

鉄道力学に関する最近の研究開発

鉄道力学研究部
部長 池田 充

1. はじめに

鉄道は、車両、軌道、構造物、電車線など複数のサブシステムからなる巨大なシステムであり、これを効率よく運営するためにはサブシステム間の協調が重要である。とりわけ、車輪とレール、架線とパンタグラフ、車両と構造物、などのサブシステム間で生じる動的相互作用は、鉄道の安全性や快適性に大きな影響を与えるため、こうした物理現象に対する理解の深度化は極めて重要である(図1)。鉄道総研では、こうした鉄道固有の境界領域において生じるダイナミクスに関わる現象解明、ならびにこうした現象に起因する動力的諸問題の解決を体系的に進めるための研究分野を「鉄道力学」と定義し、鉄道の安全性、快適性、利便性の向上にむけた研究・開発に取り組んでいる。

鉄道力学の本質は、力学的相互作用の解明である。例えば、一般的な鉄道では車両の支持案内路の役割をレールが担っている。したがって、車両の走行安全性は車輪/レール間の相互作用力により担保されている。しかしその一方で、こうした相互作用力は動的なものであるため、特に衝撃的な力が作用するような条件下においては、車輪やレールに損傷や劣化が生じる。こうした長期劣化現象によって車両の走行安全性が低下することのないように、車両や軌道には定期的なメンテナンスが実施されるが、経験を要するうえ、時間とコストも必要である。したがって、鉄道車両の走行安全性を確保し、なおかつ車輪やレールに関わるメンテナンスコストを低減して安定した鉄道経営を実現する

ためには、車輪/レール間の動的な相互作用の解明が重要である。

本発表では、こうした鉄道のサブシステム間で生じる動的相互作用に関わる研究開発、すなわち鉄道力学に関わる最近の研究開発状況について、特に鉄道の安全性の観点から、その概略を俯瞰的に紹介する。

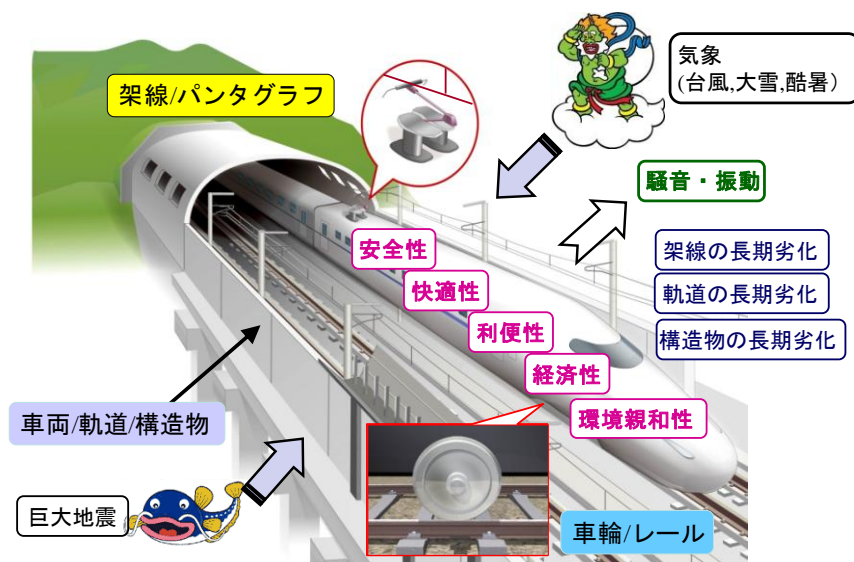


図1 鉄道のダイナミクスに関わる課題

2. 架線/パンタグラフ系

事故の引き金となる事象を「引金事象」と呼ぶと、引金事象は「外乱」、「誤操作・誤作業」、「設備の機能不全」、「保安設備の誤動作」の四つに分類できる¹⁾。こうした引金事象の発生がそのま

ま大事故へとつながることを防ぐため、大規模なシステムには多重の独立防護層が設けられており、低位の防護層で対応できない場合のトラブル拡大を防ぐため、より上位の防護層が用意される。こうした概念を架線設備に対して適用し、整理を試みたものが図2である。このように、架線設備に関わる事故抑止を多重防護の概念から改めて概観してみると、その特徴は明白である。すなわち架線設備のトラブル防止に関しては、上位の防護層、言い換えれば設備に異常が発生した後の防護の仕組みが非常に脆弱であり、事故防止対策が引金事象を起こさないための防護（最下層）、ならびに引金事象が発生した場合でも設備を異常な状態にしないための防護（第2層）に偏っている。これは、よく言われることであるが、架線が1重系であり、そのうえ加圧された設備であるため常時モニタリングが難しい、という特徴をそのまま反映している。

そこで、鉄道総研では架線とパンタグラフとの動的相互作用を直接評価する指標である、パンタグラフの接触力を測定し、これをもとに架線の静的な架設状態を評価し、最終的には架線の合理的な保守計画の策定を実現するための研究開発を進めている。また、架線の動的挙動を捉えることによって、すり板の段付摩耗のような架線事故を誘発する可能性の高い不具合を早期に検知する手法についても、実用化を目指した研究を進めている。

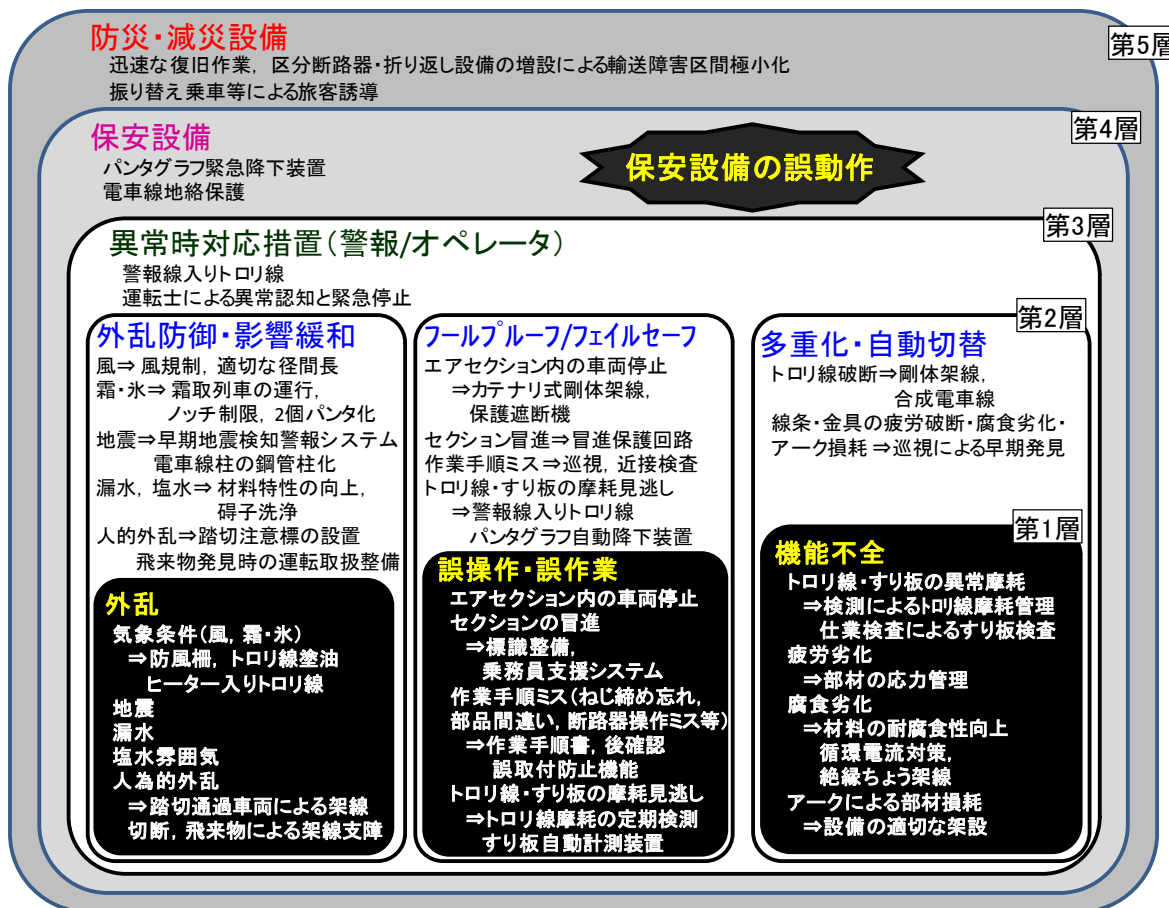


図2 架線設備の事故を防ぐ多重防護の仕組み

3. 車輪/レール系

車輪とレールの間の動的相互作用は、コンタクトパッチと呼ばれる長径10mm程度の小さな楕円形の接触面を介して生じる。したがって、コンタクトパッチ内における接触応力の性状を様々な

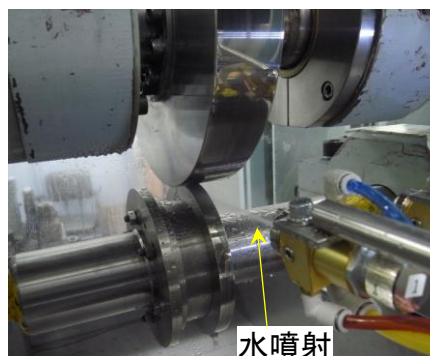
条件下（表面粗さ，温度，湿度など）に対して詳細に把握することが，車輪フラットや，レールのシェリングやきしみ割れなどといった劣化損傷現象の解明と，その効果的な抑制手法を見出すうえで欠かせない。

そこで鉄道総研では，車輪/レール間のミクロな転がり接触現象について，実験，シミュレーションの両面から研究を進めている。ただし，転動している車輪とレールとの間のコンタクトパッチを実験により詳細に観察することは容易ではない。そこで，レールを円筒に置き換えたうえで，コンタクトパッチに作用する応力の合計値により特性評価を行う，といった巨視的な観察を行い（図 3(a)），多くの有用かつ実用的な成果を挙げてきた。

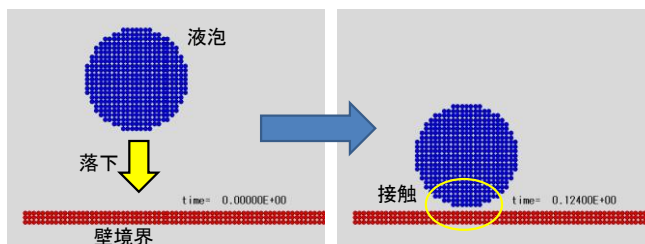
その一方，車輪/レール間の転がり接触現象を大規模なシミュレーションにより再現し，コンタクトパッチ内の動的な接触応力分布を詳細に把握する研究も進めている。さらに，車輪/レール間に水膜が介在する場合の水膜の挙動を，粒子法に基づくシミュレーションにより評価する研究（図 3(b)）にも取り組んでいる。これらのシミュレーションに関しては，その適用可能条件や解析精度の検証を慎重に進めている段階であるが，実験を補完し，現象理解に資するツールとして今後の活用が期待されている。

4. 車両/軌道/構造物系

先述した車輪/レール間の動的相互作用は，車両/軌道/構造物からなる力学系の一部を微視的に捉えたものである。逆に言えば，車輪とレールの間に作用する力は，軌道を介して構造物に作用し，最終的には地盤へと伝搬する。その過程において，バラスト軌道ではバラスト碎石の長期劣化が進行して軌道沈下が発生するため，車両の走行安全性低下を防ぐための定期的なメンテナンスが必要となる。しかし，軌道沈下の物理的メカニズムについては，その詳細な観察が難しいこともあって不明な点が多く，合理的な対策工の提案の妨げとなっている。そこで鉄道総研では，列車通過時

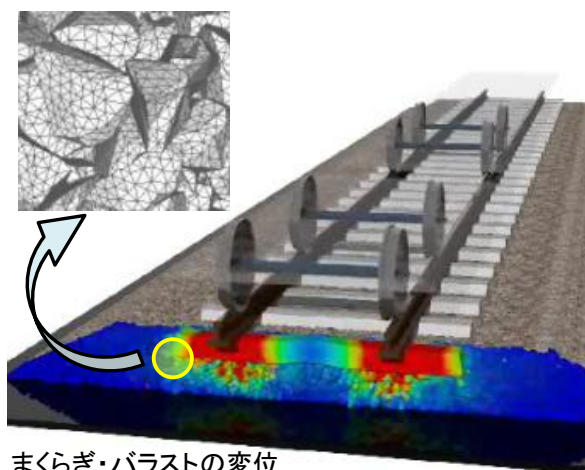


(a) 2円筒転がり接触試験機による粘着力評価



(b) 壁に衝突する水滴の運動シミュレーション

図 3 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



まくらぎ・バラストの変位
(赤色は変位が大きいことを示す)

図 4 列車通過時のバラスト軌道の動的解析例
(海洋研究開発機構との共同研究)

のバラストの動的挙動を詳細に再現することが可能な個別要素法に基づくシミュレーション手法の開発に取り組んでいる(図4)。

一方、構造物に関しては、地震により深刻な被害が発生するとその影響が極めて大きいことから、鉄道の安全性向上を図るとともに、経済性の高い社会インフラを実現するためにも、地震時における構造物の応答を高い精度で評価する手法を確立することが望まれている。そこで、大規模地震時における構造物の応答を、車両と構造物の間の力学的な相互作用力の影響を考慮に入れたうえで合理的に評価する手法の研究を行い、構造物の設計者が簡易ではあるが合理的に構造物の耐震性能を評価できる手法の提案などを行っている(図5)。

また、地震時における車両走行安全性の低下を抑制するため、台車用の地震対策部品として、地震対策用左右動ダンパならびに地震時脱線対策クラッシュブルストップの開発を行い、その有効性を確認した(図6)。現在、これら対策部品を車両に搭載する際に必要となる設計諸元の整理などを進めているところである。

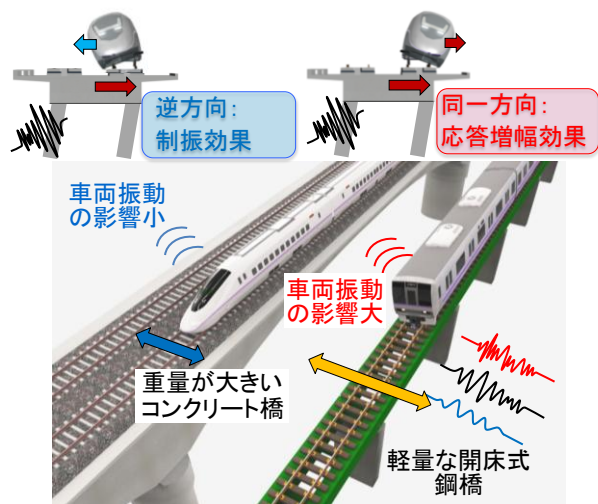


図5 車両/軌道/構造物の地震時動的相互作用



図6 地震時の車両走行安全性評価のための実物台車による加振実験(大型振動試験装置)

5. おわりに

本発表では、鉄道のサブシステム間で生じる動的相互作用を、主として鉄道の安全性の観点から捉えた研究開発について紹介した。しかし、図1にも示した通り、環境との調和や利便性向上といった観点においても、サブシステム間の動的相互作用に関わる現象解明は重要である。例えば、鉄道の沿線騒音を低減するためには、架線/パンタグラフ系から生じる集電系音、車輪/レール系から生じる転動音やきしり音、車両/軌道/構造物系から生じる構造物音、などをそれぞれ低減することが必要であるが、これらの音はいずれも動的な相互作用力と密接に関連している。

鉄道総研では、研究分野の枠を超えて知恵と経験を結集し、鉄道力学の研究開発に邁進していく所存であり、今後とも関係各位のご支援、ご協力をお願いしたい。

参考文献

- 1) 松山久義, “科学・石油精製プラントの保安に関する問題点”, 第12回評価・診断に関するシンポジウム, pp.1-6, (2013)