

鉄道力学に関する最近の研究開発

池田 充*

Recent Research and Development in Railway Dynamics

Mitsuru IKEDA

Train operation causes numerous dynamic problems such as vibrations and noises. These phenomena induce not only environmental degradation but also deterioration of railway elements such as wheel/rail wear, track deterioration and fatigue failure of structures. Furthermore, seismic force acting on railway systems causes various problems relating to the running safety. We are making progress in the research and development to resolve such problems from the perspective of dynamics. For this purpose, we have started to develop a railway simulator using high performance computing technology for clarifying the dynamic behavior of the railway system. This paper will describe our current research activities in order to achieve a highly-safe and reliable railway system.

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

1. はじめに

鉄道を他の交通機関，例えば自動車や航空機などに対して比較したとき，その顕著な特徴として，移動体である車両とこれを支持・案内する地上設備との間に無視し得ない動的相互作用が存在し，これがシステム全体の安全性，信頼性，保守性，あるいは環境調和性などに大きな影響を与えているということを挙げる事ができよう。もちろん，自動車でも橋梁などにおいては道路との間の連成振動が問題となるし，航空機は空気との間の動的相互作用によって飛行し，その影響によって引き起こされた空気の乱れが騒音として問題となる。しかしながら，鉄道においては，架線／パンタグラフ間，車輪／レール間，レール／構造物間などにおける動的相互作用が，列車の安全運行を維持するうえで本質的な影響を与えている。これが，鉄道事業者が車両と地上設備の両方を維持，管理している所以でもある。

鉄道総研では，鉄道システムの安全性向上，高速化，保守性の向上などに資することを旨とし，ダイナミクスという観点に立った研究開発を進めている。本稿では，車輪とレールの転がり接触など実験・観察が難しい現象の解明に向けた鉄道シミュレータの構築や，地震時の列車走行安全性の向上策に関わる研究などについて概説するとともに，常時の列車走行により引き起こされる動的相互作用に関わる最近の研究開発について概説する。

2. 鉄道シミュレータ

2.1 鉄道シミュレータの開発計画

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するものである¹⁾。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ためのツールとして，鉄道総研では2010年より鉄道シミュレータのコアシステムの構築を開始している。現在の開発スケジュールを図1に示す。

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を行うプログラム群からなり，「バーチャル鉄道試験線」と「地震災害シミュレータ」とに大別される（図1）。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，軌道の損傷などをコンピュータ上に再現する仮想的な試験線（図2）である。一方，地震災害シミュレータは延長数百kmにわたる鉄道線区を自動的にモデル化し，任意の位置に想定した断層が引き起こす地震動が鉄道構造物に与える被害

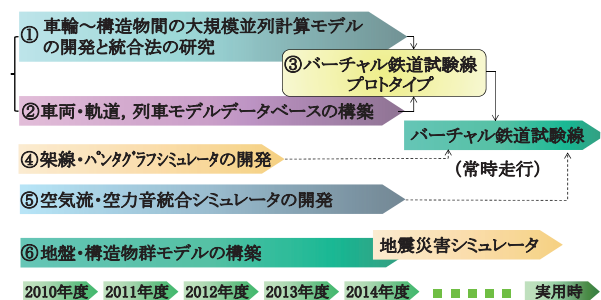
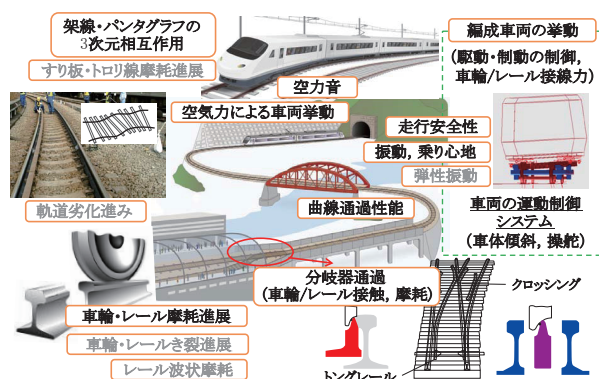


図1 鉄道シミュレータのコアシステム開発スケジュール

* 鉄道力学研究部 部長

特集：鉄道力学



※灰色文字は2015年度以降の完成を目指している項目

図2 バーチャル鉄道試験線

のシナリオを模擬するシミュレータである²⁾。

このうち、バーチャル鉄道試験線については、単に列車運行時の車両や地上設備の動的な挙動を再現するのみならず、経年による地上設備の長期劣化現象、すなわち、車輪/レールの摩耗や損傷、バラスト軌道の沈下などを予測可能とすることを目標として掲げ、その実現に向けて開発を進めている。ただし、その完成にはまだ年月を要するため、マルチボディダイナミクスによりモデル化した列車と軌道の動的挙動を評価するシミュレータ³⁾をバーチャル鉄道試験線のプロトタイプとして位置付け、これに対して、レールの摩耗・損傷や軌道の劣化現象を再現するためのツールを漸次付加していく計画としている。

2.2 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では長期劣化現象の予測、すなわちレールの波状摩耗やき裂の進展予測、バラスト軌道の沈下予測などを重要な開発目標の一つとしている。その実現のためには、車輪/レール間の転がり接触や、レール/構造物間の動的相互作用に大きな影響を与えるバラストの詳細な挙動などを、力学的に解明することが不可欠である。しかしながら、これらを実験的あるいは理論的に解明することは容易ではない。そこで、これらの観測困難な現象を数値的に再現し、それに基づいて現象を物理的に理解することによって、長期劣化現象を適切に表現できるマクロな近似式を構築して、漸次バーチャル鉄道試験線プロトタイプに反映させていくという戦略をとっている。

車輪/レール間の転がり接触の評価に関しては、大規模並列計算を前提とした3次元有限要素法解析プログラムを開発している(図3)。本プログラムは、車軸に回転トルクを与えることによって加速時の転がり現象を再現し、車輪とレールとの間の接触面(コンタクトパッチ)における応力分布を詳細に解析することができる。これにより、図3(b)～図3(c)に示すように、コンタクトパッチにおける固着領域とすべり領域を数値的に再現するこ

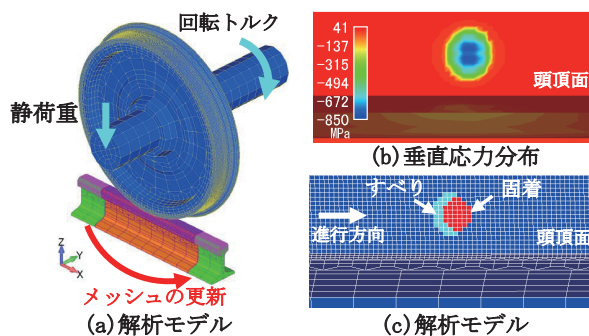
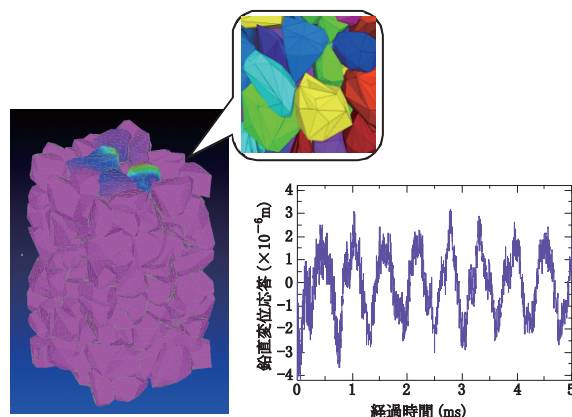


図3 車輪/レール間の転がり接触解析

とができるようになった^{4) 5) 6)}。現在は1軸1輪の解析のみが可能であるが、今後は2軸2輪の解析を可能にするとともに、レール表面に不整がある場合や、レールが弾性支持されている場合の解析を進め、レールの波状摩耗やシェリングなどの発生メカニズムの解明を進めていく予定である。

一方、列車通過時のバラストの運動を詳細に解析するため、実軌道と同様につき固められたバラストを再現する手法として、個々のバラストの詳細形状を四面体要素の集合体で表現したうえで、弾性体個別要素法(QDEM)によって付き固め作業を数値的に実施する手法を構築した。さらに、付き固められたバラスト集合体の内部を列車荷重が伝播する様子を有限要素法により解析することによって、列車荷重がバラストを経て路盤へと伝達される際に生じる減衰が、個々のバラストが互いに接触している稜角部の局所的な変形・劣化特性と密接に関連していることなどが明らかとなってきた(図4)^{7) 8) 9)}。



(a) バラスト粒状体モデル (b) インパルス加振に対するバラストの変位応答

図4 バラストの粒状体解析

3. 地震時の列車走行安全性向上策

3.1 長大な構造物の地震時列車走行安全性に関する被害発生確率の算出法

長大な鉄道構造物全体の地震時車両走行性や、地震

に対する各種対策の効果を、総合的に検討することを目的として、線区全体を対象とした地震時被害発生確率の算定手法を確立した^{10) 11) 12)}。この手法は、数十 km 単位の長大な鉄道構造物を疑似的な境界を用いて複数の解析区間に分割し、各解析区間を列車が通過する際に地震が発生した場合の挙動の数値解析を並列計算により実行し、これを基に列車に対する被害（脱線、逸脱）の発生確率を評価するものである（図 5 (a)）。本手法により、車両の諸元や速度、構造物の諸元、地震動の種類、震源の方向、各種対策工の効果など、様々なパラメータが列車の被害確率に与える影響を定量的に解析することが可能となった。

トンネル、盛土、高架橋からなる延長 20km のモデル線区に対し、各解析区間の長さを 600m として列車の被害発生確率を求めた例を図 5 (b) に示す。トンネル内や盛土区間では大規模地震に対しても車両の脱線は発生しにくいことや、構造物群上に架道橋のような弱点箇所が存在することなどが確認できる。

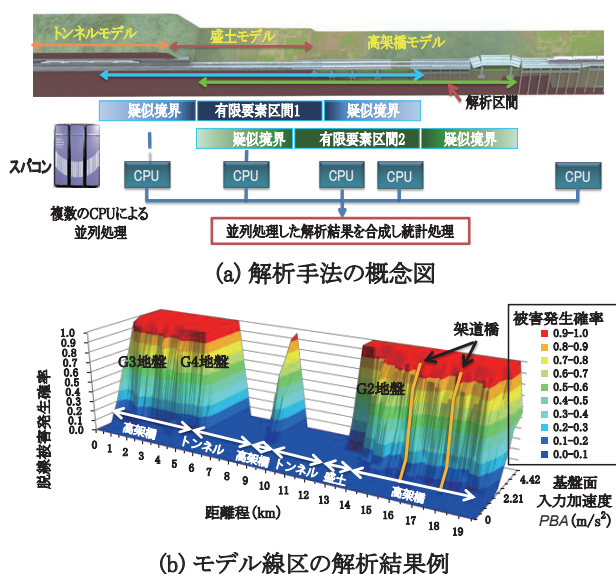
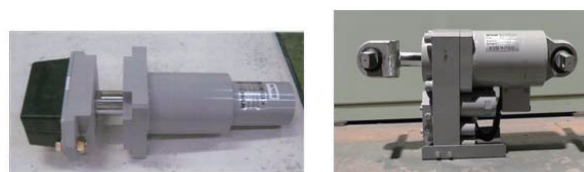


図 5 長大な構造物の地震時列車走行安全性に関する被害発生確率の算出法

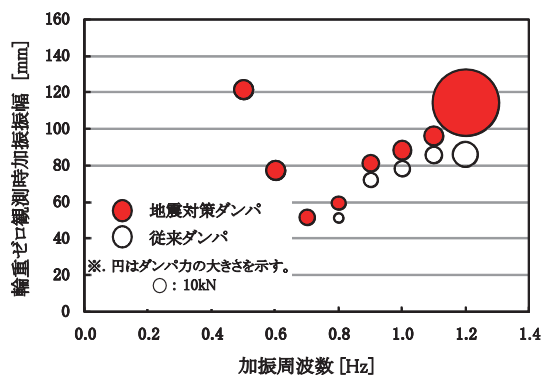
3.2 クラッシュャブルストップと地震対策左右動ダンパ

大きな地震が発生すると、列車各部は平常時とは大きく異なる挙動を示す。この性質を利用し、列車が大きな地震に遭遇した場合のみ機能する特殊なデバイスを台車に組み込むことによって、脱線に対する走行安全性を向上させる手法を提案した。その一つは、台車と車体の間に設けられる左右動ストップに対し、衝撃的な荷重が作用した際にストップ遊間を拡大する機構を付加したクラッシュャブル左右動ストップ（図 6 (a)）であり、もう一つは台車と車体の間に設けられる左右動ダンパに対して、ピストン速度が平時の使用範囲を超えた場合に減衰

力が増加する機構を付加した地震対策左右動ダンパ（図 6 (b)）である^{13) 14)}。これらはいずれも平常時の走行性能には全く影響を及ぼさない。この 2 つのデバイスを同時運用することにより、地震時に脱線防止効果を発揮する。現在、図 6 (a), (b) に示すようにこれらデバイスの試作を進めているところである。図 6 (c) は、試作した地震対策左右動ダンパを実台車に組み込み、加振試験を実施した結果であるが、地震発生時に相当する加速度の大きな領域において、ダンパの減衰力を従来品の 3 倍程度に増加させることが可能であることを確認している。



(a) クラッシュャブル左右動ストップ (b) 地震対策左右動ダンパ



(c) 地震対策ダンパによる地震時安全性向上効果

図 6 クラッシュャブルストップと地震対策左右動ダンパ

4. 平常時の列車走行における動的相互作用

2 章で紹介した鉄道シミュレータのコアシステムの一つとして、架空電車線の幾何学的非線形性を考慮したうえでその動的挙動を解析するツールである、非線形有限要素法に基づく架線・パンタグラフ系 3 次元動的相互作用シミュレータを開発した^{15) 16) 17)}。従来のシミュレーション手法では無視されていた、トロリ線やちよう架線の曲げ剛性の影響や、架線に与えられた左右偏位に伴う横張力によって生じる曲線引金具や吊り金具の姿勢変化を考慮した架線の 3 次元静構造計算が可能であり、曲線引金具によるトロリ線の引上り量などを正確に評価することができる。さらに、パンタグラフの走行により生じる系全体の動的挙動についても、曲線引金具や吊り金具の非線形な特性を正確に再現したシミュレーションが可能である（図 7）。

また、これと並行してパンタグラフの解析モデルに

特集：鉄道力学

ついても改良を進めており、従来から用いられているばね・質点モデルの代わりに、マルチボディダイナミクスに基づく運動解析モデルを開発している。今後、このモデルを架線／パンタグラフ系の運動シミュレータに統合し、より高い精度のシミュレーションを実現する予定である。

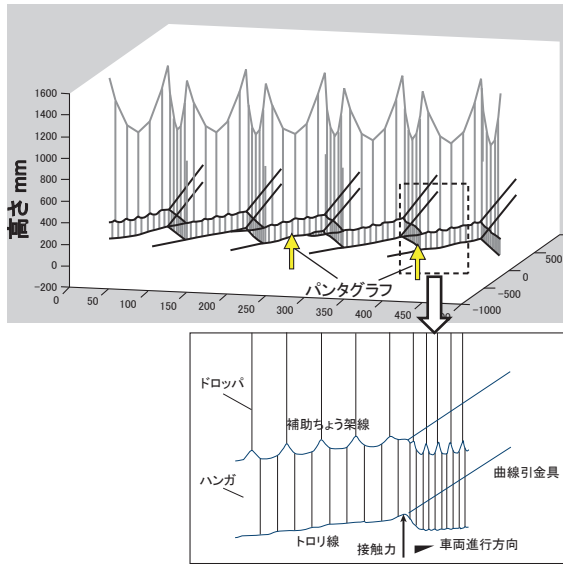


図7 架線／パンタグラフ系の3次元運動シミュレータ

5. おわりに

鉄道のダイナミクスに係る安全性向上、高速化、保守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。今後、鉄道シミュレータを構成する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。これらツールを活用することによって、車輪／レールの摩耗・損傷メカニズムの解明や軌道劣化の進展予測手法の確立などを進めるとともに、境界領域で発生する動的相互作用の物理的な理解を深めることにより、鉄道システムの最適化に向けた研究開発がより一層加速されるものと考えている。

文献

1) 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
 2) 坂井公俊, 室野剛隆, 京野光男: 鉄道盛土の地震被害簡易推定手法の提案, 土木学会論文集 A1, Vol.68, No.3,

pp.542-552, 2012
 3) 辻江正裕 他: MBD ソフトを援用したレール摩耗形状予測モデルの構築, Translog2011, 2011
 4) 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
 5) 高垣昌和, 坂井宏隆, 相川明, 奥田洋司: 動的転がり接触解析による車輪・レール間の挙動評価, 日本機械学会第25回計算力学講演会論文集, F503, 2012
 6) 坂井宏隆, 高垣昌和, 林雅江, 相川明: 3次元大規模並列有限要素法を用いた車輪～レール間の動的転がり接触解析, 鉄道工学シンポジウム論文集 第17号, 2013
 7) 相川明: 実軌道測定に基づくバラストに加わる衝撃荷重とその減衰特性, 鉄道総研報告, Vol.27, No.4, pp.41-46, 2013
 8) 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
 9) 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, No.67, No.2, pp.I_955-I_964, 2011
 10) 曾我部正道, 原田和洋, 浅沼潔, 丸山直樹, 渡辺勉: 連続する鉄道構造物群の地震時車両走行性, 土木学会鉄道力学論文集, Vol.13, pp.177-184, 2009
 11) 曾我部正道, 川西智浩, 後藤恵一, 渡辺勉, 室野剛隆, 谷村幸裕: 地盤応答解析に基づく地震時車両走行性評価, 鉄道力学論文集, Vol.14, pp.106-113, 2010
 12) 曾我部正道, 後藤恵一, 徳永宗正, 渡辺勉: 地震動の違いが地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線に及ぼす影響, 土木学会鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.16, pp.133-140, 2012
 13) 鈴木貢: 地震時脱線対策左右動ダンパ, R&M, Vol.20, No.3, pp.17-20, 2012
 14) 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, pp.17-22, 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&D2011 講演論文集, 411, 2011
 16) 池田充: 架線・パンタグラフ系の運動シミュレーションにおけるペナルティ係数の検討, 日本機械学会 2012 年度年次大会, J102025, 2012
 17) 池田充: コンパウンド架線に対応したFEMに基づく架線パンタグラフ系3次元運動シミュレーション, 第19回鉄道技術連合シンポジウム, 2012