

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 列車運行電力シミュレーターで省エネ技術の導入効果を予測する

鉄道の省エネ技術の導入効果を予測するために、直流電気鉄道の列車運行の消費エネルギーを計算する列車運行電力シミュレーターを開発しました。列車運行電力シミュレーターは、列車ダイヤに基づいた実際の運転に近い運転方法を模擬する機能を有すること、外気温による空調負荷の変動を考慮した検証がなされていることなどが特徴としてあげられます。そして、省エネ技術の導入効果の予測にて重要な要素を考慮したうえで、列車運行電力シミュレーターを活用して導入効果を検討しました。ここでは、その具体例として、電力貯蔵装置と省エネ車両の導入効果の予測事例を紹介します。

## はじめに

電気鉄道は、架線から供給される電気を利用して加速し、列車を運行させています。列車運行に関する消費エネルギーを削減するための取り組みが、さまざまな鉄道事業者で行われています<sup>1)</sup>。その取り組みの代表例が回生ブレーキです。回生ブレーキによって、ブレーキ時にモーターを発電機として使用して架線へ電力を戻します。この回生ブレーキの有効活用を狙ったさまざまな省エネ技術が開発されています。また、回生ブレーキ以外にも、電気抵抗が少なくなるような電力供給設備の構成に変更したり、車両の機器の効率を高めたりする工夫も行われています。それらのさまざまな省エネ技術から、限られた予算の中で効果の高い導入方法を検討すべきですが、その施策ごとに費用対効果はさまざまです。省エネ技術の導入において難しい点は、省エ

ネ電力設備を設置する場所や省エネ車両を導入する路線の特性によってその効果が変わってくることです。同じスペックの省エネ技術を導入するのであれば、効果の高い導入方法の検討が求められます。また、後述するように、現状よりも高性能な新型車両の導入は、省エネ化だけでなく、走行時間を短縮することも可能であり、その導入効果を予測する際には、エネルギー以外の観点を考えることも重要になります。このような省エネ技術の導入検討のために、鉄道総研では広範囲で多数の列車の運行エネルギーを予測する列車運行電力シミュレーターを開発しました。ここでは、回生ブレーキに関する省エネ技術の事例をあげたうえで、列車運行電力シミュレーターの仕組みと、省エネ技術の導入効果の予測の事例を紹介します。



**小川 知行**  
Tomoyuki Ogawa  
車両制御技術研究部  
水素・エネルギー研究室  
主任研究員



**武内 陽子**  
Yoko Takeuchi  
信号・情報技術研究部  
運転システム研究室長



**森本 大観**  
Hiroaki Morimoto  
電力技術研究部  
き電研究室長

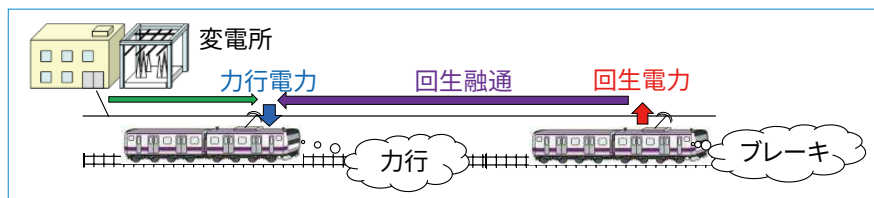


図1 回生ブレーキによる電力融通のイメージ

## 回生ブレーキに関する省エネ技術

回生ブレーキに関する省エネ技術について紹介します。図1のように、近くに力行(☞参照)しているほかの列車があれば、回生ブレーキによって発生した回生電力は架線を通じて融通されて有効に活用されますが、列車が少なく列車同士の距離が離れている場合や、連続したカーブや下り坂といった地形的な制約にともなってブレーキが必要になる場合など、回生ブレーキが有効活用できない場合があります。そのような場合には、直流電化区間では、架線の電圧が高くなりすぎてしまうのを防ぐため、回生ブレーキを絞り込んで、機械ブレーキで減速することになります。このような回生絞り込みを減らすように工夫することで、さらなる省エネ化が期待できます。

例えば、直流方式の地上の電力供給設備では、回生電力を貯める電力貯蔵装置を設置したり、回生電力を駅のエスカレーターや照明などに融通する回生インバーターを設置したりする取り組みがあげられます。また、車両では、遠くの列車まで回生電力を融通できるように回生絞り込みの制御を工夫した車両が導入されています。列車運行電力シミュレーターは、回生絞り込み現象の再現を重視して開発されており、省エネ技術の導入効果を予測できるようになっています。

## 列車運行電力シミュレーターの仕組み

列車運行電力シミュレーターは、直流電気鉄道の列車運行をシミュレーションして、その消費エネルギーを計算するシミュレーターです(図2)<sup>2)</sup>。運行管理部は、設定した列車ダイヤにしたがって、列車を発車させる計算処理を呼び出します。列車を発車させる

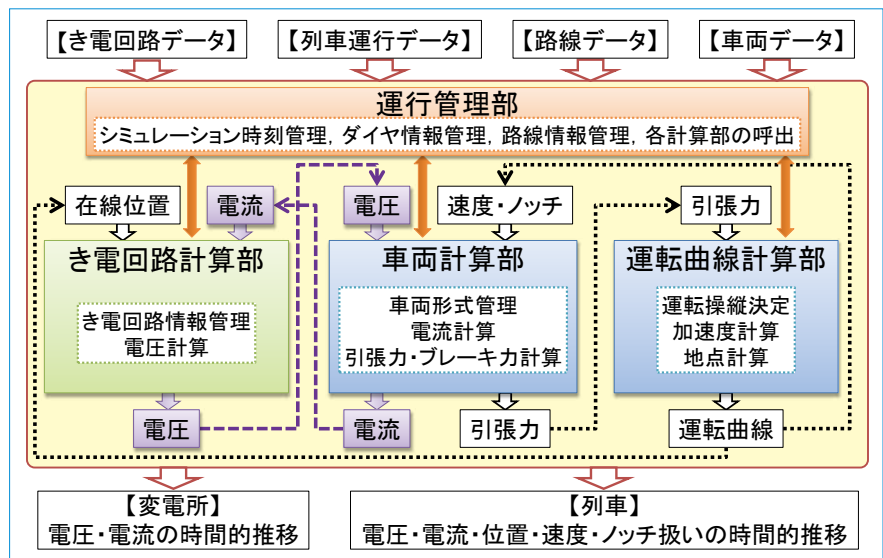


図2 列車運行電力シミュレーターの機能と構成

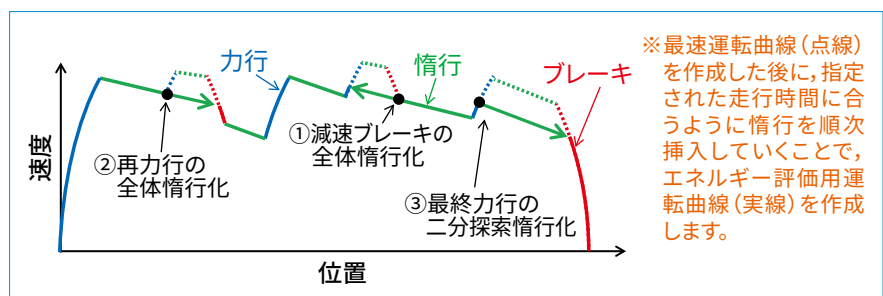


図3 エネルギー評価用運転曲線作成のイメージ

際には、運転曲線計算部が列車の運転曲線(☞参照)を作成します。この時、車両計算部が計算した引張力(☞参照)を用いて運動方程式を解きながら、列車の力行・惰行(☞参照)・ブレーキの運転状態を決めていくことで運転曲線が作成されます。引張力は、き電回路計算部が計算した架線の電圧によって変わります。架線の電圧は、電気回路の方程式を解くことで求めますが、列車の在線位置、すなわち、列車ダイヤと運転曲線によって変わってきます。つまり、架線の電圧、引張力、運転曲線は相互に依存します。そこで、各時刻ステップで架線の電圧に応じた運転曲線を再計算しながら、時刻ステップを進めていきます。

また、列車運行電力シミュレーターの特徴の1つとして、エネルギー評価用運転曲線を作成する機能があげられます(図3)。運転曲線は消費エネルギー

計算に大きく影響するため、指定された走行時間に合わせた実際の運転方法に近い運転曲線を作成することを目指し、エネルギー評価用運転曲線

### ☞ 力行

列車を加速させるために、モーターやエンジンから力を出している状態。

### ☞ 惰行

力行もブレーキもせずに、惰行で走行している状態。

### ☞ 引張力

列車を加速させる力。

### ☞ 運転曲線

列車の運転扱いに応じた各地点の速度を示すもので、横軸を距離、縦軸を速度で表すグラフ。

力行(青)、惰行(緑)、ブレーキ(赤)の運転状態に合わせて色分けして表示することが多くあります。これにより、列車が各地点を走行する際の運転状態や速度がわかりやすく示されます。

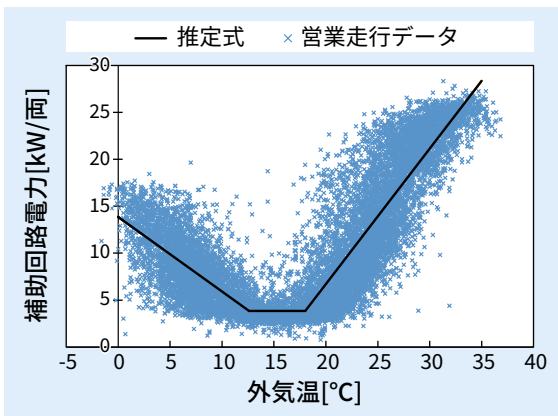


図4 補助回路電力の外気温に対する推移<sup>4)</sup>

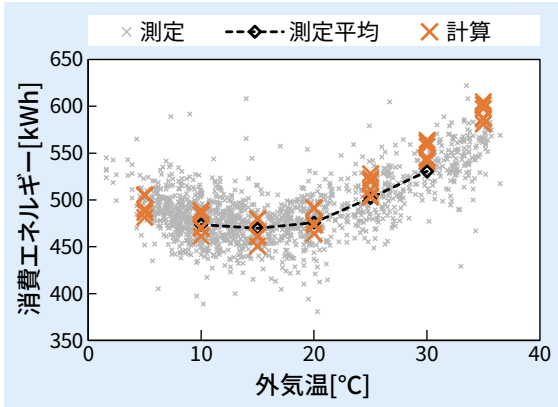


図5 消費エネルギーの検証事例

の機能を開発してきました<sup>3)</sup>。エネルギー評価用運転曲線では、最速となる運転曲線を作成した後に、惰行を挿入していき、指定された走行時間に合わせた運転曲線を作成します。

列車の電力は、列車を加減速させるための主回路電力と、車内の照明や空調などの補助回路電力に大きく分けられます。このうち空調の負荷は季節によって大きく変動します。このため、季節変動を考えて計算する必要があります。補助回路電力の季節変動の例を図4に示します。図4の各プロットのように、気温が低い時期には暖房、高い時期には冷房のために補助回路電力が大きくなります。そこで、図4の実線のような外気温に対する補助回路電力の特性を設定しました。

列車運行電力シミュレーターは、さまざまな測定試験を実施して、検証作業を進めながら開発を進めてきました<sup>4)</sup>。ここでは、ある変電所の日中帯

の消費エネルギーを予測した事例を紹介し、空調の負荷のために変電所の消費エネルギーも変動するため、延べ1年強にわたり測定をして検証用データとしました。

図5にその結果を示します。測定結果には外気温による変動のほかにもばらつきがありますが、計算結果はおおむね測定平均付近に分布しています。このように、列車運行電力シミュレーターを用いることで、列車運行の消費エネルギーを予測することができます。

### 電力貯蔵装置の省エネ効果

それでは、回生電力を貯めるための電力貯蔵装置の省エネ効果を予測した例を紹介します。回生絞り込みは、空

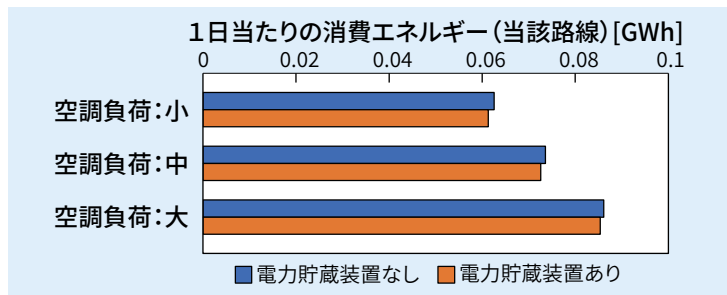


図6 空調負荷別の消費エネルギー計算結果

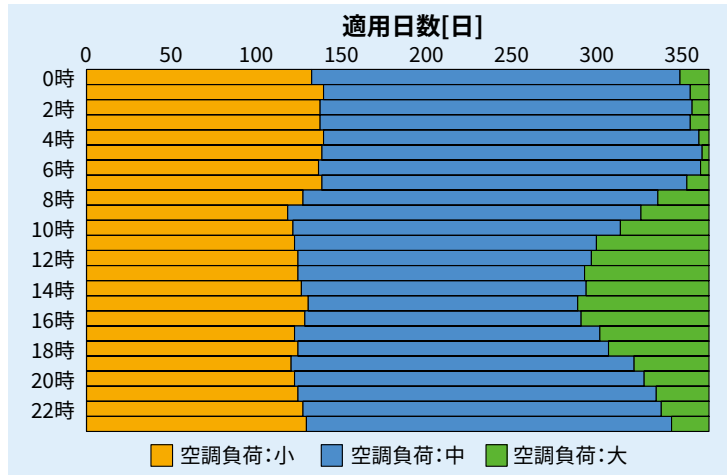


図7 空調負荷の適用日数

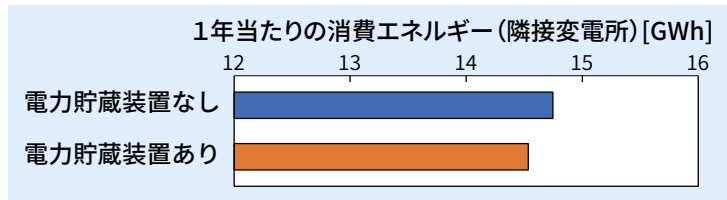


図8 電力貯蔵装置の消費エネルギーの比較事例

調の負荷が少ない春や秋に発生しやすいことが知られています。つまり、回生絞り込みの抑制を狙った電力貯蔵装置の省エネ効果は春や秋に高くなり、夏や冬に低くなるのです。このため、電力貯蔵装置を評価する際には、空調負荷の季節変動を考慮する必要があります。そこで、鉄道総研では、空調負荷の大きさごとに何パターンかシミュレーションして、消費エネルギーを算出することとしました(図6)。ここに示す例では、空調負荷を3パターンに分けて、それぞれ1日分の消費エネルギーを算出しています。そして、気象庁のデータベースから得られた外気温の実績から、空調負荷のそれぞれのパターンの出現日数を求めることにしま

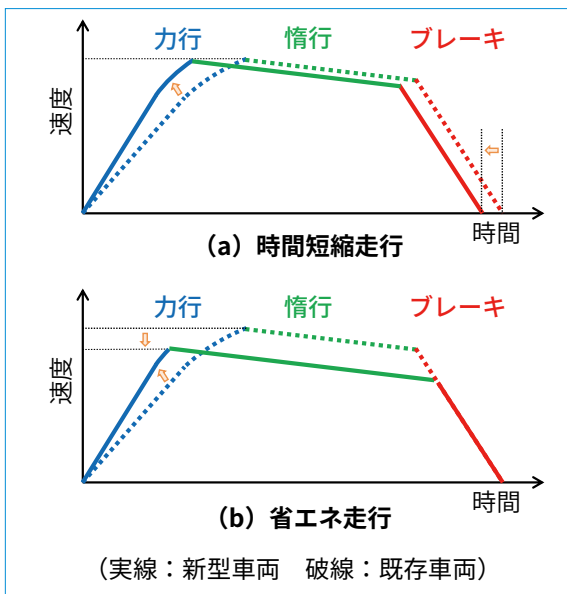


図9 加速向上時の走行方法のイメージ

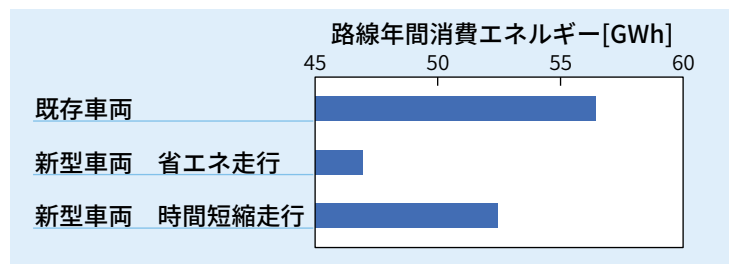


図10 新型車両の消費エネルギーの比較事例

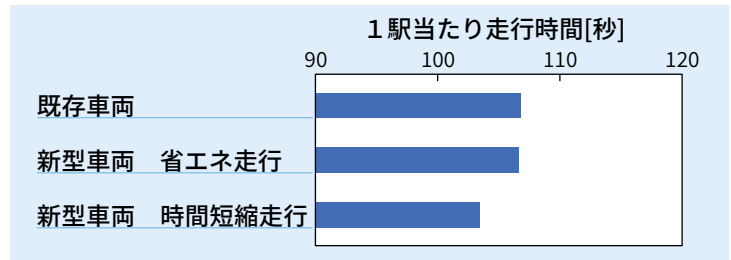


図11 新型車両の走行時間の比較事例

した(図7)。ここに示す例では、1年分の外気温実績から1時間ごとに近い空調負荷の条件を数えています。そして、それぞれの空調負荷のパターンにおける消費エネルギーと出現日数を掛け合わせることで、年間の消費エネルギーを予測しています(図8)。

### 新型車両の省エネ効果

次に、省エネなモーターやインバーターを搭載した新型車両の省エネ効果を予測した例を紹介します。一般に、新型車両と既存車両では編成質量や引張力が異なり、加速度が異なってくることとなります。今回は、加速性能が大きく向上した新型車両を導入した場合の省エネ効果と走行時間短縮の評価事例を紹介します。

加速性能が向上した場合の走行の仕方として大きく分けて2通りがあります。1つは、加速性能の向上によって走行時間を短縮することです(図9(a))。もう1つは、早く加速して、早めに加速をやめて、惰行を長く取ることです(図9(b))。後者のような走り方をすると、同じ走行時間にするならば力行をやめる速度を低くすることが可能になるので、消費エネルギー低減につながります。このため、加速性

能が変わった場合には、走り方を適切に設定して消費エネルギーを評価する必要があります。また、新型車両に省エネ機器を導入した場合には、このような走り方の変化だけでなく、車両の機器効率が向上することによる省エネ効果も期待できます。このため、走り方の変化による省エネ効果と、省エネ機器による省エネ効果の両方を適切に評価することが求められます。

そこで、新型車両の省エネ効果について条件を分けて評価しました。新型車両を既存車両と同じ走行時間で走行した場合と、時間短縮を図った場合を比較することにしました。同じ走行時間で走行する場合には、現行の列車ダイヤに合わせて走行するようにエネルギー評価用運転曲線作成機能を使用しています。このようにして計算した結果の例を紹介します。この路線全体での消費エネルギーを図10に、1駅当たりの走行時間を図11に示します。この例に示す新型車両は、走行時間を短縮しても消費エネルギーの削減につながりますが、同じ走行時間で走行した方が消費エネルギーの削減量は大きくなります。このように、加速性能の向上は、消費エネルギーの削減に活用することもできますし、走行時間の短縮

に活用することもできます。

### おわりに

列車運行電力シミュレーターを活用した省エネ技術の導入効果の予測手法を紹介しました。今後は、本手法を用いて、省エネ技術の効果的な導入方法について調べていく予定です。

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]

### 文献

- 1) 鉄道電気利用における省エネルギー・新エネルギー技術の効果の検証調査専門委員会編：鉄道電気利用における省エネルギー・新エネルギー技術の効果の検証，電気学会技術報告，No.1499，2021
- 2) 森本大観，武内陽子，小川知行：電車の運行電力をシミュレーションする，RRR，Vol.74，No.5，pp.20-23，2017
- 3) 小川知行，武内陽子，森本大観：列車運行電力シミュレータで省エネ効果を予測する，RRR，Vol.75，No.7，pp.12-15，2018
- 4) 小川知行，武内陽子，森本大観，影山真佐富，美濃部晋吾：列車運行電力シミュレータによる消費エネルギー予測手法，電気学会論文誌D，Vol.141，No.5，pp.374-387，2021