

電力ネットワークの 電力協調制御による低炭素化



重枝 秀紀
Hidenori Shigeeda

前 電力技術研究部長
(現 電力技術研究部 主管研究員)

はじめに

地球温暖化に伴う気候変動の影響を緩和するため、二酸化炭素(CO₂)を始めとする温室効果ガスの排出量を削減して吸収量と均衡させるカーボンニュートラル、いわゆる「脱炭素」に向けた取り組みが世界的に進められています。脱炭素実現において、我が国の主力電源を火力発電から、太陽光や風力などの再生可能エネルギー(再エネ)や原子力といった非化石エネルギーによる発電に転換するなどして、電源を脱炭素化することが柱の一つとなります。今後、各部門において脱炭素化された電源による電化が進められる中で、電力を大量に利用する鉄道には一層の消費電力量削減(省エネ)が求めら

れます。また、鉄道は全国に広大な電力ネットワークを有しており、これを電力会社のネットワークとも協調して活用することで、再エネ電力の導入拡大への貢献が期待されます。

ここでは、電力ネットワークにおける「省エネ」と「再エネ電力の活用」によるCO₂排出量削減(低炭素化)を目的とした大課題「電力ネットワークの電力協調制御による低炭素化」の取り組みと主な成果を紹介します。

課題設定の背景と目標

鉄道における脱炭素の方向性

2019年度における国内鉄道事業者のCO₂排出内訳¹⁾(図1)によると、電力の使用に伴うCO₂

図1 鉄道事業者のCO₂排出内訳(2019年度)
(文献1をもとに作成)

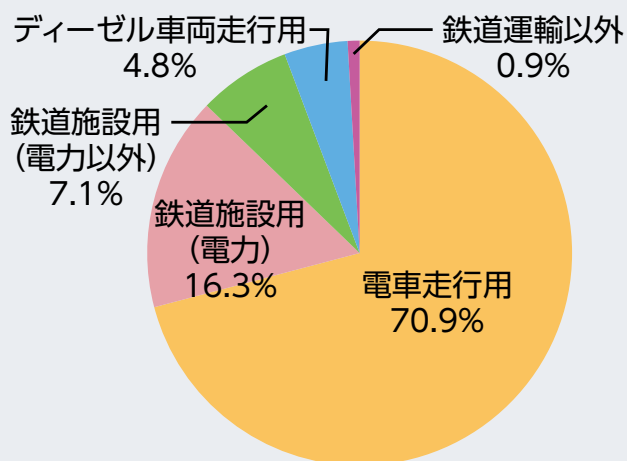
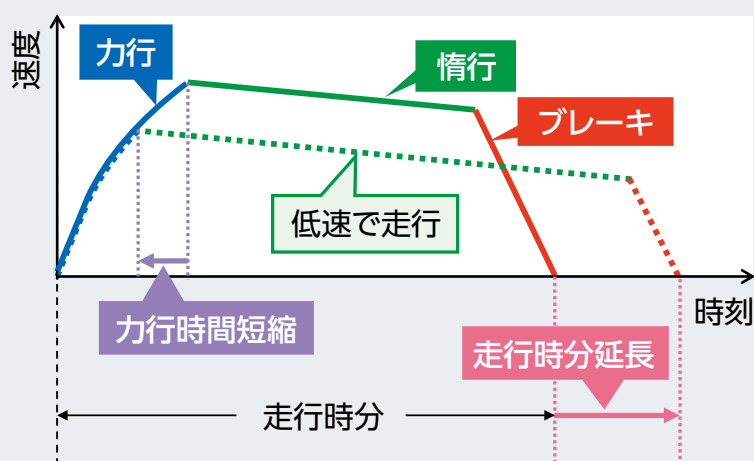
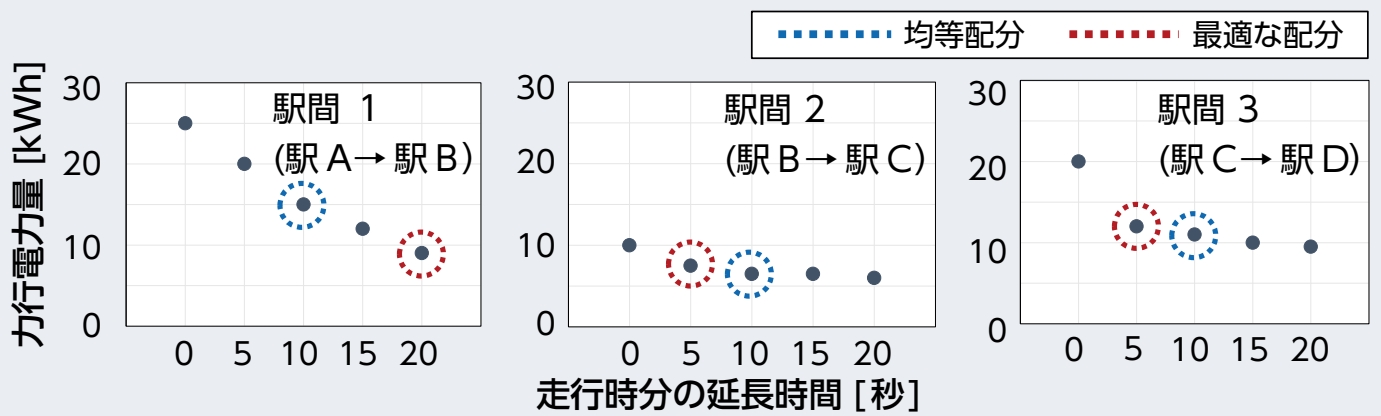


図2 運転速度と走行時分の関係





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
30秒	均等配分	+10秒	+10秒	+10秒	32.5kWh
	最適な配分	+20秒	+5秒	+5秒	28.5kWh

力行電力量を最小化

図3 走行時分の配分による力行電力量の変動（駅A～駅D間で30秒の走行時分を配分する例）

排出が約87%を占めています。これは、同年度に鉄道事業者が調達した電力の3/4程度が火力発電由来¹⁾であることが主な要因です。一方、国が示す2040年度の電源構成の見通し²⁾では、火力発電の割合が減少する一方、再エネなどの非化石電力が6～7割程度になると想定されており、電力の使用に伴うCO₂排出が主である鉄道では、大幅な低炭素化が期待されます。

ただし、再エネ電力には電力利用者による自家発電が含まれており、鉄道事業者自身による再エネ電力の調達が重要です。また、太陽光や風力など気象条件により変動する再エネ電力の大量導入に向けて、電力ネットワークにおいてその変動を調整可能とする必要があります。

本課題の目標

このような背景を踏まえ、2023年度に国土交通省が取りまとめた「鉄道分野のカーボンニュートラルが目指すべき姿」では、電車のエネルギー効率向上や気動車の電化・非化石化など鉄道事業そのものの脱炭素化(鉄道の脱炭素)に加えて、鉄道の送電設備や蓄電装置などの活用による再エネ電力の導入加速化など、鉄道アセットを活用した脱炭素化(鉄道による脱炭素)、環境優位性のある鉄道利用を通じた脱炭

素化(鉄道が支える脱炭素)に向けた取り組みを推進すべきであると提言されています。

本課題では、鉄道に求められる上記の取り組みに対し、鉄道の電力ネットワーク、とりわけ回生電力の活用余地が大きく、蓄電装置の導入効果が高い都市近郊の直流電化路線を対象として、

- 省エネを指向した列車ダイヤ作成手法の構築
- 再エネ電力の活用を可能とする鉄道用蓄電装置の制御手法の構築

などを目標とした研究開発を実施しました。

成果の概要

省エネを指向した列車ダイヤ作成手法

一般に、列車の最高運転速度を下げると列車の加速に要するエネルギー(力行電力量)が削減されて省エネになりますが、発駅から着駅までの走行時分が延びて旅客利便性に影響します(図2)。一方、最高運転速度を変更した際の力行電力量と走行時分の関係は、線路の勾配や線形などの条件によって駅間ごとに異なります。このため、各駅間の走行時分を適切に設定することで、始発駅から終着駅までの所要時間は変えずにトータルの力行電力量を削減できる可能性があります(図3)。また、列車が回生ブレーキ

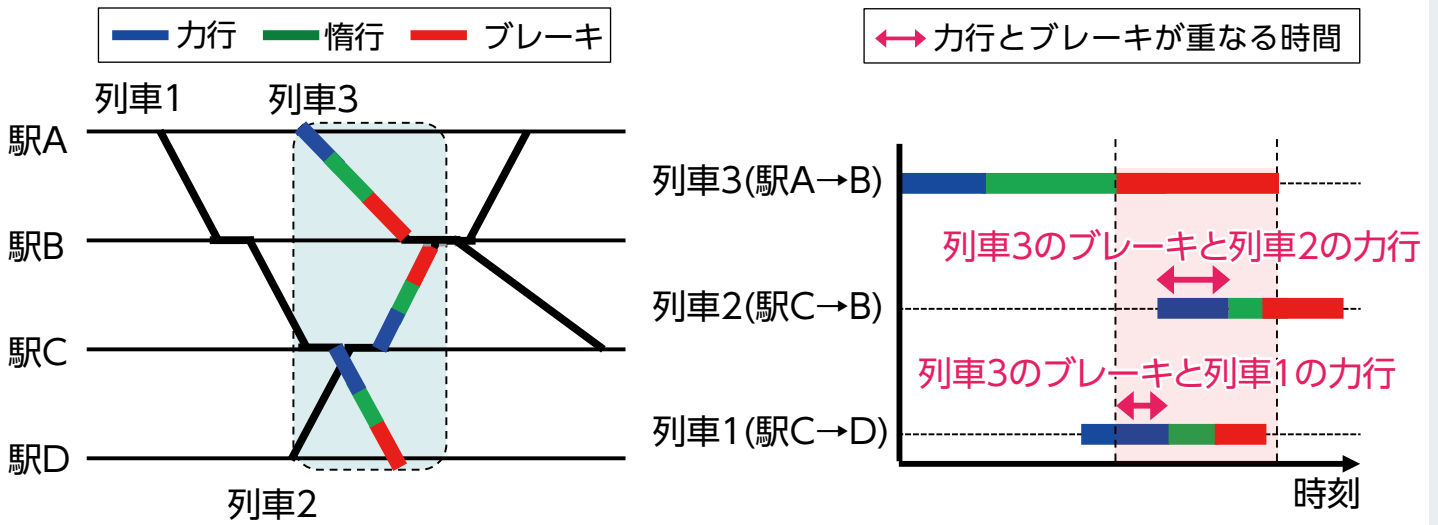


図4 列車ダイヤにおける力行とブレーキの重なり

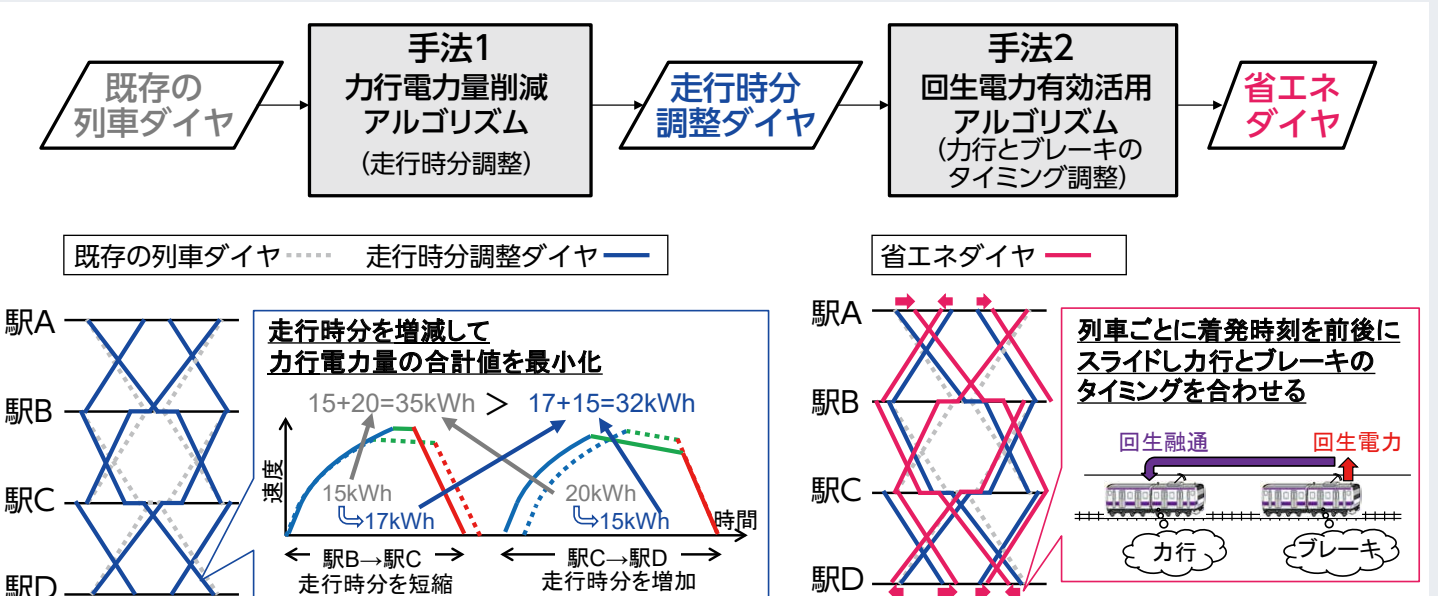


図5 省エネダイヤ作成手法の概要

を用いて減速する際の回生電力を力行中の他の列車に供給することでエネルギー効率が向上します。図4のように力行する列車と減速する列車が近くにいる場合に、力行とブレーキが重なる時間がより多くなるように着発時刻を調整すれば、回生電力のさらなる活用が期待されます。

これらを踏まえて、本課題で構築した省エネダイヤ作成手法の概要を図5に示します。まず、既存の列車ダイヤに対して、各駅間の走行

時分を増減して力行電力量の合計値を最小化した「走行時分調整ダイヤ」を作成します。つぎに、走行時分調整ダイヤに対して、列車ごとに着発時刻を前後にスライドすることで力行とブレーキのタイミングがなるべく合うように調整した「省エネダイヤ」を作成します。本手法では、列車本数や始発駅から終着駅までの所要時間が既存の列車ダイヤから変わらないため、旅客利便性への影響は軽微であると考えられます。

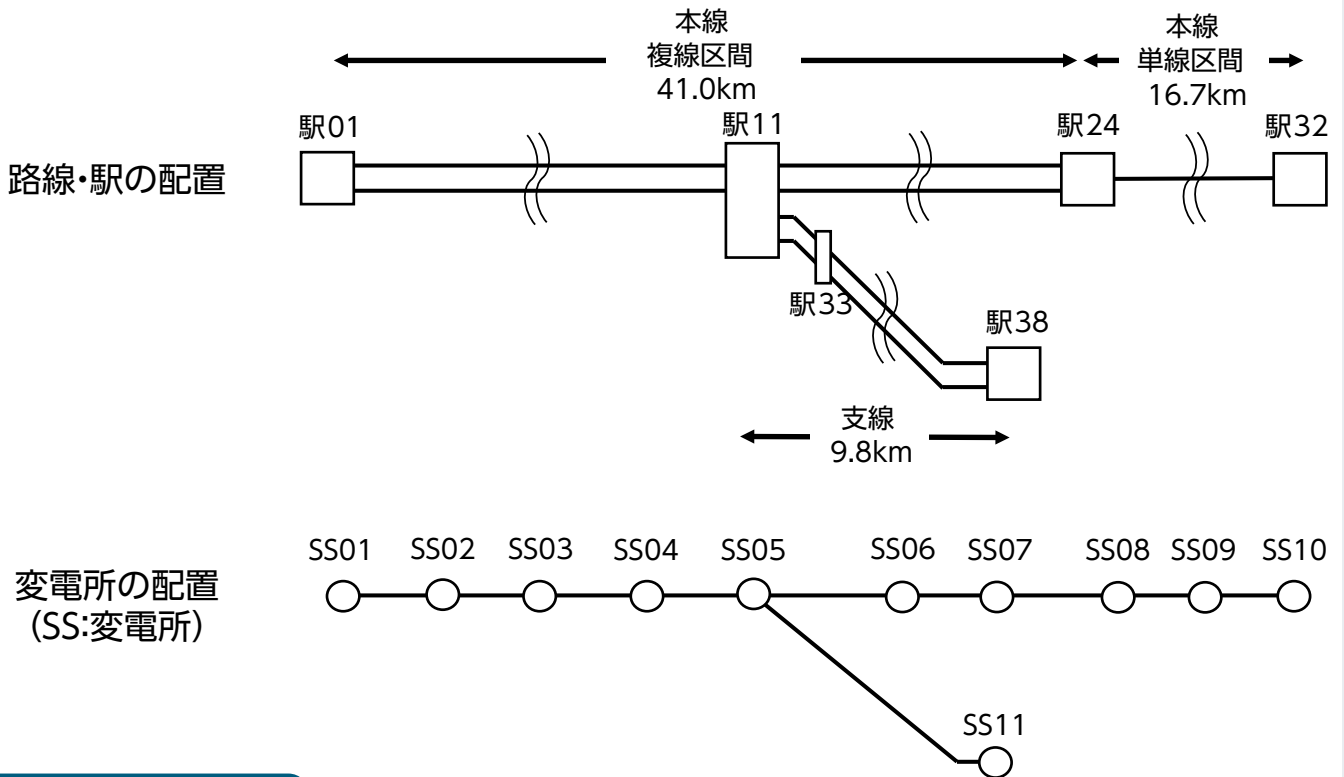


図6 モデル路線の概要

消費電力量内訳[%] (既存ダイヤの消費電力量を 100 とする)

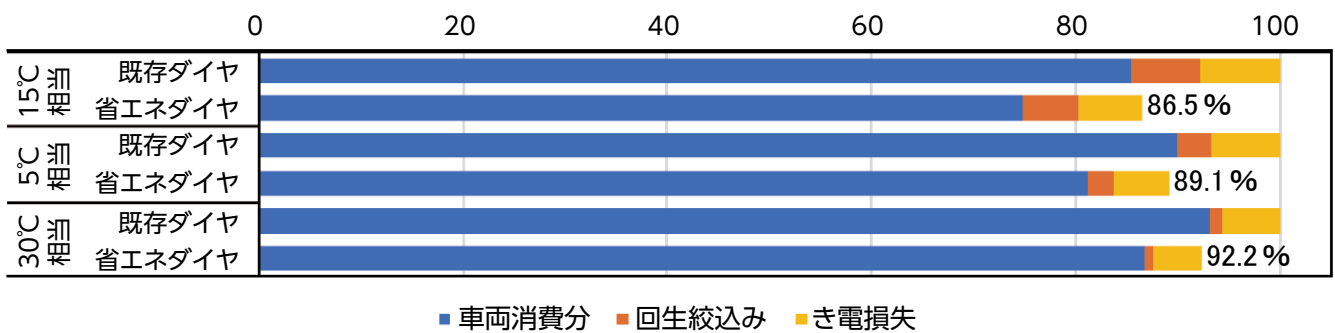


図7 省エネ効果の試算結果

1日の列車本数が400本を超える都市圏の路線 (図6) をモデルケースとして、[列車運行電力シミュレーター](#)¹⁸⁾を用いて省エネダイヤの効果を試算しました (図7)。気温5℃および30℃の条件では冷暖房による車両消費電力が増加し、活用できない回生電力 (回生絞込み) が減少するため、力行とブレーキの重なりを増やしたことによる回生電力活用の効果が低下しますが、省エネダイヤを適用することで終日の列車運行

において7.8～13.5%の省エネ効果が得られることを確認しました。

¹⁸⁾ 列車運行電力シミュレーター

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、消費電力量などを高精度に計算できるシミュレーターです。消費電力量の内訳を分析することで、省エネ施策の導入効果を定量的に評価できます。

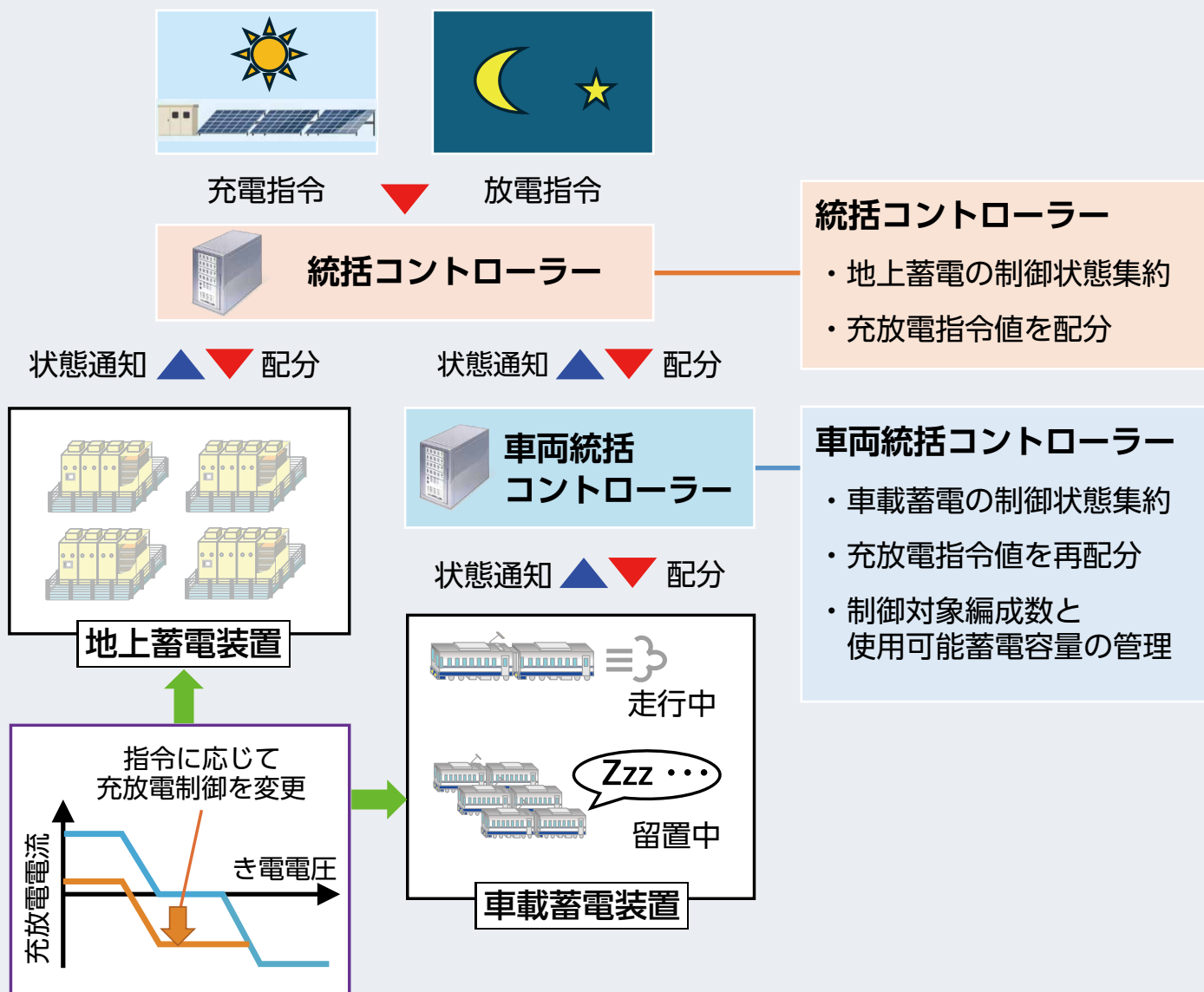


図8 蓄電装置の統括制御アルゴリズム

再エネ電力の活用を可能とする鉄道用蓄電装置の制御手法

鉄道で用いられる蓄電装置として、回生電力活用などの目的で変電所に設置される装置（地上蓄電装置）、自然災害や電力設備故障による停電時に列車を最寄りの駅などに自走させる目的で列車に搭載される装置（車載蓄電装置）などがあります。これらの鉄道用蓄電装置は単体では小規模ですが、統括して制御することで変動する再エネ電力の調整に活用できる可能性が

あります。そこで、本課題では①回生電力の活用と再エネ電力の活用を両立する蓄電装置の制御アルゴリズム³⁾、②鉄道用蓄電装置を統括し、各装置の充電状態に応じて充放電電力を配分して指令する制御アルゴリズム（図8）を構築しました。

図6と同じ路線をモデルとして、500kWhの蓄電装置を11箇所の変電所に設置、110kWhの車載蓄電装置を39編成に搭載したという前提で、列車運行電力シミュレーターを用いて日

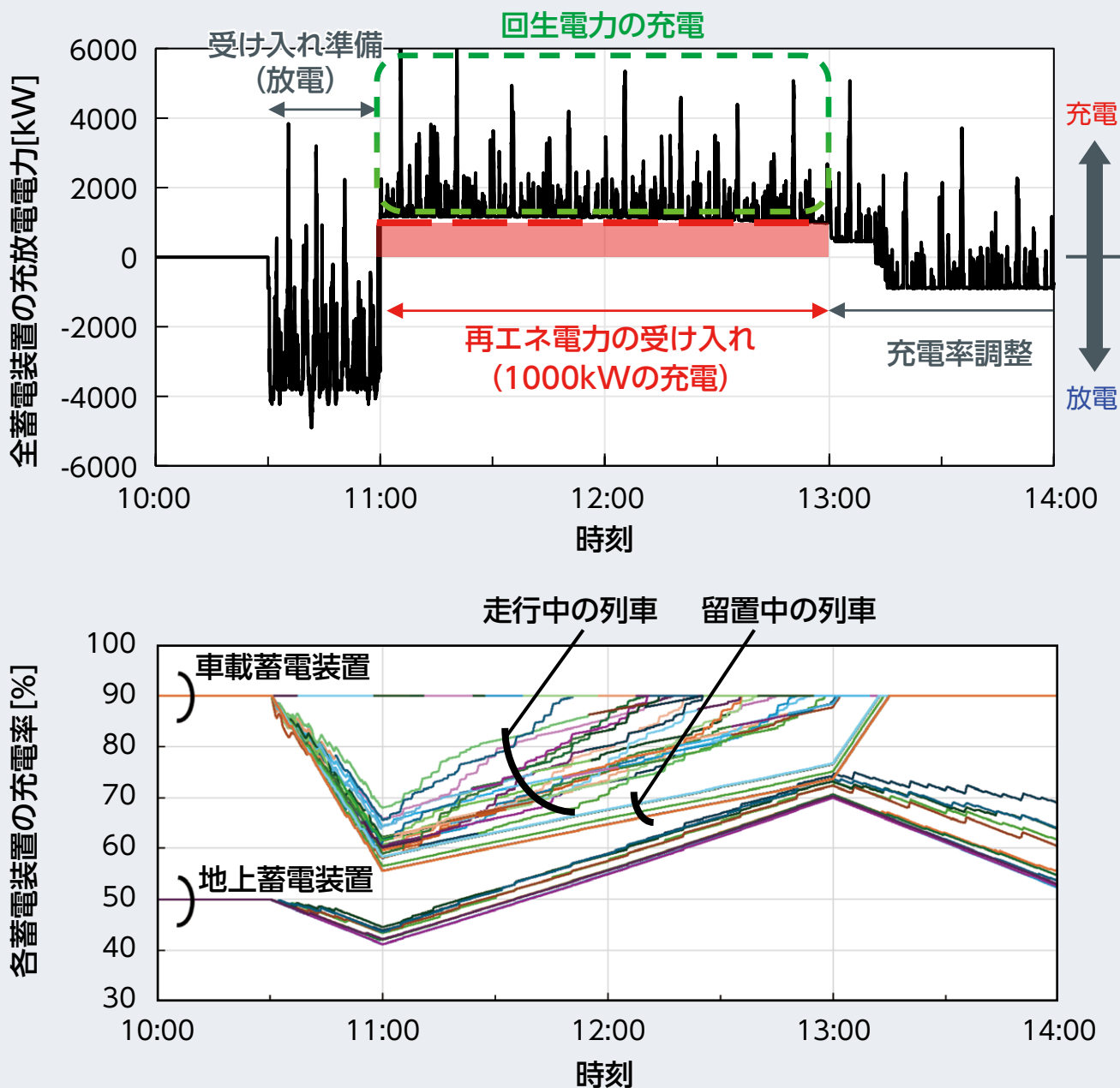


図9 統括制御アルゴリズムの検証例

中11時～13時の2時間に1000kWの再生電力を鉄道用蓄電装置で受け入れるケーススタディを行い、構築したアルゴリズムの有効性を検証した結果を図9に示します⁴⁾。地上蓄電装置のほか、走行中・車両基地に留置中の車載蓄電装置を全て活用し、回生電力を充電しつつ目標とする再生電力の充電を行うよう制御できることを確認しました。

また、図8に示す蓄電システムの実現性を検証するため、所内試験線において地上側のコン

トローラーから無線通信を介して蓄電池電車の充放電を制御する試験を実施し(図10, 図11)、地上側の指令値に基づいて蓄電池電車に再生電力を充電しつつ、必要に応じて走行する別車両の回生電力の充電も可能であることを実証しました。

なお、鉄道用蓄電装置を再生電力の活用にも用いる場合、本来の用途のみに用いる場合と比べて蓄電池の寿命が短くなる可能性があります。本課題では、蓄電池を再生電力活用に供

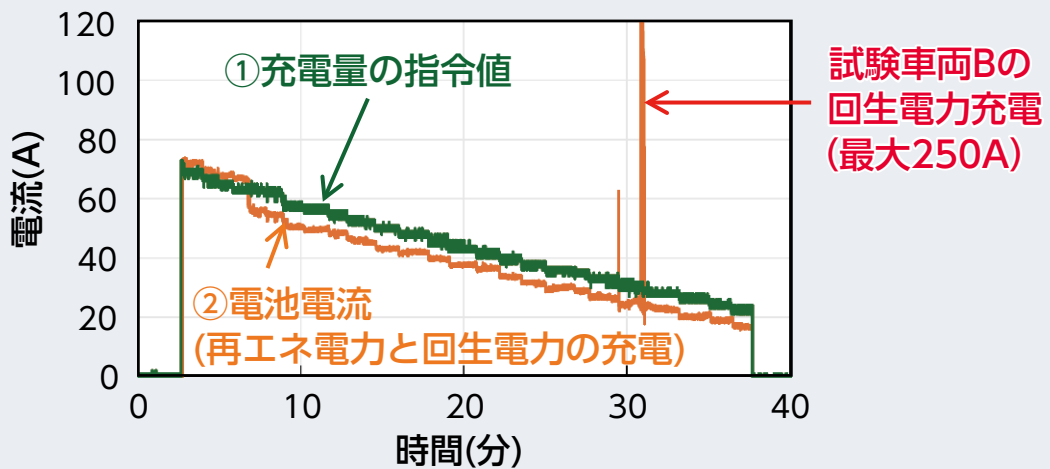
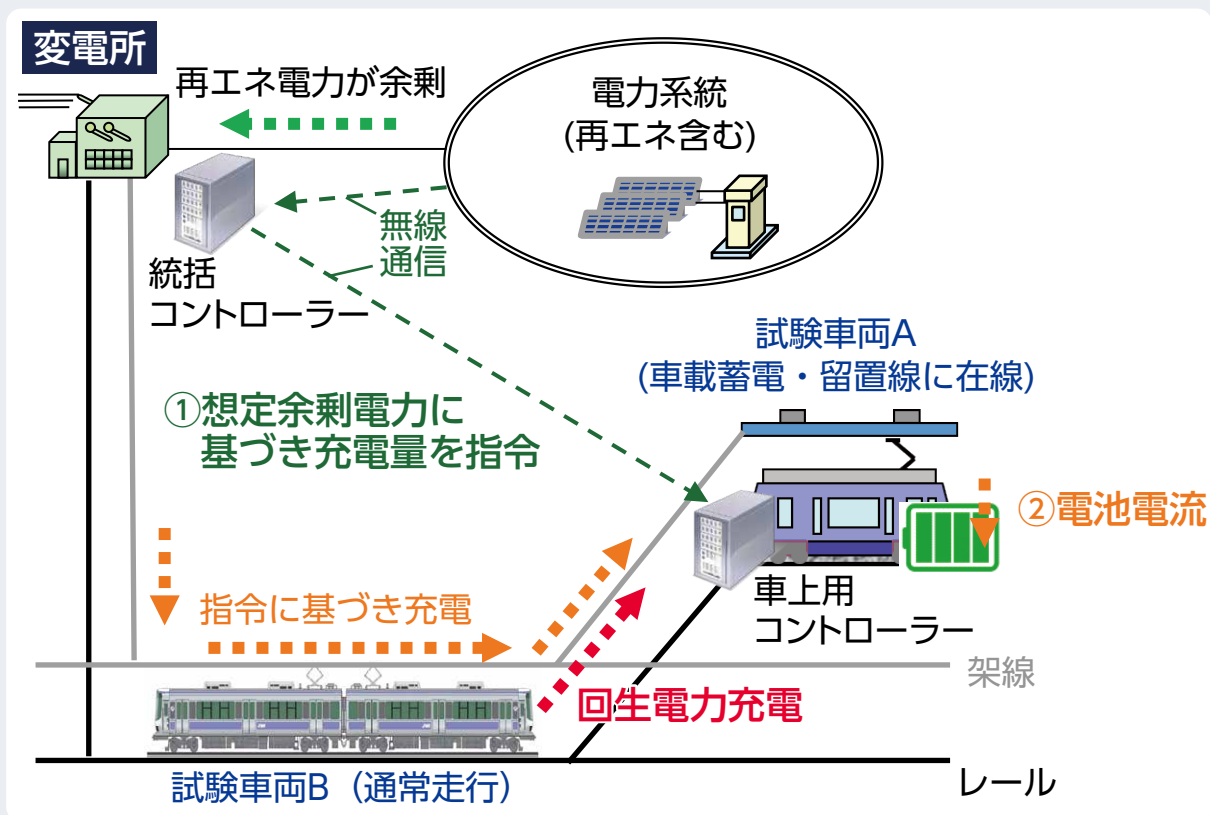


図10 所内試験線における実証試験

した場合は寿命予測に基づく費用対効果の評価手法も提案しています⁵⁾。

今後の展開

ここで紹介した成果のうち、省エネダイヤは同じ区間でも列車によって運転方法が変わる場合があるなど、乗務員の負担増加が課題となりますが、今後、自動運転技術の普及に伴い解決可能と考えられます。本課題では都市近郊の直流電化路線を対象としましたが、引き続き停車

駅間が長い優等列車の省エネ運転手法の研究にも取り組めます。

鉄道用蓄電装置の統括制御は、蓄電池の低価格化や地上設備～列車間的高速無線通信の普及などを前提としており、導入は少し先になると想定していますが、再エネ電力の活用によって「鉄道の脱炭素」だけでなく「鉄道による脱炭素」にも寄与するとともに、活用の場面が停電時などに限られる蓄電装置の価値を向上させるという面でも有益な技術と考えています。

一方、鉄道のみ電回路を再エネ電力の送電に活用することへの期待もありますが、列車運行と再エネ電力の送電を両立させるために検討すべき多くの課題があり、両立を可能にする送電方法の研究に取り組む予定です。

おわりに

脱炭素実現に向けて、従来の省エネによる低炭素化の取り組みに加え、今後は再エネ電力のさらなる活用に向けた取り組みも必要になると想定されます。鉄道総研では、本課題で構築した各手法やシミュレーション技術を通して、鉄道事業者における様々な取り組みの導入・普及に貢献したいと考えています。また、基本計画RESEARCH 2030における取り組みを中心に、蓄電池や水素の活用などによる非電化路線の電化・非化石化に向けた研究開発も継続して進めてまいります。

なお、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



図11 実証試験の様子

文献

- 1) 国土交通省：鉄道分野におけるカーボンニュートラル加速化検討会 第1回検討会資料, <https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001474317.pdf> (入手日：2022年4月15日)
- 2) 資源エネルギー庁：第7次エネルギー基本計画（令和7年2月）2040年度におけるエネルギー需給の見通し, https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_03.pdf (入手日：2025年2月21日)
- 3) 小西武史：鉄道用蓄電装置で再エネを活用する, RRR, Vol.80, No.4, pp.14-19, 2023
- 4) 小西武史, 緒方隆充, 生出珠之助, 齋藤達仁：再生可能エネルギー活用を指向した鉄道用蓄電装置の充放電制御手法, 鉄道総研報告, Vol.38, No.9, pp.9-15, 2024
- 5) 渡邊有人, 田口義晃, 小西武史：鉄道車両用蓄電池のさらなる有効活用方法を考える, RRR, Vol.80, No.4, pp.20-25, 2023