

エネルギー評価用運転曲線を用いた エネルギーシミュレーション

小川 知行* 武内 陽子** 森本 大観***
今村 洋一# 影山 真佐富#

Energy Simulation by Use of a Speed Profile Generator for an Energy Estimation

Tomoyuki OGAWA Yoko TAKEUCHI Hiroaki MORIMOTO
Yoichi IMAMURA Masahisa KAGEYAMA

We have developed energy simulators for the purpose of estimating the effect of energy saving technologies. The simulators have the function of the speed profile generator, which adjusts the speed profile to given running time so as to be suitable for the energy estimation. And we have measured energy consumption at substations for the verification. Measured energy consumption fluctuates according to the outside temperature. This paper shows the verification by the use of the distribution figure of energy consumption according to the outside temperature.

キーワード：消費エネルギー，エネルギー計算，運転曲線，直流き電，車両情報記録装置

1. はじめに

鉄道運行に関わる消費エネルギーを削減するための様々な研究開発が進められている。それらの省エネ技術の導入判断においては、導入効果を正確に予測することが重要となる。このための1つの手法として列車運行を模擬するエネルギーシミュレーションが挙げられる。導入前の技術の効果を予測し、比較検討を行うための有用な手段である。

列車の走行エネルギーは、運転方法によって大きく変動する。このため、エネルギーシミュレーションを実施するに当たり、運転方法を再現する運転曲線作成機能は計算精度に大きな影響を与える。そこで、車両走行エネルギーシミュレータ向けにエネルギー評価を目的とするエネルギー評価用運転曲線作成アルゴリズム¹⁾を開発した。そして、別途開発を進めてきた列車運行電力シミュレータ²⁾と組み合わせることで、複数列車間での電力融通も模擬したエネルギーシミュレーションを可能とした。

1.1 エネルギー評価用運転曲線

エネルギー評価用運転曲線とダイヤ作成における最速運転曲線の関係を示すため、走行時分と消費エネルギーの関係を図1に示す。図1には、営業走行の走行結果の分布も示している。営業走行にはばらつきがあるが、一

般に、走行時分が長くなると消費エネルギーが小さくなる傾向がある。従来、運転曲線作成機能は、ダイヤ作成に必要な基準運転時分算出のため、最速運転曲線を作成することが主な目的であった。ダイヤ作成においては、最速走行時分に余裕時分を付加した上で、走行時分が決定されている。このため、最速走行時分はダイヤ上の走行時分よりも短くなり、これを用いてエネルギー計算を行うと、消費エネルギーは過大な結果となってしまうことが多い。そこで、ダイヤ上の走行時分に合わせた運転曲線を作成するエネルギー評価用運転曲線を開発した。これにより、消費エネルギーが営業走行の平均程度となる運転曲線作成が期待できる。

1.2 列車運行電力シミュレータ

列車運行電力シミュレータは、地上電力設備、車両、運転分野のシミュレータを連携することで、特に回生電力の有効利用に関する省エネ技術の効果予測を高精度に行うことを目的として開発を進めているシミュレータである。列車運行電力シミュレータの物理的な計算アルゴリズムに関しては、試験列車による走行試験を行い、高精度な計算が可能であることを確認した²⁾。現在、次のステップとして、列車運行電力シミュレータによる営業走行の再現に取り組んでいる段階である。物理的な計算アルゴリズムを検証した走行試験においては、運転士に対して運転指示を行い、シミュレーションにおいてもそれに合わせた運転操作を模擬することで検証を行っている。すなわち、運転操作に関する検証は行っていない状況である。それに対して、現在の取り組みは、営業走行

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

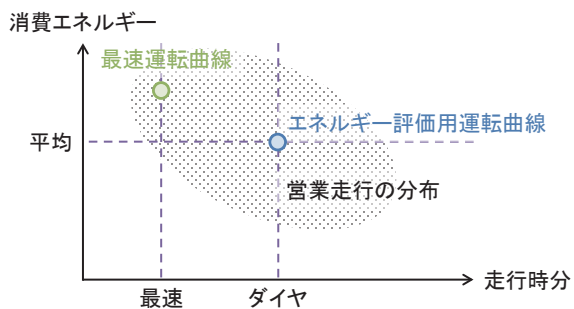


図1 エネルギー評価用運転曲線と最速運転曲線の関係

の走行データを取得し、営業走行を模擬するためのエネルギー評価用運転曲線の検証を行うものである。

2. エネルギー評価用運転曲線

エネルギー評価用運転曲線作成アルゴリズムでは、最速運転曲線の走行時分よりも長い「目標時分」を指定して、最速運転曲線から各所に惰行を挿入することで走行時分を調整してエネルギー評価用運転曲線を作成する。

2.1 アルゴリズムの概要

エネルギー評価用運転曲線を作成する流れを図2に示す¹⁾。走行時分を調整するために、最速運転曲線に対して、減速ブレーキの全体惰行化、再力行の全体惰行化、減速ブレーキの部分惰行化、再力行の部分惰行化、最終力行の二分探索惰行化の5つを組み合わせ、エネルギー評価用運転曲線を作成する。惰行の挿入においては、惰行開始点を指定する順引き惰行と惰行終了点を指定する逆引き惰行を使用する。

エネルギー評価用運転曲線の例を図3に示す。この例では、減速ブレーキの全体惰行化と再力行の全体惰行化によって、走行時分を目標時分に大まかに近づけた後、最終力行の二分探索惰行化によって走行時分を目標時分に合わせる微調整が行われている。

各ステップの概要を以下に示す。

(1) 減速ブレーキの全体惰行化

減速ブレーキの全体惰行化では、減速ブレーキに逆引き惰行を挿入し、対象のブレーキ全体を惰行化する。対象とする減速ブレーキは、ブレーキ時間の短いものから順に選定し試行する。惰行を挿入してできた運転曲線の走行時分が、目標時分以内の場合は惰行化を採用する。

(2) 再力行の全体惰行化

再力行の全体惰行化では、再力行に順引き惰行を挿入し、対象の再力行全体を惰行化する。対象とする再力行は、力行時間の短いものから順に選定し試行する。惰行を挿入してできた運転曲線の走行時分が、目標時分以内の場合は惰行化を採用する。

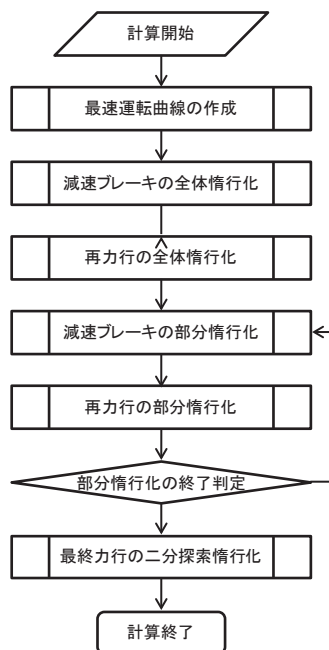
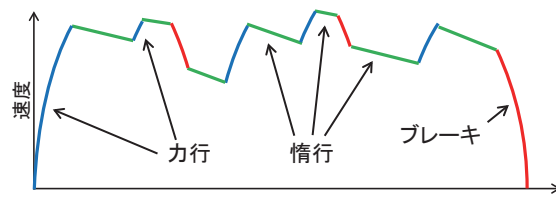
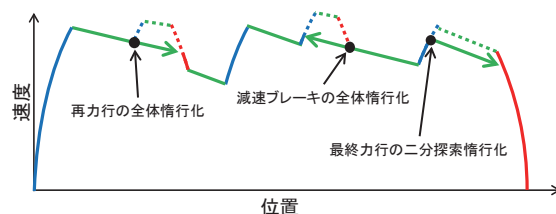


図2 エネルギー評価用運転曲線作成アルゴリズムの概要



(a) 最速運転曲線



(b) エネルギー評価用運転曲線

図3 エネルギー評価用運転曲線作成の例

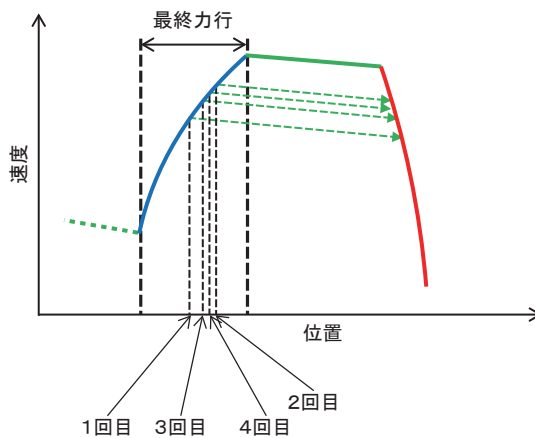


図4 二分探索惰行化の例

(3) 減速ブレーキの部分惰行化

減速ブレーキの部分惰行化では、減速ブレーキのブレーキ時間を二等分して逆引き惰行を挿入し、対象のブレーキの前半分を惰行化する。対象とする減速ブレーキは、ブレーキ時間の短いものから順に選定し試行する。惰行を挿入してできた運転曲線の走行時分が、目標時分以内の場合は惰行化を採用する。なお、運転操作の継続時間の観点から、ブレーキ時間が一定時間より短くなる場合には、惰行化を行わない。

(4) 再力行の部分惰行化

再力行の部分惰行化では、再力行に力行時間を二等分して順引き惰行を挿入し、対象の再力行の後半分を惰行化する。対象とする再力行は、力行時間の短いものから順に選定し試行する。惰行を挿入してできた運転曲線の走行時分が、目標時分以内の場合は惰行化を採用する。なお、運転操作の継続時間の観点から、力行時間が一定時間より短くなる場合には、惰行化を行わない。

(5) 部分惰行化の終了判定

部分惰行化の終了判定では、減速ブレーキの部分惰行化と再力行の部分惰行化のいずれかで惰行化が採用された場合は、惰行化された運転曲線に対して、減速ブレーキの部分惰行化と再力行の部分惰行化を再度試行する。新たな惰行化が一度も採用されなくなった時点で探索を終了する。

(6) 最終力行の二分探索惰行化

最終力行の二分探索惰行化では、着駅に最も近い最終力行を対象として、二分探索によって惰行化を行い目標時分に合わせる。最終力行の二分探索惰行化の方法を図4に示す。力行開始点と力行終了点が二等分される時刻の位置から停車までの区間に対して、順引き惰行を挿入する。次に、走行時分が目標時分に近づく区間を選んで、二等分する順引き惰行を挿入する。この操作を再帰的に繰り返すことで、走行時分を目標時分に合わせていく。

2.2 検証事例

車両情報記録装置を用いたエネルギー評価用運転曲線の検証事例を示す。車両情報記録装置のデータ収集システムの概要を図5に示す³⁾⁴⁾。沿線無線WANを用いて、営業走行中のデータを随時地上サーバに伝送することでデータ取得を行うシステムである。

本章では、快速列車1停車駅間の走行を対象として、車両情報記録装置から得られた営業走行データと、車両走行エネルギーシミュレータ⁵⁾を用いて計算した消費エネルギーの計算結果を比較する。営業走行実績の運転曲線、エネルギー評価用運転曲線、最速運転曲線の比較を図6に、走行時分と消費電力量の関係を図7に示す。なお、図6において営業走行実績の運転曲線は、ばらつきが大きく図示が困難であるため、代表的な運転曲線を抽

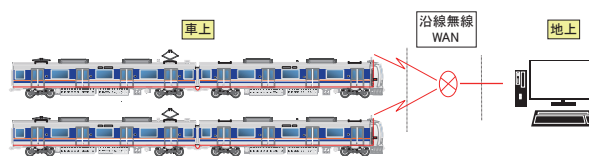


図5 車両情報記録装置のデータ収集システム

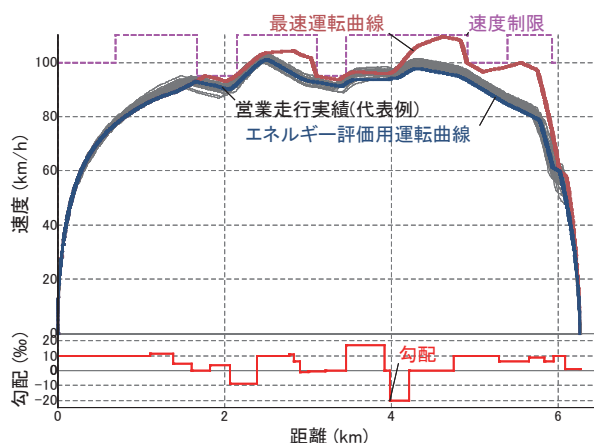


図6 運転曲線の比較

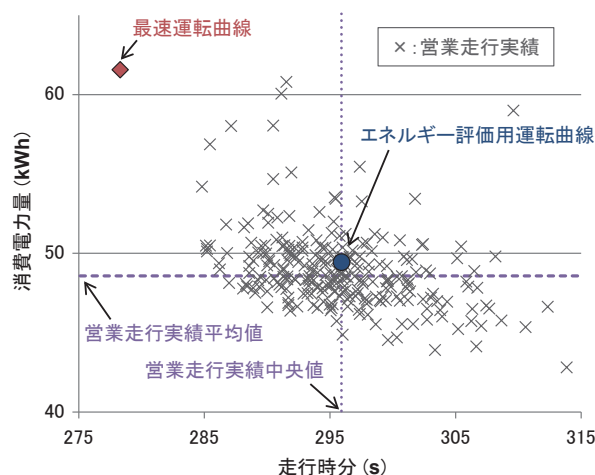


図7 走行時分と消費電力量の関係

出した。地点毎に速度の中央値を求め、中央運転曲線を算出した。そして、中央運転曲線との速度の差が小さい順に上位10%を代表例として示している。

図6に示す運転曲線を比較すると、最速運転曲線は、速度制限の範囲内で可能な限り速い走行を行っている。これに対して、エネルギー評価用運転曲線は、営業走行実績の代表例に近いものとなっている。この結果、図7に示す消費電力量を比較すると、エネルギー評価用運転曲線の消費電力量は営業走行実績平均値に近い値になっている。

3. 列車運行電力シミュレータ

複数列車間での電力融通も模擬するエネルギーシミュ

特集：車両技術

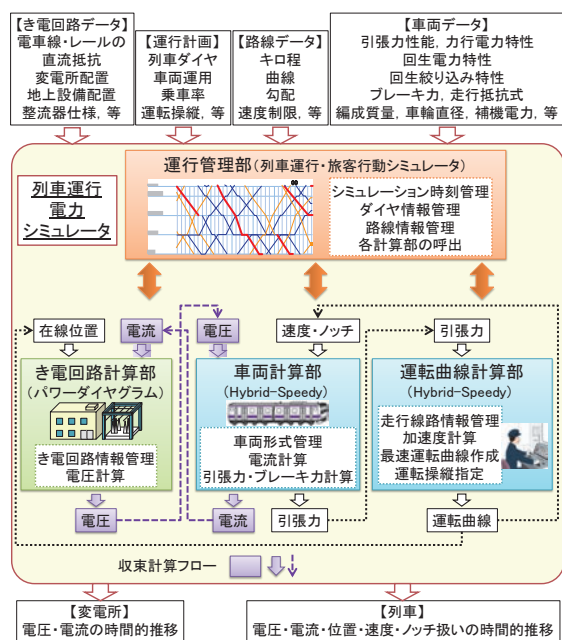


図8 列車運行電力シミュレータの機能・構成

レーションを可能とするため、列車運行電力シミュレータにエネルギー評価用運転曲線作成機能を組み込んだ。

3.1 列車運行電力シミュレータの構成

列車運行電力シミュレータの構成と機能の概要を図8に示す。運行管理部、き電回路計算部、車両計算部、運転曲線計算部から構成される。運行管理部は、列車ダイヤと車両運用に従って列車を管理し、き電回路計算や運転曲線作成処理を呼び出す。き電回路計算では、運転曲線計算部から得られた列車の在線位置、速度、ノッチに応じて、き電回路計算部と車両計算部の間でデータを授受しながら、収束計算を実施する。運転曲線作成処理では、き電回路計算部から得られた列車の電圧に応じて、運転曲線計算部と車両計算部の間でデータを授受しながら、運転曲線が作成される。

3.2 エネルギー評価用運転曲線作成機能の組み込み

列車運行電力シミュレータの運転曲線計算部にエネルギー評価用運転曲線作成機能を組み込んだ。列車ダイヤで想定されている走行時分を指定して、それに合わせる運転曲線を作成する。列車運行電力シミュレータでは、運転曲線作成中に電圧が変動することがあり、走行時分が変化してしまう。このため、走行時分の変化が大きい場合には、その地点からエネルギー評価用運転曲線を再度作成し直す再探索機能を追加した。

4. 検証測定

列車運行電力シミュレータの検証を目的として、JR

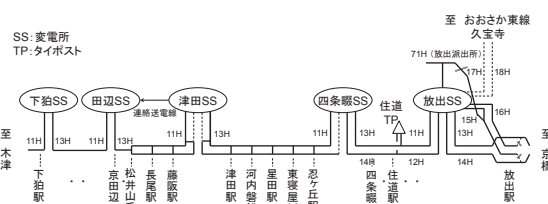


図9 き電回路の概要

西日本学研都市線にて測定試験を実施した⁶⁾。約4ヶ月間に渡り、学研都市線内の5つの変電所に測定器を仮設して電力測定を行った。

4.1 路線概要

JR 西日本学研都市線のき電回路概要を図9に記す。木津ー松井山手間は単線、松井山手ー四条畷間は上下一括き電、四条畷ー放出間は上下タイき電となっている。木津, 放出, 京橋では、他線区と電氣的に接続されている。

下粕, 田辺, 津田, 四条畷, 放出の各変電所(以下, SS)で回線電流, 母線電圧等を測定した。各変電所にてGPSモジュールを用いた同期のための信号を記録することで、同期測定を可能とした⁷⁾。これにより、複数変電所を跨がる電力量の評価が可能となった。

本報告では、下粕SSと放出SSの間の5変電所の結果を示すが、き電回路は他線区とも接続されているため、学研都市線全線だけでなく、JR東西線、おおさか東線もシミュレーションの対象とした。

4.2 車両概要

車両情報記録装置を活用して車両のシミュレーションモデルを構築した。車両情報記録装置を用いた走行抵抗推定手法を用いて走行抵抗を算出した⁸⁾。シミュレーションに用いた走行抵抗を図10に示す。また、車両情報記録装置を用いて補機電力の気温に対する推定式を構築した。シミュレーションに用いた補機電力特性を図11に示す。

4.3 ダイヤ概要

30分単位でのパターンダイヤが組まれている学研都市線の平日日中のパターンダイヤを模擬した。学研都市線のダイヤを図12に示す。

5. 検証結果

測定試験によって得られた測定結果と、エネルギー評価用運転曲線作成機能を有する列車運行電力シミュレータにより計算した結果を比較する。

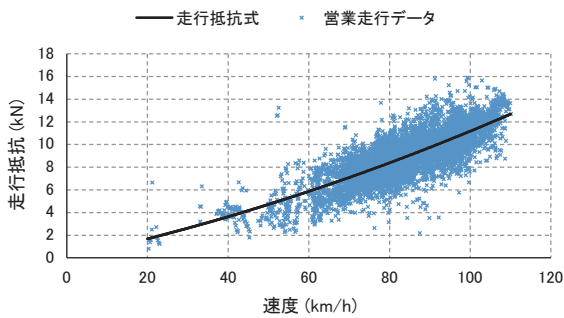


図10 走行抵抗モデル

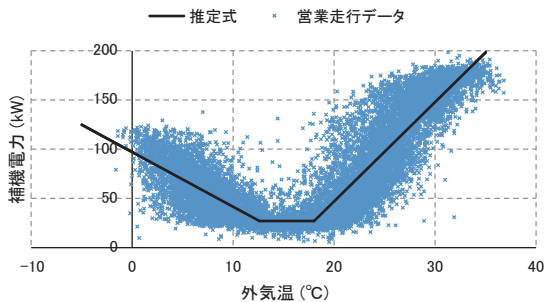


図11 補機電力モデル

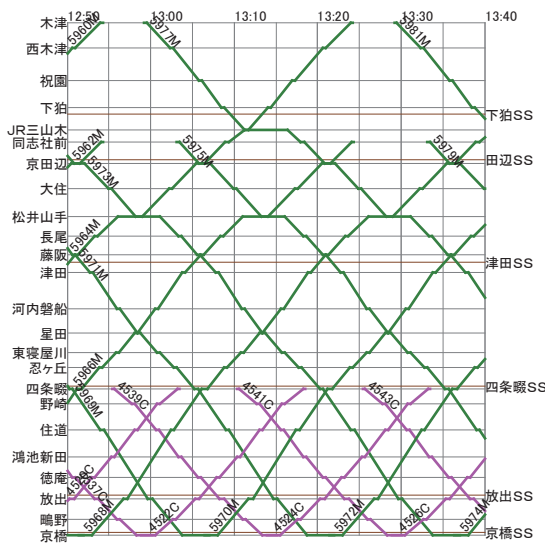


図12 学研都市線ダイヤの概要

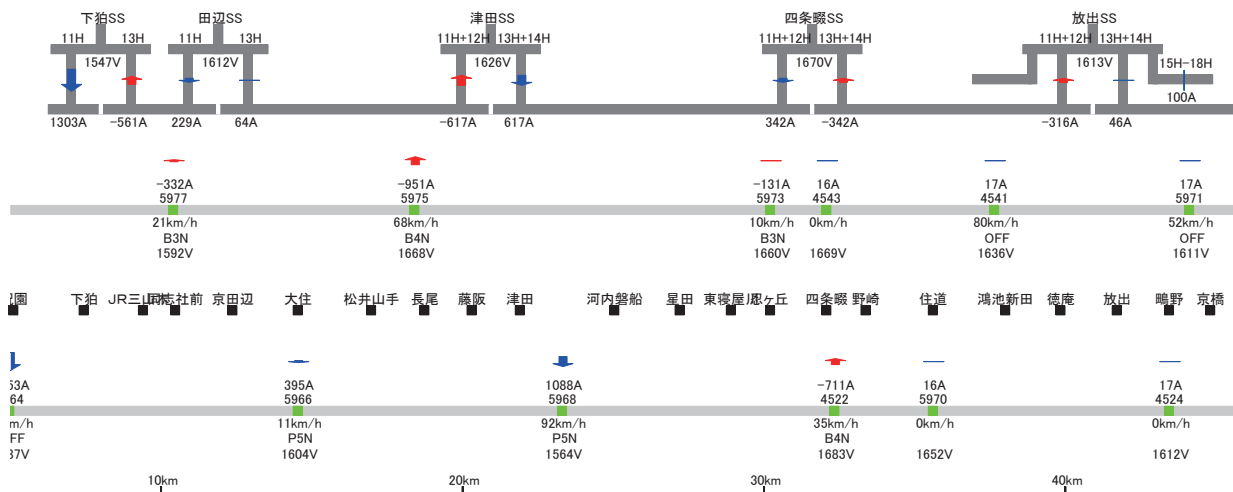


図13 列車運行電力シミュレータによる計算結果例

5.1 計算結果例

計算結果の例として、時刻13:17:40における変電所の電流、電圧、列車の電流、電圧、速度、ノッチの状況を図13に示す。青の矢印は供給電流、赤の矢印は回生電流を示す。

5.2 気温に対する電力量の傾向の比較

変電所の電力量の気温に対する分布を比較することで計算結果を検証する。気温の変化により車両の補機電力は変動する。このため、測定結果に対して、気象庁が提供する気象データから、測定地点に近い気温を対応させた。

全変電所の合計総括電力量を用いて評価した結果を図14に示す。また、き電区間電力量に着目し、隣接する変電所の回線電力量の和（田辺SSの13Hと津田SSの11Hの和）を用いて評価した結果を図15に示す。前者は、鉄道事業者が電力会社から受電した電力量に相当する。後者は、特定の変電所間に在線した列車による負荷を示している。すなわち、車両の負荷電力量を評価するものである。

図14及び図15の測定結果のプロットは平日の日中時間帯のパターンダイヤとなる11:30～14:30について、30分ごとの電力量をプロットしたものである。一方、計算結果のプロットは、13:00～13:30を対象にシミュレーションを行った結果である。これらより、計算結果は、測定結果の気温に対する傾向を良好に再現できていると考えられる。

5.3 気温を限定した電力量の比較

前述のように気温により電力量は大きく影響を受けるため、気温を限定した変電所の総括電力量の比較を図16に示す。測定結果は、気温15±1[°C]のデータに限定し、計算結果は15[°C]の場合の結果を示している。また、参考として、計算結果には、エネルギー評価用運転曲線を用いた場合だけでなく、最速運転曲線を用いた

特集：車両技術

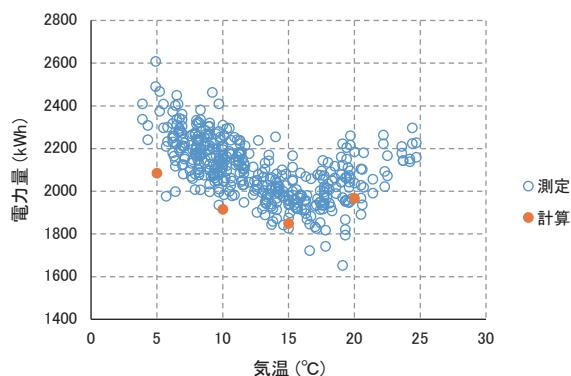


図 14 変電所合計総括電力量による比較

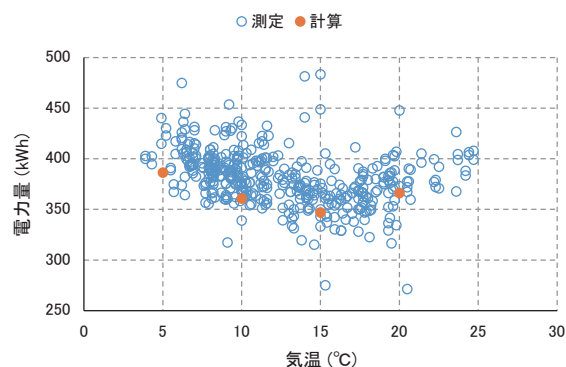


図 15 き電区間電力量による比較

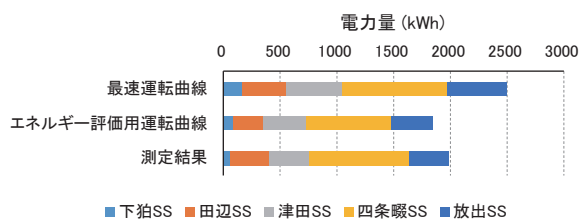


図 16 気温を限定した比較

場合の電力量も示している。

測定結果とエネルギー評価用運転曲線を用いた計算結果を比較すると、変電所の負担割合については、一部に差違は見られるものの、全変電所を合計した総括電力量は10%以内の差となっており、良好な計算が行えていることが確認できる。なお、最速運転曲線を用いた場合には、過大な計算結果となり、運転曲線を再現することの重要性が確認できる。

6. おわりに

省エネ施策の導入判断にエネルギーシミュレーションを活用するため、エネルギー評価用運転曲線を開発した。

そして、エネルギー評価用運転曲線作成機能を、列車運行電力シミュレータに組み込んだ。

そして、営業走行における測定試験により検証を行った。検証の結果、計算結果は、測定結果の気温に対する傾向を良好に再現し、全変電所を合計した電力量も大きな差違はなく、良好な計算が行えていることが確認できた。今後は、省エネ技術の効果予測に活用できるエネルギーシミュレーションに向けて、検証の深度化を進めていく予定である。

本研究の列車運行電力シミュレータの一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて開発した。

文 献

- 1) 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, Vol. 135, No. 5, 2015
- 2) 武内陽子, 小川知行, 森本大観, 今村洋一: 列車運行電力シミュレータの開発, 鉄道総研報告, Vol.30, No.8, pp.5-10, 2016
- 3) 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 (J-RAIL2010), S1-2-1, 2010
- 4) 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回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2015), SS3-1, 1705, 2015
- 5) 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
- 6) 小川知行, 吉井剣, 森本大観, 武内陽子, 地田隆博, 武内紳, 東海勝人, 平松英, 影山真佐富: 変電所と車両の同時電力測定による回生電力融通状況の分析, 電気学会交通・電気鉄道合同研究会, TER-16-036, 2016
- 7) 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
- 8) 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, Vol.30, No.4, pp.5-10, 2016