

小規模遅延時を対象とした 省エネ運転整理ダイヤ作成手法の構築

国崎 愛子* 武内 陽子*

Construction of Method for Creating Energy-saving Rescheduling Timetable for Small-scale Delays

Aiko KUNISAKI Yoko TAKEUCHI

We constructed a method for creating energy-saving rescheduling timetables for small-scale delays using mathematical optimization. In the constructed algorithm, the rescheduling timetable is converted into an energy-saving rescheduling timetable by reducing the powering energy and increasing the regenerative energy. We considered passenger convenience under the condition that the total time from the starting station to the terminal station of each train does not change. This paper describes the details of the method for creating energy-saving rescheduling timetables and reports the results of a case study using real line data.

キーワード：省エネ，運転整理，小規模遅延，力行電力量，回生電力量，利便性，数理最適化

1. はじめに

世界的にエネルギー消費量が増大している中、化石燃料の安定供給に対する不安などの課題があり、エネルギー事情は大きく注目されている。また、世界的に地球環境問題への関心が高まっており、各種産業分野において持続可能な開発目標（SDGs）やカーボンニュートラルを目指した取り組みが進んでいる。鉄道においても、省エネのために、電力貯蔵装置や回生インバータなどの地上設備の導入¹⁾や、省エネ車両の導入²⁾、省エネ運転が検討されてきた³⁾。

運行管理・運転手法に関する省エネ化のアプローチには、大きく2つの方法がある。1つ目は運転操縦に関する検討であり、複数の運転操縦方法から、列車運行エネルギーを最小化する組み合わせを求める手法⁴⁾などがある。2つ目はダイヤに関する検討であり、消費電力量に着目して走行時分を最適化したダイヤを作成する手法^{5) 6)}などがある。これらの研究は、計画ダイヤ通りの走行ができる前提での省エネ化の検討であり、列車の遅延を想定していない。

そこで、数分程度の小規模遅延時に列車間隔調整のために駅で抑止する場合を想定し、省エネ効果が得られるような運転整理ダイヤ案（以下、「省エネ運転整理ダイヤ案」）を作成する手法を開発した⁷⁾。具体的には、従来の省エネを考慮しない列車間隔調整による運転整理ダイヤ案（以下、「基本運転整理ダイヤ案」）をもとに、1分程度の短時間の計算で省エネ運転整理ダイヤ案を作成する。そして、遅延状況に応じてその都度作成する省エ

ネ運転整理ダイヤ案をもとに、運転士に対して運転指示を伝達することで、省エネとなる列車運行を実現するものである。省エネ運転整理ダイヤ案作成においては、力行電力量を削減しつつ、回生電力を融通しやすくするために力行とブレーキのタイミングを合わせるような着発時刻調整方法を、数理最適化手法を用いて定式化した。

本論文では、省エネ運転整理ダイヤ作成手法について、構築した手法の詳細を紹介するとともに、実路線データに提案手法を適用したケーススタディの結果を報告する。ケーススタディでは、鉄道総研で開発した列車運行電力シミュレータ⁸⁾上で、省エネ運転整理ダイヤを再現し、消費電力量を求め、省エネ効果を試算した。

2. 省エネ運転整理ダイヤ作成手法

2.1 省エネ運転を実現するための基本的な考え方

一般に、走行時分を延長すると、列車の力行時間を短縮して最高速度を抑えることができるため、列車運行エネルギーを削減することができる。また、列車がブレーキをかけるときに回生電力を架線に返すが、近くを走行する力行列車に電力を融通することができれば、回生電力を有効活用することができ、変電所から供給する電力量を削減することができる。この2点に着目し、低速で走行することと、力行とブレーキのタイミングを合わせることで、列車運行エネルギーの削減を図る。

また、省エネ運転整理ダイヤ作成にあたって、遅延状況に応じてその都度ダイヤを更新するために、計算時間を1分以内とすることを目標とした。

なお、本論文で使用する用語のうち、「力行電力量」は列車が架線から取得する電力量から補機電力量を除い

* 信号技術研究部 運転システム研究室

た電力量、「補機電力量」は照明や空調など列車走行以外に使用する電力量、「回生電力量」は列車が架線に返す電力量、「回生絞り込み量」は架線電圧が高くて回生融通されなかった電力量、「消費電力量」は力行電力量から回生電力量を引き、補機電力を加えた値とする。列車運行電力シミュレータ⁸⁾では、き電回路、車両性能、運転操縦を統合した計算を行うことで、実際の運行状況に近い状況を再現できるため、消費電力量等を高精度に算出することができる。

2.2 省エネ運転整理ダイヤの概要

省エネ運転整理ダイヤ作成イメージを図1に示す。図1(a)に示すような小規模遅延が発生する状況を対象とする。図1(b)に示す通り、遅延発生時に、乗車率の平準化のための列車の間隔調整や、信号による駅間での減速、機外停止を避けるために駅での停車時分をのばす運転整理が実施されることを想定する。これが、基本運転整理ダイヤ案である。

ここで、図1(b)の紫色の丸で囲ったような、駅での停車時分の延長時間（以下、「抑止時分」）に注目した。この抑止時分を、図1(c)の赤い丸と紫の丸で囲った部分で示すように、可能な範囲で走行時分と停車時分とに割り振ることで、走行時分延長による力行電力量の削減と、力行、ブレーキのタイミング合わせによる回生電力の有効活用によって、省エネ化を図る。これが省エネ運転整理ダイヤ案である。

2.3 利便性の考慮

一般的に列車運行エネルギーと利便性はトレードオフの関係にあり、利便性を極力損なわないように省エネ運転の方法を検討する必要がある。

図1にイメージを示した通り、基本運転整理ダイヤ案の抑止時分を、走行時分と停車時分に再分配して省エネ化を図る方法では、列車の本数や停車駅、編成数が計画ダイヤ時点から変わらないため、旅客への影響を抑えることができる。また、基本運転整理ダイヤ案で抑止手配を行った列車、駅間のみを調整対象とするため、各列車

の始終着駅の発着時刻は変えずに、中間駅間の発着時刻のみを調整する。このように基本運転整理ダイヤ案と省エネ運転整理ダイヤ案で、合計所要時間を変えないことで、利便性を低下させないよう考慮した。

なお、乗降人数が多い主要駅や他路線への乗継駅などにおいては、低速で運行して省エネ化するよりも、駅での停車時分を確保する方がのぞましい場合がある。そのような駅については、発着時刻や停車時分が基本運転整理ダイヤ案と同じとなるように固定することで対応する。

2.4 力行電力量削減アルゴリズム

走行時分を延長して、低速で走行することで力行電力量を削減する。列車、駅間によって、走行距離や勾配、曲線などの線路条件が異なり、走行時分延長時間に対する力行電力量の減少量は異なるため、走行時分を延長した際に省エネ効果が高い列車、駅間と、そうでない列車、駅間がある。そこで、数理最適化手法を用いて、省エネ効果が最大となるように効率よく、各列車、各駅間の走行時分延長時間を求めるアルゴリズムを構築した。

まず、列車、駅間ごとに走行時分延長時間と力行電力量の減少量のデータを準備する。走行時分延長時間と力行電力量の関係を図示した例（以下、「WTプロット」）を図2に示す。図2に示す通り、ある程度走行時分を延長すると、力行電力量の減少幅は飽和する傾向がある。そのため、特定の列車、駅間の走行時分を長時間延長するよりも、複数の列車、駅間の走行時分を少しずつ延長

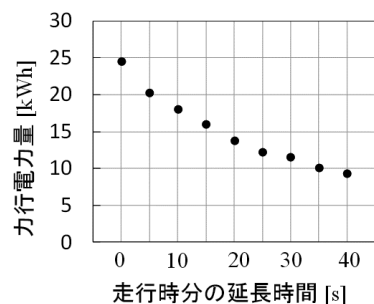


図2 WTプロットの例

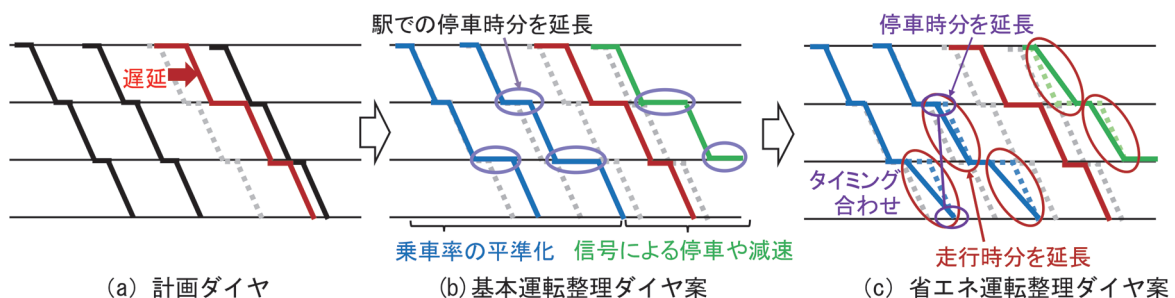


図1 省エネ運転整理ダイヤ作成イメージ

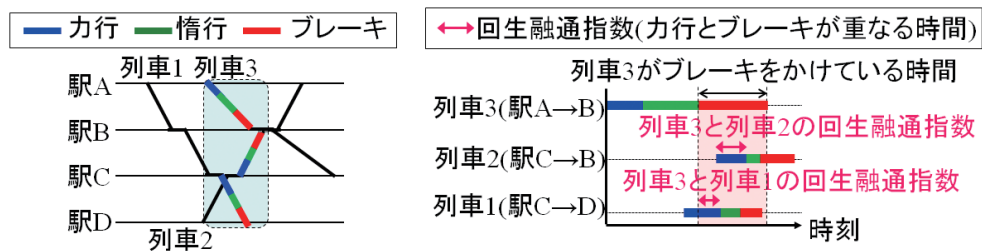


図3 回生融通指数の概念

する方が、省エネ効果は高くなると考えられる。

次に、基本運転整理ダイヤ案をもとに、抑止時分の合計値を列車ごとに算出し、走行時分と停車時分へ再分配できる合計時間を求める。そしてWTプロットをもとに、力行電力量の減少量の合計値が最大となるように、列車、駅間ごとに走行時分延長時間の組み合わせを求める最適化計算を行う。なお、走行時分の延長時間は、列車ダイヤを作成する単位時間（例：5秒）の倍数とする。数理最適化手法による定式化は3章で後述する。

2.5 回生電力の有効活用アルゴリズム

力行、ブレーキのタイミングを合わせることで、回生融通しやすい状況をつくり、回生絞り込み量を削減して回生電力を有効活用させるアルゴリズムを構築した。

まず、ある列車がブレーキをかけるときに、周辺を走行する列車が力行している場合の、2列車間の力行、ブレーキのタイミングが重なる時間を「回生融通指数」と定義した。回生融通指数の例を、図3に示す。

2列車間の回生融通指数を考えると、ブレーキをかける時間を $o_{start} \sim o_{end}$ 、力行する時間を $c_{start} \sim c_{end}$ としたとき、5通りの場合分けが考えられる。各場合分けを図4に示す。力行、ブレーキのタイミングが重ならない場合は、回生融通指数は0となり、それ以外の場合は、ブレーキ終了時刻 o_{end} と力行終了時刻 c_{end} のうち早い時刻 z_{end} から、ブレーキ開始時刻 o_{start} と力行開始時刻 c_{start} のうち遅い時刻 z_{start} の差分が回生融通指数となる。すなわち、回生融通指数 z は式(1)で表される。

$$z = \max\{0, z_{end} - z_{start}\} \quad (1)$$

回生融通指数を考える上で回生電力の潮流が発生する2列車の組み合わせについて、1つの回生列車に対して全ての他列車との組み合わせを考えた場合、計算時間が増大する懸念がある。また、着目するブレーキに対して、複数の列車の力行時間が重なるように調整したとしても、列車間距離や架線の電圧条件等によって、実際に回生融通できる力行列車は限られる。そこで、距離的区切りと時間的区切りによって、力行とブレーキのタイミングを合わせる2列車の組み合わせを限定する。概念図

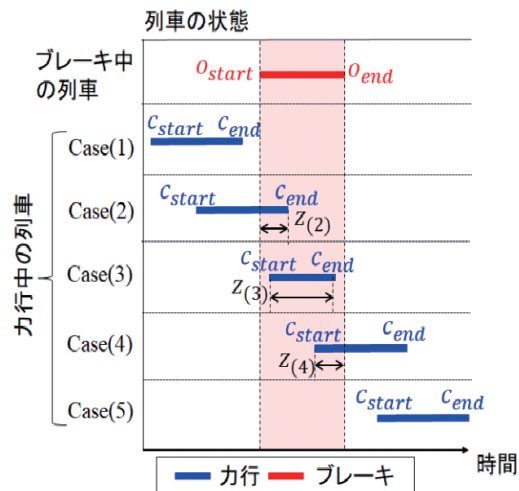


図4 列車ごとの運転状態に応じた回生融通指数の場合分け

を、図5に示す。直流き電方式では一般に回生列車の近傍の力行列車との間でのみ回生電力の潮流が起こることから、変電所の位置で線区をブロックに分割し（距離的区切り）、同じブロック内に在線する列車同士の組み合わせに限定することとした。さらに、着目するブレーキが操作される列車、駅間と、そのブレーキ動作の前後一定時間（時間的区切り）以内に力行する列車、駅間との組み合わせに限定した。

このように選定された2列車について求めた回生融通指数の合計値が最大となるように、列車、駅間ごとに、走行時分と停車時分へ再分配する時間の組み合わせを求める最適化計算を行う。数理最適化手法による定式化は3章で後述する。

なお、走行時分を延長するとランカーブが変わり、力行、ブレーキのタイミングも変化する。よって、各走行時分延長時間に対する力行、ブレーキのタイミングのデータを準備する必要がある。

2.6 力行と回生の両立

回生電力を有効活用する調整によって、力行電力量が受ける影響の例を図6に示す。図6では、列車3の時刻が調整可能で、列車1、2の発着時刻は固定とする。

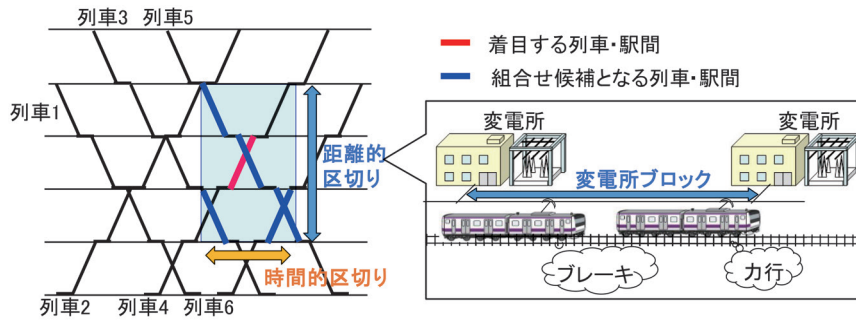


図5 力行とブレーキのタイミングを合わせる2列車の組み合わせ方法

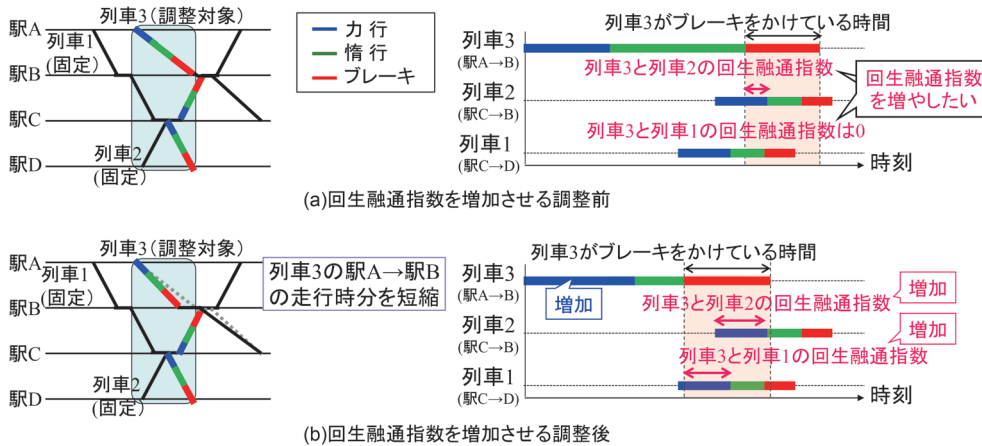


図6 回生と力行を両立させるための課題

図6 (a) で回生融通指数の合計値を増加させるため、図6 (b) のように列車3の駅Aから駅Bへ向かう走行時分を短縮するような調整をしたとする。その結果、回生融通指数の合計値は増加するが、力行電力量も増加することとなる。この例のように、回生電力を有効活用するための調整によって、力行電力量も増加してしまう可能性があり、力行電力量削減アルゴリズムと回生電力の有効活用アルゴリズムをできる限り両立する必要がある。

そこで、力行と回生のバランスを調整するための重みパラメータ W [kWh/s] を導入した。重みパラメータは、回生融通指数1秒あたりの回生電力量の期待値を表しており、回生融通指数に重みパラメータを乗じてその和をとった値は、回生電力量と正の相関があると考えられる。そこで、2.4節、2.5節のアルゴリズムを組み合わせ、力行電力量の減少量の合計値と、 W を乗じた回生融通指数の合計値の和を最大化する目的関数を設定し、力行電力量の削減と回生電力の有効活用の両立を目指すこととした。重みパラメータの値を大きくすれば、力行電力量の変化量に対して、回生融通指数をより優先的に増加させることができる。 W を用いて力行と回生を両立できる最適なバランスを見つけることで、省エネ効果の最大化を検討することが可能となる。

3. 数理最適化問題としての定式化

2.4節、2.5節のアルゴリズムを組み合わせ、力行と回生のバランスを調整できるように、数理最適化問題としての定式化を行った。本章では、その定式化について、目的関数の詳細と、制約条件の概要を記載する。これらの定式化をもとに、数理最適化ソルバーGurobi Optimizer (ver. 9.5.1) を使って、計算を行った。

集合の表記

- \mathcal{A}^{adjust} : 走行時分、停車時分を調整する対象列車の集合 (要素を a^{adjust} で表す)
- $\mathcal{S}^{adjust}(a^{adjust})$: 走行時分、停車時分を調整する対象列車 a^{adjust} の調整対象駅間の集合 (要素を s^{adjust} で表す)
- $\mathcal{D}(a^{adjust}, s^{adjust})$: 走行時分、停車時分を調整する列車、駅間における、走行時分延長時間 [s] の集合 (要素を Δd で表す)
- $\mathcal{M}(a^{adjust}, s^{adjust})$: 走行時分、停車時分を調整する列車、駅間における、停車時分延長時間 [s] の集合 (要素を Δm で表す)
- $\mathcal{B}^{power}(a^{adjust}, s^{adjust})$: 走行時分、停車時分を調整する対象列車が、調整対象駅間でブレーキをかけたときに、力行、ブレーキのタイミング合わせを図る力行列車の

集合（要素を b^{power} で表す）

- ・ $S^{power}(a^{adjust}, s^{adjust}, b^{power})$: 力行, ブレーキのタイミング合わせを図る力行列車 b^{power} が在線している駅間の集合（要素を s^{power} で表す）

入力データの表記

- ・ $\Delta e(a^{adjust}, s^{adjust}, \Delta d)$: 走行時分, 停車時分を調整する列車, 駅間において, 走行時分を Δd だけ延長した際の力行電力量の減少量 [kWh]
- ・ $W (> 0)$: 回生融通指数の合計値を目的関数に加えるときの重みパラメータ [kWh/s]

決定変数の表記

- ・ $x(a^{adjust}, s^{adjust}, \Delta d) = \begin{cases} 1 & \text{列車 } a^{adjust} \text{ の駅間 } s^{adjust} \text{ で延長する走行時分が } \Delta d \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$
- ・ $y(a^{adjust}, s^{adjust}, \Delta m) = \begin{cases} 1 & \text{列車 } a^{adjust} \text{ の駅間 } s^{adjust} \text{ で延長する停車時分が } \Delta m \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$

その他の変数の表記

- ・ $z(a^{adjust}, s^{adjust}, b^{power}, s^{power})$: 駅間 s^{adjust} でブレーキ中の列車 a^{adjust} と, 駅間 s^{power} で力行中の列車 b^{power} の回生融通指数

目的関数

力行電力量の減少量の合計値と, W を乗じた回生融通指数の合計値の和を最大化する (式 (2))。

$$\begin{aligned} & \sum_{a^{adjust}} \sum_{s^{adjust}} \sum_{\Delta d} (\Delta e(a^{adjust}, s^{adjust}, \Delta d) \\ & \quad \times x(a^{adjust}, s^{adjust}, \Delta d)) \\ \text{Max} & \quad + W \times \sum_{a^{adjust}} \sum_{s^{adjust}} \sum_{b^{power}} \sum_{s^{power}} \\ & \quad z(a^{adjust}, s^{adjust}, b^{power}, s^{power}) \end{aligned} \quad (2)$$

制約条件

下記の制約条件を考慮した。

- (1) 基本運転整理ダイヤ案の抑止時分だけ, 走行時分, 停車時分に再分配する
- (2) 省エネ運転整理ダイヤ案の出発時刻は, 計画ダイヤよりも早くしない

4. 実路線データを用いたケーススタディ

2章, 3章で前述した省エネ運転整理ダイヤ作成手法について, 実路線データでのケーススタディを行った。

4.1 計算条件

試算する線区は, 38 駅, 約 69km の規模で, タラッシュの約 1 時間分の列車ダイヤ (62 列車, 612 停車駅間) を計算対象とした。補機電力は外気温 15℃ 相当に設定した。試算対象とした計画ダイヤを図 7 (a) に示す。過去の列車遅延の実績データを参考に, 遅延初列車の初期遅延を 290 [s] に設定し, 赤線で示した。なお, ダイヤ図では, 線区全体のうち, 遅延による影響があり調整対象となる駅間が含まれる範囲を抜粋して示す。

遅延発生時刻以降の各列車に対して, 各駅で必要となる時隔と最小停車時分を設定して, 計画ダイヤ時の駅間走行時分で運転した場合の遅延伝搬を計算し, 抑止手配のみを想定して作成した基本運転整理ダイヤ案を図 7 (b) に示す。抑止が手配された列車, 駅間を太線で示す。遅延初列車より先行する 4 列車については, 乗車率平準化のための抑止, 遅延初列車より後発する 3 列車については, 駅間での減速や機外停止を避けるための抑止を想定した。このように抑止手配を行った 7 列車, 50 駅間を調整対象として, 省エネ運転整理ダイヤ案を作成した。なお, 各列車の抑止時分は 30~195 秒であり, 全列車合計で 745 秒であった。

力行電力量削減アルゴリズムで用いる列車, 駅間ごと

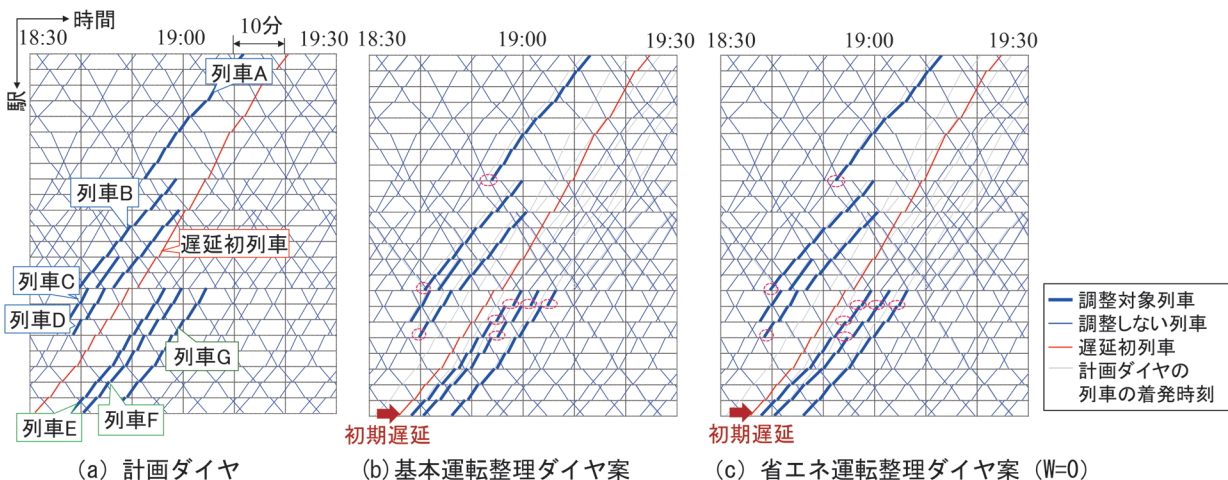


図 7 作成した省エネ運転整理ダイヤ案

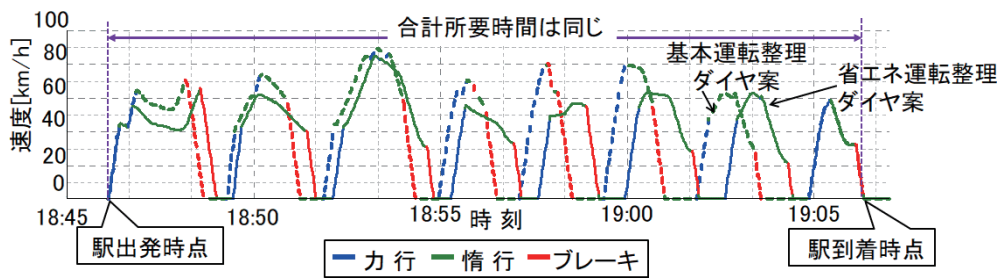


図8 列車Gの運転曲線の比較 (W = 0)

の走行時分延長時間と力行電力量の減少量のデータ (WTプロット), および, 回生電力の有効活用アルゴリズムで用いる各走行時分延長時間に対する力行, プレーキのタイミングのデータは, 列車運行電力シミュレータ⁸⁾を活用して準備した。

省エネ運転整理ダイヤ案を作成する際の計算条件について記す。延長可能な駅間に再分配する走行時分延長時間 (3章の Δd) と, 駅での停車時分延長時間 (3章の Δm) は, すべての列車において, 0, 5, 10, 15, …40秒のいずれかとした。力行と回生のバランスを調整するためのパラメータ W は, 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 [kWh/s] とした。

4.2 提案手法で作成した省エネ運転整理ダイヤ案

4.1節で設定した計算条件で, 省エネ運転整理ダイヤ案を作成した。力行電力量削減量アルゴリズムによる走行時分の延長を確認するために, W が0 [kWh/s] のときに得られた省エネ運転整理ダイヤ案を図7(c)に示す。図7(b)の基本運転整理ダイヤ案と, (c)省エネ運転整理ダイヤ案を比較すると, 赤い点線の丸で示すように, 駅での抑止時分が減少し, 走行時分が延長している駅間があることが確認できる。

4.3 シミュレーションによる省エネ効果の試算

基本運転整理ダイヤ案と省エネ運転整理ダイヤ案を, 列車運行電力シミュレータ⁸⁾で再現し, 計算対象である1時間 (図7の18:30~19:30) 分の消費電力量等を求めた。

まず, W が0 [kWh/s] のときの列車Gの運転曲線の比較を, 図8に示す。合計所要時間に変更はなく, 力行時間を短縮し, 最高速度が低下していることがわかり, 力行電力量を効率的に削減できていることを確認した。

次に, 各 W に対する, 走行時分, 停車時分の調整対象列車, 駅間 (7列車50駅間) の力行電力量, 回生電力量を図9に示す。 W が大きいほど, 回生電力の融通を優先することを意味するが, 確かに回生電力量が増加し, 力行電力量も増加する。すなわち, W によって, 力行と回生のバランスが調整可能であることを確認した。

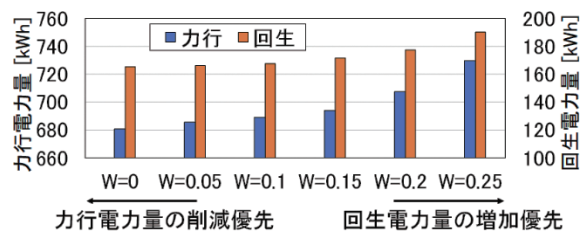


図9 力行電力量と回生電力量

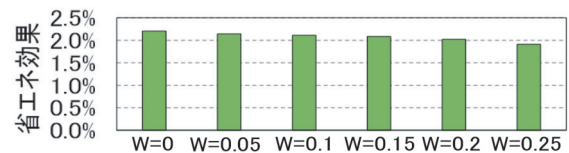


図10 省エネ効果

表1 省エネ運転整理ダイヤ作成にかかる計算時間

W[kWh/s]	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25
計算時間[s]	0.1	13.0	59.9	101.2	459.8	479.7

また, 各 W について, ダイヤ全体の消費電力量をもとに算出した省エネ効果を図10に示す。図10では, 基本運転整理ダイヤ案の消費電力量を基準として省エネ効果を算出した。本ケーススタディの条件では, W の値による省エネ効果の差はほとんどなく, 最大で2.2%, 最小でも1.9%の省エネ効果が得られた。

省エネ運転整理ダイヤ案作成にかかった時間を表1に示す。 W が0~0.1 [kWh/s] の範囲では, 計算時間が目標である1分以内であった。

5. まとめ

本研究では, 小規模遅延時に, 列車間隔調整のために駅で抑止する場合を想定し, 省エネ効果が得られるような運転整理ダイヤを作成する手法を構築した。各列車, 各駅間の発着時刻を調整することで, 利便性を考慮しながら, 力行電力量の削減と回生電力の有効活用を両立を図った。

ケーススタディの結果, 1分以内に省エネ運転整理ダ

ダイヤを作成でき、省エネ効果として最大2.2%が得られることを確認した。このように作成した省エネ運転整理ダイヤをもとに、運転指示を行うことで、列車運行の省エネ化の実現が可能である。

今後は、提案手法を計画ダイヤ作成時に適用し、力行電力量削減と回生電力の有効活用の両立を図った省エネダイヤ作成を試行する予定である。

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) 伊藤努：地上電力設備における省エネ施策の現状，2018年電気学会産業応用部門大会，5-S1-2，2018
- 2) 富川英朝，若林良明，篠宮健志：鉄道車両における省エネの現状，2018年電気学会産業応用部門大会，5-S1-3，2018
- 3) 渡邊翔一郎，宮武昌史：電気鉄道における運転と運行計画の省エネルギー技術の現状，2018年電気学会産業応用部門大会，5-S1-4，2018
- 4) 武内陽子，田口東，小川知行，森本大観：き電回路の簡易模擬とブレーキパターン選択による列車運行エネルギーの最小化，電気学会研究会資料，VT-20-077/TER-20-073，2020
- 5) 宮武昌史：節電に貢献する鉄道の省エネ運転・省エネダイヤに関する理論的検討，電気学会研究会資料，TER-11-68/ITS-11-43，2011
- 6) 明石太輔，仲野淳，佐藤拓哉，宮武昌史，渡邊翔一郎，武内陽子，小川知行：モデル線区での省エネルギー列車ダイヤの作成と列車運行電力シミュレータでの評価，令和2年電気学会全国大会，5-205，pp.337-339，2020
- 7) 国崎愛子，武内陽子：小規模遅延時の省エネ運転整理ダイヤ作成手法における力行とブレーキのタイミング合わせの検討，電気学会研究会資料，TER-23-038/MSS-23-004，2023
- 8) 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（産業応用部門），Vol.141，No.5，2021