した以外にも、鉄道総研では、様々な室内・現車実験技術や、画像解析、AI、無線・ネットワークなどのデジタル技術を活用した計測技術を構築しており、鉄道の革新に向けて邁進する所存であるので、読者諸兄からのご指導、ご協力を賜れば幸いである。

文献

- 1) 上半文昭：鉄道シミュレータの構築，鉄道総研報告，Vol.34, No.8, pp.1-4, 2020
- 2) 一戸光一：解説 高速車両試験台について，車両と電気，42巻，6号，通号493，pp.20-22, 1991
- 3) 丸岡昭：大型低騒音風洞，鉄道総研報告，Vol.10, No.2, pp.11-16, 1996
- 4) 豊岡亮洋：国内外最大級の性能を有する大型振動試験装置の製作と加振実験—大型振動試験装置の竣工，検査技術，14巻，10号，pp.26-34, 2009
- 5) 小山達弥：高速パンタグラフ試験装置の開発，鉄道総研報告，Vol.35, No.9, pp.5-10, 2021
- 6) Iwasawa, N., et al., “Basic Concepts of Buried Wireless Sensor under Ballasted Layer,” Proceedings of ICSNC 2019, No.4346, 2019.
- 7) 渡辺勉，箕浦慎太郎，松岡弘大，後藤恵一：PCまくらぎの維持管理に関する最近の研究，プレストレストコンクリート，63巻，2号，pp.80-84, 2021
- 8) 上半文昭：構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」の開発，鉄道総研報告，Vol.21, No.12, pp.17-22, 2007
- 9) 上半文昭：ビデオカメラとドローンを用いた構造物検査技術の開発，鉄道総研報告，Vol.35, No.9, pp.47-52, 2021
- 10) 松岡弘大，渡辺勉，上半文昭：車上計測による共振橋梁の検知手法，鉄道総研報告，Vol.33, No.8, pp.35-40, 2019