

列車運行電力シミュレータの開発

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#

Development of a Coupled-Analysis Traction Power Simulation System

Yoko TAKEUCHI Tomoyuki OGAWA Hiroaki MORIMOTO
Yoichi IMAMURA Shingo MINOBE Shoichi SUGIMOTO

In order to estimate traction power consumption more precisely, we have been developing a traction power simulation system which executes coupled analysis among the power supply network, the rolling stock characteristics and drivers' operating methods. First, we describe the outline of this simulation system. Secondly, we explain about the simultaneous measurements of substations and rolling stocks within a limited feeding section. Then, we verify the degree of accuracy of this simulation system though comparison between the calculation results and this simultaneous measurement results.

キーワード：直流き電，消費電力，シミュレータ，変電設備，車両特性，運転操縦，回生ブレーキ

1. はじめに

従来、鉄道の運行電力推定は、地上設備設計や車両機器設計が主な用途となっていたため、最大負荷時の電力を把握することが主な目的となっていた。一方、近年、消費エネルギー削減の観点での列車運行電力推定に対するニーズが高まっている。2005年の改正省エネルギー法の施行や、2011年の東日本大震災以降の電力不足と電気料金の値上がりもあり、鉄道事業者では、電力貯蔵装置・上下タイポストなどの各種省エネ地上設備や、省エネ車両の導入・省エネ運転の工夫などが進んでいる。そのため、どのような施策を実施すれば、どの程度の省エネ効果があるのかを予測するための手段が求められてきている。このような背景のもと、鉄道総研では、実規模の複数路線を対象とした多数の列車の消費エネルギーを推定することを目標として、地上設備・車両・運転操縦を模擬する列車運行電力シミュレータを開発している。

本報告では、シミュレータの計算手法と、その計算手法を検証するために実施した測定試験について述べ、検証結果を示す。具体的には、き電区間を限定した地上設備と車両の同時測定試験¹⁾とシミュレータの計算結果とを比較することにより、シミュレータの精度を確認する。

2. 背景と課題

列車の消費エネルギーを推定するシミュレーションは、それぞれ既に各方面で開発され実用に供されている^{2)~8)}。しかしながら、従来は電力・車両・運転といった分野別の取り組みに留まることが大多数であったため、自分野の計算モデルや計算条件は詳細に実装していても、他分野の模擬が必ずしも十分でない場合があり、結果的に数値計算結果が実測データから乖離してしまうという問題があった。したがって、より現実に近い消費電力推定を実施可能とするためには、複数列車の電流・電圧を計算する機能、各列車の電圧を反映して運転曲線を計算する機能、実際の運転操縦を再現できる機能等が必要となり、さらにそれらが適切な形で連成解析を構成していることが必要である。

また、各種省エネ施策の効果の度合いは数%程度であることを考えると、シミュレーション計算によって省エネ効果を評価可能とするためには、電力量を±10%以内の精度で再現可能であることがひとつの目標となる。シミュレータの精度を検証するためには、実地上設備・実車両による測定試験結果との比較による検証が重要である。しかしながら、分野別の取り組みとして測定試験が実施されると、自分野の試験条件設定や測定作業は詳細に行っているが、他分野に関する部分は不十分な場合が多い。この結果、シミュレータの検証においても自分野に偏った評価・検証となってしまう。特に、厳密な検証を行うためには、き電区間内に測定対象車両以外が存在しない状態にして、全ての変電所と車両の同時測

* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室
** 車両制御技術研究部 水素・エネルギー研究室
*** 電力技術研究部 き電研究室
西日本旅客鉄道株式会社

特集：輸送計画技術

定試験を実施し、地上設備と車両を同期したデータに対して、シミュレータの検証を行うことが必要である。

3. 列車運行電力シミュレータの計算手法

今回開発したシミュレータは、より現実に近い列車運行電力推定を可能にするという目標の下に、車両性能、運転操縦と運行管理、電力供給について、これまでに鉄道総研の各分野がその専門性・知見を活かして開発してきた計算手法を統合することで構成している。車両計算部並びに運転曲線計算部は、運転曲線作成と車両エネルギー計算を行う汎用走行エネルギーシミュレータ「Hybrid-Speedy」⁷⁾のロジックを基本とした。き電回路計算部は、旧来型の運行電力シミュレーションのひとつである「パワーダイアグラム」⁸⁾からき電回路電圧降下計算サブモジュールのみを抜粋して、本用途向けに改良した。列車群の運行管理並びに計算上の時間進行を司る運行管理部は、列車運行・旅客行動シミュレータ⁶⁾を基に構成した。

3.1 列車運行電力シミュレータを構成する計算部

列車運行電力シミュレータの入出力データ・機能・構成を図1に、計算結果の表示イメージを図2に示す。各計算部の主な機能は、以下の通りである。

運行管理部

- シミュレーションクロックを管理する
- 列車ダイヤと車両運用にしたがって、該当する車両形式の列車を発生させる
- 路線情報を管理し、各列車の在線位置を計算する
- き電回路計算部、車両計算部に対して、在線位置、電流、電圧、速度などのデータを設定し、回路方程式を繰り返し解く収束計算を実施させる
- 運転曲線計算部をダイヤデータに従った順序で呼び出し、各列車の各駅間を走行させる

き電回路計算部

- 各列車の電圧と電流は、シミュレーションクロック Δt [s]の間は一定と仮定する
- Δt 毎の各時刻において、在線中の全ての列車の電流と電圧との関係が適切になる値を計算する
 - 回路方程式を繰り返し解き、収束計算を実施する

車両計算部

- 車両特性を詳細に模擬し、き電回路計算に必要な各列車の電流を計算する
- 各列車の電圧を用いて、運転曲線計算に必要な引張力を計算する

運転曲線計算部

- ノッチ変化点・こう配変化点・曲線変化点等のあらかじめ定義された変化点に加えて、距離 Δs [m] を

最大計算単位として、運転曲線の計算点を設定する

- 速度制限、線路データ、車両データ、運転操縦指定、および、車両計算部の計算結果である引張力に基づいて、指定区間の運転曲線を計算する
- 運転操縦の指定に基づいた運転曲線を計算する
- 運転操縦が指定されていない場合には、最速運転曲線を計算する

3.2 計算部の連成手順

本来は連続的に変化する現象を離散的に計算するため、き電回路計算部は、シミュレーションクロック Δt [s]の単位で離散化する一方で、運転曲線計算部は、距離の Δs [m]を最大計算単位として計算を実施している。この非同期交互連成アルゴリズムは、 Δt と Δs を独立に選べるため、特に運転曲線計算との親和性が良く、運転・車両・き電回路の各計算部の計算モデル構築を各々独立に行うことができる。電流、電圧、運転曲線の計算単位のイメージを図3に示す。具体的な連成手順は以下の通りである。

- 時刻 t_j ~ 時刻 t_{j+1} 間の Δt の間の各列車の電圧・電流を計算する（き電回路計算部、車両計算部）
- (1) の計算値を用いて、時刻 t_j ~ 時刻 t_{j+1} 間の Δt の間の運転曲線を Δs 毎に計算する（運転曲線計算部）
- シミュレーションクロックを Δt 進める（運行管理部）

4. 列車運行電力シミュレータの精度検証

より現実に近い列車運行電力推定のためには、列車運行電力シミュレータの計算ロジックが正しいかどうか

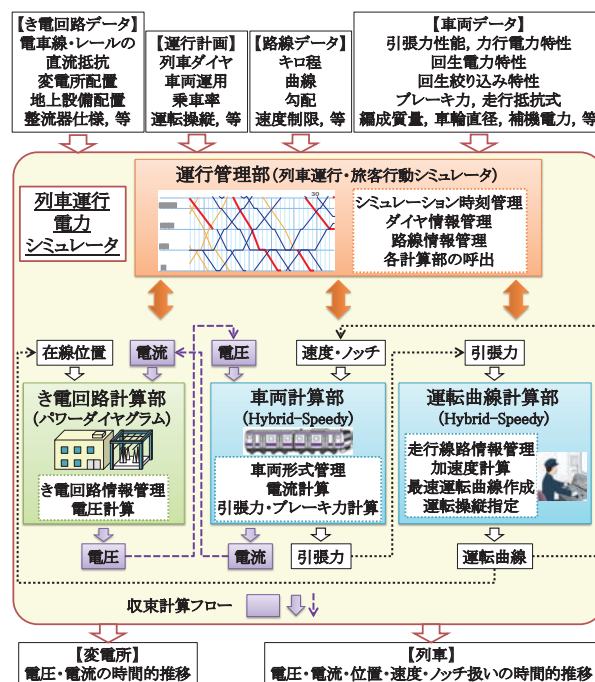


図1 列車運行電力シミュレータの入出力データ・機能・構成

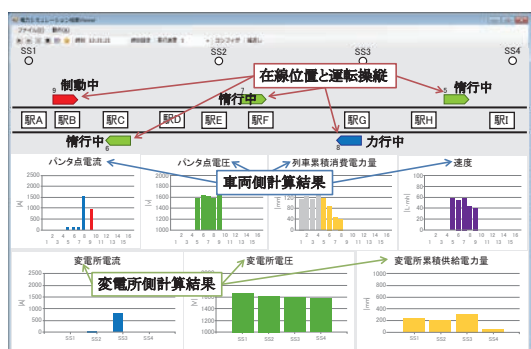


図2 計算結果の表示イメージ⁹⁾

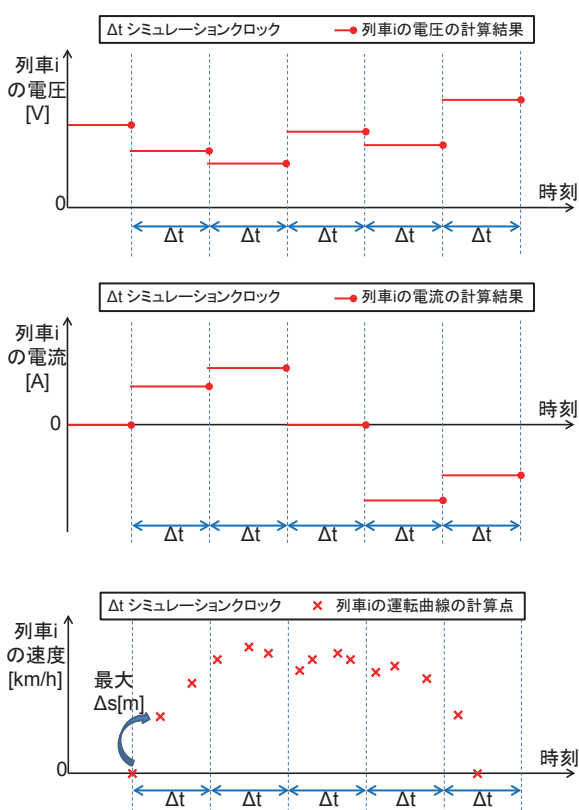


図3 電流、電圧、運転曲線の計算単位のイメージ¹⁰⁾

を検証する必要がある。そのため、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。直流電化区間では、き電区間が変電所ごとに区分されていないため営業運転中に変電所での測定結果と、対象列車での測定結果とを関連づけることが困難である。また、計算対象列車の運転操縦データを全て取得することも困難である。そのため、まず、夜間の走行試験により、き電区間内に測定対象車両以外が存在しない状態にして、全変電所の電流、電圧と車両のノッチ、速度、電流、電圧などを同時に測定した。次に、計算対象列車と変電所の入力データを4.3節で後述するように可能な限り正確に設定して、シミュレーション計算を実施し、測定結果と計算結果の電力量を比較する精度検証により、列車運行電力シミュレータの計算ロジックを確認した。

夜間の走行試験は、まず、2013年11月に、地下区間であるJR東西線において、単編成走行・2編成走行での試験を実施した¹⁾。走行試験を再現したシミュレーション計算結果と、測定結果とを比較した結果、回生電力の差が大きいことが確認された。その理由は、列車運行電力シミュレータでは、単一のブレーキノッチで運転曲線を計算する一方で、測定試験では停止目標に合わせてブレーキノッチが細かく調整されており、電流・電圧に差が生じていたためであった。

そのため、2014年11月に、JR東西線、および、明かり区間であるおおさか東線において、あらかじめ指定したブレーキノッチのみを使用した駅停車を運転指示し(以後「一括ブレーキノッチ」と呼ぶ)、単編成走行での試験を実施し、シミュレーション計算結果と測定結果とを比較して、精度を検証した。

以下、同時測定試験の概要(4.1節)、運転指示の工夫(4.2節)、シミュレーションへの入力データ(4.3節)、シミュレーション計算結果(4.4節)、走行試験測定結果との比較による精度検証(4.5節)について述べる。

4.1 同時測定試験の概要

回生インバータが設置されている地下区間のJR東西線(京橋～尼崎駅間)、および、明かり区間のおおさか東線(放出～久宝寺駅間)の2路線を対象とした。

試験車両は、消費電力の算出に必要な情報が十～数百[ms]の間隔で取得可能なデジタル伝送装置を搭載した321系を用いた。2編成、および、単編成走行での試験を実施し、列車ダイヤは、試験区間を1日あたり3往復するように設定した。2編成走行での列車ダイヤを図4に示す。第1編成に水タンクを搭載して50%程度の乗車率を設定し、第2編成は空車条件を設定した。

変電所においては、市販GPSモジュールの信号をレコーダのサンプリングクロックに用いて2変電所間の時刻を同期し¹¹⁾、各き電回線、回生インバータおよび帰線の電流と直流母線電圧を測定した。例として、JR東西線での変電所測定概要を図5に示す。両端の京橋と尼崎の各変電所のき電用しゃ断器を開放して新福島と御幣島の2変電所からのみ電力供給を行い、検証対象外区間との電力融通を排除した。おおさか東線でも同様に、放出と加美の2変電所からのみ電力供給を行った。

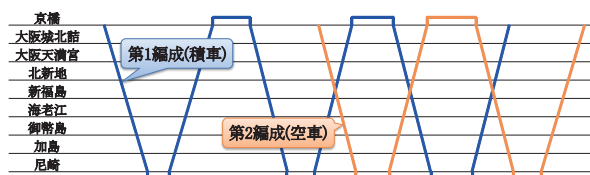


図4 2編成走行での列車ダイヤ¹⁰⁾

特集：輸送計画技術

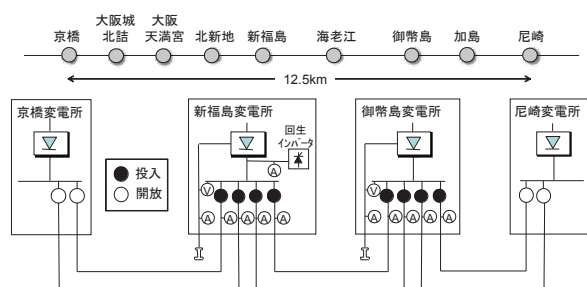


図5 JR東西線変電所測定概要¹⁰⁾

4.2 運転指示の工夫

2014年11月の試験においては、走行試験時に一括ブレーキノッチを運転指示することにより、シミュレーション計算になるべく近い条件を再現した。具体的には、まず、営業車両における車両情報記録装置¹²⁾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た。次に、Hybrid-Speedyのエネルギー評価用運転曲線作成機能¹³⁾を用いて、設定した駅間走行時分での運転曲線を計算した。そして、計算した運転曲線を基に、実際の運転操作のしやすさも考慮し、運転指示を作成した。これらは、停止目標になるべく近い位置に一括ブレーキノッチでの停車を実現し、かつ、営業時の走行時分に近い運転を再現するための工夫である。

4.3 シミュレーションへの入力データ

高精度な計算を実施するためには、入力データをなるべく正確に設定することが重要である。そのため、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¹⁴⁾を活用した。計算に用いた走行抵抗の値を図6に示す。このことにより、高速域での惰行時の速度が精度良く計算できるようになった。

車両の電力特性、補機電力等は、設計値を基本にして、変電所での測定結果等も参考に補正したモデルを使用した。変電所の整流器・回生インバータの特性は実情を近似する静的特性を設定した^{10) 15)}。

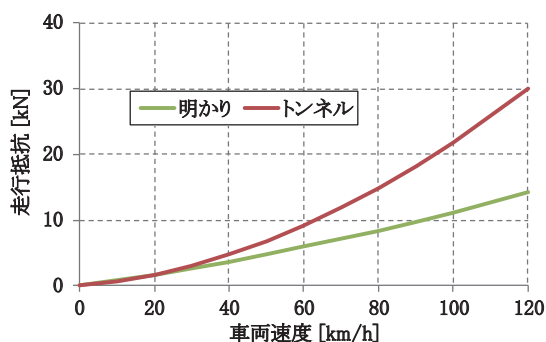


図6 計算に用いた走行抵抗

4.4 シミュレーション計算結果

試験走行時の列車ダイヤを入力として、シミュレーション計算を実施した。その際、運転操縦指定機能によって惰行と惰行後の再力行を中心に測定試験時のキロ程、ノッチを指定することで実績の運転操縦を再現した。

2013年11月のJR東西線での2編成での測定結果、2014年11月のJR東西線での測定結果、2014年11月のおおさか東線での測定結果と、列車運行電力シミュレータでの計算結果の比較を、それぞれ図7～図9に示す。車両の電力は、補機分を含まない主回路電力を示している。SSは変電所の略称である。測定結果は実線、計算結果は破線で示している。速度を表す曲線の色は、運転操縦とノッチを示しており、青系の色が力行、緑が惰行、赤系の色が制動である。測定結果と計算結果の速度は概ね一致しており、運転操縦を再現することで、現実に近い列車走行を再現できていると考えられる。

4.5 精度検証

本節では、電力量を積算して比較することにより、列車運行電力シミュレータの精度検証を行う。電力の正負を分けて積算して供給電力量と回生電力量を計算しており、消費電力量は、供給電力量から回生電力量を差し引いた電力量となっている。

2013年11月の測定試験では、停止目標に合わせてブレーキノッチが細かく調整されており、シミュレーションで再現可能な一括ブレーキノッチとは異なるため、精度検証は、2014年11月の結果を用いて実施する。2014年11月の測定試験においては、一括ブレーキでの停車を運転指示したため、所定停止位置からずれが生じている。このため、停車後に駅停止目標への小移動を行っているが、小移動に要する電力量は除いて比較する。JR東西線では、回生電力は新福島変電所の回生インバータに吸収されるとともに、2編成走行の試験時は他編成にも融通される。一方で、おおさか東線は、単編成のみの走行試験であるため、回生電力の融通先が存在せず、回生絞り込みが発生し、回生電力量は、自列車の補機電力分を除いて0となる。そのため、精度検証においては、JR東西線は、消費電力量と供給電力量と回生電力量、おおさか東線は供給電力量のみを対象とする。

変電所測定においては、オフセット値補正を実施し、また、車両測定よりも分解能が高い¹⁵⁾。したがって、車両で測定した電力よりも精度の高い積算が実施できたと考えられるため、精度検証は、変電所で測定した電力量を用いる。

電力量の比較結果を図10、および、図11に示す。2014年11月の測定試験結果に対するシミュレーション計算結果の誤差は、JR東西線の変電所合計消費電力量で3.6%、おおさか東線の変電所合計供給電力量で1.5%

であった。各変電所個別での誤差が2変電所合計より大きくなっており、消費される総電力量は精度良く計算できているのに対して、変電所の負荷分担の計算には課題が残っている。この主要因は、検証対象の数十分間において、電力会社系統運用や他需要家の影響で受電電圧が随時変動することを、シミュレーションでは、考慮していないためである。

これらの検証より、測定データと、車両、電力に加えて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のすべてが揃うという条件を満たせば、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た。

5. おわりに

本報告では、地上設備・車両に加えて運転操縦を指定可能な列車運行電力シミュレータの計算手法と、計算ロジックの検証について述べた。現在、より現実に近い運行状況の再現に取り組んでいる。具体的には、駅間走行時分を指定した場合の運転曲線を作成するエネルギー評価用運転曲線作成機能¹³⁾を組み込み、営業運転の列車ダイヤ、および、広範囲な路線網のシミュレーションに適用可能となるよう、本シミュレータを改良すると共に、車両情報記録装置などを活用し¹²⁾、必要な入力データ

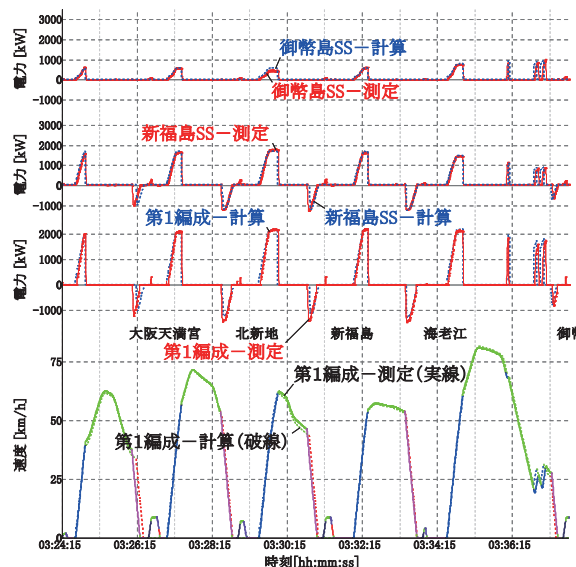


図8 測定結果と計算結果との比較
(2014年度, JR 東西線 1 編成)

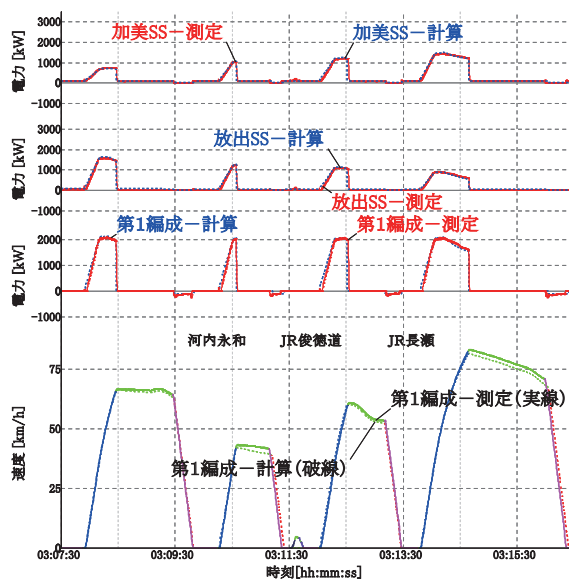


図9 測定結果と計算結果との比較
(2014年度, おおさか東線)

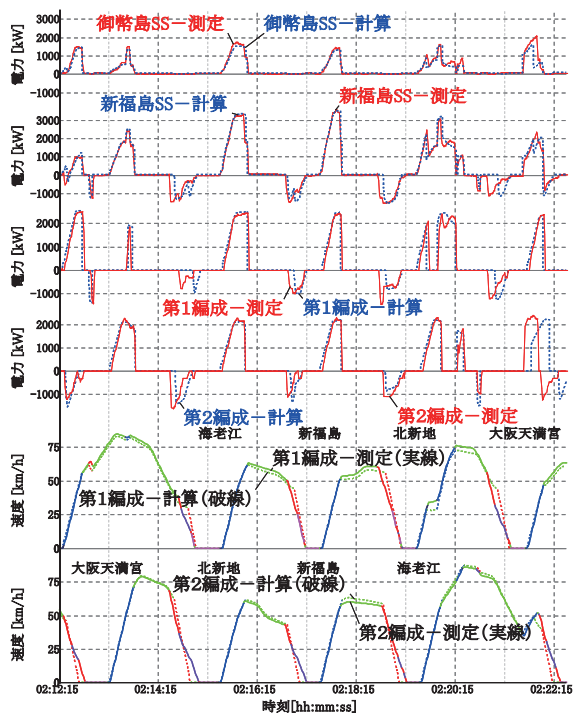


図7 測定試験と計算結果との比較
(2013年度, JR 東西線 2 編成)

作成手法の検討^{14) 16)}も実施している。また、より現実に近いブレーキノッチ扱い模擬手法を構築する必要もある。営業路線での各種省エネ地上設備・車両の効果予測を実施可能とするため、引き続き、これらの研究開発課題に取り組んでいく所存である。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

特集：輸送計画技術

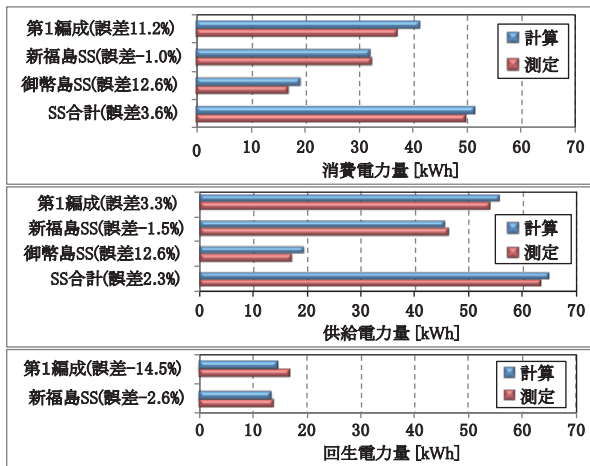


図10 消費電力量（上）、供給電力量（中）、回生電力量（下）の比較（2014年度、JR東西線1編成）

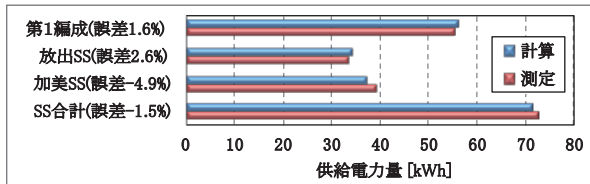


図11 供給電力量の比較（2014年度、おおさか東線）

文献

- 今村洋一, 美濃部晋吾, 宮口浩一, 川村淳也, 林田健太郎, 島田直人, 山野井隆, 小川知行, 森本大観, 武内陽子: 直流電化区間における鉄道車両と電鉄変電所の消費電力同時測定試験の実施, 日本鉄道車両機械技術協会誌 R&m, Vol.22, No.10, 2014
- 高木亮, 曾根悟: 直流き電システムの駅間走行時分一定化シミュレーション, 電気学会論文誌 C, Vol. 115, No. 8, 1995
- 浅野純一, 小林宏泰, 齋藤達仁, 近藤圭一郎, 渡辺翔, 落合康文, 山口秀, 遠藤孝夫, 鈴木剛志: 軽負荷回生制御パターンと省エネルギー効果に関する考察, 第20回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL 2013), S3_4_2, 2013
- 鈴木基也, 宮内努, 中村恭之: 鉄道統合評価システムの開発, 鉄道における国際サイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, No.103, 2011
- 酒見和生, 佐藤公一, 村松和彦, 平山真明, 宇野昌嘉: 鉄道システムシミュレータによる運行, 電力等のパフォーマンス解析, 鉄道における国際サイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, No.907, 2009

- 武内陽子, 坂口隆, 熊澤一将, 國松武俊, 佐藤圭介: 運転曲線レベルで再現可能な列車運行シミュレーション, 鉄道総研報告, No.28, Vol.4, 2014
- 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
- 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, 平成13年鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL '01) S8-4-5, 2001
- 武内陽子, 小川知行, 森本大観: 複数分野の協調による列車運行電力シミュレータの開発, 運転協会誌, 2016年1月号, 2016
- 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
- 今村英樹, 森本大観: 汎用GPS受信モジュールを活用した変電所間時刻同期測定手法, 平成27年電気学会全国大会, 5-144, 2015
- 小川知行, 武内陽子, 菅野晋, 影山真佐富, 東海勝人, 平松英: 車両情報記録装置の大規模データ分析処理支援システムの開発, 第22回鉄道技術, 政策連合シンポジウム (J-RAIL 2015), SS3-1, 1705, 2015
- 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のエネルギー評価用運転曲線の開発, 電気学会論文誌 D, 電気学会, Vol. 135, No. 5, 2015
- 小川知行, 真鍋慎一, 吉川岳, 今村洋一, 影山真佐富: 営業車両における車両情報記録装置を活用した走行抵抗の推定手法, 鉄道総研報告, No.30, Vol.4, 2016
- 武内陽子, 小川知行, 森本大観, 今村洋一, 美濃部晋吾, 宮口浩一, 川村淳也, 林田健太郎, 島田直人, 山野井隆, 真鍋慎一: 消費電力測定試験による列車運行電力シミュレータの追加検証, 電気学会交通, 電気鉄道/リニアドライブ合同研究会, TER-15-028 / LD-15-019, 2014
- 菅野晋, 小川知行, 真鍋慎一, 高重達郎, 今村洋一, 美濃部晋吾, 川村淳也, 影山真佐富: 季節変動や乗車率等が車両の補機電力に与える影響の定量評価, 第21回鉄道技術, 政策連合シンポジウム (J-RAIL 2014), S3-3-3, 2014