

車両技術に関する最近の研究開発動向

佐々木 君章
車両構造技術研究部(部長)



ささき きみあき

はじめに

鉄道総研では基本計画 RESEARCH2010 に則り、図1のように①安全性の向上、②環境との調和、③低コスト化、④利便性の向上の4点を大きな目標として、①将来に向けた研究開発、②実用的な技術開発、③基礎研究という3つの柱に沿ってテーマを設定し、研究開発を推進しています。車両技術についても、この基本方針のもとで研究開発を進めていますが、車両技術の研究範囲は強度や材料特性、運動特性や制御の問題、乗り心地や経済性など、非常に多岐にわたっており、これらをバランスよく組み合わせることで安全性や性能の向上につなげていく必要があります。

最近の車両技術研究の流れとして、シミュレーションなど、コンピュータを応用する技法の応用が進んでいることが挙げられます。マルチボディダイナミクスといわれるソフトウェアによる運動解析が広く使われるようになり、また、大きな変形を伴う衝突などの現象も数値計算モデルにより精度良く表現できるようになってきました。

一方、実時間シミュレーション(実際の物理現象と同じ速度で行うシミュレーション)と試験装置を組み合わせることで、実物の装置を仮想的な走行状態の中で動か

して評価するHILS(Hardware In the Loop Simulation)といわれるシステムの研究も行われています。

ここでは、こうした技法を応用して進められている研究の例を紹介します。

マルチボディダイナミクスの応用

自動車や鉄道車両などの機械システムは質量をもった多数の部品要素が、ばねやダンパなどの力を発生する要素を介して結合された、相互に干渉する複雑な構成と見ることができます。これらの要素の運動方程式を統一的に導き、計算力学的に運動や力を解析する手法がマルチボディダイナミクスです。

これを応用したソフトウェアは、1970年代からコンピュータによる機構解析のツールとして市販されてきましたが、近年では応用が進み、3次元CADと連携して設計

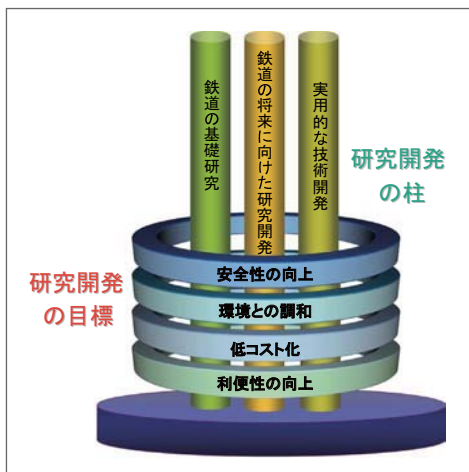


図1 鉄道総研の研究開発活動

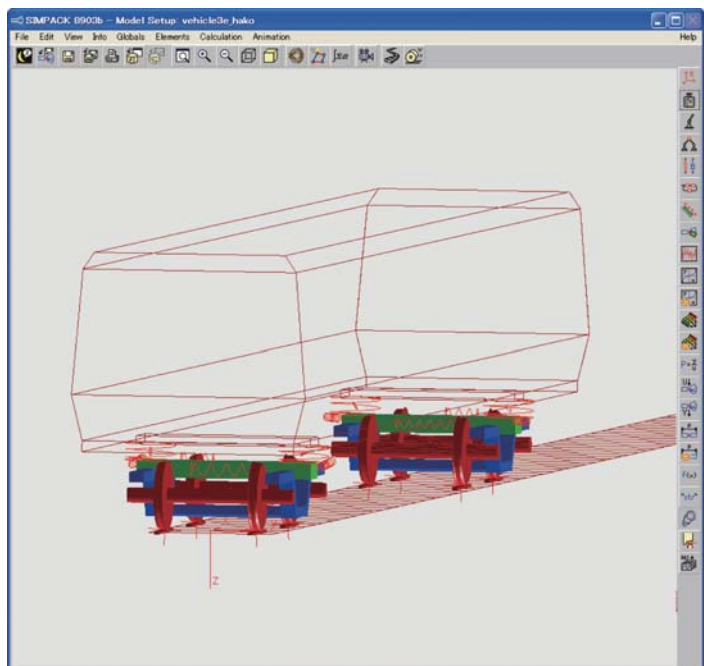


図2 マルチボディダイナミクスによる車両モデル

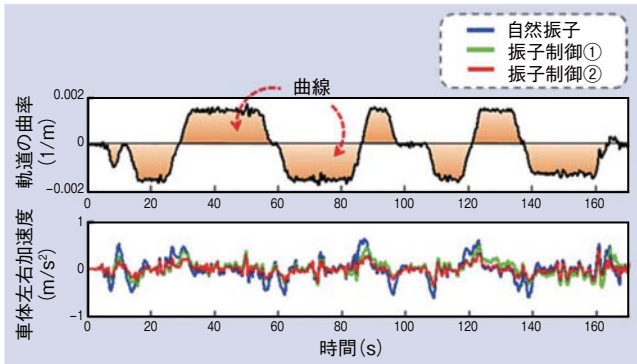


図3 振り車両の走行シミュレーション

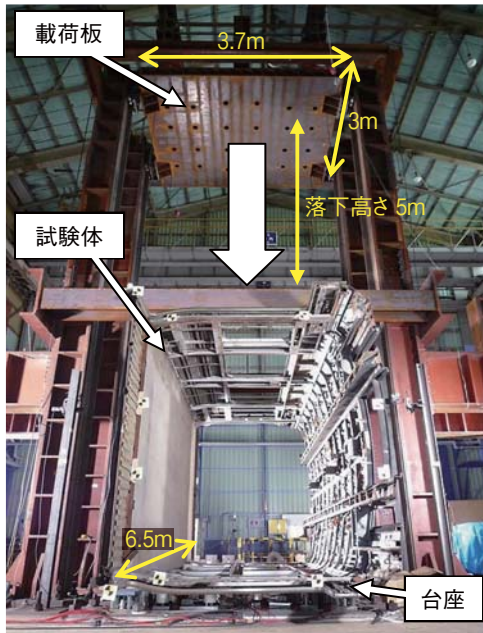


図4 落錘試験



図5 衝撃後80ms時の変形状況(試験結果)

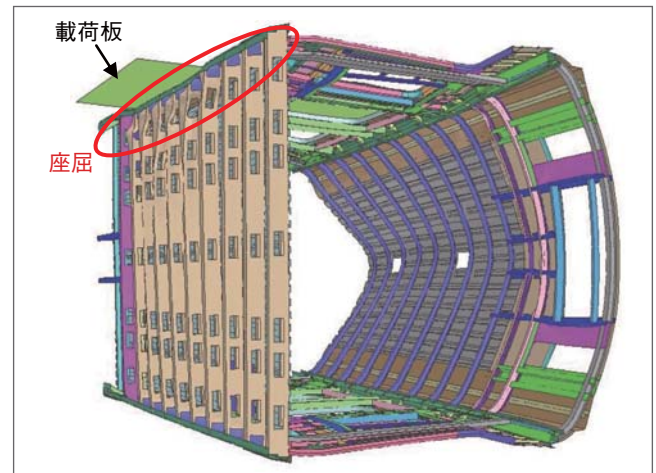


図6 衝撃後80ms時の変形状況(FEM結果)

開発の重要なツールとして広く用いられるようになってきています。

シミュレーションモデルの作成例として振り車両の走行シミュレーションモデルを図2に示します。この図のように、実際の車両のイメージで構成要素の幾何学的形状、質量などの属性、要素間の結合の仕方(自由に動ける方向など)、結合要素の特性(ばね係数、減衰係数など)を定義します。

解析プログラムはこのデータを元にして車両全体の運動方程式を導き、シミュレーションを行います。この結果の例として上記の振り車両が曲線を通る時に車体に働く加速度を計算した結果を図3に示します。

手計算で運動方程式を導出してプログラム化する従来の方式と比べて、簡単な手順でシミュレーションモデルが得られるこの方法は、間違いの防止や省力化のメリットが大きく、この例以外にも車両の脱線解析、操舵機構の検討など、車両運動解析分野の様々な所で応用が進められており、今後も用途が拡大していくと考えられます。

衝突現象の解析

衝突時の車体の変形状態を把握しておくことは、衝突安全性を向上する点から重要なことですが、鉄道車両は車体が大きいため、数多くの衝突実験を行うのは困難です。このため、有限要素法(FEM)などを用いた数値計算モデルを立て、実験結果と照合することで衝突時の車体変形などを予測し、乗客の被害を軽減する研究を行っています。

この例として、車体側面に衝撃荷重が加わった時の変形挙動について、図4のように輪切りにした車体に錘(載荷板)を落下させて衝撃を与える実験と、FEMによる数値計算の比較を示します。この実験は国土交通省の補助金を受けて実施した「車両の衝突安全性向上に関する研究」の一環として行われたものです。

衝突80ms後の試験体の変形状況を図5に、同じ条件に対してFEMで求めた変形状況を図6に示します。両者を比較すると、変形形状が良く再現されていることがわかります。衝撃後、車体に変形していく時に作用する荷重の時

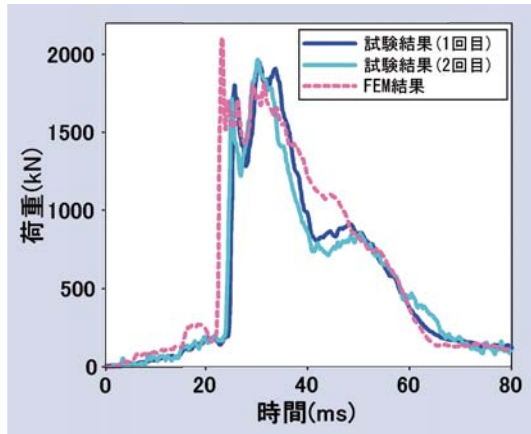


図7 荷重-時間関係

間変化を図7に示します。計算結果は概ね実験結果と一致していますが、30ms～50msでは違いが見られます。これは、計算モデルでは載荷板を自由落下として計算したのに対して、試験装置では安全上平行に落下するようにガイドを付ける必要があったため、この違いが表れたものと考えられます。

また、本件に関連して行った静的荷重に対する変形の検討では、車体外板を止めているスポット溶接の強度が変形状に大きな影響を及ぼすことなどがわかりました。

同様の検討を、踏切衝突などに対しても行っており、変形挙動の正確な予測を計算で可能にすることによって、車両の衝突安全性の向上を図っています。

HILSの応用による車両性能評価・開発

鉄道車両の走行試験は長大な走行区間を要するため、日本国内には試験線がなく、ほとんどが営業線で実施されています。このため、営業運転に影響を与えないよう、走行回数や走行条件の設定には大きな制約があります。

そこで鉄道総研では、ハイブリッドシミュレータにより、ベンチ試験で実走行に近い試験を行える試験環境の開発を行ってきましたので、紹介します。

本システムはHILSという方法をベースとして開発を進めて来ました。これは図8のように評価対象として実物の部品や車両を用い、それ以外の部分を実際の物理現象と同じ速度で動く「実時間シミュレーション」で模擬して連動させるハイブリッドシミュレーションの一種です。

例えば、「新しく開発した空気ばねを車両に組み込んで走行した時の乗り心地

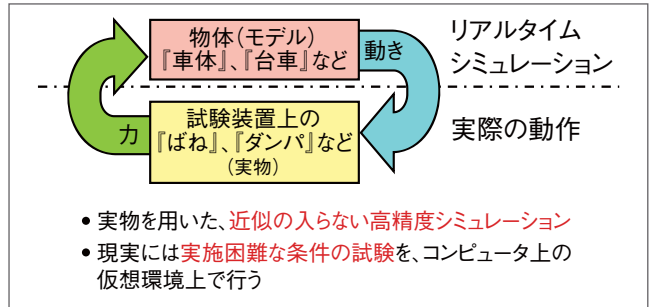


図8 HILSの動作イメージ

を調べる」という課題を考えると、まず、走行時の車両運動を実時間シミュレータでもとめ、評価対象である空気ばねの変位を3次元で計算します。次に、評価対象の空気ばねを組み込んだ加振試験装置を、この空気ばね相対変位に従って正確に動かします。この動きにより、空気ばねには変位や速度に対応する反力が発生するので、この力をセンサで測定し、実時間シミュレータが次のステップの運動を計算する時の入力として戻してやります。このようにすると、物理的な車両はなくとも実際の空気ばねの走行時の特性を模擬できるようになります。

HILSは評価対象に実物を用いるため、評価対象のモデル化誤差がないことや、試験環境をソフトウェアで模擬するため、試験項目の自由度が大きいなどの利点があります。

一方で、このシステムを実現するためには①大規模な実時間シミュレーションを可能にする高速演算、②汎用性のある実時間シミュレーションモデル、③非線形性を含む機器特性の自動的なモデル化手法、④実車と同じ自由度に対応可能な試験装置など、広範な技術開発が必要となります。

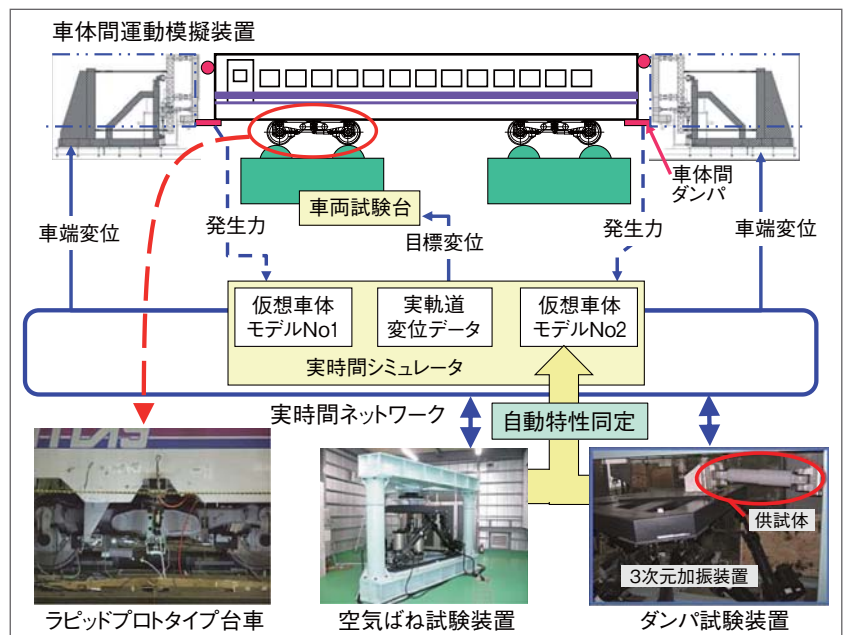


図9 鉄道総研の車両特性評価システム

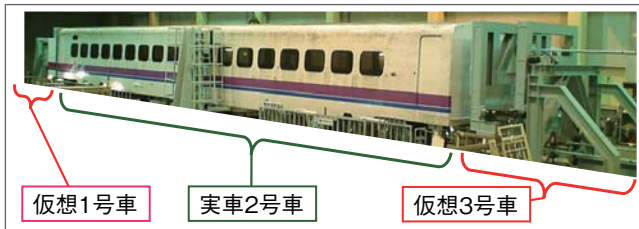


図10 編成運動模擬試験の状況

鉄道総研が開発している車両特性評価システムの構成を図9に示します。実時間シミュレーション用の計算機と、それぞれが計算・判断能力を持つ試験装置を実時間ネットワーク（設定時間内でのデータ伝送が保証されているネットワークシステム）で接続する構成となっています。

実時間シミュレーションの中で、レール車輪間の作用力を計算する部分は0.1ms～0.2ms程度の短い周期で計算しないと精度や安定性が悪化することが分かっています。HILSシステムは物理現象と同期して運動計算を行う必要があるため、計算周期を超える遅延が許されず、非常に高速な計算が求められます。このため、計算を複数のCPUで分担して実行する分散処理システムを構築しました。本システムでは1両の計算を3個のCPUコアが協調して処理する構成にしています。現状で4両の実時間シミュレーションを行う能力があり、隣接車両の運動を模擬する試験装置（車体間運動模擬装置）と組み合わせると、車両試験台上で編成運動の模擬が可能になります。この試験状況を図10に示します。

評価対象部品を実車に取り付けた時の性能を評価するための試験装置（空気ばね試験装置・ダンパ試験装置）は、6本のアクチュエータを組み合わせたスチュワート型プラットフォームと呼ばれる多自由度加振機構により、シミュレーションと連動して実車両と同じ3次元運動を再現できるようになっています。

本システムは、評価対象部品の正確な特性を表す計算モデルを要素試験装置による試験からもとめ（「同定」といいます）、シミュレーションモデルに組み込むことにより、精度を向上して行こうとしています。このため、部品モデルの同定精度と同定手順の省力化は重要な問題であり、供試対象の入出力関係を表す高精度なモデルを自動的に生成するシステムを開発しました。この詳細は本特集の別記事「鉄道車両のダンパを高精度にモデル化する」で取り上げているので、ここでは概要のみ示します。

この方式は「ニューラルネットワーク」という手法を応用して特性同定を行います。これは人間の神経細胞の働きを模擬する情報処理モデルで、与えられた入出力データ（教師データ）の関係を学習して、対象部品の応答を精度良く予測できるように自分自身を変える機能を持ちます。

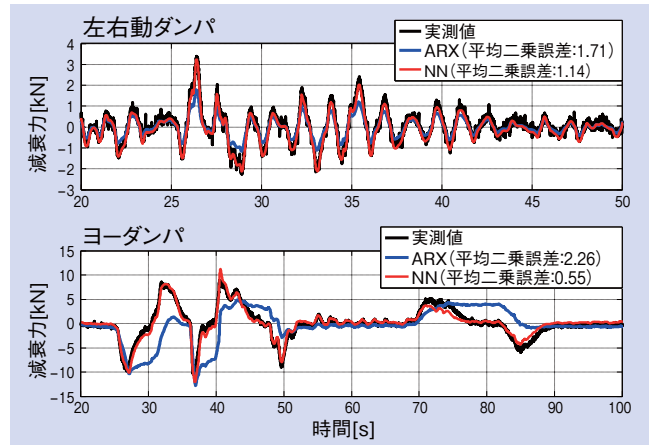


図11 ニューラルネットワークによる特性同定

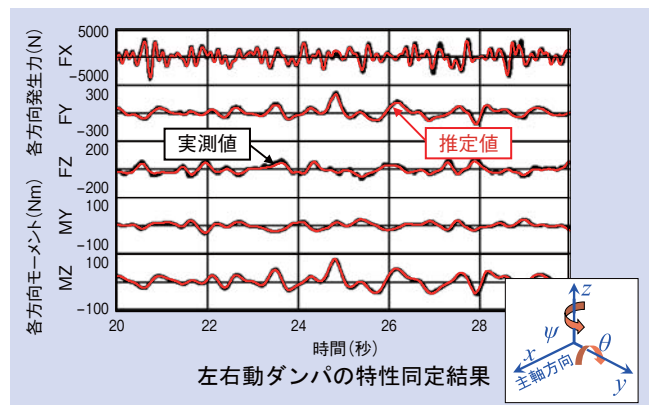


図12 多自由度の特性同定

本方式による特性同定の例を図11に示します。一般的な線形同定モデル（ARXモデル）では実測値と推定値の間に差が見られますが、本モデル（NNモデル）では良く一致しています。また、前述のように試験装置は3次元加振が可能な機能を持っているため、3次元の加振に対する応答を全て求めることができます。この同定結果例が図12ですが、各軸とも実測値と推定値が良く一致しています。なお、本システムの一部は国土交通省からの補助金により開発しました。

おわりに

最近の車両技術研究の流れの一つとして、コンピュータの高度利用が上げられ、研究の効率化や、実験が実施しにくい対象の研究に役立てられています。

本稿で取り上げたのは、そのごく一部の事例ですが、シミュレーション技術は長足の進化を遂げており、コンピュータの高性能化と相まってますます重要性を高めていくものと考えられます。シミュレーションによる解析は、実験結果の裏付けがあって初めて有効なものとなりますが、こうした実験が可能な鉄道総研の特質を活かし、着実な検証を行いながら研究を進めていきたいと考えています。RRR