

鉄道車両のエネルギー消費原単位簡易計算手法

車両制御技術研究部 動力システム研究室

主任研究員 近藤 稔

1. はじめに

省エネ車両の導入効果を評価するためには、車両のエネルギー消費量を評価する尺度が必要であり、走行距離あたりのエネルギー消費量を編成両数で割ったエネルギー消費原単位という尺度が改正省エネ法で用いられている。省エネ車両の導入効果を事前評価するためにエネルギー消費原単位を計算する場合には、走行シミュレーションを行うのが一般的である。しかし、その実施には多くのデータ入力等を必要とするため、走行シミュレーションを行わない簡易な計算方法があると便利である。特に様々な車両や路線を保有する規模が大きい鉄道事業者の場合には、車両と路線や運用の組み合わせが膨大になるため、簡易な計算法の必要性が高いと考えられる。そこで、走行シミュレーションを行わずに車両のエネルギー消費原単位を簡易に計算する方法を開発した。以下では、本計算法の概要を説明するとともに、その活用方法について紹介する。

2. 簡易計算法の概要

2.1 簡易計算法の基本的考え方

図1は電車が駅を出発してから次の駅に停車するまでのエネルギーの変化の例を示したものである。走行シミュレーションでエネルギー消費量を計算する場合には、まず、各位置（各時刻）での消費電力を計算する。そして、通常の場合、力行時の消費電力を積算して力行エネルギーを計算し、ブレーキ時の回生電力を積算して回生エネルギーを計算し、力行エネルギーから回生エネルギーを引くことでエネルギー消費量を計算する。一方、図1から分かるように、機器損失、走行抵抗と曲線抵抗の損失、非回生ブレーキ損失を個別に計算できれば、それらを合計することでもエネルギー消費量の計算が可能である。この方法では、エネルギー消費量の内訳も明らかになるため、省エネルギー化を推進するために有用な知見が得られることが期待できる。そこで、本計算法では各損失を個別に計算し合計する方法を用いる。

なお、実際の運用では駅間毎に駅間距離や走行時間は異なり複雑である。そこで、本計算法では運用を表現する情報として、列車ダイヤに相当する情報を与えることとし、まず、走行距離を駅間の数で割って平均駅間距離を計算し、さらに、走行時間を駅間の数で割って平均駅間走行時間を計算する。そして、平均駅間距離の駅間を図1のような運転パターンに従い平均駅間走行時間をかけて走行する運用について計算を行う。

2.2 各損失の計算方法

次に各損失の計算方法について説明する。まず、機器損失について考えると、車両の総合的な

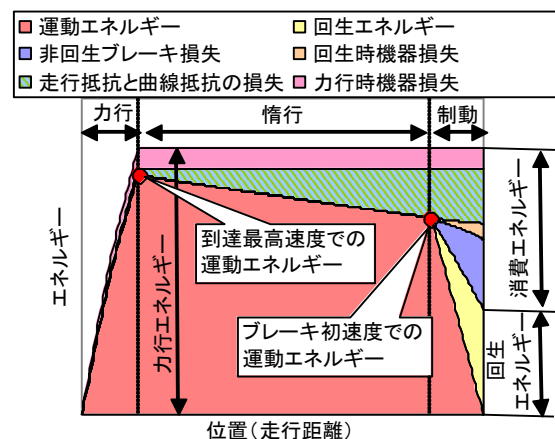


図1 走行時のエネルギーの変化

効率と到達最高速度が分かれば、到達最高速度から車両の運動エネルギーを計算して、そのエネルギーを供給する際に発生する損失を効率から求め、力行時の機器損失を計算できる。同様に、ブレーキ初速度や回生性能が分かれば、ブレーキ時の機器損失や非回生ブレーキによる損失を計算できる。また、走行抵抗による損失は、走行抵抗を距離で積分することで計算できるため、速度を距離で積分して全走行距離で割った距離平均速度が分かれば、それを走行抵抗式に代入することで、走行抵抗による距離あたりの損失が計算できる。

そこで、本計算法では到達最高速度、ブレーキ初速度、距離平均速度を得るために、まず、平均駅間距離を平均駅間走行時間で割って時間平均速度を算出する。そして、実際の走行データを分析して得られた回帰式を用い、時間平均速度からそれらの速度を算出している。

図2は時間平均速度から到達最高速度を計算するための回帰式の例である。図2では停車駅間毎に実際の走行データを処理して求めた時間平均速度と到達最高速度の関係をプロットしているが、車種に依存しないほぼ一定の関係があることが分かる。そこで、最小二乗法によりその関係を表す回帰式を予め求めて計算に用いている。

このように回帰式を予め求めておくことで、走行シミュレーションを行わなくともエネルギーの計算に必要な速度の情報を得る事ができるようにしている点が本計算法の特徴である。なお、機器効率については機器の試験結果を基に車両の駆動システム全体の効率を算出して用いている。さらに、回生性能は、それぞれの車両の回生性能に応じて回生ブレーキの割合を設定して計算に用いている。

このようにして、各損失について算出し、それらを合計することでエネルギー消費原単位を計算することができる。よって、基本的には車両の編成両数、質量、機器効率、回生性能、平均駅間距離と平均駅間走行時間が分かればエネルギー消費原単位が計算できる。

2. 3 計算と実測の比較

本計算法の妥当性を検証するため、複数の車両について計算を行い、計算結果と消費電力量の実測値を比較した。対象とした電車の

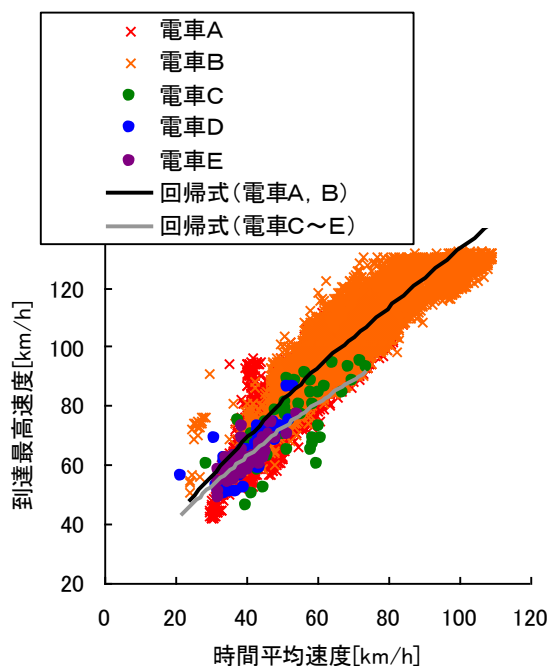


図2 到達最高速度と時間平均速度の関係

表1 計算対象とした電車の方式と運用条件

車両	A	B	C	D	E	F
制御方式	インバータ	インバータ	チョップ	添加励磁	抵抗制御	抵抗制御
車両種別	通勤	近郊	通勤	通勤	通勤	特急
平均駅間距離[km]	2.28	6.64	2.12	1.18	1.23	19.3
時間平均速度[km/h]	58.2	83.6	52.6	41.8	41.2	76.7

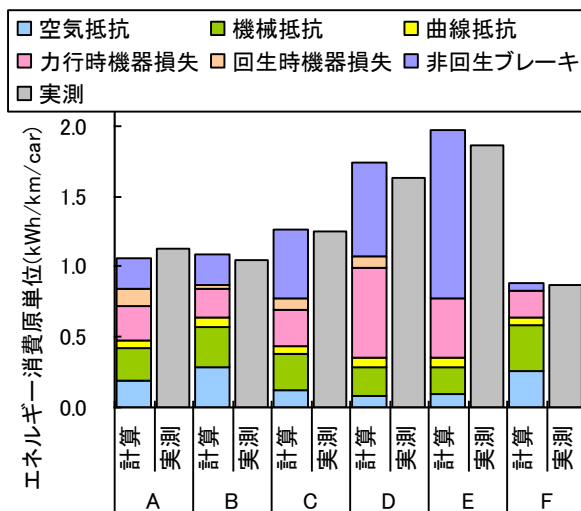


図3 計算と実測の比較（電車）

方式と運用条件（表1）、計算結果（図3）を以下に示す。図3によると、計算と実測は概ね一致している。これにより、本計算法が電車のエネルギー消費量の概算法として有効であることが確認できる。

また、本簡易計算法を用いることで、エネルギー消費原単位の値とその内訳が示されるため、何故エネルギー消費原単位に違いが生じるかが理解しやすい。例えば、共に通勤電車で駅間距離の短い電車Aと電車Eを比較すると、電車Aでは回生ブレーキの使用によりブレーキ損失があまり発生しないため電車Eよりもエネルギー消費原単位が大幅に小さくなっていることが分かる。一方、電車Fのような特急ではブレーキをかけて停止する頻度が少ないため、回生ブレーキを用いない抵抗制御車であってもブレーキ損失がほとんど無く、エネルギー消費原単位の値が小さくなっていることが分かる。

3. 簡易計算の活用例

3.1 車種と運用の組み合わせ

次に、本計算法の活用例を示すため、車両と運用の組み合わせによる省エネ効果の計算例を示す。ある路線において、各駅停車と急行の運用があり、車両は新型のインバータ車と旧型の抵抗制御車の二種類があるとす。このとき、インバータ車を各駅停車に割り当てた場合と急行に割り当てた場合とでエネルギー消費にどのような違いが出るかを検討する。検討のための具体的データとしては図3の計算に用いたデータを使用し、各駅停車、

急行の運用は、それぞれ車両A、Bの運用条件を用い、インバータ車の車両データは車両Aのものを、抵抗制御車の車両データは車両Eのものを使用する。以上の前提で各駅停車と急行それぞれにおいてインバータ車と抵抗制御車のエネルギー消費原単位を計算した結果を図4に示す。

図4で各駅停車に注目すると、インバータ車のエネルギー消費原単位は抵抗制御車の約半分になっており、通勤電車のエネルギー消費に関してよく知られている知見と一致する。一方、急行に注目すると、車両間のエネルギー原単位の差がほとんど無くなっている。つまり、抵抗制御車をインバータ車に置き換えることにより大きな省エネが期待できるのは各駅停車の場合であり、急行の場合は大きな効果は期待できない。

この理由の一つは、急行では平均駅間距離が長いいため、停止時に生じるエネルギー損失がエネルギー消費全体に占める割合が比較的小さいということがあ。そして、もう一つの理由としては、駅間距離が長くなり最高速度が高くなる結果としてブレーキ初速度が高くなり、インバータ車においても十分な回生ブレーキ力が確保できない高速域からブレーキをかけることになるため、空気ブレーキにより発生する損失が大きくなっていることが挙げられる。

新型車両をどの運用に割り当てるかはエネルギー消費の観点からのみ決まるものではないが、少なくともエネルギー消費の観点からは新型のインバータ車は停車駅間距離の短い運用に割り当てるのが良い。

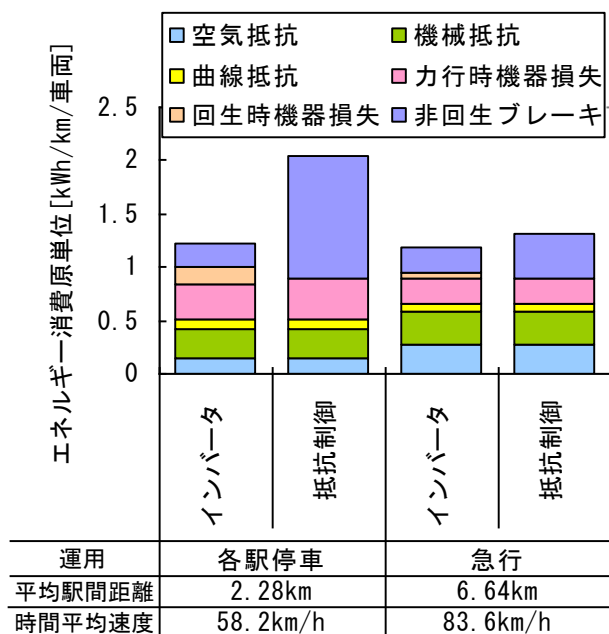


図4 車種と運用の組み合わせによる省エネ

運用と車種の組み合わせによるエネルギー消費の削減はほとんどコストをかけずに実施可能であると考えられ、もし、現時点でエネルギー消費原単位が大きくなる組み合わせで車両を運行しているのであれば、運用の変更のみで大幅な省エネを達成できる可能性がある。

3. 2 機器の高効率化

次に、機器の高効率化による省エネ効果の試算例を示す。図5は電車Aの車両データを用い、平均駅間距離が異なる電車D、A、Bの運用条件それぞれについて、車両の駆動システム効率の向上によりどの程度エネルギー消費原単位が変わるかを計算した結果を示したものである。電車Aの車両データでは駆動システムの効率は87%であるが、これが3%向上して90%になった場合と5%向上して92%になった場合について計算を行った。3%の効率向上は最新の技術を用いて高効率化を図った誘導電動機の適用に、5%の効率向上は永久磁石同期電動機の適用に相当する。

図5によると、駅間距離が短い場合の方が高効率化による省エネ効果が大きく、駅間距離が1.18kmの場合には5%の効率向上で約2割の省エネとなっている。たった5%の効率向上で2割の省エネ効果が得られることは不思議に思えるかもしれない。しかし、効率が87%であるということは、入力電力の13%が機器損失となることを意味しており、効率92%の場合には機器損失が8%となる。つまり、効率が5%向上することで、機器損失は13%から8%となり、約4割削減される。そのため、機器損失が約半分を占める短い駅間の運用の場合には、たった5%の効率向上でも大幅な省エネ効果が得られるのである。

図5によると、駅間距離が短い場合の方が高効率化による省エネ効果が大きく、駅間距離が1.18kmの場合には5%の効率向上で約2割の省エネとなっている。たった5%の効率向上で2割の省エネ効果が得られることは不思議に思えるかもしれない。しかし、効率が87%であるということは、入力電力の13%が機器損失となることを意味しており、効率92%の場合には機器損失が8%となる。つまり、効率が5%向上することで、機器損失は13%から8%となり、約4割削減される。そのため、機器損失が約半分を占める短い駅間の運用の場合には、たった5%の効率向上でも大幅な省エネ効果が得られるのである。

永久磁石同期電動機のような高効率モータを導入すれば省エネになることは明らかであるが、一般に、効率の良い機器は導入コストが高くなる傾向があり、そのことが高効率機器の普及を妨げる一因となっている。

そこで、本計算法を用いてエネルギー消費原単位を定量的に評価すれば、そこに走行距離や電力コスト単価をかけていくことで電力コストの削減効果を計算できるようになり、どの運用であれば何年で導入コストの上昇分を回収できるかといった検討が可能となる。

4. おわりに

車両のエネルギー消費量原単位の計算を簡易に行う手法を開発し、実測との比較によりその有効性を確認した。また、その活用方法について例示した。本発表では電車のみを対象としたが、気動車についても同様の考え方で計算可能である事が確認されている。¹⁾ 本計算法が鉄道事業者における省エネ計画策定の際に活用され、鉄道の更なる省エネに貢献できることを期待する。

文献：

- 1) 近藤 稔・小川 知行・村上 浩一：「鉄道車両のエネルギー消費量簡易計算法」, 鉄道総研報告, Vol. 25, No. 8, pp. 41-46 (2011)

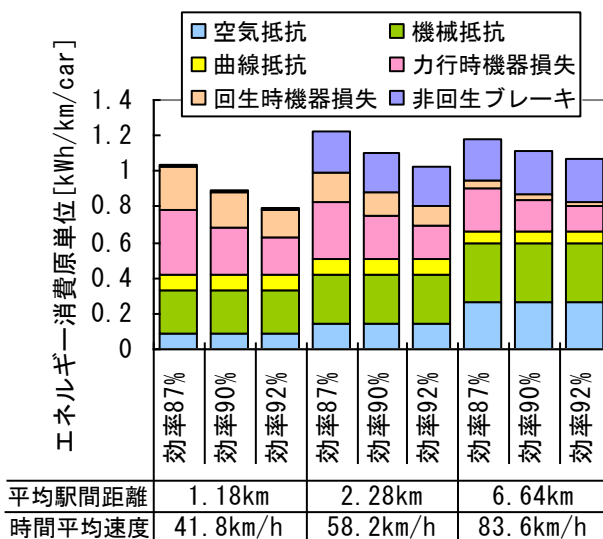


図5 機器の高効率化による省エネ