

電車の消費エネルギーを計算する

小川 知行
車両制御技術研究部
(動力システム 研究員)

近藤 稔
同
(同 副主任研究員)



おがわ ともゆき こんどう みのる

はじめに

鉄道は、他の交通機関に比べて消費エネルギーが少なく環境に優しい乗り物であると言われていています。鉄道の利用を増やしていくことが環境にとってプラスであると言えますが、鉄道の消費エネルギーの削減も求められています。なぜなら、電車の使用する電力は、家庭にある電気機器に比べると遙かに大きいからです。電車の消費エネルギーを削減できれば、鉄道会社としては社会的な義務となっている二酸化炭素の排出量を削減する効果もありますし、電力コストを減らすこともできます。

さて、電車の消費エネルギーを減らすためには、まずは現状の電車の消費エネルギーを知る必要があります。電車の消費エネルギーを知るためにはどのような方法があるのでしょうか。1つは、電車に電気を供給する変電所で電力を測る方法です。もう1つは、電車に測定装置を付けて測る方法です。前者では、測定した路線の全体の消費エネルギーが得られますし、後者では、1つの列車での消費エネルギーが得られます。このような方法は実際の消費エネルギーを知るのに有効な方法ですが、測定に手間や時間がかかってしまいます。そこで、手軽に消費エネルギーを知る手法として、今回紹介する電車の消費エネルギーをシミュレーションによって検討する方法があります。鉄道総研が開発したシステムでは、簡単なパソコン操作で消費エネルギーを計算することができます。電車の消費エネルギーを減らしたいと思ったときに、省エネルギーになる新しい機器を導入するとします。実際にその機器を試作して、試験列車で走らせてみるのは、とてもコストや手間や時間がかかります。それに加えて、新しい機器を導入するということはずしも期待通りの効果が得られるわけではありません。そこで、今回紹介するシミュレータで事前に手軽にパソコン上で効果を検討してみて、試作品を作ってみるかどうかを決めることができます。本稿では、始めに、電車の消費エネルギーを計算する方法を紹介して、その後で鉄道

総研で開発した電車の消費エネルギー評価システムについて紹介します。

消費エネルギーとは

最初に、そもそも電車の消費エネルギーとはどのようなものであるかを考えてみたいと思います。図1のように電車は架線から電気を受け取り、その電気でモータを回して加速します。また、駅などで停まる時には、そのモータを発電機として使用して、架線に電気を返すことができます。これを回生ブレーキと言います。エネルギーの観点で見ると、電車は、加速する時に架線から電気エネルギーを受け取り、速度が上がっていきます。物体が速度という形で持つエネルギーを運動エネルギーと言います。すなわち、加速することによって、電気エネルギーが運動エネルギーに変換されているのです。そして、減速する時には回生ブレーキによって運動エネルギーを再び電気エネルギーに戻しているのです。

エネルギー保存の法則と言う法則があります。エネルギーは、熱エネルギー、光エネルギー、電気エネルギー、機械エネルギーなど様々な形をとりますが、エネルギーの

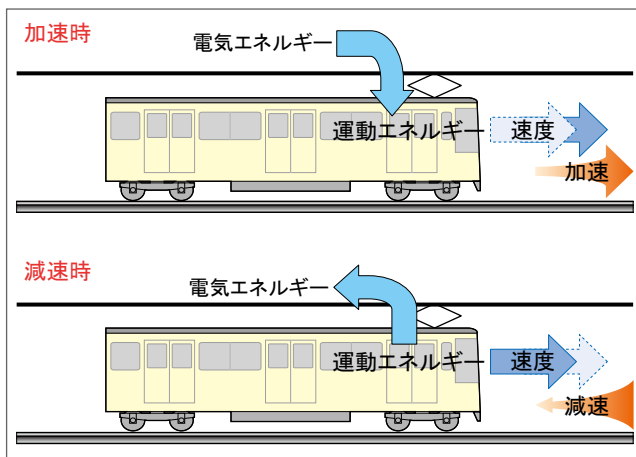


図1 エネルギーの流れ

形は変わってもその総量は保存されるという法則です。この法則から考えると、加速する時に架線からもらった電気エネルギーを電車の運動エネルギーに変換し、減速する時にその運動エネルギーを電気エネルギーに変換して返すと言うことは、架線から受け取った電気エネルギーと架線に返す電気エネルギーは同じで、理想的には消費エネルギーはゼロと言うことになります。しかしながら、実際には、受け取った電気エネルギーの一部しか架線に返すことができません。これは、エネルギーの形を変換したり、電車が走行したりしている間に様々な損失があるからなのです。例えば、電車を動かすモータは使っているうちに熱くなってきますが、これは架線からもらった電気エネルギーの一部が運動エネルギーに変換されることなく熱エネルギーに変換されてしまったためなのです。また、電車の速度が高くなると空気抵抗が大きくなりますが、これは電車の持つ運動エネルギーを減らそうとする力となってしまいます。これらの損失により失われた分が電車の消費エネルギーと考えられます。そこで、損失を計算することで、電車の消費エネルギーが計算できます。

運転パターンを再現する

電車の消費エネルギーを計算するためには、電車の運転パターンを再現する必要があります。電車の基本的な運転の仕方を示したのが図2になります。電車は、駅を出て、電気でモータを回し加速していきます。これを力行と言います。力行により最高速度まで加速し、その後は電気を使わず惰性で走って行きます。これを惰行と言います。惰行中は電車にエネルギーを与えていませんが、慣性があるためそのままの速度で走ることができます。しかしながら、実際には空気抵抗や摩擦があるため、次第に速度が落ちていきます。このため、駅間距離が長い場合には、再び力行します。これを再力行と呼びます。再力行で最高速度まで達したら、また惰行に戻ります。惰行と再力行を繰り返しながら、次の駅に近づいたらブレーキをかけて停車します。多くの電車では回生ブレーキを使って、発電した電気を他の電車に送っています。

このような運転の仕方を図にしたものを運転曲線と言います。電車が電気を使うのは、力行している時と再力行しているときになります。また、回生ブレーキを使用しているときは電気を返しています。つまり、電車の運転状態によって、電気の使用状況が変わってきます。このため、消費エネルギーを正確に計算するためには、実際の運転に近

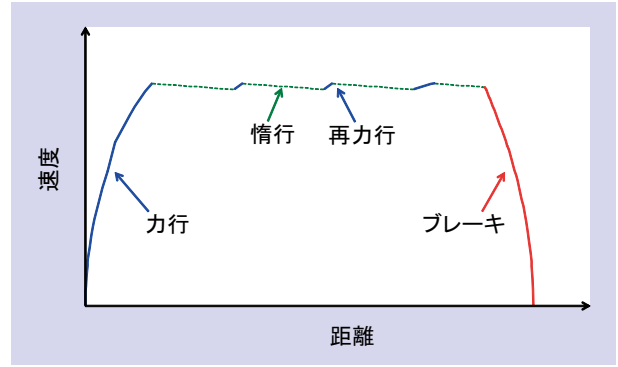


図2 基本的な運転曲線

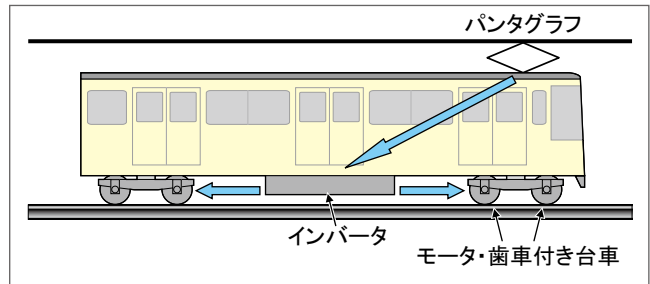


図3 直流電車の主回路の構成

い運転曲線が必要となります。実際の鉄道路線では、勾配、曲線、トンネル、信号などがあるため、図2のような単純な運転曲線にはなりません。上り勾配では自然に速度が落ちてきますし、下り勾配では自然に速度が上がっていきます。曲線があると速度制限がかかりますし、線路との摩擦も大きく速度が落ちやすくなります。トンネル内では空気抵抗が大きくなります。また、信号が示している速度制限は守って運転する必要があります。さらに、加速・減速する力は車両の種類によって異なってきます。このような様々な条件を考慮して運転曲線を作成するのです。

電車の機器の損失を計算する

電車の消費エネルギーを計算するにあたって、もう一つ重要なことは、車両の電気エネルギーを運動エネルギーに変換する部分の損失を求めることです。架線からの電気をモータの回転に変換する装置が主回路機器と呼ばれています。図3のように、最近の直流電車では主回路機器としてインバータと交流モータを積んでいます。架線から送られてきた直流の電気をパンタグラフで集電し、インバータによって交流に変換し、交流モータを回しています。そして、歯車を通じてモータの回転を車輪に伝えて、電車が加速し、電車は運動エネルギーを得ます。

電車の消費エネルギー計算では、これらの機器の損失を

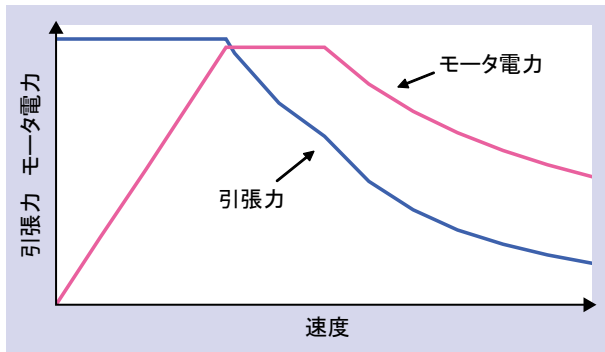


図4 力行時のモータ電力と引張力

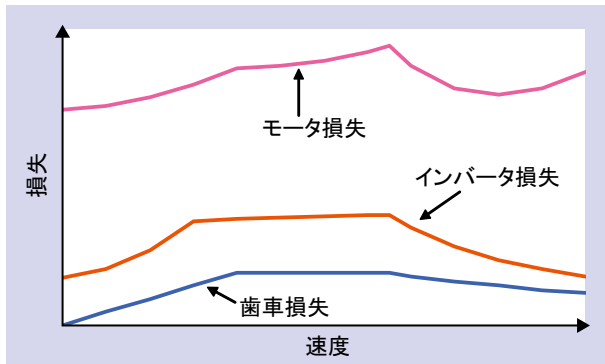


図5 力行時の各機器の損失

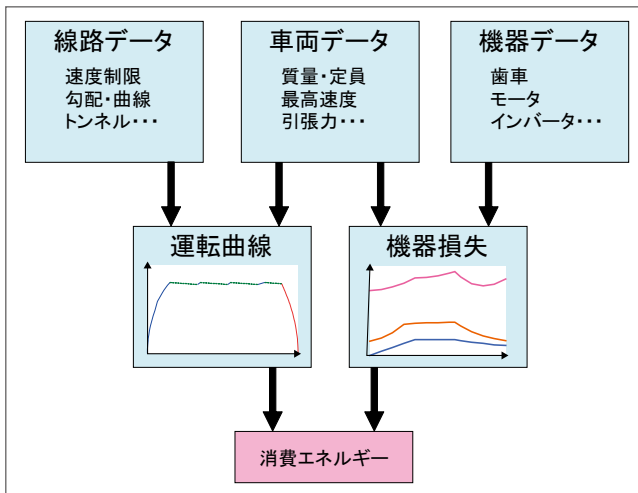


図6 電車の消費エネルギー計算の流れ

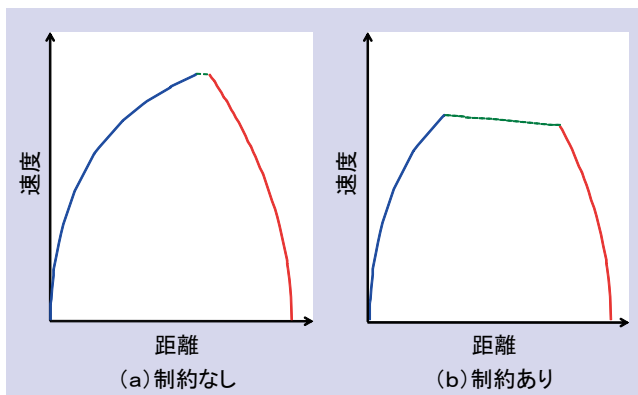


図7 惰行時間制約による運転曲線の比較

求めていきます。各機器の損失は、列車の運転状態と速度によって異なってきます。図4に力行時のモータ電力と引張力の関係を示します。引張力というのは、列車を加速させようとする力になります。低い速度の時は大きな引張力となっていますが、ある速度を超えると、引張力は小さくなっていくことがわかります。また、モータ電力は速度と引張力に応じて変化し、図4のような関係になります。モータ電力が速度に応じて変化するので、その時に生じるモータ損失も速度に応じて変化します。これは、モータだけでなく他の機器も同様です。ですから、電車の消費エネルギーを計算するには各機器の損失を速度に応じて求める必要があります。力行時の各機器の損失の一例を図5に示します。また、回生ブレーキを使用する場合にも各機器に損失が生じます。ブレーキ時は、損失を考慮して回生電力を求め、消費エネルギーを負の値として計算します。

消費エネルギー計算の流れ

話が長くなってしまったので、ここまでに紹介した電車の消費エネルギーを計算する流れを図6にまとめてみます。まず、線路のデータと車両のデータから運転曲線を求めます。これによって、各時点での運転状態と速度がわかります。次に、車両のデータと機器のデータからそれぞれの運転状態での速度に応じた機器損失を求めます。そして、運転状態と速度毎に機器損失を積算していくことで、電車の消費エネルギーが計算できるのです。

計算の工夫

ここまでの、電車の消費エネルギーを計算するための基本的な流れを説明してきましたが、実際に消費エネルギーを精度良く計算するためには、様々な工夫が必要になります。そこで、運転曲線を正確に求めるために鉄道総研で開発した技術を紹介します¹⁾。

まず、図7に2つの運転曲線を比較した例を紹介します。距離も短く、速度制限もない区間の運転曲線を2通り示しました。図7 (b) の運転曲線では、力行、惰行、ブレーキと運転する時に、惰行時間は30秒以上にするという条件を付けています。本稿ではこれを惰行時間制約と呼ぶことにします。このような惰行時間制約の有無によって、実際の路線で消費エネルギーと所要時間がどのように変化するかを試算したのが、図8になります。これは、後述する消費エネルギーの測定を行った路線で、距離が28kmで途中駅が14駅の区間を走行したときに、所要時間が約40分

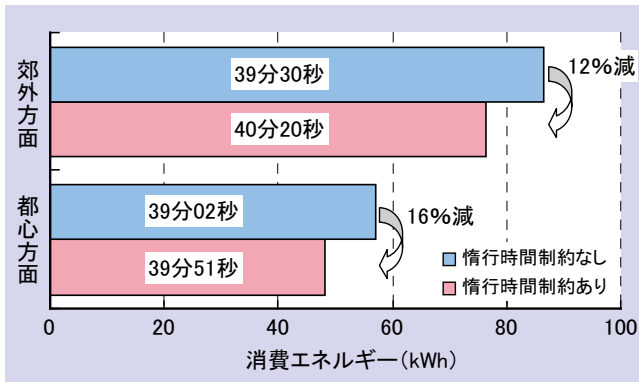


図8 所要時間と消費エネルギーの関係の例

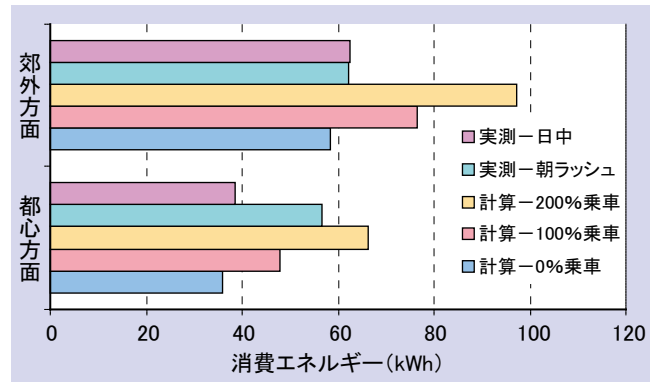


図9 消費エネルギーの実測と計算の比較

となるのに対して、惰行時間制約を入れると50秒ほど所要時間が長くなりました。しかし、郊外に向かう列車で12%、都心に向かう列車では16%の消費エネルギーが減っています。所要時間の増加が2.1%程度であるのに対して、消費エネルギーの減少の割合が大きくなっています。

このように運転曲線が少しでも違うと消費エネルギーが大きく異なってくることがあります。このため、運転士の運転の実態に近い運転曲線が求められます。そこで、鉄道総研が開発している電車の消費エネルギー評価システム「ECOES」では、運転曲線を計算するのに、列車ダイヤ作成に使われている運転曲線作成システム「SPEEDY」を使用しました。先ほど紹介した惰行時間に条件を付けることを始めとして、実際の運転曲線に近づける様々な工夫をして、消費エネルギー計算に適した運転曲線を作成しています。

測定結果との比較

続いて、鉄道総研で計算した消費エネルギーと実際の車両で測定した結果を図9で紹介します。ある通勤路線の各駅停車の列車で朝ラッシュと日中の時間帯に測定しました。郊外に向かう列車の方が消費エネルギーが大きいのは、郊外に向かう方が全体的に見ると上り勾配となっているためです。計算は乗車率を0%、100%、200%の3通りで実施しました。乗車率によって消費エネルギーが大きく変わっていることがわかるといえます。実際の列車の乗車率は、各駅でお客さんの乗り降りがあり変化しますので、正確な数字は分かりません。この結果から乗車率を計算すると、朝ラッシュの都心方面は乗車率が150%程度、それ以外の場合は乗車率が25%程度となります。この車両は全員が着席した時の乗車率が35%程度ですので、空席もある状態ということになります。実際の乗車率は都心に近いほど高い傾向になると推定されますが、平均的な乗車率として測定した路線の状況を考えると、紹介した計算は妥当な結果と言えます。

課題

本稿で運転曲線によって消費エネルギーが大きく異なることを示しました。実際の電車では、運転士の運転操作はばらつきがありますので、これにより消費エネルギーは異なってくると考えられます。この違いをどのように扱うのかは難しい問題であり、今後の課題です。一方、電車の消費エネルギー評価システム「ECOES」によって消費エネルギーの少ない運転方法を提示していくことで、省エネルギーを実現できることが期待されます。

また、回生失効という問題もあります。回生電力は、他の電車が消費することになりますが、近くに電車がいないと電力の使い道がなくなってしまうため、回生ブレーキを使用することができません。運転頻度の少ない路線や時間帯には回生失効が起こると言われています。今回のシステムは1編成の電車を対象としていますから、他の電車の状態まではわかりません。このため、回生失効はないものとして消費エネルギーを計算しています。回生失効を再現するには列車ダイヤを入力して他の電車の状態も考える必要がありますが複雑になってしまうため、今後の対応が課題であると考えています。

おわりに

電車の消費エネルギーを計算するための原理と技術について紹介しました。鉄道総研が開発したシステムは、電車の消費エネルギーを減らすための検討ツールとして今後の活用が期待されます。今後も、これらの技術について更なる向上を目指し、研究開発を行っていきたいと思います。

RRR

文献

- 1) 富井規雄:「鉄道システムへのいざない」, 共立出版, pp.157-170, 2001