

# 鉄道力学研究部



鉄道力学研究部は、車両、電車線、軌道、構造物などにおけるダイナミクスの問題、特に、車両と構造物・軌道、レールと車輪、パンタグラフと架線などの境界領域で生じる現象に関わる基礎的な研究を担当しています。独自の計測・評価技術、試験技術、シミュレーション技術を開発・活用して、鉄道の劣化現象や安全に関わる動力的な現象の解明と具体的解決法の提案に取り組んでいます。ここでは、鉄道力学研究部の最近の研究成果を紹介します。

鉄道力学研究部長 上半文昭  
 鉄道力学研究部ウェブサイト <https://www.rtri.or.jp/rd/division/rd50/>

## はじめに

鉄道では、車両、電車線、軌道、構造物などの複数の構成要素の境界領域において、それらが相互に作用しあって鉄道固有の複雑な動力的な現象が生じます。鉄道の事故や災害に対する安全性の向上、機器・設備の劣化に対する維持管理の効率化を実現するためには、この鉄道固有現象を理解して、具体的な解決策を提案する必要があります。我々鉄道力学研究部は、車両力学、集電力学、軌道力学、構造力学、および計算力学の幅広い分野にわたる5つの研究室が協力して、現車試験における計測・評価技術、独自の試験設備を用いた試験技術、数値シミュレーション技術の開発を行っています。そして、リアル空間で実行される計測・評価技術や試験技術とコンピューター空間上で実行される数値シミュレーション技術を高度に融合させることによって、鉄道固有現象の解明と鉄道の維持発展に寄与するゲームチェンジャーとなり得る具体的解決法の提案に挑戦しています(図1)。

計測・評価技術では、車両や地上設備の動的

挙動の計測技術と計測データに基づく状態評価手法を提案しています。計測・評価技術の検証には数値シミュレーションを有効に活用しています。また、計測・評価技術は将来的に実鉄道路線とバーチャル試験線を高度に融合させるためのリアル情報の収集ツールに発展させたいと考えています。

試験技術では、鉄道固有現象を再現する独自の試験装置を開発<sup>1)</sup>するとともに、数値シミュレーションとの融合による試験の高度化にも取り組んでいます。さらに、シミュレーション技術を用いてコンピューター空間上に実試験装置のデジタルツイン<sup>2)</sup>である数値実験室を構築しています。

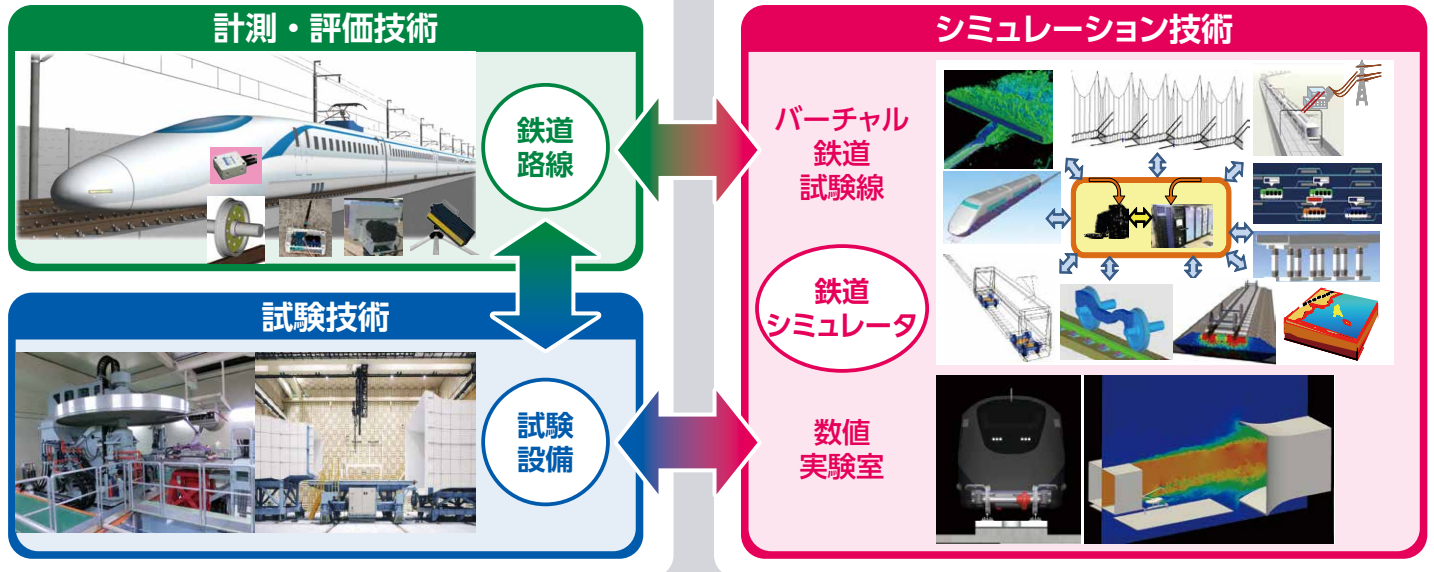
シミュレーション技術では、新たな解析手法を開発するとともに、これまでに鉄道総研が開発したシミュレーション手法を統合して「鉄道シミュレータ」を開発しています<sup>2)</sup>。さまざまな鉄道構成要素で生じる物理現象を大規模に連

### ☞ デジタルツイン

リアル空間に実在しているものを、デジタル技術を活用してバーチャル空間に忠実に再現したモデル。

## リアル(フィジカル)空間

## コンピューター(バーチャル)空間



計測・評価技術，試験技術，シミュレーション技術の開発と融合による鉄道の劣化現象や安全に関わる鉄道固有現象の解明と具体的解決法の提案

図1 計測・評価技術，試験技術，シミュレーション技術の連携

成して、コンピューター空間上に実鉄道路線のデジタルツインであるバーチャル鉄道試験線を構築しています。

以下、鉄道力学研究部の計測・評価技術，試験技術，シミュレーション技術に関わる最近の研究成果を紹介します。

### 車上からの鉄道橋の健全度評価

#### —計測・評価技術—

まず、実鉄道路線で車両や地上設備に生じる動力学的現象の計測・評価技術の開発事例として、車上計測による鉄道橋の性能評価技術を紹介합니다。なお、ここでの説明は割愛しますが、計測・評価技術の開発においては、計測・評価理論の仮説検証や計測結果の妥当性検証において、数値シミュレーションが重要な役割を果たしています。

列車通過時の鉄道橋の振動や桁たわみは、列

#### ④ 鉄道橋の共振現象

鉄道橋上を列車が通過する際に車両の規則的な軸配置によって特定の振動数をもつ振動が生じ、この振動数が鉄道橋の固有振動数に近い値となった場合に共振が発生して鉄道橋に過大な振動が生じる現象。

車の乗り心地や鉄道橋の健全性に関する代表的な評価指標ですが、その測定は地上から1橋りょうずつ実施されるため、多くの労力と時間を要しています。このような地上計測の代わりに、橋りょう上を通過する列車に設置したセンサーで計測した列車振動や軌道変位を用いて鉄道橋を検査する手法の開発を進めています。

#### 車上からの共振橋りょうの検出

鉄道橋の共振現象<sup>④</sup>によって、列車通過時に大きな振動が生じる橋りょう(共振橋りょう)の車上からの計測・評価手法を構築しました<sup>3)</sup>。この手法では、先頭車両と最後尾車両にセンサーを搭載して、最後尾車両が通過する際の橋りょう振動が先頭車両通過時よりも増大していることを検知します(図2)。

#### 車上からの橋りょうたわみ計測

これに加え、現在では列車通過時の桁たわみを車上計測した軌道変位から推定する手法を提案しています。編成列車の先頭と最後尾車両で計測した軌道変位(高低変位)の差分が列車通過時の桁たわみの一部であることを理論的に解明し、軌道変位の差分最大値に鉄道橋のスパン

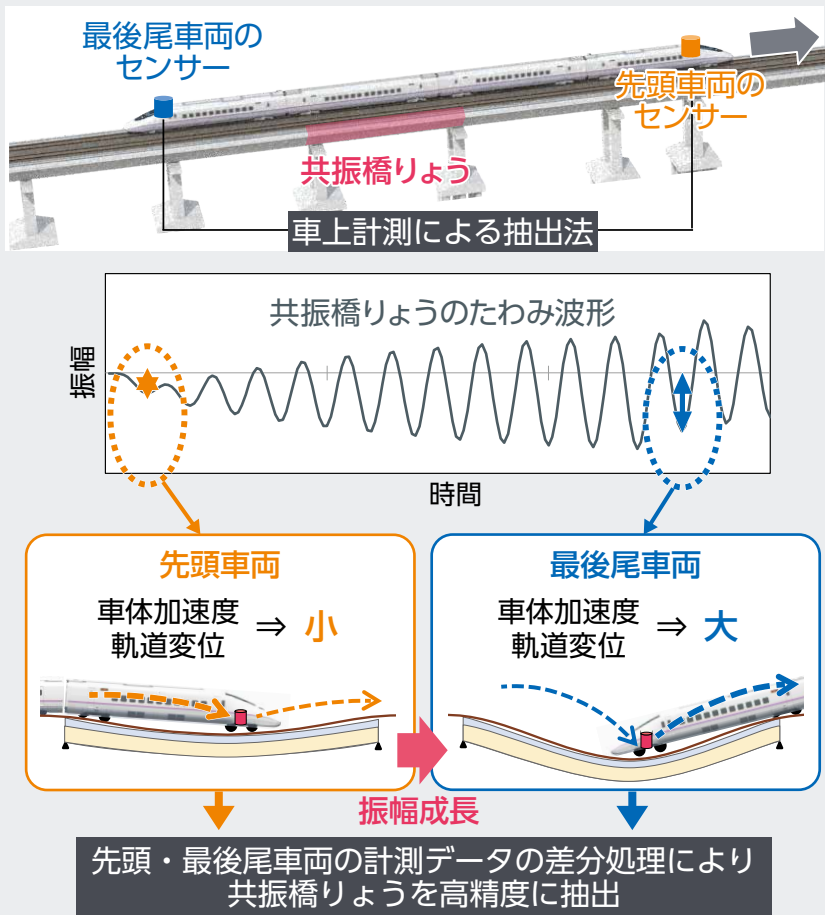
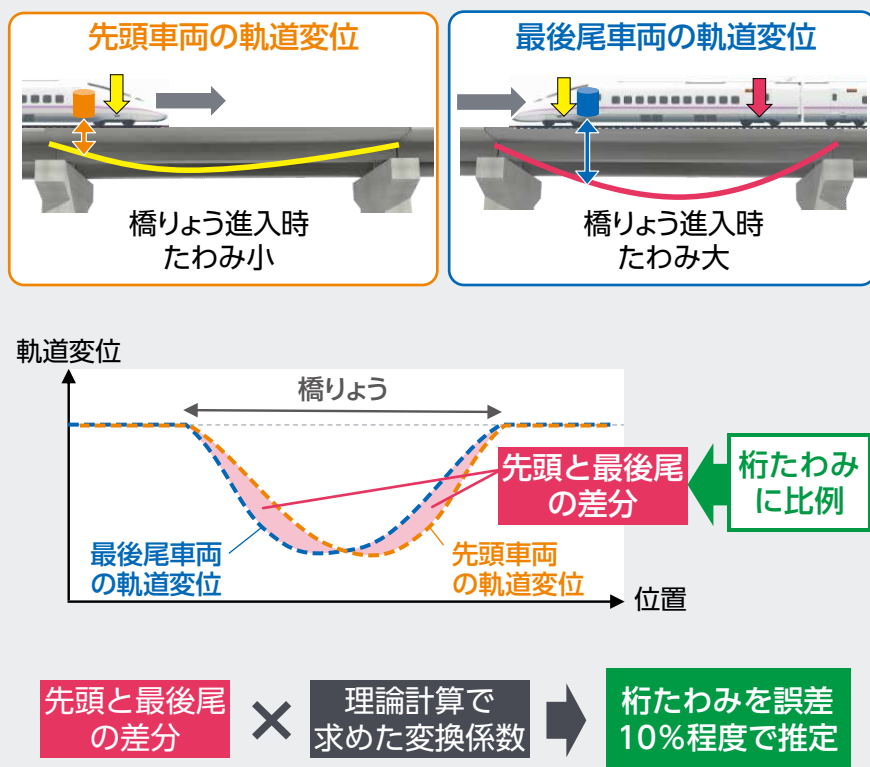


図2 車上からの共振橋りょう検出手法

図3 車上からの橋りょうたわみ計測手法



長に応じた変換係数を乗じることで、桁たわみを推定可能にしました(図3)。実路線での検証試験により本手法を用いれば誤差10%程度で桁たわみを推定できることを明らかにしています<sup>4)</sup>。現在は、先頭と最後尾車両で軌道変位を測定する場合だけでなく、在来線で多く利用される2台車検測車で得られる高低検測差による桁たわみの推定法も開発を進めています。

これらの計測・評価技術は、鉄道力学研究部が開発した車両と構造物の動的相互作用シミュレーション技術<sup>5)</sup>や、非接触振動計測技術<sup>1)</sup>による現地試験によって技術的検証が行われています。

### 高速パンタグラフ試験装置とハイブリッドシミュレーション —試験技術—

次に、鉄道総研独自の試験技術・装置の開発、および試験装置と数値シミュレーションの融合による、より高度な試験の実現に向けた研究開発事例を紹介します。

現車試験以外でパンタグラフの性能を評価するために、計算機による運動シミュレーションや試験設備による各種試験などが行われています。鉄道力学研究部では、架線・パンタグラフの運動シミュレーション技術の開発に取り組んでいるほか、高速パンタグラフ試験装置(図4)<sup>6)</sup>を活用した試験・調査を行っています。高速パンタグラフ試験装置は、温度・湿度を制御した試験室で架線に相当する円

盤を動作（回転，上下・左右変位）させることにより定置のパンタグラフに対して500km/hまでの走行状態を模擬した種々の試験を実施することができる装置です。

本装置では，円盤の動きはあらかじめ設定した通りに制御する試験が一般的ですが，前述したシミュレーション技術と融合することでHILS試験<sup>7)</sup>と呼ばれるより高度な試験を実施することができます。HILSとは，Hardware In the Loop Simulationの略称で，実機とコンピューターシミュレーションをリアルタイムで融合する技術です。架線・パンタグラフ系HILSは，実機のパンタグラフと接触する円盤の上下運動をリアルタイムシミュレーションに連動させることで実現しました（図5）。これにより，架線・パンタグラフの相互の連成を高速パンタグラフ試験装置で実現することが可能となり，実現象により近い条件で試験が実施できるようになります。このような技術をさらに高度化し，パンタグラフの開発コストの低減や保守の効率化につなげていきたいと考えています。

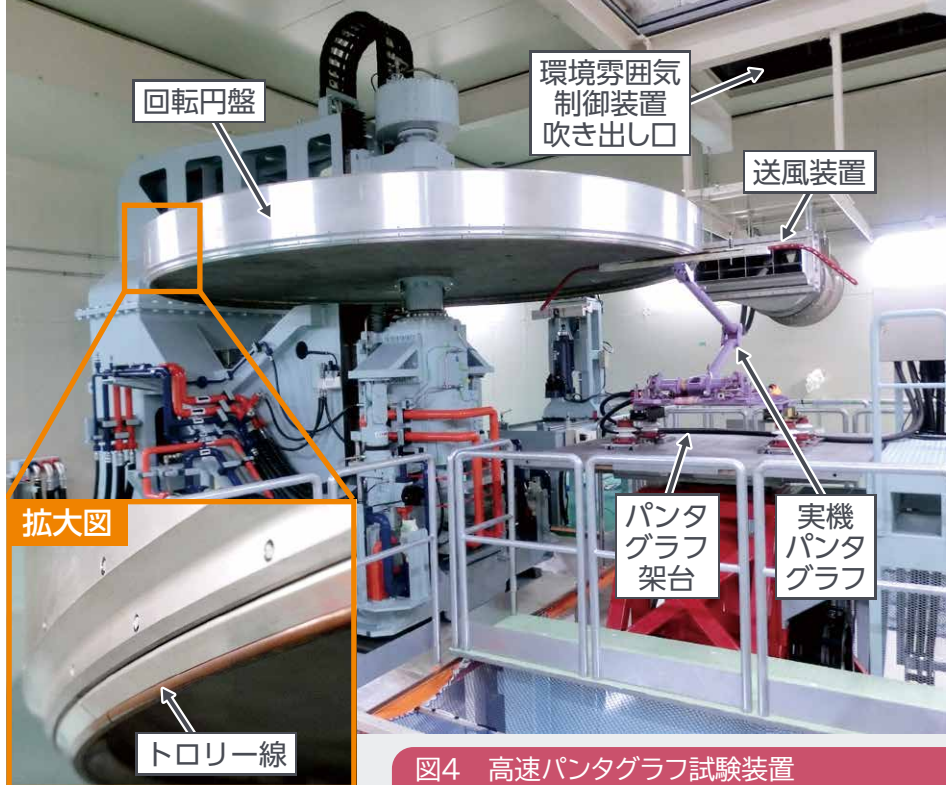


図4 高速パンタグラフ試験装置

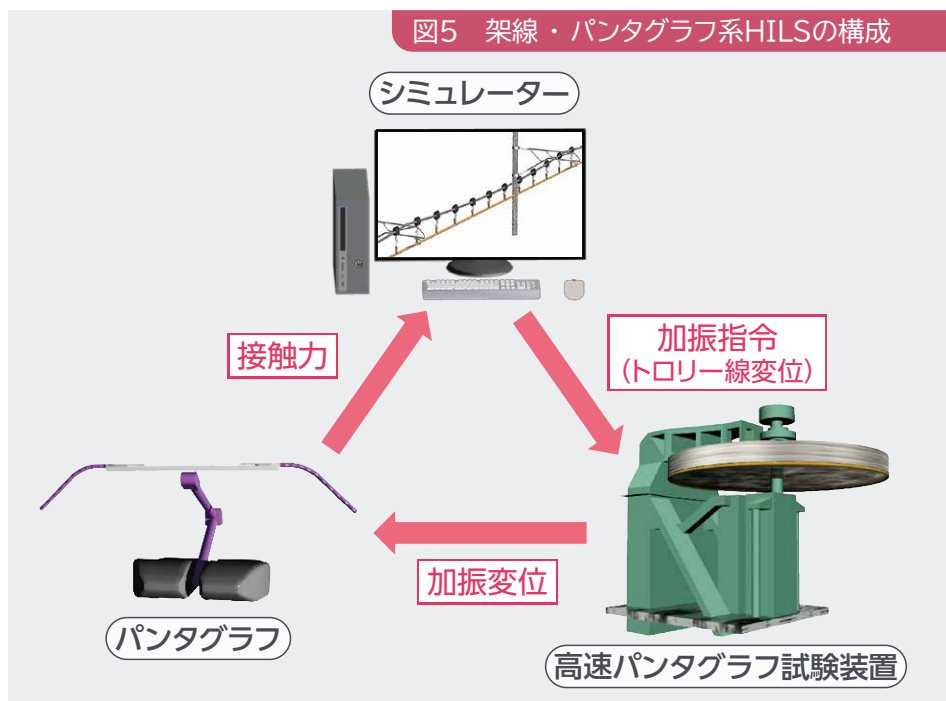


図5 架線・パンタグラフ系HILSの構成

### 大型低騒音風洞の数値風洞 —シミュレーション技術—

最後に，試験装置を数値シミュレーションでバーチャル空間上に再現した数値実験室の開発事例を紹介します。数値実験室は，実試験装置との相互補完による試験実施内容の削減，実試験装置のサイズや仕様の制約が試験結果に与える影響の調査，実試験装置の能力を超えた数値

実験の実施などに活用します。

鉄道総研における空気力学に関する研究開発では，米原にある大型低騒音風洞が重要な研究開発ツールとなっており，毎年200日以上，さまざまな風洞実験を実施しています。風洞実験のより効率的かつ高度な推進を目的に，風洞実験を数値シミュレーションで再現する「数値風洞」を開発しました。

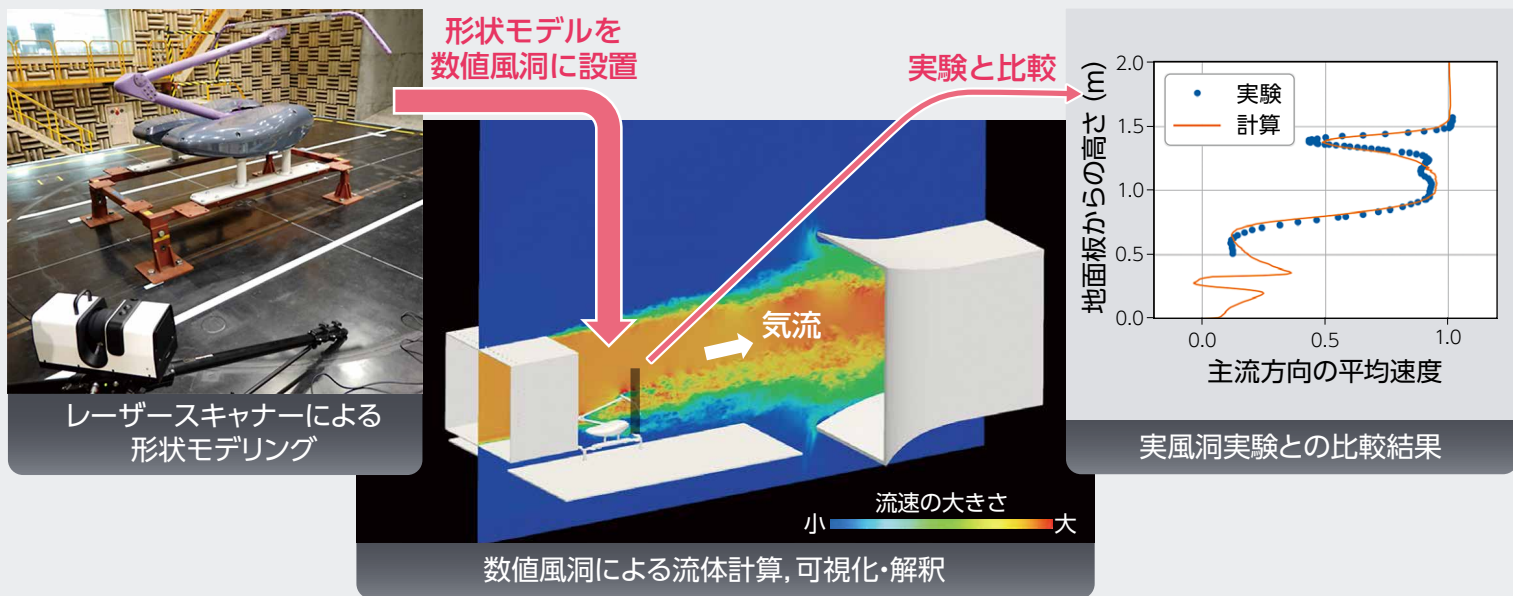


図6 数値風洞（左：モデル作成，中央：計算結果の可視化例，右：実験結果との比較例）

数値風洞は、米原風洞のデジタルツインとして開発するものであり、その構築においては、米原風洞気流の把握およびその数値的再現に取り組みました。気流の数値的再現には、複雑形状の流れを効率よく計算できる、鉄道総研が開発した「空気流シミュレータ」を用いました。また、三次元レーザー scanner を用いた供試体の形状モデリング手法を導入し、モデルの形状定義から計算実行までを一貫して実施できるシステムを構築しました(図6)。数値風洞による計算結果と実験結果を比較したところ、良好に一致することを確認しました。

構築した数値風洞は実験条件の絞り込みや測定点数の削減など風洞実験を補完するツールとして活用できます。これにより、数値風洞と風洞実験を組み合わせることで実験期間を短縮することができ、ひいては研究開発の期間を短縮できます。また、鉄道事業者等の突発的な課題においては、風洞実験に頼らずとも迅速に対応できる新たな選択肢として、風洞と連携した数値風洞を提供できます。

### おわりに

ここでは、計測・評価技術、試験技術、シミュレーション技術の開発と融合によって鉄道固有

現象の解明と具体的解決法の提案に取り組む鉄道力学研究部の研究開発方針を説明し、各技術の最近の成果例として、車上計測による鉄道橋評価技術、パンタグラフの試験技術、大型低騒音風洞の数値風洞を紹介しました。そのほかの研究開発については鉄道総研の鉄道力学研究部のウェブサイトをご覧ください(<https://www.rtri.or.jp/rd/division/rd50/>)。鉄道力学研究部は、これからも、独自の計測・評価技術、試験技術、シミュレーション技術を開発・融合して鉄道の安全性の向上や維持管理の効率化に寄与する研究成果を創出し、デジタル技術の革新などに伴って変革する社会・鉄道のニーズに応えていきたいと考えています。

### 文献

- 1) 上半文昭：鉄道固有現象に関わる実験・計測技術，鉄道総研報告，Vol.35，No.9，pp.1-4，2021
- 2) 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
- 3) 松岡弘大，上半文昭，田中博文：列車走行により共振する橋りょうを抽出する，RRR，Vol.78，No.5，pp.20-23，2021
- 4) Matsuoka, K. and Tanaka, H.: Drive-by deflection estimation method for simple support bridges based on track irregularities measured on a traveling train, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.182, No.109549, 2023
- 5) 曾我部正道，松本信之，藤野陽三，涌井一，金森真，宮本雅章：共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究，土木学会論文集，No.724，pp.83-102，2003
- 6) 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
- 7) 小林樹幸，小山達弥，原田智：高速パンタグラフ試験装置を用いた集電系ハイブリッドシミュレーション手法，鉄道総研報告，Vol.35，No.12，pp.47-52，2021