

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

モーター制御系と連成した車両運動シミュレーション

鉄道車両や、軌道などのモデルをマルチボディーダイナミクス解析ソフトウェア上に構築しました。また、電車のモーターやそれを制御するためのインバーターといった電氣的な装置のモデルを数値解析ソフトウェア上に構築し、これら2つの解析ソフトウェアを連成させ電車の走行を再現するシミュレーション手法を開発しました。このシミュレーションモデルにおける計算例と、実際の車両の走行試験による検証結果を紹介しします。また、車両モデルを構成要素ごとに分類しデータベース化したうえで、連結器などの車両間結合モデルを含めた列車編成への拡張について紹介しします。



門脇 悟志
Satoshi Kadowaki
車両制御技術研究部
駆動制御研究室
副主任研究員
[専門分野] 車上蓄電技術、消費エネルギー解析、蓄電車両の運動解析



鴨下 庄吾
Shogo Kamoshita
車両構造技術研究部
車両振動研究室
主任研究員(上級)
[専門分野] 制御技術応用、車両のダイナミクス

はじめに

鉄道車両に関する研究・開発において、マルチボディーダイナミクス(以下、MBDと記載します)解析ソフトウェアを用いた車両の動的挙動解析や、車輪-レール間の動的挙動解析、車輪とレールの摩耗進展の評価に関する研究などが幅広く行われるようになって

きました。MBDを活用したより詳細な評価事例は、車両の剛体モデルをFEM(※参照)により弾性体モデルとして表現することにより実現に適用した事例や、列車の衝突解析事例などがあります。

ところで、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どのような力が発生するかなどを数値計算により求める手法です。市販のMBD解析ソフトウェアは、多自由度の複雑な運動方程式

※ FEM

有限要素法。解析対象物を要素に分割し、要素を単位として支配方程式を解くことで全体の振舞を解析する方法です。

式の自動導出機能を有しており、コンピュータの性能向上と合わせて、シミュレーション技術の発展に大きく寄与しています。鉄道総研では以前からMBD解析ソフトウェアを用いた研究が行われてきましたが^{1),2)}、これらは駆動トルクが印加されてい

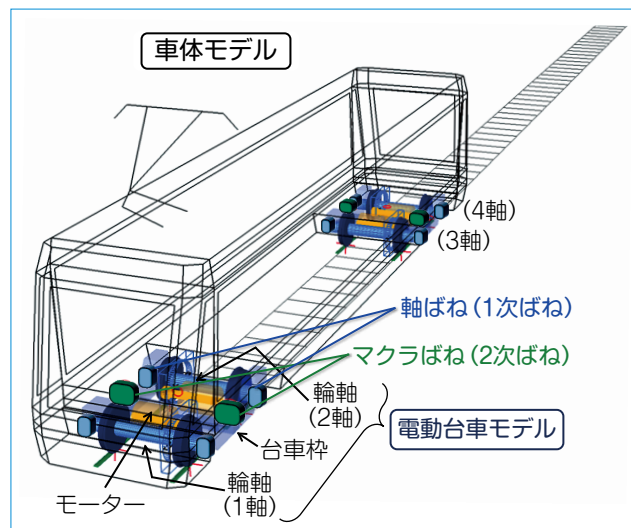


図1 Hi-tramのマルチボディーダイナミクスモデル

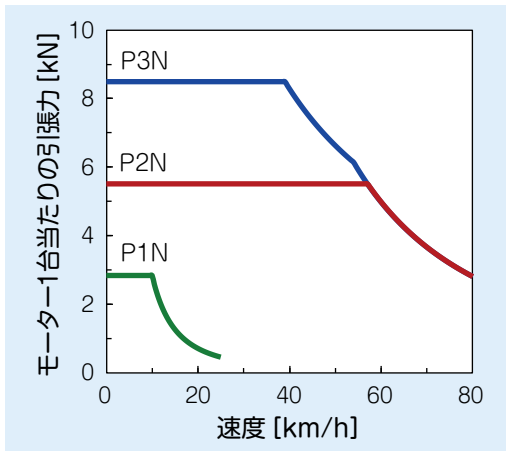


図2 Hi-tramの力行性能曲線(トルクパターン)

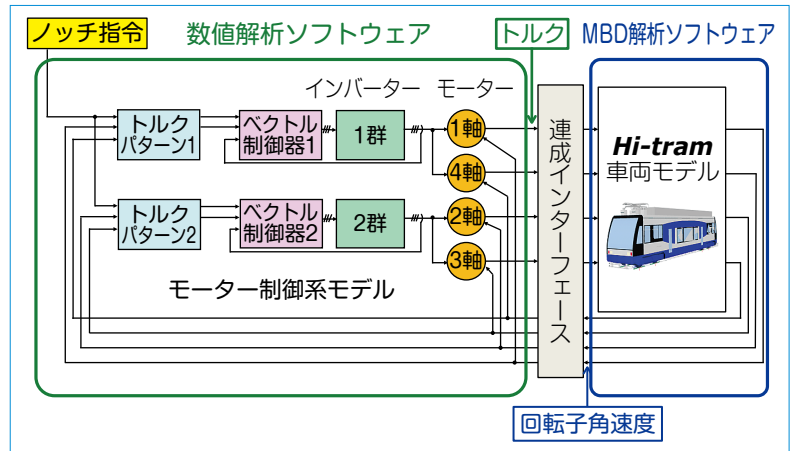


図3 連成シミュレーターの構成図

ない惰性走行状態での解析でした。既に脱線係数・輪重・横圧などの評価項目により実車両との比較検証が行われ、有用性が確認されています。一方で、インバーターやモーターの制御に関わる研究開発には、運動方程式をMBD解析ソフトウェアとは別の数値解析ソフトウェア上に表現することで、シミュレーションが実施されてきました。それぞれの研究目的に応じたシミュレーションツールを活用することは現象を抽出するうえで重要ですが、両者を連成動作させることができればより現実に即した解析を行うことが期待できます。

そこで、鉄道総研の架線・バッテリーハイブリッドLRV LH02形電車(以下、Hi-tramと記載します)を対象にMBD解析ソフトウェア上に構築した車両モデルと、数値解析ソフトウェア上に構築したインバーター・モーターモデルを連成させたシミュレーターを構成しました。ここでは、その手法、連成シミュレーション結果及び鉄道総研の所内試験線におけるHi-tramを用いた走行試験による比較検証結果について紹介します³⁾。また、車両の構成要素ごとにデータベース化し、列車編成へと拡張することで様々な車両をシミュレーター上で模擬走行させるための取り組みも紹介します。

車両のモデル化と連成シミュレーターの構成

(1) MBDによる車両のモデリング

Hi-tramの寸法、重量などの基本的な車両諸元をもとに、車体や台車の慣性、1次ばねや2次ばねの各軸方向の剛性などを組み込んだ車両モデルをMBD解析ソフトウェア“SIMPACK”上に構築しました(図1)。このモデルは、1車体、2台車、4輪軸から構成され、42自由度の3次元運動解析が可能です。モーターが付いている電動台車を模擬するために、モーターの回転子に直結された小歯車と、輪軸に直結された大歯車もモデルに含んでいます。

なお、レール頭頂面の形状もMBD解析ツール上にモデリングし、線路データもここで入力します。

(2) インバーター・モーターのモデリング

Hi-tramには、4つの車軸全てにモーターが付いています。主回路構成は、1台のインバーター(Controller)で2台の交流モーター(Motor)を駆動する1C2M構成となっています。この構成は台車単位ではなく、インバーター1群は先頭第1軸と最後尾になる第4軸を、インバーター2群は第2軸と第3軸を制御していますので、シミュレーター上でも同じ主回路構成でモデル化を行っています。

また、Hi-tramにおいて自動車の

アクセルに相当する力行ノッチ段は、P1NからP3Nの3段あり、ノッチ段が高くなるほど車両の加速度は高くなります。さらに、速度に応じて図2のような力行性能曲線を描くので、この特性もトルクパターンとして、モーター制御系モデルの中に表現しています。

モデル化の対象の交流モーターは、近年新製される電車で広く採用されHi-tramにも搭載されている誘導モーターです。その特性は、T型等価回路(図4参照)で表されるモーター定数として代入します。詳細な式は割愛しますが、三相瞬時電流を磁束成分電流とトルク成分電流に分けて制御することで高速かつ高精度なトルク制御が可能となるベクトル制御方式をモデリングしています。

以上のモーター制御系モデルは、数値解析ソフトウェア“MATLAB/Simulink”上に構築しました。

(3) 連成シミュレーターの構成

図3にMBD解析ソフトウェアと数値解析ソフトウェアによる連成シミュレーターの構成の概略を示します。このうち、数値解析ソフトウェアで演算された各モータートルクは、モーター

図4 T型等価回路

定常状態の誘導モーター1相分をインダクタンス、抵抗値で表したものです。

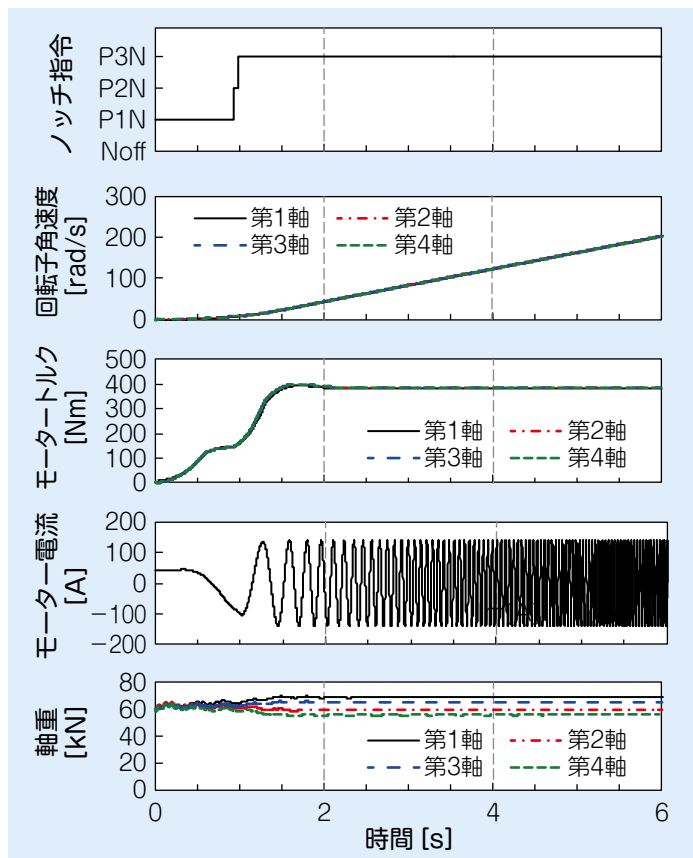


図4 連成シミュレーション結果の一例

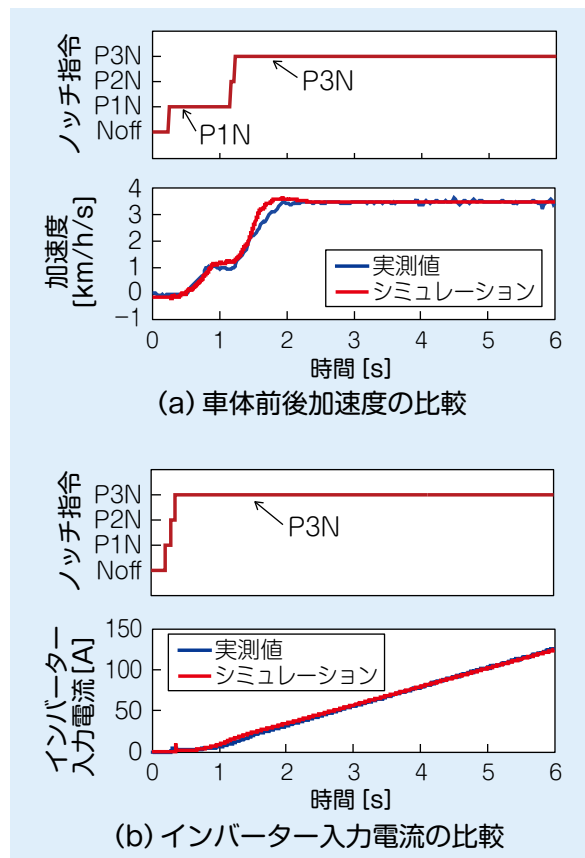


図6 実測値との比較結果

の軸に対してピッチング方向のトルクとしてMBD解析ソフトウェアに入力します。逆に、MBDソフトウェアからは、各モーターの軸の回転速度、すなわち回転子角速度を数値解析ソフトウェアにフィードバックさせます。このように双方のシミュレーターを同期させ、連成インターフェースを介して僅かな時間刻み毎に状態量をやりとりすることで、連成計算を実施しています。



図5 Hi-tramによる所内走行試験

実際の車両の走行試験結果との比較

モーター制御系と連成した車両運動シミュレーション結果の一例を図4に示します。このように電気的な挙動と、車両のさまざまな箇所の機械的な挙動を同時に把握することができるようになります。

次に、鉄道総研の所内試験線においてHi-tram (図5) を実際に走行させて、各部の状態量を実測しました。上り

3.5‰の勾配上を起動加速したときの運転士のノッチ扱いに対して、車体に仮設した加速度ピックアップにより実測した車体前後加速度と、シミュレーション結果を比較します。図6(a)で、ノッチ指令が切り替わるタイミングは走行試験における実測値と合致するようにシミュレーションと時刻を合わせています。その結果、P1Nで保持されている間、さらにP3Nにノッチアップした際の車体前後加速度の変化につ

いて、実測値とシミュレーション結果が良く一致していることを確認できます。次に、図6(b)において、インバーター入力電流で比較します。シミュレーションと実測値は時間応答が良く一致していることが確認できます。

データベース化によるシミュレーターの拡張

これまでは1両のHi-tramを例に紹介してきましたが、通勤電車や新幹線

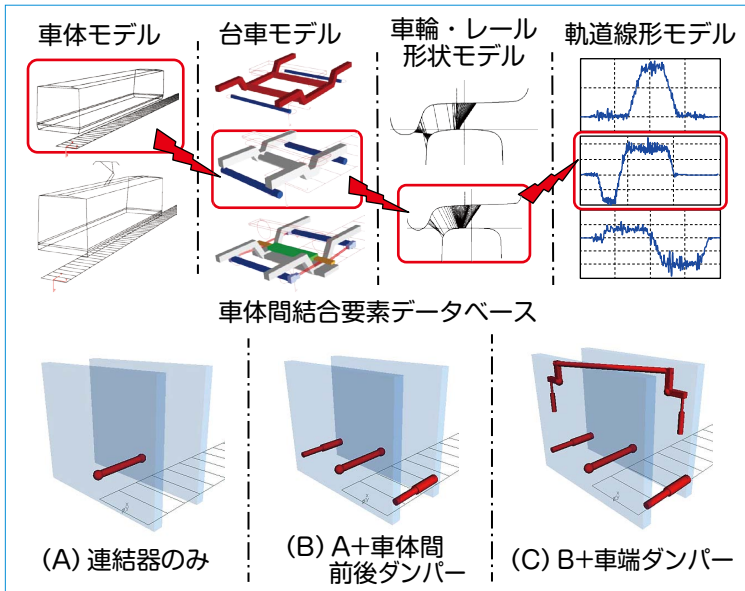


図7 車両・車体間構成要素データベースのイメージ

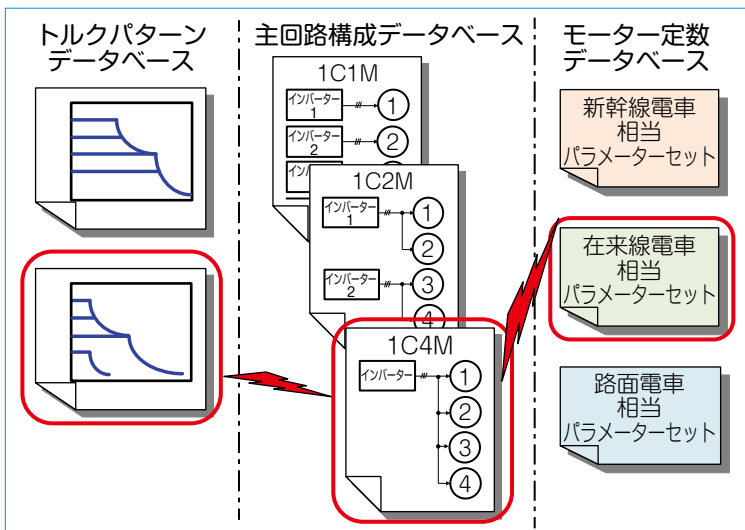


図8 インバーター・モーターデータベースのイメージ

電車をはじめとする多くの電車は、複数車両により編成を組んで走行しています。

鉄道総研では、既にMBD解析ソフトウェアに対応した形式で車体・台車・車輪・レール形状・軌道線形の各モデルをデータベース化しています。今回新たに車体間結合要素を連結器単体、あるいはダンパー有無の構成に応じてデータベースのラインナップに加えることで、列車編成を表現することができるようになりました(図7)。また、インバーターやモーターといったモーター制御系のモデルについても同様に

トルクパターン・主回路構成・モーター定数をデータベース化しました(図8)。

これらの構成要素を適宜選択することで、シミュレーションの目的に応じた列車編成全体を構築することができ、さまざまな車種を容易にシミュレーター上にモデル化することが可能になります(図9)。この結果、例えば、同じ線区を対象に列車編成中のモーターの付いた電動車と、モーターの付いていない付随車の構成を変えた場合、主回路構成の違い、モーター特性の違いによる車両運動特性を把握するといった場面での活用が期待できます。

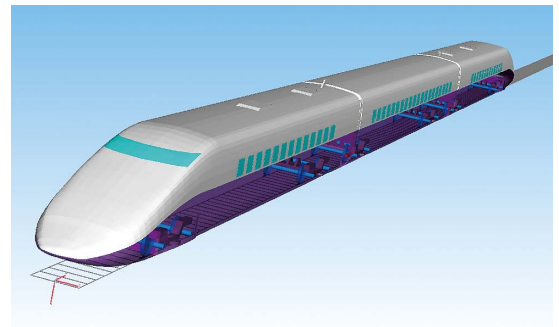


図9 列車編成モデルのイメージ

おわりに

MBD解析ソフトウェア上にHi-tramの車両モデルを構築し、モーター制御系をモデル化した数値解析ソフトウェアとの連成シミュレーション手法を紹介しました。そして、鉄道総研の所内試験線における走行試験結果とシミュレーション結果について比較検討した結果、運転士のノッチ扱いに応じて車体前後加速度、インバーター入力電流を確認しました。また、車両の構成要素をデータベース化することで、このシミュレーターをさまざまな列車編成に展開できる事例を紹介しました。

今後は、実車両における検証事例を増やして、構築した連成シミュレーターの精度検証と高機能化を進め、車輪摩耗状態で駆動トルクが加わった際の解析などに役立てていきたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 宮本：マルチボディダイナミクスによる車両運動シミュレーション, RRR, Vol.65, No.10, pp.2-5, 2008
- 2) 鴨下, 石毛, 梅原, 山長, 石栗：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
- 3) 門脇：主電動機制御系とマルチボディダイナミクスの連成シミュレータの構築とその検証, 電気学会交通・電気鉄道/フィジカルセンサ合同研究会資料, TER-15-7/PHS-15-7, pp.37-40, 2015