

# 省エネルギー化のために 列車ダイヤを工夫する



**国崎 愛子**  
Aiko Kunisaki  
信号技術研究部  
運転システム研究室  
研究員



**高田 真由**  
Mayu Takada  
信号技術研究部  
運転システム研究室  
研究員



**武内 陽子**  
Yoko Takeuchi  
信号技術研究部  
運転システム研究室長

## はじめに

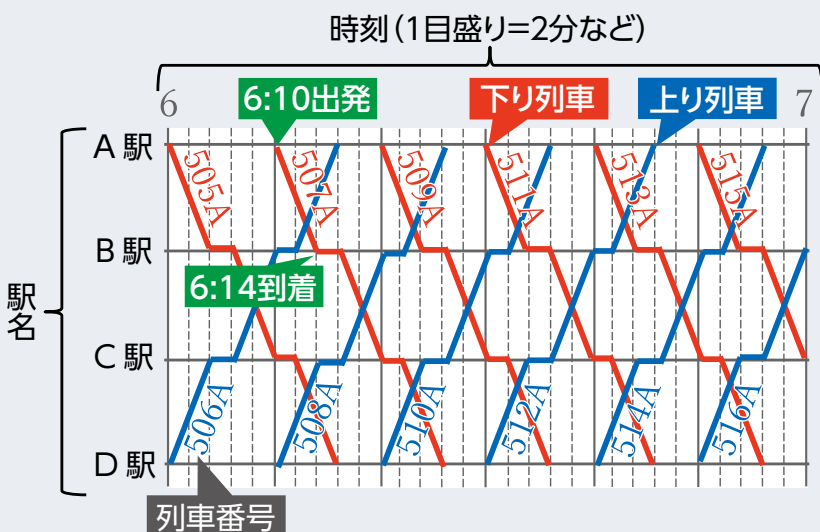
鉄道における運行エネルギーの脱炭素化に向けては、さらなる省エネルギー(以下、「省エネ」)化も重要なカギであり、省エネ運転はそのためのアプローチの一つです。省エネ運転を実現するには、運転操縦を工夫する手法と、列車ダイヤの設定で工夫する手法があります。

列車ダイヤとは、各列車に割り振られた番号(列車番号)や各列車の各駅での着発時刻などを示した列車の運行計画であり、図1に示すとおり、ダイヤ図とよばれる形式で表現されます。列車ダイヤは、エネルギーや利便性と密接に関係します。運行エネルギーは、列車本数や走行距離が増えるほど増加します。また、列車本数

や走行距離が同じであっても、駅間での走行時間を長くして低速で走行させると、必要なエネルギーを減らすことができます。

しかし、列車本数や走行距離を減らしたり、列車を低速で走行させたりすると、利便性の低下につながります。このように、一般にエネルギーと利便性は、どちらかを良くするとどちらかが悪くなるトレードオフの関係にあります。社会全体としてカーボンニュートラルを実現するためには、鉄道自体の脱炭素化だけでなく、環境優位性のある鉄道利用を通じた脱炭素化の推進も重要です。鉄道が魅力的な輸送モードとして選択されるためには、省エネ性と利便性が両立できるよう、列車ダイヤを設定する必要があります。

図1 ダイヤ図の例



## ☞ デマンド・レスポンス<sup>1)</sup>

電気は大量に貯蔵することができないため、安定して電気を供給するためには、電力供給量と電力需要量が同じである必要があります。また、再生可能エネルギーは天候などのさまざまな条件で、供給量変動するため、電力需給バランスに急な変動をもたらしてしまうリスクがあります。そこで、エネルギーの需要側が、供給状況に応じて賢く消費パターンを変化させることを、「デマンド・レスポンス」といいます。

あります。

列車ダイヤは、ダイヤ改正時などに作成される計画ダイヤを基本として、日々の列車の運行を管理するために修正・変更されます。これまで、臨時の計画変更や遅延解消のために列車ダイヤを変更する際には、利便性と省エネ性を同時に考慮することができませんでした。本記事では、利便性を最大限考慮しつつ、減便したり、列車を低速で走行させたりすることで、省エネルギー化を可能とする列車ダイヤの設定手法について、2つの研究事例を紹介します。

### 節電要請に対応した 臨時減便ダイヤ選択手法

脱炭素化社会に向けて再生可能エネルギーの導入拡大が進むと、天候などによって変動する電力供給量にあわせて電力需要量（使用量）を調整するダイヤモンド・リスポンス<sup>®</sup>が必要となります。現在すでに、電力の需給バランスが乱れると予想された際に、社会全体の電力需要を一時的におさえて大規模停電を未然に防ぐため、節電への協力が要請される場合があります。今後、鉄道においても、電力需要を一時的におさえて節電要請に応えるために、臨時に列車を減便する必要が生じることも想定されます。そこで、このような場合でも、利便性をできる限り

悪化させないように臨時減便ダイヤを設定する手法を構築しました。

### 臨時減便ダイヤ選択のための評価指標

まず、鉄道総研で開発した列車運行電力シミュレーター<sup>®</sup>上で通常のダイヤに基づく列車の運転を再現し、各列車のエネルギーを試算し、減便列車のエネルギーを差し引いて、臨時減便ダイヤの概算消費エネルギー $f_1$  [kWh]を計算します。

つぎに、利便性を表す評価指標として、乗車率最大値 $f_2$  [%]、所要時分の増分の合計 $f_3$  [時]、到着時刻の増分の合計 $f_4$  [時]の、3つを計算します。これらの指標を計算するためには、減便時に利用者が乗車する列車を予測する必要があります。そこで、図2に示すとおり、減便列車に乗る予定の利用者は減便列車の後続列車に乗車すると仮定し、各利用者が乗車する列車を推定する手法を構築しました<sup>3)</sup>。

このように計算した $f_1 \sim f_4$ を用いて、省エネ性と利便性を両立する臨時減便ダイヤ候補を絞っていきます。具体的にはどのように選択していくのか、次のケーススタディーの中で紹介します。

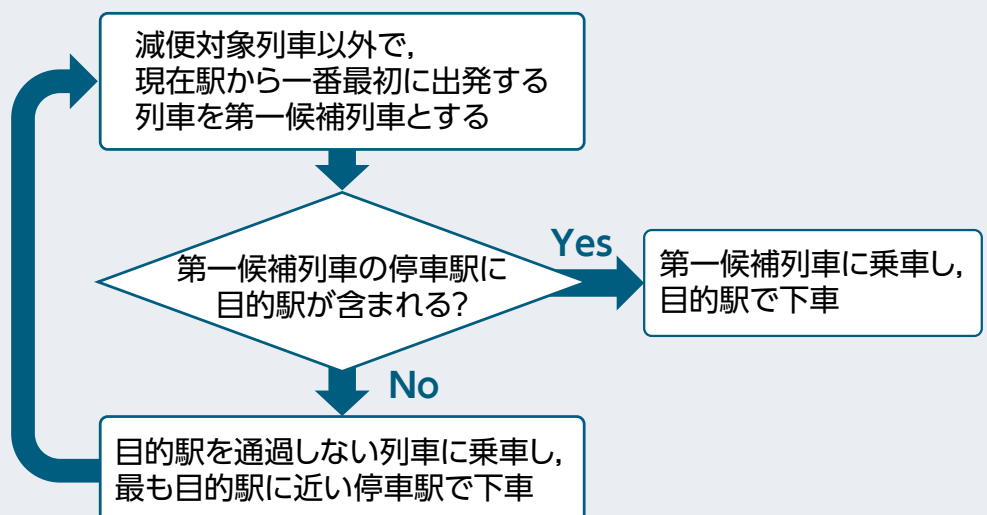
### ケーススタディー

都市圏のある路線の列車ダイヤで、12本の列車から1～4本減便する場合を対象としたケーススタディーを実施しました。臨時減便ダ

#### ② 列車運行電力シミュレーター<sup>2)</sup>

地上電力設備・車両・運転操縦を詳細にモデル化することによって、実際の運行状況に近い状況を再現し、消費エネルギーなどを高精度に計算できるシミュレーターです。また、旅客の出発駅、目的駅、出発駅への出現時刻を入力として、乗車列車を推定する機能があります。

図2 減便時の乗車列車を推定する方法



ダイヤの候補は794通りあります。図3に、全候補の概算消費エネルギーと各利便性評価指標のプロットを示します。消費エネルギーが同じ程度であっても、減便本数や利便性評価指標が異なる臨時減便ダイヤが多くあります。この中から、次の手順で、効率よく候補を絞っていきます。まず、消費エネルギー $f_1$  [kWh] の削減率と乗車率最大値 $f_2$  [%] の条件を設定します。

たとえば、削減率が20%以上、乗車率最大値が100%以下という条件を設定すると、図3の点線枠内に示すとおり、候補を91個まで絞ることができます。そして、残った候補の中から、所要時分の増分の合計 $f_3$  [時] と到着時刻の増分の合計 $f_4$  [時] の評価がよいものを選択します。図4に $f_3$  [時] と $f_4$  [時] を軸としたプロットを示します。最初に、 $f_3$  [時] と $f_4$  [時] のい

図3 概算消費エネルギーと各利便性評価指標の関係

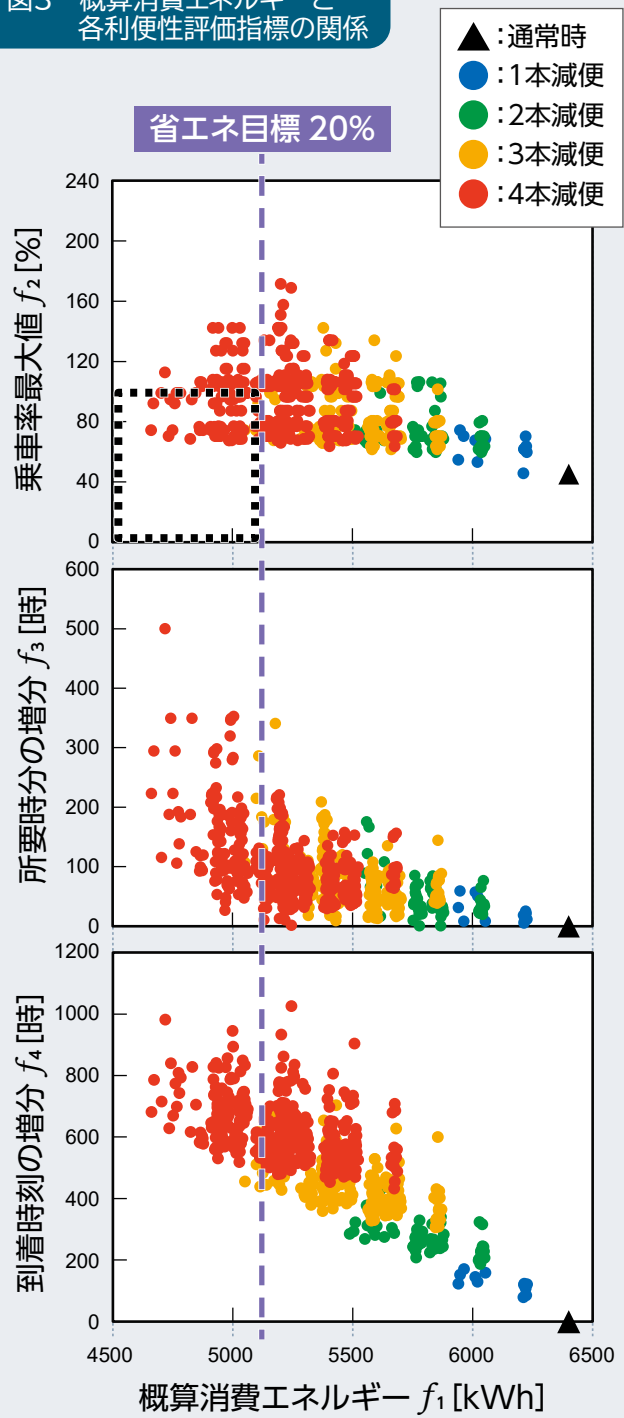


図4 図3の点線枠内の臨時減便ダイヤにおける時間に関する利便性評価値の関係

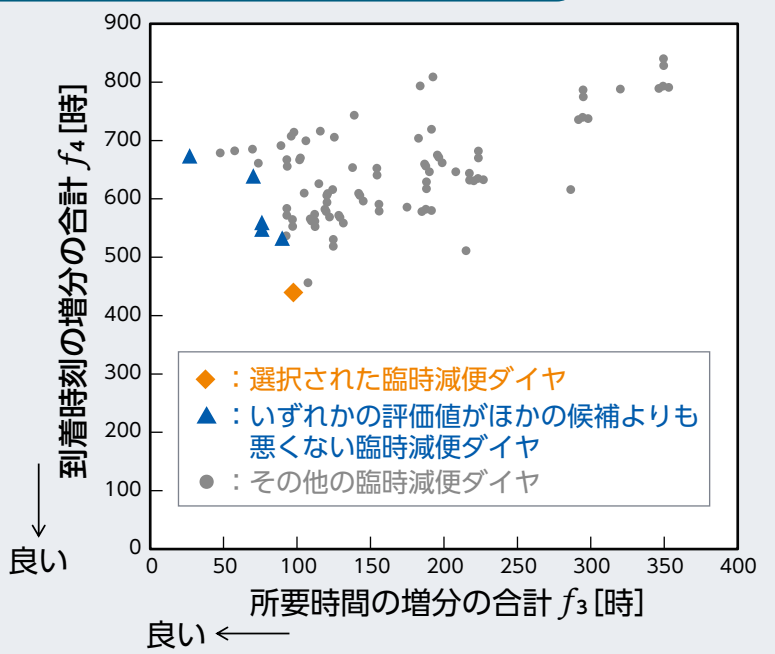
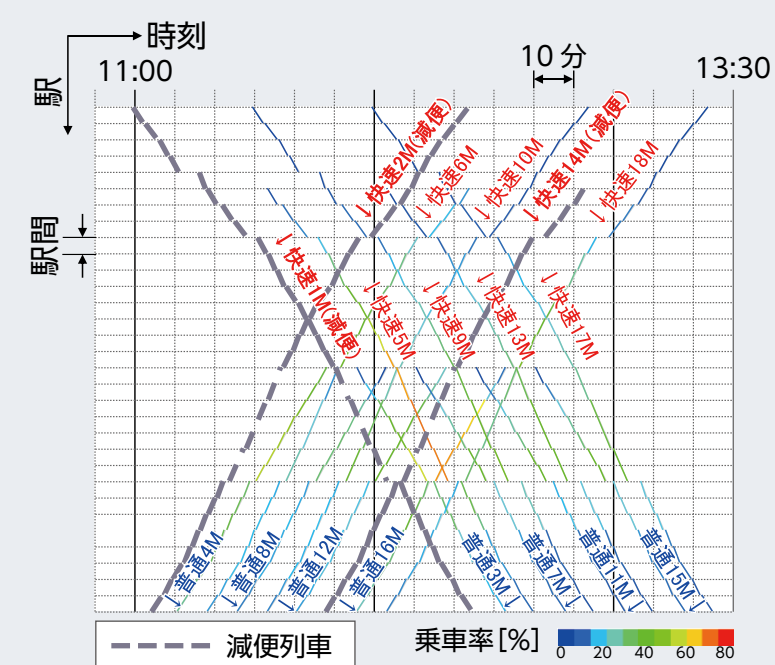


図5 選択された臨時減便ダイヤ



れかがほかの候補よりも“悪くない”ものに絞ります(図4の▲印と◆印)。そこから、 $f_3$ [時]と $f_4$ [時]の“両方が良い”ものを選択します。原点( $f_3$ と $f_4$ のいずれの値もゼロとなる点)からの距離に近い方が良い臨時減便ダイヤとなるため、図4の◆印が選択されます。図5に、この臨時減便ダイヤを示します。最大で4本まで減便ができるものとしましたが、利便性を考慮した結果、3本の減便でエネルギー削減率20%を達成できる臨時減便ダイヤを選択できました。

### 数分程度の遅延時の 省エネ運転整理ダイヤ作成手法

数分程度の遅延が発生した場合、駅での停車時分を長くして列車間の運転間隔を調整する**運転整理**<sup>1)</sup>が行われることがあります。このような運転整理時に、できる限り省エネとなるように間隔を調整する手法を開発しました。

#### 省エネ運転整理ダイヤ作成手法

電気を動力とする在来線の旅客列車では、図6に示すとおり、列車を加速させる「力行運転」、列車のスピードを落とす「ブレーキ」、力行もブレーキもせずに惰性で走行する「惰性運転」の3種類を組み合わせ、列車ダイヤにあわせた運行をしています。列車が架線から受け取った電力の大部分は、力行するためのエネルギー(以下、「力行電力量」)に変換されますが、図6の点線に示すとおり、列車の駅間での走行時分を延ばすと、力行時間を短くすることができます。そこで、図7に示すとおり、省エネを考えない通常の運転整理ダイヤ(以下、「基本運転整理ダイヤ」)で、後続列車が信号に

#### 1) 運転整理

事故や災害などによって、列車運行に乱れが生じたときに、正常に戻すために列車ダイヤに一連の変更を行うことを、「運転整理」といいます。着発時刻や着発番線、列車種別、運転順序の変更や、運転休止などがあります。

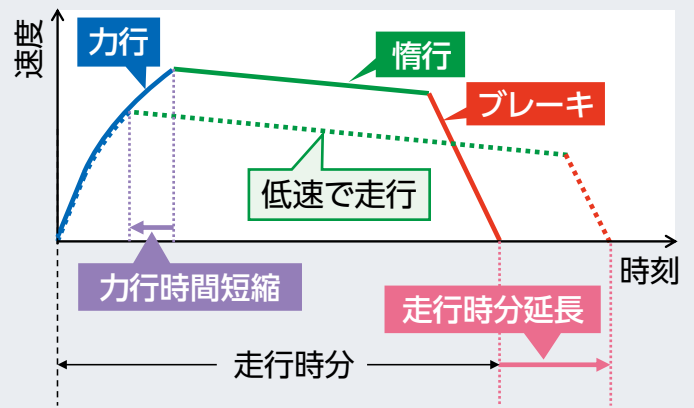
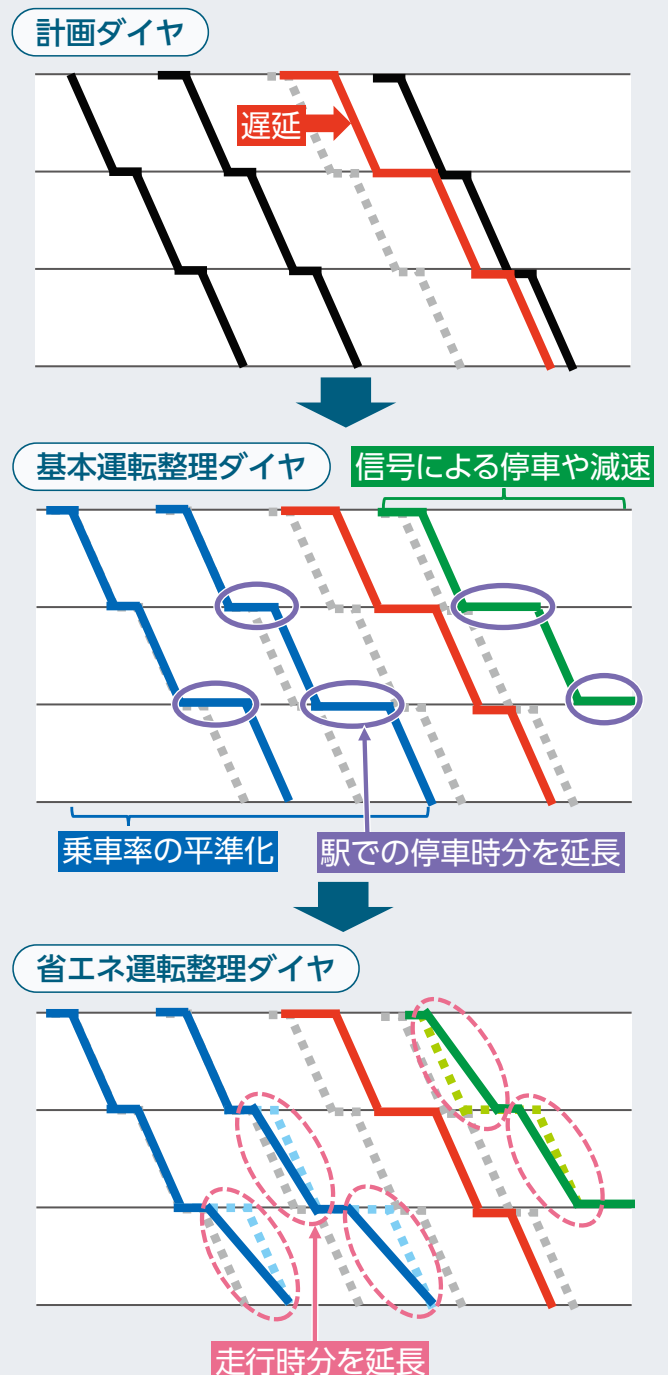


図6 運転方法の例(運転曲線)

#### 図7 省エネ運転整理ダイヤの作成イメージ(ダイヤ)



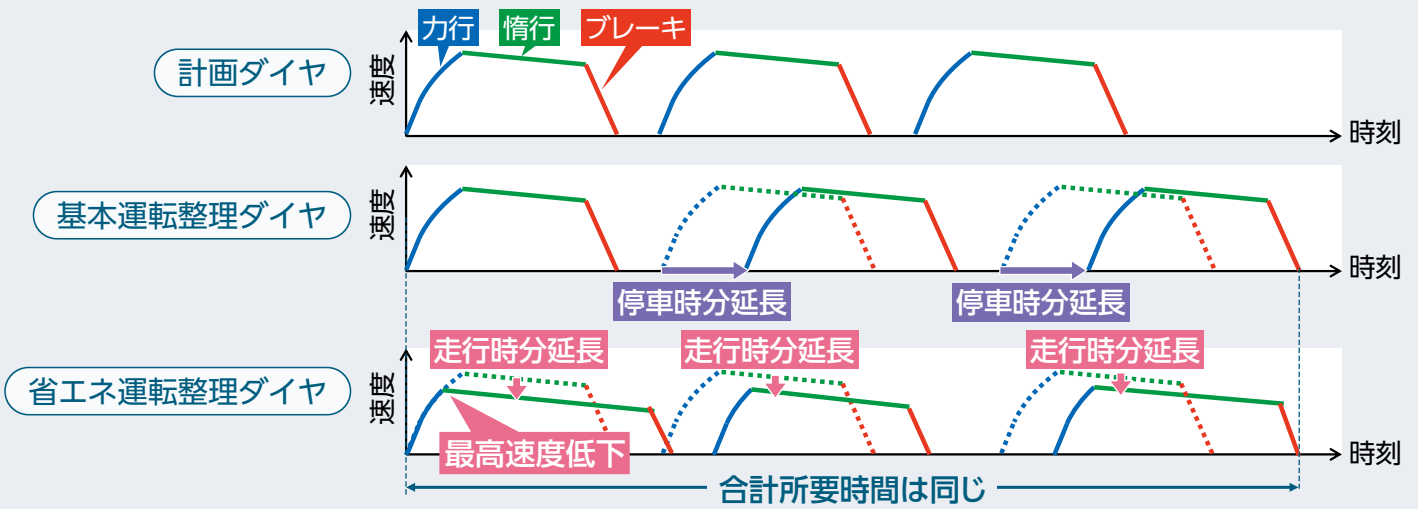


図8 省エネ運転整理ダイヤの作成イメージ (運転曲線)

より駅間で減速や停止するのを避けたり、先行列車の乗車率を平準化したりするために、運転間隔調整で延長した駅での停車時分を、列車の走行時分に分配して低速で走行させることで、省エネ運転整理ダイヤを作成します。図8に示すとおり、終着駅に到着する時刻は、基本運転整理ダイヤと省エネ運転整理ダイヤで変わらないことで利便性を考慮しました。

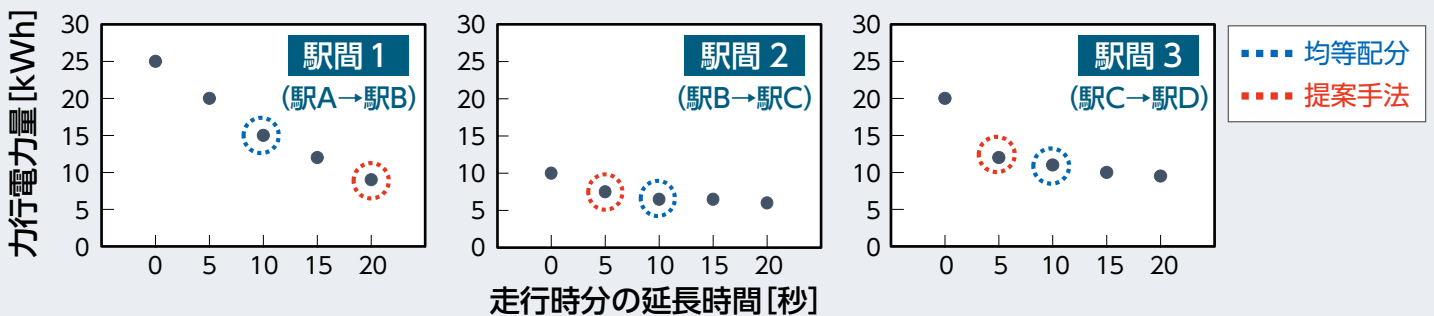
駅間によって距離や勾配などの線路条件が異なるため、力行電力量は駅間ごとに異なります。そのため、省エネ運転整理ダイヤを作成するためには、走行時分を均等に分配するのではなく、よりエネルギー削減効果が高い駅間に重点的に分配することが重要です<sup>4)</sup>。走行時分を延長し

て得られる力行電力量の削減量が最大となるように、走行時分を分配する駅間と時間の組み合わせを求めます。図9の例においては、走行時分に30秒を分配できる場合、駅間1に多く配分すると、各駅間に均等に配分するよりも多くの力行電力量を削減できます。

### ケーススタディー

都市圏のある路線で発生した5分程度の遅延を対象として、ケーススタディーを実施しました。列車運行電力シミュレーターを使い、基本運転整理ダイヤと省エネ運転整理ダイヤの運転方法と消費電力量を比較しました。図10に、列車の運転方法の比較の一例を示します。全体的に速度が下がり、力行時間が短くなっている

図9 走行時分の分配アルゴリズムの例



配分可能時間	配分方法	駅間 1	駅間 2	駅間 3	力行電力量合計値
0 秒	—	—	—	—	55kWh
30 秒	均等配分	+10 秒	+10 秒	+10 秒	32.5kWh
	提案手法	+20 秒	+5 秒	+5 秒	28.5kWh

力行電力量の削減量を最大化

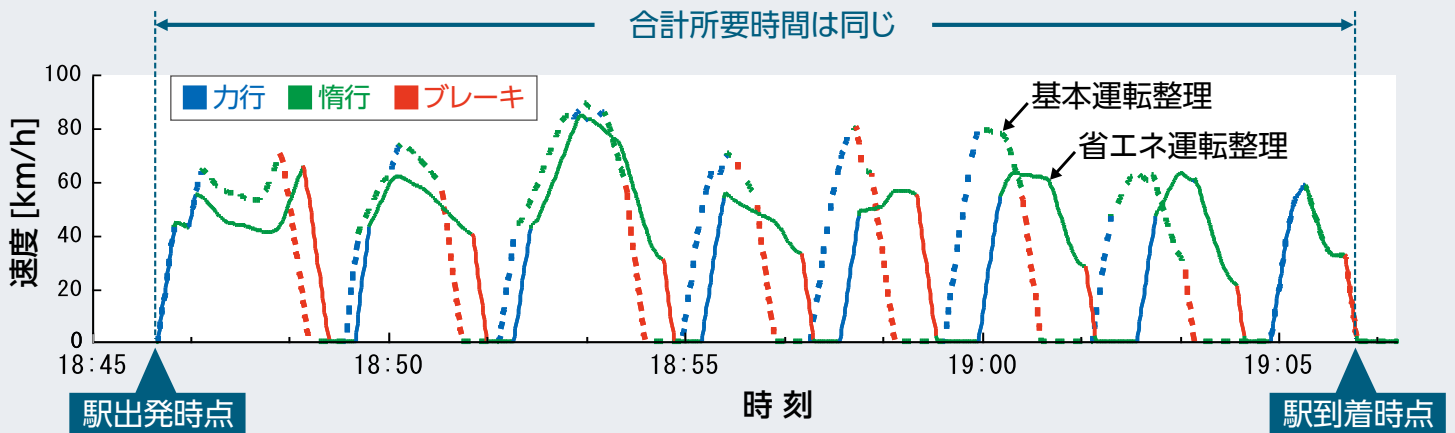


図10 運転方法の比較

ことがわかります。また、図11(a)に示すとおり、走行時分を分配した全列車の力行電力量の合計値は31%削減でき、図11(b)に示すとおり、遅延解消までの1時間にダイヤ全体で消費する電力量も、2.2%削減できることを確認しました。今回のケースでは省エネ効果がわずかでしたが、脱炭素化を実現するためには、このように徹底した省エネ化を積み重ねるための技術も必要と考えています。

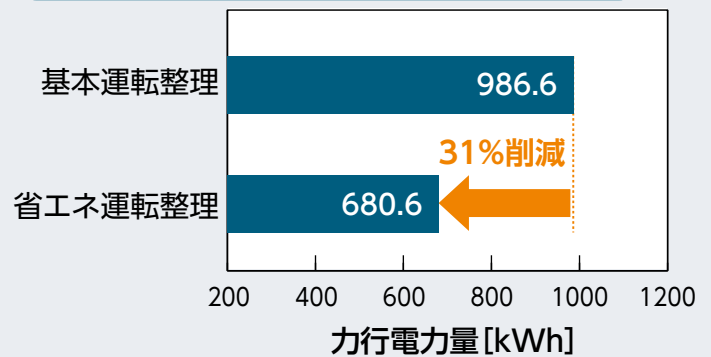
ここで紹介した力行電力量を削減する考え方を、計画ダイヤに適用して省エネ化する手法についても研究を進めています。昼間の時間帯の列車ダイヤを対象とすることで、社会全体に対する電気需要平準化（ピークカット）に寄与することができ、脱炭素化へ貢献できると考えています。

## おわりに

本記事では、脱炭素化に必要な要素技術の一つとして、省エネと利便性を両立しながら柔軟に列車ダイヤを工夫する手法の研究事例を紹介しました。今後は、計画ダイヤの力行電力量削減や、回生電力を有効活用するための研究にも取り組み、よりクリーンで利用しやすい列車運行の実現をめざします。

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ました。RRR

(a) 走行時分を分配した全列車を対象に集計



(b) 遅延解消までの1時間を対象に集計

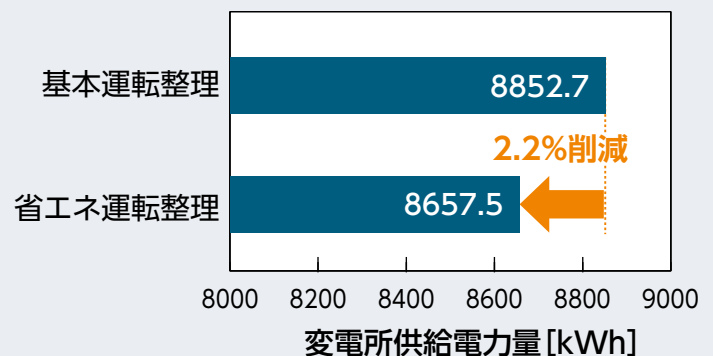


図11 力行電力量と変電所供給電力量の比較

## 文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁：DR（デマンド・レスポンス）、[https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/electricity\\_measures/dr/index.html](https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electricity_measures/dr/index.html)（入手日：2023年6月19日）
- 2) 小川知行，武内陽子，森本大観：列車運行電力シミュレーターで省エネ技術の導入効果を予測する，RRR，Vol.78，No.10，pp.20-23，2021
- 3) 高田真由，武内陽子，国崎愛子：省エネ性と利便性を両立させるための減便列車選択手法，電気学会研究会資料，TER-22-070/VT-22-015，2022
- 4) 国崎愛子，武内陽子，小久保達也，田中峻一，小川知行，生田珠之助，明石太輔：力行電力変化量に基づいた走行時分変更による省エネ運転整理ダイヤ作成，電気学会研究会資料，TER-21-031/MSS-21-024，2021