

営業運行を再現する列車運行電力シミュレータの開発

小川 知行* 武内 陽子** 森本 大観***

齋藤 達仁* 影山 真佐富#

Development of Train Operation Power Simulator Reproducing Commercial Operation

Tomoyuki OGAWA Yoko TAKEUCHI Hiroaki MORIMOTO

Tatsuhito SAITO Masahisa KAGEYAMA

In recent years, railway companies have been introducing energy-saving technologies. This trend results in the need for a method to accurately estimate the energy-saving effect when adopting each technology. To this end, we developed a method to estimate train operation energy consumption using the Train Operation Power Simulator reproducing commercial operation. Since there is dispersion of energy consumption on the commercial operation, it is important to faithfully reproduce commercial operation. Therefore, we developed a method to reproduce commercial operation utilizing commercial running data obtained from a train data collection device. Moreover, we achieved practical calculation time to estimate the energy-saving effect.

キーワード：直流き電，消費エネルギー，車両情報記録装置，運転操縦，車両補機電力，走行抵抗

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、その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。

そこで、鉄道総研とJR西日本は、電力・車両・運転分野の技術を融合して、直流き電回路において列車運行エネルギーを計算して、省エネ技術の効果を予測するための列車運行電力シミュレータの開発を進めてきた。本開発は大きく分けて物理的計算アルゴリズムの開発と営業運行再現手法の開発の2段階に分けられる。第一段階では、き電区間を限定した地上設備と車両の同時測定試験を実施し、シミュレータの物理的計算アルゴリズムを検証した¹⁾。第二段階では、車両情報記録装置を活用した上で、営業運行時の地上設備での電力測定試験を実施し、営業運行再現手法を検証した。本論文では、第二段階である営業運行再現について述べる。

営業運行の再現においては、いわゆる通勤路線と近郊路線に分けて、段階的に計算手法の開発を進めた。通勤路線として対象としたJR西日本の学研都市線は、車両

形式、列車種別、線路配線等が限られており、計算模擬や結果分析において取り組みやすい路線である。また、近郊路線として対象としたJR西日本の東海道線米原—京都間は、車両形式が多様である点、駅間距離が長い点、貨物列車の走行が多い点、複々線区間がある点など、より汎用的なシミュレータの開発のために検証すべき点が多く含まれている。

本論文では、通勤路線及び近郊路線を対象に、営業運行再現のための計算手法と、その検証結果を示す。

2. 営業運行を再現するための計算手法

2.1 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を図1に示す。列車運行電力シミュレータは、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、列車群の運行管理並びに計算上の時間進行を司る。き電回路計算部は、列車の在線位置に応じて、電氣的に適切な関係となる電流と電圧を計算する。車両計算部は、電圧と速度とノッチに応じた電流と引張力を計算する。運転曲線計算部は、引張力に応じて運転曲線の時間的推移を計算する。すなわち、各計算ステップにおいて、き電回路計算部、車両計算部、運転曲線計算部間で情報を授受しながら計算が進行する。

営業運行の再現に当たっては、運転曲線計算部に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作成機能を開発するとともに、営業列車の走行データを記録した車両情報記録装置を活用して、プレー

* 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（現 株式会社JR西日本新幹線テクノス）

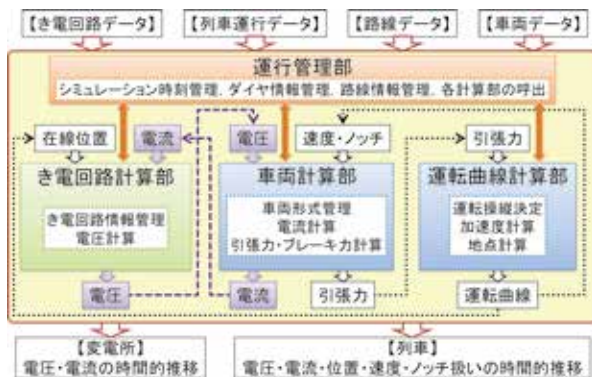


図1 列車運行電力シミュレータの構成

キノッチモデル，走行抵抗モデル，補機負荷モデル，乗車率モデルなどを構築した。

2.2 運転曲線作成アルゴリズム

消費エネルギーは運転方法によって大きく変化することが知られている。そこで，走行時間を指定し，平均的な消費エネルギーとなる運転曲線作成を目指したエネルギー評価用運転曲線作成アルゴリズム²⁾(図2)を列車運行電力シミュレータに組み込んだ。エネルギー評価用運転曲線を列車運行電力シミュレータに適用するに当たっては，電圧変動による加速度変化を考慮する必要がある。そこで，計算の時間ステップの進行に伴い，走行時分に一定時分以上の差が生じた場合には，途中からエネルギー評価用運転曲線作成の再探索を行うアルゴリズムを組み込んだ(図3)。

2.3 車両情報記録装置

車両モデルの構築には，通信回線を用いた情報取得機能を有する車両情報記録装置⁴⁾⁵⁾(図4)の情報を活用した。車両情報記録装置には，デジタル伝送装置から取得した速度，ノッチ，パンタ点電圧，主回路電流，補機電流などが各車両や各ユニット単位で記録されている。

2.4 ブレーキノッチモデル

車両情報記録装置を用いて，対象路線の営業列車で実施されたブレーキ扱いのデータを取得してパターン化した⁶⁾。代表的なブレーキ扱いをパターン化するため，速度30km/h刻みでの平均ブレーキノッチを算出した。平均ブレーキノッチとは，1駅間で扱われたブレーキの記録に対して，30km/h毎の速度範囲で使用されたブレーキノッチを時間平均したものである。なお，駅停車のための停止ブレーキと，駅間の速度制限による減速ブレーキの区別は行っていない。そして，パターン化したブレーキ扱いを「ブレーキパターン」とよび，その表現は例えば「5→4→3」で，平均ブレーキノッチが速度60km/h以上でB5N，速度60～30km/hでB4N，速度30km/h

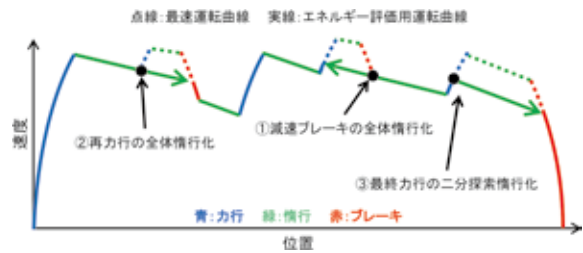


図2 エネルギー評価用運転曲線作成のアルゴリズム概要

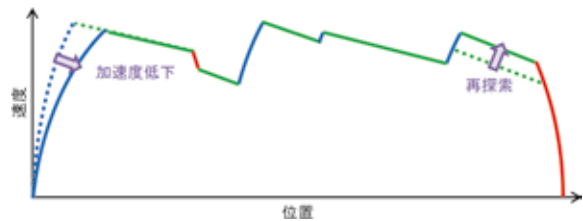


図3 エネルギー評価用運転曲線作成における電圧低下時の再探索のイメージ³⁾



図4 車両情報記録装置のデータ収集システム³⁾

未満でB3Nとなったことを意味する。例として，学研都市線でのブレーキパターンの出現割合を図5に示す。上位20パターンで約6割を占める結果となった。各列車の各駅間に対して，出現割合に応じてこの上位20パターンからランダムに適用することでブレーキ扱いのばらつきを再現した。

ブレーキパターンに応じた計算の手法を図6に示す。ブレーキパターンによって減速度が異なるため，そのまま適用すると，走行時分に差が生じることとなる。そこで，各ブレーキパターンを適用した後にエネルギー評価用運転曲線を用いて走行時分を合わせることで走行時分が変わらないようにすることとした。

2.5 走行抵抗モデル

走行抵抗に起因する損失は，エネルギー消費の多くを占めるため⁷⁾，エネルギー計算においては実際に近い走行抵抗式を用いることが望ましい。そこで，走行抵抗測定試験によって得られた走行抵抗式を用いた(図7)。

2.6 補機負荷モデル

車両の補機負荷は，外気温によって大きく変動することが確認されている²⁾。そこで，外気温に対する補機負荷モデルを車両情報記録装置から算出した(図8)。主

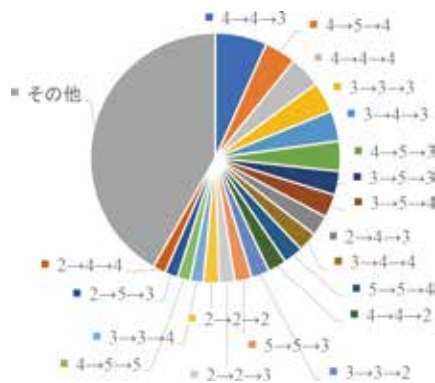


図5 ブレーキパターンの出現割合³⁾

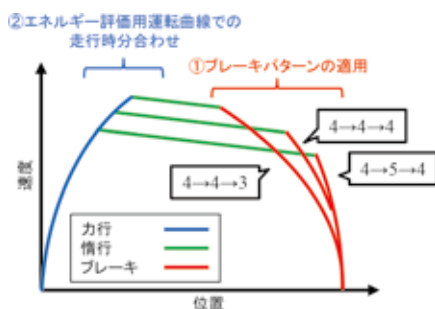


図6 ブレーキパターンの適用方法の概念図

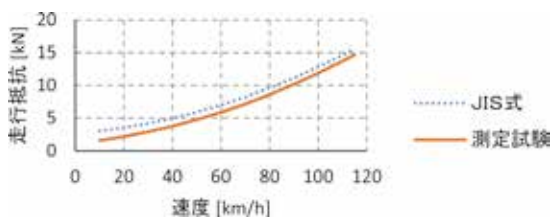


図7 走行抵抗モデルの例

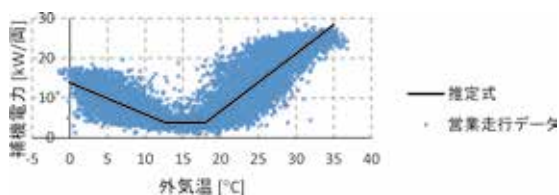


図8 補機負荷モデル³⁾

回路電力とは別に、外気温に応じた補機電力を設定し、これらの和を車両電力計算に用いた。

2.7 乗車率モデル

乗車率が異なると、車両質量が変化するため、運転曲線作成における列車の加速度、及び応荷重制御による車両電力計算に影響を与える。そこで、時間帯及び駅間毎の乗車率モデルを車両情報記録装置から算出した。車両情報記録装置のデータから時間帯及び駅間毎に乗車率の中央値を算出し、運転曲線作成及び車両電力計算に用い

る乗車率を設定した。車両情報記録装置のデータが少ない路線については、自動改札機データから推定した各列車の各駅間の乗車率を設定した。

3. 通勤路線の営業運行の再現手法の検証

通勤路線である JR 西日本の学研都市線において営業運行再現手法を検証した。

3.1 検証対象

検証対象の概要を表1に示す。変電所と車両の同時電力測定では、約15km程度遠方の車両に対する回生融通の事例も確認されている⁸⁾。き電回路は他線区に接続されているため、計算対象範囲は、後述する検証範囲より広く設定して、学研都市線だけでなくJR東西線、おおさか東線も対象とした。分析に使用した学研都市線のダイヤの一部を図9に示す。

日中帯のダイヤは、30分ごとのパターンダイヤとなっているため、パターンの単位で概ね同様の電力量となることが予想される。これに対して、検証のサンプル数を多く得るため、30分ごとに測定データを区切り、1日当たり6データを得ることとし、この30分毎のデータを元に評価を行った。

3.2 変電所測定

営業運行条件における複数変電所の同時電力測定を2015年10月より2016年2月と、2016年7月より2017年5月にかけて実施した⁸⁾。学研都市線の下粕、田辺、津田、四条畷、放出の変電所に測定器を仮設し、各回線電流、直流母線電圧等を測定した。

学研都市線のき電回路の概要を図10に示す。木津—松井山手間は単線区間となる。複線区間となる松井山手—京橋間のうち、松井山手—四条畷間は上下一括き電である。また、四条畷—放出間は途中の住道にタイポストがある上下タイき電である。このため、これらの区間では変電所の直流母線を介さずに、上下線間で直接回生電力が融通される場合がある。従って、田辺変電所から放出変電所までの区間では、変電所で測定される電流は上下線を分離することができないため、上下線合わせた負荷を評価の対象とした。

3.3 分析方法

変電所の電力として、分析に用いる指標を図11に示す。電力測定では、変電所回線電流を測定することにより、変電所回線電力が取得されており、同期測定により離れた変電所間での変電所回線電力の演算が可能となる。隣接する2変電所間で供給するき電区間を対象に、そのき電区間に供給する変電所回線電力の和を求めるこ

表1 通勤路線の計算条件³⁾

路線	学研都市線（木津—京橋） JR 東西線（京橋—尼崎） おおさか東線（放出—久宝寺）
変電所等	13 ポスト（き電区分所等を含む）
列車ダイヤ	平日日中及び平日終日
乗車率	列車・駅間毎に設定
列車キロ	2,130km 及び 16,365km

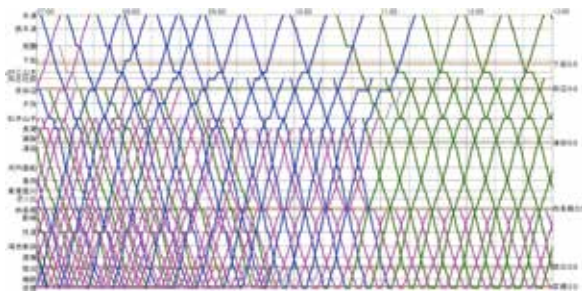


図9 通勤路線の分析対象ダイヤ（抜粋）

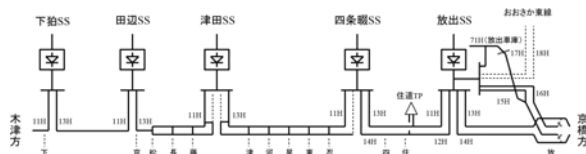


図10 通勤路線の測定き電回路概要

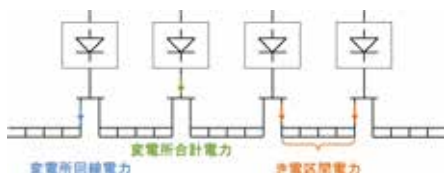
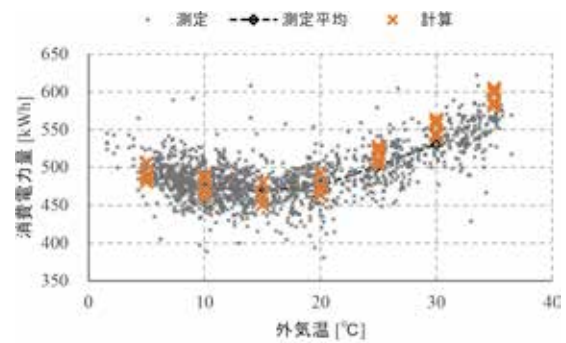


図11 変電所同期測定による分析方法

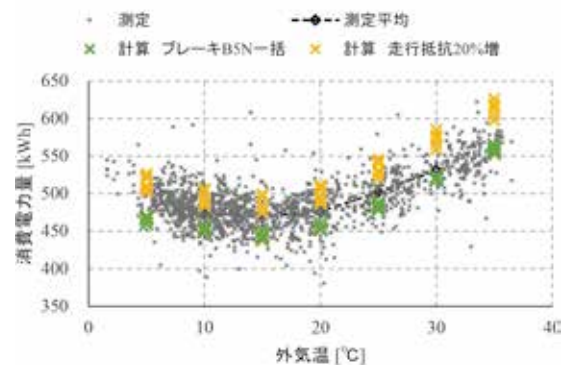
とで、き電区間電力が求められる。き電区間電力は、当該のき電区間を走行する列車の電力量となるため、車両の電力量を評価するのに有用な指標である。

3.4 測定結果との比較

き電区間電力量の計算結果と測定結果の比較を図12に示す。図12は、パターンダイヤとなる11:30～14:30の30分ごとの電力量を外気温に応じて描画している。また、従来の計算ではブレーキ扱いや走行抵抗が実態と合っていないことが課題の一例として考えられる。そこで、それら従来の計算手法と比較するために、従来手法の再現としてブレーキ扱いを運転指導に用いられるB5Nとした場合の計算結果及び全車両の走行抵抗を20%増加させた場合の計算結果も示している。また、



(a) 提案手法



(b) 従来手法の再現

図12 通勤路線のき電区間電力量による検証
(津田SS—四條畷SS き電回路電力量)

測定結果については外気温5℃毎に分別し、 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ の範囲の平均値も示している。なお、測定結果の平均値は、外気温の上限(35℃)では平均対象の測定値が下限側に、下限(5℃)では平均対象の測定値が上限側に偏るため描画の対象外とし、10℃～30℃の範囲で示している。

外気温を横軸とすることで、外気温によって消費電力量が変動していることが確認できる。また、測定結果は、同じ外気温でもばらつきが見られる。この主な要因としては、同じパターンダイヤにおいても乗車率が異なること、走行する主な車両形式が2形式存在すること、運転扱いにばらつきがあることが挙げられる。本計算では、乗車率は列車及び駅間に応じて車両情報記録装置データから設定し、車両運用は配置両数比率に応じてランダムに設定し、運転扱いはブレーキ扱いをランダムにすることによって再現している。このうち、ブレーキ扱いをランダムにすることによって、ブレーキ扱いをB5Nで一律に設定した場合と比べて、測定結果付近で計算結果がばらついている。これより、特にブレーキ扱いの違いがばらつきの要因として大きいと考えられ、ブレーキ扱いをランダムにすることによって測定結果のばらつきの大きな要因を反映できていると考えられる。

また、提案手法の計算結果は測定結果の平均値に近く

なっており、例えば、外気温 15℃では測定結果の平均値に比べて、計算結果は-4.0～+2.2%の範囲（平均-0.2%）となっている（図 12（a））。従来の計算手法と比較すると、ブレーキ扱いを B5N で一律に設定した場合には、測定結果に対して計算結果が小さめになる傾向がある。例えば、外気温 15℃では測定結果の平均値に比べて、計算結果は-6.7～-4.1%の範囲（平均-5.6%）となっている（図 12（b））。一方、走行抵抗を 20% 増加させた場合には、測定結果に対して計算結果が大きめになる傾向がある。例えば、外気温 15℃では測定結果の平均値に比べて、計算結果は+1.0～+6.2%の範囲（平均+3.8%）となっている（図 12（b））。以上より、外気温によって、その差に違いは見られるが、提案手法は測定結果の傾向を再現できており、概ね良好な計算が行えていると考えられる。

4. 近郊路線の営業運行の再現手法の検証

近郊路線である JR 西日本の東海道線において営業運行再現手法を検証した。

4.1 検証対象

検証対象の概要を表 2 に示す。学研都市線を対象とした検討ではパターンダイヤとなる日中帯のダイヤを主な対象としたが、東海道線は貨物列車の走行や編成両数の差違などのため、消費エネルギーは日中帯でも一定周期での繰り返しとはならない。このため、始列車から終列車までの終日ダイヤで検証する。計算対象範囲は、東海道線米原-京都及び草津線とした。なお、き電回路は最小限の範囲で模擬した。

また、当該線区は多様な車両形式・編成両数の列車が走行する。これら全ての車両の情報を収集して車両モデルを作成することは容易ではない。そこで、事前に列車ダイヤ及び車両運用から車両形式・編成両数別の車両キロを算出した。車両キロの算出結果を車両形式別にまとめて図 13 に示す。車両形式と編成両数を加味して、旅客列車で 12 種類の車両モデルを使用した。

4.2 変電所測定

営業運行条件における複数変電所の同時電力測定を 2017 年 10 月より 2019 年 2 月にかけて実施した。東海道線の河瀬、能登川、篠原、守山、瀬田の各変電所及び野洲、草津の各き電区分所に測定器を仮設し、各回線電流、直流母線電圧等を測定した。測定対象の東海道線のき電回路の概要を図 14 に示す。米原-草津間は複線区間、草津-京都間は複々線区間となる。

表 2 近郊路線の計算条件³⁾

路線	東海道線（米原-京都） 草津線（柘植-草津）
変電所等	15 ポスト（き電区分所を含む）
列車ダイヤ	平日終日
乗車率	列車・駅間毎に設定
列車キロ	23,865km



図 13 車両形式別の車両キロ³⁾

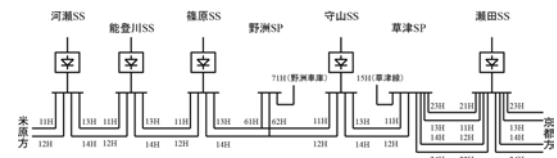


図 14 近郊路線の測定き電回路概要

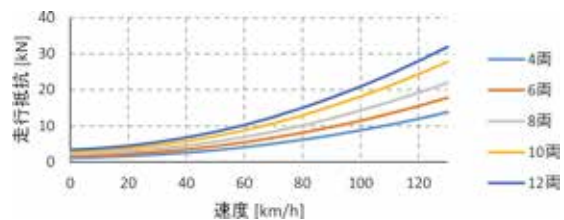


図 15 推定した走行抵抗特性³⁾

4.3 走行抵抗推定

一般に、近郊路線を走行する列車は通勤路線に比べて走行速度が高くなる。高い走行速度では、引張力に対して走行抵抗の比率が高くなり、走行抵抗が計算精度に与える影響が大きくなる。しかしながら、当該線区を走行する全ての車両の走行抵抗測定を実施するのは現実的ではない。そこで、車両キロ算出結果より主力車両形式を対象として走行抵抗測定を実施した。当該形式は、複数の編成両数にて運用されているため、いくつかの編成両数にて走行抵抗測定を実施し、編成両数を変数とする走行抵抗の推定式を算出した。計算に用いた走行抵抗特性を図 15 に示す。

4.4 測定結果との比較

き電区間電力量の計算結果と測定結果の比較を図 16 に示す。計算結果は、各時間帯において外気温 15℃の条件にて、60 分ごとの電力量を計算している。測定結

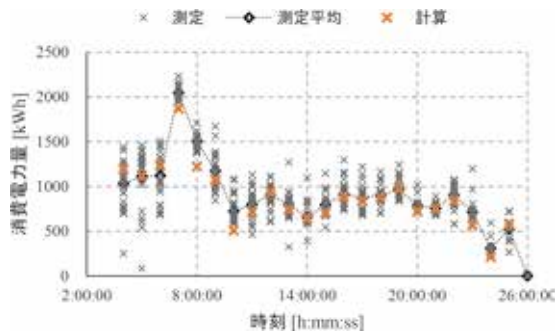


図 16 近郊路線のき電区間電力量による検証
(能登川 SS—篠原 SS 下り線 き電回路電力量)

果は、 $15^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 範囲に該当した測定値を示している。

測定日によって測定結果には大きな幅がある。このようなばらつきの要因としては、乗務員毎の運転操縦の差違、複数の車両形式の共通運用のために日々充当される車両形式の差違、旅客列車の乗車率及び貨物列車のけん引質量の変動などが考えられる。このため、ばらつきが反映できるような計算手法を用いており平均値での定量的な比較は参考程度となるが、外気温 $15^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 範囲に収まるデータが多い日中の 10:30～17:30 では、測定結果の平均値に比べて、計算結果は $-3.8\% \sim +12.6\%$ の範囲 (平均 $+5.3\%$) となっている。また、定性的には、測定結果の時間変化に概ね対応して計算結果が推移しており、良好な計算結果であると考えられる。

5. 計算規模と計算時間の比較

計算規模と計算時間の比較を図 17 に示す (計算機：CPU Intel Core i9-9900 3.10GHz, RAM 16.0GB)。列車キロが 20,000km を超える計算モデルでも 1 日強の計算時間で計算できた。これは、省エネ技術に関する効果予測において実用的な計算時間といえる。

なお、省エネ技術の評価においては、一般的に省エネ技術の導入前後の条件にて比較を行うこととなり、省エネ技術の導入後の条件については、検討対象とする複数の諸元での比較を行うことが多い。本シミュレータはシングルコアにて処理している。複数条件での比較の際に



図 17 計算規模と計算時間の比較

は、同一計算機内で複数プロセスを起動しマルチコア活用による並列処理や、複数計算機を用いた並列処理により、1 条件とほぼ同等の計算時間で複数条件の比較が可能となる。

6. まとめ

本論文では、列車運行電力シミュレータの営業運行の再現について示した。営業運行においては同じ列車ダイヤであっても消費エネルギーのばらつきが課題となるが、それを再現した上で、測定に近い消費エネルギーを計算できる手法を開発した。また、省エネ技術の効果予測という用途に対して実用的な計算時間を実現した。

今後は、列車運行電力シミュレータを活用して、様々な省エネ技術に対して、精度の高い効果予測を行うとともに、効果的な導入法を探っていく予定である。

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。

文 献

- 1) 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
- 2) 小川知行, 武内陽子, 森本大観, 今村洋一, 影山真佐富：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, 鉄道総研報告, Vol.30, No.11, pp.29-34, 2016
- 3) 小川知行, 武内陽子, 森本大観, 影山真佐富, 美濃部晋吾：列車運行電力シミュレータによる消費エネルギー予測手法, 電気学会論文誌 D, Vol.141, No.5, pp.374-387, 2021
- 4) 川村淳也, 山本雄一, 小川展史, 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
- 5) 小川知行, 武内陽子, 菅野晋, 影山真佐富, 東海勝人：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
- 6) 小川知行, 武内陽子, 森本大観, 齋藤達仁, 影山真佐富：ブレーキ扱いを考慮した軽負荷回生絞込みエネルギーの予測シミュレーション手法の検討, 2019 年電気学会産業応用部門大会, 5-82, 2019
- 7) 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
- 8) 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・電気鉄道研究会, TER-16-036, 2015