

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

運転方法の工夫による省エネ化

列車がある駅から次の駅まで運行されるとき消費エネルギーを少なくする方法として、地上設備や車両の改良のほかにも、列車の運転方法の工夫があります。同じ駅間を同じ車両で運転する場合でも、運転時間の違いや加減速のしかたによって、消費エネルギーは変わります。ここでは、コンピューターで列車の走行シミュレーションを行い、運転方法から省エネ化を探る手法を紹介します。



佐藤 圭介
Keisuke Sato
信号・情報技術研究部
運転システム研究室
副主任研究員
[専門分野] 数理最適化の応用, 運転整理, 運用整理



熊澤 一将
Kazumasa Kumazawa
前 信号・情報技術研究部
運転システム研究室
研究員
[専門分野] 運転曲線



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, ハイブリッド車両

駅間の運転操作

力行とブレーキには、「ノッチ」と呼ばれる、車両が加速や減速をするための力の段階がいくつかあります。惰行も一つのノッチとみると、運転士は、複数あるノッチの中から一つを選択し、場面により切り替えて運転していることとなります(図1)。

力行の際は、電車の場合は架線からの電力、気動車(ディーゼルカー)の場合は燃料を消費しますが、電車には、ブレーキ時にモーターを発電機として動作させて電力を架線に返す回生ブレーキが備わっている車両が一般的で

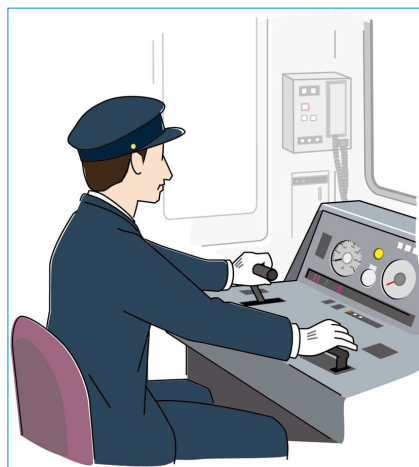


図1 ノッチを切り替えての運転

す。以降は電車を例にして、力行時の力行エネルギーからブレーキ時の回生エネルギーを引いた消費エネルギーと、運転操作の関係を探ります。

運転操作と消費エネルギー 運転時間

図2は運転曲線の例で、横軸は出発駅からの距離を、縦軸はおのおのの地点での列車の速度を示します。線の色や種類は、おのおのの地点で選択されているノッチを示します。この例での列車の運転操作は、出発駅から1500mのA地点まで最大力行ノッチで加速し、この区間の最高速度に達すると惰行に切り替え、その後、最大減速力を得るブレーキノッチを選択し、到着駅に停止するというものです。この運転操作は、列車の加減速の性能を最大限に発揮した運転なので、駅間を最速で運転しています。このような運転曲線を最速運転曲線と呼びます。

次に、最高速度に達する図2のA地点の250m手前のB地点から惰行を開始する運転曲線を考えます(図3)。この運転曲線は、図2の運転曲線よりも、あらゆる地点で速度が同じか低いため、

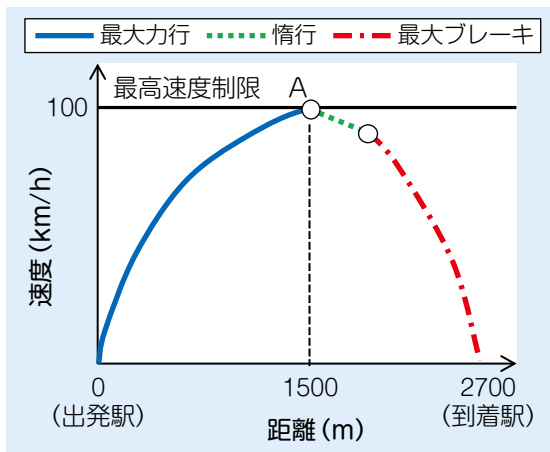


図2 運転曲線(最速運転曲線)の例

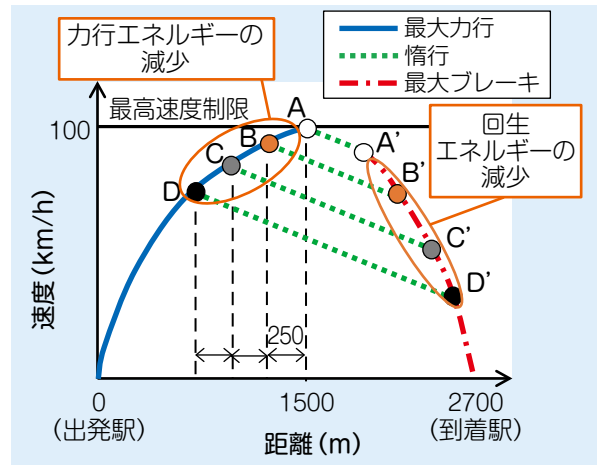


図3 最速運転曲線と惰行を増加させた運転曲線の例

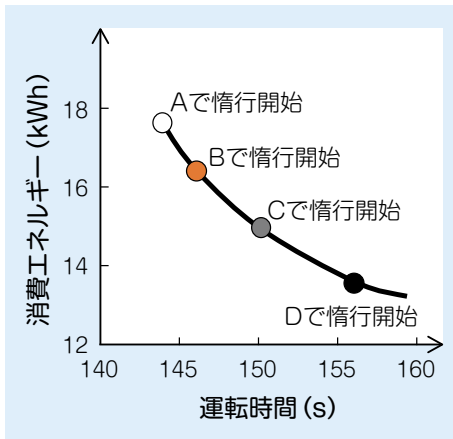


図4 運転時間と消費エネルギーの関係

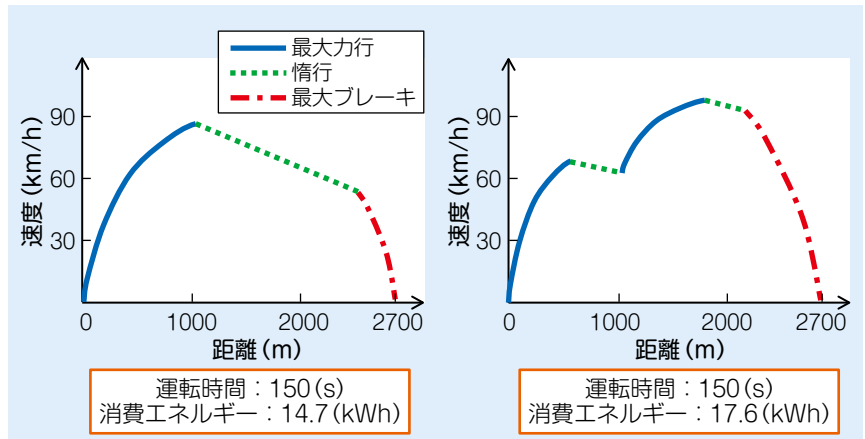


図5 同じ運転時間で消費エネルギーが異なる運転曲線の例

運転時間は長くなります。また、A～B地点間の力行に相当する量のエネルギーが減少します。A'～B'地点間のブレーキに相当する回生エネルギーも減少しますが、差し引きすると、B地点から惰行を開始することで消費エネルギーは少なくなります。さらに手前のC地点やD地点から惰行を開始した場合も含めて、運転時間と消費エネルギーの関係をグラフにすると、図4のようになります。惰行を増加させると、運転時間は増加し消費エネルギーは減少しますが、減少の割合は小さくなっていくのがわかります。

運転方法

駅間を最速で運転するためには、図2に示すような運転方法しかありませんが、実際の列車ダイヤでは、駅間の運転時間には、最速運転時間に多少の余裕が加えられています。余裕があ

るといことは、それだけ、運転操作に自由度があることになります。図5に、同じ運転時間で運転方法を変えたときの消費エネルギーの違いの例を示します。右側の運転曲線では、力行を2回に分けて行っており、消費エネルギーが多くなっています。

このように、同じ運転時間であっても、駅間のどのタイミングで、どのような運転操作をするかによって、消費エネルギーは変わります。言い換えると、駅間でのノッチの選択、切り替えを工夫することで、消費エネルギーを

抑えることができます。

車両走行エネルギーシミュレーション

列車の消費エネルギーが少ない運転方法を調べるには、コンピューター上で車両走行シミュレーションを行い、消費エネルギーを評価するのが一般的となっています。鉄道総研で開発した車両走行エネルギーシミュレーター(参照)の画面を図6に示します。このシミュレーターは、市販のパソコン上で動作し、走行シミュレーション結

車両走行エネルギーシミュレーター

対象となる路線と車両に対して、勾配や速度制限などの線路データと、モーターやブレーキの性能などの車両データを基に、路線の各駅間の車両の走行の推移をシミュレーションするソフトウェアです。駅間の最速運転曲線の表示、運転時間の計算、車両の消費エネルギーの推定といった機能があり、列車ダイヤや車両の効率的な機器構成の検討などに活用されます。鉄道総研のシミュレーターでは、通常の電車や気動車のほかにも、ハイブリッド車両の走行シミュレーションができます。

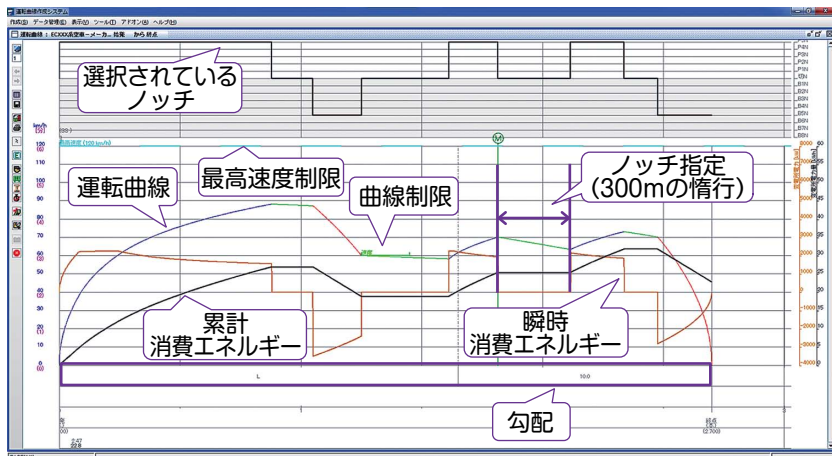


図6 車両走行エネルギーシミュレーター

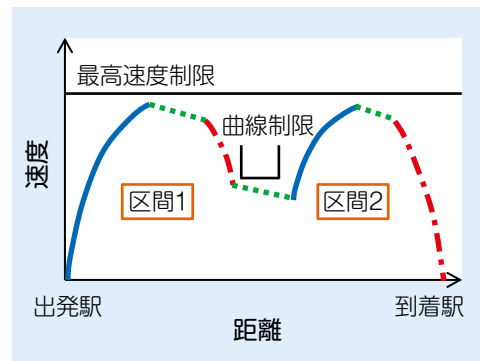


図7 再力行のある最速運転曲線の例

果を運転曲線で表示します。特に指定がなければ最速運転曲線が作成されますが、任意の区間でノッチを指定できる機能があるため、さまざまな運転曲線を作成し、その消費エネルギーの推定ができます¹⁾²⁾。

省エネな運転方法の計算

あらゆる運転操作のパターンをシミュレーションすれば、最も省エネな運転方法が求まることになります。この場合、シミュレーションにかかる時間が膨大になるため、精度は多少犠牲にしつつも、ある程度網羅的にシミュレーションを行い、実用に耐えうる時間で答えを出すシミュレーターもあります。しかしながら、そのようにして求められた運転方法は、ノッチの切り替えが頻繁に発生するなど、運転士が無理なく運転できるものには限りません。

そこで、駅間の最速運転を元にして一部の区間を省エネになるように運転方法を変更します。言いかえると、最速運転曲線の一部を省エネになるように変形して、運転のしやすさも考慮した運転曲線を作成します。ただし、最速運転曲線を変形すると運転時間が長くなるため、ダイヤで定められた運転時間を超えない範囲で行います。

(1) 惰行の増加

図3の例のように、最速運転曲線の

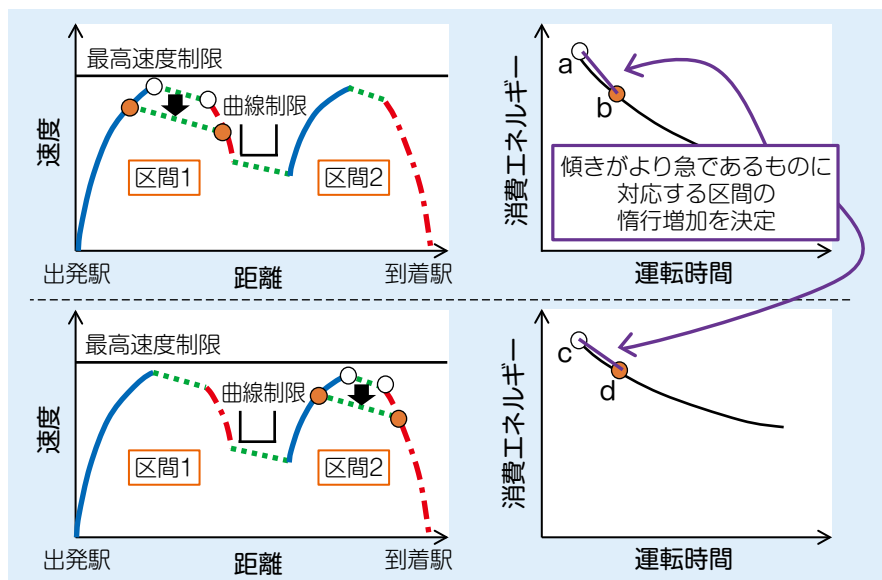


図8 惰行を増加させる区間の選択(1回目)

力行とブレーキの間にある惰行を増加させていけば、消費エネルギーを減らすことができます。では、図7の最速運転曲線の例のように、途中で曲線による速度制限があり、力行とブレーキに挟まれた惰行が、区間1と区間2の2箇所ある場合は、どちらの惰行をどれくらい増加させれば、効果的に消費エネルギーを減らせるでしょうか。

図8, 9を例に具体的な手順を示します。まず図8で、区間1の惰行を少し増加させた仮の運転曲線を作成し、元の運転曲線からの「消費エネルギーの増加量÷運転時間の増加量」を計算します。運転時間は増加し消費エネルギーは減少するので、この値は負

になります。区間1の惰行を増加させることで、運転時間と消費エネルギーが、図8の右のグラフの点aから点bになったとすると、「消費エネルギーの増加量÷運転時間の増加量」の値は、点a, bを結んだ線分abの傾きに相当します。一方で、区間2の惰行を少し増加させた仮の運転曲線を作成し、同様の計算を行い、線分cdの傾きを得ます。そして、線分の傾きがより急であるものに対応する区間、言いかえらると、運転時間の増加1秒あたりの消費エネルギー改善効率がより高い区間の、惰行を少し増加させることを決定します。図8の場合、区間1の惰行を少し増加させます。次に図9で、区間

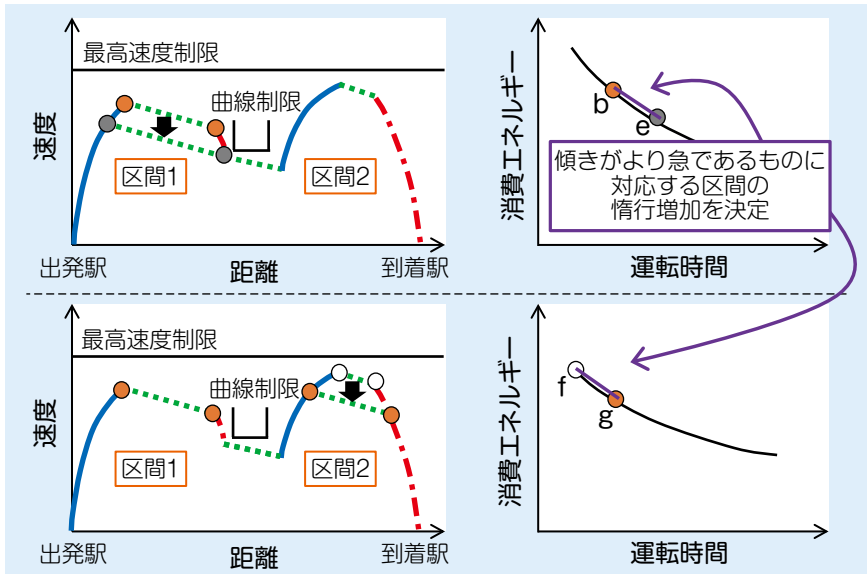


図9 惰行を増加させる区間の選択 (2回目)

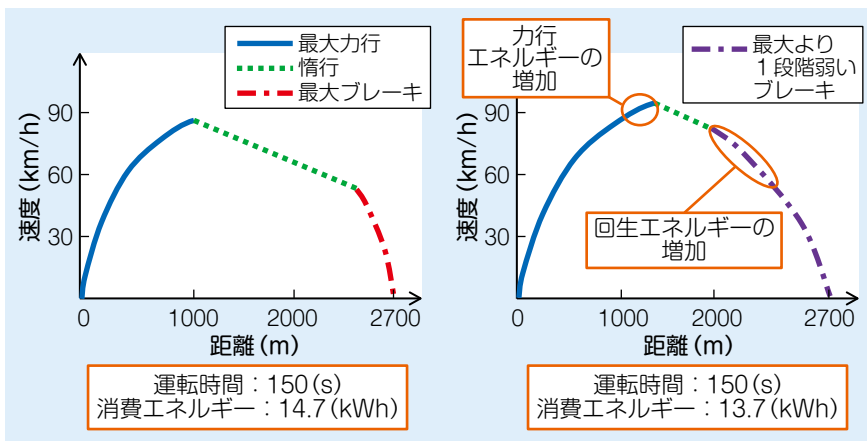


図10 同じ運転時間でブレーキノッチが異なる運転曲線の例

1の惰行をさらに少し増加させた仮の運転曲線と、図8でも試みた区間2の惰行を少し増加させた仮の運転曲線を作成し、線分beと線分fgの傾きを比べ、線分の傾きがより急であるものに対応する区間の惰行を増加させることを決定します。この流れを、運転時間がダイヤで定められた時間を超えない範囲で繰り返します。

このような手順にするのは、図4に示したように、「惰行を増加させていくと、消費エネルギーの減少の割合は小さくなっていく」ので、一つの区間だけの惰行を増加させると、そのうち改善効率が悪くなるためです。この手法を使えば、そのつど、改善効率の

良い区間が選ばれ、全体として最も良い惰行増加量の配分になります。

(2) ブレーキノッチの変更

惰行を増加させる以外にも、ブレーキノッチをより弱い段階に変更することで、消費エネルギーが減少する可能性があります。図10の例で左の運転曲線に比べて右の運転曲線は、ブレーキの時間が長く、より多くの回生エネルギーが発生しています。一方で、運転時間が同じなので、2500m付近以降の速度が低い代わりに、力行が増加しています。差し引きした消費エネルギーが減少するかどうかは、一概にはいえず、具体的なケースごとにシミュレーションを行う必要があります³⁾。

省エネな運転方法の活用

この省エネ運転曲線作成手法を、図6のシミュレーターに搭載しました。実際の路線や車両を模擬した仮想的なデータに対して省エネ運転曲線を作成したところ、経験的に省エネと知られている運転曲線に比べて、消費エネルギーが数%減少する結果が、数分程度の計算時間で得られました³⁾。

作成した省エネ運転曲線は印刷することができます。印刷した省エネ運転曲線を運転士の事前の訓練や研修の場で資料として使い、実際の運転場面に反映させるという流れで、省エネな運転方法を活用できると考えています。

おわりに

コンピューターで列車の走行シミュレーションを繰り返して、省エネな運転方法を見つける手法を紹介しました。ここでは、力行に要するエネルギーとブレーキ時の回生エネルギーを差し引きした値を少なくすることを目標にしましたが、回生エネルギーは、実際には、ほかの列車の力行で消費されます。ほかに力行している列車がない場合は、回生エネルギーは制限されます。今後は、複数の列車が同時に運行している場面での、最適な省エネ運転方法を探る研究を進めていきます。[RRR]

文献

- 1) 熊澤一将, 村上浩一, 近藤稔, 小川知行: エネルギー消費の少ない運転方法を探る, RRR, Vol.69, No.5, pp.12-15, 2012
- 2) 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, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-14-030, 2014
- 3) 熊澤一将, 佐藤圭介, 小川知行: 効率的な運転操作の組合せによる省エネルギー運転曲線の作成, 鉄道総研報告, Vol.29, No.6, pp.35-40, 2015