

鉄道力学に関する最近の研究開発

石田 弘明*

Recent Research and Development on 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 wheel/rail wear, track deterioration and fatigue failure of structures. Further, external forces such as seismic forces shake railway systems and cause various problems relating to the running safety. We have carried out the research and development for solving such problems in order to attain high-grade performance of the railway systems. In addition, we have started to develop a railway simulator using high performance computing technology for clarifying the dynamic wheel/rail/track interaction. This paper describes the current major research activities especially addressed to achieving the highly-safe and reliable railways and the present state of things of the railway simulator.

キーワード：鉄道力学，ダイナミクス，走行安全性，地震，振動，シミュレーション

1. はじめに

鉄道では列車の走行に伴い、架線・パンタグラフ間、車輪・レール間に動的相互作用が生じ、架線、車両、軌道、構造物などの各部に振動、騒音が発生する。これらは、沿線環境のみならず、鉄道システムの各要素の劣化や安全性にも影響を及ぼす。さらに、地震などの外力を受けた場合には、列車運行の安全に直結する様々な問題が起きる。このように鉄道の力学的な現象は、安全性・信頼性、省保守、環境との調和といった鉄道システムに要求される性能に深く関わっている。

鉄道総研ではこれらの性能向上を目指して、動的システムの最適化という観点から現象の解明、解析・評価手法の提案を行ってきた。また、2010年度からは、HPC（High Performance Computing：高性能計算）技術を採用し、列車の走行により生じる動的な現象を計算機の中に再現すべく、「鉄道シミュレータのコア・システム」の開発も進めている。

本稿では、特に安全性・信頼性の向上に関する最近の主な研究開発について、本報告の特集論文に取り上げていないテーマを中心にその概要を紹介する。また、「鉄道シミュレータのコア・システム」についても、開発状況と今後の取り組みを報告する。

2. 安全性・信頼性の向上に係る最近の研究開発

2.1 パンタグラフの異常検出

パンタグラフに異常が発生すると、最悪の場合には広い範囲にわたって電車線設備の損傷を引き起こす恐れがある。そこで、地上設備にセンサを設置し、その区間を通過する全てのパンタグラフを監視することにより、パンタグラフの異常を早期に検出する手法を開発した。本研究で対象としたパンタグラフの異常は、在来線パンタグラフのすり板の段付摩耗と揚力異常である。

すり板の段付摩耗は、トロリ線に複数個の加速度計や変位計を設置し、トロリ線の上下・左右方向の振動を計測して検知する（図1）。その際、取得した波形のフィルタ処理やクルトシス（尖鋭度）の算出を行い、段付摩耗に起因した特徴を抽出する¹⁾。また、パンタグラフの揚力異常は、すでに実用化したパンタグラフ接触力の地上モニタリング手法²⁾を簡素化し、ハンガ軸力とトロリ線の傾斜によりトロリ線・パンタグラフ間の平均接触力を測定して検知する（図2）。これらの異常検出手法を検証するために所内設備を用いた走行試験を実施し、120km/hまでの速度範囲においてすり板の段付摩耗を高い精度で検出可能であること、揚力異常については平均揚力を十分な精度で測定可能であることを確認した。

このほか、パンタグラフの異常にはばねの折損やダンパの固着等による動特性異常がある。上述の方法のように走行中の車両を監視してこれを検知することは難しいが、パンタグラフの上げ操作時にトロリ線の上下加速度と架線・パンタグラフ間の接触力をそれぞれ測定し、パンタグラフの機械インピーダンスを算出すれば、異常を検知することが可能である（図3）。所内試験設備におい

* 鉄道力学研究部 部長

特集：鉄道力学

で、正常なパンタグラフと復元ばねをすべて撤去したパンタグラフを用いて本手法の検証を行い、パンタグラフの動特性異常を検知できることを確認した。パンタグラフの動特性異常は外観の目視検査では見付けにくいことから、本手法を適用すれば、早期に、かつ確実に異常を発見してパンタグラフ事故を防止できると期待される。

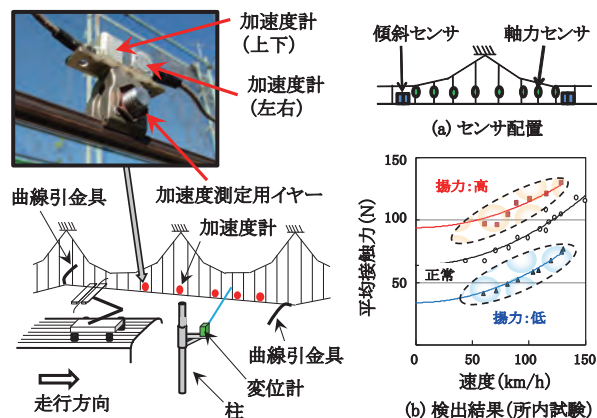


図1 段付摩耗の検出 図2 揚力異常の検出

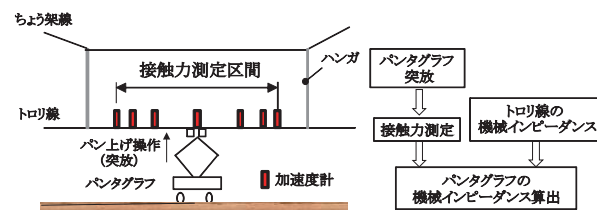


図3 動特性異常の検出

2.2 地震時走行安全性の評価とその向上策

鉄道総研では、これまで地震時走行安全性の評価や安全性向上に向けた研究開発を精力的に進めてきたが、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震を受け、さらにその研究を加速させている。

2.2.1 車両の脱線防止策

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³⁾。このダンパは、従来ダンパと取り替えるだけで地震時に脱線防止効果を発揮し、常時の走行性能には全く影響を及ぼさないという特徴を有している。現在、ダンパの小型化を進める一方、新たにクラッシュャブル左右動ストッパの開発を開始した⁴⁾。これは、台車の左右動ストッパに過大な荷重が作用した時、ストッパの一部をわざと破壊し、車体と左右動ストッパとの遊間を拡げて脱線しにくくする装置である。これと地震対策ダンパを組み合わせればダンパの作用域が拡大し、さらに地震時走行安全性が向上すると期待される。現在、機械式と油圧式の2種類のクラッシュャブル左右動ストッパを試作して、その効果を確認しているところである。

2.2.2 地震時におけるバラスト軌道の変形挙動

ロングレールを管理する上で、軌道の構造や敷設条件など様々な条件を考慮して常時の温度変化に対する軌道の変形や座屈安定性を定量的に評価することが重要である。また近年、地震時の脱線・逸脱防止策について鋭意検討が進められ、これらの対策が講じられるバラスト軌道自体の変形挙動を定量的に評価する必要性が高まっている。そこで、常時の温度変化や地震時の振動等の影響を定量的に評価できる、バラスト軌道の座屈・大変形解析手法を開発した。本解析プログラムでは、様々な形式の構造物や軌道構造を3次元FEMによりモデル化し、道床抵抗力や締結装置の非線形ばね特性を弾塑性モデルとして取り扱うことができる。また、常時の静的座屈解析では、解析ステップごとに抽出した座屈に対して最も敏感な節点に対して弧長法による変位制御を行うことにより、安定して解が得られ（図4）、地震時の動的大変形解析では、道床抵抗力特性に横方向への加振や構造物境界での不同変位（角折れ、目違い）の影響等を考慮して軌道の変形挙動を求めることができる⁵⁾。

本手法による解析結果の妥当性については、実物大バラスト軌道による静的座屈実験の結果や動的な加振実験の結果等により検証している（図5）。また、橋台区間と盛土区間の構造物境界部におけるバラスト軌道を対象として動的FEM解析を行い、不同変位によるPCまくらぎの道床横抵抗力低下量を求めた。これをもとに図6に示す高架橋モデル線区の地震応答解析を行い⁶⁾、構造物の応答加速度と角折れ、目違いの関係を整理すると

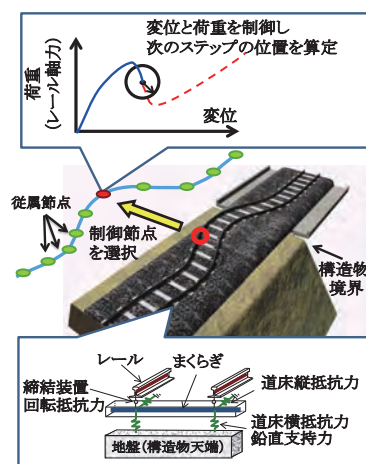


図4 バラスト軌道の座屈・大変形解析手法

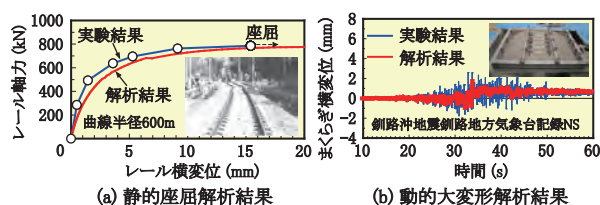


図5 座屈・大変形解析の検証例

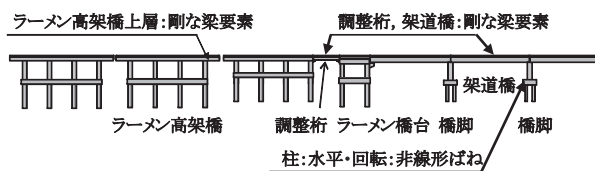


図6 高架橋モデル線区 (FEM モデル)

もに、残留変位を推定してノモグラムを作成した。この残留変位推定用のノモグラムを利用すれば、構造物群全体をモデル化して応答値を計算することにより、バラスト軌道区間における構造物境界部の地震に対する危険度を把握し、弱点箇所を抽出することができる。

2.2.3 地震時走行安全性の評価

地震時走行安全性の評価には、車両運動シミュレータ VDS (Vehicle Dynamics Simulator)⁷⁾ や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)⁸⁾ を順次機能向上しながら活用してきた。後者を用いて、巨大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策の評価にも取り組んでおり、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行っている⁹⁾。さらに脱線後の車輪と各種軌道部材との衝突現象を精緻に表現可能な、有限要素モデルを用いた脱線及び高速衝撃応答の解析システムを構築した¹⁰⁾。巨大地震発生時には列車と軌道の間に大きな衝撃力が生じることから、構造物の動的応答に及ぼす列車/構造物間の動的相互作用の影響についても検討を進めている¹¹⁾。また、バラスト軌道上での脱線後の列車走行に関し、車輪とまくらぎの衝突や道床バラスト上の走行による走行抵抗が車両挙動に及ぼす影響、脱線車両の編成内での位置やブレーキ力の差異による列車座屈の可能性等を評価することが可能な解析プログラムを新たに構築した^{12) 13)}。

3. 鉄道シミュレータのコア・システム

3.1 RESEARCH2010におけるシミュレータ開発計画

鉄道シミュレータとは、列車の運行に伴い生じる様々な事象をコンピュータ上に再現したもので、将来は、鉄道線区の安全性、信頼性、利便性、経済性等を評価し、鉄道の運営全般を支援するツールとすることを目指している。2010年度より開発を進めている鉄道シミュレータのコア・システムは、鉄道のダイナミクスに関わるシミュレーションのモデルと解析プログラムで、「バーチャル鉄道試験線」と「地震災害シミュレータ」の構築を目標に開発を進めている(図7)。バーチャル鉄道試験線は常時の列車走行で発生する振動、騒音、軌道の損傷などを再現する試験線(図8)、地震災害シミュレータは

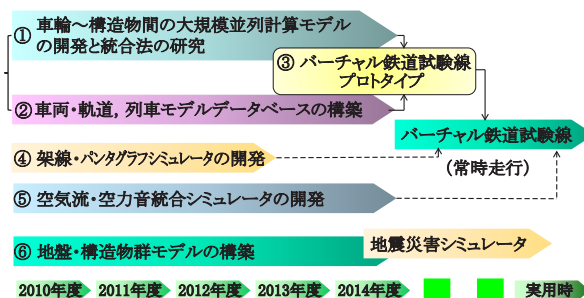
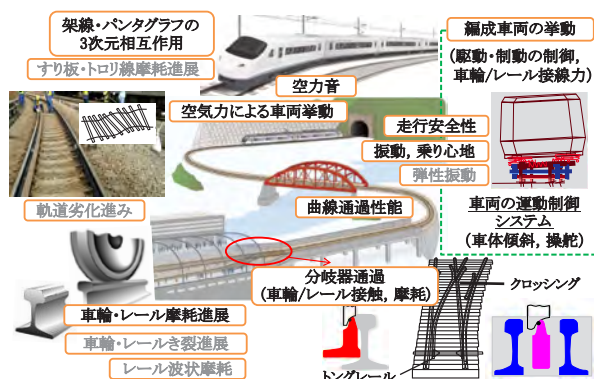


図7 コア・システムの開発スケジュール



※ 灰色文字は2015年度以降の完成を目指している項目

図8 バーチャル鉄道試験線

延長数百 km にわたる鉄道線区を自動的にモデル化し任意の位置に断層を想定して発生し得る被害シナリオを模擬できるシミュレータである¹⁴⁾。本稿では特に、前者の開発状況について述べる。

バーチャル鉄道試験線プロトタイプは、マルチボディダイナミクス的手法により列車走行を表現する車両・軌道・列車モデルデータベースを軸にして、レールの摩耗・損傷や軌道劣化の現象を解明するための車輪～構造物間の大規模並列計算モデルとの連携を図ったものである。具体的には、後者の解析から導出した数値実験式を列車走行解析プログラムに組み込んだものとする計画である。この仮想的な試験線は、単に現車走行試験を再現して鉄道施設や車両の挙動を調べるだけでなく、列車が繰り返し走行することにより進展する長期劣化現象、すなわち、車輪/レールの摩耗や損傷、軌道不整などをも予測するという点に特徴がある。さらにこのプロトタイプと架線・パンタグラフシミュレータ¹⁵⁾、空気流・空力音シミュレータ¹⁶⁾との間でデータを相互に受け渡し、図8に示したような様々な現象を解析する。

3.2 車輪～構造物間の大規模並列計算モデル

前節に述べた通り、バーチャル鉄道試験線は長期劣化現象の予測を重要な目標の一つとしている。そこで、これまで観測が困難であった高周波の車輪/レール間作用力変動やその道床への伝播状況を解明し、レールの摩耗・損傷や軌道の劣化メカニズムを明らかにするために、

特集：鉄道力学

HPC を活用した車輪～構造物間の大規模並列計算モデルの構築を進めている。その基礎となる車輪～路盤間の大規模並列計算モデルのイメージを図9に示す。

車輪とレールの転がり接触解析については、現在すでに、車輪に軸箱上下荷重と駆動力を与えて速度 300km/h まで加速できる弾塑性 FEM (有限要素) モデルを構築し、実車輪 / レール相当モデルの接触面に発生するすべりや応力と歪み、数 kHz オーダーの動的な作用力変動を求めることが可能となった¹⁷⁾。有道床軌道におけるまくらぎの振動特性について、実験と FEM 解析により明らかにした¹⁸⁾ ほか、砕石の尖った形状や内部の波動伝播が解析できる DEM (個別要素法) を用いたバラスト軌道モデルも構築中である。すでに砕石の FEM モデルを個別要素法ソフトウェアで締め固めた砕石集合体に衝撃荷重が作用した時の解析を行い、衝撃波の伝播経路やその減衰メカニズム、砕石同士が接触している稜角部に大きな応力が発生することなどを明らかにした¹⁹⁾。

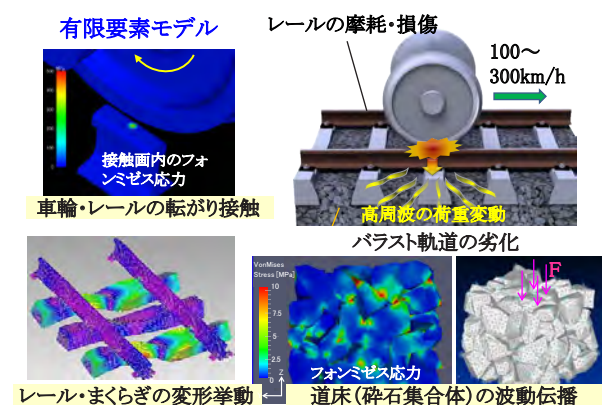


図9 車輪～路盤間の大規模並列計算モデル

4. おわりに

鉄道のダイナミクスに係る安全性・信頼性の向上を目指した最近の主な研究開発と鉄道シミュレータの開発状況について報告した。鉄道シミュレータは、今後、各コア・システムを完成させるとともに、これらを統合してバーチャル鉄道試験線へと発展させていく計画である。このシミュレータは長期劣化現象の予測を主な狙いの一つとしている。鉄道システムの最適化に向け、その開発と並行して車輪 / レールの摩耗・損傷メカニズム解明や進展予測等の基礎研究をさらに加速することが重要と考える。

文献

1) 白田隆之, 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
 2) 白田隆之, 池田充, 山下義隆, 源導士: 営業線におけるパンタグラフ接触力の地上モニタリング, 鉄道総研報告,

Vol.24, No.2, pp.29-34, 2010

3) 鈴木貢, ほか5名: 鉄道車両の地震対策用左右動ダンバの開発, 鉄道総研報告, Vol.25, No.6, pp.17-22, 2011
 4) 宮本岳史: 地震時の車両脱線防止に向けた取り組み, RRR, Vol.69, No.3, pp.14-17, 2012
 5) 浅沼潔, ほか5名: バラスト軌道の地震時変形挙動, 鉄道総研報告, Vol.25, No.6, pp.47-52, 2011
 6) 浅沼潔, 関根悦夫, 曾我部正道, 後藤恵一, 徳永宗正: 地震時における構造物上のバラスト軌道の変形挙動解析, 土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.311-312, 2011
 7) 宮本岳史, 石田弘明, 松尾雅樹: 地震時の鉄道車両の挙動解析, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.64, No.626, pp.236-243, 1998
 8) 松本信之, 曾我部正道, 涌井一, 田辺誠: 構造物上の車両の地震時走行性に関する検討, 鉄道総研報告, Vol.17, No.9, pp.33-38, 2003
 9) 後藤恵一, 曾我部正道, 浅沼潔: 数値解析による逸脱防止ガードの性能評価, 鉄道総研報告, Vol.25, No.6, pp.41-46, 2011
 10) 後藤恵一, 曾我部正道, 浅沼潔, 徳永宗正: 有限要素法による車両 / 軌道の加振モデルの構築, 土木学会, J-Rail2011 講演論文集, pp.337-340, 2011
 11) 徳永宗正, 曾我部正道, 後藤恵一, 浅沼潔: 構造物の地震時動的応答に及ぼす列車 / 構造物間の動的相互作用の影響, 土木学会, J-Rail2011 講演論文集, pp.289-292, 2011
 12) 葛田理仁, 植木健司, 宮本岳史: 鉄道車両の脱線後まくらぎ上走行縮尺模型試験とその運動シミュレーション, 日本機械学会, D&D 講演論文集, 337, 2011
 13) 葛田理仁, 宮本岳史, 植木健司: 脱線後の編成車両の挙動に着目したシミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.26, No.8, pp.17-22, 2012
 14) 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
 15) 池田充: 有限要素法による架線・パンタグラフ系の3次元運動シミュレーション, 日本機械学会, D&D 講演論文集, 411, 2011
 16) 高石武久: 複雑形状物体から発生する空力音の並列計算, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.78, No.790, pp.1206-1219, 2012
 17) 高垣昌和: 高速鉄道の車輪レール間の転がり接触に関する動的解析, イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発シンポジウム, RISS, pp.153-158, 2011
 18) 坂井宏隆, 浦川文寛, 相川明, 名村明: 振動特性を考慮した種々の構造を持つ PC まくらぎの3次元 FEM 解析, 土木学会論文集 A2, Vol.67, No.2, pp.I_955-I_964, 2011
 19) 浦川文寛, 相川明: バラスト砕石集合体の弾性体モデル構築と振動解析, 土木学会論文集 A2, Vol.67, No.2, pp. I_395-I_404, 2011