

特集：電力技術

持続可能な社会に貢献する電力システムの研究開発

重枝 秀紀*

Research and Development on Power Supply Systems for Sustainable Society

Hidenori SHIGEEDA

Carbon neutrality is a necessary goal as a countermeasure against climate change. Therefore, it has become more important to promote further energy saving and the use of energy storage systems in the railway systems. On the other hand, the reduction in passenger traffic due to COVID-19 has a significant impact on railway management, so that reducing the maintenance costs of the infrastructure is one of urgent issues. This paper presents some of the research and development on power supply systems, especially for decarbonizing the railways and reducing maintenance resources of the overhead contact line systems.

キーワード：電力設備、電車線設備、持続可能性、脱炭素、省エネルギー、省メンテナンス

1. はじめに

2015年9月の国連サミットにおいて、2030年までに持続可能でよりよい世界を目指す国際目標として採択された「持続可能な開発目標」(SDGs: Sustainable Development Goals)には、「エネルギーをみんなにそしてクリーンに」「気候変動に具体的な対策を」等の電力・エネルギーに関する目標も掲げられている。気候変動対策として、我が国では従来の目標を上方修正する形で2050年までに二酸化炭素(CO₂)等の温室効果ガス排出量を実質ゼロとする、いわゆる脱炭素化の方針が2020年10月の首相所信表明演説において表明された。鉄道事業者においても、ESG(Environment, Social, Governance)を経営方針に掲げて脱炭素に積極的に取り組む流れが加速している。

地球環境への負荷低減に向け、鉄道総研では2020年度から2024年度までの現基本計画RESEARCH 2025～鉄道の未来を創る研究開発～の中で、おおむね数十年先の実用化を念頭に置くテーマ「鉄道の将来に向けた研究開発」(以下、将来指向課題)の一環として研究課題「電力ネットワークの電力協調制御による低炭素化」を設定し、取り組んでいる。本課題は、国内の列車運行に要するエネルギー消費量の約96%を占める電力を対象とし、従来から取り組んでいる「鉄道で消費するエネルギーの削減」に加えて、鉄道外部システムの再生可能エネルギーを積極的に活用することで低炭素化を図る。このため、鉄道用の蓄電システムと外部電力とを協調制御する手法の構築に新たに取り組むことを大きな特徴としている(図1)。

一方、国内における鉄道経営環境の面では少子高齢化に伴う人口減少と、それによる旅客輸送の減少やインフ



図1 「電力ネットワークの電力協調制御による低炭素化」の主な取り組み

ラの維持管理に要する労働力の確保が課題になると予測されていたが、昨年度から続く新型コロナウイルス禍によって旅客輸送の減少に前倒しで直面することとなり、その影響は長引くとの観測もある。このため、電力設備を含むインフラの維持管理において延命化や省メンテナンス化、検査の自動化による省力化等、リソースの削減と選択的配分を可能とすることで「インフラの持続可能性」を高める研究開発成果が早急に求められている。

鉄道総研では、現基本計画の中で将来指向課題「デジタルメンテナンスによる省力化」を設定し、設備状態データの統合分析プラットフォームと自動診断技術の構築に向けた取り組みを進めるとともに、2019年度までの前基本計画における成果の実用化を促進し、上述のニーズに対して実効性のある成果を提供していく。

本稿では、こうした研究開発の中から脱炭素化に関する研究開発と電車線設備の保守省力化に関する研究開発について紹介する。

* 電力技術研究部長

2. 脱炭素化に関する研究開発

2.1 脱炭素化に必要な取り組み

脱炭素社会実現に向けた大まかな取り組みとして、エネルギー供給側では再生可能エネルギーを始めとする非化石エネルギーの比率を高め、エネルギー消費に伴うCO₂排出原単位を低減させるとともに、排出が避けられないCO₂の分離・回収・貯留等の技術を確認することが挙げられる。

需要側では、省エネルギー技術の導入によりエネルギー消費を抑制するとともに、化石燃料を利用するものについては電化もしくは水素利用等による非化石化への転換を推進することが主な取り組みとして挙げられる。また、供給側で太陽光や風力等の変動性エネルギーの比率を高めるためには電力系統のレジリエンスを強化する必要があり、需要側においても負荷の平準化やエネルギーの貯蔵など、柔軟な調整能力を具備することが求められる。

大部分の鉄道事業者は需要側であり、特に電化率が高い事業者の脱炭素化は供給側の取り組みに負うところが大きいが、需要側においても省エネルギー化を中心に合理的に導入可能な取り組みを着実に進める必要がある。

2.2 省エネルギーに関する研究開発

列車運行の省エネルギーに資する研究開発として、電力設備に関してはこれまでに、電力変換技術を応用した直流高電圧き電方式の開発¹⁾や、蓄電技術や超電導技術の応用による電力利用の効率化などに取り組むとともに、これら技術の導入効果を定量的に評価可能な列車運行電力シミュレータを開発した²⁾。

現在取り組んでいる「電力ネットワークの電力協調制御による低炭素化」においては、ICTの導入によって地上・列車間および列車同士の高速度通信が可能になることを前提に、回生エネルギーの利用率を考慮して最も省エネルギーになると期待される個々の列車の運転曲線を、運転状況に応じてリアルタイムに生成するアルゴリズムの確立を目指している。一例として、列車遅延が発生して列車間隔調整のための延発や抑止、信号による駅間での減速などが発生し、計画ダイヤと比べ列車の運行時分が増加するケースを対象として、延発や抑止による停車時分の増加分を可能な範囲で削減し、その時間を駅間走

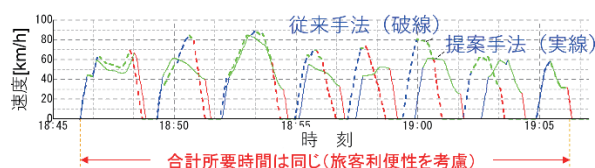


図2 遅延発生時における省エネ運転曲線の例³⁾

行時分に割り振ることで駅間の最高速度低減を図った省エネ運転曲線を示す(図2)。遅延に伴う運転整理を実施した時間帯を含む1時間の変電所消費電力量を列車運行電力シミュレータにより試算したところ、提案手法によって1~2%程度削減できる見込みを示した³⁾。

このほか、計画ダイヤ作成において駅間の運行時分見直しを許容することを前提に、回生エネルギーの利用率を考慮して最も省エネルギーになると期待されるダイヤの作成手法の提案を目指す。ただし、運行時分の見直しによって乗客の利便性に影響が生じると考えられるため、利便性を定量的に評価しつつ、省エネルギー性と利便性との両立を図る。

これらの成果を活用することで、従来のダイヤと運転手法に基づく列車運行エネルギーに対して数%のエネルギー削減を見込む。

2.3 蓄電装置の活用に関する研究開発

経済産業省が取りまとめている第6次エネルギー基本計画案では、2030年の電源構成に関する野心的な見通しとして再生可能エネルギーの比率を36~38%程度に引き上げることなどが示されている。再生可能エネルギーのうち、太陽光は15%程度、風力は6%程度とされ、これら変動性エネルギーに対する系統調整能力の確保はますます重要になると考えられる。

国内の鉄道では、主に回生エネルギーの有効利用による省エネルギー用途、あるいは停電時における非常走行用途を中心に地上設置型・車載型の蓄電装置導入が進められている。また、気動車の電動化に向けて蓄電池車両の導入も行われている。鉄道負荷のピークシフト等を目的とした大容量蓄電装置の導入事例もある⁴⁾。

「電力ネットワークの電力協調制御による低炭素化」では、鉄道が有する蓄電装置を対象に、非常走行用途の装置を省エネルギー用途にも用いる、あるいは省エネルギー用途の装置を調整用としても用いることを目的としたシステム構成と制御手法を構築するとともに、その適用効果や本来用途としての設備寿命に及ぼす影響を定量的に評価する手法の確立を目指している。一例として、図3のように変電所に設置した大規模蓄電装置を回生電力の充電に用いる場合と、鉄道の交流系統に接続された再生可能エネルギーの充電にも用いる場合の試算例を図4に示す⁵⁾。回生電力のみを充電する従来制御では、蓄電装置を設置した変電所における電力会社からの購入電力量が、蓄電装置なしの場合と比較して3.6MWh削減されるが、鉄道側で消費しきれない再生可能エネルギーは全て電力会社系統に逆潮流する。これに対し、提案制御では逆潮流していた再生可能エネルギーも充電して活用することで、購入電力量が更に1.4MWh削減されている。

これらの成果を適用することで、既存の蓄電装置に対し1台あたり2~5倍程度のCO₂削減効果向上を見込む。

3. 電車線設備の保守省力化に関する研究開発

3.1 延命化・保全周期延伸に関する研究開発

電車線設備は一重系であり、高い信頼性が求められることから断線等の障害防止が重要であり、定期的に巡視・検測を行うとともに、設備の異常や劣化・摩耗の進行を認めた場合は適切な修繕・交換等を行う必要がある。設備の延命化や保全周期の延伸を目指すうえで、トロリ線やパンタグラフのすり板等の集電材料の摩耗低減が課題であり、摩耗要因毎のメカニズム解明と摩耗低減策の提案に向けた基礎研究に取り組んでいる。

これまで、通電接点の発熱による摩耗現象を解明するため、通電しながら接触力一定のしゅう動試験が可能な直動式の摩耗試験機による摩耗試験と通電接点の温度解析を実施し、集電系材料の通電摩耗形態マップを作成した(図5)⁶⁾。図において縦軸はトロリ線とすり板間の接触電圧、横軸の接触境界係数はトロリ線とすり板の表面被膜抵抗を含む電気抵抗の比であり、通電接点の発熱による摩耗形態が、接点条件によって明確に異なることを示している。これらの摩耗形態の違いは、トロリ線とすり板の融点や電気抵抗率の違いから生じるものである。

さらに、しゅう動する際の摩擦熱による摩耗現象を解

明する目的で、しゅう動速度を上げるとともに接点温度を測定可能な回転摩耗試験機を製作した。この試験機による摩耗試験の結果から、接点温度に応じて機械的摩耗形態を4種類に分類し(図6)、各摩耗形態の遷移条件を明らかにした⁷⁾。引き続き、すり板部材の内部温度、トロリ線のジグザグ偏位、列車風の影響など実フィールドの条件を考慮して摩耗メカニズムの解明に取り組む。

このほか、沿岸線区の電車線設備を中心に行われている絶縁強化やがいし清掃等の塩害対策の軽減に資する研究開発として、気象や地形に関する公開データを用いたがいし汚損度推定アルゴリズムを構築した(図7)⁸⁾。本手法により、従来海岸からの距離に基づき一律に設定していた汚損区分の細分化が可能となり、地域の実態に即した保全の見直しにつながるものと期待される。

3.2 検査の自動化に関する研究開発

保守省力化を目的とした電車線検測の自動化に関する研究開発について、鉄道総研ではこれまでに開発した電車線非接触測定装置⁹⁾で取得した画像データを用いた電車線金具の異常検出に取り組んでおり、その一環として線条位置情報を用いた画像正規化手法を提案した¹⁰⁾。本手法では、画像データから抽出されたハンガ等の任意サイズの画像を機械学習に適した一定サイズに変形する際に、異常が発生しやすい線条との接続部近傍における画像の情報量が保たれるように変形を行う(図8)。敵対

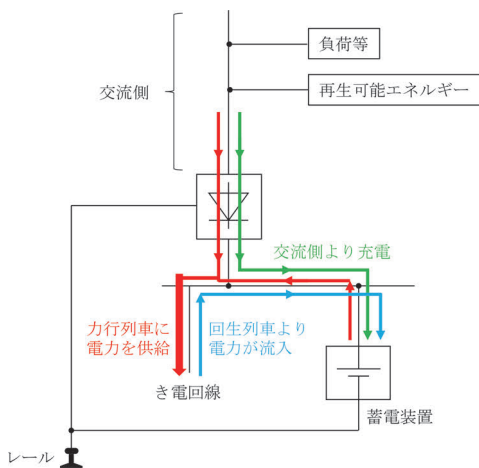


図3 蓄電装置の充放電イメージ⁵⁾

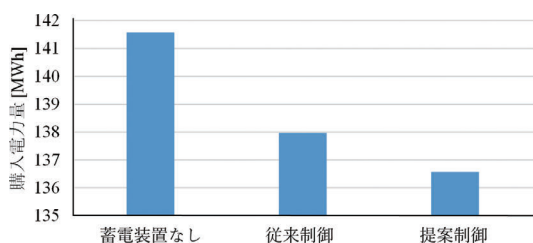


図4 購入電力量の試算例⁵⁾

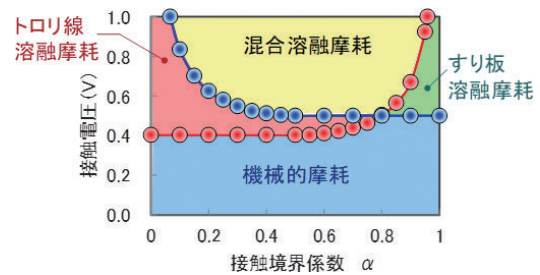


図5 通電摩耗形態マップ⁶⁾

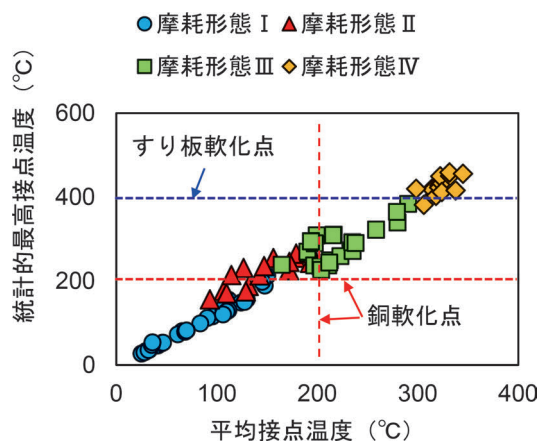


図6 接点温度に応じた機械的摩耗形態⁷⁾

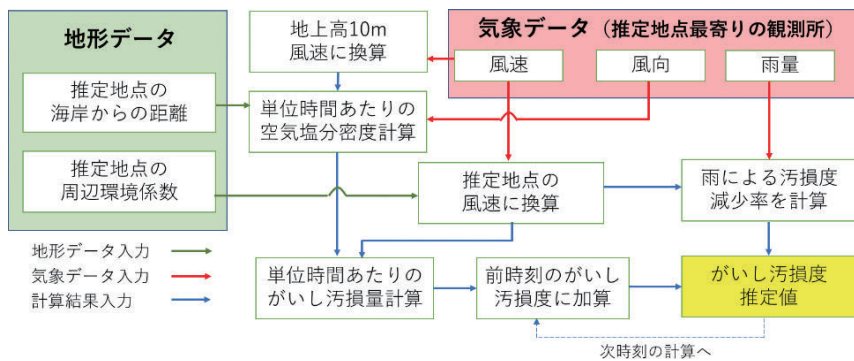


図7 がいし汚損度推定手法の計算アルゴリズム⁸⁾

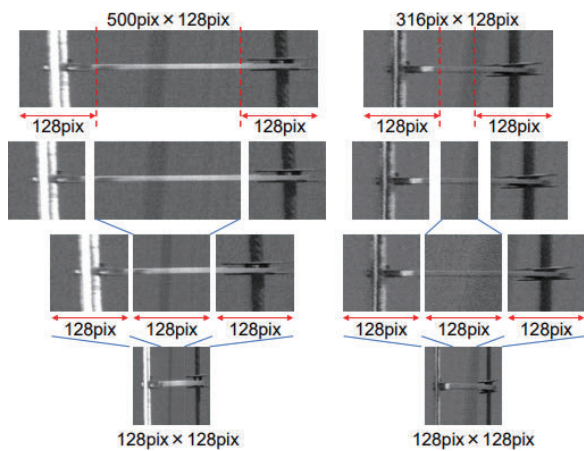


図8 電車線金具画像正規化の手順¹⁰⁾

的生成ネットワークによる教師なし機械学習において、本手法で正規化した画像データを学習させることにより異常検出精度を向上できる見通しを得た。

鉄道事業者では、電車線設備の点検や画像データ収集に無人航空機（ドローン）を用いる研究開発が行われている。しかしながら、電車線等から生じる磁界がドローンの飛行制御に影響を及ぼす場合があり、特に直流電車線路ではビームや鋼管柱等の金属構造物が着磁することで残留磁界が生じ、夜間停電時の飛行にも影響する可能性が考えられた。このため、鉄道総研では直流磁界がドローンの飛行制御に及ぼす影響の調査を行い、金属構造物の着磁による残留磁界のシミュレーションに基づく飛行可能エリアの考え方を提案した¹¹⁾。

4. おわりに

本稿では、「持続可能な地球環境」の観点から脱炭素化に関する研究開発を、また「持続可能な鉄道電力設備」の観点から電車線設備の保守省力化に関する研究開発を紹介した。鉄道総研では、今回紹介したものの以外にもこれら課題を解決するための様々な研究開発を行っている。鉄道の持続的発展に向けて、今後も独創的・革新的

な研究開発に取り組む所存であり、引き続き鉄道事業者をはじめとする関係各位のご指導・ご協力をお願いする次第である。

なお、省エネ運転曲線に関する研究の一部は、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) 吉井剣, 生出珠之助: 直流高電圧き電用電力変換器における再生電力有効活用のための制御方法, 鉄道総研報告, Vol.35, No.12, pp.5-10, 2021
- 2) 武内陽子ほか: 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, 5-S8-9, 2017
- 3) 国崎愛子ほか: 力行電力量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, 電気学会交通・電気鉄道/マイクロマシン・センサシステム合同研究会, TER-21-031/MSS-21-024, 2021
- 4) 中井貴哉, 桂木浩光, 杉浦治: 近鉄東花園変電所蓄電システム導入の成果検証について, 第33回鉄道電気テクニカルフォーラム講演集資料, pp.97-100, 2020
- 5) 生出珠之助, 小西武史: 直流き電回路に接続した大規模蓄電装置による余剰再エネ出力吸収, 2021年電気学会産業応用部門大会, 5-27, 2021
- 6) 山下主税: 通電下における集電材料の摩耗メカニズム, 鉄道総研報告, Vol.31, No.2, pp.35-40, 2017
- 7) 山下主税, 根本公紀: 摩擦熱に起因するトロリ線とすり板の機械的摩耗形態の分類, 鉄道総研報告, Vol.35, No.12, pp.11-16, 2021
- 8) 白木理倫, 柴田直樹: 公開データによる気象情報や地形情報を用いたがいし汚損度推定手法, 鉄道総研報告, Vol.35, No.12, pp.29-34, 2021
- 9) 松村周ほか: 電車線非接触測定装置の在来線車載試験による性能検証, 鉄道総研報告, Vol.34, No.9, pp.11-16, 2020
- 10) 松村周, 根津一嘉: 線条位置情報を活用した電車線金具異常検出用画像正規化手法の検討, 令和3年電気学会全国大会, 5-191, 2021
- 11) 森田岳, 樋口靖展, 笹川卓: 直流電車線路の点検を想定した無人航空機飛行可能エリアの提案, 鉄道総研報告, Vol.35, No.12, pp.17-22, 2021