

鉄道のダイナミクスに関わる 数値シミュレーションの研究動向

池田 充*

The Recent Trend in Research on Numerical Simulation Techniques Applied to Dynamics in the Railway System

Mitsuru IKEDA

RTRI has been making efforts toward the creation of innovative technical solutions for various dynamic problems caused by the characteristics of the railway system. Numerical simulation technique is one of the powerful tools for promoting such research works; therefore, RTRI started developing organized simulation tools named “Railway Simulator” using high performance computing technologies in 2010. This paper describes the recent trend in research on numerical simulation techniques applied to research on dynamics in the 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

1. はじめに

自然科学に関わる研究を進めるうえで数値シミュレーションはいまや欠かせない存在であり，計算科学は理論，実験と並ぶ科学の第3の形態と見なされるようになってきている。ただし，計算科学が理論，実験と大きく異なる点は，コンピュータの計算能力が3年で約10倍，10年で約1000倍という割合で急速に向上していることである¹⁾。こうしたコンピュータの能力向上は，計算精度の向上，あるいは解析可能な現象の拡大にそのまま直結する。つまり，数値シミュレーションの適用可能範囲が急速に拡大していることを意味している。

こうした状況を受け，鉄道総研では2014年度に終了した前基本計画（RESEARCH2010）において，シミュレーション技術の高度化を基礎研究における重点項目の一つと定め，シミュレーション手法の開発・改

良を進めてきた。2015年より開始した現基本計画（RESEARCH2020）においても，引き続きシミュレーション技術の高度化を研究開発の重点事項の一つとして推進することとしている。その柱として，列車運行に関わる様々な事象の数値シミュレーションを実現するとともに，複数のシミュレーションを連成して実行する環境を整備するため，鉄道シミュレータ（図1）の構築を2010年より進めている^{2) 3)}。

本稿では，鉄道のダイナミクスに関わる数値シミュレーションに焦点を絞り，その研究動向について紹介する。

2. 観察できない現象を再現するシミュレーション

数値シミュレーションを活用する利点の一つは，理論解析が難しく，しかも実験による観察も困難な現象であっても，系の支配方程式さえ導くことができれば，その挙動を数値的に再現することが可能なことである。本章ではこうした事例について紹介する。

2.1 車輪とレールの動的転がり接触解析

鉄道車両は，車輪とレールとの間に作用する接触力によって支持されるとともに，左右方向にガイドされ，さらには加減速に必要な駆動力を与えられる。この接触力は，一般にコンタクトパッチと呼ばれる小さな接触領域内に作用するが，このパッチの大きさはたかだか十数ミリ程度に過ぎないことから，接触力によって車輪やレールに作用する応力は車両が静止状態にあっても部分的に鋼の降伏応力を超える，つまり塑性化している。しかも，車輪はレールに対して常に微小なすべりを伴いながら転

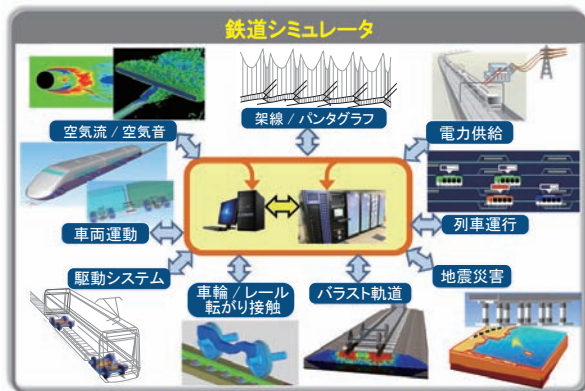


図1 鉄道シミュレータの概要

* 鉄道力学研究部 部長

特集：鉄道力学

動しており、こうした微小すべりによって車輪に駆動力が発生する。このようなコンタクトパッチ内の接触力の特徴は、車両の走行安全性に影響を与えることはもちろんであるが、レール踏頂面や車輪踏面に摩耗や疲労を引き起こす直接の原因でもあることから、車輪とレールの転がり接触現象を詳細に把握することは非常に重要である。

車輪とレールの転がり接触の理論的な取扱いは、カーターやカルカーにより提案⁴⁾されているが、これらは弾性理論（線形理論）であり、塑性変形の影響を説明できない。一方、転動する車輪のコンタクトパッチの形状を超音波センサにより計測する試みも進められている⁵⁾が、計測が可能であるのはごく低速に限られるうえ、応力分布を定量的に計測することはできない。このように、車輪とレールの転がり接触は複雑な現象であり、観測も難しいことから、数値解析によるアプローチが有効である。カルカーにより開発された計算プログラム CONTACT⁴⁾はその代表例であり、多数の活用事例があるが、境界要素法をベースとしていることから材料の非線形性の取扱いに弱点がある。さらに、レール継目部のような不連続部を通過する際の挙動を取り扱うことができない。

そこで鉄道総研では、材料の非線形、幾何学的非線形などをより厳密に取り扱うことが可能で、しかも動的な転がり接触を解析することのできる数値シミュレーションツールとして、東京大学奥田教授との共同研究で車輪・レール転がり接触シミュレータ⁶⁾の開発を進めている。本シミュレータは大規模並列有限要素法構造解析ソフトウェア FrontISTR をベースとして構築したものであり、車輪踏面ならびにレール踏頂面を一樣かつ細かいメッシュ（ファインメッシュ）に分割し、コンタクトパッチ内の応力分布を十分な解像度で解析することにより、何らかの接触モデルの前提によらない動的転がり接触挙動を解析可能としたことが特徴である。一様なファイン

メッシュの採用によるモデル規模の増大を防ぐため、ある一定長さのレールモデルを複数結合してレールをモデル化し、進行方向最後尾側のレールモデルを一定のタイミングで進行方向前側に移動させる手法（キャタピラメッシュ：図2 (a)) を考案するとともに、分散型並列計算を効率的に実行するために車輪モデルとレールモデルの有限要素のうち接触ペアとなる有限要素を常に同一の分散領域に配分するオンメモリ領域分割機能を組み込んでいる。車輪が転動する際に車輪、レールに生じる応力分布とコンタクトパッチ内の接線方向接触力分布を本シミュレータにより計算した結果を、図2 (b) および図2 (c) にそれぞれ示す。低速走行時に準静的な転動を行っている場合には、コンタクトパッチ内の応力分布はカルカーの CONTACT により得られる結果とほぼ一致することを確認している⁷⁾。今後、高速走行時の動的転がり接触解析を実施し、結果の妥当性を確認するとともに、曲線区間における転がり接触解析が可能となるようにプログラムの高度化を進める予定である。

また、車輪とレールとの間に介在する水膜の挙動を粒子法的一种である SPH 法により計算するシミュレータの開発にも取り組んでいる⁸⁾。SPH 法とは、連続体を粒子の集合として捉え、個々の粒子の物理量の重ね合わせにより連続体の物理量を表現する手法であり、水膜のように複雑に変形する流体の自由表面の挙動計算に適している。本シミュレータを車輪・レール転がり接触シミュレータと連成させることによって、踏頂面上に水膜が形成されたレールの上を車輪が転動する際の水膜挙動を解析することができる（図3）。現時点では水膜のモデルがまだ2次元であり、現実の水膜挙動をそのまま再現することができないため、今後、モデルの3次元化を行う予定である。

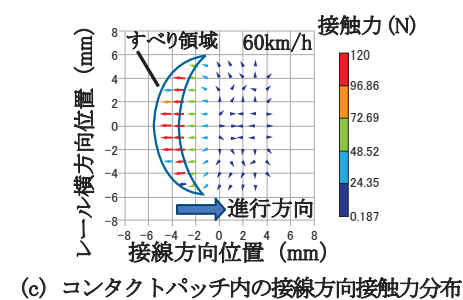
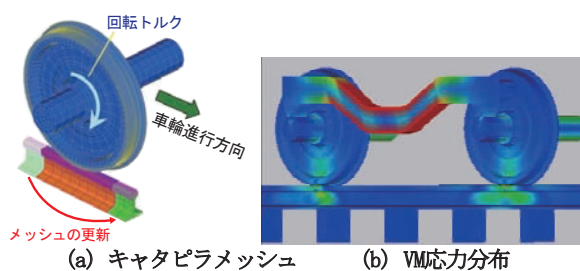


図2 車輪・レール間の動的転がり接触解析

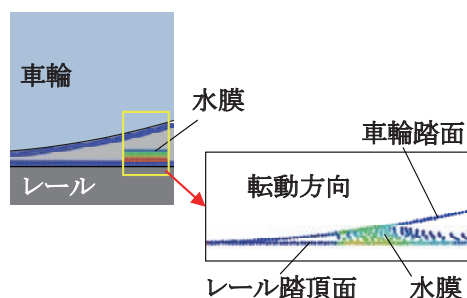


図3 水膜が形成されたレール上を車輪が転動するときの水膜挙動シミュレーション

2.2 個別要素法によるバラスト軌道の動的挙動解析

バラスト軌道は、施工性、排水性に優れ、安価であるうえに補修も容易であることから、在来線を中心に広く用いられている。その反面、列車通過による繰り返しの荷重によってバラスト沈下などの長期劣化が生じることから、良好な軌道状態を維持するためには常に保守作業を

必要とする。こうした保守作業には多くの手間と費用を要するため、軌道の長期劣化現象のメカニズム解明と有効な対策工の提案に関わる研究開発が継続的に実施され、成果を挙げてきた。しかし、バラスト層内部におけるバラスト碎石個々の動的挙動を俯瞰的に観測することが難しいため、バラスト軌道の動的挙動に関しては未だに不明な点も多く残されている。

バラストのような粒状体の解析には個別要素法によるシミュレーションが適している。そこで鉄道総研では、バラスト個々の動的挙動を再現可能な個別要素法に基づく数値シミュレーションツールの開発を進めている。図4 (a) は、筑波大学 松島教授との共同研究により開発した離散体バラスト軌道モデル DEMCS-track により、レール継目部におけるバラスト移動量を計算した例を示したものである⁹⁾。バラスト層のバラスト碎石一つ一つを独立した要素（球剛接バラスト要素）としてモデル化することにより、各碎石が独立して動く様子を計算により再現することが可能となり、列車通過によるバラスト層の構造変化（沈下や流動）を直接捉える事ができるようになった。なお、バラスト碎石の実形状をモデルに反

映するため、DEMCS-Track のバラスト要素は、実際のバラスト碎石の形状測定データに基づいて作成している。本手法はバラストを剛体球の集合体としてモデル化するため、後述の弾性体個別要素法による解析に比べると計算負荷が小さく、軌道弾性化などの各種対策工の効果検証に活用している。

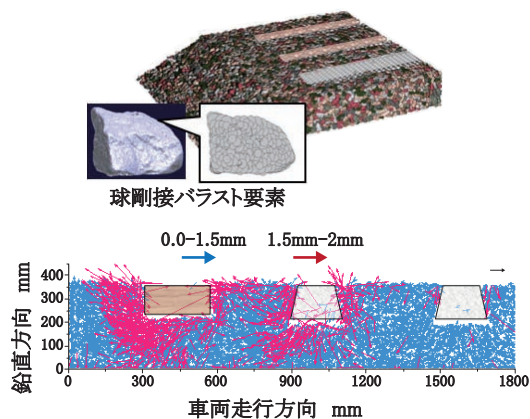
これと並行して、海洋研究開発機構との共同研究において、粒状体解析が可能で、しかも各粒状体要素もつ粘弾性を考慮することが可能な弾性体個別要素法をバラスト軌道に適用したバラスト軌道シミュレータの開発も進めている^{10) 11)}。本シミュレータは、バラスト碎石自体の連続体としての挙動まで再現することが可能であるため、バラスト碎石内部の応力分布や、バラストの弾塑性に起因する荷重伝播を解析することが可能である。ただし、計算負荷が大きいことから、バラスト軌道シミュレータはGPU（画像処理プロセッサ）を計算処理に用いた並列アルゴリズムにより計算を実行している。バラスト軌道シミュレータにより、まくらぎ4本分相当のバラスト軌道を列車が通過した際のバラストおよびまくらぎの挙動解析を行った例を図4 (b) に示す。本例はまくらぎ下をつき固めた直後のバラスト軌道の沈下挙動を計算により再現したものであるが、初期沈下の特徴がよく再現されていることがわかる。詳細は本誌の特集論文を参照頂きたい¹²⁾。

今後は、これら解析ツールが取り扱うことのできる軌道モデルの規模（レール方向長さ）を拡張するとともに、前述した車輪・レール転がり接触シミュレータと連成させることにより、レール継目部など特殊なレール条件下におけるバラストの動的挙動解析を可能にする予定である。

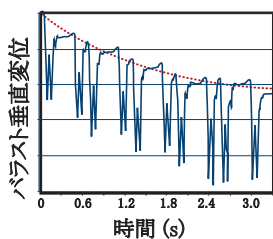
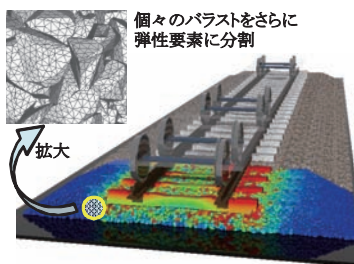
3. 実験の実施が難しい現象を再現するシミュレーション

数値シミュレーションを活用するもう一つの利点は、脱線や衝突などのように実験を行うことが難しい事象、あるいは実験可能であってもコスト等の理由で複数回実施することが現実的ではない事象を、様々な条件下で再現できることにある。本章ではこうした事例の一つとして、大規模地震により車両が脱線した際の、車両ならびに構造物の動的挙動の数値シミュレーションについて紹介する。

大規模地震発生時に車両や構造物がどのような挙動を示すのかを把握することは、逸脱防止装置の性能評価や構造物の耐震性評価において重要である。そこで、車両が軌道から逸脱した状態を縮小模型等により再現する試験が実施されているが、全ての相似則を満足させることは容易ではない。そこで、実験と平行して数値シミュレーションによる検討が進められてきた¹³⁾。ここでは、数値シミュレーションの特性を活かし、大規模地震時における車両の脱線挙動について詳細に検討した研究事



(a) DEMCS-trackによるレール継目部のバラスト挙動解析



(b) バラスト軌道シミュレータ(弾性体個別要素法)によるバラストの動的挙動解析(上下変位分布)

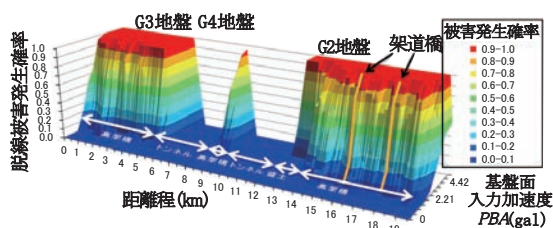
図4 個別要素法によるバラスト軌道の挙動解析

特集：鉄道力学

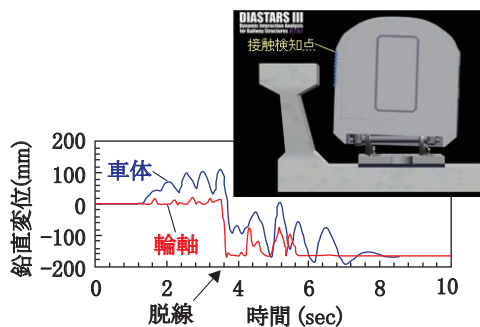
例を示す。

図5(a)は、鉄道線区全体を対象として地震時の被害発生確率をシミュレーションにより算定した例である¹⁴⁾。本シミュレーションは、鉄道総研が開発した車両と構造物との動的相互作用解析プログラム DIASTARS III¹⁵⁾により実施したものであるが、長大な鉄道構造物に対する車両走行を再現するため、疑似的な境界を用いて構造物を複数の解析区間に分割し、各解析区間を車両が通過する際に地震が発生したときの動的挙動を並列計算により計算し、これを基に脱線や逸脱の発生確率を評価していることが特徴である。こうした解析により、車両や構造物の諸元、列車速度、地震動の種類、震源の方向など、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示すことが可能となった。

図5(b)は、大規模地震の発生により車両が脱線したときの挙動を、車両と構造物との接触を考慮したうえで評価した事例である。本解析は、DIASTARS IIIをベースとして、車両と構造物との接触挙動を評価できるように改良を施したプログラムにより実施したものである。具体的には、マルチボディとして表現した車両モデルの表面に接触検知点を配置し、構造物の有限要素モデルの各節点と車両モデル上の接触検知点との間の接触により作用する力をペナルティ法により計算する。大規模地震時に生じる極端な事象を実験により再現することは容易ではないうえ、車両と構造物との接触により作用する力を精度よく測定すること自体が難しいことから、車両の各種逸脱対策工の評価ツールなどとして、本手法の活用が期待されている。なお、本手法の詳細は本誌の特集論文を参照頂きたい¹⁶⁾。



(a) 線区全体を対象とした地震時の列車被害発生確率評価



(b) 車両と構造物の接触を考慮した地震時車両挙動評価

図5 地震発生時の車両と構造物の動的挙動解析

4. おわりに

鉄道のダイナミクスに関わる数値シミュレーションの鉄道総研における研究動向について紹介した。今後、研究開発における数値シミュレーションの役割はますます大きくなると思われる。信頼性が保証された高機能な数値シミュレーション手法の開発を引き続き推進する所存である。

文 献

- 1) 加藤千幸：大規模数値シミュレーションが実現する技術革新，第28回鉄道総研講演会要旨集，pp.1-8，2015
- 2) 高垣昌和：シミュレーション技術で鉄道を支える，RRR，Vol.71，No.5，pp.8-11，2014
- 3) 池田充：鉄道シミュレータのコアシステムの設計・開発，RRR，Vol.72，No.7，pp.52-55，2015
- 4) Kalker J.J., Three-dimensional elastic bodies in rolling contact, Kluwer academic publishers, 1990.
- 5) 深貝晋也，ほか4名：超音波を用いた車輪フランジ接触状態の評価，鉄道総研報告，Vol.28，No.2，pp.29-34，2014
- 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) 林雅江，ほか5名：車輪・レール間の動的接触挙動評価，鉄道総研報告，Vol.28，No.12，pp.29-34，2014
- 8) 坂井宏隆，鈴木正昭：有限要素法および粒子法による車輪・レール間の流体挙動シミュレーション，第20回計算工学講演会，2015
- 9) 河野昭子，松島亘志：離散体モデルを用いた道床バラスト層の変形挙動解析，鉄道総研報告，Vol.28，No.12，pp.41-46，2014
- 10) Nishiura D., Sakaguchi H., "Parallel-vector algorithms for particle simulations on shared-memory multiprocessors", J. of Computational Physics, Vol.230, Issue 5, pp.1923-1938, 2011.
- 11) 西浦泰介，坂口秀，相川明：Multi-QDEM の Multi-GPU 計算によるバラスト軌道の衝撃応答シミュレーション，計算工学講演会論文集，Vol.20，2015
- 12) 相川明，ほか5名：バラスト軌道大規模モデルの構築，鉄道総研報告，Vol.30，No.2，pp.23-28，2016
- 13) 葛田理仁，ほか4名：1/10 模型車両による側壁誘導試験と数値シミュレーション，鉄道総研報告，Vol.28，No.12，pp.23-28，2014
- 14) 曾我部正道，ほか3名：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
- 15) 田辺誠，ほか3名：MBD と FEM を併用した地震時における新幹線編成車両の線路構造上の高速走行シミュレーション，シミュレーション，Vol.29，No.3，pp.56-61，2010
- 16) 後藤恵一，ほか3名：MBD による車体と軌道・構造物等の簡易な接触解析手法，鉄道総研報告，Vol.30，No.2，pp.35-40，2016