

鉄道力学に関する研究の動向

石田 弘明*

Recent Trend of Research 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 including wear due to pantograph/wire contact and wheel/rail contact. Farther, external forces such as seismic forces and wind 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 dealt with chiefly by Railway Dynamics Division, research activities for achieving the optimum railway dynamic system and future prospects especially on the numerical simulations with a computer.

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

1. はじめに

鉄道システムにおける力学的な課題には、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る。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。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。以上のような動力学現象に対し、鉄道総研では、安全性・信頼性の向上、保守の省力化、環境との調和をキーワードに、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。本稿では、現在、主に鉄道力学研究部が進めている研究の中で、特にコンピュータを活用したシミュレーション解析に焦点を当て、その状況と今後の展望を概説する。

2. 最近の研究開発状況

2.1 車両運動解析

鉄道総研では、走行する車両の左右・上下系の運動を詳細に解析できる車両運動シミュレータVDS¹⁾(Vehicle

Dynamics Simulator)を開発した。VDSには多体拘束系解析(マルチボディーダイナミクスMBD)の手法を取り入れており、車両や軌道のモデルファイルを変更するだけで、様々な車両・軌道・走行条件下での運動解析を実行することができる。車両モデルは、剛体同士を線形または非線形特性のばね・ダンパ要素、空気ばね要素、ストッパ要素等を介して結合し構築する。輪軸は一体輪軸、独立車輪軸のいずれも扱うことができ、任意の踏面形状、車輪とレール間の摩擦係数を車輪毎に設定可能である。軌道モデルでは、カントやスラックの付いた曲線、各種のカント逡減に対応した緩和曲線、勾配、軌道変位のほか、左右レールの任意断面形状や脱線防止ガードを設定できる。台上試験に対応した軌条輪モデルもある。VDSの特徴としては、車輪フランジがレール頭頂面に乗り上がる状況²⁾や車輪がレールから離れてまたレール上に戻る様子を再現できること、地震動の入力が可能で車両の大変位挙動を精度よく解析できること³⁾、空気力等の任意の外力を車体に入力できることなどがある。最近では、車両の地震時走行安全性評価や対策の開発にVDSを活用している⁴⁾。なお、現在のVDSは、車輪／レール間に働く駆動・制動力や進行方向に沿ったレールの断面形状変化を厳密にモデル化しておらず、運動制御アルゴリズムの組み込みも容易ではない。

一方、最近では鉄道車両の運動解析ツールとして、市販のソフトウェアが広く用いられている。その例を表1に示す⁵⁾。車輪とレールの多点接触など、複雑な問題を扱うことができるようになってきており、鉄道総研でも、曲線通過中の輪重・横圧解析等にSimpackを利用してゐる。これらの活用方については次章にその概略を述べる。

* 鉄道力学研究部 部長

特集：鉄道力学

表1 市販されている主な車両運動解析ソフト

文献5) より抜粋 (“r” = research, “c” = commercial)

名称	国	用途	形式
A'GEM	カナダ	一般 / 鉄道	r/c
ADAMS	米国 / 欧州	一般 / 鉄道	c
GENESYS	スウェーデン	一般 / 鉄道	c
MEDYNA	ドイツ	鉄道	c
NUCARS	米国	鉄道	r/c
SIMPACK	ドイツ	一般 / 鉄道	c
Univ.Mechanism	ロシア	鉄道	r/c
VAMPIRE	英国	鉄道	c

2.2 構造物～車両間の動的相互作用解析

鉄道総研では、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、連続した構造物群の振動と地震時走行安全性の評価等に利用してきた⁶⁾。DIASTARSは任意の構造物を有限要素でモデル化し、その弾塑性変形や履歴非線形特性、軌道の変形等の詳細を表現できるほか、最近ではVDSのように車両の非線形ばね・ダンパ、ストップや車輪／レール断面の実形状も考慮できるように改良してさらに解析精度を高めている。このDIASTARS IIを活用して地震時走行安全性向上策の検討を進めており、既設の高架橋に対する目違い防止工、基礎補強工等の地震時の変位抑制工法の提案⁷⁾、すべり支承を用いた軟弱地盤上の連続桁式高架橋の地震時走行安全性評価⁸⁾などを行った。さらに脱線後の車輪と逸脱防止ガードとの衝撃を考慮した車両挙動解析ができるようにDIASTARS IIを拡張し(図1, DIASTARS III)、RC製逸脱防止壁を設けたバラスト・ラダー軌道の開発⁹⁾、逸脱防止ガードの有無を考慮した地震被害発生確率の推定を行っている¹⁰⁾。著大地震に対しては、限られた投資枠の中で効果的かつ総合的に被害軽減策を実施していく必要があり、鉄道沿線における弱点箇所の抽出、そのためのリスク評価に関する研究が今後の重要な課題と考えている。

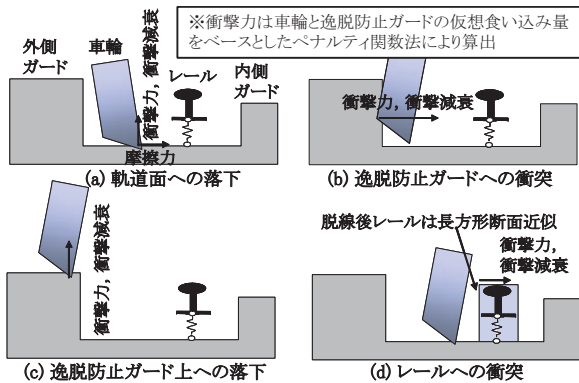


図1 車輪と逸脱防止ガードの力学モデル

2.3 高速鉄道トンネル上の地盤振動解析

DIASTARS IIの車両・軌道・トンネル構造物系モデルを用いてトンネル内を高速列車が走行した際の軸重変動を計算し、その上下加振力をトンネル・地盤系のモデルへ入力してトンネル上の地盤振動を推定する手法を開発した(図2)。後者の解析にはSuperFLUSH/3Dを用い、トンネル躯体はシェル要素、地盤は薄層要素で各々モデル化する。本手法では、軌道とトンネルの構造的な周期性を考慮して加振点を同一軌道構造の繰り返し単位に減じ、計算時間の短縮を図っている。本解析により80Hz以下の地盤振動については実測値にほぼ近い結果が得られることを確認し、地盤条件や軌道構造・特性の相違が地盤振動に及ぼす影響に着目した解析を進めている¹¹⁾。

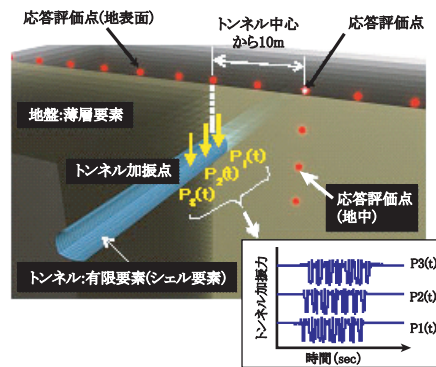


図2 トンネル・地盤系の解析モデル

2.4 道床バラストの挙動解析

車輪通過時にまくらぎ下の個々のバラストがどう応答するかについては、これまで十分に把握されていなかった。そこで、実バラスト形状を多面体で模擬した個別要素法(DEM)によるバラスト軌道の3次元粒状体モデル¹²⁾を開発し、列車荷重を受けたときのバラスト碎石の動的挙動解析を行って、道床内部で発生している現象の解明を進めている(図3)。同時にセンシングまくらぎ、センシングストーンを開発し、営業線でまくらぎ下面圧力やバラストの3次元動的挙動を実測して解析結果の検証を行った¹³⁾。現状では数百Hzオーダーのバラストの高周波振動が十分に再現されていないため、引き続き碎石

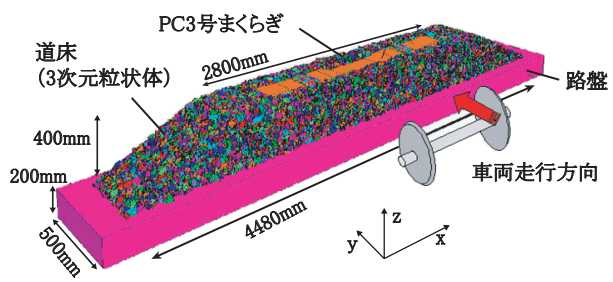


図3 バラスト軌道の3次元粒状体モデル

モデル、摩擦モデルや減衰パラメータの見直しを進めている。また、パラスト軌道モデルのつき固めと解析に1ヶ月強のCPU時間を要しており、計算速度の向上が今後の課題となっている。

2.5 レールのき裂進展解析

レールのき裂や摩耗の進展予測が可能になれば、曲線半径や線区の列車条件に応じてレール種別を適切に選択したり、車輪とレール間の摩擦係数を制御することでレール破断事故を未然に防止し、損傷または摩耗による交換の周期を延伸することができる。そこで、図4に示すき裂進展解析と、摩耗進展解析を統合したレール損傷モデルを開発した。き裂の発生と短いき裂の進展については有限要素法 (FEM) により転がり接触疲労解析を行い、水平裂と横裂の進展は破壊力学理論に基づいて、境界要素法 (BEM) 及びメッシュフリーの境界接点法 (BNM) を用いて解析する。シェリング (水平裂) の進展について解析と室内試験の結果を比較したところ、前者の進展速度の方が高くなり安全側の評価結果となった。現在、き裂・摩耗進展予測の精度向上を図りつつ、設備改善の方向性提示に向けて、線区条件・レール種別による損傷の相違や進展速度の解析を進めているところである。

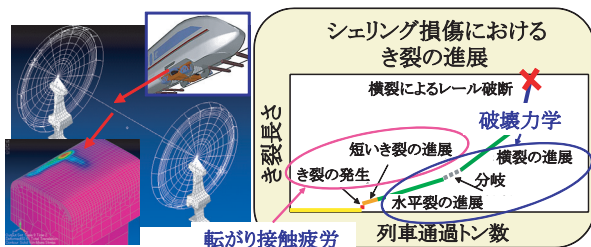


図4 レールのき裂進展モデル

2.6 パンタグラフ周りの流れ場解析

パンタグラフの空力音低減策として舟体の形状改良を進めてきたが、期待したほどの効果が得られなかった。そこで、数値流体解析 (CFD 解析) によりパンタグラフ周りの流れを調べた結果 (図5)、舟体と舟支えとの干渉により発生する縦渦が新たな音源となることが分かり、舟支えの改良法を検討・提案した¹⁴⁾。現状では時速

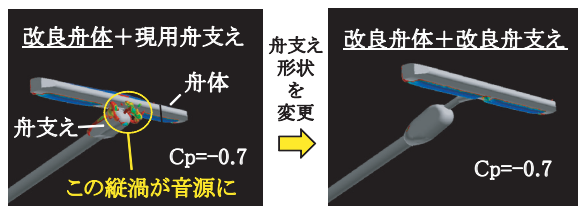


図5 パンタグラフ周りの流れ場解析結果例 (圧力の等値面を表示)

300km/h 域での騒音低減効果を CFD で定量的に示すのが困難であるため、試作したパンタグラフの風洞試験を行い、その効果を確認している。

3. 今後の取組みと展望

3.1 計算力学分野の発展

2002年3月に運用を開始し2009年3月に更新された地球シミュレータ¹⁵⁾をはじめとして、最近のコンピュータの機能向上には目覚ましいものがある。同時に、マルチCPUでメモリを共有する計算ノードを複数結合したスーパーコンピュータに対応し、並列化によって大規模なモデルを高速で計算するソフトウェアの開発も進められている。2010年頃重要となるアプリケーションソフトウェアはライフサイエンス、ナノサイエンス、天文学、環境防災、工学の広い分野に渡り、工学では有限要素法による構造計算と非定常流れの解析が具体的な応用内容として想定されている¹⁶⁾。代表的なソフトとしては既に、革新的シミュレーション研究センター¹⁷⁾が開発した大規模並列有限要素法構造解析プログラム FrontSTR、乱流燃焼解析プログラム FrontFlow/red、乱流音場解析プログラム Front Flow/blue 等がある。また、これらのソルバを統合して連成解析を行うための REVOCAP や全体系最適化ツールの開発が進められ、解析結果を可視化するソフトも充実してきている。一方、計算力学の分野では、これらの有限要素法をベースとしたソフトウェアだけでなく、粒子法などの新たな手法が実用化されつつある。2.3節に述べた DEM もその一種であるが、最近では SPH 法や MPS 法¹⁸⁾が開発され、産業界でも設計ツールとして活用され始めた。粒子法は連続体の支配方程式を粒子の運動として離散化する方法で、メッシュレス、大変形の扱いが容易、各種物理現象の同一アルゴリズムによる計算が可能という優れた特徴を有する。粒子法は気体・液体・固体の相変化やこれらの分裂・合体、噴流、混相流、自由界面問題を扱うことができるほか、構造解析、破壊解析、連成解析等に適した解析手法として今後の発展が期待される。以上のような流れを受け、コンピュータシミュレーションは理論、実験に続く第3の方法として、現象解明のための基礎科学研究から工学応用の分野まで科学技術開発には欠くことのできない存在となってきている。なお、摩擦・摩耗、潤滑等のトライボロジー分野については、まだ精度の良いシミュレーション解析が困難であり、これらが将来の課題の一つと考えられる。

3.2 鉄道総研における大規模数値解析への取組み

(1) 従来解析技術の拡張

従来は力学現象を、ばね・質量系を基本とした簡易なモデルで表現し、非線形な特性を考慮する必要がある場

特集：鉄道力学

合に時刻歴シミュレーションを利用してきた。簡易などというの、準静的変位もしくは数Hzの振動を対象に、弱い連成や微小変位を無視したという意味である。これらの理論モデルは現象の理解を助け、各パラメータの感度把握が容易であるため、有用なツールとして評価・設計に活用されている。ただし、扱う現象が概ね10Hz以上の領域になると、単に質点や剛体でなく連続体や構造体としての局所変形モードを考慮する必要がでてくる。例えば車両の走行解析では、架線、パンタグラフ舟体、車体、台車枠、輪軸、レールを弾性体として捉えなければならない。2.1節に紹介したSimpack等の市販ソフトには最近、FEMの解析結果を取り込んだりSimulinkの制御モデルと統合するためのインターフェースが用意されている⁵⁾。今後は、鉄道総研でもこれらのツールを活用して各要素間の連成を考慮した振動解析を行い、新たなシステムや防振対策等を提案していきたいと考えている。

(2) 大規模モデル解析

計算力学分野のコンピュータシミュレーション技術は格段に進歩しており、現象解明の道具という新しい役割を担い始めている。鉄道総研では、数kHzオーダーの騒音・高周波振動現象を解明するため、複雑形状周りの流れ場解析や路盤～輪軸間の大規模モデル解析が可能な並列計算プログラムを開発していく計画である。後者においては、現在のDEMモデルを改良していく一方で、数千万要素の大規模モデルにより車輪とレールの転がり接触、レール・まくらぎの変形(図6)、道床～路盤の動的挙動を細かく再現し、それらの連成により発現する事象を明らかにすることを目指している。これによって、高周波領域の荷重変動や各部の振動が車輪・レールの摩耗損傷、軌道劣化等に及ぼす影響をさらに明確にしていけば、より効果的な省保守技術の提案につながると考える。

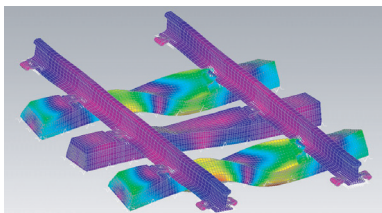


図6 レール・まくらぎの高周波振動解析例

4. おわりに

本稿では、主に鉄道力学に関するシミュレーション技術について、現在の状況と将来展望を述べた。鉄道力学研究部では、常に最新技術の導入を図りながら、動的現象の定量的把握と鉄道システムの最適化をさらに進めて行く計画である。読者諸兄のご指導とご協力をこれからも是非よろしく願いたい。

文献

- 1) 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
- 2) 石田弘明:車両の走行安全性を向上する, 第19回鉄道総研講演会要旨集, 2006
- 3) 宮本岳史, 曾我部正道, 下村隆行, 西山幸夫, 松本信之, 松尾雅樹:大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験, 日本機械学会論文集(C編), Vol.71, No.706, pp.59-65, 2005
- 4) 宮本岳史, 石田弘明:台車改良による地震時走行安全性の向上に関する解析, 鉄道総研報告, Vol.21, No.12, 2007
- 5) Christoph Weidemann: STATE-OF-THE-ART RAILWAY VEHICLE DESIGN WITH MULTIBODY SIMULATION, Abstract of STECH 2009, pp.22-30, 2009.
- 6) 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, 2003
- 7) 曾我部正道, 谷村幸裕, 室野剛隆, 松橋宏治:既設新幹線高架橋の地震時変位抑制工法の性能評価, 鉄道総研報告, Vol.23, No.2, 2009
- 8) 曾我部正道, 青木一二三, 涌井一:線路直角方向にすべり支承を用いた高架橋の地震時列車走行性解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, 2007
- 9) 曾我部正道, 浅沼潔, 渡辺勉, 岡山準也, 涌井一:逸脱防止機能を有するバラスト・ラダー軌道の開発, 鉄道総研報告, Vol.23, No.2, 2009
- 10) 曾我部正道, 丸山直樹, 後藤恵一, 渡辺勉:線区単位での地震時車両走行性評価, J-Rail2009, pp.507-510, 2009
- 11) 渡辺勉, 曾我部正道, 横山秀史, 芦谷公稔, 米澤豊司, 清田三四郎:高速鉄道トンネル上の地盤振動解析, J-Rail2009, pp.371-374, 2009
- 12) 相川明, 浦川文寛:三次元個別要素法によるバラスト軌道の動的応答解析, 鉄道総研報告, Vol.23, No.2, 2009
- 13) 相川明, 名村明, 河野昭子, 浦川文寛:まくらぎ下面圧力とバラスト挙動に関する現場測定法の開発, 鉄道総研報告, Vol.22, No.8, 2008
- 14) 光用剛, 池田充:数値流体解析による舟体・枠組間の空力干渉の検討, 鉄道総研報告, Vol.23, No.2, 2009
- 15) (独) 海洋研究開発機構, 地球シミュレータセンター, <http://www.jamstec.go.jp/esc/index.html>
- 16) 姫野龍太郎:次世代スーパーコンピュータにかけたる夢, 日本機械学会計算力学部門ニュースレター, No.40, 2008
- 17) 革新的シミュレーション研究センター, <http://www.ciiss.iis.u-tokyo.ac.jp/index.php>
- 18) 越塚誠一:粒子法シミュレーションの発展, 日本機械学会計算力学部門ニュースレター, No.42, pp.7-9, 2009