

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 電車の運行電力をシミュレーションする

電車の運行電力を推定するシミュレーションは各方面で長年取り組まれてきましたが、従来は電力・車両・運転といった分野別の取り組みにとどまることが多く、他分野の事項の模擬不足に起因して数値計算と実測の差が大きくなりがちでした。ここでは、分野横断的取り組みとして、各分野で蓄積した詳細模擬ノウハウを組み合わせ高精度な計算を可能としたシミュレーターの開発と、その現車・現地検証事例を紹介します。



**森本 大観**  
Hiroaki Morimoto  
電力技術研究部  
き電研究室  
主任研究員  
【専門分野】き電回路全般



**武内 陽子**  
Yoko Takeuchi  
信号・情報技術研究部  
運転システム研究室  
主任研究員  
【専門分野】列車運行シミュレーション、運行実績分析



**小川 知行**  
Tomoyuki Ogawa  
車両制御技術研究部  
水素・エネルギー研究室  
副主任研究員  
【専門分野】鉄道車両のエネルギー消費計算

## 列車運行用電力の効率的利用の検討

電気鉄道を安定して営業するために、営業にかかわるすべての電車に十分な電力が供給されることが必須です。これに加え、いかに電気エネルギーを効率よく利用するかが、昨今では改めて大きな課題となっています。

エネルギー利用効率の改善には、変電所から列車までの間の抵抗損失の低減、車両の軽量化・機器効率向上、列車の運転操縦の地道な工夫の積み重ねなどがあげられます。さらに、車両の回生ブレーキで発生する電力をうまく利用するためのダイヤ組成の工夫や、電力貯蔵（地上、車上）も手段になり得るでしょう。

では、各々の取り組みは、電気鉄道事業全体の視点においてどのくらいの効果を期待できるものなのでしょうか。

この問いに答えるための一つの手段として、車両の特性・運転操縦と運行管理・き電システムの諸現象を計算機上で模擬する「シミュレーション」があげられます。

## シミュレーションと実際の相違とその理由

列車運行用電力を推定計算することは、電化設備設計や車両機器設計における仕様検討などの場面において行われてきました。

電力分野では、各々の列車位置で架線電圧が十分確保できるかどうか、また設備の容量が足りるか否かを確認するにあたり、既存の設計指針で対応しきれない変則ケースをシミュレーションで検討することがあります<sup>1)</sup>。

車両分野では、新形式車両あるいは新しい電機品の性能が投入先路線を走行するために十分であるか、あるいは新規投入する路線や列車に対する性能が十分であるかなどの事前評価において、シミュレーションが重要な検討手段となります。

一方、運転分野において、運転曲線作成はダイヤ策定に不可欠であり、古くから列車走行のシミュレーションが用いられてきました<sup>2)</sup>。その一環として、新形式車両による走行時間短縮効果の試算にもシミュレーションが用いられてきました。

さて、ここにあげたシミュレーショ

は従来、電力・車両・運転といった分野別にその技術が蓄積されてきました。ただし、これらのどれをとっても自分分野だけの情報では完結せず、多少なりとも他分野の情報が必要となります。しかし、従来は自分分野での検討対象に関することは模擬計算モデル作成や入力数値条件設定を詳細に行えていても、他分野に関する模擬は必ずしも十分にできていない場合が多くありました。

ある列車のある時点における架線電圧は、その列車の位置・速度、車両の特性、変電所の特性、電車線とレールの電気抵抗、運転操縦、乗車率、補機類の稼働状態など、さまざまな要因の組み合わせによって決定されます。また、回生ブレーキはそれによって発生した電力を受け取ってくれる他列車や地上装置が近傍にあるか否かによってその効果が影響されます。そして、駅の位置、勾配、速度制限などの線路の条件と、直前の時刻までの履歴が、当該列車の現在時刻での加速性能や次の時刻に行われる運転操縦に影響し、その結果が積み重なって、各列車および各変電所の電力量、列車の実績ランカーブ・実績ダイヤなどが決まります。

従来は、これらの相互関係のどこかを、個別分野での検討目的別に固定した入力条件とせざるを得なかったのですが、計算のためのモデルとそのモデルに入力するデータのどこかに実際に反映しないものがあれば、計算結果もまた実際に反映しないものが得られてしまいます。これが、従来長い間「電力シミュレーションは現実とは決して合わないものである」と言われてきたことの根本原因だったのです。

### 垣根を超えるー餅は餅屋

冒頭に掲げた個々の省エネ施策の効果度合いは数%程度ですから、シミュ

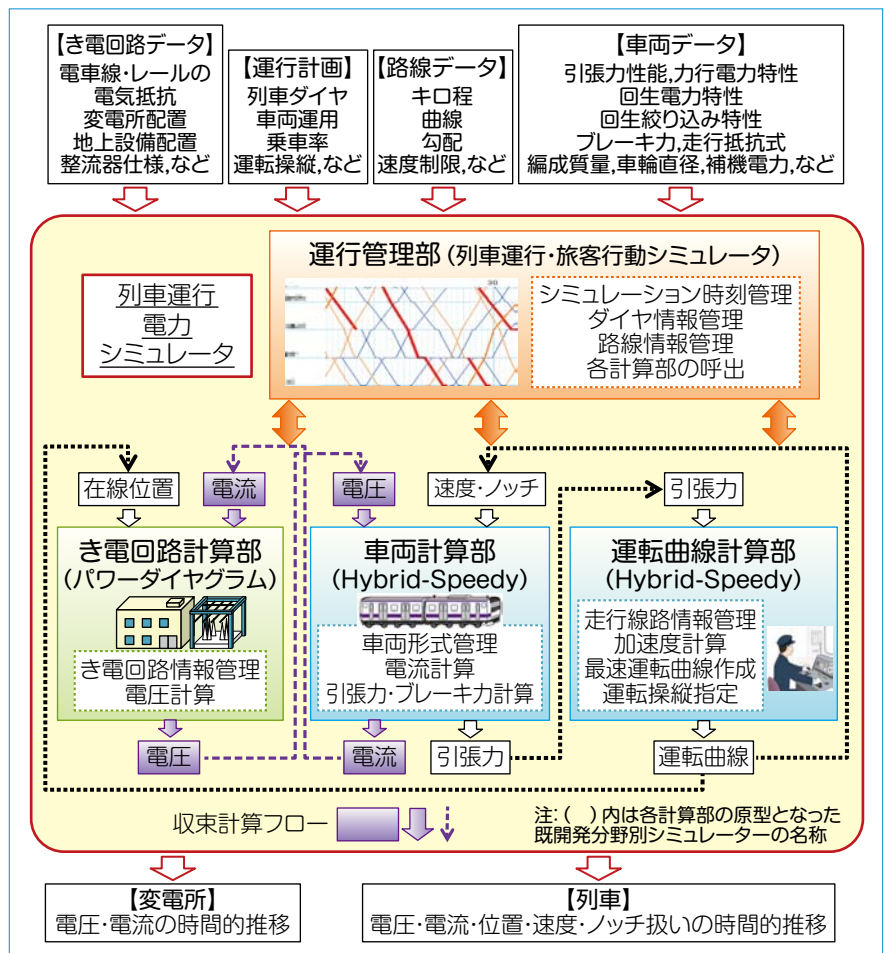


図1 「列車運行電力シミュレータ」の入出力データ・機能・構成<sup>3)</sup>

レーションで省エネ効果を予測可能とするためには、使用するシミュレーター自身が実現可能な限り忠実に模擬し、評価に耐えうる高い精度の数値出力を得られることが求められます。

この現状において、もはや分野間で壁を作っている状況ではないと考え、電力量を±10%以内の数値精度で再現することをひとつの到達目標として、新しいシミュレーターを開発しました。それが、「列車運行電力シミュレータ」です(図1)。

「列車運行電力シミュレータ」は、電力・車両・運転の分野でそれぞれ実績を蓄積してきた分野別シミュレーターから、各々が最も得意とする技術・ノウハウに基づく計算モジュールを持ち寄り、それらが密接に関わりながら全体として一貫した計算の流れを構成するように改良・調整をすることに

よって誕生しました。これにより、各分野で計算に必要な一つひとつの要素のモデルを、データを余すことなく活用して忠実に作成し、その積み重ね全体もまた電気鉄道の実現象を忠実に再現できるようにしています。

### 現地・現車試験とその再現計算の比較による検証

高い計算精度を目的とするシミュレーターは、その計算手法が正当であることが検証されて初めてその存在意義を成します。これに関して、西日本旅客鉄道(株)殿のご協力を得て、JR東西線での列車走行試験による測定結果を活用した精度検証を実施しました。

検証のためには、実路線での測定結果と、測定状況を再現したシミュレーション計算結果とを比較する必要があります。しかし、直流電化区間では、

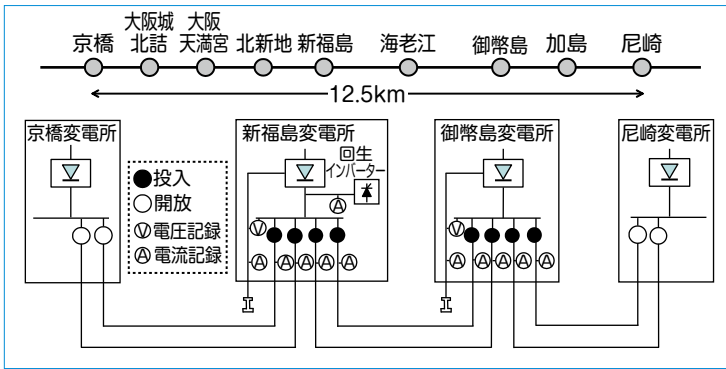


図2 試験とき電回路構成<sup>4)</sup>

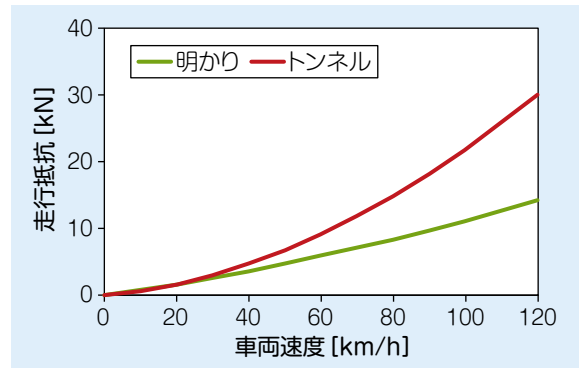


図3 再現計算に用いた走行抵抗<sup>3)</sup>

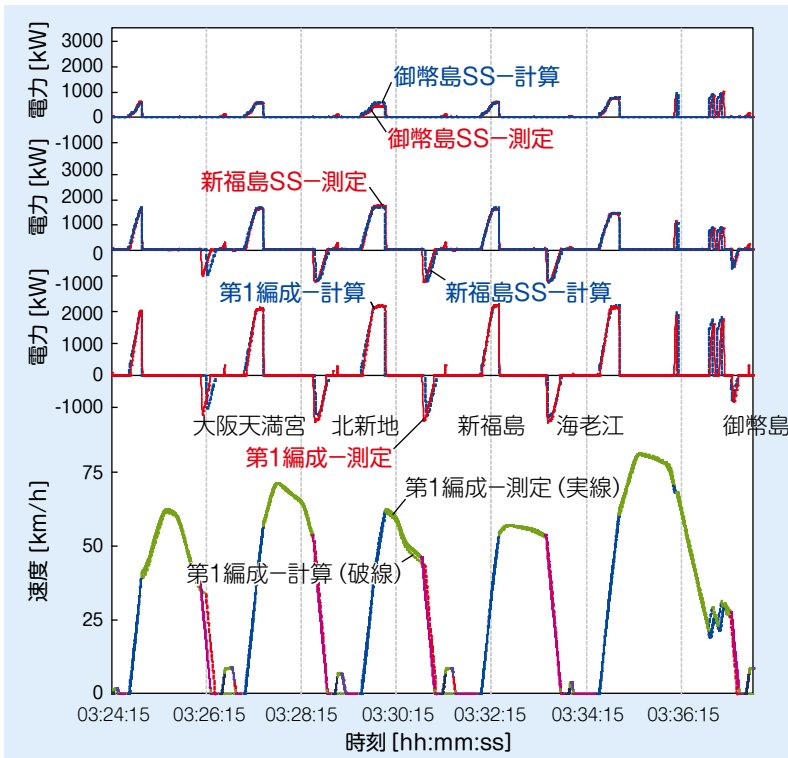


図4 測定結果と計算結果との比較<sup>3)</sup>

営業時間帯はき電回路がどこまでもつながるため、検証対象となる列車と変電所の電力測定結果を一对一で関連付けることが困難です。また、営業列車の運転操縦・集電電流などの詳細をすべて取得することも容易ではありません。そこで、夜間にき電区間を限定し(図2)、その区間内で荷重条件や運転操縦を設定して試験列車を走らせ、車上と地上で測定データの時刻同期を含む詳細測定を行う試験を実施しました。設定条件の中でも、運転操作はとく

に消費エネルギーに重要な影響をおよぼします。シミュレーターの基礎機能検証のためには、再現計算が可能な運転操作によって試験列車が走行することが必要でした。そのため、各駅での停止位置を考慮してブレーキノッチ扱いをあらかじめ適切に規定し、かつ、営業時の走行時分に近い運転を再現すべく、詳細な検討を重ね、列車走行試験時の運転指示を作成しました。まず、営業車両における車両情報記録装置<sup>5)</sup>の実績走行時分から、試験ダイヤ

上の駅間走行時分を設定します。次いで、車両走行エネルギーシミュレーター「Hybrid-Speedy」<sup>6)</sup>のエネルギー評価用運転曲線作成機能<sup>7)</sup>を用いて、設定した駅間走行時分での運転曲線を計算し、さらに実際の運転操作のしやすさを加味した修正を加えました。

一方、再現のためのシミュレーションで高精度な結果を得るためには、入力データをなるべく正確に設定することが重要です。そのため、車両の走行抵抗は運転計画に用いられる一般式でなく、車両情報記録装置を活用した走行抵抗推定手法を活用して入力データを作成し(図3)、とくに高速域での惰行時の速度低下が精度良く計算できるようにしました。変電所の特性も、機器銘板値による従来の簡略モデルではなく実際の電流-電圧特性をトレースして得られた多点折れ線近似モデルを設定しました。試験走行時の列車ダイヤ、ならびに実績運転操縦を入力として計算を実施し、シミュレーション結果と測定結果とを比較しました(図4)。

まず、列車速度について見てみます。図中の速度を表す曲線は、計算結果を破線で、測定結果を実線で、それぞれ示しており、さらに運転操縦を、青系の色が力行、緑が惰行、赤系の色がブレーキで色分けして示しています。測定結果と計算結果はおおむね一致しています。運転操縦を実績通りに再現す

るとともに、正確な車両の諸特性を与えることによって、現実に近い列車走行を再現できています。

次に、変電所の電圧・電流について見てみます。青系の色が計算で、赤系の色が測定データです。こちらも測定結果と計算結果はおおむね一致しています。試験時は2箇所の変電所の並列き電としていましたので、両変電所と列車の位置関係によって電力の分担割合が変化していきます。2箇所の変電所の特性に若干の差が生じている状況も模擬できています。

電力量の比較結果を図5に示します。測定試験結果を基準としたシミュレーション計算結果の誤差は、2変電所合計の消費電力量で3.6%でした。なお、各変電所個別での誤差は2変電所合計よりも大きくなっていますが、これは電力会社側の系統運用や他の電力需要家などに起因して変電所の受電電圧が随時変動することをシミュレーションモデルでは考慮していないためです。

これらの検証より、測定データと、車両、電力、運転操縦なども含めた設定試験条件に対応する入力データがそろうという条件で、良好な精度で測定結果とシミュレーション計算結果とが対応することを確認しました。

他の路線での検証でもここで紹介したのと同様に、良好な再現計算ができることを確認しました。

### おわりに一将来へむけて

ここでは分野間の連携による高精度なシミュレーターの開発事例を紹介しました。ただし、これは実はゴールではなく、新たなスタートラインによりやく立てたという方が正確です。現在は、営業時間帯における複数路線の多数列車・多数変電所を模擬するためのさらなるシミュレーターの改良に取り組んでいるところです<sup>8)</sup>。

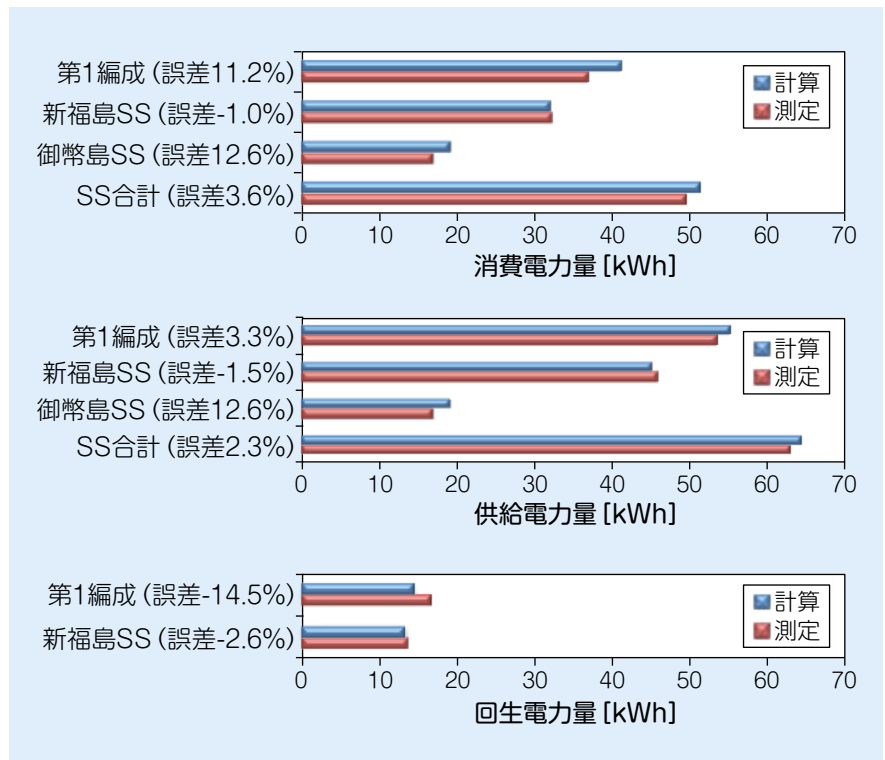


図5 消費電力量、供給電力量、回生電力量の比較<sup>3)</sup>

これからも地道に改良を続け、電気鉄道のエネルギ消費の課題に取り組んでまいります。

列車走行試験やデータ提供などに多大なご協力をいただいた西日本旅客鉄

道(株)の関係各位に深く感謝申し上げます。

本稿の列車運行電力シミュレーターの開発の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。

RRR

### 文献

- 1) 長谷伸一, 伊東利勝: 列車ダイヤ入力方式による運転電力シミュレーション, 第8回鉄道技術連合シンポジウム, S8-4-5, 2001
- 2) 山下修: 特集 鉄道総研 運転曲線図と運転曲線作成システム「SPEEDY」, 運転協会誌, Vol.48, No.3, pp.1-4, 2006
- 3) 武内陽子, 小川知行, 森本大観, 今村洋一, 美濃部晋吾, 杉本祥一: 列車運行電力シミュレーターの開発, 鉄道総研報告, Vol.30, No.8, pp.5-10, 2016
- 4) 武内陽子, 小川知行, 森本大観, 真鍋慎一, 今村洋一, 美濃部晋吾, 川村淳也, 宮口浩一, 林田健太郎, 島田直人, 山野井隆: 列車運行電力シミュレーターの開発と消費電力測定試験による検証, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-14-049, 2014
- 5) 川村淳也, 山本雄一, 小川展央, 福井省三: データマイニング手法を用いた営業列車蓄積データの分析, 第17回鉄道技術連合シンポジウム, S1-2-1, 2010
- 6) 小川知行, 近藤稔, 熊澤一将, 今村洋一, 美濃部晋吾, 川村淳也, 島田直人, 添田正, 杉山義一: 汎用鉄道車両走行エネルギーシミュレーターの開発, 電気学会リニアドライブ/交通・電気鉄道合同研究会, LD-14-067/TER-14-030, 2014
- 7) 小川知行, 佐藤圭介, 今村洋一, 美濃部晋吾, 川村淳也, 影山真佐富, 島田直人: 鉄道車両走行シミュレーターのエネルギー評価用運転曲線の開発, 電気学会論文誌D, Vol.135, No.5, pp.563-570, 2015
- 8) 小川知行, 武内陽子, 森本大観, 今村洋一, 影山真佐富: 列車運行電力シミュレーターの長期営業走行電力測定による検証, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-17-004, 2017