

車両走行シミュレータにおける車両・軌道モデルの構築

車両構造技術研究部 車両振動研究室
主任研究員 鴨下 庄吾

1. はじめに

軌道上を走行する車両の諸現象をシミュレーションするため、様々な車両・軌道モデルを作成した。鉄道車両のように複雑な機構系などから構成されるシステムのシミュレーションにおいて、マルチボディダイナミクス（以下、MBD と表記）によって全体システムを解析する方法が非常に効果的である。MBD 解析とは、空間中の互いに作用を及ぼす複数の剛体がどのような運動をするか、またその運動の過程で各構成要素においてどのような力が発生するかなどを、数値計算により調査する手法である。コンピュータの性能向上に伴い GUI ユーザインターフェイスの充実した、取り扱いに専門的な知識を必要としない MBD 解析用のパッケージソフトウェアの利用が拡大し、シミュレーション技術の発展に大きく寄与している。そこで、鉄道車両用シミュレータとして広く利用されている "SIMPACK" を使用し、状況に応じて諸条件を組み合わせることで所望のシミュレーションを実施可能なモデルデータベースの構築について検討した。

モデルデータベースの範囲として一般的な車両条件、走行条件に加え、分岐器をモデル化することについて検討した。また、長期劣化現象を解析する手法の一例として、レールの摩耗進展予測について取り扱うこととした。さらに、車両モデル中の要素として、振り車両や制御機能付き操舵台車のシミュレーションを可能とする「制御要素」を定義し、SIMPACK モデルとの連携でシミュレーションシステムを構成する方法について検討した。このような MBD をベースとした車両・軌道モデルの開発状況と今後の展望について紹介する。

2. 標準車両・軌道モデルデータベースの構築

車両モデルは、輪軸・台車枠・車体などの構成要素と、その間を結合するばね-ダンパ要素などで表現される。開発中の車両走行シミュレータは、このような車両モデルが、線路形状・軌道不整・レール踏面形状などのパラメータを持つ軌道上を走行する状態を数値的にシミュレーションするものである。事前にデータベースとして準備した各構成要素を適宜選択し、シミュレーションの目的に応じた全体モデルを構成する。また、車両パラメータの変更に関しては、構成要素のモデル形状と別途準備したパラメータファイルによって任意に切り替えることが可能である。このようなデータベースを構成することで、車体・台車の構造やレール踏面形状などに既存のモデルデータ資産が存在する場合、それを効率的に活用することができ、シミュレーション実施期間の短縮、精度や信頼性の向上などのメリットが期待できる。同一形状の線区を異なる車両が走行する状況、あるいは台車形式の異なる車両の走行性能をシミュレーションで比較する場合、車輪断面の変化に伴ってどのように車両の運動形態が変化するかを把握する場合など、多くの場面での活用が期待される。このようなモデルデータベースの構成イメージを図 1 に示す。

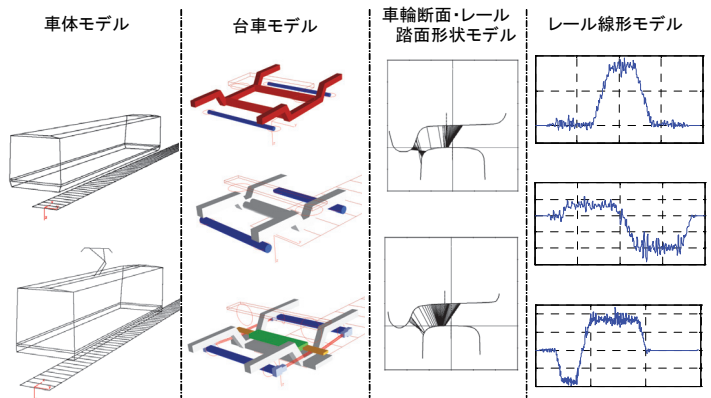


図 1 標準車両・軌道モデル DB のイメージ

3. 分岐器モデルの構築

SIMPACK においては、一般的な鉄道車両の軌道表現に加え、追加モジュールを使用することで線路方向にレール断面形状が変化する状況、分岐器を通過する状況のシミュレーションが可能である。そのためにはレール断面の3次元形状を作成し、各断面間で線路方向に滑らかに補間された断面形状データを取り込み、車両運動シミュレーションを行う必要がある。

分岐器走行シミュレーションのためには、左右車輪それぞれについて、元の

形状データを車輪踏面及びフランジ部が接触する可能性のある部分と車輪バック面が接触する可能性のある部分に分割したデータセットを作成し、プリプロセッサによって4つのデータセットの各々を補間する。さらに分岐器の線形（曲線形状）を定義し、最終的に運動シミュレーションに用いることができる分岐器モデルを生成することができる。

鉄道総研所有の車両モデルを用い、作成した分岐器モデル上を通過するときの車両運動シミュレーションを行った。ここでは、8番片開き分岐器について、速度18km/hでの対向走行（トンネル側からクロッシングに向けた走行）の場合の横圧計算結果について示す（図2）。分岐器通過時の横圧波形の定性的な特徴については現車試験などで知られている横圧発生状況と傾向が一致することが確認できた。また、接触点为非連続的に左右方向に推移した位置を調査すると、分岐器通過時の特徴的な部分と相関があり、妥当な計算結果であると考えられる。

4. レール摩耗進展予測

車輪-レール間の転がり接触によるレールの摩耗形状予測に関して、その接触状態・接触位置は逐次変化しているため、レール断面形状を連続的に予測することが重要である。この点において、MBDを使った接触解析に基づく摩耗形状予測は非常に効果的である。SIMPACKに組み込み可能なレール摩耗形状予測モデルを構築し、簡単なモデルでレールの摩耗を解析するとともに、本モデルの優位性について検討を行った。接触応力の分布は、Hertzの接触理論によって算出した断面における接触半径を用いてその接触面内の応力分布を算出し、接触面内に含まれる各点の摩耗量を算出した。このような計算を長手方向に配置された各レール断面について行い、摩耗したレール断面形状データを得る。レールの摩耗則として接触で生じる摩耗形態は凝着摩耗を想定し、Archardの摩耗予測式に基づいて摩耗体積を計算した¹⁾。

半径400mの曲線区間における解析結果を図3に示す。1両通過時の摩耗による形状変化量は微小であるため、摩耗量を10000倍して新しいレール断面形状として更新した。従って、1回の更新が概ね10000回の曲線通過による摩耗に相当する。断面の更新は10回行い、2回目、5回目、10回目の更新時におけるレール断面形状から、それぞれの摩耗量を算出した。断面形状が更新されても、接触点が大きく変化する傾向は見られなかった。y座標は、負の方向をFC側、正の方向をGC側として表す。GC側25mm付近で1・3軸の通過による摩耗が認められ、側摩耗の主要因となっていることがわかった。GC側5mm付近の摩耗は、2・4軸の通過によるものが主だった。

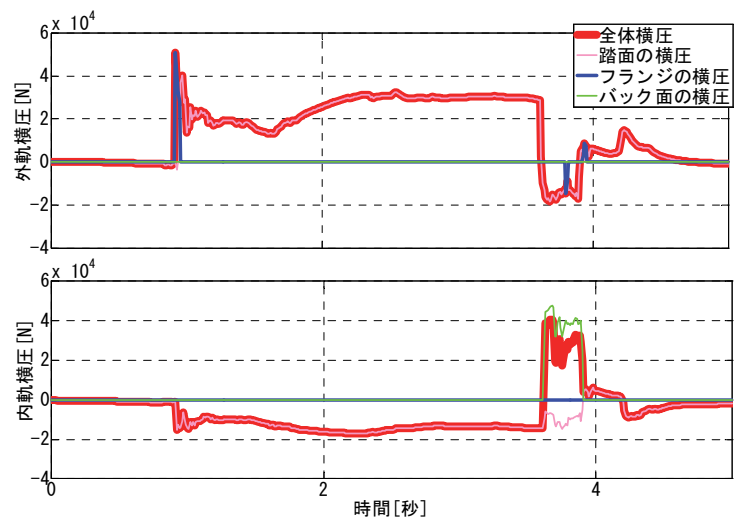


図2 分岐器通過時の発生横圧

また断面形状を更新するにつれて、摩耗する領域が少しずつ広がる傾向にあるが、これはレールが摩耗し車輪形状となじんでいくことに起因すると考えられる。

次に曲線の部位別の摩耗深さを算出した。算出箇所は入口側緩和曲線、円曲線、出口側緩和曲線の各中央部である。シミュレーション結果を図4に示す。GC側15～25mmの摩耗については、緩和曲線と円曲線において、摩耗深さや摩耗箇所に大きな違いが見られる。これらは車輪との接触状態に起因するものであるが、緩和曲線と円曲線の曲率半径の違いに伴う、アタック角や輪重・横圧、すべり率が影響したものと考えられる。

本モデルの特徴として、車輪-レールの接触状態からレールの摩耗量や摩耗による形状変化を予測することができるほか、摩耗したレール断面形状と車輪により新たな接触状態を算出し、その接触状態から更なる摩耗量や摩耗形状を得ることができる。図3に示す結果では、レール断面の更新回数と摩耗量との関係は非線形性を示しており、また摩耗している領域にも差が見られることから、レール断面形状を更新させる本モデルの利点が認められる。また、本モデルは曲線部位別のレール断面形状変化を予測することができ、走行区間全体の平均的な摩耗形状予測を行っていた従来のモデルに比べて優位性が認められる。

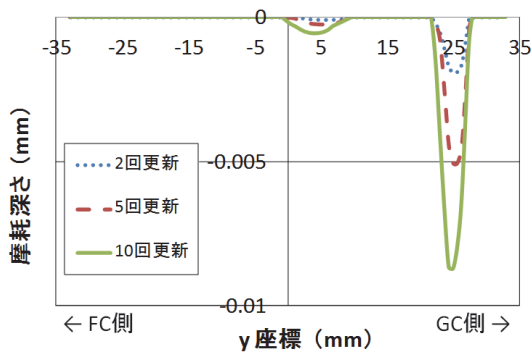


図3 各更新時のレール摩耗量

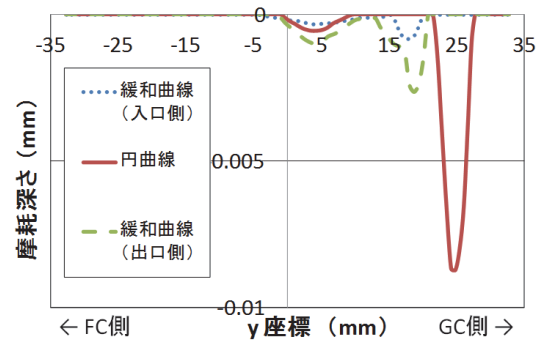


図4 線路部位ごとのレール摩耗量

5. 振り車両モデル

鉄道車両に制御要素を付加して性能改善を目指す試みが様々な形態で実施されている。ここでは、そのような制御要素をモデル化して MBD 解析ソフトウェアに組み込み、全体システムを表現する手法について報告する。制御系のモデリングは、演算処理をブロックライブラリの結合で表現して計算を実行する汎用ソフトウェア (SIMULINK) を利用して作成し、両者のシミュレーションを同期・連携させてシステム全体のシミュレーションを実行する (図5)。MBD シミュレータ側から運動状態に関するパラメータを出力し、コントローラ側の処理に入力する。コントローラモジュールは適切な制御動作によって生成される発生力を求め、アクチュエータの動特性を考慮して車両モデルにフィードバックする。このような手順をサンプリングタイムごとに実行し、指定した区間の計算を繰り返す。このような連携シミュレーションの具体例として、制御付き振り車両と操舵台車への適用例を紹介する。

振りアクチュエータは台車枠-振りばり間に取り付け、曲線の出入口で適切な発生力を与えて車体傾斜動作を補助する。このような制御機器の動作と空気圧シリンダ、サーボバルブなどの空気圧系の挙動を理想気体の状態方程式から求める計算部分を SIMULINK によって構成した。これを鉄道車両モデルに適用し、現在実用化している空気圧系に比

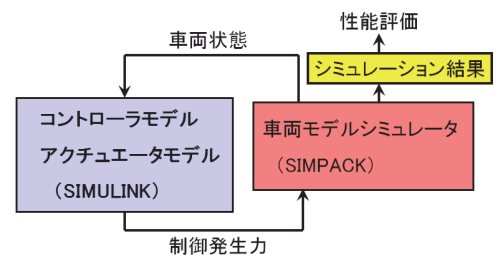


図5 連携シミュレーションの構造

べて高応答なアクチュエータに改良した場合の乗り心地改善効果を連携シミュレーションによって評価した。乗り物酔いの評価指標 (MSDVy)²⁾が、アクチュエータの機能向上により改善できることが示された (図6)。

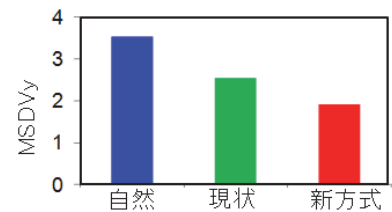


図6 MSDVyの改善効果

6. 操舵台車モデル

操舵台車への制御要素の導入について、ボルスタレス台車に操舵システムを組み込んだアシスト操舵台車、並びにボギー角連動操舵台車への操舵アクチュエータの適用について検討した。制御付き振子モデルの構成と同様、SIMPACKとSIMULINKの連携シミュレーションの手法を踏襲した。ボルスタレス台車向けのシステムは輪軸-台車枠間、ボギー角連動操舵台車では操舵はり-台車枠間に曲線区間で能動的な操舵力を付与して横圧を低減し、曲線通過性能を向上させるシステムである。なお、ボギー角連動操舵台車は、円曲線区間では装備した機械リンクの作用によって横圧低減が図れるため、緩和曲線での横圧低減が制御システム導入の主眼となる。操舵レバー、操舵リンクなど機械リンクの動作は、MBDでモデル化し、パッシブな操舵力を作用させている。

軌道データとして鉄道総研構内の試験線を用いたシミュレーション結果を図7に示す。いずれも操舵制御による横圧低減効果が確認され、ボルスタレス台車向けでは先頭軸外軌側平均横圧で30%程度、ボギー角連動操舵台車では緩和曲線区間の平均横圧で70%程度の横圧を減少できることが示された³⁾。いずれの方式も別途実施した実車の走行試験結果と良好な一致が見られ、シミュレーションモデルの構成、制御系の構成等に問題はなく、制御装置・制御方法の検証手法として適切であると考えられる。

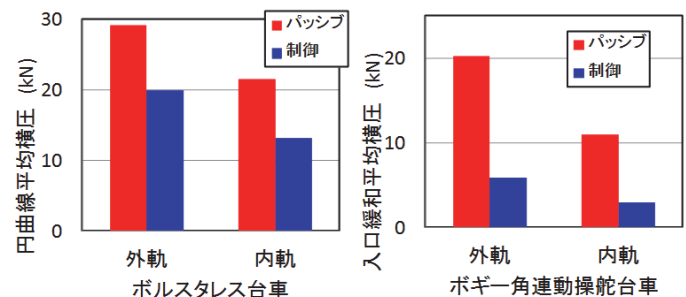


図7 各台車の平均横圧比較

7. まとめ

MBD解析による鉄道車両シミュレーションを効率的に実施するため、標準車両・軌道モデルのデータベースを構築した。走行位置に応じたレール踏面形状変化に対応可能であり、分岐器走行の再現が可能である。長期劣化現象の事例としてレール摩耗に着目し、中間段階でのレール摩耗を加味して車輪-レール接触位置、応力分布を推定し、適切な摩耗量、摩耗形状を予測する手法を開発した。また、車両に搭載する制御系機器類を別ソフトウェアで構成し、MBD解析と連携させて全体システムを表現する手法について検証した。

今後は、台車内に駆動・制動要素を構成して車両前後方向の車両挙動を再現し、編成車両の運動解析が可能なシミュレータに拡張してゆく。また、従来剛体で表現していたマルチボディの構成要素、例えば輪軸、台車枠、車体などを弾性体として扱うとともに、架線、パンタグラフの動的解析や軌道劣化モデルとの連携、軌道路盤の弾性支持機能の導入などに取り組む計画である。

参考文献

- 1) 辻江正裕 他：MBDソフトを援用したレール摩耗形状予測モデルの構築，Translog2011，2011
- 2) 風戸昭人 他：振子制御用空気圧アクチュエータの応答性向上による低周波左右振動低減，鉄道総研報告，Vol.25，No.8，pp.5-10，2011
- 3) 鴨下庄吾 他：ボギー角連動操舵台車へのアシスト操舵技術の適用，鉄道総研報告，Vol.26，No.3，pp.17-22，2012