

鉄道のダイナミクスに関する最近の研究

鉄道力学研究部

部長 石田弘明

1. はじめに

鉄道は構造物、軌道、車両、架線など多くの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。車輪とレール、架線とパンタグラフの間では、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、安全性・信頼性の向上、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、計測手法・実験手法・解析手法の開発、評価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いる(表1)。本講演では、現在、動的システムの最適化を目指して行っている研究の状況と今後の取組みを報告する。

2. 安全性の向上

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。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。各種対策により、日比谷線脱線事故の発生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、特に車輪とレール間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。

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*^{脚注1)} を開発

表1 最近の主な研究開発課題

キーワード	課題
安全性	車輪削正後の表面状態が走行安全性に及ぼす影響
	車両転覆の復元限界
	台車改良による地震時走行安全性の向上
	地震時における新幹線車両の挙動解析
	車輪と軌道部材の衝撃解析法
	地震時走行安全性に関するフラジリティ曲線
	脱線後の列車座屈に着目した車両運動解析
信頼性・省保守	パンタグラフ動特性制御による集電性能向上
	パンタグラフの異常検出手法
	車輪フランジ摩耗進展モデル
	車輪踏面と内軌頭頂面間の潤滑手法
	レール損傷・バラスト軌道劣化モデルと設備改善手法
	常時微動による高架橋の等価固有周期推定法
環境	パンタグラフ空力音低減手法
	高速走行に対する構造物の部材振動特性
	ダブルフローティング型サイレント鋼鉄道橋

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。*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できるように改良を加えている。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、ストッパ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。このダンパを用いると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*^{脚注 2)} 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。*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* 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、すべり支承を用いた軟弱地盤上の連続桁式高架橋、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、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などがある。また最近、地震時走行安全性に関するリスク評価の研究にも取り組み始め、*DIASTARS* を活用しながらフラジリティ曲線の算出法を検討している。

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おり、そのモデル化と *DIASTARS* の改良を進めている。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ため、部分模型による実験を実施しながら、精度の良い高速衝撃応答解析手法をあわせて開発中である。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。

3. 信頼性の向上、保守の低減

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、損傷や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、転がり接触疲労による歪みの蓄積からき裂の発生を予測し、破壊力学理論に基づくモデルによりき裂の進展を解析する。

また、具体的なレールの損傷防止及び曲線の騒音防止対策として FRIMOS (摩擦緩和システム) の開発を行った。すでに一部の鉄道会社に導入されている FRIMOS は、レール波状摩耗の防止効果も期待できる。このほか、地上からの潤滑剤塗布による曲線内軌・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られる。

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、個別要素法 DEM による 3次元粒状体モデルを開発し、列車荷重を受けたバラスト碎石の動的挙動解析を行って、目に見えない道床内部で起きている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、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、本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、まくらぎ等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、パンタグラフの異常検出

電気車はパンタグラフでトロリ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。離線防止にはパンタグラフの追随性が重要であり、動特性制御による性能向上手法について基礎的な研究を行っている。また、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と昼間でも測定可能な紫外線検出式離線測定装置を開発し、接触力と離線、トロリ線の摩耗残存径を定期的に測定して、摩耗予測手法を検討した。この手法を実用化すれば、接触力と離線の車上測定結果をもとにトロリ線の摩耗進展が予測される箇所を把握して、架線の再調整・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。すり板異常摩耗等のパンタグラフの不具合についても、地上側での観測により検出できると考えられ、センシングと処理、評価の方法に関する基礎研究を今年度から開始した。

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

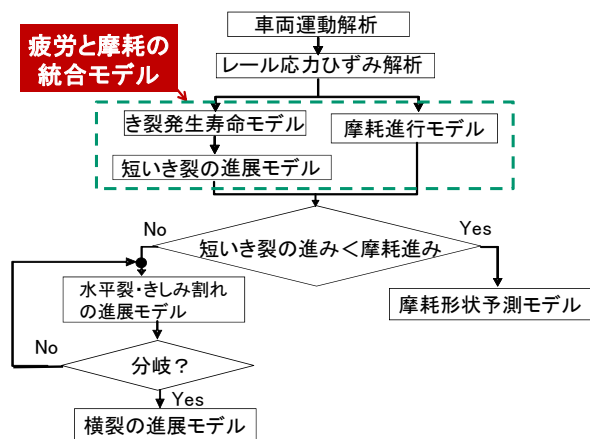


図 1 レール損傷モデルの全体構成

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。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付し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。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。

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、周波数が数十Hz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、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、振動モードの測定を進めているところである。

5. おわりに

安全性の向上、信頼性の向上と保守の低減、環境との調和という観点で、鉄道のダイナミクスに関する研究の状況と今後の取組みを概説した。計測・評価手法、解析手法、改善手法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、今後さらに動的システムの最適化を目指した研究開発を進展させて行く計画である。

【参考文献】

- 1) 石田弘明：鉄道のダイナミクスに関する最近の研究，鉄道総研報告，Vol.23，No.2，2009

脚注 1) VDS: Vehicle Dynamics Simulator, 脚注 2) DIASTARS: Dynamic Interaction Analysis for Shinkansen Irain And Railway Structures