

環境を考慮した車両関連シミュレーション技術

小笠 正道*

Simulation Technology for Rail-vehicles to Improve Environmental Issues

Masamichi OGASA

This paper introduces three topics of simulation technology for rail vehicles to improve environmental issues. The first topic is the development of a surge-propagation simulator for AC-fed rail-vehicles consisting of four general-purpose freeware. The second one is the development of a running-energy simulator for hybrid rail-vehicles by using originally developed software. The third one is the construction of an analysis model of on-vehicle gear units to simulate the vibration conduction and acoustic emission, by using dedicated software, to reduce the noise level.

キーワード：サージ、伝搬、ハイブリッド、走行エネルギー、歯車、振動、放射音

1. はじめに

車両シミュレーションは技術対象ごとに特化したものが数多く存在し、以前より、車両の運動、台車挙動をはじめ、車体の振動、走行車両の運転時分、電力変換器スイッチングに伴う高調波による電磁妨害などに関するシミュレーションが行われてきた。

また鉄道総研では2010年度から2014年度にかけての中長期計画 Research2010 において高機能鉄道シミュレータの開発を掲げており、車両分野では走行エネルギーなどに力点を置いた車両の走行シミュレータの開発、電磁環境評価に向けた磁界の見える化シミュレーション技術の構築、HILS (Hardware In the Loop Simulation) 方式の車体間運動模擬装置を用いた編成車両の運動特性評価や空力特性評価などに邁進している。

このような状況の中、「環境との調和」は、Research 2010 における研究開発4目標の1つである。そこで本稿では、環境を考慮した車両設計を支援するシミュレーション技術3件を紹介する。1件目は4つの汎用フリーソフトの組合せによる交流電気車のサージ電圧伝搬シミュレーション¹⁾、2件目はオリジナルシミュレータ開発によるハイブリッド車両走行エネルギーシミュレーション²⁾、3件目は専用ソフトを用いた解析モデル構築による歯車装置の振動・騒音低減シミュレーション³⁾である。

2. サージ電圧伝搬シミュレーション

サージ電圧は鉄道電磁環境の国際規格 IEC62236 にも定義される EMC (Electromagnetic Compatibility: 電磁

両立性)の1つで、環境項目である。交流電気車でパンタグラフ上昇時に車体やケーブルにサージ電圧が発生伝搬し、台車機器破損の発生や、接地回路次第では車体電位上昇に伴って人体感電も起きかねない重要な項目である。周囲に影響を及ぼすものは「環境公害」であり、沿線環境の1つでもある。

2.1 サージ電圧の抑制に向けて

パンタグラフ上昇時やセクション通過時に車上機器や地上機器を損傷する事例があり、この原因として、特別高圧(特高)ケーブルの電位急変に伴って電圧変動が誘導されて車体に発生するサージ電圧がある。サージ電圧軽減策としては搭載機器の絶縁強化、接地方法の改良が挙げられる。後者の例である車体接地抵抗器は条件が揃えば有効な対策である。しかし車種により車両の構造が異なると、特高ケーブルの種類や配置も変わり、発生するサージ電圧に違いが生じて抑制効果は限定的となる。

近年、車体傾斜制御装置、台車の振動・温度測定センサなど搭載電子機器の増加に伴い、被害拡大の可能性が高まっている。実際いくつかの報告が上がっている。

サージ電圧をゼロにすることは出来ないが、サージ電圧の上限を事前に予測できれば被害拡大防止策を取ることが可能となる。そのため、交流電気車の車体に発生するサージ電圧を設計段階で予測できるサージ電圧伝搬シミュレータを開発した。

2.2 汎用無償ソフト採用によるシミュレータの構築

シミュレータ構築に当たり、さまざまな車両に対応できること、回路の変更が容易であることを条件とした。この場合、通常は3次元シミュレータの適用を考えるが、高価かつファイル変更が複雑というデメリットがある。

* 車両制御技術研究部 部長

特集：車両技術

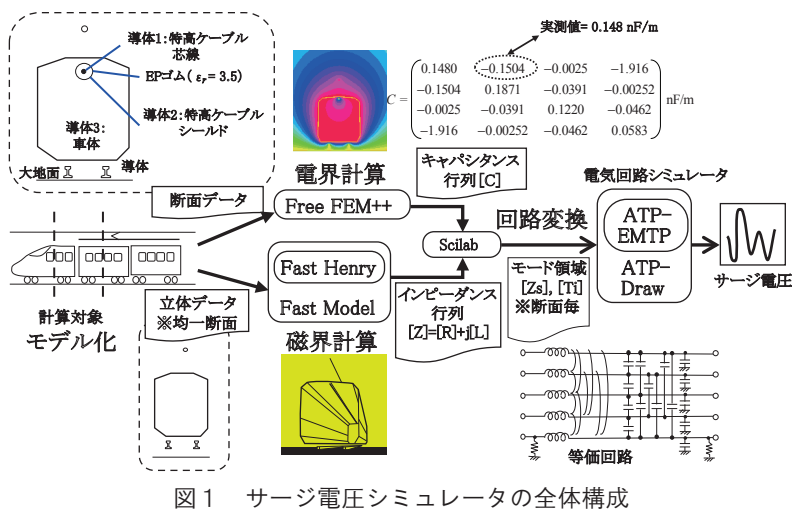


図1 サージ電圧シミュレータの全体構成

そこで、前者には断面形状から電界と磁界を各々計算できる無償汎用ソフトを、後者には無償の電気回路シミュレータを使用するなど、4つの無償ソフトを組合せてシミュレータを構築した。

構築したシミュレータの全体構成を図1に示す。キャパシタンス行列を求める「Free FEM++」、インピーダンス行列を求める「Fast Henry」、モード領域に変換する「Scilab」、最終的にサージ電圧を計算する「ATP-EMTP」の4種類を組合せている。

シミュレータに入力するデータは、架線、レールや大地を含めた車両の各断面データである。また、設計段階で検討が必要と考えられる車両数の変更や特高ケーブル有無の変更、接地箇所の変更などは「ATP-Draw」上での変更のみで可能である。

3次元シミュレータで必要になる煩雑なデータ変更が不要であることが今回のシミュレータの特長である。

2.3 サージ電圧実測結果との照合および結果の活用

8両編成電車において過去多くの機器を損傷してきた1号車車体とレール間のサージ電圧を図2に示す。図2(a)が計算結果、図2(b)が実測結果である。サージ電圧の0-peak 最大値、波形とも概ね再現できており、0-peak 最大値は10%程度の精度が得られている。

構築したシミュレータは導体数や断面形状の制限がないほか、接地の有無や変更、ケーブル配置や編成両数の増減など、多様な構成におけるサージ電圧の計算が容易に可能である。また、汎用無償ソフトのみでの構成のため安価である。

設計段階でのサージ電圧評価を行うことで、サージ電圧の低い配線方法の提示が可能となる。

3. ハイブリッド車両の走行エネルギーシミュレーション

非電化区間を走行する車両の消費エネルギー削減や排

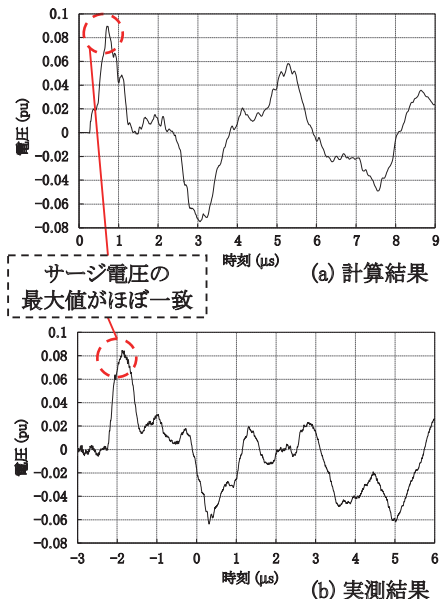


図2 サージ電圧シミュレータの検証結果

出ガス低減など環境改善を目的と

してバッテリーを搭載する鉄道車両の研究開発が進展している。ディーゼルエンジンを搭載してバッテリーにより力行アシストや回生吸収さらには停車中の補機供給を行うディーゼルハイブリッド方式と、ディーゼルエンジンは搭載せずに電化区間や充電箇所バッテリーに充電し、非電化区間は専らバッテリーからの給電のみで力行、回生、補機供給を行うバッテリー電車方式が挙げられる。

上記いずれの方式にも、バッテリー容量の算定など機器設計援用ツールとして、または上述の環境改善効果の予測ツールとして、走行シミュレーションが有用である。

鉄道総研開発のオリジナルソフトである運転曲線作成システム「Speedy」の拡張機能として、同一ソフトで様々な種類のハイブリッド車両に対応可能な、ハイブリッド車両走行シミュレータの開発を行った。

3.1 ハイブリッド車両走行シミュレータの対応車種

当シミュレータが対応する車種を図3に示す。一般の電車、気動車をはじめ、シリーズハイブリッド方式とパ

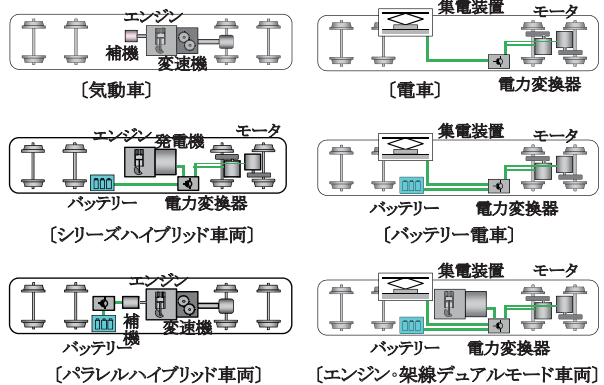


図3 ハイブリッド車両走行エネルギーシミュレータの対応車種

ラレルハイブリッド方式、またバッテリー電車や架線・バッテリーハイブリッド電車、さらにはディーゼル架線デュアルモード車両に対応できる。エンジンを置き換えて燃料電池車両にもできる。なお、集電装置モデルには電抵抗や効率、電力変換器の効率も設定される。

各種ハイブリッド車両のいずれのタイプにも対応できるように、機器の追加削減とその接続を容易に可能とした。シミュレータ画面上では選択した駆動機器群とその接続状況から車両のハイブリッド構成が判別できる。

シミュレータへのデータ入出力の流れを図4に示す。最終出力として運転曲線と、消費エネルギーや燃費、その内訳を示すエネルギーフロー分析結果が得られる。

3.2 エネルギーフロー分析の例

一例としてバッテリー電車の走行線区を示す(図5)。電化区間は架線からの電力で走行し、非電化区間はバッテリーに蓄えた電力で走行する。非電化区間の末端であるE駅には充電設備があり、車載バッテリーへ充電する。

走行シミュレーションのグラフには、速度、時間、バッテリー残量などが駅、勾配、曲線などの線路情報とともに表示され(図6)、CSV形式ファイルに各機器のトルク、電力、回転速度など詳細情報の時間推移が出力される。この例では、車両質量40.5トン、116名乗車のバッテリー電車がC駅からE駅まで走行するのに必要なエネルギー量が23kWhであることが分かる。

このように、シミュレーション結果を用いることで、最小限必要なバッテリー容量、寿命を考慮した搭載容量を決定するなど、設計支援に使用できる。

またエネルギー量の推移を表示でき(図7)、さらに

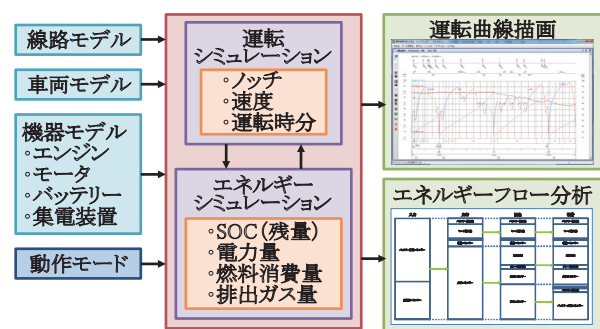


図4 ハイブリッド車両走行エネルギーシミュレータへのデータ入出力の流れ

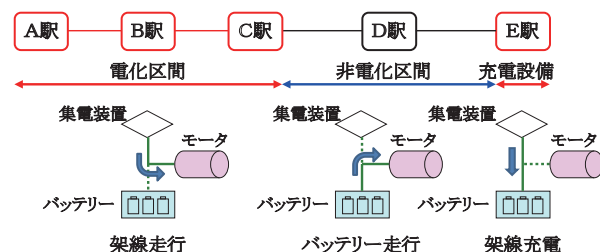


図5 バッテリー電車の走行線区の例

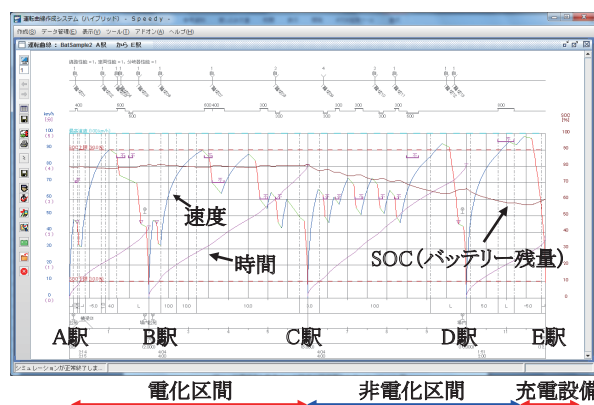


図6 バッテリー電車の走行シミュレーション結果

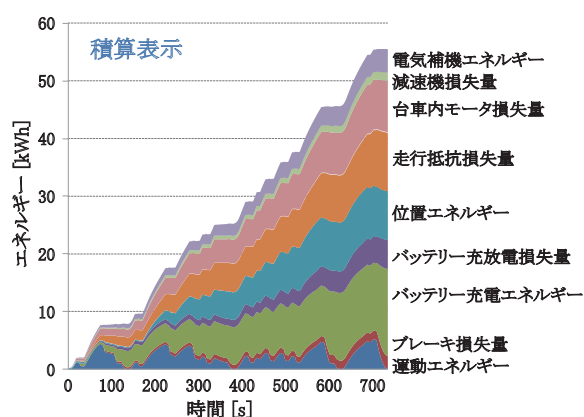


図7 エネルギー損失の推移

パワー源、駆動機器ごとおよび走行抵抗等を含む各種損失として、力行時、回生時、さらに最終消費段階ごとに、エネルギー分担を分析できる機能を持っている。この機能を活用すれば、ハイブリッド化やハイブリッド構成の変更によって、どの損失がどの程度減るかなどの予測も可能となる。

4. 歯車装置の振動・騒音低減シミュレーション

在来鉄道の電動車では騒音低減の観点から主電動機の密閉化が試みられており、主電動機自体の低騒音化は着実に進みつつある。付随車なみの駆動系騒音レベルに近づけるには、歯車装置からの騒音低減が必要である。歯車装置の詳細な振動・騒音の発生メカニズムの解明と低減対策の提示に向けて、その一環として振動・騒音低減シミュレーション技術の開発を進めている。

4.1 歯車装置の振動伝搬経路と解析モデル

電気車で最も普及している平行カルダン方式の歯車装置の振動伝搬経路と騒音発生のイメージを図8右上部に示す。走行時には主電動機のトルク脈動に起因するねじり変動力(図8の①部分)、はす歯形状に起因するスラスト力を含めた小歯車と大歯車の噛合いによる変動力

特集：車両技術

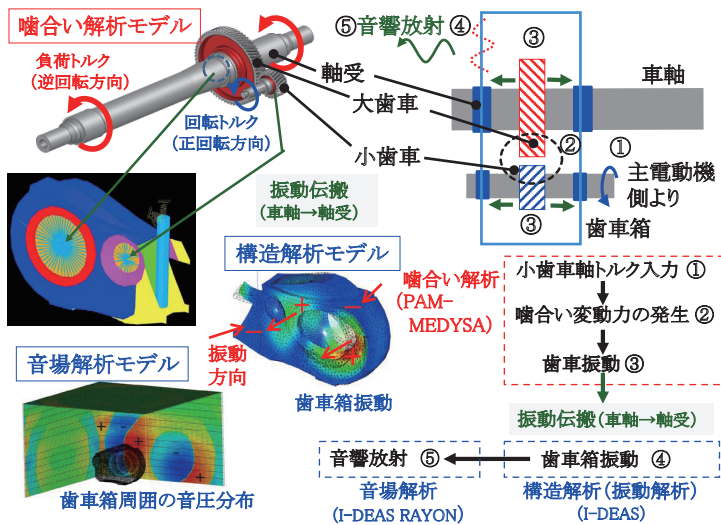


図8 歯車振動・騒音の伝搬経路と解析モデル

(②部分) などが発生する。これらの成分が小歯車や大歯車 (③部分) の各軸受を介して歯車箱に伝搬することで歯車箱振動を発生 (④部分) し、その表面から外部へ音響放射 (⑤部分) する。

解析手法として、まず小歯車と小歯車軸、大歯車と車軸から構成される形状モデルを用いて回転状態を模擬して噛み合い解析を行う。次に得られた各軸受部の作用力を入力として歯車箱の構造解析 (振動解析) を行う。さらに歯車箱表面の振動成分を境界条件として周囲の音場を解析することで騒音評価を行う。これら各ステップで専用ソフトを用いたシミュレーション結果を組み合わせることにより、歯車装置から発生する騒音や振動の解明を進めている。

4.2 噛み合い解析による歯車変動力の再現

汎用有限要素法コード (陽解法) である「PAM-ME-DYSA」を用いた噛み合い解析の結果例を示す。小歯車に一定回転数を維持する主電動機トルクを入力した場合、小歯車と大歯車の噛み合い作用によって大歯車の回転数に 1849rpm から 1852rpm の間の変動が生じている (図9)。この変動成分が歯車系のねじり成分となり、振動発生源の1つになると考えられる。

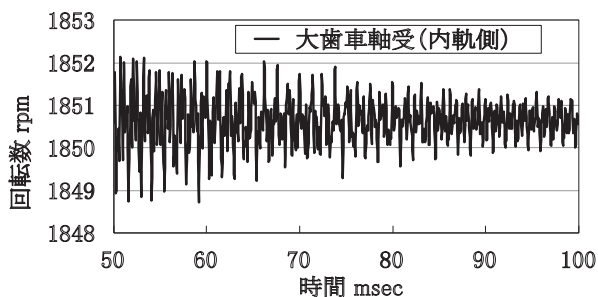
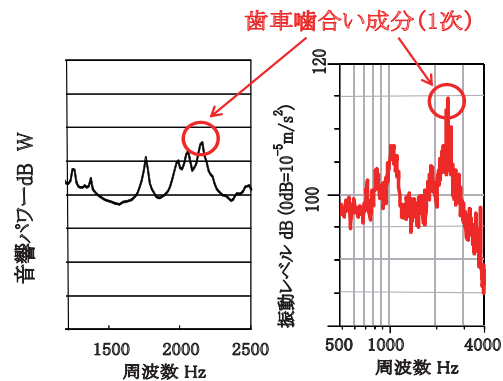


図9 歯車の噛み合い作用に伴う大歯車の回転数変動

4.3 歯車箱から発生する騒音の再現

噛み合い解析結果に基づき、構造解析 (振動解析) ソフト「I-DEAS」と音場解析ソフト「I-DEAS RAYON」を用いて、歯車箱からの音響パワーを計算した (図10 (a))。複数のピーク周波数のうち音響パワーの最大値を与える周波数は、図10 (b) の実車歯車箱の最大振動レベルを与える周波数であり、歯車噛み合い1次成分によるものである。このことから、歯車の噛み合いに起因して歯車箱から音響放射が起こっていると考えられる。

複数の専用ソフトを駆使したシミュレーション技術により、歯車材質の変更や構造変更による騒音低減度合いの予測ができるようになることが期待される。



(a) 構造/音場解析による歯車箱の音響パワー解析結果 (b) 歯車箱の振動測定結果 (実車力行時)

図10 歯車箱からの騒音 (シミュレーション結果) と振動 (実車測定) の比較

5. おわりに

環境を考慮した車両関連のシミュレーション技術を紹介した。検討対象のモデル化の重要性は言を待たないが、同時に「ソフトの構成法や具体化手法の巧拙によって所望の結果を得るまでのリソースに影響を与える」ことも重要なポイントである。知識や経験、実物の物理情報を統合することで初めて役に立つシミュレータが構成できる。

今後も、実機との整合など十分な確認を行いながら、有用なシミュレータ開発を続けて行く予定である。

文献

- 1) 廿日出悟, 藤野謙司, 菅野悟: 高速鉄道車両の車体異常電圧推定のためのシミュレータ構築, 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-13-004, 2013
- 2) 小川知行: ハイブリッド車両向け走行シミュレーション, RRR, Vol.68, No.12, pp.22-25, 2011
- 3) 笹倉実, 佐藤潔: 平行カルダン方式歯車装置の振動放射音の解析, 鉄道総研報告, Vol.26, No.3, pp. 41-46, 2012