

講演 3. 運転支援装置を活用した省エネルギー運転に対する 列車運転シミュレータによる評価の取組

交通システム研究部 ※渡邊 翔一郎 竹内 俊裕 長谷川 智紀 押立 貴志(客員研究員)

1. はじめに

1. 1. 電気鉄道環境優位性

鉄道は、単位輸送量あたりの CO₂ 排出量が相対的に小さいことから、他の交通モードと比べ、環境優位性が高く、特に電気駆動の回生ブレーキ技術は省エネルギー化に大きく寄与することができる。しかしながら、必ずしも回生ブレーキを満足に利用できるとは限らず、回生絞り込み(回生時に電車線電圧が高くなると車両の主回路を保護するために回生電力を制限する制御)を含む回生失効が生じることもある。

近年、リチウムイオン電池をはじめとする蓄電装置の性能が向上し、鉄道車両に駆動用の蓄電装置を搭載した蓄電車両が実用化されている¹⁾。この蓄電車両により、地方鉄道に多く見られる非電化区間でも架線レスで走行することができる。さらに、回生電力を蓄電装置に蓄えることができるため、回生失効が発生しにくくなる。これらの利点から、地方鉄道への導入が期待されているが、蓄電装置が重いこと、場所を占有すること、コストが高いことなどが導入の壁となっており、その対策として、例えば非接触給電装置を用いて蓄電装置容量を減らす方法が検討されている²⁾。具体的には駅とその近傍の加速区間に設置し、駅停車中や加速中に電力供給する方法である。

1. 2. 蓄電車両の課題

非接触給電装置が故障した場合には、車両は所望の電力を受電することができないため、蓄電量が通常時より少ない状態で次駅に到達することになる。また、地震や線路沿線異常が発生した場合には、車両は走行を停止し、運行再開もしくは救援を待つことになるが、待機中も照明や空調など補機電力を消費するため、蓄電量に余裕が無くなる恐れがある。従って、旅客の安全を考えれば、蓄電装置容量に余裕をもたせる必要があり、また、蓄電車両が走行する地域も、比較

的救援がしやすい地域に限定する必要がある。このように非常時においては、蓄電装置のエネルギーを意識した対応が必要となるが、その判断を運転士や指令所が即座に行うことは必ずしも容易ではない。

1. 3. 本研究の目的

非接触給電装置と蓄電装置を有する架線レス車両を対象に、運転支援装置を活用して蓄電装置の状況及び次駅到達までの省エネルギーな運転パターンをリアルタイムに計算して提示することができれば、運転士や指令所が、蓄電装置のエネルギーを意識した適切な対応を取ることができ、限られた蓄電装置の容量でも、旅客を次駅に輸送する可能性を高めることができる。また、駅間で停止せざるを得ない状況になったとしても、待機可能時間を伸ばし、救援対策の手段を多様に検討することができる。

そこで、本研究では架線レス車両をはじめとする将来技術を見据えつつ、リアルタイム計算アルゴリズムを実装した運転支援装置の効果を簡易に検証するため、列車運行システム安全性評価シミュレータ(以降、運転シミュレータとする)を改造し電力量評価を行った。具体的には、次に列挙する研究及び実験を行ったので報告する。

- ・運転シミュレータの電力量計算の検証
- ・最適省エネルギー運転曲線の計算と検証
- ・蓄電装置残量に従った蓄電車両性能の変化の再現
- ・運転シミュレータによる運転支援法の検証

2. 研究の手順

2. 1. 実験設備の概要

本研究では、交通安全環境研究所に整備された運転シミュレータを活用した。この運転シミュレータでは、任意の路線と車両を設定して手動運転操作を行い、その結果を分析することができる。運転シミュレ

ータの構成は図1のようにになっている。運転席にはワンハンドルのマスコンと2つのモニタが設置されており、正面にはスクリーンが設置されている³⁾。

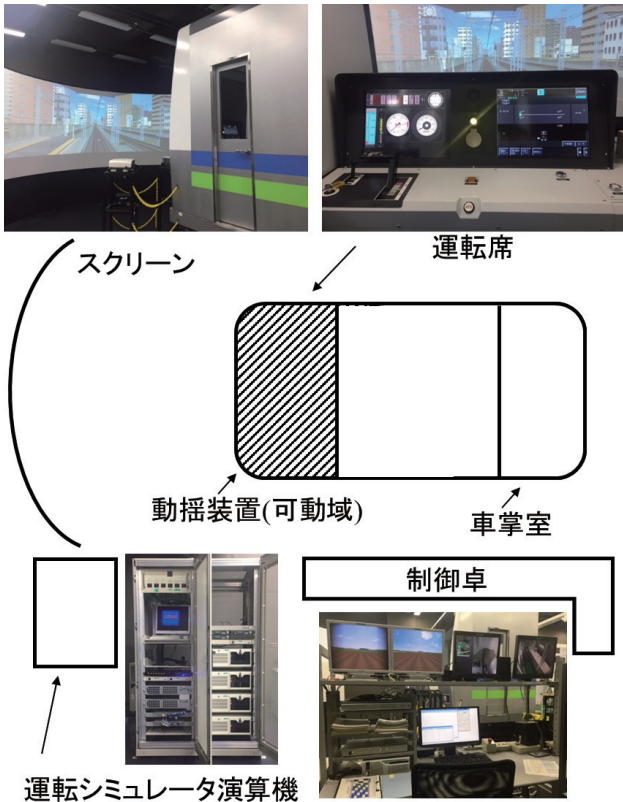


図1 列車運行システム安全性評価シミュレータ

るよう、リアルタイムに計算できるようにした。直線平坦路線での最適運転曲線は列車抵抗のうち走行抵抗を考慮して、現在位置から次駅まで力行と惰行の組み合わせで走行し、制動を扱わずに目的位置に停車するように計算した。

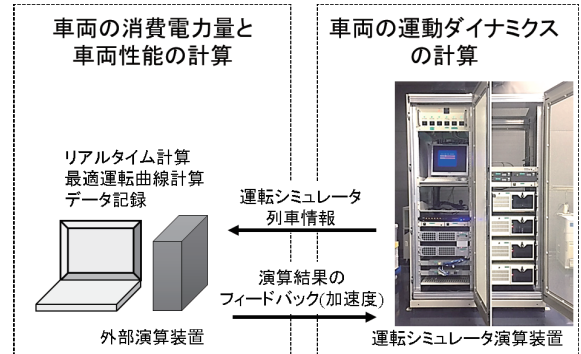


図2 運転シミュレータと外部演算装置の構成

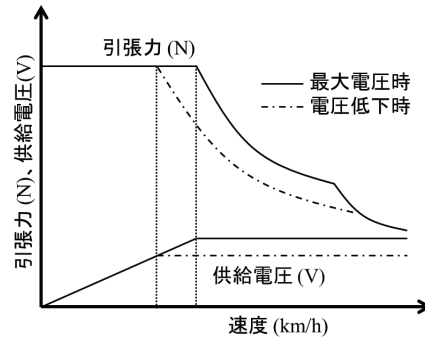


図3 引張力特性

2. 2. 手動運転の評価方法

2. 2. 1. 電力系演算と車両性能の模擬

運転シミュレータの現有設備のままでは電力量を評価することができないため、運転シミュレータから出力される車両の情報を取得し、車両の消費する電力量及び車両性能の変化を計算する外部演算装置を準備することとした。その装置の構成を図2に示す。模擬する車両は、国内で既に実用化されているEV-E301系車両を対象とし、先行研究^{1, 2)}の設定条件を反映した。ブレーキは回生ブレーキ特性を考慮している。蓄電装置の充電率が変化すると、インバータへの供給電圧が変化するため、車両のモータ性能も変化する。したがって、充電率からインバータへの供給電圧を求め、図3に示す供給電圧と引張力の関係から車両性能を模擬した。

2. 2. 2. 最適運転曲線の導出方法

本研究では、最も少ない消費電力量で次駅に到達する運転曲線を最適運転曲線と定義する。最適運転曲線は、車両が駅間で停車した場合などでも利用可能とな

3. 検証実験

3. 1. 消費電力量の計算検証

外部演算装置による計算の検証のため、駅間 2kmの直線平坦区間の電力量を評価した。検証結果を図4に示す。力行ノッチ扱いによる消費電力量の増加と回生ブレーキによる消費電力量の減少を確認することができる。

外部演算装置では車両の引張力と速度、電気機器変換効率を時間積分して求めている。この電力量計算の

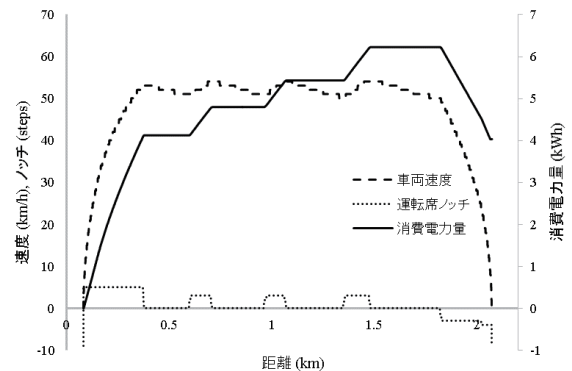


図4 消費電力量を検証した運転曲線

表1 消費電力量の計算妥当性検証実験結果

外部演算装置結果	4.124 kWh
検証計算結果	4.030 kWh
差 / 割合	0.094 kWh / 2 %

検証のため、運転シミュレータから得られるデータのみを利用して、外部演算装置とは別の手段で電力量を計算して比較した。電力量計算の検証では、最初の力行オフ時点での消費電力量を計算することとし、車両速度と質量から運動エネルギーを求め、電気機器変換効率と走行抵抗を考慮して電力量を計算した。計算精度上の有効数字を4桁に設定して外部演算装置の計算結果と比較した。その結果を表1に示す。外部演算装置と検証計算結果の差は約2%であり、外部演算装置の計算が妥当であることが確認できた。

3. 2. 最適運転曲線計算の検証

車両が駅間を走行している時に、リアルタイムに最適運転曲線を導出できることの検証実験を行った。この検証では、満充電で駅間5kmの直線平坦路線を仮定し、3.5kmの地点で非常ブレーキを扱う事態が発生し、駅間で車両が停車するシナリオとした。そして車両が停車した後に、リアルタイム計算で得られた最適運転曲線の結果に従って車両を運転・加速し、その後惰行で次駅に向けて走行した。この時の実験結果を図5に示す。非常ブレーキを取り扱くと3.6kmの地点で停車し、この時の最適運転曲線によるノッチオフ速度は30.0km/hであった。この速度を目標に、指示通りに加速して30km/hに到達後にノッチオフして惰行すると、当該車両は再力行をすることなく次駅に到達することができ、到着時点での車両速度は8.2km/hであった。

この実験結果を考察する。最適運転曲線の考え方から、理想的には次駅到達時に車両速度はゼロになるはずである。しかし、今回の実験でゼロにならなかった理由は次の2点が考えられる。

1 点目は外部演算装置と運転シミュレータの計算モデルに差があると推察される。計算モデルの差を埋めるために、外部演算装置では補正計算も行っているが、合致させることは難しい。特に、車両速度が速い時には無視できる小数点以下のパラメータの差が、車両速度が遅くなると、その影響が相対的に増加することが原因となっていると考えられる。

2 点目は運転モニタの表示・通信や人間の認識・運

転操作に遅延時間が生じることが挙げられる。最適運転曲線ではこれらの遅延時間を考慮していないため、理論通りの結果に至らなかったと考えられる。

一方で、この検討では著者らの文献³⁾で懸念していた最適化計算に要求される計算精度は大きく影響しないことが明らかになった。図6に最適運転曲線計算のタイムステップと得られるノッチオフ速度の関係を示す。最適運転曲線の計算は車両の停止位置も影響するため、車両の停止位置が3.6kmの地点に加え、前後5mの位置に停車した時の結果も計算した。計算の結果、図6に示すようにタイムステップが0.02秒より小さくなると、得られる計算結果の値が収束する傾向にあることが確認できた。このことから、計算精度を上げて得られる結果、つまり運転操作で目標とする速度は、小数点以下の値が多少変化する程度であり、運転操作の誤差に比べて小さいことから、影響は小さいと考えられることが明らかになった。

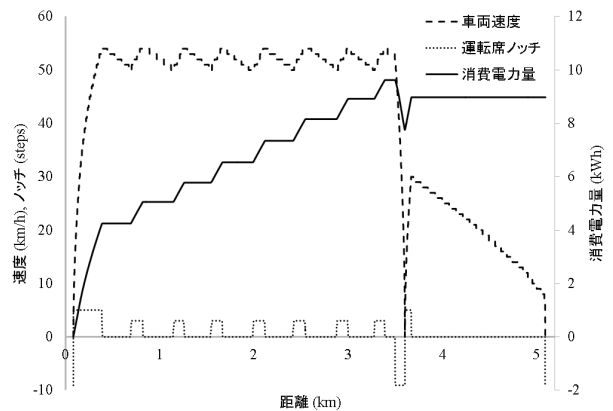


図5 最適運転曲線計算検証実験の運転曲線

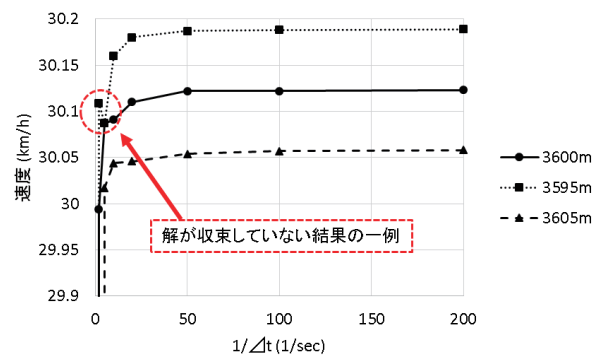


図6 最適運転曲線のタイムステップと得られるノッチオフ速度の関係

3. 3. 車両性能変化を考慮した最適化計算の検証

蓄電装置の残量に応じて最適化計算の結果が変化することを検証する実験を行った。この実験では駅間距離5kmの直線平坦路線を仮定し、500mの位置で

非常ブレーキを扱うシナリオとした。そして、車両が停車した時点での最適運転曲線の計算結果を調べた。このとき、蓄電装置の残量が十分な場合(ケース A)と少ない場合(ケース B)の2条件を比較することにより、車両性能の違いを見ることとした。この結果を表2に示す。一般的に、蓄電装置残量が多いと、蓄電装置の出力電圧が高いため、車両の加速性能も高くなる。したがって、短い時間で高速域に到達することができ、結果として惰行距離を伸ばすことができる。一方、蓄電装置残量が少ないと蓄電装置の出力電圧が低下して加速性能が低下するため、高速域に到達するために必要な時間と距離が増加し、結果、惰行で走行できる距離も短くなる。つまり、理論的には蓄電装置残量が多いほど最適力行オフ速度は大きくなり、残量が少ないと最適力行オフ速度は小さくなると考えられる。表2では理論的考察と結果が合致しており、適切な最適化計算が行われていると判断できる。

3. 4. 運転支援法の検証

運転支援については、図7に示すように検証実験を開始している。運転モニタの表示・通信や人間の認識・運転操作に遅延時間が生じることがこれまでの実験で明らかになっているため、この遅延を考慮した支援アルゴリズムや、HMI(Human Machine Interface)の構成及び情報展開の方法について今後評価していく。

表2 蓄電装置残量を変化させた時の計算結果

実験ケース	A	B
蓄電装置残量 (kWh)	189.4	20.0
満充電に対する割合 (%)	99.6	10.5
車両停止位置 (m)	603	601
最適力行オフ速度 (km/h)	64.9	64.0



図7 運転支援装置の検証状況

4. 結論と今後の課題

4. 1. 結論

本研究ではリアルタイム計算アルゴリズムを実装した運転支援装置の効果を簡易に検証するため、運転シミュレータを改造して電力量評価を行った。

運転シミュレータの電力量計算の検証では、力行電力量を異なる手段で計算し、妥当な計算が行われていることを確認した。最適省エネルギー運転曲線の計算では、リアルタイムに最適運転曲線が得られることを確認し、また、その運転曲線に従って運転すれば、次駅に到達できることを確認した。そして、蓄電装置残量に応じて蓄電車両性能の変化を再現することができ、得られる最適運転曲線の計算結果も理論的考察と合致していることを確認した。

4. 2. 今後の課題

最適運転曲線は、本論では簡易な方法で求めることができたが、今後、勾配抵抗や手動運転の操作遅延時間等を考慮すると条件設定が複雑になる一方、計算精度を維持する必要があるため、最適運転曲線を求めることが困難となることが考えられる。解決策として動的計画法の導入を考えており、既に外部演算装置の改良を始めている。

また、同時に、計算結果の検証や運転支援の HMI の検討と検証についても継続して進める必要がある。

謝辞

本研究は日本学術振興会(JSPS)科研費 17H07407 の支援を受けたものである。

参考文献

- 1) 滝口裕之:「蓄電池駆動電車 EV-E301 系 (ACCUM) の概要 (Special Edition Theme 鉄道のエネルギーマネジメント)」, Technical review, JR East, 51: 45-50, (2015)
- 2) 植原彪之介, 他 :「双方向非接触給電による蓄電池駆動電車の蓄電装置容量低減」, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, V-347-350
- 3) 渡邊翔一郎, 他:「列車運転シミュレータを活用した手動運転の電力量評価とリアルタイム運転曲線計算の基礎検討」, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-18-063, pp. 7-12 (2018)