

- 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で省エネ効果を予測する

鉄道運行に関わる消費エネルギーを削減するためのさまざまな研究開発が進められています。その導入効果を高精度に予測するため、地上電力設備、車両、運転分野のシミュレーターを連携することで構成されている「列車運行電力シミュレータ」を開発しました。この列車運行電力シミュレータを活用して、営業運行を模擬するためには、各列車の走行を模擬する運転曲線（※参照）作成が重要となります。そこで、消費エネルギー計算のために開発したエネルギー評価用運転曲線を中心に紹介します。



**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  
副主任研究員  
【専門分野】 鉄道車両の  
エネルギー消費計算



**武内 陽子**  
Yoko Takeuchi  
信号・情報技術研究部  
運転システム研究室  
主任研究員  
【専門分野】 列車運行シ  
ミュレーション、運行  
実績分析



**森本 大観**  
Hiroaki Morimoto  
電力技術研究部  
き電研究室  
主任研究員  
【専門分野】 き電回路全  
般

## はじめに

鉄道運行に関わる消費エネルギーを削減するためのさまざまな研究開発が進められています。たとえば、バッテリーを地上電力設備もしくは車両に設置して回生電力を吸収させる事例、車両の主回路機器に高効率な機器を導入

する事例、上下のき電線を接続し電気抵抗を減らす事例などがあげられます。それらの省エネ技術の導入判断においては、その導入効果を高精度に予測することが重要です。そこで、省エネ技術の導入効果を予測するため、「列車運行電力シミュレータ」を開発しました。

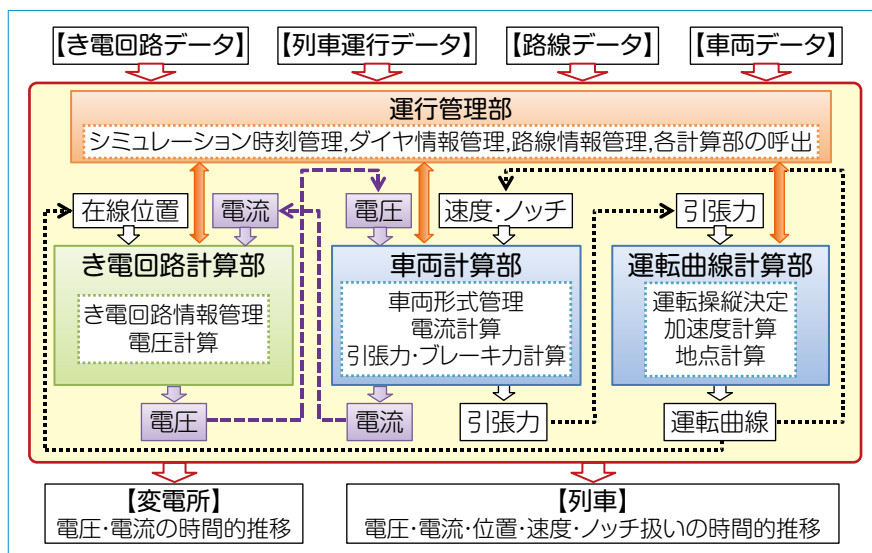


図1 列車運行電力シミュレータの機能と構成

## ※ 運転曲線

運転曲線は、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です。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。

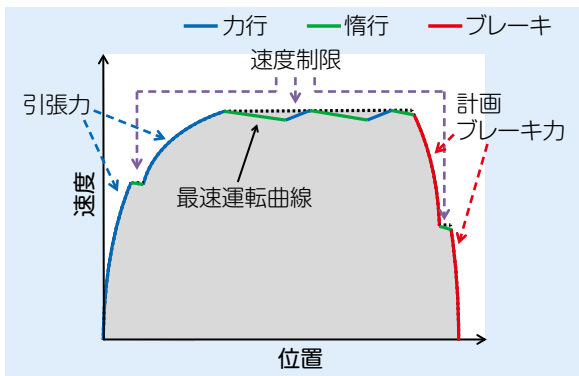


図2 最速運転曲線の作成イメージ

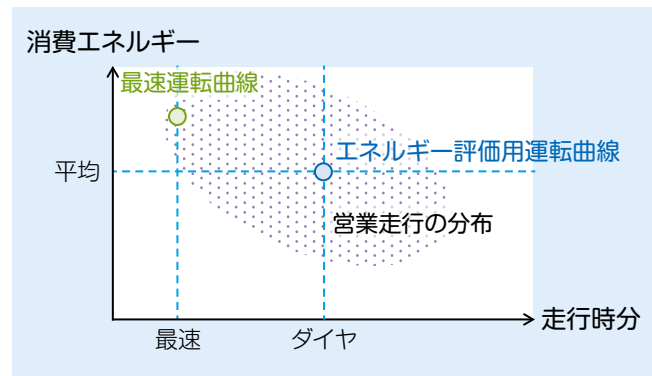


図3 エネルギー評価用運転曲線と営業走行の運転曲線の関係(イメージ)

列車運行電力シミュレータは、地上電力設備、車両、運転分野のシミュレータを連携することで構成されています(図1)。列車運行電力シミュレータについては、夜間の走行試験の再現による基本的な計算の仕組みの検証をこれまでに実施してきました<sup>1)</sup>。この夜間の走行試験は、運転方法を指定して実施し、電気回路や運動方程式といった物理現象を中心とする計算アルゴリズムの検証を行い、目標としていた誤差5%以内の精度を達成しました。

しかしながら、その次の大きな課題は、営業運行の再現でした。具体的には、列車ダイヤで指定された走行時分から従った運転士による営業走行を模擬する必要がありました。そこで、今回は営業運行の再現でとくに重要な運転曲線に関する話を中心に紹介します。

### エネルギー評価用運転曲線の目的

列車運行電力シミュレータは、各列車の運転曲線を作成して、それに基づき各計算ステップでの消費電力計算を行っていきます。このような消費エネルギーを予測するシミュレーションにおいて、運転曲線の模擬は計算精度に大きな影響を与えます。その理由としては、運転曲線作成は物理現象と違って数式のような計算モデルで表現することが難しく、それゆえにダイヤ上の走行時分を合わせるという条件だけで

はさまざまな運転曲線を取りうるものがあげられます。そこで、探索的手法で消費エネルギー計算に適した運転曲線を作成するエネルギー評価用運転曲線作成アルゴリズムを開発しました。

従来、運転曲線作成システムは、列車ダイヤの元となる走行時間を算出するために開発されてきました<sup>2)</sup>。このシステムは、車両の力行性能やブレーキ性能と、線路の速度制限の条件の中で、最速の走行方法を示す最速運転曲線を作成することを目的として構築されていました。その最速運転曲線で計算された走行時分から余裕時分を付加して列車ダイヤが設定されます。最速運転曲線の作成のイメージを図2に示します。速度制限に加えて、力行時には車両を加速させる引張力、ブレーキ時には計画ブレーキ力の制約の中で、おおむね最大の速度を取る運転曲線が最速運転曲線となります。つまり、最速運転曲線は、おおむね一意に決定されることとなります。

一方で、最速運転曲線でなく、走行時分に余裕のある運転曲線は、余裕時分の使い方に無数の選択肢が存在するので、同じ走行時分でも複数の運転曲線の解があることとなります。エネルギー評価用運転曲線では、その中から平均的な消費エネルギーとなる運転曲線となることを目指して、最速運転曲線から運転曲線を少しずつ変化させながら走行時分に合う運転曲線を探していきます。

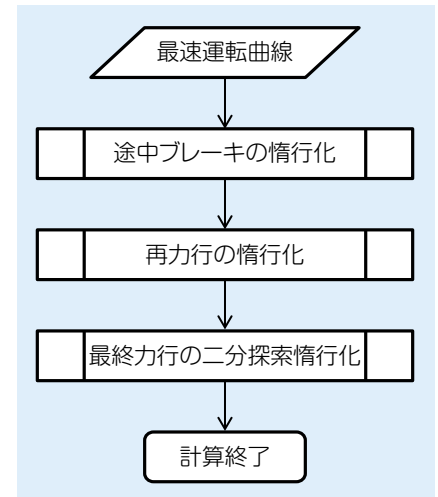


図4 エネルギー評価用運転曲線作成アルゴリズムの概要

ここで、エネルギー評価用運転曲線と実際の営業列車の運転曲線の関係を図3にて紹介します。横軸を走行時分、縦軸を消費エネルギーとしてグラフを作った際に、おおむね走行時分と消費エネルギーにはトレードオフの関係がありますが、営業走行をこの分布に表してみるとある程度のばらつきが生じます。エネルギー評価用運転曲線は、ダイヤ上の走行時分を入力したときに、平均的な消費エネルギーを算出できることを期待して構築しました。

### エネルギー評価用運転曲線のアルゴリズム

エネルギー評価用運転曲線のアルゴリズムの概要を図4に、その作成例のイメージを図5に示します<sup>3)</sup>。エネルギー評価用運転曲線では、最初に最速

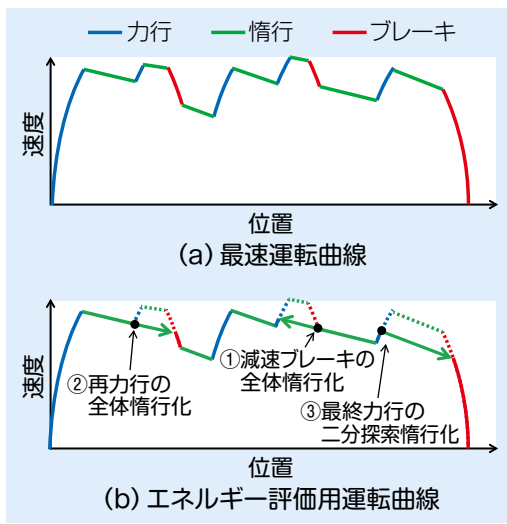


図5 エネルギー評価用運転曲線作成の例

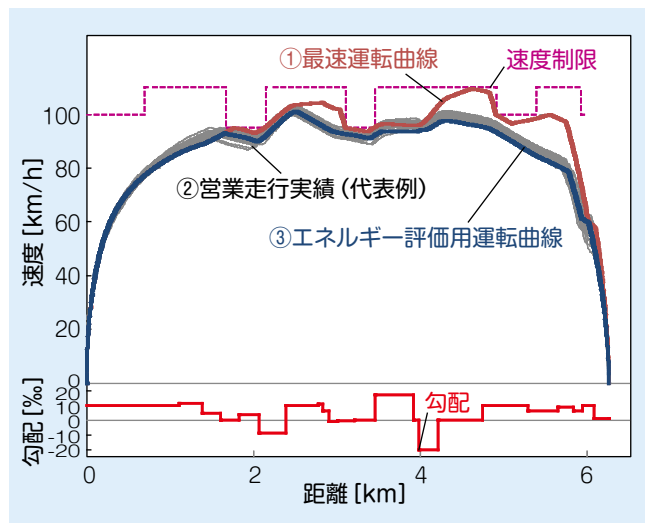


図6 運転曲線の比較

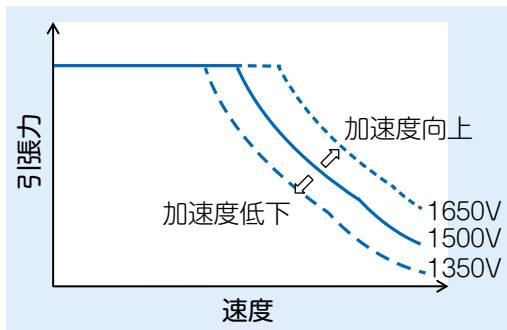


図7 架線電圧による引張力への影響

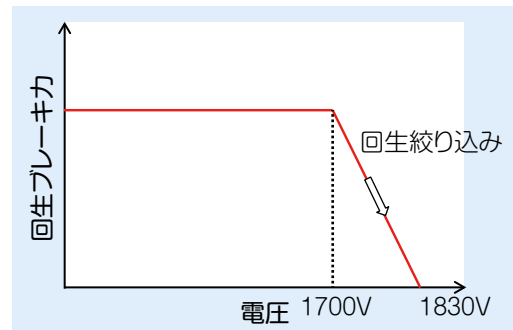


図8 架線電圧による回生ブレーキ力への影響

運転曲線を作成して、それに対して惰行を挿入していくことで指定された走行時分に合わせていきます。その時の惰行の入れ方は、実際の営業列車の走行パターンを分析して得られた知見から決定しました。その代表例が、運転操作の少ない運転が一般的であることです。そこで、駅到着以外のブレーキである減速ブレーキや、駅発車以外の力行である再力行を対象として、惰行を挿入していく順番を工夫したアルゴリズムを構築しました。

具体的には、減速ブレーキの惰行化①や再力行の惰行化②を行って、指定された走行時分を超えていなければ、その惰行化は採用されません。この際に、惰行化の対象となる減速ブレーキや再力行は、その時間が短いものから優先的に試行していきます。このようにして、指定された走行時分に大まかに合わせていくのが前半のステップです。後半のステップでは、駅

到着に最も近い力行を対象に、二分探索という力行時間の半分の点から惰行する試行を繰り返す探索により、細かく走行時分を合わせていきます③。

### 運転曲線の比較の事例

エネルギー評価用運転曲線を使って作成した運転曲線の事例を図6に示します。この図では、最速運転曲線①と、実際の営業列車から取得された運転実績②もあわせて示しています。最速運転曲線①は、速度制限ぎりぎりまで加速するため、営業走行実績とはだいぶ異なる運転曲線となっていますが、エネルギー評価用運転曲線③はおおむね営業走行実績と重なる運転曲線となっています。

### 列車運行電力シミュレータが再現する現象

さて、列車運行電力シミュレータは、大きく分けて二つの現象を再現できま

す。一つは、力行時に負荷が集中することによって架線電圧が低下して、車両の加速が低下する現象です。一般に、高速域では架線電圧の低下によって引張力は低下します(図7)。もう一つは、回生時に回生電力の融通先の列車がなく架線電圧が上昇して、回生電力が融通できない現象です。一般に、架線電圧の上昇によって回生ブレーキ力は絞り込まれます(図8)。

### 列車運行電力シミュレータへの組み込み

エネルギー評価用運転曲線は、当初、車両走行エネルギーシミュレーター「Hybrid-Speedy」<sup>4)</sup>向けに開発されました。単独列車のシミュレーターであるHybrid-Speedyは、き電回路については簡単な模擬に留まっており、他列車の影響を受けて架線電圧が変化することまでは模擬していません。このため、架線電圧の変化を考慮せず、運転曲線を作成

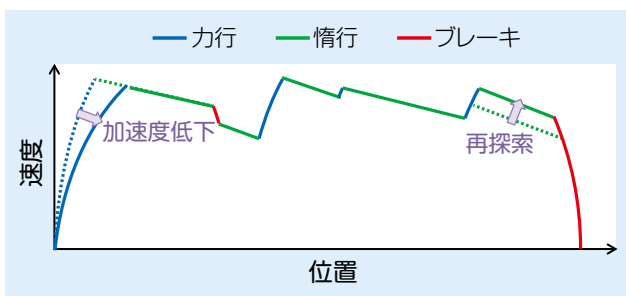


図9 エネルギー評価用運転曲線の再探索のイメージ

できるため、エネルギー評価用運転曲線の組み込みも容易でした。一方で、複数列車を同時に計算していく列車運行電力シミュレータは計算ステップごとに架線電圧の変化により引張力が変化する可能性があり、エネルギー評価用運転曲線作成アルゴリズムで作成された運転曲線が指定された走行時分に合わなくなる懸念されました。

そこで、列車運行電力シミュレータにエネルギー評価用運転曲線作成アルゴリズムを組み込む際には、エネルギー評価用運転曲線の再探索機能を盛り込みました。具体的には、架線電圧の変化により運転曲線の変化があり、一定以上の走行時分のずれが発生した場合に、エネルギー評価用運転曲線の作成を途中からやり直す再探索機能を設けました。再探索機能のイメージを図9に示します。たとえば、力行中に架線電圧が低下していった場合には、走行時分が延びてしまいますので、再探索が実行されて、結果的には再探索前の運転曲線に比べてどこかの速度を高くすることにより、当初の走行時分に合わせます。この仕組みにより、計算に時間がかかる惰行化探索の回数を最小限に抑えながら、指定された走行時分からずれの少ない運転曲線を作成することが可能となりました。

### 列車運行電力シミュレータの検証

エネルギー評価用運転曲線を組み込んだ列車運行電力シミュレータの検証事例を紹介します。西日本旅客鉄道株

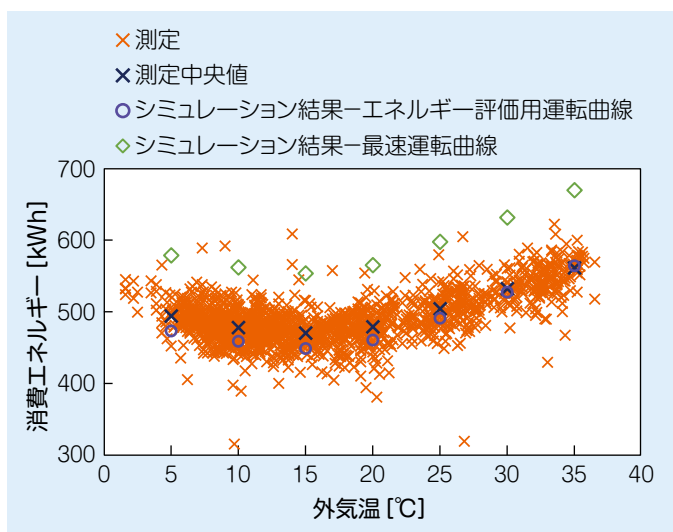


図10 列車運行電力シミュレータの検証

殿のご協力により、学研都市線の変電所にて延べ約14ヶ月に渡って測定された消費エネルギーとシミュレーションの消費エネルギーとを比較して検証した結果を図10に示します。消費エネルギーは、車両の冷暖房のため、夏冬に大きくなり、春秋に小さくなるということが知られています。そこで、このグラフでも横軸を外気温とし、外気温ごとに想定される補機電力を設定してシミュレーションしています。このようにして計算したところ、シミュレーション結果は、外気温ごとに算出した測定の中央値に対して、誤差は3%程度に収まり、良好な計算精度が確認されました。なお、最速運転曲線を用いて計算すると、2割ほど大きな消費エネルギーとなったことから、消費エネルギー計算における運転曲線の重要性がわかるかと思えます。

### おわりに

各種の省エネ技術の導入効果を正確に予測するための列車運行電力シミュレータの開発の取り組みのうち、営業運行時の消費エネルギー予測の観点で、運転曲線の再現の取り組みを紹介しました。

運転曲線は、消費エネルギーの計算に大きな影響を与えることを紹介しましたが、これは見方を変えれば、運転方法を工夫することで消費エネルギーを低減できる可能性を示しています。今後は、運転方法の工夫による消費エネルギー低減の可能性についても列車運行電力シミュレータを用いて検討していきたいと考えています。

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) 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
- 2) 山下修: 鉄道総研 運転曲線図と運転曲線作成システム「SPEEDY」, 運転協会誌, Vol.48, No.3, pp.1-4, 2006
- 3) 小川知行, 佐藤圭介, 今村洋一, 美濃部晋吾, 川村淳也, 影山真佐富, 島田直人: 鉄道車両走行シミュレータのエネルギー評価用運転曲線の開発, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol.135, No.5, pp.563-570, 2015
- 4) 小川知行, 近藤稔, 熊澤一将, 今村洋一, 美濃部晋吾, 川村淳也, 島田直人, 添田正, 杉山義一: 汎用鉄道車両走行エネルギーシミュレータの開発, 電気学会リニアドライブ/交通・電気鉄道合同研究会, LD-14-067/TER-14-030, 2014