

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

Railway Dynamics is the research field for finding out technical solutions for dynamic problems caused by the characteristics of the railway system. RTRI has been tackling many problems in the field of the railway dynamics. To accelerate this research and development, RTRI has been developing organized simulation tools named “Railway Simulator” using high performance computing technologies since 2010. This simulator mainly focuses on interaction in boundary regions such as wheel/rail/track/structure, pantograph/catenary, and so on. This paper describes our current research activities including the development of the railway simulator for the purpose of achieving 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，接触現象，走行安全性，地震

1. はじめに

鉄道は、支持案内路上に車両を走行させることによって乗客や貨物を運ぶことを特徴とする輸送システムである。車両が主体的な操舵を行うことなく走行可能であることが大きな特徴であり、これによって安全かつ稠密な運行を実現している。その一方で、車両の走行性能に与える支持案内路の影響は大きく、その適切な維持、管理が強く求められる。鉄道総研では、こうした鉄道の特性に起因する動力的問題を体系的に取り扱う研究分野を「鉄道力学」と定義し、鉄道の安全性、利便性、保守性、環境親和性の向上にむけた研究に取り組んでいる。

鉄道力学の本質は力学的相互作用の解明である。普通鉄道では車両の支持案内路の役割をレールが担う。そのため、車輪とレールとの間の相互作用は鉄道車両の運動特性を決定づけるとともに、車輪やレールの長期劣化を引き起こす（図1）。また、レールを線路上に固定する構造が軌道であり、軌道を介して車両と構造物（高架橋、橋梁、トンネルなど）との間の相互作用が生じる。こうした相互作用力によってバラスト軌道の沈下が進行したり、構造物のひび割れが誘引される。さらに、目を上に転じれば、電車線とパンタグラフとの間の相互作用は、車両の集電性能を決定づけるとともに、しゅう動部材であるトロリ線やパンタグラフすり板の損耗を引き起こす。

こうした力学的相互作用には多くのパラメータが関与することから、現象を精緻に調べるためには数値シミュレーションの援用が欠かせない。さらに、実験による再

現や現車における現象把握が困難であり、数値シミュレーションによる再現以外に有効な現象解明ツールがない場合もある。したがって、鉄道力学に関わる研究開発を進めるうえで、数値シミュレーションツールの改良、発展は極めて重要な課題である。こうした認識のもと、鉄道総研では鉄道力学研究部を中心として鉄道シミュレータの構築を進めている。その一方、力学的相互作用の結果として車両や設備に生じる長期劣化現象のなかには、摩耗、疲労などの劣化現象のように、現象を適切に表現する物理モデルがまだ十分に確立していないものもある。こうした現象については、基礎的な実験、ならびに実現象の観察を通じた現象理解が不可欠である。

本稿では、鉄道に固有な力学的相互作用を数値的に再現する鉄道シミュレータの開発状況を紹介するとともに、鉄道力学に関わる最近の研究成果について紹介する。

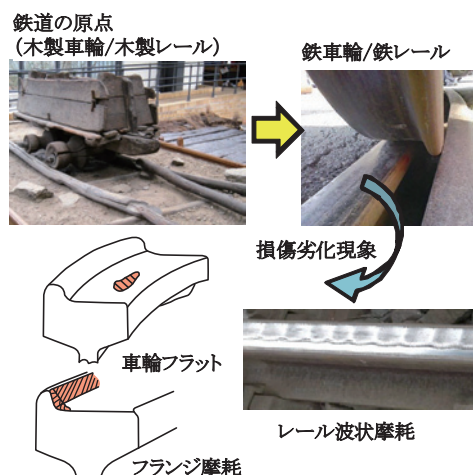


図1 車輪・レールに関わる損傷劣化現象の例

* 鉄道力学研究部 部長

特集：鉄道力学

2. 鉄道シミュレータ

鉄道総研では、鉄道に関わる研究開発の質の向上と効率化を図ることを目的として、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可能な鉄道シミュレータの開発を進めている^{1) 2)}。現在、その第1フェーズとして鉄道シミュレータのコアシステム構築を進めているところである。

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タ群から構成され、「バーチャル鉄道試験線」「空気流・空力音シミュレータ」「地震災害シミュレータ」に大別される。

バーチャル鉄道試験線は、常時の列車走行に伴う軌道、車両、架線の動的挙動をコンピュータ上に再現するシミュレーションツール群である。このうち、図1に示した車輪、レールに関わる損傷劣化現象を解明することを目的として開発を進めている、大規模有限要素法に基づく車輪/レール間の動的転がり接触解析ツール^{3) 4)}については、その妥当性の検証が本特集号に報告されている⁵⁾。こうした車輪やレールの損傷劣化現象は、レールを支えるバラストの長期劣化とも深く関連している。そこで、車輪/レール間の動的転がり接触解析ツールと連成してバラストの動的挙動を再現する、バラスト挙動解析モデルの開発を並行して進めている^{6) 7) 8)}。これは、弾性体個別要素法(QDEM)により、まくらぎならびにバラスト一つひとつの弾性挙動を計算するものであり、車両通過時におけるまくらぎやバラストの挙動ならびに荷重分布を詳細に求めることが可能である(図2)。現在はまくらぎ1本分相当のバラスト軌道を対象とした解析が可能となった段階であるが、レール方向に対してより広い範囲を対象とした解析を可能とする予定であり、軌道沈下に対する有効な対策工の開発への活用が期待されている。

空気流・空力音シミュレータは、物体まわりの流れ場を解析する空気流シミュレータと、流れ場の物理情報

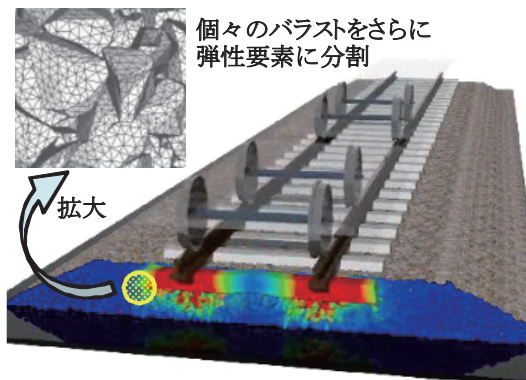
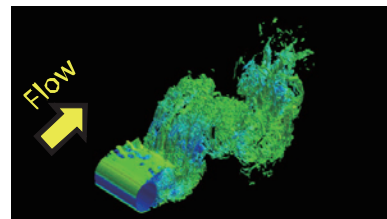


図2 弾性体個別要素法によるバラスト挙動解析例 (まくらぎ、バラストの変位)

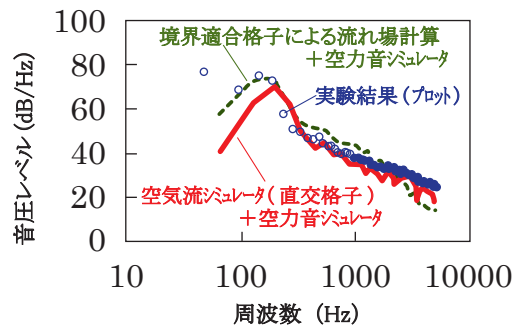
をもとに空力音の大きさを解析する空力音シミュレータとを統合したものである。このうち空気流シミュレータについては、流れ場解析においてしばしば直面するメッシュ作成作業の煩雑さから解析者を解放するため、メッシュの自動作成が容易な直交格子法を採用していることが大きな特徴である。直交格子法により精度の高い流れ場計算を実現するためには大きなコンピュータリソースを要することから、スーパーコンピュータの性能を最大限活用することが本手法の前提となる。本シミュレータにより円柱まわりの流れ場から発生する空力音を予測した結果を図3に示すが、円柱のように物体表面が曲面で構成された部材であっても、従来の境界適合格子による流れ場解析法を空力音シミュレータと組み合わせた場合と同等の精度で空力音予測が可能であることがわかる。

一方、地震災害シミュレータは、日本全土の任意の場所で地震が発生したとき、これによる鉄道施設の被害予測を行うシミュレータである^{9) 10)}。震源からの地震動の伝搬予測ツールと、地震動が到達した際に鉄道構造物が受ける被害の予測ツールから構成されている。様々なシナリオの下で生じ得る鉄道施設の被害を解析することにより、地震対策工をどのような優先順位で施工すればよいのか、施工によってどの程度の効果が得られるのか、といった事前評価に広く活用することができる。

鉄道シミュレータの第1フェーズの開発は今年度で終了する予定であり、2015年度からは開発の第2フェーズに移行する。このフェーズでは、これまでのダイナミクス系のシミュレータのみならず、列車運行・旅客行動シミュレータや鉄道通信環境シミュレータの開発にも着



(a) 流れ場解析結果 (渦構造)



(b) 空力音の予測結果と実験結果との比較

図3 直交格子法による円柱まわりの流れ場解析と空力音解析結果

手するとともに、個別の各シミュレータ間の連携機能を整備することにより、より統合的な解析ツールとして整備する予定である。

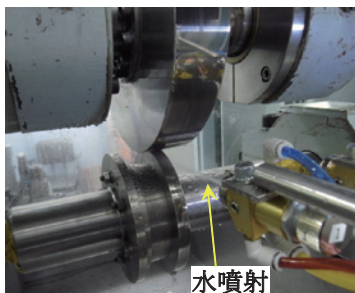
3. 鉄道力学に関わる基礎研究

3.1 接触現象

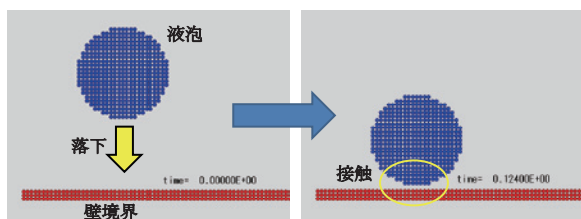
前章で述べたように、シミュレーションは非常に強力な研究ツールであるが、これはあくまで取り扱う現象の物理モデルが確立していることが前提となる。しかし、接触や摩擦など、トライボロジに関わる現象にはまだ未解明な点も多く、現場における現象観察と地道な基礎実験が求められている。

たとえば、降雨、降雪時のように、車輪とレールとの間に水膜が形成されるような状況下では、水膜の潤滑作用によって粘着係数が低下して車輪の空転、滑走が発生しやすいため、その合理的な対策を行うために粘着係数の見積もりが求められるが、多くのパラメータが関与することから正確な粘着係数の見積もりは容易ではない。そこで、鉄道総研の所有する試験装置（2円筒転がり接触試験機：図4（a））を活用し、様々なパラメータが粘着係数に対してどのように影響するのか、研究を進めている¹¹⁾。その一つの成果として、湿潤条件下における車輪、レール間の粘着係数に及ぼす、表面粗さならびに接触部温度の影響についての研究が本特集号にて報告されている¹²⁾。

こうした実験的な取り組みと平行して、車輪／レール間に水膜等が介在する場合の水膜自体の挙動を、粒子法¹³⁾によるシミュレーションによって評価する研究にも取り組んでいる。本研究はまだ緒に就いたばかりの段階であるが（図4（b））、実験を補完し現象を理解するため



(a) 2円筒転がり接触試験機による粘着力評価



(b) 壁に衝突する水滴の運動シミュレーション

図4 湿潤条件下における車輪／レール間の粘着特性解明に向けた基礎的研究

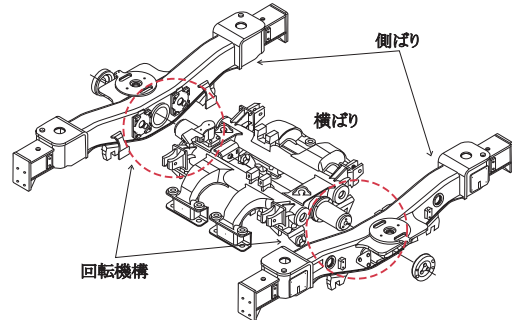
のツールとして活用が期待される。

3.2 車両走行安全性

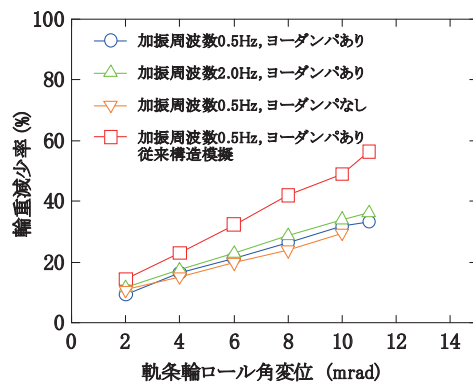
急曲線の緩和曲線出口部のように軌道の平面性変位が大きい箇所を車両が走行する際、各車両の進行方向先頭側に位置する輪軸の外軌側車輪において大きな輪重減少が発生することがある。これは、平面性変位の大きな箇所では台車に作用する車体重量を他の3つの車輪で支持する状態（いわゆる3点支持状態）となるためである。このような状況下で、何らかの理由により当該車輪に大きな横圧が作用すると、車輪がレールに乗り上がって脱線に至る可能性が生じる。そこで、その実用的な対策として輪重減少抑制台車の開発に取り組んでいる¹⁴⁾。

この台車の特徴は、図5（a）に示すように台車枠の側はりが横ばりに対して回転可能な構造となっていることである。左右の側ばりがそれぞれ独立してピッチング方向に回転できることから、軌道の大きな平面性変位に対して各車輪が追従可能となり、輪重減少を抑制することができる。また、側ばりの回転機構以外は従来の台車構造とその諸元をそのまま踏襲可能であることから、通常時の走行安全性に対する信頼性も高い。

図5（b）は、車両試験台における転走試験により輪重低減率の抑制効果を調べた結果である。ここでは輪重低減率が約4割小さくなる結果が得られている。現在はこの台車を2台制作して同じ車両に組み込み、各種走行試験を行っているところである。



(a) 台車枠の構造



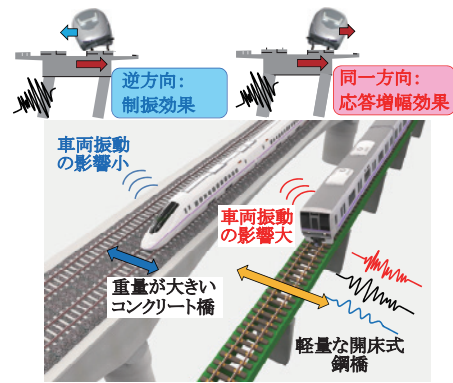
(b) 輪重低減抑制効果（車両試験台の転走試験）
図5 輪重低減抑制台車の構造とその効果

特集：鉄道力学

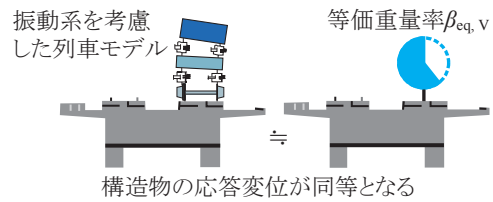
3.3 地震時の構造物応答解析

地震発生により構造物に深刻な被害が発生するとその影響が大きいことから、地震時における構造物の応答評価は重要である。しかし、大規模地震時には車両と構造物との間に大きな相互作用力が発生することが予測されるものの、その影響を合理的に評価する手法は確立されていなかった。

そこで、地震による車両振動が構造物の地震時応答に及ぼす影響を数値シミュレーションにより詳細に検討するとともに、これを一般化して合理的でなおかつ簡易な評価法を提案した^{15) 16)}。具体的には、設計実務に適用可能な評価法として、一般の耐震設計用としては等価慣性力法（静的解析）を、また長大橋などの特殊設計用としては等価重量法を、それぞれ提案した（図6）。これらの評価法を活用することによって構造物の地震時応答を適切に評価することが可能となり、経済的な構造物設計や既設構造物の高精度な耐震診断が実現できる。



(a) 車両／構造物の地震時動的相互作用



(b) 等価重量法 の概念

図6 列車の影響を考慮した構造物の耐震設計法

4. おわりに

本稿では、鉄道に固有な力学的相互作用を数値的に再現する鉄道シミュレータの開発状況を報告するとともに、鉄道力学に関わる最近のいくつかの研究成果について紹介した。

冒頭にも述べたとおり、鉄道力学の本質は力学的相互作用の解明である。鉄道シミュレータの活用によって、鉄道固有の境界領域（車両／軌道／構造物、電車線／パンタグラフ、など）における動的相互作用の現象解明がより一層加速され、こうした相互作用によって発生する長期劣化現象の効果的な抑制法の確立にも寄与するものと期待している。

文 献

- 1) 網干光雄：鉄道における数値シミュレーション，RRR，Vol.70，No.9，pp.4-7，2013
- 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) 坂井宏隆，ほか5名：大規模並列計算による車輪／レール間の転がり接触挙動の解析，鉄道総研報告，Vol.27，No.10，pp.29-34，2013
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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.
- 7) 西浦泰介，坂口秀：離散体モデルを用いたバラスト軌道のGPUシミュレーション，第19回計算工学講演会，2014
- 8) 相川明：バラスト軌道の動的応答特性に関する力学的評価，鉄道総研報告，Vol.28，No.6，pp.23-28，2014
- 9) 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
- 10) 室野剛隆，ほか3名：地震災害シミュレータの開発，日本鉄道施設協会誌，Vol.52，No.3，2014
- 11) 陳樺：湿潤条件下の車輪・レール粘着メカニズムを解明する，RRR，Vol.71，No.6，pp.16-19，2014
- 12) 谷本啓，陳樺：湿潤時の車輪・レール間の粘着力に及ぼす表面粗さと温度の影響，鉄道総研報告，Vol.28，No.12，pp.35-40，2014
- 13) 石井英二，杉崎泰介：粒子法における表面張力モデルの開発，日本機械学会論文集B編，Vol.78，No.794，pp.1710-1725，2012
- 14) 鈴木貢，ほか5名：3ピース構造台車枠を用いた輪重減少抑制台車の開発，鉄道総研報告，Vol.27，No.12，pp.17-22，2013
- 15) 徳永宗正，ほか4名：鉄道車両の動的影響を考慮した鉄道構造物の耐震設計法，土木学会論文集A1，Vol.70，No.2，pp.265-281，2014
- 16) 曾我部正道，徳永宗正：鉄道車両／構造物間の動的相互作用が構造物の地震時応答変位に及ぼす影響，平成24年度土木学会全国大会 第67回年次学術講演会，2012