

鉄道のダイナミクスに関する最近の研究開発

鉄道力学研究部
部長 石田 弘明

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に関する課題には、大きく分けて次の二つがある。一つは、列車の走行に伴い発生する各部の振動と騒音であり、振動は、単に揺れるという問題だけでなく、各要素の劣化にも影響を及ぼす。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、車両の走行に不可欠な相互作用を行うと同時に、摩耗・損傷を引き起こす要因ともなっている。もう一つの課題は、地震動や空気力等の外力を受けたときの鉄道システムの応答である。これらの課題は、単に構造物の設計強度評価にとどまらず、走行する車両の安全性など、システム全体の問題として扱わなければならない場合も多い。以上のような鉄道のダイナミクスに関わる現象に対し、我々は、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)。本講演では、特に安全・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、その状況と今後の取組みを報告する。

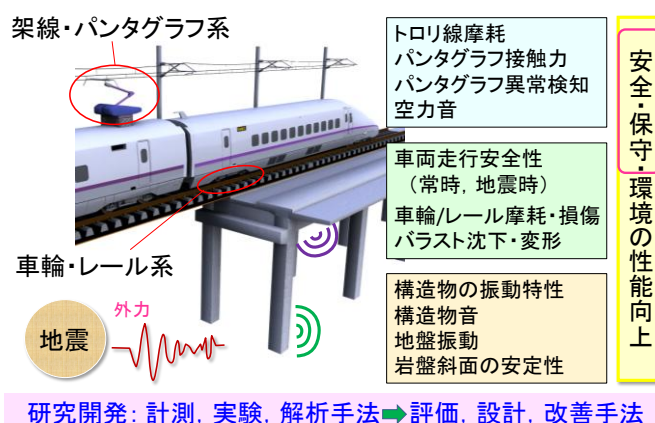


図1 鉄道のダイナミクスに関する研究開発

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。この接触力を測定するために、これまででは主として、パンタグラフに加速度計等の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にセンサを取り付けるため、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、従来法による接触力の測定が困難である。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。

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従性を向上させる方法と、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の開発を進めている(図2)。前者は 20Hz 程度までの高い周波数域、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、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。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。

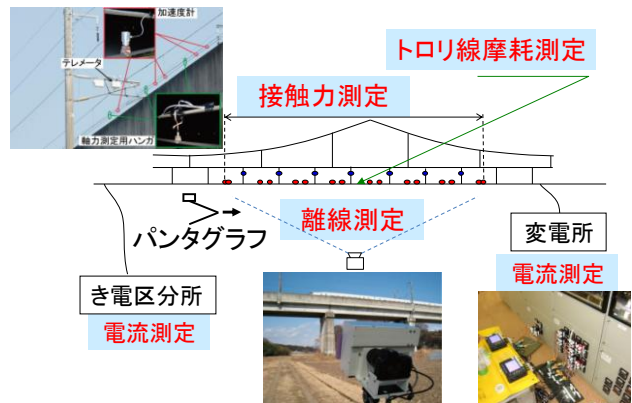


図3 トロリ線摩耗予測のための地上測定

2.3 パンタグラフの異常検出

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。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。

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。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散布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歪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を予測し，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。今後，熱処理レールについても基礎実験を行い，ゲージコーナき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。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・軌道・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ている。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。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をも考慮して，さらに地震被害発生確率の推定精度向上を図っていく。

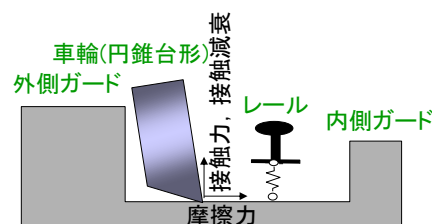


図4 車輪と軌道部材の衝突モデル

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、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(統計的検定手法)により、計測データから、弾性固有周期を自動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桁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。これにより、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る。

4.2 常時の走行安全性（構造物の部材振動、健全度診断）

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。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手法の開発も行っている。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。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。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 kKz 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、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

上述した研究のほかにも、パンタグラフ空力音の低減や構造物音、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繰返し計算を得意としており、HPC を活用すれば、営業線において数年の間に徐々に進行する事象を短時間で再現することができる。その点からも、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。