

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

佐藤 圭介* 熊澤 一将** 小川 知行***

An Energy-efficient Speed Profile Generator
by Combining Partial Energy-oriented Driving Approaches

Keisuke SATO Kazumasa KUMAZAWA Tomoyuki OGAWA

One way of reducing the energy consumption of trains is to drive them in an energy-efficient manner. There can be various driving patterns between two adjacent stops, or speed profiles, since there is a gap called the running time supplement between the planned running time set in a timetable and the shortest possible running time of the train. In this study, we have developed an energy-efficient speed profile generator by combining partial energy-oriented driving approaches. We have added this generator to the existing shortest running time calculation software; therefore it is applicable to various vehicles and train route alignment. Numerical experiments show that our profile prepared by the generator provides superior performance compared to the manually prepared ones.

キーワード：省エネ運転，運転曲線，惰行，回生ブレーキ，数理最適化

1. はじめに

列車運行におけるエネルギー消費量の低減手法として車両や地上設備の省エネルギー化が考えられるが、多大な費用を要さずに効果が得られる手法としては、運転方法の工夫、いわゆる省エネ運転が挙げられる。これは、列車ダイヤであらかじめ設定された駅間の走行時分（以降、ダイヤ時分と呼ぶ）と列車の最速走行時分との差である余裕時分を活用して運転することで、エネルギー消費量を低減するものである。

省エネ運転の検討にあたっては、走行シミュレーションもしくは列車の走行試験が実施されることが多いが、条件設定の自由度から、走行シミュレーションによって評価を行い、必要に応じて走行試験との整合性を取るのが現実的となっている。代表的な走行シミュレーションの実現方法として、各走行地点における列車の速度を表す運転曲線¹⁾を作成し、そのエネルギー消費量を計算する方法がある。しかしながら、担当者などの試行錯誤により、車両や線路の様々な条件（あわせて列車走行条件と呼ぶ）を考慮しながら走行シミュレーションを行わねばならず、省エネな運転方法を探索するには多くの労力を伴う。

本研究では、車両にて測定可能な力行エネルギーと回生エネルギーの差として定義するエネルギー消費量を評価指標として、停車駅間の列車走行条件とダイヤ時分が与えられたときに、省エネの観点で効率的であると考えられる惰行開始地点の調整とブレーキノッチの変更という運転操作を組み合わせた走行シミュレーションにより、省エネ運転曲線を自動作成する。また、実利用されている最速走行用の運転曲線作成システム^{2) 3)}に機能を追加することで、さまざまな列車走行条件に対して適用可能なものとする。運転曲線作成システムで省エネ運転曲線を作成することにより、エネルギー消費量の少ない運転方法の提案と、省エネ運転検討の効率向上が期待できる。

2. 省エネ運転曲線作成に関する研究動向

これまでも、エネルギー消費量の少ない運転曲線を理論的に探索する研究はなされてきた。このうち、数値解法による研究⁴⁾は自動運転を前提としており、車両のノッチ扱いが考慮されていないため、適用可能な線区が限られる。動的計画法を用いた研究⁵⁾では、ノッチ扱いの考慮が可能とされながらも、数値実験では自動運転車両が想定され、複雑な運転制御が行われている。一方、最速走行の運転曲線から省エネな運転曲線への変形を考えた研究^{6) 7)}では、この問題が数理最適化問題⁸⁾として捉えられ、最適な定速巡航速度と惰行開始地点が提案

* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

** 前 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

*** 車両制御技術研究部 動力システム研究室

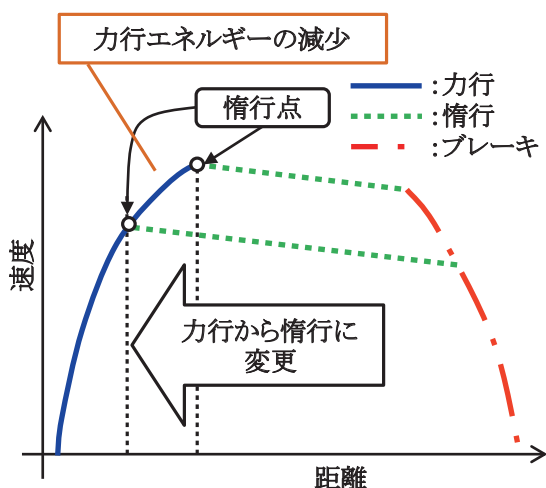


図1 惰行開始地点の調整

されている。ほかにもいくつかの省エネ運転探索手法が提案されている⁹⁾。しかし、先行研究^{6) 7)}では、定速巡航運転が可能である車両を前提としているほかに、ブレーキ時は最大減速を前提としており、回生ブレーキによる省エネ効果が検討されていない。最大減速ではなく回生ブレーキの負担率を向上させるブレーキノッチを選択することで、エネルギー消費量が低減するケースも存在するのではないかと考えられる。また、単にブレーキノッチを変更しただけでは走行時分が変わってしまうため、同一のダイヤ時分で走行するには、惰行開始地点や力行方法もあわせて調整する必要がある。つまり、省エネ運転では、エネルギー消費量の低減効果の大きい運転操作の組合せを考えなければならない。

本研究では、省エネの観点で効率的な運転操作について検討し、運転操作を組み合わせで作成する運転曲線のエネルギー消費量を評価する。

3. 効率的な省エネ運転操作

駅間内のある区間で実施される効率的な省エネ運転操作の例としては、惰行開始地点の調整、回生性能を考慮したブレーキノッチ選択、定速走行が考えられる。このうち定速走行については、車両の機器特性を考慮した検討¹⁰⁾によると、エネルギー消費量はかえって増加する場合が多く、減少する場合もその量はわずかという結果が得られている。本研究では、この知見と運転曲線作成にかかる計算時間の観点から、惰行開始地点の調整と回生性能を考慮したブレーキノッチ選択の2つを対象とする。

3.1 惰行開始地点の調整

力行している箇所を惰行に変更する、具体的には、ある運転に比べて惰行開始地点を前倒しすることで、力行していた分のエネルギーを削減できる。運転曲線上で示

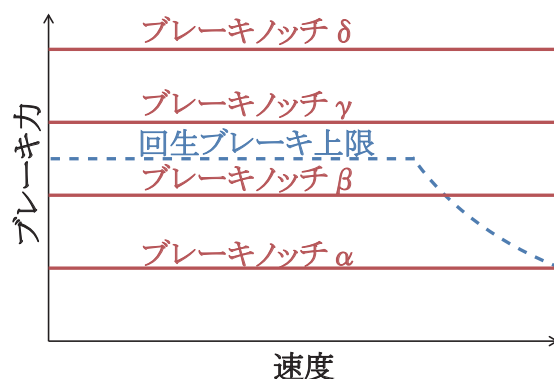


図2 車両のブレーキ特性の例

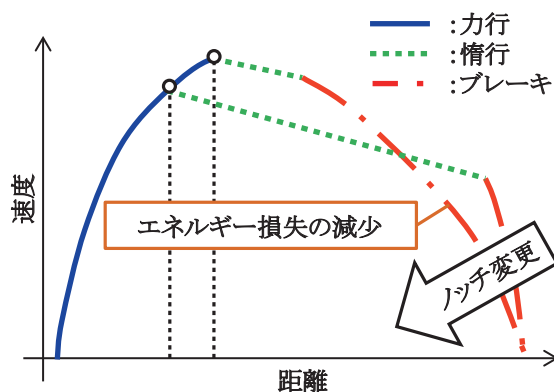


図3 同一時分でブレーキノッチが異なる運転曲線

した例を図1に示す。これは運転操作としても単純であり、実現がしやすい。惰行開始地点を前倒しすると、図1の下側の惰行曲線が示すように、速度が低下して走行時分が増加するため、余裕時分の範囲内で行う。

3.2 回生性能を考慮したブレーキノッチ選択

3.2.1 ブレーキノッチごとのエネルギー消費量

車両のブレーキ特性は、例えば図2に示すようになる。この図には、回生ブレーキの上限も記している。この例で、ブレーキノッチ γ と δ については、どの速度においても実線で示した総ブレーキ力が点線で示した回生ブレーキ上限を超過している。回生ブレーキ上限を超えるブレーキノッチは機械ブレーキによる大きなエネルギー損失が発生するため、減速力の弱いブレーキノッチ α や β を使用することが、省エネの観点において有利な場合も存在すると考えられる。図3に例を示す。一方で、先行研究^{6) 7)}より、減速力の大きいブレーキノッチを用いることが省エネ運転になるという知見もある。これは、高い減速度によりブレーキの時間が短縮されるため、同じダイヤ時分では力行の少ない運転が可能になるためである。図3の例では、右側のブレーキ曲線で減速力が大きくなっており、高い速度から短い距離および時間で停止ができるため、同じ走行時分では、惰行開始地点が前倒しされ、力行エネルギーが削減される。

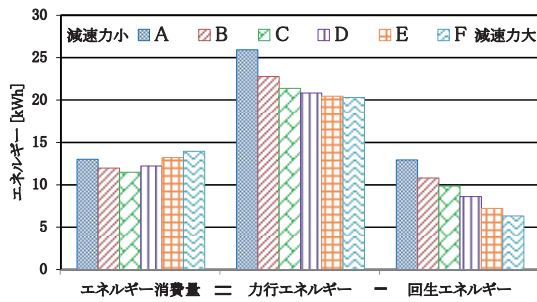


図4 ブレーキノッチごとのエネルギー消費量の例
(走行時分：180[sec])

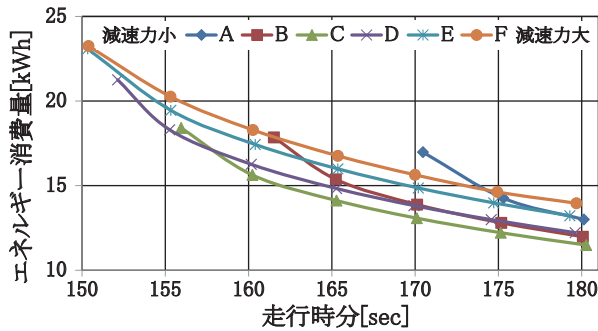


図5 走行時分を変化させたときのエネルギー消費量の例

あるブレーキ特性を持つ車両と、図3のように再力行をすることなく走行可能な仮想線区のデータに対して、以前に開発した走行シミュレータ³⁾を用いて各ブレーキノッチを使用した場合のエネルギー消費量を比較する。走行時分を180秒としたときは、機械ブレーキの負担が少なく減速力の大きいブレーキノッチCを使用した場合にエネルギー消費量が最小となっている(図4)。また、実在のある列車の特定の駅間での走行試験結果¹¹⁾では、回生ブレーキの上限付近のブレーキノッチの使用で、消費電力量が少なくなっている。

3.2.2 走行時分とブレーキノッチ

次に、各ブレーキノッチについて走行時分を変化させた場合のエネルギー消費量をシミュレーションする。その結果を図5に示す。この例においては、エネルギー消費量が最小となるブレーキノッチは、走行時分によってブレーキノッチCまたはDとなっている。この例から、エネルギー消費量が少なくなるブレーキノッチの傾向はあると考えられるものの、最小のものを求めるには全てのブレーキノッチについてシミュレーションするのが確実であるといえる。

4. 省エネ運転曲線の作成

本研究では、与えられた列車走行条件に対して、まず

運転曲線作成システム²⁾で最速走行の運転曲線を作成したあと、ダイヤ時分を入力し、最速走行の運転曲線を元にして惰行開始地点の調整とブレーキノッチの変更を行い、ダイヤ時分を超えない範囲で省エネとなる運転曲線を作成する。

4.1 基本的な考え方

2章では、図1や図3で示した、力行・惰行・ブレーキがこの順に1回ずつ発生する運転曲線に対して、効率的な省エネ運転操作を議論したが、実在する多くの線区では、速度制限などが存在するため、より複雑な曲線になる。しかし、そのような線区でも、最速運転曲線はおおむね、力行後、惰行を挟んで速度制限の手前でブレーキをかけ、速度制限の通過後に再力行することを繰り返す形になっている。そこで、本研究で提案する省エネ運転曲線作成手法は、速度制限の手前のブレーキの終了点を境界として、最速運転曲線を分割し、おのおのの区間に分かれた部分的な運転曲線に対して、効率的な省エネ運転操作を適用し、その結果を統合するという方法をとる。効率的な省エネ運転操作の組合せ方法であるが、最速走行の運転曲線のブレーキ箇所を、あるブレーキノッチに変更したうえで、先行研究^{6) 7)}に近い手法により前倒しをする惰行開始地点と前倒しの距離を決定する。以降、また別のブレーキノッチに変更したうえで、惰行開始地点と距離の決定処理を行うことを繰り返す。

4.2 省エネ運転曲線作成手法

本研究の省エネ運転曲線作成手法を以下に示す。なお、記号「:=」は変数への値の代入を表す。

- [1] 最速走行の運転曲線を作成する。
 $T_0 :=$ 運転曲線の走行時分とおく。
- [2] ダイヤ時分 $T_{\text{Max}} (\geq T_0)$ を入力する。
- [3] 速度制限手前のブレーキ終了点と、停止ブレーキの終了点を抽出する。
- [4] 各抽出ブレーキ点のブレーキノッチの組合せをすべて列挙する。
- [5] まだ試していない各抽出ブレーキ点のブレーキノッチの組合せが存在しなければ、[6]へ。
存在すれば、
[5]-1 $B :=$ 任意の、まだ試していないブレーキノッチの組合せとおく。
ブレーキノッチの組合せを B に変更した

運転曲線を作成する。

T_B := 運転曲線の走行時分とおく。

W_B := 運転曲線のエネルギー消費量とおく。

[5]-2 走行区間を [3] の地点ごとに分割し、区間 1, ..., n とおく。

[5]-3 区間 1 を除く各区間の最初の力行から、走行方向の反対側に力行の補助曲線を描く。

[5]-4 各区間 $i := 1, \dots, n$ について、区間 i の終端に近い惰行開始地点を微小距離前倒しした、仮の運転曲線を作成する。

T_B^i := 運転曲線の走行時分とおく。

W_B^i := 運転曲線のエネルギー消費量とおく。

[5]-5 $T_B^i \leq T_{Max}$ かつ $-(W_B^i - W_B)/(T_B^i - T_B) \geq 0$ を満たす区間 i が存在すれば、

$-(W_B^i - W_B)/(T_B^i - T_B) \geq 0$ の値が最大の区間 i の惰行を前倒しした運転曲線を採用する。

$T_B := T_B^i, W_B := W_B^i$ とおく。

存在しなければ、[5] の冒頭へ。

[5]-6 力行がなくなっている区間があれば、走行方向手前側の区間と統合する。

[5]-4 の冒頭へ。

[6] 作成した運転曲線のうち、走行時分 $T_B \leq T_{Max}$ かつエネルギー消費量 W_B が最小の運転曲線を出力する。

この省エネ運転曲線作成手法は、最速走行の運転曲線から省エネな運転曲線への変形を線形制約付き凸最適化問題（凸計画問題）⁸⁾ としてモデル化したものに対するアルゴリズム¹²⁾ となっている。

4.3 省エネ運転曲線の作成例

提案アルゴリズムの [3] 以降の流れを運転曲線上に描いた例を図 6 に示す。[3] では、[5]-1 のブレーキノッチ変更や、[5]-2 の走行区間分割に利用するための、ブレーキの終了点を抽出する。ただし、下りこう配で惰行とブレーキを繰り返している箇所のブレーキは抽出しない。これは、抽出してしまうと、[5]-1 で弱いブレーキノッチに変更したときに、ブレーキとブレーキの間の惰行の時間が短くなり、実際に運転可能とはならなくなるためである。[4] では、各ブレーキ点で使用可能なノッチの全組合せを列挙し、[5] で、一つ一つの組合せについて、[5]-1 ~ [5]-6 を適用する。図 6 は、最速走行の運転曲線で 2 か所のブレーキがブレーキノッチ D という組合せであったものを、ともにブレーキノッチ C という組合せにする場合を表している。[5]-1 にて、[3] で抽出したブレーキ終了点は変えずにブレーキノッチを変更し、[5]-2

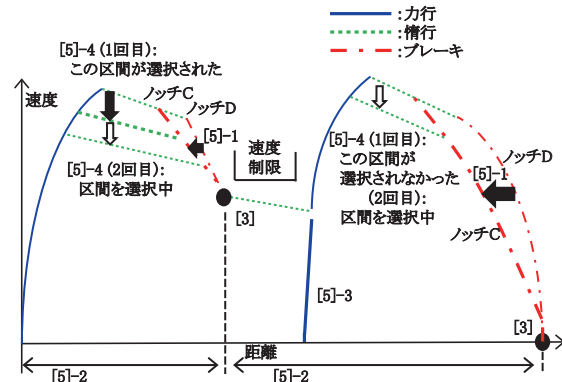


図 6 省エネ運転曲線手法の流れ

で運転曲線を分割して各区間がおおむね力行→惰行→ブレーキという運転曲線になるようにする。[5]-3 では、ある区間で惰行が長くなったとしても次の区間の運転曲線に影響を与えないよう、再力行の開始地点を補助曲線として用意する。[5]-4 で、各区間について、仮に惰行開始地点を微小量前倒した場合の運転増加時分あたりのエネルギー消費量の減少量、つまり、エネルギー消費量の改善度を試算する。このとき、実際に運転可能な運転曲線になるよう、前後の力行やブレーキの時間が極端に短くなることを避ける。[5]-5 で、惰行を前倒してもダイヤ時分に到達せず、かつ、改善度が正の区間があれば、その中で改善度の最も大きい区間の惰行を前倒しする。そうでない場合には、現在のブレーキノッチの組合せにおける惰行前倒し処理を終了し、[5] の冒頭に戻り、まだ試していないブレーキノッチの組合せが残っていれば、その組合せに対して、[5]-1 ~ [5]-6 を適用する。[5]-6 にて、力行がなくなりこれ以上惰行を前倒しできない区間があれば、手前の区間と統合する。そして、区間を統合したかどうかに関わらず、[5]-4 に戻る。これを、[5]-5 の判定条件が成立しなくなるまで繰り返す。図 6 では、[5]-4 の 1 回目の処理で、手前側の区間の惰行を前倒したほうが後ろ側の区間で惰行を前倒するよりも改善度が高いと判断して、手前側の惰行の前倒しを採用し、2 回目の処理で、その区間の惰行をさらに前倒するか今度は後ろ側の区間の惰行を前倒するかを選択しようとしている。

5. 省エネ運転曲線の評価

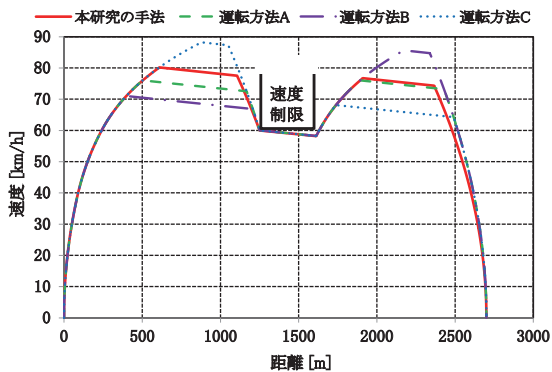
5.1 評価の条件

仮定の線区と電車を例に、開発した省エネ運転曲線作成手法を評価する。具体的には、以下に示すような、省エネ運転のために検討されている一般的な運転方法とあわせて、以前に開発した走行シミュレータ³⁾ を用いて運転曲線の消費電力量を算出し比較する。

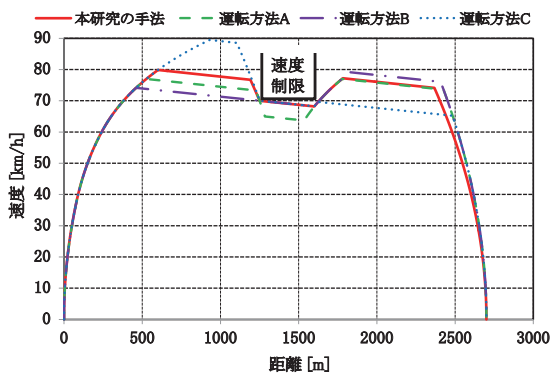
- (1) 運転方法 A：ダイヤ時分どおりに走行できる範囲内で、最高速度を抑制した運転をする。最高速度に達した場合は細かい惰行と力行を繰り返す（ノコギリ運転）。
- (2) 運転方法 B：速度制限へ進入する際に、なるべくブレーキによる減速を削減する運転を行う。速度制限への進入方法が惰行になっても余裕時分が残る場合は、速度制限の通過速度は低下させず、再力行の距離を削減する。
- (3) 運転方法 C：速度制限通過後の再力行を削減する運転を行う。再力行がすべて惰行になっても余裕時分が残る場合は、速度制限の通過速度は低下させず、速度制限へ進入する際のブレーキを削減する。

運転方法の違いによる消費電力量の比較を適切に行うため、各運転方法の走行時分は一定の範囲内にそろえることとする。

最速走行の運転曲線が図 1 のように力行・惰行・ブレーキが 1 回ずつとなる路線では運転方法に差が出ないため、再力行が発生するような複雑な運転方法になるよう線路条件を設定する。そのため、駅間中央に速度制限を設定し、制限速度として 60[km/h] と 70[km/h] のパターンを用意する。



(a) 速度制限が60[km/h]の場合



(b) 速度制限が70[km/h]の場合

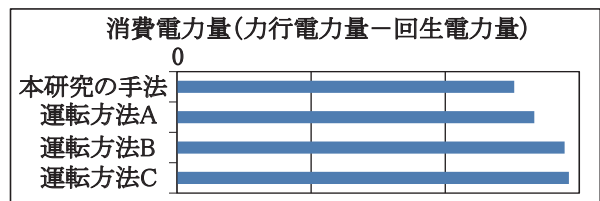
図 7 各運転方法の運転曲線

5.2 評価結果

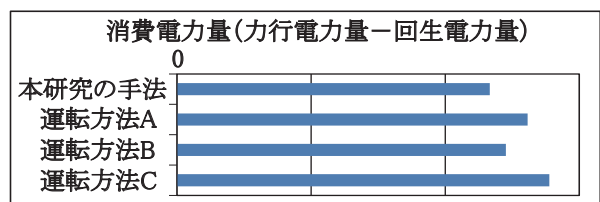
各運転方法の運転曲線を図 7 に、それらの走行時分と消費電力量を図 8 に示す。運転方法 A, B, C を比較すると、速度制限を 60[km/h] と設定した場合は、図 8 に示したように、最高速度を抑制する運転方法 A の消費電力量が少なくなっている。運転方法 A の最高速度は 75[km/h] 前後であるが (図 7 (a)), これにより走行抵抗が低減し、エネルギーの損失が抑えられていると考えられる。一方で、制限速度が 70[km/h] の場合は、運転方法 B のほうが消費電力量が少なくなっている。運転方法 B では速度制限へ進入する手前でブレーキ操作をしておらず、ブレーキ損失が発生しないことが省エネに貢献していると考えられる (図 7 (b))。このように、一律に方針を定めた運転方法では、どの運転方法が省エネとなるかは、線路条件に依存して異なるものとなる。

本研究の手法で作成した省エネ運転曲線は、運転方法 A, B に比べて手前の段階でやや弱いノッチで停止ブレーキ操作を開始しているため、同じ時分で走行するために、速度制限が 60[km/h] と 70[km/h] の両方の場合において、最初の力行操作が長くなっている。それにもかかわらず、図 8 より、力行電力量から回生電力量を引いた消費電力量はほかの運転方法よりも少なくなっている。一律に方針を定めた運転方法では、このような線路条件の違いに応じた省エネ運転方法は発見しにくく、本研究の手法によってこそ探索できるものと考えられる。

この例における本手法の計算時間は、市販の PC (CPU: Core i7-4770 (3.4GHz, 1 コア使用), メモリ: 3.41GB, OS: Windows 7 32bit SP1) を用いて約 5 分であった。省エネ運転方法の検討にあたり、本手法を適用することは十分効率的であるといえる。



(a) 速度制限が60[km/h]の場合



(b) 速度制限が70[km/h]の場合

図 8 各運転方法の消費電力量

6. まとめと今後の課題

本研究では、エネルギー消費量の低減効果のある運転操作の組合せとして、惰行量増加に対するエネルギー消費低減量の増加を評価値とした惰行開始地点の最適化と、ブレーキ点ごとのブレーキノッチの適切な組合せの抽出を基にした運転曲線作成手法を開発した。この手法を仮想路線に適用したところ、作成された省エネ運転曲線が省エネ運転のために検討されている一般的な運転方法と比べてエネルギー消費量が少なくなることと、省エネ運転検討の効率が向上することを確認した。

今後の課題として、開発した省エネ運転手法の列車走行試験による検証と、省エネ運転曲線の運転現場への普及が挙げられる。前者に関しては、力行・惰行・ブレーキがそれぞれ複数回発生する路線や、回生ブレーキ特性の異なる車両など、さまざまな条件を考慮して効果を検証することが必要である。後者に関しては、作成した省エネ運転曲線を運転士に指導する方法の検討が必要である。また、これらの課題の先には、複数列車が同時に走行する環境での全体のエネルギー消費量の低減手法の開発と、それに基づく運行管理の実現という研究課題がある。今後も、理論と実践の両面から、省エネ運転の検討を進めていく。

文献

- 1) 運転理論研究会:運転理論 (再改訂版), 日本鉄道運転協会, 2010
- 2) 平野純一, 富井規雄, 山下修:運転曲線システム SPEEDY の開発, RRR, Vol.49, No.5, pp.9-14, 1992
- 3) 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
- 4) 高英聖, 宮武昌史:直流饋電特性を考慮した列車運転曲線最適化問題の数値解法, 電気学会論文誌 D, Vol.126, No.8, pp.1104-1112, 2006
- 5) 高英聖, 古関隆章, 宮武昌史:動的計画法を用いた列車運転曲線最適化問題の求解法, 電気学会論文誌 D, Vol.125, No.12, pp.1084-1092, 2005
- 6) Horn, P. and Zinke, R., "Energy-optimal control of trains in long distance traffic," in Proceedings of 2nd Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Budapest, Hungary, pp.170-184, November, 1990.
- 7) 村田悟, 永田剛士, 秋山弘之:駅間の速度制限を考慮した省エネルギー運転曲線作成方法, 平成7年鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL'95), pp.479-482, 1995
- 8) 田村明久, 村松正和:最適化法, 共立出版, 2002
- 9) Wang, Y., Ning, B., Cao, F., De Schutter, B., and van der Boom, T.J.J., "A survey on optimal trajectory planning for train operations," in Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT 2011), pp.589-594, Beijing, China, July, 2011.
- 10) 小川知行, 近藤稔, 村上浩一:機器損失特性を考慮した定速運転時の消費エネルギーの検討, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-09-040, 2009
- 11) 小川知行, 熊澤一将, 杉田憲亮, 今村洋一, 美濃部晋吾, 川村淳也, 岩崎正憲:ブレーキノッチ選択による省エネ運転の検証試験, 電気学会論文誌 D, Vol.134, No.12, pp.1022-1030, 2014
- 12) 熊澤一将, 佐藤圭介, 小川知行:局所的な省エネ運転操作を組み合わせた省エネ運転支援システムの開発, 電気学会論文誌 D, Vol.135, No.4, pp.368-375, 2015