

鉄道力学に関する最近の研究開発

石田 弘明*

Recent Research and Development in Railway Dynamics

Hiroaki ISHIDA

Train running causes numerous dynamic problems such as vibrations and noises. These matters bring about not only environmental degradation but also deterioration of railway elements such as wears due to pantograph/wire contact and wheel/rail contact. Farther, external forces such as seismic forces shake railway systems and cause various problems on the running safety. We have carried out the research and development (R&D) for solving such problems in order to attain high-grade performance of the railway systems. This paper describes the current major R&D subjects and research activities especially for achieving the highly-reliable and low-cost railways dealt with chiefly by Railway Dynamics Division.

キーワード：鉄道力学，ダイナミクス，走行安全性，振動，摩耗，省保守

1. はじめに

鉄道は架線、車両、軌道、構造物など多くの設備から成り立つシステムである。この鉄道システムのダイナミクス（鉄道力学）に関する研究開発は、列車の走行に伴い発生する各部の振動と、地震動等の外力を受けたときの応答という二つの課題を主な対象としている。鉄道システムの振動は、騒音等の源となるだけでなく、安全性や各要素の劣化にも影響を及ぼす。また、そこには架線/パンタグラフ系、車輪/レール系のように、二つの物体が互いに接触しながら移動するという鉄道固有の現象も含まれ、これら車両の走行に不可欠な相互作用は、同時に摩耗・損傷を引き起こす要因ともなっている。

以上のような鉄道力学に関わる現象に対し、鉄道総研では、安全性・信頼性の向上、保守の低減、環境との調和をキーワードとして、実験・計測手法の開発、現象の解明と解析手法の開発、評価・設計手法や設備改善手法の提案など様々な研究開発を進めてきた（図1）。本報告では、特に安全性・信頼性の向上と保守の低減に関する最近の研究を取り上げ、その概要と今後の取組みについて述べる。

2. 架線/パンタグラフ系

2.1 パンタグラフ接触力

パンタグラフと架線の状態を評価するのに重要な役割を果たすのが、両者間に作用する接触力である。この接

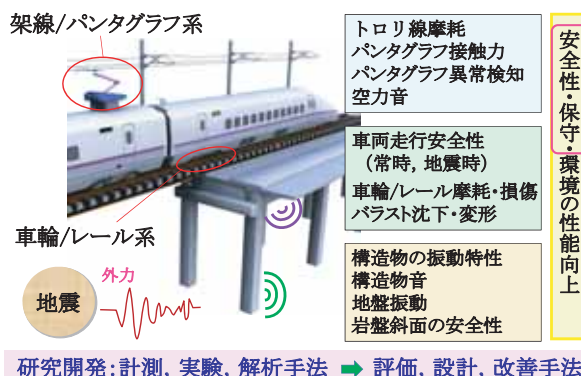


図1 鉄道力学に関する研究開発

触力を測定するために、これまでは主として、パンタグラフに加速度計やひずみセンサを設置する手法を実用化し適用してきた。しかし、この方法はパンタグラフの部材に穴を開けたり、ケーブルを配線するなどの特殊な細工を必要とし、特に最近開発された多分割すり板方式のパンタグラフでは、実用的なセンサや配線の実装が困難な場合がある。そこで、新たにラインセンサカメラで撮影した画像から画像処理によって接触力を測定する方法を開発した。画像データの処理方法等を改善した結果、加振試験装置での性能評価試験により、多分割すり板方式のパンタグラフでも約17Hz以下の接触力変動を精度よく測定できることを確認している¹⁾。

一方、接触力変動を低減する手法として、パンタグラフ舟体の復元ばねの剛性を変化させて架線への追随性を向上させる方法²⁾と、枠組の基部に空気アクチュエータを設置し枠組の運動を介して接触力を制御する方法³⁾の開発を進めている（図2）。前者は20Hz程度までの高い

* 鉄道力学研究部 部長

特集：鉄道力学

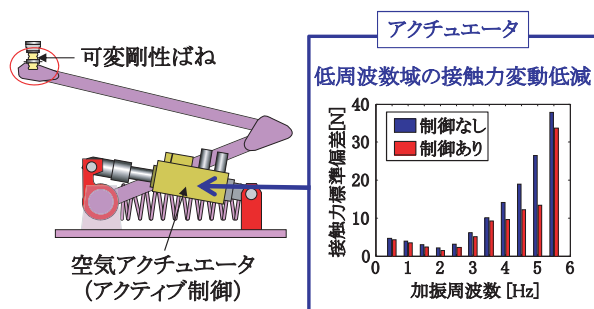


図2 パンタグラフの接触力制御

周波数域、後者はインピーダンス制御を用いることにより、約5Hz以下の接触力変動が低減できることを室内実験で確認した。これらの制御技術の適用は、ハンガ間隔や支持点間隔に対応した接触力変動を低減し、広い速度域で良好な集電性能を得る手法として期待される。可変剛性ばねについてはより柔らかいばねの実現、アクティブ制御についてはごく低い周波域での性能改善が今後の課題である。

2.2 トロリ線の摩耗予測

トロリ線の寿命延伸には、局所的な摩耗の進行を予測して設備を改善・管理することが重要である。そこで、パンタグラフ接触力や離線アークを地上側で測定する手法を開発し(図3)、新幹線営業線での3年間にわたる測定データから、トロリ線の摩耗予測モデルを構築した⁴⁾。このモデルは、トロリ線の摩耗量が接触力、離線アーク、集電電流の三つの摩耗要因の関数により決定されると仮定し、実測値により各要因の影響度を算定したものである。実測値との比較により、予測モデルによる摩耗量推定結果は、離線の多い箇所とそうでない箇所各々の摩耗傾向を正しく表現していることを確認した。また、新たに開発した地上側での接触力測定法は各パンタグラフの揚力を含む接触力を直接測定できる利点を有し、離線アーク測定法はアーク光の紫外線を検出するため昼夜を問わず測定が可能である。したがって、これらの手法は今後、パンタグラフのモニタリングにも活用できると考えている。

2.3 パンタグラフの異常検出

在来線を主な対象に、トロリ線に複数個の加速度計を設置し、その信号を処理してパンタグラフすり板の段付摩耗を検出する手法の開発を進めている。所内の集電試験装置による実験では、トロリ線の段付摩耗底部への移行や底部での引っ掛かりが高い精度で検出できることを確認した⁵⁾。また、ばね系に異常のあるパンタグラフの検出方法についても基礎的な検討を行った。今後、より高速域でのデータ取得等を行い、現地試験可能な異常検出システムを構築していく計画である。

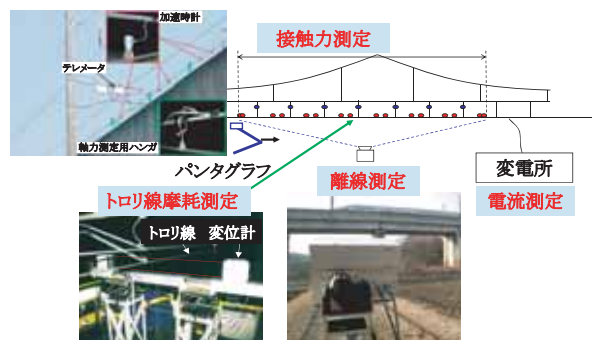


図3 トロリ線摩耗予測のための地上測定

3. 車輪/レール系

3.1 車輪とレールの摩耗

曲線半径や線区の列車条件に応じて、車輪フランジとレールゲージコーナの摩耗進展及び形状変化を予測するモデルを構築した。この予測モデルは、車輪とレールの硬さ、車両の曲線走行に伴う車輪とレール間の接触面圧、接線力、すべりの関数として接触面の摩耗量を表現したもので、これらの条件を変化させた模型輪による室内試験から、各要因の影響度を表す摩耗係数を求めている⁶⁾。車輪フランジの摩耗予測に関しては、今後さらに実測データの収集等を進め、摩耗実態を適切に再現できるモデルへとブラッシュアップしていく。また、具体的な車輪とレールの摩耗及び急曲線での騒音対策として、車上から摩擦緩和材を内軌頭頂面上に散布するFRIMOS(摩擦緩和システム)の開発を行った。FRIMOSはすでに一部の鉄道会社に導入されているが、さらなる普及を目指して地上式摩擦緩和システムの開発を進めているところである。このほか、摩擦緩和材、水系潤滑剤、潤滑油の塗布による曲線内軌・外軌潤滑の適正化に関する研究⁷⁾を行っており、横圧低減効果や延び性等の材料自身の性能向上だけでなく、安全性や経済性といった面で最適な潤滑手法を提案したいと考えている。

3.2 レールの損傷

シェリング、きしみ割れ、側摩耗といった主要なレール損傷の発生と進展を解析により評価するための「レール損傷モデル」を構築した。このモデルは、転がり接触疲労によるひずみの蓄積からき裂の発生を予測し、破壊力学理論に基づくモデルによりき裂の進展を解析する。疲労と摩耗の統合モデルについてはさらに深度化が必要であるが、水平裂が分岐した後の横裂進展モデルはすでに現場の保守への活用が可能なレベルにある。具体的なモデル適用例として、現地調査データに基づき、レール探傷によってき裂が確認された場合にレール破断に至るまでの通トン予測し、適切なレール交換時期と探傷周期を定める手法を提案した⁸⁾。今後、熱処理レールにつ

いても基礎実験を行い、ゲージコーナキ裂の進展予測にも活用できるモデルとしていく計画である。

4. 車両/軌道/構造物系

4.1 地震時走行安全性

4.1.1 車両の脱線防止対策

常時走行と異なり、地震時には車両の車体・台車間が大きく変位する。そこで、地震時走行安全性向上策の一つとして、ピストン速度が通常使用範囲を超えた場合に減衰力が増加する地震時脱線防止対策用左右動ダンパ（以下、地震対策ダンパと記す）を開発した⁹⁾。試作したダンパを新幹線用台車に取り付け、所内の大型振動試験装置により加振試験を行った結果、このダンパを用いると広い加振周波数範囲において走行安全限界振幅が向上することが確認できた。このダンパは、従来ダンパと取り替えるだけで地震時に効果を発揮し、常時の走行性能には全く影響を及ぼさない。今後、左右動ストッパの特性変更と地震対策ダンパを組み合わせ、より大きな地震時走行安全性向上効果が得られる対策の開発を進める。

4.1.2 脱線後の車両逸脱防止対策とリスク評価

車両と構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARS (Dynamic Interaction Analysis for Shinkansen Train And Railway Structures) を開発し、各種高架橋や橋梁、連続した構造物群等の振動と地震時走行安全性の評価に活用してきた。このDIASTARSを改良・機能向上し、大規模地震により脱線した後の2次被害軽減を目的とした車両逸脱防止対策の評価にも取り組んでいる(図4)。新たなDIASTARS IIIでは、スラブ軌道だけでなく横まくらぎを敷設したバラスト軌道上での脱線後の列車走行解析も可能である。この解析精度を上げるには、さらに脱線後の車輪とコンクリート壁との衝撃や破壊という難しい現象を明らかにする必要がある。そこで、部分模型によるコンクリート部材やPCまくらぎへの車輪衝突実験を実施し、有限要素モデルを用いた高速衝撃応答解析手法をあわせて開発した¹⁰⁾。本研究により、車輪フランジが衝突した際のコンクリート部材の破壊モードを明らかにするとともに、弾塑性変形を考慮した衝撃力を精度よく評価することが可能となった。また、これらの成果を活用して、構造物群の上を走行する列車の地震時走行安全性に関するフラジリティ曲線（地震被害発生確

率)を算出し、車両逸脱防止対策の効果を明らかにした¹¹⁾。リスク評価に関しては、大規模地震による構造物の不同変位の影響も考慮して、さらに地震被害発生確率の推定精度向上を図っていく。

上記に加え、構造物の耐震診断や走行性評価のために、常時微動測定による構造物の等価固有周期推定法の研究も行った。非接触振動測定システムUドップラーや微動計を用いて地表面、橋脚、橋桁の常時微動を同時に計測できる多チャンネル同期システムを開発するとともに、ERA (Eigensystem Realization Algorithm) によるモード分解と1次モードに最適化したフィルタ処理、仮定モード形とのMAC (Modal Assurance Criteria) により、計測データから、弾性固有周期を機械的に高い精度で推定できる手法を開発した。さらに張出式及び調整杆式ラーメン高架橋と壁式橋脚の多数の測定結果に基づき、弾性固有周期から等価固有周期を推定する信頼性の高い換算式を導出して提案した¹²⁾。常時微動測定による弾性固有周期の推定により、構造物の健全度を素早く診断することが可能となる。さらに、本成果によって、地盤特性を含む連続した構造物群の等価固有周期を効率良く把握することが可能となり、旧形式高架橋等の地震時走行安全性評価を高い精度で行うことができる。

4.1.3 バラスト軌道の変形挙動

地震時走行安全性を評価する上で重要となる構造物境界部の有道床軌道の変形挙動を明らかにするため、道床横抵抗力、地震動、構造物諸元等が有道床軌道の地震時変形挙動に及ぼす影響について検討を進めている。これまでに、実物大有道床軌道の加振試験、連続するRCラーメン高架橋上の有道床軌道を対象とした変形挙動解析を行い、加振時の道床横抵抗力の低減特性を考慮した座屈解析により、残留変位を含め、試験結果の妥当な評価が可能であることを確認した¹³⁾。

4.2 常時の走行安全性（構造物の部材振動、岩盤斜面の安定性）

列車の高速化に伴う構造物音や地盤振動の顕在化を背景に、RC高架橋の中間スラブや張出スラブ、防音壁等、各部材の振動特性を解明する手法を開発した¹⁴⁾。この手法を適用すれば、対象部材に加速度計をアレイ配置し、ハンマリング又は走行列車を加振源として、部材の固有振動数や振動モードを計測することができる。また、部材振動が解析可能な有限要素モデルも構築し、速度向上時の安全性を簡易に評価できるよう、特定線区の標準RC高架橋を対象に各部材の固有振動数と列車速度に応じた衝撃係数が参照できる早見表を作成した。このほか、橋脚のたわみ測定、構造物の振動測定による健全度診断等に活用している非接触振動測定システムUドップラーを用いて、鉄道沿線の岩盤斜面の安定性を評価する

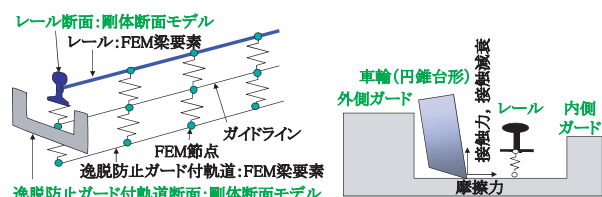


図4 車輪と逸脱防止ガードの衝突モデル

特集：鉄道力学

手法の開発も行っている¹⁵⁾。すでに3台のUドップラーにより岩塊の微動を3次元同時測定するシステムを開発しており、卓越周波数等からその安定性を判定する方法を提案すべく、今後引き続き研究を深度化していく予定である。

4.3 バラスト軌道の劣化

バラスト軌道の塑性沈下は、列車荷重の変動がまくらぎを介して道床に伝播することにより促進される。そこで、現地測定や室内実験を行うとともにまくらぎの変形・振動を解析し、道床の振動低減に有効なまくらぎ構造を提案した¹⁶⁾。また、3次元粒状体モデルによる「バラスト軌道劣化モデル」を構築し、列車通過時のバラストの並進・回転挙動等を明らかにしたが、従来の個別要素モデルでは、実用的な解析時間で高周波の振動伝播現象を再現することが困難であった。この点を踏まえ、今年度から開始した将来指向課題「鉄道シミュレータの構築」では、その主要なコアシステムとして、有限要素法、個別要素法を用いた「車輪～路盤間の大規模並列計算モデル」の構築を進めている¹⁷⁾。実際に測定が困難な、速度300km/hで車輪がレール上を転走した際に発生する数千KHzの高周波輪重変動がレール～軌道パッド～まくらぎ～道床～路盤へと伝播し、道床内の目に見えないバラストがどう応答するのかを解析により明らかにすることがその目的である。この研究では、理論解析、実験に続く「第三の科学手法」として注目されているHPC (High Performance Computing) 技術を導入し、高度なシミュレーションによって劣化現象そのものに迫ることを目指している。

5. おわりに

以上に述べた研究のほかにも、パンタグラフ空力音低減手法の開発¹⁸⁾ や構造物音、地盤振動の解明など、環境との調和を目指した研究開発を鋭意進めている。コンピュータシミュレーションは、単に列車走行を模擬するだけでなく、営業線において数年の間に徐々に進行する事象を、繰返し計算により短時間で再現することができる。その点からも、HPCを活用した、トロリ線、車輪、レールの摩耗・損傷やバラスト軌道の沈下等、長期劣化現象の解明とこれらを再現・予測するシミュレータの開発が、今後の重要な研究課題になると考える。

文 献

1) 中村幸太郎：画像処理技術を活用したパンタグラフ接触力

測定手法, 第242回鉄道総研月例発表会講演要旨, pp.11-14, 2011

2) 山下義隆, 池田充：可変剛性ばねによるパンタグラフの動特性制御, 鉄道総研報告, Vol.24, No.4, pp.37-42, 2010

3) 山下義隆, 池田充：インピーダンス制御によるパンタグラフの接触力制御, 鉄道総研報告, Vol.25, No.6, 2011

4) 臼田隆之, ほか4名：新幹線営業線データに基づくトロリ線摩耗予測モデル, 日本機械学会 D&D2010 講演論文集, No.10-8, 510, 2010

5) 臼田隆之, 池田充：トロリ線の振動測定によるすり板段付摩耗の検出, 鉄道総研報告, Vol.25, No.4, pp.35-40, 2011

6) 金鷹, 名村明, 石田誠：レール頭部の摩耗形状予測手法, 鉄道総研報告, Vol.23, No.2, pp.5-10, 2009

7) 伴巧, 名村明：摩擦緩和材に関する最近の動向, 日本施設協会誌, Vol.48, No.10, pp.32-34, 2010

8) 辻江正裕, 赤間誠, 松田博之, 名村明：レール横裂進展予測モデルの開発, 鉄道総研報告, Vol.24, No.12, pp.41-46, 2010

9) 鈴木貢, ほか5名：鉄道車両の地震対策用左右動ダンパの開発, 鉄道総研報告, Vol.25, No.6, 2011

10) 後藤恵一, 曾我部正道, 浅沼潔：逸脱防止ガードの基本性能評価, 土木学会鉄道力学論文集, pp.29-36, 2010

11) 後藤恵一, 曾我部正道, 浅沼潔：鉄道車輪とPCまくらぎの接触力に関する研究, J-Rail2010 講演論文集, pp.461-464, 2010

12) 徳永宗正, 曾我部正道, 上半文昭, 室野剛隆：常時微動による鉄道構造物の等価固有周期推定手法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.6, 2011

13) 浅沼潔, ほか5名：バラスト軌道の地震時変形挙動に関する解析的検討, 土木学会鉄道力学論文集, pp.21-28, 2010

14) 貝戸清之, ほか4名：走行列車荷重下における鉄道橋桁の動的応答の特性とその利用, 土木学会論文集F, Vol.66, No.3, pp.382-401, 2010

15) 村田修, 上半文昭, 斎藤秀樹, 馬貴臣：遠隔非接触振動計測による岩盤斜面の安定性評価法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.2, pp.47-52, 2011

16) 坂井宏隆, 浦川文寛, 相川明, 名村明：構造変更を施したPCまくらぎのFEM解析による振動低減効果の検証, 日本学術会議第60回理論応用力学講演会論文集, GS05-04, 2011

17) 涌井一, 石田弘明：鉄道シミュレータの構築, RRR, Vol.68, No.1, pp.30-33, 2011

18) Sueki, T. et al., "Reduction of Aerodynamic Noise from High-speed Pantograph using Porous Materials," *JSME, Journal of Environment and Engineering*, Vol.5, No.3, pp. 469-484, 2010.