

運転操縦方法の選択による列車運行エネルギーの最小化

武内 陽子* 佐藤 圭介*

Minimization of Total Train Operation Energy by Driving Pattern Selection

Yoko TAKEUCHI Keisuke SATO

Our research purpose is to construct a control algorithm for minimizing the total train operation energy. For this purpose, a model was constructed, of which the control targets are driving patterns of the trains between stopping stations. Then, this model was formulated as a mathematical optimization problem. In this report, we introduce some results of case studies implemented by using sample data.

キーワード：列車運行，エネルギー，回生電力，最適化，電力貯蔵装置，制御アルゴリズム

1. はじめに

鉄道においては、近年、消費エネルギー削減に対するニーズが高まっている。そこで、全列車について、列車ダイヤの走行時分を遵守しつつ、列車運行エネルギーの総和を最小化する手法の構築を最終目的とした研究に取り組んでいる。文献1)では、その最初のステップとして、電力貯蔵装置の充放電時における吸収率を考慮し、各列車の出発から次の停車駅までの運転操縦方法を選択することによって列車運行エネルギーを最小化する問題を、数理最適化問題としてモデル化した。本稿では、運転操縦のしやすさを考慮し、停車駅間ごとに、ある1つの基準となる運転操縦方法を選択可能なモデルへと拡張する。

拡張したモデルでのケーススタディを行い、ブレーキノッチを変えて作成した複数の運転操縦方法に対して、列車運行エネルギーの総和を最小化するブレーキノッチの組合せパターンを求めた。また、求めたブレーキノッチの組合せパターンで運転した場合と、全列車が全駅間で同じブレーキノッチで運転した場合との列車運行エネルギーを比較し、提案手法の妥当性を確認した。

以下、2章では列車運行エネルギー最小化のためのモデルの作成、3章では本研究における列車運行電力シミュレータの活用、4章では数理最適化問題としての定式化、5章ではケーススタディ、6章ではまとめと今後の課題について、それぞれ述べる。

2. 列車運行エネルギー最小化のためのモデル作成

2.1 背景と目的

列車が力行中のときは、車両は架線から供給される電力を使って加速し、列車運行エネルギーを消費する。ま

* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

た、制動中のときは、モーターを発電機として動作させて回生電力を架線に返す。その際、回生しうるエネルギーは、車両のモーター特性、質量、ブレーキ初速度などの影響を受けて、大きく変化する。

列車が回生している時刻に、力行する列車が存在すると、回生電力は力行時のエネルギーとして活用される。一方で、力行する列車が近くに存在せず、架線の電圧が高くなりすぎ、回生できないエネルギーが生じる（「回生絞り込み」と呼ばれる）。すなわち、ある列車が同じ運転操縦をしていても、その回生電力が有効活用されるか、回生絞り込みにより散逸してしまうかは、他の列車の運転操縦に依存する。

また、電力貯蔵装置が設置されている場合、回生絞り込みが発生する時刻に充電制御をすれば、回生絞り込み電力量を削減することができる。その削減量は、充放電制御方法だけでなく、電力変換器を含む電力貯蔵装置の充放電時の損失にも依存する。したがって、列車運行全体のエネルギーを最小化するためには、ある列車が回生するタイミングと、他の列車が力行するタイミング、および、電力貯蔵装置の充放電制御方法と充放電時の損失とを考慮する必要がある。

一方、列車ダイヤは、旅客利便性を考慮して作成され、かつ、線路設備、車両運用、乗務員運用などの様々な制約がある。ここでは、駅間走行時分を一定とし、運転方法を変えて列車運行エネルギーを削減する制御方法を目指す。

以上により、本研究では、電力貯蔵装置の充放電時の損失を考慮し、列車ダイヤを遵守するという前提のもとで、列車運行エネルギーの総和を最小化することを目的とする。最小化のためには、本問題を数理最適化問題として定式化することが有効であるため、いくつかの前提条件を設定し、数理的なモデル化を行う。

以下、2.2節ではモデル化における前提条件、2.3節

特集：輸送・交通計画技術

では、前提条件を使用したモデル化の基本的な考え方について述べる。

2.2 モデル化における前提条件

前述した通り、列車運行エネルギーの総和は、列車群の相互作用に依存する。また、列車運行エネルギーは、変電所の整流器特性、き電線・レールの抵抗（以下、総称して「き電回路抵抗」と呼ぶ）を考慮したき電回路計算や、車両の力学的な動きなどから決定される連続的に変化する値であり、実現象をそのまま解析的に取り扱うことは難しい。電力貯蔵装置の充放電制御方法に自由度を持たせると、さらに問題は複雑になる。

そこで、「列車運行エネルギー最小化」を数理最適化問題として定式化するにあたって、列車運行エネルギー、運転曲線、き電回路抵抗、電力貯蔵装置について、以下を仮定した。

① 列車運行エネルギーの離散化

時間のある単位で区切り（「時刻」と呼ぶ）、区切った時刻での列車運行エネルギーを「電力量」と呼ぶ。時間の区切りを細かく設定することにより、精度の良い近似が可能となる。

② 列車運行エネルギーの固定

(ア)時刻 i において列車 i が回生しうる電力量（「回生可能電力量」と呼ぶ）は、車両のモーター特性、ブレーキ初速度のみに依存し、乗車率の変動に起因する変化は無視できるものとする。

(イ)同一時刻内の電圧変動に起因する列車 i の力行電力量の変化は無視できるものとする。

③ 設定したブレーキノッチごとの、運転曲線の固定

(ア)電圧変動に起因する力行時の運転曲線の変化は無視できるものとする。

(イ)回生絞り込みが発生しても、その分の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。

④ き電回路抵抗によるエネルギー損失

電力貯蔵装置の充放電時の損失に比べると相対的に小さいため、無視できるものとする。

⑤ 電力貯蔵装置

(ア)回生可能電力量と、実際の回生電力量（「実回生電力量」と呼ぶ）との差分の電力量は、無限大の貯蔵媒体をもつ電力貯蔵装置に、吸収率 w で吸収されることとする。吸収率 w は、電力変換器を含む装置の充放電時の損失に伴う効率を表す。すなわち、充電制御は、可能なかぎり、列車間で回生電力を融通しあい、融通しきれなかった分を電力貯蔵装置で吸収するものとする。

(イ)電力貯蔵装置で吸収した分の電力量は、放電できるタイミング（当該時刻における消費電力量の総

和が正の値を取る場合）において、最大の電力量（当該時刻における消費電力量の総和と、蓄電されている電力量のうちの最小値）を放電するものとする。

2.3 モデル化における基本的な考え方

2.3.1 項と 2.3.2 項では最適化問題を解くために必要な 2 つの入力データについて、2.3.3 項では回生電力量と電力貯蔵装置充電量の計算方法について、それぞれ述べる。

2.3.1 運転パターン

本モデルでは、あらかじめ、計算対象となる列車ダイヤの各列車の各停車駅間に対して、ダイヤ上の走行時分を遵守し、かつ、実際に走行可能な複数の運転操縦方法（「運転パターン」と呼ぶ）を、入力データとして準備する。例として、駅間走行時分を同じとし、ブレーキ時の減速度を変化させた 3 通りの運転パターンでの速度－走行距離曲線を図 1 に示す。運転パターンごとに、力行から惰行に移るタイミング、惰行からブレーキに移るタイミングが異なるため、2.3.2 項で後述する電力量も異なる。

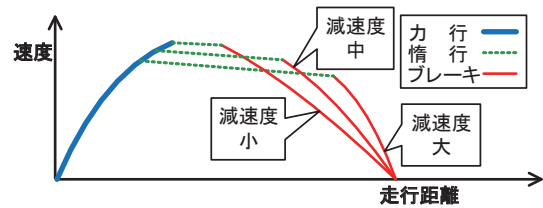


図 1 運転パターンの例¹⁾
(ブレーキ時の減速度を変えた場合)

2.3.2 電力量

入力データとして、各列車の各運転パターンでの時刻ごとの力行電力量、回生可能電力量を準備する。列車運行エネルギーおよび運転曲線は固定されるという前提条件②③より、運転パターンごとに力行電力量、および、回生可能電力量は一意に決まる。ある運転パターンでの具体例を図 2 に示す。横軸は時間、曲線は速度－時間曲線、棒グラフは 1 秒ごとの電力量を表す。惰行時には、補機電力だけ電力を消費している。正の電力量が力行電力量、負の電力量の絶対値が回生可能電力量となり、力行電力量と回生可能電力量が同時に正となる時刻は存在しない。

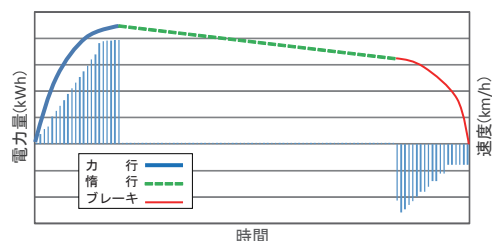


図 2 運転パターンと電力量の例¹⁾

2.3.3 回生電力量と電力貯蔵装置充電量の計算方法

時刻 t における停車駅間での実回生電力量を求めるには、回生電力が融通できるか、回生絞り込みが発生してしまうのかを計算する必要がある。そのため、区切った時刻 t において、在線中の全列車を、力行や惰行で電力を消費している「電力消費グループ」と、ブレーキをかけて回生する可能性のある「回生発電グループ」とに分類する。ある列車のある駅間で図2の運転パターンを選択した場合、当該列車は、電力量が正の時刻では電力消費グループ、電力量が負の時刻では回生発電グループに属する。

き電回路抵抗によるエネルギー損失はないものとする2.2節の前提条件④より、時刻 t における実回生電力量の総和 ($R(t)$ とする) は、電力消費グループでの総力行電力量 ($P(t)$ とする) と、回生発電グループでの総回生可能電力量 ($\bar{R}(t)$ とする) との大小関係によって決定される。

例えば、図3のような場合、総力行電力量 $P(t) = 260[\text{Wh}]$ 、総回生可能電力量 $\bar{R}(t) = 130[\text{Wh}]$ であり、 $P(t) > \bar{R}(t)$ である。結果として、全ての回生可能電力が、他の列車の力行電力として消費され、有効活用される。一方、図4は、総力行電力量 $P(t) = 80[\text{Wh}]$ 、総回生可能電力量 $\bar{R}(t) = 230[\text{Wh}]$ であり、 $P(t) < \bar{R}(t)$ である。この状況では、実際に回生できる電力量は、総力行電力量 $P(t)$ と等しくなり、回生絞り込みが発生する。具体的には、 $R(t) = P(t) = 80[\text{Wh}]$ 、回生絞り込み電力量は $\bar{R}(t) - P(t) = 150[\text{Wh}]$ となる。電力貯蔵装置の充電制御方法の前提条件⑤(ア)より、図4の時刻での電力貯蔵装置への充電量は、充放電時の吸収率 w を用いて、 $150 \times w[\text{Wh}]$ となる。

このように、各列車の各停車駅間での運転パターンを決定すれば、各時刻での消費電力量、および、回生絞り込みが発生する時刻での電力貯蔵装置の充電量を計算できる。また、回生発電グループに属するそれぞれの列車

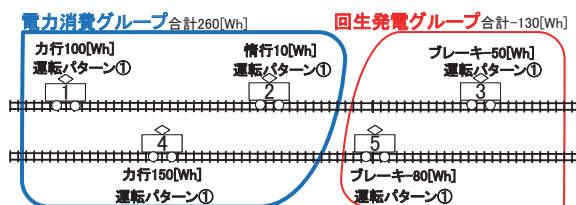


図3 回生絞り込みが発生しない例¹⁾

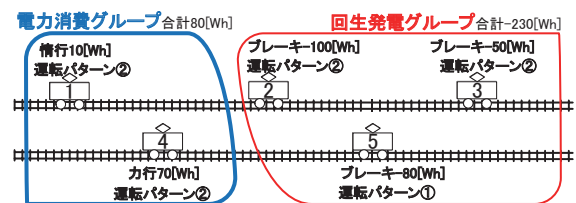


図4 回生絞り込みが発生する例¹⁾

の実回生電力量を計算する必要はなく、回生発電グループ全体としての回生電力量のみ考慮すればよい。

3. 列車運行電力シミュレータの活用

選択候補となる運転パターンの集合として、実際に走行可能な運転パターンを準備することは、本モデルにとって重要である。また、各運転パターンにおける電力量の推定精度も重要である。さらに、モデルから求めた最適な運転パターンの組合せでの列車運行エネルギーを試算し、省エネ効果を確認することで、本モデルの妥当性を検証する必要がある。

そこで、本研究では、より精度の高い列車運行電力推定のために開発している列車運行電力シミュレータ²⁾を活用し、運転パターンの候補集合を作成し、かつ、本モデルの妥当性を検証する。列車運行電力シミュレータと数理最適化問題としての本モデルとの関係を、図5に示す。

以下、3.1節では列車運行電力シミュレータの概要、3.2節では具体的な入力データ作成について述べる。

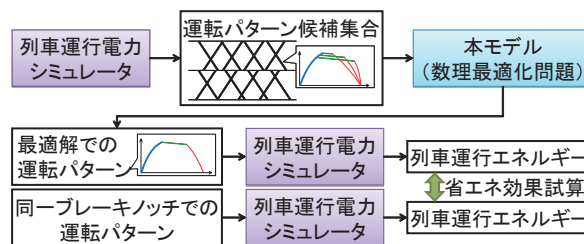


図5 列車運行電力シミュレータと本モデルとの関係

3.1 列車運行電力シミュレータの概要

列車運行電力シミュレータは、より現実に近い列車運行電力の推定を可能とするために、車両性能、運転操縦と運行管理、電力供給経路について、各分野の専門性を活かして開発してきたモデルを統合したシミュレータである²⁾。入出力データ・機能・構成を図6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、各変電所の電圧・電流の時間的推移、各列車の各駅間での運転曲線、各車両の電圧・電流の時間的推移を推定する。

3.2 入力データ作成

列車運行電力シミュレータで作成する入力データは、列車ダイヤ、各列車の停車駅間ごとでの複数の運転パターン、各運転パターンの各時刻における力行電力量および回生可能電力量である。運転パターンは、各列車の停車駅間ごとに、計画ダイヤでの駅間走行時分を設定し、車両の運転時の標準的な消費エネルギーの試算を目的に開発したエネルギー評価用運転曲線計算アルゴリズム³⁾を用いて、列車運行電力シミュレータで作成した。また、

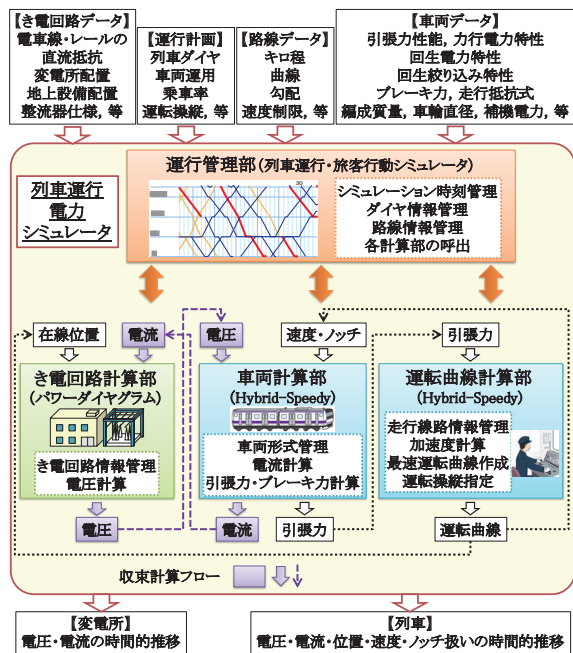


図6 列車運行電力シミュレータの構成²⁾

本稿においては、作成した運転パターンにおける力行電力量、回生可能電力量を計算するために、一定間隔で回生インバータを設置した場合の電圧値・電流値を採用して積算した。

4. 数理最適化問題としての定式化

4.1 節では、基本となるモデルとして、電力貯蔵装置の充放電時の吸収率も考慮し、最も総消費電力量を小さくするような運転パターンの組合せを求めるといった数理最適化問題としての定式化について記載する¹⁾。4.2 節では、運転のしやすさを考慮して、停車駅間ごとに、ある1つの基準となる運転パターンを選択する制約を追加し、文献1)のモデルを拡張する。

4.1 基本となる定式化

以下は、本節における表記のリストである。

集合の表記

- I : 列車の集合 (要素を主に i で表す)
- T : 時刻の集合 (要素を主に t で表す)
- S^i : 列車 i の走行する停車駅間を表す集合 (要素を主に $s(i,t)$ で表す (走行中の駅間は時刻 t によって決まるため))
- $Q^{i,s(i,t)}$: 列車 i の停車駅間 $s(i,t)$ における運転パターンの集合 (要素を主に q で表す)

入力データの表記

- w : 電力貯蔵装置の吸収率 ($0 \leq w \leq 1$)
- $P_q^{i,s(i,t)}(t)$: 列車 i が停車駅間 $s(i,t)$ を運転パターン q

で走行しているときの時刻 t における力行電力量 ($P_q^{i,s(i,t)}(t) \geq 0$)

➤ 力行電力量は補機電力量を含有

- $R_q^{i,s(i,t)}(t)$: 列車 i が停車駅間 $s(i,t)$ を運転パターン q で走行しているときの時刻 t における回生可能電力量 ($R_q^{i,s(i,t)}(t) \geq 0$)

決定変数 (0-1 変数) の表記

- $x_q^{i,s(i,t)} = \begin{cases} 1 & \text{列車 } i \text{ が停車駅間 } s(i,t) \text{ を} \\ & \text{運転パターン } q \text{ で走行する場合} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$

定式化のための追加表記

- $P^i(t)$: 列車 i の時刻 t における力行電力量

$$P^i(t) = \sum_{q \in Q^{i,s(i,t)}} x_q^{i,s(i,t)} P_q^{i,s(i,t)}(t)$$

- $\bar{R}^i(t)$: 列車 i の時刻 t における回生可能電力量

$$\bar{R}^i(t) = \sum_{q \in Q^{i,s(i,t)}} x_q^{i,s(i,t)} \bar{R}_q^{i,s(i,t)}(t)$$

- $\sum_{i \in I} R^i(t)$: 時刻 t における回生絞り込みを考慮した実回生電力量の合計

$$\sum_{i \in I} R^i(t) = \min \left\{ \sum_{i \in I} P^i(t), \sum_{i \in I} \bar{R}^i(t) \right\}$$

定式化は、以下の通りとなる。

$$\text{Min.} \quad \sum_{i \in I} \left\{ \sum_{t \in T} P^i(t) - \sum_{t \in T} R^i(t) - w \left[\sum_{t \in T} \bar{R}^i(t) - \sum_{t \in T} R^i(t) \right] \right\} \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{q \in Q^{i,s(i,t)}} x_q^{i,s(i,t)} = 1 \quad \forall i \in I \quad \forall t \in T, \quad (2)$$

$$x_q^{i,s(i,t)} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad \forall t \in T \quad \forall q \in Q^{i,s(i,t)}. \quad (3)$$

定式化での式の各項の意味は、以下の通りである。

- $\sum_{i \in I} P^i(t)$: 時刻 t における力行電力量の合計
- $\sum_{i \in I} R^i(t)$: 時刻 t における実回生電力量の合計
- $\sum_{i \in I} \bar{R}^i(t) - \sum_{i \in I} R^i(t)$: 時刻 t における回生絞り込み電力量の合計
- 式 (2): 列車 i は停車駅間 $s(i,t)$ でただ1つの運転パターンを選択

目的関数である式 (1) の項 $\sum_{i \in I} R^i(t)$ は、 \min 演算子を含んでいる。そこで、問題を解きやすくするため、以下の決定変数の追加と式変形を行う。

$$a(t) = \sum_{i \in I} P^i(t), \quad b(t) = \sum_{i \in I} \bar{R}^i(t), \quad c(t) = \sum_{i \in I} R^i(t)$$

$$\sum_{i \in I} R^i(t) = \min \left\{ \sum_{i \in I} P^i(t), \sum_{i \in I} \bar{R}^i(t) \right\}$$

$$\Leftrightarrow c(t) = \min \{a(t), b(t)\}$$

$$\Leftrightarrow \text{制約条件に } a(t) \geq c(t), \quad b(t) \geq c(t) \text{ を追加し, } c(t) \text{ を最大化}$$

これにより、目的関数式 (1) の Σ を除いた部分は以下に変形できる。

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in I} P^i(t) - \sum_{i \in I} R^i(t) - w \left\{ \sum_{i \in I} \overline{R^i(t)} - \sum_{i \in I} R^i(t) \right\} \\ = & a(t) - c(t) - w \{ b(t) - c(t) \} \\ = & a(t) - wb(t) - (1-w)c(t) \end{aligned}$$

すなわち、以下のとおりに整理することができ、0-1 整数線形計画問題となる。

$$\text{Min. } \sum_{i \in I} \{ a(t) - wb(t) - (1-w)c(t) \} \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \sum_{q \in Q^{i,s(i,t)}} x_q^{i,s(i,t)} = 1 \quad \forall i \in I \forall t \in T, \quad (5)$$

$$x_q^{i,s(i,t)} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \forall t \in T \forall q \in Q^{i,s(i,t)}, \quad (6)$$

$$a(t) = \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q^{i,s(i,t)}} x_q^{i,s(i,t)} P_q^{i,s(i,t)}(t) \quad \forall t \in T, \quad (7)$$

$$b(t) = \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q^{i,s(i,t)}} x_q^{i,s(i,t)} \overline{R_q^{i,s(i,t)}}(t) \quad \forall t \in T, \quad (8)$$

$$a(t) \geq c(t) \quad \forall t \in T, \quad (9)$$

$$b(t) \geq c(t) \quad \forall t \in T. \quad (10)$$

4.2 停車駅間ごとの基準運転パターン選択問題への拡張

同じ停車駅間でも、列車によって異なる運転パターンを設定することは、運転操作の煩雑さが増え、好ましくない場合がある。そこで、4.1 節の定式化を、停車駅間ごとに、ある1つの基準となる運転パターンを選択するような問題に拡張する。

この拡張により、停車駅間、および、運転パターンを表す集合は、列車ごとの集合ではなくなるため、表記を下記のように修正する。

集合の表記の修正

- S : 停車駅間を表す集合 (要素を主に s で表す)
- Q^s : 停車駅間 s における運転パターンの集合 (要素を主に q で表す)

式(4)～式(10)の表記は、以下の通りに読み替える。

- 停車駅間を表す要素: $s(i,t) \rightarrow s$
- 運転パターンの集合: $Q^{i,s(i,t)} \rightarrow Q^s$

そして、次の式(11)を制約条件に追加する。

$$x_q^{i,s} = x_q^{j,s} \quad \forall i \in I \forall j \in I \forall s \in S \forall q \in Q^s \quad (11)$$

5. ケーススタディ

文献1)では、4.1 節の定式化によるケーススタディを実施している。本章では、文献1)と同様のサンプルデータを用いて、4.2 節で定式化した問題を解いた結果を紹介する。

5.1 入力データ

サンプルデータの線路は、勾配や曲線が存在する実データを模擬した線路データを使用した。列車ダイヤは、列車間隔が5分のパターンダイヤとした。列車はすべて各駅停車とし、約1時間を計算対象とした。列車ダイヤ図を図7に示す。

電力量を計算する時刻は、1秒ごととした。運転パターンは、各列車の停車駅間ごとに、計画ダイヤの走行時分に合わせ、ブレーキ時の減速力が異なる3パターン(以下、減速力が小さい順に「B3N」、「B4N」、「B5N」と呼ぶ)に変えて作成した。

5.2 列車運行エネルギー最小化の計算結果

電力貯蔵装置の充電時の吸収率 w を、0.0 (電力貯蔵装置なし)、0.8、1.0 (理想的な貯蔵装置) の3通りとした場合について、4.2 節で定式化した停車駅間ごとの基準運転パターン選択問題を解いた。Core i7-4790 CPU @ 3.60GHz、実装メモリ 24GB の PC を使用した場合、計算時間は約3秒であった。

4.1 節の各列車の停車駅間ごとの運転パターン選択問題を解いた結果¹⁾と、4.2 節で定式化した停車駅間ごとの基準運転パターン選択問題を解いた結果を比較する。目的関数値、および、計算結果から算出した列車運行エネルギーと回生絞り込み電力量を表1に、電力貯蔵装置の蓄電電力量を表2に、4.2 節の定式化を解いた結果で

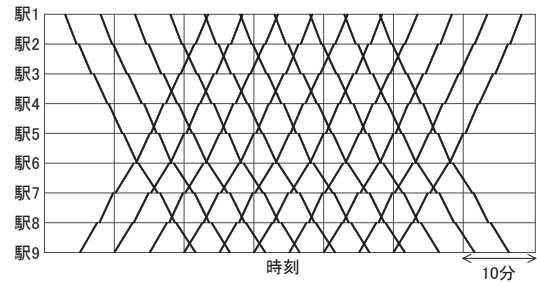


図7 列車ダイヤ¹⁾

表1 計算結果 (列車)

定式化	w	列車運行エネルギー [kWh]		回生絞り込み電力量 [kWh]	
		総和 (目的関数値)	1列車平均	総和	1列車平均
4.1 節 ¹⁾	0.0	1854.8	92.7	175.1	8.8
	0.8	1707.7	85.4	40.2	2.0
	1.0	1665.3	83.3	—	—
4.2 節	0.0	1870.5	93.5	178.9	8.9
	0.8	1721.9	86.1	40.9	2.0
	1.0	1677.5	83.9	—	—

表2 計算結果 (電力貯蔵装置)

定式化	w	電力貯蔵装置の蓄電電力量 [kWh]	
		総和	1列車平均
4.1 節 ¹⁾	0.0	—	—
	0.8	160.9	8.0
	1.0	225.5	11.3
4.2 節	0.0	—	—
	0.8	162.7	8.1
	1.0	229.3	11.5

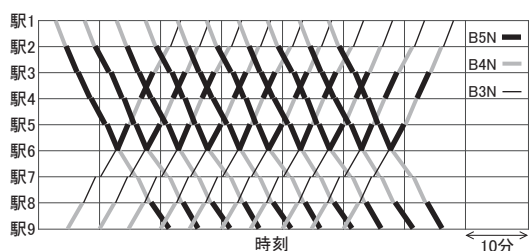


図8 w=0.0での運転パターン選択結果

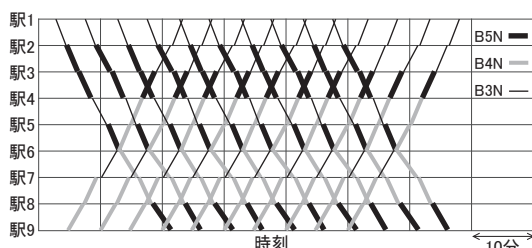


図9 w=0.8での運転パターン選択結果

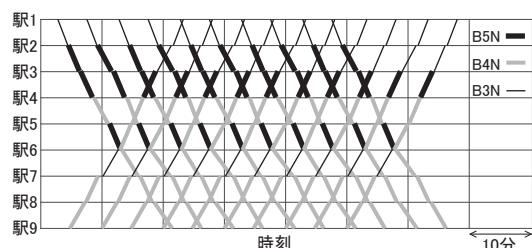


図10 w=1.0での運転パターン選択結果

ある選択運転パターンを図8～図10に示す。表1と表2より、4.2節の定式化では、列車運行エネルギー、回生絞り込み電力量、電力貯蔵装置の蓄電電力量が、4.1節の定式化と比較して、約1～2%大きくなっているが、その差は小さい。

5.3 列車運行電力シミュレータによる最適解の妥当性検証

4.1節のモデル化、および、4.2節のモデル化を解いたブレーキノッチ選択結果を設定して、列車運行電力シミュレータで消費電力量を計算し、省エネ効果を試算することにより、提案したモデルの妥当性を検証する。なお、ここでは、電力貯蔵装置がない状況 ($w=0.0$) で比較する。

具体的には、全列車の全停車駅間を同一のブレーキノッチで運転した場合と、図8のブレーキノッチの組合せを選択した場合とで、変電所の総消費電力量を比較した。結果を図11に示す。

4.1節および4.2節の定式化による変電所消費電力量の合計値の差は、約0.4%であり、ほとんど差がなかった。また、4.1節および4.2節の定式化のいずれについても、同一ブレーキノッチでの運転方法と比べて約3～5%の省エネ効果が確認でき、提案した4.2節の定式化が妥当であることを確認した。

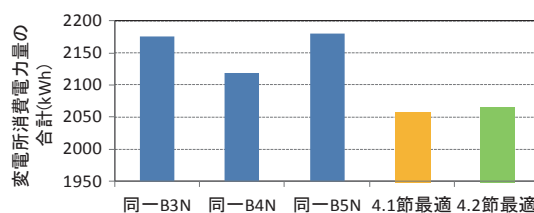


図11 列車運行電力シミュレータの計算結果

6. おわりに

本研究の目的は、設定された設備と列車ダイヤに対して、列車運行エネルギーの総和を最小化する制御アルゴリズムを構築することである。文献1)では、その最初のステップとして、電力貯蔵装置の充放電時における吸収率を考慮し、各列車の出発から次の停車駅までの運転パターンを制御対象としたモデル化を提案し、0-1線形整数計画問題として定式化した。本稿では、停車駅間ごとに、ある1つの基準となる運転パターンを選択するような問題に拡張した。

ケーススタディを実施した結果、本稿でのサンプルデータにおいては、計算時間は約3秒となり、各列車の各停車駅間の運転パターン選択の定式化でも、停車駅間ごとの基準運転パターン選択の定式化でも、列車運行エネルギーや変電所消費電力量の合計値には、ほとんど差が見られなかった。また、最適ブレーキノッチの組合せを選択した場合は、同一ブレーキノッチでの運転方法と比べて約3～5%の省エネ効果が確認できた。すなわち、提案した定式化は、高速な計算が可能であり、かつ、妥当な結果が得られることを確認した。

今後は、実規模データでのケーススタディを実施し、妥当性検証を深度化する。また、定式化が実規模の問題に耐えるかどうかを確認する。

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, 田口東, 佐藤圭介: ブレーキノッチ選択による列車運行エネルギーの最小化, 電気学会交通・電気鉄道/フィジカルセンサ合同研究会, TER-17-017/PHS-17-009, 2017
- 2) 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, pp.5-10, 2016
- 3) 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, 電学論 D, Vol.135, No.5, pp.563-570, 2015