

最適充放電制御による地上蓄電装置の容量選定手法

武内 陽子* 小川 知行** 佐藤 圭介***
森本 大観# 齋藤 達仁**

Capacity Selecting Method of Energy Storage Systems Using Optimal Charging/Discharging Control Method

Yoko TAKEUCHI Tomoyuki OGAWA Keisuke SATO
Hiroaki MORIMOTO Tatsuhito SAITO

From the viewpoint of energy saving, the optimal control method of wayside energy storage systems is one of minimizing of the total energy supplied from all the related traction substations. Therefore we developed the optimal charging/discharging power control method of the energy storage systems under the condition in which a discrete time model is adopted, speed profiles and driving operations of all trains are fixed, and charging energy of the energy storage system is lost at a fixed rates. The method can support the design of a required capacity for the energy storage systems. In this paper, we present details of this method with some calculation results obtained by varying parameters.

キーワード：列車運行，エネルギー，回生電力，最適化，地上蓄電装置，容量選定

1. はじめに

近年、鉄道では地上蓄電装置の導入が進んでいる。その目的は、省エネルギー、電圧降下対策、大規模停電時における次駅までの非常走行エネルギーの確保など様々である^{1)~6)}。

ここでは、蓄電装置を設置する主目的の1つである回生電力の有効活用による省エネルギー化に着目する。蓄電装置の設置箇所、定格容量や充電電力・放電電力、充放電制御手法によって、その省エネ効果は異なる。すなわち、省エネルギー化を目的として蓄電装置を導入する場合には、どの場所にもどの程度の性能の蓄電装置を設置するか、また、どのような充放電制御手法を適用するかを考慮して設計する必要がある。

本研究では、このような蓄電装置の設計を支援するため、列車ダイヤ通りの列車運行を実施した場合に、蓄電装置が省エネルギー化に寄与しうる最大量を試算し、容量選定に活用することを目的とする。具体的には、いくつかの仮定の下で、全変電所の供給電力量合計を最小化する最適な蓄電装置の充放電出力パターンを求める手法を構築した⁷⁾。

本稿では、サンプルデータに対して、蓄電装置を導入する場合の省エネ効果の試算を行い、開発手法を用いて

蓄電装置の定格容量や充電電力・放電電力の効果的な容量選定が支援可能であることを示す。さらに、列車運行電力シミュレータ⁸⁾を用いて、開発手法の妥当性を確認し、蓄電装置の省エネ効果を試算した結果を報告する。

2. 変電所供給電力量最小化のための数理最適化モデル

本研究では、全変電所の供給電力量合計を最小化する蓄電装置の充放電出力パターンの導出を目的として、数理最適化問題としてモデル化する。蓄電装置は、その寿命を考慮して、定格容量に対する実際の充放電容量を一定範囲に限定して使用することが一般的である。本稿では、実際に充放電に使用する容量を「蓄電活用容量」と定義し、この蓄電活用容量の範囲内で充放電することを「SOC (State Of Charge) 制約」と呼ぶ。

従って、省エネのためには、SOC制約のもとで、回生絞り込み電力量を可能な限り減らすように充電すること、また、適切なタイミングで放電することが求められる。

2.1 数理モデルにおける前提条件

数理最適化問題としてモデル化するために、以下の仮定を置く。

(1) 離散モデルを適用する。

実際には、消費電力は連続的に変化するが、連続モデルをそのまま取り扱うことは難しいため、離散モデルを導入する。具体的には、ある微小な単位時間 Δt ごとに電力を取り扱う。

* 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
*** 信号・情報技術研究部 運転システム研究室
(現 神奈川大学)
電力技術研究部 き電研究室

(2) 運転曲線は電圧によって変動しない。

本数理モデルにおいては、列車の電圧の変動に起因する運転曲線の変動がないものとする。また、回生絞り込みが発生しても、これにより不足するブレーキ力は機械ブレーキによって補われ、ブレーキ時の運転曲線は変わらないものとする。本研究では、列車ダイヤ通りの列車運行を実施し、任意の時刻で、あらかじめ決められた運転操作が行われる状況を対象とする。

(3) 蓄電装置の電力は一定の割合で消失する。

蓄電装置の変換効率を考慮するため、効率 η を導入する。実際の列車運行電力として消費される電力は、放電した電力に η を乗じた値とする。この仮定は、放電した電力の全てが、列車運行のための電力として使えるわけではないことを意味する。

(4) 蓄電装置の数と設置位置を制限する。

モデルを単純にするため、蓄電装置を設置する数は計算対象区間において1つだけとし、設置位置は変電所に隣接しているものとする。

2.2 基本的な考え方

2.1節の仮定(1)(2)より、任意の時刻 t における蓄電装置の出力をある値に設定すれば、各変電所の供給電力を計算することができる。この計算を図1と図2で説明する。

仮定(1)(2)より、任意の時刻において、全ての列車の在線位置と運転縦横はあらかじめ決められている(図1)。このことより、蓄電装置の出力を p [kW] (正の値を充電とする)と設定すれば(図2(a)), 基回路方程式を解くことで、各列車の消費電力と回生電力、および、各変電所の供給電力を計算することができる(図2(b))。なお、各時刻において取り得る蓄電装置の出力は、列車運行電力に応じて変化する。たとえば、時刻 t に全ての列車がブレーキをかけていれば、加速のために電力を消費する列車が存在しないので、蓄電装置は放電できない。

上記の考え方をを用いて、数理最適化問題としてのモデル化の手順を以下に示す。まず、各時刻において、蓄電装置の出力をある値に設定した場合の全変電所の供給電力合計を計算しておき、数理最適化問題の入力データとする(図3(a))。設定値の数を多くすることにより、よりきめ細かな制御が可能となる。そして、各時刻において、ただ1つの蓄電装置の出力を選ぶこと、および、SOC制約を守ることを主な制約条件として、始発から終電までの全変電所の供給電力量の総和を目的関数として最小化する数理最適化問題として定式化する。定式化の詳細は、文献7を参照されたい。

最適解の例を図3(b)左に示す。蓄電装置のSOCの推移と全変電所の供給電力量の推移を図3(b)右に示す。

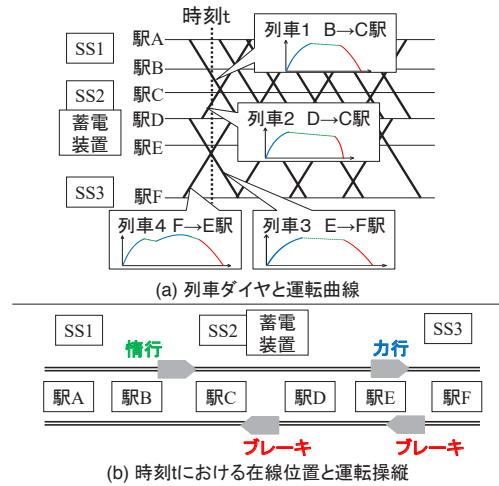


図1 列車ダイヤと運転曲線と運転縦横の例⁷⁾

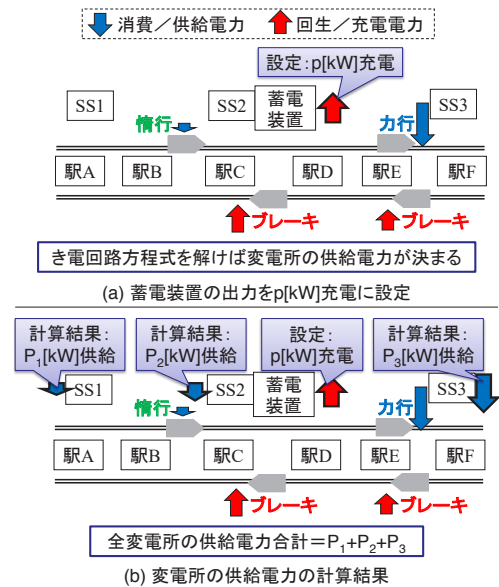


図2 蓄電装置に設定する出力の例⁷⁾

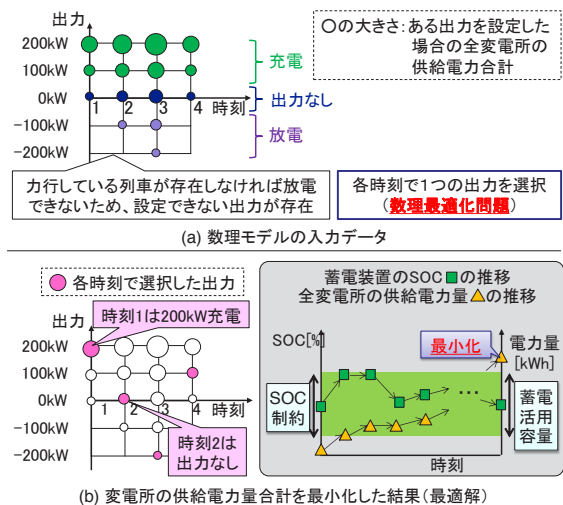


図3 入力データと最適化結果の出力の例⁷⁾

2.3 列車運行電力シミュレータの活用

本数理モデルの入力データとなる変電所供給電力量を求めるためには、車両の性能、運転操縦、変電所の特性、蓄電装置の出力を設定した場合のき電回路方程式を解く必要がある。

また、本数理モデルでは、運転曲線は電圧によって変動しないという仮定(2)のもとで、変電所供給電力量を最小化しているが、実現象では、電圧変動による運転曲線の変動がある。従って、本数理モデルの妥当性を確認するためには、数理モデルで求めた充放電出力パターンを設定し、かつ、電圧変動による運転曲線の変動を考慮した場合の変電所供給電力量を計算し、本数理モデルで求めた目的関数値である変電所供給電力量と比較する必要がある。

これらのために、本研究では、鉄道総研が開発している「列車運行電力シミュレータ」⁸⁾を活用する。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4に示す。実路線における実測データとシミュレータの計算結果の比較による検証⁸⁾を実施し、精度の高い列車運行電力推定が可能であることを確認している。

また、本シミュレータの機能の一部として、車両の性能、運転操縦、変電所の特性、蓄電装置の出力を設定した場合のき電回路計算を行うことが可能である。その際には、列車の電圧変動に伴う運転曲線の変化がないような車両モデルを設定することも可能である。

本研究における列車運行電力シミュレータの活用方法を図5に示す。まず、き電回路方程式計算機能を用いて、列車の電圧変動に伴う運転曲線の変化がない場合の出力・時刻毎における全変電所の供給電力合計を計算して、本数理モデルへの入力データを準備する(図5(a))。次に、電圧変動による運転曲線の変動を考慮した場合の全変電所の供給電力量を計算して、本数理モデルの妥当性を確認する(図5(b))。さらに、蓄電装置が設置されていない場合の計算結果をもとに、蓄電装置と充放電出力パターンの省エネ効果を推定する(図5(c))。

3. ケーススタディ

本章では、図5の手順に従って蓄電装置を導入する場合を想定した試算について述べる。蓄電装置の蓄電活用容量や充電電力・放電電力を変化させて、開発手法による変電所供給電力量を試算し、定格容量や充電電力・放電電力の効果的な設計が支援可能であることを示す。更に、列車運行電力シミュレータを用いて、本数理モデルの妥当性を検証し、蓄電装置による省エネ効果を試算する。

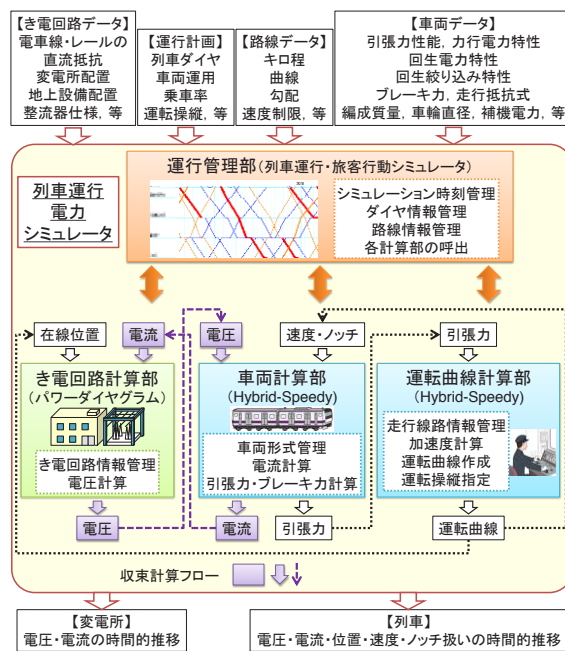


図4 列車運行電力シミュレータの入出力データ・機能・構成⁹⁾

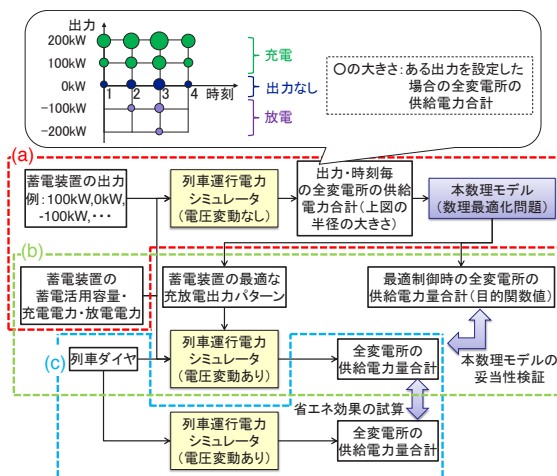


図5 本研究における列車運行電力シミュレータの活用方法¹⁰⁾

3.1 サンプルデータと計算条件

都市圏の始発～朝ラッシュをイメージしたサンプルデータの線路の高低差、駅の位置、変電所の位置を図6に、列車ダイヤ図を図7に、計算条件を表1に、編成の主要諸元を表2に、運転曲線の例を図8に示す。

3.2 本数理モデルの設定パラメータ

蓄電装置設置候補箇所のSS3, SS7, SS10それぞれに対して、表3のパラメータを設定し、列車運行電力シミュレータのき電回路計算機能を用いて、数理最適化問題を解くために必要となる入力データを作成した。次に、作成した入力データを用いて、表4の条件のように

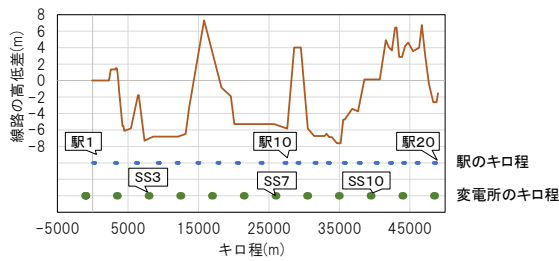


図6 線路の高低差および駅と変電所の位置

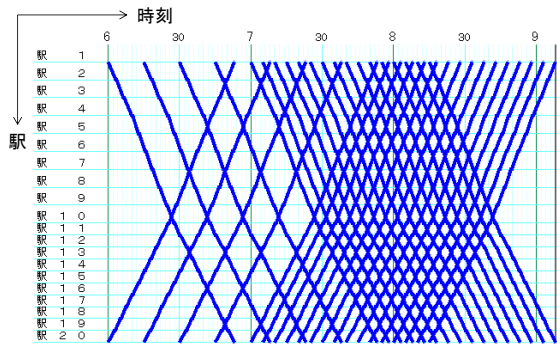


図7 列車ダイヤ

表1 計算条件

駅数, 路線長	20 駅, 約 49km
駅間距離	駅 1 ~ 駅 10 : 2.5 ~ 3.5km 駅 10 ~ 駅 20 : 1.5 ~ 2.5km
列車種別, 列車ダイヤ	駅 1 ~ 駅 20 を往復する各駅停車 6 時台は 15 分間隔 7 時以降は 5 分間隔
運転曲線	列車ダイヤ上の走行時分に合わせたエネルギー評価用運転曲線 ¹¹⁾
変電所	4.5km 置きに 12 箇所
変電所の 定格容量	2500kW ~ 6000kW 文献 12 に基づいて設定
蓄電装置 設置候補箇所	SS3, SS 7, SS10

表2 編成の主要諸元

編成	10 両編成 (5M5T)
編成質量 [ton]	310
起動加速度 [km/h/s]	3.3
ブレーキ減速度 [km/h/s]	2.5
主回路効率	0.855
補機電力 [kW / 編成]	30

蓄電装置の仕様を変化させ、汎用の数理計画ソルバー Gurobi Optimizer8.1.0 を用いて、最適充放電出力パターンを求めた。

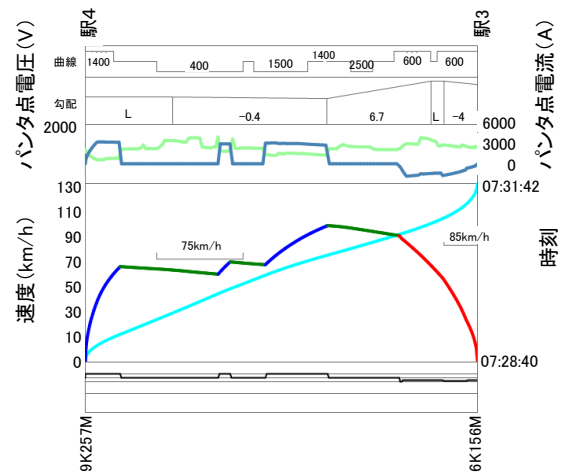


図8 運転曲線の例

表3 列車運行電力シミュレータの設定パラメータ

仮定 (1) の 時刻刻み幅	1[s]
図 3(a) で設定 する出力	放電電力から充電電力までを 250[kW] ごとに変化させた点

表4 数理最適化問題の設定パラメータ

蓄電活用容量	10, 20, 30, 40, 50[kWh]
充電電力・放電 電力の絶対値	500, 1000, ..., 5000[kW]

3.3 蓄電装置の性能を変化させた場合の比較

それぞれの条件における全変電所供給電力量合計の比較を図9～図11に示す。これらの図より、蓄電活用容量を一定として、充電電力・放電電力を大きくすると、すなわち蓄電媒体を出力密度に偏重した設計のものとする、省エネルギー効果の改善度合いが小さくなるのがわかる。以下、充電電力・放電電力の絶対値を500[kW]増やした場合の全変電所供給電力量の改善率が $\alpha\%$ 以下となる点を「特徴点」と呼ぶ。 $\alpha = 0.5\%$ の場合の本ケーススタディにおける特徴点を図12に示す。

この特徴点は、蓄電活用容量を図12の各横軸値に決めた場合に、装置の充電電力・放電電力を図12の対応する縦軸値より大きくしても、省エネ効果が頭打ちになる理論上の点を表している。すなわち、蓄電装置を導入する場合には、蓄電活用容量と充電電力・放電電力とのバランスを考慮する必要がある。

このように、本数理モデルを活用することにより、蓄電装置の容量を選定するための有用な情報を得ることができる。

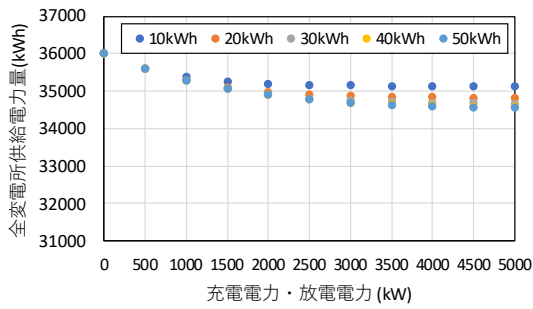


図9 全変電所供給電力量の比較（設置箇所：SS3）

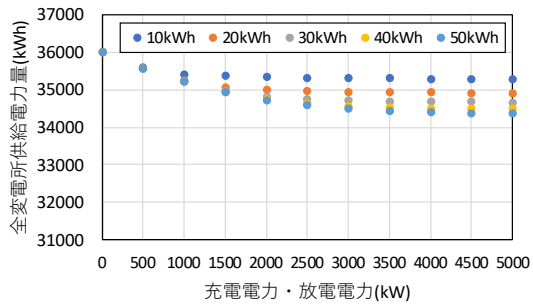


図10 全変電所供給電力量の比較（設置箇所：SS7）

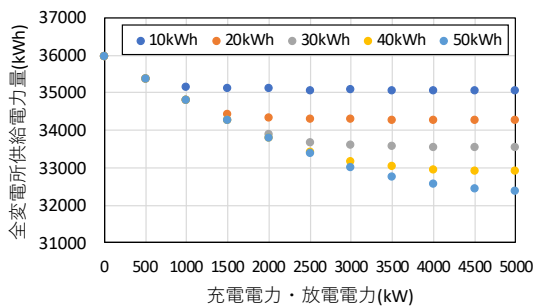


図11 全変電所供給電力量の比較（設置箇所：SS10）

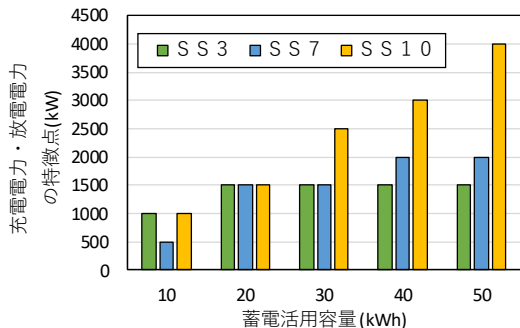


図12 各ケースにおける特徴点（ $\alpha=0.5\%$ ）

3.4 省エネ効果の試算

本節では、列車運行電力シミュレータを用いて、蓄電装置による省エネ効果を試算する。

まず、図5(b)の手順に従って、本数理モデルの妥当

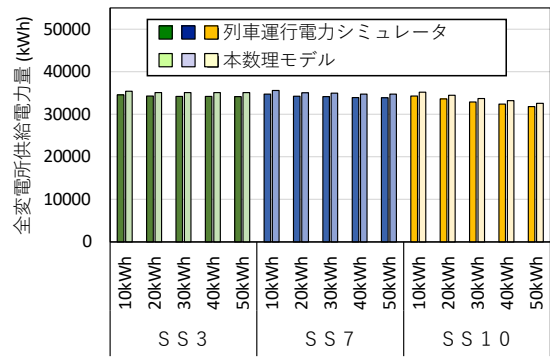


図13 列車運行電力シミュレータと本数理モデルとの比較

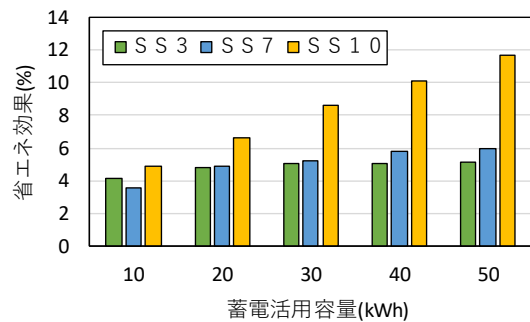


図14 省エネ効果の比較

性を確認した。具体的には、図12における蓄電装置の最適充放電出力パターンを入力として、列車運行電力シミュレータを用いて、全変電所の供給電力量を算出した。本数理モデルでは、電圧変動に伴う運転曲線の変化はないものとしているが、列車運行電力シミュレータでは、実現象同様、電圧変動に応じて運転曲線が変化する。その結果、本数理モデルでは放電できず、き電回路方程式を解くことができない時刻が存在する可能性がある。

列車運行電力シミュレータと本数理モデルとの比較を図13に示す。全変電所の供給電力量の差は、約2.4～2.7%であった。また、列車運行電力シミュレータでき電回路方程式を解くことができなかった時刻の割合は、約0.2～0.9%とわずかであった。すなわち、本数理モデルで求めた全変電所の供給電力量は、列車運行電力シミュレータで計算する値に対して、精度の良い近似であると言える。

次に、図5(c)の手順に従って、列車運行電力シミュレータを用いて、蓄電装置がなかった場合の全変電所の供給電力量を計算し、図13での計算結果と比較することにより、蓄電装置を導入し、本数理モデルでの制御を適用した場合の省エネ効果を試算した。その結果を図14に示す。省エネ効果は、約3.6～11.7%となった。

SS3およびSS7に蓄電装置を設置する場合には、蓄

電活用容量がある値を超えると省エネ効果に改善が見られなくなる。具体的には、SS3は30[kWh]、SS7は40[kWh]よりも大きな蓄電活用容量を持つ装置を設置したとしても、その省エネ効果は頭打ちとなる。一方で、SS10は、蓄電活用容量を増やすほど省エネ効果が高くなる。

4. まとめ

近年、鉄道で導入が進んでいる地上蓄電装置の容量選定支援のため、列車ダイヤ通りの列車運行を実施した場合に、蓄電装置が省エネルギー化に寄与しうる最大量を試算する手法を構築した。具体的には、時間を離散的に扱い、列車の電圧変動に伴う運転曲線の変化がないという仮定のもとで、蓄電装置の充放電時の損失を考慮し、本問題を数理最適化問題としてモデル化して最適解を求めた。

また、サンプルデータに対して、蓄電装置を導入する場合を想定した試算により、蓄電装置の定格容量や充電電力・放電電力の効果的な設計を支援することが可能であることを示した。さらに、列車運行電力シミュレータを用いて、本数理最適化モデルの妥当性を確認した。また、蓄電装置の省エネ効果に関するケーススタディを行ったところ、約3.6～11.7%の省エネ効果となった。

本研究においては計画ダイヤ通りの列車運行を想定している。一方で、将来的には、時々刻々と変化する列車運行状況をリアルタイムに取得し、蓄電装置の充放電制御に活用することで、省エネルギー性能を向上できる可能性もある。そのため、リアルタイムな列車の力学的エネルギー情報を活用した蓄電装置の充放電制御手法の構築にも取り組んでいる^{13) 14)}。本稿の成果は、これらの新しい制御手法の省エネ効果を検討する上での、基礎的なデータにもなり得ると考えている。

今後も、地上蓄電装置の充放電制御手法に関する研究を実施し、鉄道の省エネルギー化に寄与することを目指す。

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) 鉄道電力供給における蓄電装置応用調査専門委員会：鉄道電力供給における蓄電装置応用技術，電気学会技術報告，No.1359，2015
- 2) 川原敬治，林屋均，古田尚，吉原洋和，根橋久男，中野誠司：蓄電装置の実運用の状況，電気学会全国大会，電気学会，5-S27-5，2014
- 3) 山下高賢，可児周博，中村悦章：JR西日本における再生電力有効活用の取り組み，鉄道車両と技術，No. 150，2009
- 4) 根橋久男，高橋慎，上村正，今伸一郎：再生蓄電装置（キャパポスト）の動作検証について，平成29年電気学会産業応用部門大会，電気学会，5-S8-2，2017
- 5) 丸山一樹，佐々木敏夫：多摩都市モノレール株式会社向け再生蓄電装置，平成29年電気学会産業応用部門大会，5-S8-3，2017
- 6) 壇知也，清水芳樹：4変電所における蓄電装置本稼働に伴う省エネ効果と今後の課題，平成29年電気学会産業応用部門大会，電気学会，5-S8-4，2017
- 7) 武内陽子，小川知行，佐藤圭介，森本大観，齋藤達仁：列車運行エネルギーの最小化のための蓄電装置の充放電制御アルゴリズム，自動車／交通・電気鉄道合同研究会，電気学会，VT-17-024 / TER-17-059，2017
- 8) 武内陽子，小川知行，森本大観，今村洋一，影山真佐富：電力・車両・運転分野の協調による列車運行電力シミュレータの開発と検証の取り組み，平成29年電気学会産業応用部門大会，電気学会，5-S8-9，2017
- 9) 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の開発，鉄道総研報告，Vol. 30，No. 8，2016
- 10) 武内陽子：列車運行を考慮した地上蓄電装置の最適制御手法，第332回鉄道総研月例発表会，2019
- 11) 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
- 12) 佐藤栄徳：直流き電回路計算の考え方と事例(4)，鉄道と電気技術，Vol.27，No.8，pp.74-80，2016
- 13) 生出珠之助，小川知行，森本大観，武内陽子：列車の力学的エネルギーを活用した地上蓄電装置の充放電制御手法の検討，電気学会全国大会，電気学会，5-277，2019
- 14) 齋藤達仁，生出珠之助，小川知行，武内陽子，森本大観：列車の力学的エネルギーと架線電圧を用いた地上蓄電装置の充放電制御方式，平成30年電気学会産業応用部門大会，電気学会，5-58，2019