

車両に関わるシミュレーション技術に関する最近の研究

車両構造技術研究部
部長 石塚弘道

1. はじめに

(財) 鉄道総合技術研究所の車両分野では、「安全」、「高速化」、「快適性」、「省エネ」、「環境」など多くの観点から研究開発を推進している。それらの研究開発の多くにおいて何らかの形でシミュレーションが取り入れられ、シミュレーションが研究テーマの遂行上不可欠のツールとなりつつあると言っても過言ではない。また、シミュレーション手法の開発自体を目的とした研究テーマもある。本講演では、このような研究テーマのうち、「ハイブリッドシミュレータによる車両運動特性評価法の開発」、「地震時における車両の大変位挙動解析」、「車両の車端部圧縮強度特性評価」を取り上げ、成果の一端を紹介する。

2. ハイブリッドシミュレータによる車両運動特性評価法の開発

ソフトウェアのシミュレータと評価対象のハードウェアを組み合わせ、実時間シミュレーションを行うシステムをHILS (Hardware In the Loop Simulation) システムという。シミュレーションループ内に実物の評価対象を組み込むことで線形化や近似なしにシステム全体の特性を評価できるHILSシステムは、費用と時間のかかる走行試験をベンチ試験で代替する手法になると期待され、自動車開発においては特にエンジンや変速機制御、ブレーキ制御等の開発・評価において開発期間の短縮や品質向上に寄与する重要なツールになりつつある。

鉄道総研では分散型リアルタイムシミュレータ、HILS 対応試験装置、車両試験台を有機的に組み合わせて鉄道車両用 HILS システムを構成し、仮想走行試験環境を作る研究を進めている。本システムは、最終的には大部分の走行試験をベンチ試験で置き換え、十分な評価・調整環境の提供により車両開発を効率化することを目指している。

図1にシステム完成時のハードウェア構成を示す。主なHILS対応試験装置(車体間運動模擬装置、ラピッドプロトタイプ台車、空気ばね試験装置、ダンパ試験装置など)は車両実験棟とHILS実験棟に分かれて配置され、リアルタイムネットワークで接続される。ダンパや空気ばねの特性再現精度はシミュレーションの精度に大きな影響を及ぼすが、シミュレーションでは運動方程式を作成する上で線形化や近似が不可欠で、車両の走行条件下では現実の特性と

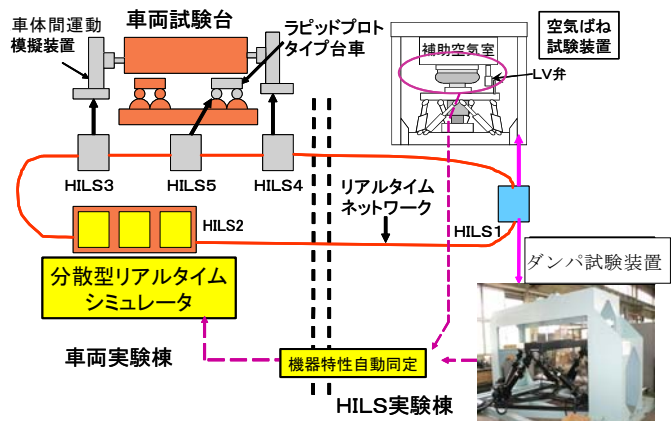


図1 HILS 全体構成

必ずしも一致しない可能性がある。HILS システムのメリットは評価対象の実物機器を用いてシミュレーションを行うので、強い非線形性を持つ対象でも近似を行わない実際の特性をを用いることができることにある。

図 2 は、左右動ダンパおよびヨーダンパの減衰力の主軸方向のみの特性同定を行った結果を示す。一般的な線形同定手法である ARX モデルと実測値を比較すると、特にヨーダンパについて実測値と波形が異なっている。ARX モデルは線形同定手法であるため、同定対象の非線形性によって大きな影響を受けるが、左右動ダンパは比較的非線形性が小さいのに対し、ヨーダンパは強い非線形性を持つため、線形モデルだけでは十分な精度が得られない。

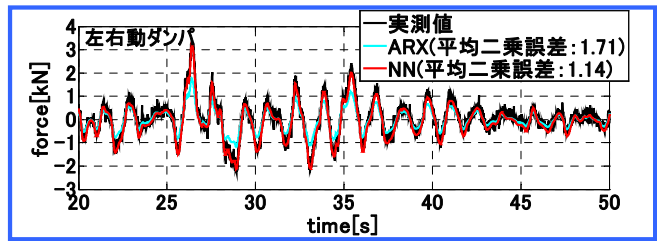
一方、図 2 の NN は、本システムのリアルタイムシミュレーションを構成するために開発したニューラルネットワークによる同定モデルの結果を示すが、ほぼ実測値と重なっており良好な推定結果を示している。これは本システムの HILS 対応試験装置を用いて自動的に生成されるモデルで、非線形性を含む入出力関係を正確に示すことができるが、対象の内部状態は全く分からない欠点がある。

実物を用いる HILS システムとこのような非線形モデルを組み合わせることで、線形性を仮定する従来のシミュレーションよりも精度の優れたシミュレーションが可能となる。

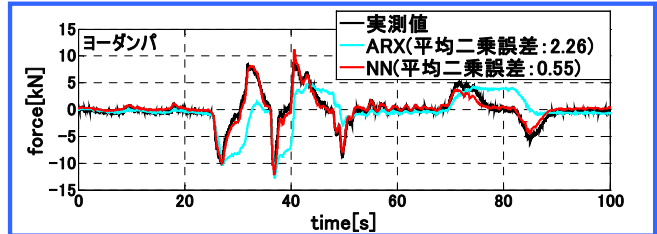
図 3 は、分散型リアルタイムシミュレータで得られた 1 両モデルのシミュレーション結果の一例を示す。波形は 300km/h で走行した場合の輪軸、台車枠、車体それぞれの左右変位結果を時系列的に示したものである。通り不整データとして実際の軌道データを使用した。通り不整の入力に伴い、輪軸、台車枠、車体の順に左右変位量として応答し、いずれもリアルタイムで動作が可能であることを確認した。

3. 地震時における車両の大変位挙動解析

図 4 のように軌道の振動変位を入力し、



(a)左右動ダンパ



(b)ヨーダンパ

図 2 ダンパ特性の同定結果 (主軸方向)

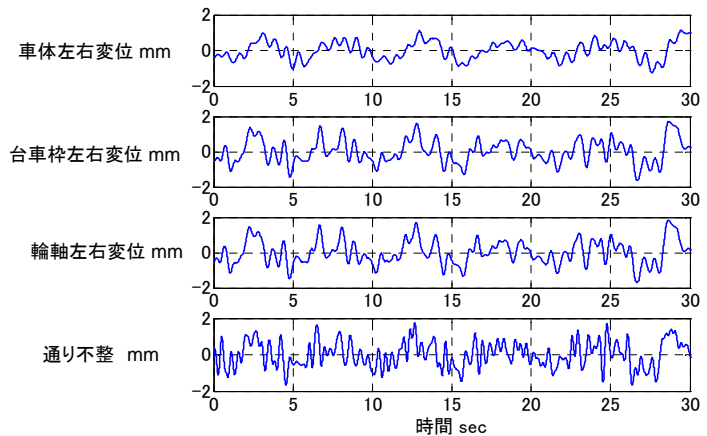


図 3 1 両モデルシミュレーション結果

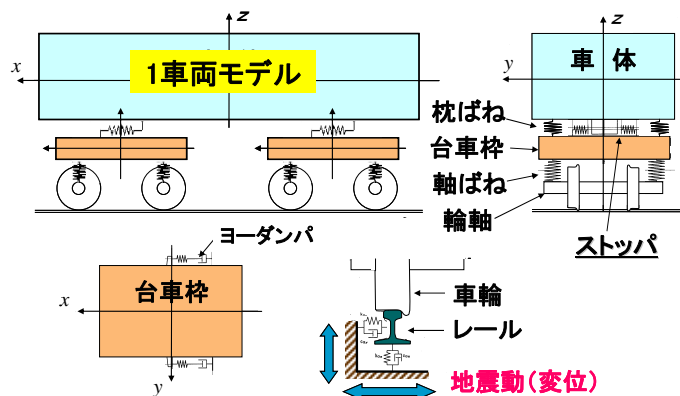


図 4 車両のモデルと地震動の入力

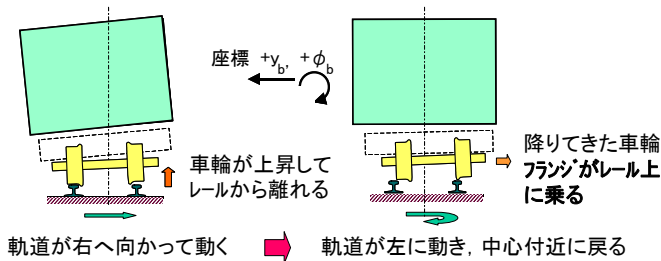


図5 ロッキング脱線

地震等により軌道が大きく左右および上下に振動した場合の車両挙動の解析を行った。また、解析と併せて実台車による加振試験もを行った。解析および実験の結果、大きな地震動によって車両が脱線するときの形態は、周波数によって異なることがわかった。軌道振動の周波数が約0.8Hz以下と低いときには車体が左右に大きく変位して片側車輪が上昇し、周波数が約1.3Hz以上と高くなると車輪フランジがレールに衝突して、反対側の車輪が跳び上がるようになる。また、周波数が概ね0.5~2.5Hzの間では、軌道が左右に変位した際に片側の車輪がフランジ高さ以上に上昇し、軌道が反対方向へ動いたときに輪軸が横方向に滑り降りてきた車輪のフランジがレール上に乗るといったメカニズムのロッキング脱線が起こる(図5参照)。なお、軌道の上下動が脱線に及ぼす影響は小さく、地震時の脱線では大きな左右動が主要な要因であることが分かった。

軌道に正弦5波の左右変位を入力し、周波数を変えて各加振周波数で脱線に至る直前の軌道変位振幅を求めた解析結果の例を、軌道振動の周波数と脱線限界振幅との関係で表した走行安全限界線図として図6に示す。走行安全限界線図は、地震による脱線事例の検討や地上構造物を設計する際の変位制限の目安として活用することが考えられる。

車両側での地震対策として、高速変位時に高減衰力を発生させる地震時脱線防止対策左右動ダンパ(地震対策用ダンパ)が考案された(JR東日本と特許共同出願中)。このダンパは、図7に示すように通常の使用速度域(0.2m/s以下)内では従来と同じ減衰力を発生し、異常にダンパ速度が速くなったとき、つまり地震のように大きく左右に揺られるような場合に、大きな減衰力が発生するようになっている。これにより、通常時の台車性能はそのままにして、さまざまな加振周波数の振動に対する走行安全限界を高くすることが可能となる。

4. 車両の車端部圧縮強度特性評価

車両の衝突時の挙動を評価するには、車端部の圧縮強度特性を把握することが重要である。そこで、ステンレス鋼製の実物部分車体を用いた圧縮強度試験を行い、その圧縮変形特性を確認した。

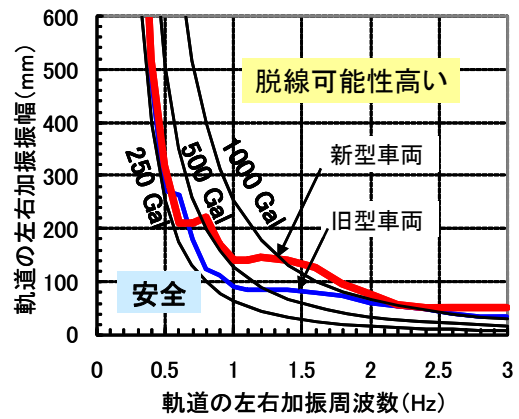


図6 走行安全限界線

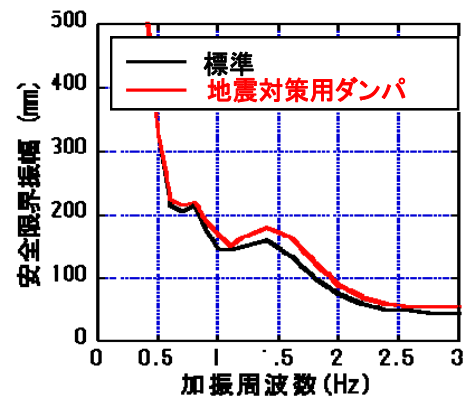
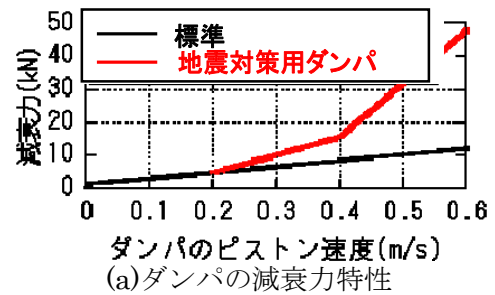


図7 地震対策用ダンパ

また試験条件を模擬したFEM解析を実施し、試験結果と比較した。

圧縮強度試験には、ステンレス鋼製車体の車端部を切断し、試験体として使用した。編成内の連結車両同士の衝突挙動において、車体台枠同士が上下方向に高低差を生じることなく衝突する場合と、一方の車両の台枠が他方の車両に乗り上がるように衝突する場合で、

車体の変形挙動に差が生じると考えられるため、衝突する車両同士の上下方向高低差が無い場合（フルラップ条件）と、乗り上がりを見込んだ上下方向高低差が有る場合（上下オフセット条件）を試験条件に設定し、車体変形挙動の差を評価した（図8参照）。

圧縮試験後の試験体の形状を3次元測定した結果を図9に示す。フルラップ条件の場合、相対的に強度の高い台枠を含めた車体全断面で荷重を受けるため、妻がほぼ平面を保った状態で変形した。一方、上下オフセット条件では妻と台枠の結合部が破断、主に剛体壁が接触する台枠より上側の構体の変形が進行した。

次に、静圧縮破壊試験に相当する条件でFEM解析を実施した。FEM解析結果による圧縮後の変形形状を図10に示す。変形形状および荷重-変形量関係について、FEM解析結果と圧縮試験結果は良く一致し、ステンレス鋼製車体端部同士が衝突する場合、乗り上がり発生の有無で変形形状や荷重が大きく変化することが明らかになった。

本研究は、国土交通省の補助金を受けて実施した。

5. おわりに

車両分野のシミュレーションについて、2~3の例を挙げて紹介した。今後ますます加速的に進展するであろうシミュレーション技術を積極的に取り入れ、車両分野の研究開発に貢献したいと考えている。

関係各位のご支援を今後もお願いする次第である。

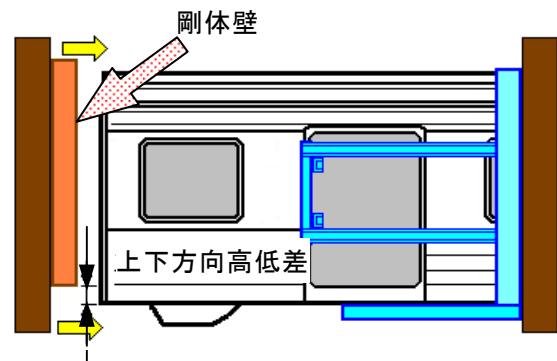
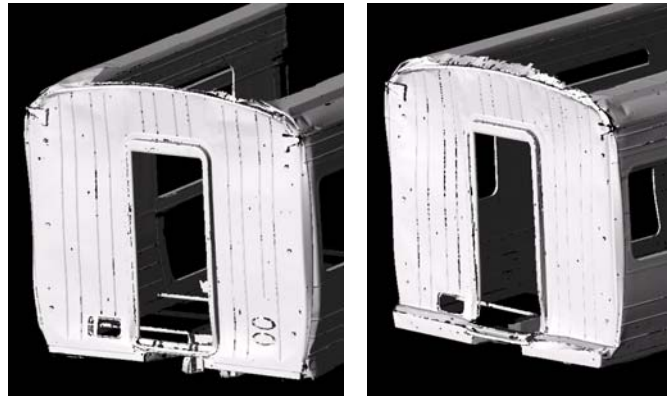
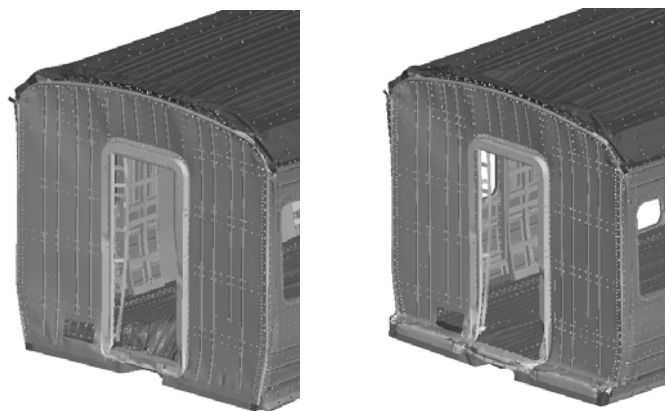


図8 上下オフセット条件の圧縮強度試験



(a)フルラップ条件 (b)上下オフセット条件

図9 圧縮強度試験による変形（三次元形状計測結果）



(a)フルラップ条件 (b)上下オフセット条件

図10 FEM解析による変形形状