

## 論文の内容の要旨

論文題目 電気鉄道の自動列車運転制御による省エネルギー運転理論の実証研究  
(Theoretical and Experimental Research on Energy-Saving Automatic Train  
Operation for Electric Railway)

氏名 渡邊 翔一郎

本論文は世界的に需要が高まっている電気鉄道の環境性能を向上させることを目的に、運転理論に基づく鉄道車両の自動列車運転装置を活用した列車運転制御法を論じるものである。

鉄道は高い陸上交通輸送能力を有し、また環境親和性に優れている。いま環境問題が世界的に懸念される中、鉄道は持続可能な地球社会実現に向けて期待される交通システムのひとつである。特に電気鉄道は駆動効率が高く、電力消費の場面でCO<sub>2</sub>や有害ガスなどの排出がないため、都市人口率が増加傾向にある海外諸国で新規建設が進められている。電気駆動系交通システムは我が国においても普及が進んでおり、近年では労働人口減少にも対応できる自動運転が積極的に研究開発されている。鉄道車両の自動運転は自動列車運転装置(ATO)として既に導入実績があり、自動列車運転装置は手動運転に比べて高い応答速度で精確に運転でき、その運転制御パターンを再現性良く実現可能である。そのため理論検討に基づく制御パターンを簡潔に実装することができ、さらに従来の手動運転では困難とされていた省エネルギー運転制御法も実現可能となった。これらの背景から、電気鉄道の高度な運転制御法を活かした省エネルギー化の研究は重要な役割と期待を担っている。

列車の運転制御法を改良するときには、鉄道事業者の定める運行計画が最も厳しい制約となる。そのため基準時間内に次駅に到着することを前提に運転制御法を工夫するには駅間走行時分を適切に活用する必要があった。そこで本研究では駅間走行時分を安全に確保するためにジャーク制御時間を短縮する手法を考案し、提案する運転制御法に割り当てる時分を得た。これにより電気機器の効率を意識したノッチ選択と惰行運転の積極的導入および機械ブレーキをできるだけ立ち上げないためのブレーキ制御法を考慮した自動列車運転装置の設計ができるようになった。さらに自動列車運転装置の性能を活用すれば秒オーダーの精緻な駅間走行時分の調整ができるようになることから、始発駅か

ら終着駅までの各駅間に割り当てられている駅間走行時分を理論計算に基づいて最適に配分し省エネルギーな運行計画を導出した。

列車の消費電力量は駅間走行時分の影響を強く受ける。そのため提案法の省エネルギー効果を適切に評価するためには、理論検討で導出した所望の駅間走行時分と実測の駅間走行時分を合致させなければならない。本研究では駅間走行時分調整法を考案し、現場の限られた試験時間内で迅速に自動列車運転装置の制御パターンを調整できるように補正データベースを構築し、さらに実験の結果が数秒ずれていても後から数値計算で電力量を補正できるようにした。

本研究では提案する運転制御法において空転・滑走問題も含む安全性に関わる実務制約を考慮している。理論検討を含めてそれらの有用性を実験で評価するために、試験フィールドとして自動列車運転機能を備えているリニア地下鉄を選定した。地下鉄は天候をはじめとする外乱が少ないため平等な条件下で比較評価することができ、問題点を簡潔明瞭に整理することができる。また自動列車運転装置は再現性良く列車を運転制御できるため、提案法の効果を初段階で評価するのに適している。リニアモータ駆動鉄道は一般的な回転モータ駆動鉄道と異なり車輪と軌道の粘着に依存せず推力および制動力を得ることができる。そのため空転・滑走の問題がなく、平均加速度の制限を適切に緩和するジャーク制御を正確に実装して評価することができる。

提案法をリニア地下鉄で評価するためにはリニアモータ駆動鉄道の計算モデルを構築する必要がある。しかしリニアモータ駆動鉄道は先行研究の例が少なく、回転モータ駆動鉄道と異なる電動機特性や磁気吸引力に起因する走行抵抗特性を有するため、従来の運転理論の単純な適用では精度の良い計算モデルを構築することが難しいという問題があった。そこで本研究では車両の電気機器駆動効率の速度依存性を実験的に把握するために予備試験を行い、リニアモータ駆動システムの数値と推力を変数に持つ効率特性を取得した。これにより列車の消費電力量に強く影響する車両の電気機器効率特性を導出し、リニアモータ駆動鉄道の運転曲線と消費電力量の計算法を確立した。さらに、これらの特徴を考慮して消費電力量を最小化する最適運転曲線を動的計画法により導出した。

提案法を自動列車運転装置に実装し、省エネルギー効果の実証試験を行った。事業者の定める運転計画はそのままに、従来の列車制御による消費電力量と比較すると、提案法により16.2%の省エネルギー効果が得られた。そして先行研究で実証例のない駅間走行時分の配分最適化の実証試験では理論予測とほぼ同等の効果を示し、先の提案法の有用性を実証するとともに、本研究の提案法の総合的な成果として17.2%まで省エネルギー効果を高めることができた。これらの実証試験で、自動列車運転装置の制御パターンの実装調整作業とその成功実績を通じて、駅間走行時分調整法の有用性が明らかになった。

本研究の重要な成果は10%を超える省エネルギー効果だけでなく、提案する列車運転

制御法がソフトウェアの改良のみで実現できたことである。すなわち、車両機器はそのままに制御パターンのみを改良するため改装費用を抑えることができる。そして制御器設計に実務的制約を適切に考慮することで、列車走行の安全性を脅かすことなく走行できる。これらの成果と経験を用いれば、省エネルギー自動運転システムの早期実用化が可能となる。

本研究で活用した自動列車運転装置の制御技術は、今後の我が国の鉄道車両への普及拡大が期待される技術である。さらに鉄道に関する技術的経験の蓄積が少ない海外諸国にとっても、自動列車運転技術は鉄道の運行を容易にし、新規導入の手助けとなる。すなわち、本研究の提案法を適用すれば小さな実装コストで省エネルギー化を図り、運行コストを本質的に小さくできるため、内外の鉄道システムの省エネルギー技術の展開にも貢献できる。さらに本研究の成果は、リニアモータ駆動鉄道のみならず電気鉄道一般、新交通システム、電気自動車などの電気駆動系交通システムに広く応用可能である。