

# 鉄道のダイナミクスに関する最近の研究

石田 弘明\*

## Recent Studies on Railway Dynamics

Hiroaki ISHIDA

Train running causes numerous dynamic problems such as noises, vibrations of bridges, viaducts and ground, track settlement and wears of rails and overhead contact wires. These problems are more intensified as trains run at higher speeds. It is inevitable to solve such problems to attain high-grade performance of railway, and the foregoing problems are only solvable through cautious investigations. This paper describes current major subjects dealt with chiefly by Railway Dynamics Division, research activities on the said subjects to achieve the railway dynamic system optimum and future prospects.

キーワード：ダイナミクス，鉄道力学，走行安全，振動，騒音，破壊，摩耗

### 1. はじめに

鉄道は構造物，軌道，車両，架線など多くの基盤設備から成り立つシステムである。そして，列車が走るという動力学的な現象は，車両の運動のみに止まらず，これらの設備間で相互に影響を及ぼし合う。例えば，車両の走行に伴う車両各部の振動や荷重の移動により騒音や構造物・地盤の振動などが発生し，軌道の劣化が進む。軌道が劣化すると車両の振動が増し，騒音，振動，そして軌道の劣化がさらに増大する。車輪／レール，架線／パンタグラフでは，騒音，振動だけでなく，摩耗・損傷といった問題も発生する。これらのダイナミクスに関する課題は，鉄道の高速度を進めるなかで益々顕在化して来ており，我々は，信頼性（安全性・安定性）の向上，利便性の向上，低コストの鉄道，環境との調和をキーワードに，現象の解明，計測・解析技術の開発，設備改善手法の提案など様々な研究開発を進めている。本稿では，現在，主に鉄道力学研究部が動的システムの最適化を目指して進めている研究の状況を概説し，今後の取組みと将来展望を記す。

### 2. 安全性の向上

列車の脱線と脱線後の人的被害を防ぐためには，脱線現象の解明と定量的な評価・解析手法の確立，脱線防止対策及び脱線後の逸脱防止対策が重要である。以下には，現在，鉄道力学研究部で取り組んでいる急曲線での乗り上がり脱線防止と地震時走行安全性の向上に関する研究開発について述べる。

\* 鉄道力学研究部 部長

#### 2.1 急曲線での乗り上がり脱線

カントの付いた急曲線を低速で走行した際の乗り上がり脱線に対しては，車両の静止輪重管理や脱線防止ガード設置等の脱線防止対策が進められている<sup>1)</sup>。鉄道総研では，乗り上がり開始から脱線に至るメカニズムの解明を行い，走行安全性評価に適用する推定脱線係数比算定式の本線上における妥当性を確認した<sup>2)</sup>。上記の対策により，日比谷線脱線事故<sup>1)</sup>が発生した2000年以前に比べて乗り上がり脱線事故件数は減少したが，運転区所構内の半径200m以下の急曲線や分岐器リード曲線等における乗り上がり脱線事例は今でも皆無ではない。これらの事故を効果的に防ぐには，特に車輪／レールの摩擦の現象をさらに明確にする必要があり，現在，車輪削正が摩擦係数に及ぼす影響やフランジ塗油の持続効果について調査・研究を進めているところである。摩擦係数や潤滑効果の調査に際しては，鉄道総研で開発した車輪・レール摩擦係数測定装置 $\mu$ テスタ<sup>3)</sup>やクリープテスタ（本特集号に掲載）を活用している。

#### 2.2 地震時走行安全性

##### 2.2.1 脱線防止対策

地震時における車両の大変位挙動を扱うことができる車両運動シミュレータVDS<sup>4)</sup>を開発し，実台車による加振試験結果によりその解析精度を検証した<sup>5)</sup>。VDSにはさらにバラスト軌道でのまくらぎの横方向変位を考慮したり，編成車両での解析を行えるように改良を加えている<sup>6)</sup>。このVDSを用いて地震時の車両挙動を解析し，車体の低重心化，まくらばねや左右動ダンパの高減衰化，ストップ遊間の拡大等が地震時走行安全性向上に有効であることを示した。ただし，これらの手法を実際に

特集：鉄道力学

適用するには、通常走行時の車両性能との両立を考慮しなければならない。そこで、地震時に車体・台車間が大きく変位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を考案し、JR東日本と共同で研究開発を進めている<sup>7)</sup>。このダンパを用いると0.6～3.0Hzの広い加振周波数範囲において地震時の走行安全限界振幅が向上すると期待され、すでに通常走行時の性能に問題がないことを現車走行試験で確認した。今後、鉄道総研に完成した大型振動台による実台車の加振試験を行って地震時走行安全性向上効果を検証する計画である。

VDSとともに、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 を開発し、各種高架橋や橋梁、連続した構造物群等の振動と地震時走行安全性の評価に利用してきた。VDSは車両のばね・ダンパ、ストッパや車輪／レール接触等の詳細特性、DIASTARSは構造物の弾塑性変形や履歴非線形特性、軌道の変形等の詳細に着目した地震時走行安全性の評価解析ツールであり、同一条件では両者の解析結果が一致することを確認している<sup>8)</sup>。DIASTARSは現在、VDSのように車輪／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、構造物側からの脱線防止対策検討に活用されている(DIASTARS IIと改称)。DIASTARS IIによる個々の構造物や地盤の特性に応じた地震時走行安全性向上策の検討例としては、既設の高架橋や橋梁に対する目違い防止工、制振工、免震工、基礎補強工などの地震時の変位抑制工法(本特集号に掲載)、すべり支承を用いた軟弱地盤上の連続桁式高架橋<sup>9)</sup>、長大スパン鉄道橋梁への中央橋脚の補強やすべり支承の適用<sup>10)</sup>、免震技術の鉄道橋梁への適用、構造物境界での角折れ・目違いや軌道座屈に有利なラダー軌道と構造物の地震時挙動解析<sup>11)</sup>などがある。

2.2.2 脱線後の車両逸脱防止対策

地震時走行安全性向上策として、脱線後の被害軽減を目的に、列車が脱線した後に軌道から逸脱することを防止する対策の評価にも取り組んでいる<sup>12)</sup>。この評価精度を上げるには、さらに脱線後の車輪と鉄筋コンクリート壁との衝撃や破壊という難しい現象を明らかにする必要がある。現在、高速衝撃応答解析を進めており、今後さらに部分模型による実験を実施して、解析精度の向上を図る計画である。また、具体的な逸脱防止構造として、RC製逸脱防止壁を設けたバラスト・ラダー軌道を開発した(本特集号に掲載)。逸脱防止効果を解析し、車輪衝撃時の逸脱防止壁及びラダー軌道の強度を実験により検証するとともに、解析により車輪が逸脱防止壁へ衝撃した場合にも軌道座屈が発生しないことを確認している。

3. 保守の低減

ここでは低コストの鉄道を目指した研究開発として、車両／軌道系、架線／パンタグラフ系の摩耗・損傷に関する研究と構造物の振動計測・診断技術を取り上げる。これらは、第2章に述べた安全性の向上や次章に記す環境との調和にも密接に関連した課題である。

3.1 レールの摩耗・損傷

シェリング、きしみ割れ、側摩耗といった主要なレール損傷の発生と進展を解析により評価するための「レール損傷モデル」を構築し、現在、その精度向上を図っている(図1)。レール損傷の進展には車両の走行に伴う車輪／レール間の接触面圧、接線力、すべりが関係し、これらの条件に応じてレール表面のき裂が進展する場合と摩耗により適度に微小き裂が除去される場合、摩耗が速い速度で進展する場合に分かれる。したがって、これらの状況がレール損傷モデルにより予測・評価できるようになれば、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、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期待できる。このレール損傷モデルでは、き裂の発生と進展については破壊力学理論に基づく解析モデル、摩耗の進展については試験結果に基づく実験式(本特集号に掲載)を適用して、実態に近い解析結果が得られるよう工夫している。

また、具体的なレールの損傷防止対策及び曲線での騒音防止対策として摩擦緩和システム FRIMOS の開発を行った<sup>13)</sup>。すでに一部の鉄道会社に導入されたFRIMOSは、レール波状摩耗の発生防止効果も期待できる。現在、鉄道総研の構内線を使い、その横圧低減効果だけでなく、雨天時等を含めた様々な条件下におけるブレーキ性能への影響を実車で調べ基礎データの蓄積を進めている。

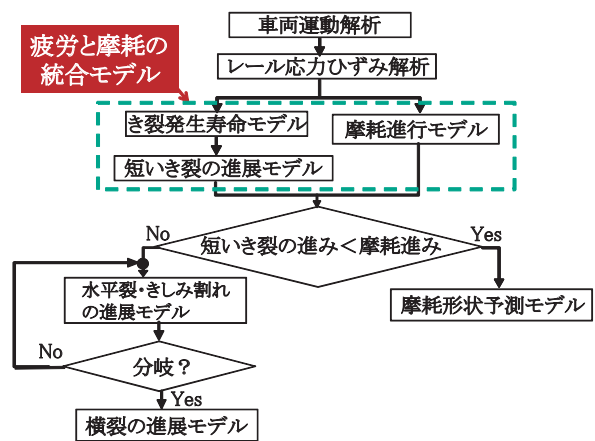


図1 レール損傷モデルの全体構成

る。このほか、地上からの摩擦緩和材塗布も想定した曲線内軌・外軌潤滑の適正化に関する研究を行っており、その性能評価にも前述のレール損傷モデルが役立つと考える。

### 3.2 バラスト軌道の劣化

バラスト軌道の沈下に関しては、主として実験によりマクロな変形特性が調べられ、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「バラスト軌道劣化モデル」として、有限要素法FEMによる連続体モデル、不連続変形法DDAによる2次元多角形ブロックモデル<sup>14)</sup>、個別要素法DEMによる3次元粒状体モデル(本特集号に掲載)を開発し、列車荷重を受けたバラスト砕石の動的挙動解析を行って、目に見えない沈下現象の解明を進めている。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<sup>15)</sup>、営業線でまくらぎ下面圧力やバラストの3次元的な挙動を実測して解析結果の検証を行った。今後、バラスト軌道劣化モデルの精度向上を図るとともに道床沈下のメカニズムと主要因子を明確にして、軌道劣化の防止に有効な軌道パッド、まくらぎなどの設備改良の方向性を提示したいと考えている。

### 3.3 トロリ線の摩耗

電気車はパンタグラフで架線を押しながら移動する。したがって、車両の走行により架線が振動し、パンタグラフの接触力が変動するとともに、振動が大きいときにはパンタグラフが離線してアークが発生する。トロリ線の摩耗には、パンタグラフすり板の摺動による機械的摩耗と離線アークによる電氣的摩耗という二つの大きな要因があると考えられ、各々の寄与度が明らかになれば、トロリ線の摩耗予測が可能になる。そこで、地上側の架線でパンタグラフ接触力を測定する手法<sup>16)</sup>と昼間でも測定可能な紫外線検出式離線測定装置(本特集号に掲載)を開発し、接触力と離線、トロリ線の摩耗残存径を定期的に測定した。現在、データの解析を進めているところである。この摩耗予測が可能になれば、走行線区全体を通して接触力と離線を車上で測定し、架線張替え箇所等でトロリ線の摩耗進展が予測される箇所を把握して、その再調整・改良を行うことで、トロリ線の寿命延伸を図ることができると期待される。

### 3.4 構造物の検査

鉄道では、構造物の振動測定による検査法が実用化され、橋梁等の健全度診断が行われている。その際、固有振動数や振動モードを測定するために対象構造物へ加速度計等のセンサを取り付ける必要があり、センサ、ケーブル等の設置や撤去に多くの時間を要していた。また、

高所や軌道近接箇所などの危険な場所にセンサを設置しなければならない場合もある。そこで、構造物検査の効率化を目指し、レーザドップラー速度計を使って遠隔から非接触で対象物の変位を計測できる振動測定システム「Uドップラー」を開発した<sup>17)</sup>。Uドップラーは、最大100m程度離れた位置から、広い範囲(周波数:DC~600Hz、変位振幅:数nm~数cm)の計測を行うことが可能であり、橋脚の微小振動から列車通過時の橋桁のたわみまで短時間で測定できる。また、Uドップラーを用いれば、河川の橋梁や下が線路や道路の高架橋など、これまで計測が困難だった箇所の測定も容易となる。このような計測システムの開発と並行して、走行列車や重錘での打撃による衝撃を加振源とするだけでなく、常時微動による構造物振動を測定して損傷度を評価する研究<sup>18)</sup>にも引き続き取り組んでいる。

## 4. 環境との調和

### 4.1 パンタグラフの空力音

列車の高速走行により発生する騒音の中でパンタグラフの空力音は大きな割合を占めており、その低減策が高速化における主要な課題の一つとなっている。パンタグラフの空力音を低減するには、パンタグラフ構成部材の簡素化や形状と表面を滑らかにすることが有効であるが、特に舟体の形状は揚力に影響を及ぼすため、これらの対策はかなり限界に来ているのが現状である。そこで鉄道総研では、これまでと全く異なる発想に基づき、パンタグラフ構成部材の表面に金属性多孔質材を貼り付けて空力音を減らす手法を提案し、風洞試験、実車走行試験によりその効果を確認した<sup>19)</sup>。今後、効果的な多孔質材貼付方法、多孔質材の耐久性向上と加工法の開発を進めるとともに、舟体や舟支えから発生する音の低減手法<sup>20)</sup>などの基礎研究成果と組み合わせ、パンタグラフ空力音低減対策の実用化を図る計画である。

### 4.2 構造物音

鋼製鉄道橋梁は鋼材がコンクリートに比べて軽量で強度が高いため長スパン化が可能であり、品質管理がしやすい利点を有するものの、薄板構造であるために列車走行時の構造物音が大きいという課題があった。そこで、橋桁の上に防振材を介してコンクリート床版(フローティング床版)を設け、その上にフローティング・ラダー軌道を敷設した構造形式を開発し、その騒音低減効果を確認した(本特集号に掲載)。

また、列車の高速化が進み、速度300km/h超の領域で顕在化してきた課題の一つに、周波数100Hz以下の低周波音がある。その音源は、列車まわりの空気の乱れによる空力音と高架橋等の振動による構造物音と考えられ

特集：鉄道力学

る。現在、後者について明らかにし今後の構造物設計に反映させるため、RC高架橋の各部材の固有振動数、振動モードの測定<sup>21)</sup>を進めているところである。

4.3 地盤振動

土被りの少ないトンネル等では、列車走行による振動がトンネルから地盤に伝搬し、地表面の振動が体感されることがある。そこで、DIASTARS IIの車両・軌道・トンネル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<sup>22)</sup>。本解析により実測値にほぼ近い結果が得られることを確認し、現在、振動低減効果の高い軌道構造の提案を目指して、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。

5. おわりに

安全性の向上、保守の低減、環境との調和という観点で、現在、主に鉄道力学研究部が進めている研究の状況と今後の取組みを記した。計測・解析技術として完成したものもあるが、大半はまだ実用化の途上にある。

動的システムの最適化はこれからも鉄道の重要な課題と考えられる。鉄道力学研究部では、動的現象の定量化と解析ツールの開発、基礎研究成果の統合による実用化を念頭に置き、今後より一層、研究開発を進展させて行く計画である。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) 事故調査検討会：営団日比谷線中目黒駅構内列車脱線衝突事故に関する調査報告書，2000.10
- 2) 石田弘明，宮本岳史，前橋栄一，土井久代，飯田浩平，古川敦：急曲線低速走行時の乗り上がり脱線に対する安全性評価手法，鉄道総研報告，Vol.18，No.8，2004
- 3) 前橋栄一，飯田浩平，西山幸夫：車輪およびレールの摩擦係数測定装置μテスタの開発，鉄道総研報告，Vol.20，No.11，2006
- 4) 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
- 5) 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：実台車加振実験による大変位車両運動シミュレーションの検証，鉄道総研報告，Vol.17，No.9，2003
- 6) 宮本岳史，石田弘明，曾我部正道，川西智浩，室野剛隆：

- 編成車両の地震時走行安全性解析，鉄道総研報告，Vol.21，No.12，2007
- 7) 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
- 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.9，2003
- 9) 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，pp.1075-1080，2007
- 10) 曾我部正道，池田学，柳澤良和：高橋脚・長スパン鉄道橋梁の地震時列車走行性とその改善方法，鉄道総研報告，Vol.20，No.11，2006
- 11) 浅沼潔，松本信之，曾我部正道，涌井一：フローティング・ラダー軌道と構造物の地震時挙動解析，鉄道総研報告，Vol.18，No.8，2004
- 12) 曾我部正道，浅沼潔，涌井一：地震時列車逸脱防止ガードの性能評価法の開発，土木学会鉄道力学論文集，Vol.11，pp.69-74，2007
- 13) 緒方正照，伴巧，深貝晋也，石田誠，名村明：車輪／レール摩擦緩和システムの開発，鉄道総研報告，Vol.21，No.6，2007
- 14) 相川明，名村明，石田誠，鷹尾良行：レール溶接部を通過する列車荷重に対するバラストの挙動測定と不連続変形法解析，土木学会鉄道力学論文集，Vol.11，pp.27-32，2007
- 15) 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
- 16) 白田隆之，池田充，小山達弥，山下義隆：架線の振動測定によるパンタグラフの接触力推定手法，鉄道総研報告，Vol.21，No.10，2007
- 17) 上半文昭：構造物診断用非接触振動測定システム「Uドブラー」の開発，鉄道総研報告，Vol.21，No.12，2007
- 18) 上半文昭，目黒一郎：微動の非接触測定による高架橋損傷度の診断手法，鉄道総研報告，Vol.17，No.8，2003
- 19) 末木健之，池田充，高石武久，栗田健，山田晴夫：金属製多孔質材付き高速用パンタグラフの空力音低減効果，日本機械学会第18回環境工学総合シンポジウム，No.08-7，2008
- 20) 池田充，小山達弥，鈴木昌弘：舟体と舟支えの空力干渉緩和によるパンタグラフ空力音の低減，鉄道総研報告，Vol.20，No.11，2006
- 21) 曾我部正道：構造物の固有振動モード測定技術，鉄道総研，第216回月例発表会講演要旨，2008
- 22) 渡辺勉，曾我部正道，横山秀史，山崎貴之，庄司正弘，鳥袋ホルヘ：鉄道トンネルにおける振動対策軌道に関する研究，土木学会年次講演論文集，No.7-168，pp.335-336，2007