

車両のシミュレーション技術に関する最近の研究

石塚 弘道*

Recent Research on Simulation Techniques for Railway Vehicles

Hiromichi ISHIDUKA

In the rolling stocks field of Railway Technical Research Institute, a lot of R&D is being propelled from various points of view such as safety, speed-up, improving riding comfort, energy saving, and environment. Today simulation techniques are being adopted in some ways in most of those R&D and it is not too much to say that simulation techniques are becoming an essential tool to complete those R&D. Besides, there are some researches aiming for developing simulation technique itself. We have chosen four themes, namely, “Evaluation System for Energy Consumption of EMUs,” “Development of a New Traction Method to Suppress the Wheel Slip One After Another,” “Dynamic Behavior Analysis of Railway Vehicles during Earthquake,” and “Evaluation of Carbody Side Strength for Railway Vehicle Structures” out of those R&D which is tackled with by our research groups, and introduce brief outline of them in this paper.

キーワード：車両，シミュレーション，消費エネルギー，車両制御，車両運動，地震，衝突

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。本稿では、このような研究テーマのうち、「電車の消費エネルギー評価システム」、「空転誘発を抑制する引張力制御」、「地震時における車両の大変位挙動解析」、「車両の側面圧縮強度特性評価」を取り上げ、成果の一端を紹介する。

2. 電車の消費エネルギー評価システム

高効率な電気機器の適用などにより電車の省エネルギー化を推進するためには、消費エネルギーの定量的評価が重要である。しかし、具体的な線区と車両に対し評価を実施するためには、車両性能、線路条件、運転士の運転方法を考慮して運転曲線を求め、電気機器の発生損失を考慮して消費電力を計算する必要があり、非常に複雑な計算が必要である。そこで、その計算の省力化を目指し、消費エネルギー評価システムを開発した。

消費エネルギー評価システムの全体構成を図1に示す。消費エネルギーを計算するためには、まず、運転曲線を求める必要があるが、本システムでは既存の運転曲線作成システム（Speedy）を用いて運転曲線を計算する¹⁾。Speedyでは車両性能、線路条件や信号現示による速度制限、運転士の運転操作などを考慮して運転曲線を求めるため、実際に近い計算結果を得ることができる。また、すでにSpeedyを導入しているユーザの場合、新たに線路条件のデータ等を入力する必要が無いという利点もある。

次に、消費エネルギーを計算するために、主電動機等の電気機器の発生損失を機器損失データとして与える。機器損失データは、Excelを利用したテンプレートを用いて、各ノッチについて各速度における各機器の発生損失を入力する形になっている。正確な消費電力計算をするためには、実測値や詳細な損失計算の結果を用いることが望ましい。しかし、そのようなデータの入手が困難な場合にも簡易に機器損失データを設定できるように、

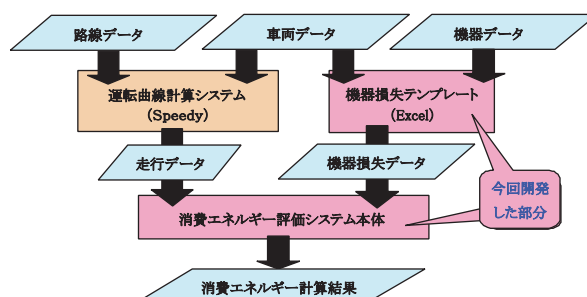


図1 消費エネルギー計算システムの全体構成

* 車両構造技術研究部 部長

特集：車両技術

本テンプレートでは機器効率を一定値として損失データを自動設定する機能も有している。機器損失テンプレートでは、入力された各電気機器の機器損失データを合計し、速度引張力特性から計算される踏面出力にこれを加えることで、各ノッチについて消費電力データを作成する。ブレーキ時についても同様な考え方で、各ブレーキノッチに対応する回生ブレーキ力パターンから回生電力（負の値の消費電力）を計算しデータとして保持する。

そして、消費エネルギー計算システム本体では、Speedyが計算した運転曲線から各地点での速度とノッチを求め、機器損失テンプレートに入力されたデータから対応する消費電力を求め、これを走行区間について積算することで消費電力量（消費エネルギー）を算出する。

計算結果の例を、図2に示す。

エネルギー計算システム出力結果				
計算条件				
編成	STANDARD ×	10 両	乗車率	100 %
MT比	5 M	5 T		
主電動機	STANDARD ×	4 台 (M車1両あたりの主電動機数)		
走行区間	練習	下り		
走行距離	A駅	—	H駅	
走行距離	7.00 km			
計算結果(その1)				
走行状態	方行	00時間 01 分 44 秒	[31.2%]	
	惰行	00時間 02 分 41 秒	[48.4%]	
	ブレーキ	00時間 01 分 08 秒	[20.4%]	
	停車	00時間 00 分 00 秒	[0.0%]	
合計	00時間 05 分 34 秒	[100.0%]		
平均速度	75.54 km/h			
計算結果(その2)				
消費電力量	走行	方行	162.947 kWh	32.589 kWh
		回生	-80.254 kWh	-16.051 kWh
	補機	37.065 kWh	7.413 kWh	
総消費電力量	合計	119.759 kWh	23.952 kWh	
機器損失量	回生率	49.3 %		
	歯車装置損失量	4.736 kWh	0.947 kWh	
	主電動機損失量	27.704 kWh	5.541 kWh	
	インバータ損失量	9.557 kWh	1.911 kWh	
	コンバータ損失量	0.000 kWh	0.000 kWh	
変圧器損失量	0.000 kWh	0.000 kWh		

図2 試算結果の表示例（一覧表）

3. 空転誘発を抑制する引張力制御

電気車の力行時に主電動機トルクが発生すると、牽引力によって台車中心や車体中心に回転モーメントが生じ、各軸に軸重移動が生じる。牽引力が大きな電気機関車では、粘着に大きな影響を与えるため、適切な補償を行う必要がある²⁾。また、空転時及び再粘着制御時には、台車内のある軸が空転すると、空転していない他の軸の空転を誘発し、粘着力を有効に利用できない場合があることが指摘されている³⁾。走行試験においても、前軸が空転を始めると後軸も連れ回りで空転する現象が観測されている。

そこで、上述した課題に対応した粘着力の有効利用を目指すため、車体、電動台車を考慮に入れた引張力制御（再粘着制御）が考案された。この引張力制御方式は、各軸の引張力/軸重比（ μ_{load} ）に目標値を設定し、その値

を上回らないように各軸の電動機トルクを制御することを特徴とする。これにより、電気的な軸重移動補償が可能となる。その有効性をシミュレーションおよび実験により確認した。

車両モデルは、車体と吊り掛け駆動電動台車2台から

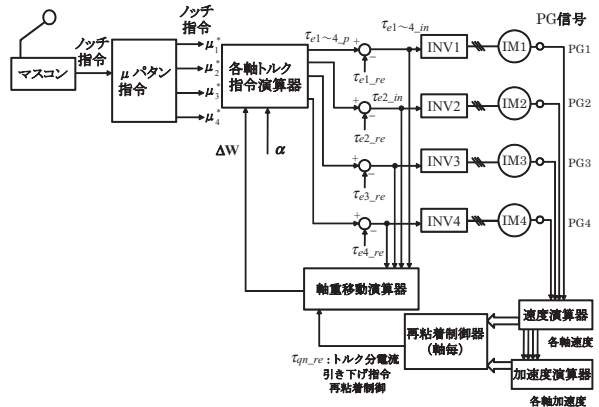
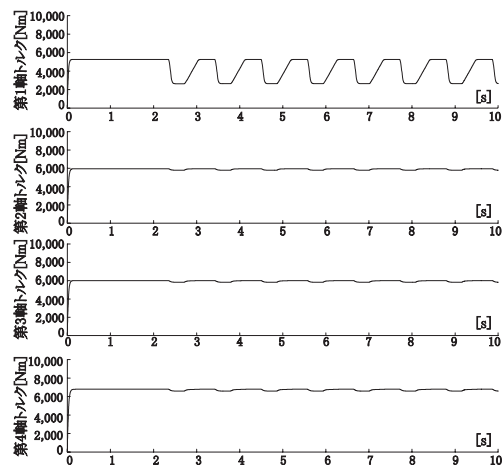
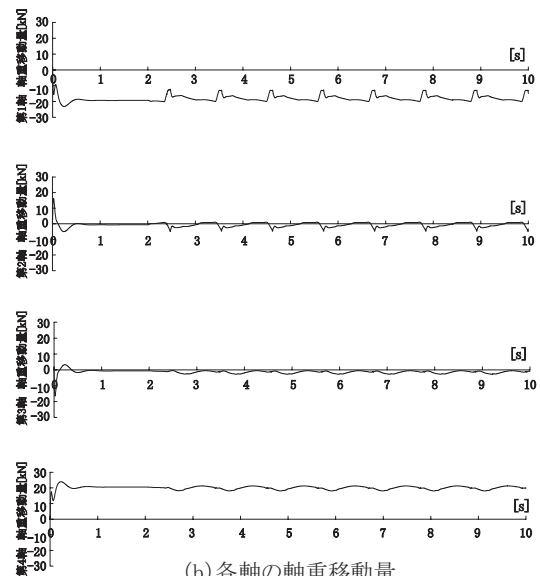


図3 軸重移動を考慮した再粘着制御



(a) 各軸のトルク



(b) 各軸の軸重移動量

図4 軸重移動を考慮した再粘着制御を用いたシミュレーション結果

構成される。各軸電動機トルクは個別に制御可能とした。

図3は、空転誘発を抑制するトルク制御（再粘着制御）を示す。ノッチ指令に応じて、各軸の引張力/軸重比指令 (μ^*) が出力 (μ パタン指令) され、 μ^* をもとに各軸の電動機トルク指令 $ten_p(n=1\sim4)$ が決定される。速度情報として、各電動機の回転速度から各軸速度 $V1\sim V4$ が得られ、再粘着制御器に入力される。空転した場合には、再粘着制御が行われる。

図4は、新たに考案した再粘着制御を用いたシミュレーション結果である。2秒以降、粘着係数 μ_{max} が低下すると、 μ_{load} が μ_{max} を上回り、空転が発生する。考案した制御では、各軸の軸重移動量を算出し、各軸の μ_{load} が、指令値 μ^* を上回らないように各軸電動機トルクを指令する。2秒以降において、他軸の空転は発生していない。これにより、ある軸の空転が、他軸の空転を誘発するのを、トルク制御により抑制できることが分かった。

4. 地震時における車両の大変位挙動解析

兵庫県南部地震（阪神大震災）や新潟県中越地震を契機として、地震時における車両の挙動が注目されている。

そこで、図5のように軌道の振動変位を入力し、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

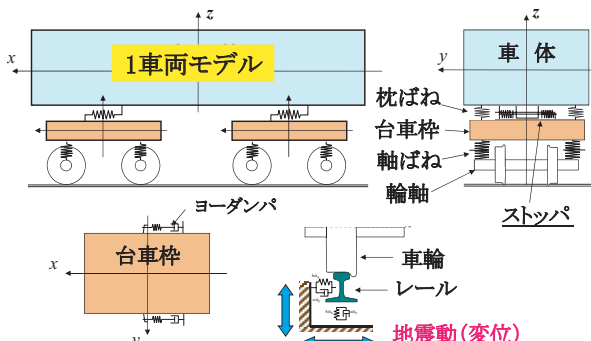
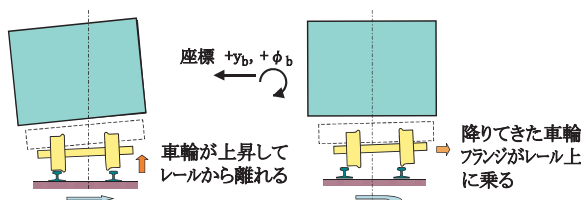


図5 車両のモデルと地震動の入力



軌道が右へ向かって動く → 軌道が左に動き、中心付近に戻る

図6 ロッキング脱線

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6参照）。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振幅との関係で表した走行安全限界線図として図7に示す。走行安全限界線図は、地震動に対する基本的な車両の走行安全性を把握し、車両や構造物等の特性に応じた走行安全性の相違を比較評価するのに有効である。また、車両側での地震

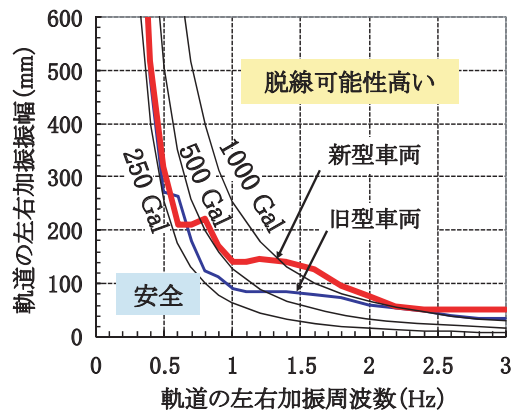
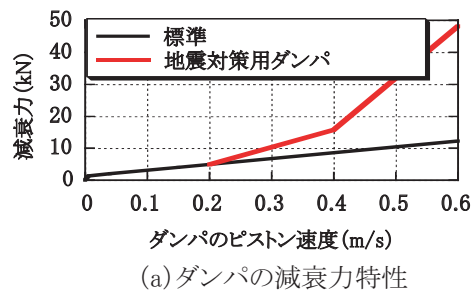
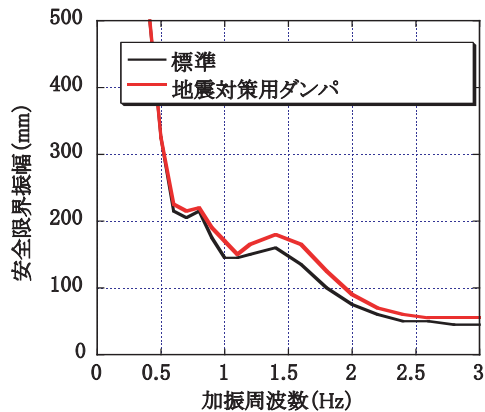


図7 走行安全限界線図



(a) ダンパの減衰力特性



(b) 安全限界振幅の向上

図8 地震対策用ダンパの効果

特集：車両技術

対策として、地震時脱線防止用左右動ダンパ（地震対策用ダンパ）を考案した（JR東日本と特許共同出願中）。このダンパは、図8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、異常にピストン速度が速くなったとき、つまり地震時のように車体・台車間が大きく左右に変位した場合に、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。

5. 車両の側面圧縮強度特性評価

平成17年4月に発生した福知山線の脱線衝突事故では、車両が側面方向から衝撃を受け、車体が大きく損壊した。したがって、車体側面圧縮強度特性を把握することが重要である。そこで、軽量ステンレス鋼製拡幅中間車を模擬した実物大部分車体を用いて準静的圧縮試験を実施した。また、準静的圧縮試験と同様の条件でFEM解析を行い、試験結果と比較・検証を行った。

圧縮試験の概略を図9に示す。反力壁と剛平板の間の支持台上に試験体を設置し、剛平板を油圧シリンダで試験体の側面から平行に押し付けるように、準静的に圧縮した。

圧縮後の変形形状を図10に示す。拡幅構造である側構体は剛平板により平面状に変形し、屋根は上に膨らみ、台枠については、横ばりが下方向に座屈した。

次に、準静的圧縮試験に相当するFEM解析を実施した。FEM解析によって得られた変形形状を図11に、計

算された圧縮荷重と変形量の関係を試験結果と併せて図12に示す。変形形状および荷重－変形量関係について、FEM解析結果と実物車体での試験結果はよく一致し、鉄道車両の車体側面圧縮強度特性の最も基本となる側面方向からの準静的な圧縮に対する変形特性および荷重－変形量特性を得た。さらに、FEM解析による検証により、側面からの荷重に対しては台枠が荷重を負担する割合が大きいこと、スポット溶接部の破断強度が車体構造の圧縮破壊特性に大きく影響すること等が分かった。

なお、本研究は国土交通省の補助金を受けて実施した。

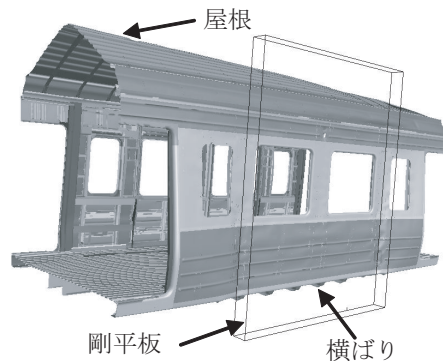


図11 FEM解析による変形形状

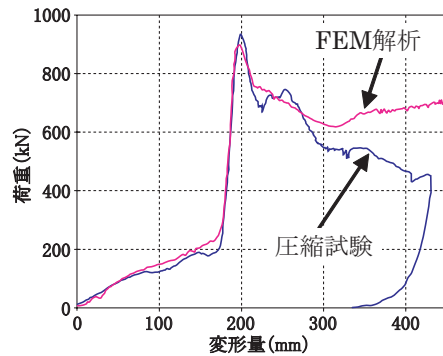


図12 荷重－変形量特性

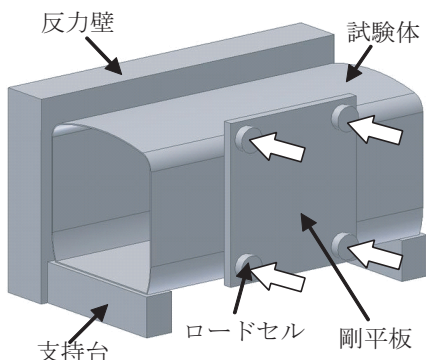


図9 圧縮試験

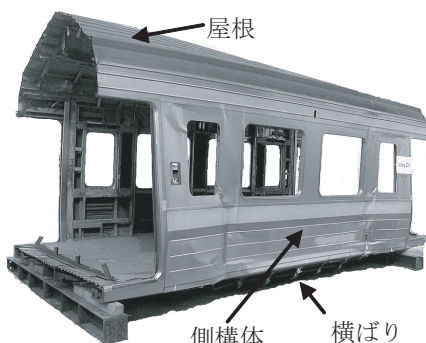


図10 圧縮試験による変形形状

6. おわりに

車両分野のシミュレーションについて、いくつかの例を挙げて紹介した。今後ますます加速度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。

文献

- 1) 平野純一，富井規雄，山下修：運転曲線作成システム SPEEDY の開発，RRR，Vol.49，No.5，pp.9-14，1992
- 2) 電気学会技術報告673号：鉄道車両における粘着制御技術
- 3) 大橋，勝又，安岡，山城，齊間：個別分散VVVF制御方式による電気車の粘着性能向上について，電気学会交通電気鉄道研究会，TER-92-49，1992