電車の省エネ技術の上手な使い方

電車を省エネにする技術には，回生ブレーキの利用，モーターの高効率化などがあります。一方，通勤電車と特急電車のように走り方が違う電車では，これらの省エネ技術による効果が大きく異なります。ここでは，省エネ計画作成支援のために開発したエネルギー消費の簡易計算法を用いて，省エネ技術の上手な使い方について考えます。

近藤　稔
Minoru Kondo
車両制御技術研究部
動力システム研究室
主任研究員
専門分野／鉄道車両のエネルギー消費計算，電車用モーター

なぜ電車が走るとエネルギーが消費されるのか？

電車が加速するときには，架線から受け取った電気でモーターを回して加速します。これをエネルギーの観点で見ると，架線から得た電気エネルギーをモーターで電車の運動エネルギーに変換したと考えることができます。

逆に，停止するときにはモーターを発電機として動作させて，電気を架線に戻します。このようなブレーキ方法を回生ブレーキと呼びます。このときには，逆に，運動エネルギーが電気エネルギーに変換されたことになります。

もしも，加速時に架線から得たエネルギーの全てをブレーキ時に架線に戻すことができれば，電車を走らせるのに消費されたエネルギーはゼロになります。しかし，実際のエネルギー消費はゼロではありません。

まず，加速をやめて惰性で走っている間に，電車の速度はだんだんと遅くなっていきます。速度が遅くなるということは運動エネルギーが小さくなるということなので，ブレーキをかけた際に戻すことができるエネルギーも小さくなります。

惰性で走っている間に速度が落ちるのは，空気抵抗や車輪とレールの間の摩擦などで発生する抵抗などの走行抵抗があるためです。この走行抵抗により，運動エネルギーは熱エネルギーに変換され，失われます。

また，加速時や回生ブレーキ時にモーターを動作させる際には，モーターなどの電気機器に電流が流れますが，電流が流れる際には電気抵抗により熱が発生します。つまり電気エネルギーの一部が熱エネルギーになります。こういった形で失われるエネルギーのことを機器損失と呼びます。

走行抵抗や機器損失があるため，加速時には架線から受け取った電気エネルギーの一部は熱エネルギーになり，全てが運動エネルギーにはなりません。また，回生ブレーキ時にも運動エネルギーの一部が熱エネルギーになるので全てを電気エネルギーに戻すことができません。

また，実際の電車は，技術的・経済的理由から，常に全てのブレーキ力を回生ブレーキで得るように設計されていません。そのため，摩擦を利用した機械ブレーキなども併用されるため，

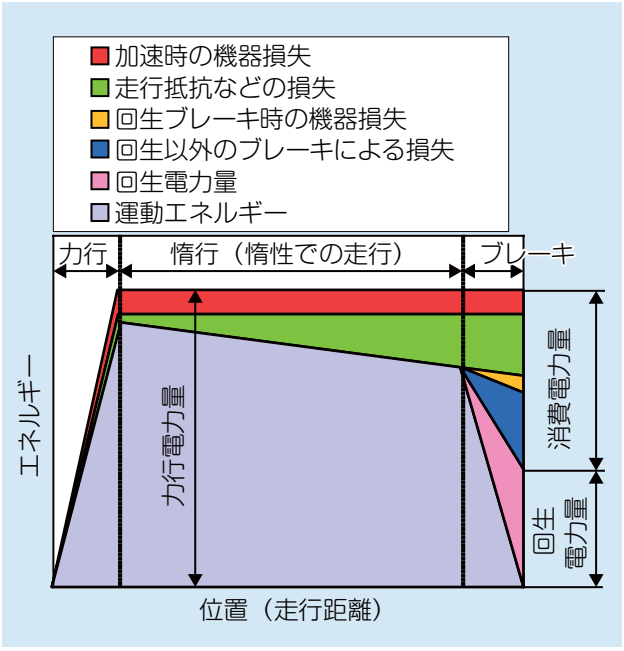

図1　電車走行時のエネルギーの変化

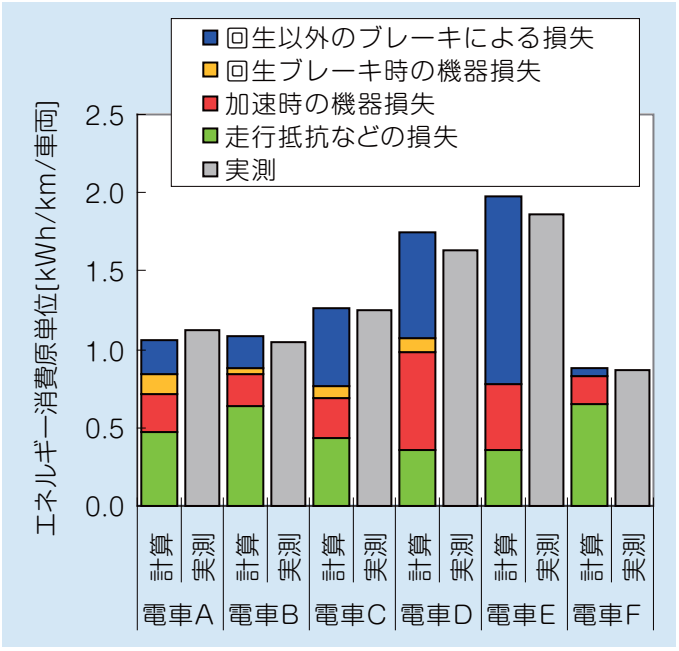

図2　電車のエネルギー消費原単位計算結果

表1　計算対象とした電車の方式と平均駅間距離

	電車 A	電車 B	電車 C	電車 D	電車 E	電車 F
制御方式	インバータ		チョッパ	添加励磁	抵抗制御	
電車種類	通勤	近郊	通勤	通勤	通勤	特急
平均駅間距離	2.3km	6.6km	2.1km	1.2km	1.2km	19.3km

そこでも運動エネルギーの一部が熱エネルギーになって失われます。特に，古い電車では技術的な理由から回生ブレーキは使われていませんでしたので，ブレーキ時には運動エネルギーを全て熱エネルギーにして捨てていました。

電車のエネルギー消費量を簡易に計算する

このような電車走行時のエネルギーの変化をグラフにすると**図1**のようになります。

一般に電車のエネルギー消費を測定したり計算したりする際には，加速時に投入した電気エネルギー（力行電力量）から回生時に架線に戻した電気エネルギー（回生電力量）を引いて消費電力量，すなわち，エネルギー消費量を求めます。

しかし，**図1**から分かるように，走行抵抗や機器損失によって失われたエネルギーを足し合わせることでもエネルギー消費量を計算することができます。

鉄道総研ではこの考え方を用いて，鉄道会社における省エネ計画作成支援などを目的とした，電車のエネルギー消費量の簡易計算法を開発しました[1)]。この簡易計算法では電車や路線の詳細な情報が分からなくても，電車の重さや機器の効率などの基本的な電車のデータと列車ダイヤから分かる基本的な運用データからエネルギー消費量を計算できます。

図2はその簡易計算法を**表1**に示すような様々な電車に適用してエネルギー消費原単位（☞参照）を計算し，実測値と比較した結果を示しています。簡易計算法の計算結果と実測値は概ね一致しており，この計算法の考え方の

☞ エネルギー消費原単位

「エネルギー消費原単位」とは，輸送量あたりのエネルギー消費量を表す指標です。改正省エネ法ではこの原単位の低減を目標としており，旅客輸送の場合，列車のエネルギー消費量を編成両数と輸送距離で割った車両キロあたりの値を，貨物輸送の場合には輸送重量と輸送距離で割ったトンキロあたりの値を原単位としています。なお，省エネ法以外では，旅客人数と輸送距離で割った人キロあたりの値を原単位として用いる場合もあります。

エネルギー消費原単位の値は鉄道事業者の環境報告書などに記載されていますが，その値には車両の空調や地上設備などのエネルギー消費も含まれます。一方，ここで扱う原単位に含まれるのは走行に伴い車両で発生するエネルギー消費のみです。そのため，その値は環境報告書に記載される一般的な値よりも小さくなっています。

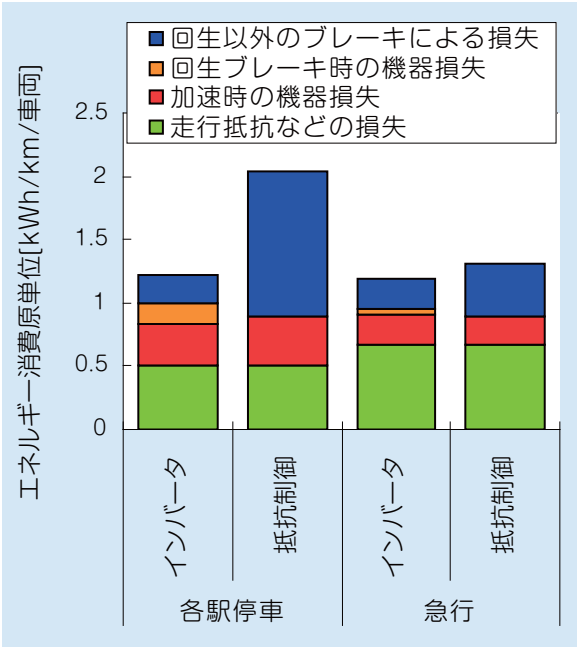

図3　電車の種類と運用の組み合わせによるエネルギー消費原単位の違い

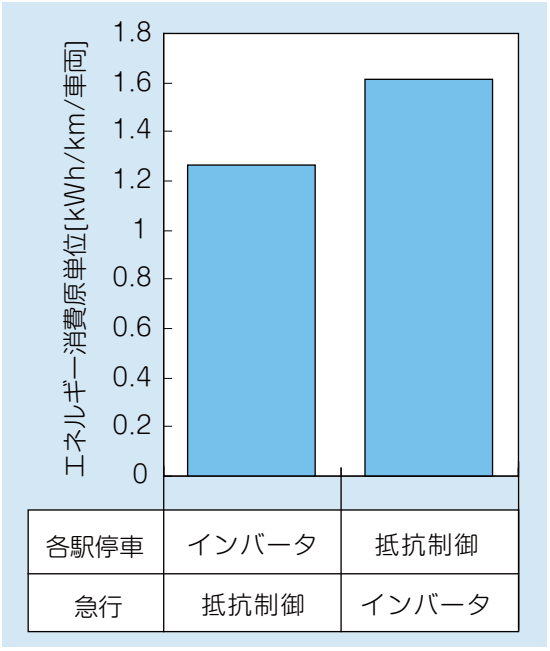

図4　異なる運用への電車の割り当て方による路線の平均エネルギー消費原単位の違い

妥当性が確認できます。

また，本計算法ではエネルギー消費の内訳が示されるため，様々な電車でエネルギー消費の差が生じる理由が明らかになります。

例えば，電車A，Bは新しいインバータ電車でブレーキ力のほとんどを回生ブレーキでまかなっているのに対し，電車Eは古い抵抗制御の電車で回生ブレーキを一切用いていません。そのため，電車Eではエネルギー消費の半分以上が回生以外のブレーキによる損失となっていますが，電車A，Bではその損失がほとんど無くなっており，電車Eの半分程度のエネルギー消費になっています。

その一方で，同じく古い抵抗制御の電車である電車Fではブレーキによる損失はほとんどありません。それは電車Fが特急電車であるため，ブレーキをかける頻度が少なく，ブレーキ損失の量が少ないためです。このように，同じ抵抗制御電車でも走り方によってエネルギー消費の仕方は大きく異なります。そのため，省エネ計画を考える際には電車の省エネ技術だけではなく，通勤電車か特急電車かといった運用の仕方にも注目する必要があります。

省エネ電車を上手に運用する

そこで，運用に着目して省エネ電車を効果的に活用する方法について考えてみます。例として，ある路線において，各駅停車と急行の運用が半々の割合であり，新しいインバータ電車と古い抵抗制御電車が半々の割合で混在している場合を考えます。

このとき，各電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簡易計算法で計算してみます。計算に用いるデータには**図2**の計算に用いたデータを使用し，各駅停車，急行の運用は，それぞれ電車A，Bの運用条件を用い，インバータ電車のデータは電車Aのものを，抵抗制御電車のデータは電車Eのものを使用します。

以上の前提で各駅停車と急行それぞれについてインバータ電車と抵抗制御電車のエネルギー消費原単位を計算した結果を**図3**に示します。

図3で各駅停車に注目すると，インバータ電車のエネルギー消費原単位は抵抗制御電車の約半分になっており，大幅な省エネ効果があることが分かります。一方，急行では，電車間のエネルギー原単位の差がほとんど無く，省エネ効果はあまり期待できません。その理由は，急行では平均駅間距離が長く，回生ブレーキの出番が少ないからです。

つまり，抵抗制御電車をインバータ電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って，急行の場合は大きな効果は期待できません。そのため，インバータ電車は極力各駅停車に割り当てるようにするのが，省エネの観点からは上手な使い方といえます。

仮に，全てのインバータ電車を各駅停車に，全ての抵抗制御電車を急行に割り当てた場合と，その逆の割り当て方をした場合とで路線の平均エネルギー消費原単位を比較すると**図4**のようになり，約2割の省エネ効果が得ら

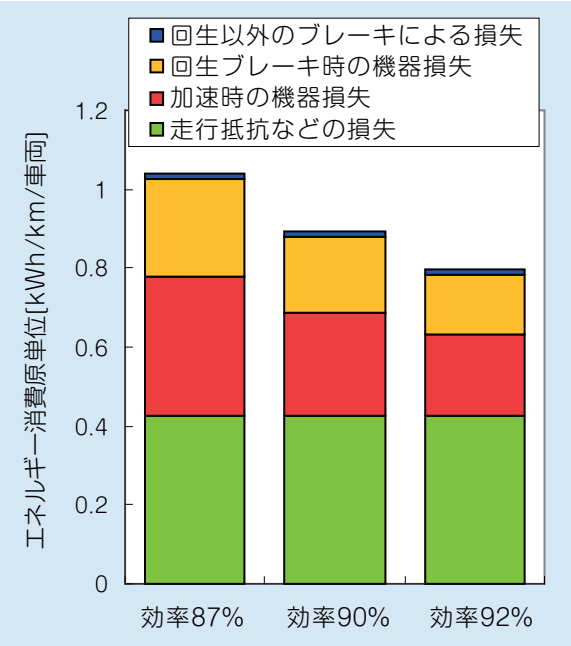

図5　機器効率によるエネルギー消費原単位の違い

図6　高効率で低騒音な全閉形永久磁石モーター

れることが分かります。

高効率モーターの導入効果を試算する

次に，モーターの高効率化による省エネ効果について考えます。電車Aは駆動システムの効率が87%ですが，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考えます。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モーター[2]の適用を，5%の効率向上は永久磁石モーター[3]の適用をそれぞれ想定しています。運用は電車Dの通勤電車の条件を用います。このような条件でエネルギー消費原単位を計算すると，**図5**のような結果になります。

図5によると，3%の効率向上で約1割，5%の効率向上で約2割の省エネ効果が得られていることが分かります。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ません。しかし，効率が87%ということは，13%が機器損失であることを意味しています。5%効率が向上すると効率は92%になりますが，そのときの機器損失は8%となります。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，機器損失が約4割削減されます。そのため5%の効率向上でも大きな省エネ効果が得られるのです。

本計算法を用いることで，高効率モーターの導入効果を定量的に評価できるので，電力コストの削減効果が試算できます。

一般に，永久磁石モーターのような高効率モーターは導入コストが高くなる傾向がありますが，電力コストの削減効果の方が大きければ，トータルコストで考えると高効率モーターの方が低コストということになります。そこで，本計算法を用いて電力コストの削減効果を計算することで高効率モーターの導入を検討する際に，より合理的な判断ができるようになります。

おわりに

以上のように，本簡易計算法を用いることで，電車のエネルギー消費をより的確に把握でき，電車の省エネ技術を上手に導入できます。

本簡易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化に貢献することを期待します。RRR

文　献

1) 近藤稔・小川知行・村上浩一：鉄道車両の消費エネルギー簡易計算法，鉄道総研報告，Vol.25，No.8，pp.41-46，2011.8
2) 宮部実・近藤稔：誘導電動機の回転子スロット内空隙による損失低減効果の解析，鉄道総研報告，Vol.24，No.6，pp.23-48，2010.6
3) 近藤稔・清水康弘・松岡孝一：全閉式永久磁石同期主電動機の開発，鉄道総研報告，Vol.17，No.4，pp.17-22，2003.4