

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：32657

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14148

研究課題名（和文）力学解析と電力潮流解析の連成による交流電気鉄道の省エネルギー最適走行パターン創成

研究課題名（英文）Calculation of Optimized Energy-Saving Speed Profile Based on Coupled Analysis of Dynamics and Power Flow in AC-Electric Railway

研究代表者

渡邊 翔一郎（Watanabe, Shoichiro）

東京電機大学・工学部・准教授

研究者番号：40807294

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、交流電気鉄道における「省エネルギー走行パターン」を明らかにすることである。

研究を進めるために、列車の走行パターンと消費エネルギーの関係を分析するための数値実験モデルを作成して計算を行った。その結果、近年よく知られている直流電気鉄道での省エネルギー走行の一般論を、必ずしも交流電気鉄道には適用できないことが明らかになった。この計算モデルでは、電圧不平衡を評価できるように工夫している。

また、計算モデルの妥当性を確認するために、交流電気鉄道の走行パターンと消費エネルギーの関係についてフィールド調査も実施することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気鉄道の省エネルギー化においては、これまで車両の電気機器効率を高める研究や、回生エネルギーを有効に活用する蓄電装置の研究が行われてきた。本研究では、このような電気設備を利用せずに、列車の走行パターンを工夫することで、少コストで大きな省エネルギー効果を得ることができる。特に、交流電気鉄道において走行パターンを工夫して省エネルギー化を試みる研究は国内外で認知されているものの、必ずしも十分な解析結果が得られていないため、本研究の解析手法を含めた研究成果は学術的にも独創的な成果となり得る。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to identify "energy-saving running patterns" in AC electric railways.

To carry out the study, a numerical experimental model was created and calculations were performed to analyze the relationship between train running patterns and energy consumption. As a result, it became clear that the general theory of energy-saving operation on DC electric railways, which has been well known in recent years, cannot necessarily be applied to AC electric railways. In this calculation model, the voltage unbalance is also evaluated. In order to confirm the validity of the calculation model, we were also able to perform a field experiment on the relationship between the running pattern and energy consumption of AC electric railways.

研究分野：交通電気工学

キーワード：数値実験 交流回路 電気鉄道 エネルギー 走行パターン 実態調査

1. 研究開始当初の背景

(1) 回生ブレーキの仕組みと電気鉄道の電力供給方式 電気鉄道車両は、制動時に電動機を発電機として駆動させることで減速することができ、これを回生ブレーキという。この仕組みにより、車両が加速して蓄えた運動エネルギーを電気エネルギーに変換して、エネルギーを無駄なく利用することができる。鉄道車両は表1のように、受け取る電力の形によって直流電気鉄道(直流系)と交流電気鉄道(交流系)に区分される。

直流系は回生電力の有効利用法が積極的に研究されている。特に直流系は回生電力の融通が鉄道車両同士のみであることから、効果的に回生電力を融通するために主に蓄電装置をはじめとした電気設備が着目されている。直流系は鉄道システム内で回路のモデル化が完結し、さらに回路も直流回路であるため、数値計算にあたってはモデル化も比較的簡易であることから、近年では国内外で研究事例が多くなっている。

(2) 研究代表のこれまでの研究 これまで研究代表者は、直流系において蓄電装置のような追加の電気設備を利用せず、列車の走行パターンを工夫することにより少コストで省エネルギー効果を得られる手法を研究してきた。近年では自動運転を活用して走行パターンを効果的に改良する手法が国内外で多数発表されているが、研究代表者は、省エネルギーな走行パターンに関して一般論を提唱し、そして列車の走行を秒単位で制御することにより、大きな省エネルギー効果を得られることを示した。

(3) 交流電気鉄道の研究状況 一方、交流系でも列車の走行パターンの工夫により省エネルギー効果を得る方法が研究されている。交流系は高速鉄道や幹線鉄道、特に海外新興国で普及が進んでいる。例えばインド国内はすべて交流系であり、また日本や欧州が新興国に技術展開している高速鉄道もすべて交流系である。しかし、我が国においては交流系の発表論文は極めて少なく、走行パターンに関する研究については同じく少ないのが現状である。

表1 直流と交流電気鉄道における加減速時の電力の流れ

	直流電気鉄道(直流系)	交流電気鉄道(交流系)
加速中	(a) 変電所から電気エネルギー(1500V)が供給され、車両は運動エネルギーを発生して加速中。	(c) 三相変電所から電気エネルギー(25000V)が供給され、車両は運動エネルギーを発生して加速中。
減速中	(b) 系統と電車の回路が独立。車両は回生エネルギー(回生電力)を発生し、他の車両に供給される。	(d) 系統と電車の回路が接続。三相変電所からの回生エネルギー(回生電力)が系統に供給される。
備考	変電所間隔は約5km 都市鉄道に普及(山手線、東京地下鉄)	変電所間隔は約50km 幹線鉄道に普及(国内外の高速鉄道)

2. 研究の目的

本研究の目的は、交流電気鉄道において電圧不平衡を一定条件下で維持しつつ、省エネルギー効果が得られる列車の走行パターンを明らかにすることである。そのために、具体的に次項について作業を進めた。

- (1) 列車の走行パターンと消費エネルギーの関係を分析するための数値実験モデルの作成
- (2) ケーススタディに向けた文献調査とパラメータの実装
- (3) 数値実験による列車の走行パターンと消費エネルギー、電圧不平衡の関係の評価
- (4) 直流系と交流系の比較
- (5) 交流電気鉄道の走行パターンと消費エネルギーの実態把握に向けた測定法の考案ならびにフィールド調査

3. 研究の方法

上記研究の目的に関して、具体的に下記の方法で研究を実施した。

(1) 列車の走行パターンと消費エネルギーの関係を分析するための数値実験モデルの作成 数値実験のモデル作成にあたっては、列車の力学運動についてはこれまでの研究代表者の知見を活用し、一方で交流電気鉄道の電力供給方式とその等価回路については直流電気鉄道の知見を活かしつつ、文献調査を進めながら構築した。ここで、列車の力学運動の計算と、消費する電力の計算では、支配方程式がともに非線形微分方程式であることを考慮して、研究の目的に影響

しない範囲で計算条件を簡易にして連成計算できるように工夫した。さらに、複数の列車が走行した場合に電気設備に与える影響についても計算できるようにした。

(2) ケーススタディに向けた文献調査とパラメータの実装 文献調査を行い、交流電気鉄道の電力供給設備の一般的なパラメータを調査し、数値実験の回路モデルに実装した。合わせて、鉄道車両についても国内の車両のパラメータをベースに実装し、具体的な電圧・電流の変化や車両負荷、電圧不平衡の大きさを調べた。

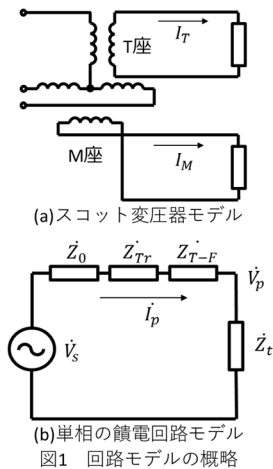
(3) 数値実験による列車の走行パターンと消費エネルギー、電圧不平衡の関係の評価 まず、列車モデルの走行パターンを「加速・惰行・減速」の単純なパターンに限定して、単列車で数値実験を行った。その後、単列車から複数の列車に拡張し、さらにそれぞれの列車の加速時間等を変化させて、鉄道変電所の消費電力、エネルギー、電圧不平衡がどのように変化するかを調べた。

(4) 直流系と交流系の比較 これまでの直流系における省エネルギー走行パターンの一般論と、本研究の交流系の結果を比較することにより、直流・交流の省エネルギー手法の共通点と相違点を調べた。

(5) 交流電気鉄道の走行パターンと消費エネルギーの実態把握に向けた測定法の考案ならびにフィールド調査 交流電気鉄道に関する研究論文が少ないという現状を考慮して、本研究の計算結果の妥当性を確認できるようにするために、国内の交流電気鉄道の走行パターンと消費エネルギーの関係を実態把握するための研究を実施した。簡易かつ精確に測定する手法として衛星測位ならびに加速度センサを活用する方法を考案し、さらにフィールド調査を行うことで、研究に必要な情報を得て、活用法も検討した。

4. 研究成果

(1) 数値実験モデルの作成とその成果 文献で調査したパラメータを実装しつつ、交流電気鉄道の数値実験のモデルを作成することができた。構築した回路モデルの概略図を図1に示す。図1(a)は系統側から三相交流で受電し、鉄道用変電所で単相交流に変換するスコット変圧器を考慮した回路モデル、図1(b)は変換したそれぞれの単相交流で車両が走行した際の電力を計算する回路(饋電回路)モデルである。ここでは電力供給設備や鉄道車両の具体的なパラメータも実装できており、具体的なケーススタディを行うことができた。この数値実験で取り扱う計算では、支配方程式が非線形微分方程式であるため、計算条件は簡易にしているものの、単列車と複数列車両方の計算結果を得ることができた。例として、図1(a)のT座とM座それぞれで列車が走行する場合の電力の計算を行うことができ、考察を深めることができた。この実験結果により、これまでの直流系の研究における省エネルギー走行パターンの一般論は、交流系特有の制約条件を考慮すると必ずしも交流電気鉄道に適用できないことが明らかとなり、今後の交流電気鉄道の省エネルギー走行パターンの研究における新たな研究課題を見出すことができた。さらに、文献調査で得た交流電気鉄道の一般的なパラメータを用いて数値実験を行ったことにより、車両の負荷の大きさが電圧不平衡に与える影響の大きさを調べることができ、今後の研究テーマにつながる新たな知見を得た。



(2) 交流電気鉄道の実態把握とフィールド調査 交流電気鉄道車両で走行パターンと消費(力行)エネルギーを簡易かつ精確に測定する手法を考案し、実験により妥当な結果が得られることを確認した。ここでは、図2(a)に示す複合センサを用いて、衛星測位の情報と加速度の情報を取得し、さらに図2(b)の高解像度カメラを用いて列車の速度情報を記録した。消費(力行)エネルギーの算出を試みた測定の様子を図3に示す。これらの測定装置を用いて得た情報を、考案した手法で処理・検証することで列車の速度、位置、そしてエネルギーを計算することができた。図4は、車両とデータ通信をせず、独立した測定によって得られた列車の速度曲線である。この測定には図2の装置を用いている。これらの手法により、交流電気鉄道に関する研究論文や公開文献が少ない現状下にあっても、本研究の計算結果の妥当性を確認できるようにする手段を得ることができた。また、本研究に関連する応用研究についても検討することができた。



(3) 数値計算の今後の応用に関する研究 本研究において計算モデルの構築とその検討を深めるにつれて、計算モデルの最適化計算についても検討することができた。図5は動的計画法による最適化計算の概要図を示しており、計算過程で生じる数値の補間計算法を工夫することにより所望する計算結果が得られるかを考察した。

これらの取り組みにより、交流電気鉄道の省エネルギー走行パターンに関する研究を進めることができ、有用な知見と成果をまとめることができた。

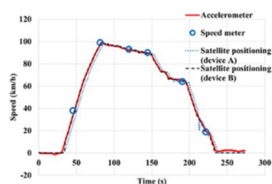
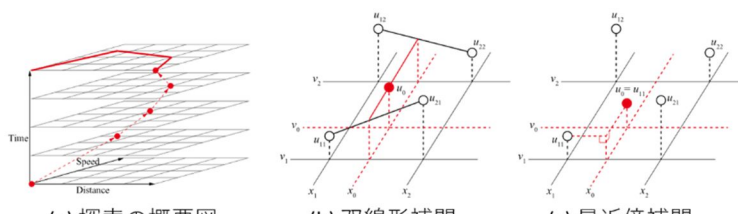


図4 列車の速度曲線



(a) 探索の概要図

(b) 双線形補間

(c) 最近傍補間

図5 動的計画法による最適化計算

参考文献

- (1) Shoichiro Watanabe, Kunihiko Hidaka: "Calculation Method for the Energy Consumption of Train Powering using Simple Measurement Device", IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol. 142, No. 5, pp. 1-8 (2022) (in Japanese)
 渡邊翔一郎, 日高邦彦: 「簡易測定による列車力行電力量の算出」, 電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), Vol. 142, No. 5, pp. 1-8 (2022)
- (2) Shoichiro Watanabe, Shintaro Doi, Kunihiko Hidaka: "Train Speed and Distance Calculation Methods Using Measureing Device Independent of Vehicle Monitoring Device", IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol. 143, (2023) (in Japanese) (Accepted)
 渡邊翔一郎, 土居真太郎, 日高邦彦: 「車両装置から独立した測定装置による列車の速度と位置の計算法」, 電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), Vol. 143 (2023) (掲載決定)
- (3) Yuki Kazama, Shoichiro Watanabe, Kunihiko Hidaka, Masafumi Miyatake: "Calculation Methods of Optimal Speed Profiles for High-speed Railway Using Dynamic Programming", IEEJ Joint Technical Meeting on Linear Drives and Transportation and Electric Railway, TER-23-005/LD-23-005, pp. 23-28 (2023) (in Japanese)
 風間勇希, 渡邊翔一郎, 日高邦彦, 宮武昌史: 「動的計画法を用いた高速鉄道の最適運転曲線計算法の考察」, 交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会, TER-23-005/LD-23-005, pp. 23-28 (2023)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 渡邊翔一郎, 土居真太郎, 日高邦彦	4. 巻 143
2. 論文標題 車両装置から独立した測定装置による列車の速度と位置の計算法	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D (産業応用部門誌)	6. 最初と最後の頁 439 ~ 446
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.143.439	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Shoichiro, Hidaka Kunihiko	4. 巻 142
2. 論文標題 Calculation Method for the Energy Consumption of Train Powering using Simple Measurement Device	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 354 ~ 361
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.142.354	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 渡邊翔一郎, 土居真太郎, 日高邦彦
2. 発表標題 スタンドアロン加速度センサを用いた列車運転曲線の作成法
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 風間勇希, 渡邊翔一郎, 日高邦彦, 宮武昌史
2. 発表標題 動的計画法を用いた高速鉄道の最適運転曲線計算法の考察
3. 学会等名 電気学会交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木下皓介, 渡邊翔一郎, 山口大助, 望月駿登
2. 発表標題 車上主体型列車位置検知システムを想定した衛星測位精度の評価手法の検討
3. 学会等名 電気学会交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊翔一郎, 日高邦彦
2. 発表標題 簡易測定による列車運転電力量の算出
3. 学会等名 令和3年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村優雅, 渡邊翔一郎
2. 発表標題 交流電気鉄道における列車運転曲線の数値計算法に関する基礎検討
3. 学会等名 電気学会交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塚淳史, 渡邊翔一郎, 日高邦彦
2. 発表標題 衛星測位技術の調査と測位データを用いた列車運転曲線の作成
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土居真太郎, 渡邊翔一郎, 日高邦彦
2. 発表標題 ノイズ除去を考慮した加速度センサによる列車運転曲線の作成
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小菅佑汰, 渡邊翔一郎, 日高邦彦
2. 発表標題 交流電気鉄道の運転パターンの違いによる消費エネルギーと架線電力に関する基礎検討
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 緒方勇輝, 渡邊翔一郎, 日高邦彦
2. 発表標題 実測値データに基づく列車前景映像シミュレータ開発
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------