

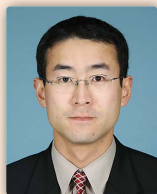
鉄道一般
車両
軌道
構造物
防災
電力
信号通信 情報
材料
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 車両運動の制御手法を開発する

鉄道車両に制御機器を組み込んで、乗り心地のみならず運動性能そのものを向上させる事例が増えてきました。そのような車両の開発や性能評価の方法として、マルチボディーダイナミクスを応用した車両運動シミュレーションと、別のソフトウェアで構成した制御系モデルを連携させ、全体システムを表現する手法があります。鉄道総研では、このような方法を用いてさまざまな制御機器類の開発に取り組んでいます。制御シミュレーションの具体例として制御付き振り子車両と操舵台車を取り上げ、マルチボディーダイナミクスの基本的な考え方、今後の展望などについて紹介します。



**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  
【専門分野】 制御技術応用、車両のダイナミクス



**風戸 昭人**  
Akihito Kazato  
車両構造技術研究部  
走り装置研究室  
主任研究員  
【専門分野】 台車構造、車体傾斜技術、油空圧工学



**梅原 康宏**  
Yasuhiro Umehara  
車両構造技術研究部  
走り装置研究室  
副主任研究員  
【専門分野】 台車構造、車両のダイナミクス



**山長 雄亮**  
Yusuke Yamanaga  
車両構造技術研究部  
走り装置研究室  
副主任研究員  
【専門分野】 台車構造、車両運動シミュレーション

## はじめに

鉄道車両に搭載する新しい機器類を開発・実用化するにあたって、実際の車両を使った走行試験でそれらの機能を検証し、性能を確認することは必須の実施事項です。さらに、各機器の最適な性能を発揮させるため、試験を繰り返して適切なパラメーター設定を決めることが必要です。ただし、走行試験の実施には時間も含め多大なコストを要します。そこで、事前に数値シミュレーションによって性能変化を予測し、走行試験で確認する諸条件やパラメーターの組み合わせを絞り込むことが一般に行われています。

鉄道車両の運動状態を再現するシミュレーションには、マルチボディーダイナミクス（以下、MBDと表記します）解析（※参照）と呼ぶシミュレーション手法が多くの場面で用いられる

### ※ マルチボディーダイナミクス解析

空間に配置された複数の物体の間で働く互いの作用に応じて、それぞれの物体がどのような運動を行うか、またその運動の過程で各物体にどのような力が発生するかなどを数値計算によって調査する方法です。

ようになってきました。これは、コンピュータの計算能力が向上し、MBD解析の実行時に要求される込み入った計算を効率よく、短時間で実行できるようになったためです。

最近では多くのMBDによる汎用ソフトウェアがパッケージソフトとして販売されており、比較的容易にMBD解析を行うことができるようになっています。

MBDによる車両のシミュレーションモデルに制御要素を導入する場合、車両と制御系のモデリングが必要となりますが、効率よくシミュレーションを実施するには、それぞれの用途に適したソフトウェアを用いてモデルを構成することが重要です。そこで、MBD解析ソフトとして鉄道車両への適用事例の多い「SIMPACK」と、制御系のモデリングに実績の多い「SIMULINK」を採用し、両者の連携動作によって制御機能を搭載した車両の全体システムを表現する手法を構築してきました。

本稿では、制御系を含めた車両運動のシミュレーション結果と、その基礎となっているMBDの概念、連携シミュ

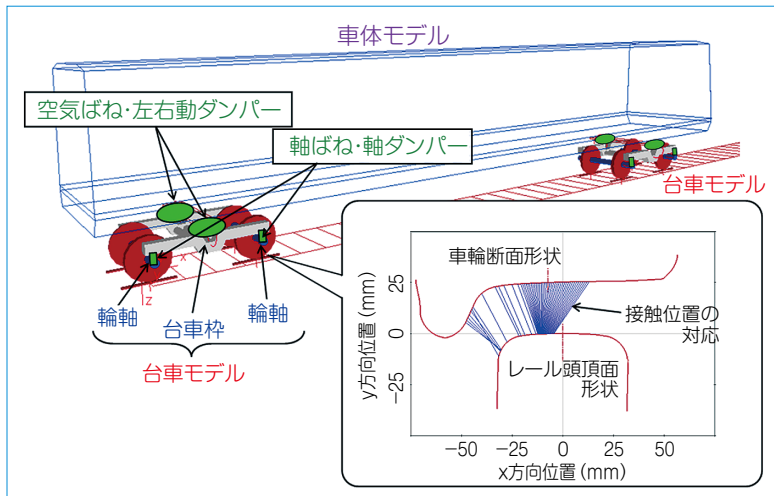


図1 MBDによる車両モデルの例

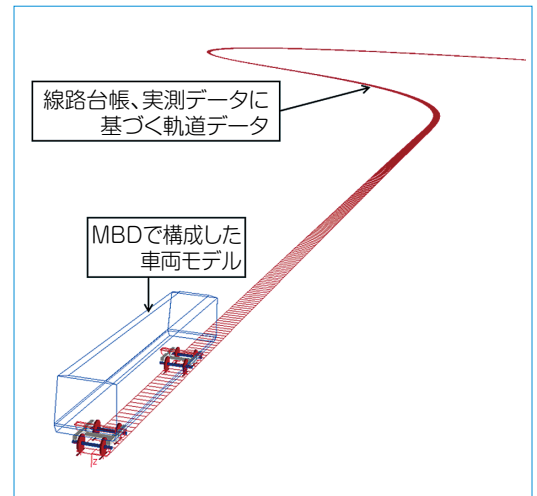


図2 軌道モデルと車両モデルの例

レーションの構成方法などについて紹介します。

### マルチボディーダイナミクスによる車両モデル

鉄道車両は、車体、台車枠、輪軸、車輪などの多くの機械要素が、軸ばね、軸ダンパー、空気ばねなど、機械要素間に作用する力を与える接続部品を介して取り付けられています。シミュレーションを行うためには、対象となっている系の全機械要素に関して運動方程式を導き、時間積分して各要素の運動状態を逐次に求めなければなりません。その際、どのように運動方程式を立てるかによってシミュレーションの計算負荷に影響を与えます。

一般に、運動方程式の導出にはニュートン-オイラーの運動方程式を用いる方法とラグランジュの運動方程式を用いる方法が広く利用されています。詳細な式の解説は省略しますが、ニュートン-オイラー法は、各要素に働く力の釣り合いから要素の運動状態を求め、それらを連立させて系全体の運動方程式とするものです。そのためには各要素ごとに作用力や運動状

態を検討しなければならず、要素数が多くなると非常に複雑となるため、コンピューターで扱うことが難しくなる傾向があります。一方、ラグランジュの運動方程式は、系全体のエネルギー収支を求め、運動方程式を導出するやり方です。それぞれの式がどのような状態を表しているのかわかりにくい欠点ではありますが、いったんエネルギー収支の式を導いてしまえば、後は単純な数式処理によって運動方程式が求められます。コンピューター処理によって運動方程式を導くことを考えた場合、その手順が増加しても処理方法が単純であれば、後は自動化させた処理の繰り返しで運動方程式を導出できるため、コンピューターを用いた計算に適した方法です。

汎用のMBD解析ソフトウェアは、機械要素や力を発生する要素の設定が3Dグラフィック上の直感的な操作で構成できるものが多く、モデル化する対象のイメージを描きながらモデリングが可能です。このように、コンピューター上に設定した対象のモデルから自動的に運動方程式を導くことができ、また積分処理によるシミュレーション

実行もサポートしているMBD解析ソフトが広く使用されています。鉄道車両のモデル化において最も大きな特徴のひとつであるレールと車輪の接触計算やそれに伴うクリープ力(☞参照)は、レールの頭頂面形状と車輪の断面形状、軌道条件、走行条件などを与えることで求めることができます。構成した単独の鉄道車両モデルの例と、軌道を含む全体モデルの例を図1、図2に示します。

制御系のモデリングは、演算処理をブロックライブラリー(☞参照)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、2つ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

#### ☞ クリープ力

車輪がレール上を転動するとき、発生する微小な滑りに伴って生じる接線力です。

#### ☞ ブロックライブラリー

数式などで表現した所定の処理を行うブロックです。このようなブロックを組み合わせることでプログラム処理を実行します。

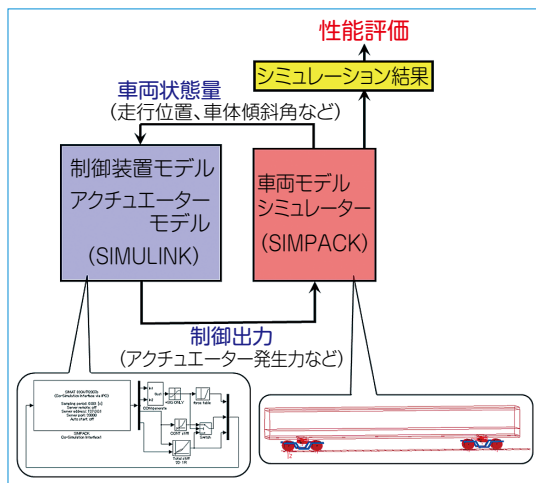


図3 連携シミュレーションの構成

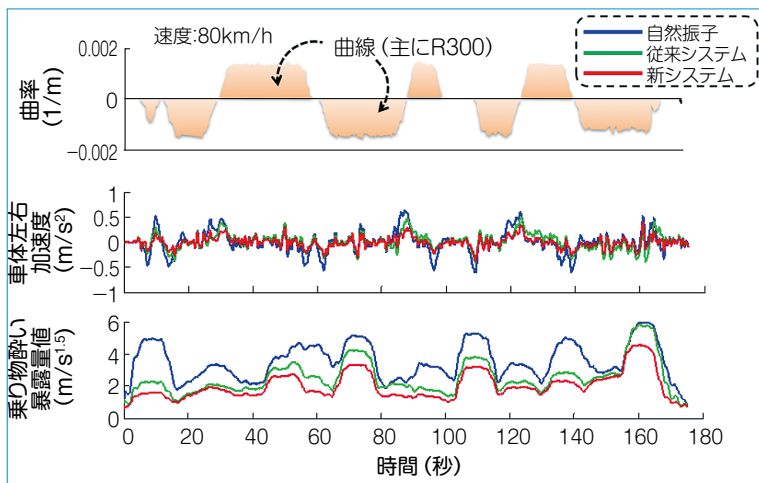


図4 振り車両のシミュレーション結果

シミュレーションを実行します（図3）。MBDシミュレーター側において車両の運動状態を求める計算を実行し、その結果をコントローラー側の処理に入力します。コントローラー系のモジュールは制御動作によって生成される発生力を求め、アクチュエーターの動特性を考慮して車両モデルにフィードバックします。このような手順を微小な時間刻みごとに実行し、指定区間の計算が完了するまで繰り返し計算を行います。

### 制御付き振り車両の性能向上

ここでは制御付き振り車両を例に説明します。制御付き振り車両とは、曲線区間でアクチュエーターを使って車体を曲線の内側に傾斜させ、曲線で発生する遠心力を重力で打ち消して乗り心地を改善する車両です。車体傾斜制御装置は走行位置を認識し、曲線の位置に合わせて適切な指令をアクチュエーターに与え、車体傾斜を補助する役割を持っています。このような車体傾斜制御装置の働きをSIMULINKで模擬します。そして、アクチュエーターで実際に発生する力を求め、求めた力をMBDで構成した車両モデルにフィードバックします。制御付き振り車両では、このような制御力によって、制御を行わない自然振子の状態より車

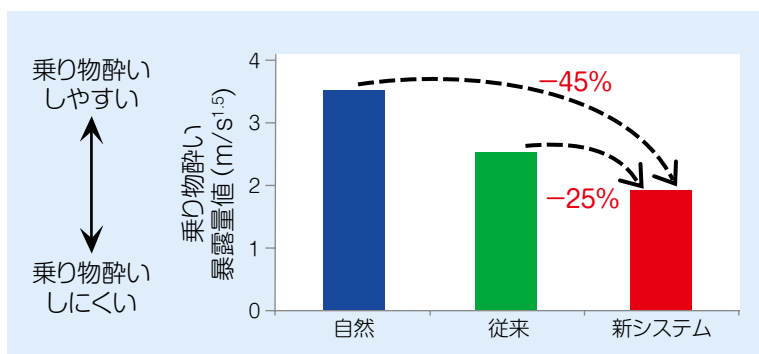


図5 乗り物酔いの改善効果

体傾斜の遅れを補償し、乗り心地を向上させることができます。

国内の制御付き振り車両では一般に空気圧アクチュエーターが用いられますが、現在実用化しているアクチュエーターは入力された指令に対する応答特性や位置決め精度が不十分なことが問題点として指摘されていました。特に乗り物酔いに対する影響が大きく、曲線が連続する線区の車両ではその対策が望まれています。そこで、より高応答のアクチュエーターを開発し、それを車両に組み込んだときの乗り物酔い低減効果を連携シミュレーションによって評価しました<sup>1)</sup>。今回開発した高性能アクチュエーターは、空気圧の制御弁の構造を変更し、小さい指令が入力された場合でもアクチュエーターの伸縮動作に敏感に反応させると同時

に、制御中の安定性を確保するための工夫を施しています。車体傾斜目標に関しても、従来はアクチュエーターの動作遅れを補償するにとどまっていた方法に変えて、乗り物酔いが発生しやすい低周波の左右振動加速度を積極的に抑え込む機能を盛り込んでいます。従来システム、高性能アクチュエーターを使った新システム、および振り制御を行わない自然振子の状態について、それぞれをSIMULINKで制御装置をモデル化し、MBDとの連携シミュレーションを実施しました。軌道の条

#### 乗物酔い暴露量値

鉄道車両の乗り物酔いの発生しやすさを示す指標です。0.3Hz程度の低周波左右振動加速度の累積によって指標が悪化します。この指標が小さいほど乗り物酔いが発生しにくいことを表します。

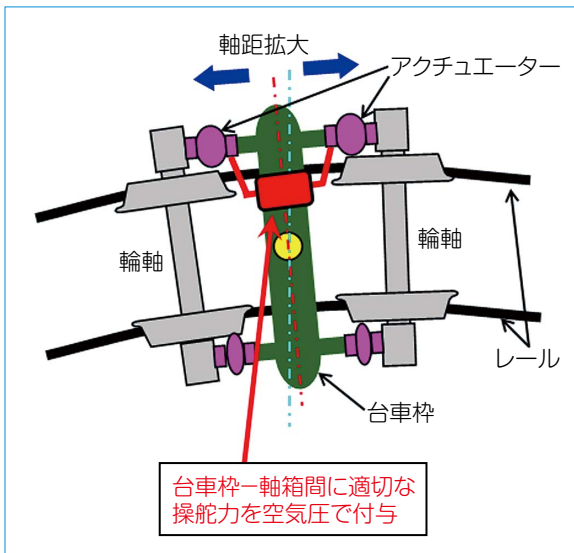


図6 アシスト操舵システムの構造

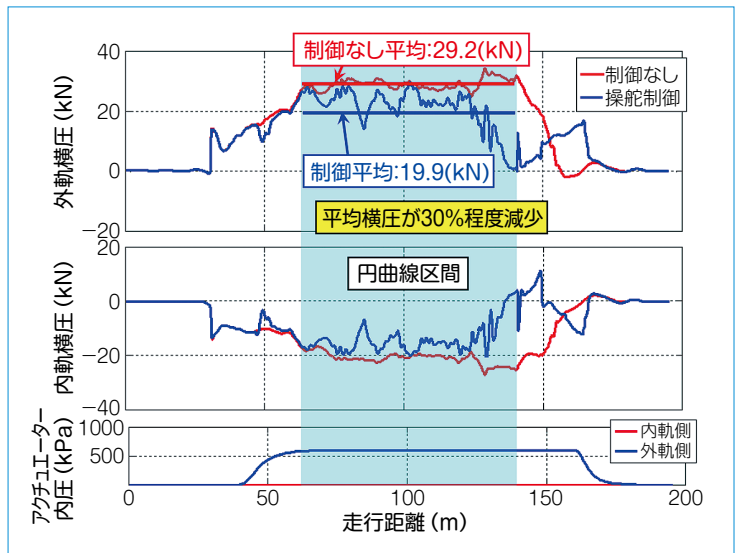


図7 操舵制御のシミュレーション結果

件は乗り物酔いへの影響が現れ易い、連続する急曲線区間を通過する条件としました(図4)。性能評価は左右加速度から求められる乗り物酔い暴露量値(参照)で行いました。図5のように、高性能アクチュエーターと新方式の車体傾斜目標の生成手法を組み合わせた新システムによって、乗り物酔い低減効果が得られることがわかりました。

### アシスト操舵システムの開発

次に、操舵台車の制御について検討した例を紹介します。操舵台車とは、曲線区間で発生するレール-車輪間の横方向の発生力(横圧)を低減させるため、車輪を曲線区間のレール方向に向けて舵を切るためのアクチュエーターを搭載した台車です。台車枠と軸箱の間にアクチュエーターを取り付け、曲線区間の進入を検出した際に、機械的な動作によって空気圧を制御するバルブを動作させ、曲線外側のアクチュエーターを伸ばすことで積極的に操舵を行う方式の操舵システムです(図6)。MBDで構成した車両モデルの構造は一般的な台車モデルとほぼ同じですが、操舵用アクチュエーターが追加されています。本操舵システムは台車の機械

的な旋回角度(ボギー角)に応じて操舵アクチュエーターの空気圧を調整します。したがって、MBDモデル側からはボギー角をコントローラー側に出し、コントローラー側では入力されたボギー角に応じてアクチュエーターの動作特性を含めた発生力を計算してMBDモデルにフィードバックするシミュレーション構造を作成しました。

シミュレーションでは、鉄道総研構内の試験線走行を再現しました。構成したモデルに構内試験線の軌道情報を入力し、実行したシミュレーション結果を図7に示します。本操舵システムによって、円曲線区間の発生横圧を30%程度低減できる可能性が示されました。この結果は、以前に実施した実車の走行試験<sup>2)</sup>から得られた横圧低減性能と比較的良好に一致しており、信頼性のあるシミュレーション結果であると考えています。

### おわりに

MBD解析による鉄道車両シミュレーションに制御装置を組み込み、両者の連携で全体システムを表現するシミュレーション手法を構築しました。このようなシミュレーション手法に

よって、既存の車両に組み込む制御機器類の事前検討を効率的に進めることが可能となりました。今後、信頼性を確保しつつこのようなシミュレーション手法の適用範囲を拡大し、効率的な機器開発に寄与したいと考えています。最終的な目標として、複数のシミュレーターを組み合わせる複雑な鉄道車両の走行状況を再現できるバーチャル試験線として構築していきたいと考えています。[RRR]

### 文献

- 1) 風戸昭人, 鴨下庄吾, 山長雄介: 振り制御用空気圧アクチュエーター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
- 2) 鴨下庄吾, 石毛真, 渡辺信行, 梅原康宏, 畠田憲司: ボルスタレス台車用アシスト操舵システムの基礎試験, 鉄道総研報告, Vol.22, No.9, pp.5-10, 2008