

# 運転操作と機器特性から消費エネルギーを分析する

小川 知行  
車両制御技術研究部  
(動力システム 研究員)

村上 浩一  
同  
(同 主任研究員)

近藤 稔  
同  
(同 副主任研究員)



おがわ ともゆき



むらかみ こういち



こんどう みのる

## 1. はじめに

地球温暖化に対する意識の高まりや燃料価格の高騰を受けて、自動車の「エコドライブ」という言葉が広まってきました。エコドライブというのは、アクセルペダルの操作を工夫する、停車中にアイドリングストップをするなど、自動車の運転操作を工夫して、燃料消費を減らして、燃料代とCO<sub>2</sub>の排出量の削減を狙ったものです。エコドライブは自動車に限ったものではなく、鉄道車両についても運転の仕方を工夫することで、省エネが図れる場合があります。そこで、鉄道車両の運転の仕方と鉄道車両を駆動するのに使われる機器の効率に注目した消費エネルギーに関する分析について紹介します。

## 2. 鉄道車両の運転の仕方

初めに、鉄道車両の運転の仕方について紹介します。基本的な運転の仕方を示したのが図1になります。車両は、駅を出て、モータやエンジンによって加速していきます。これを力行と言います。力行によりある程度までの速度まで加速し、その後は惰性で走って行きます。これを惰行と言います。惰行中は空気抵抗や摩擦抵抗などがあるため、下り勾配でなければ次第に速度が落ちていきます。このため、

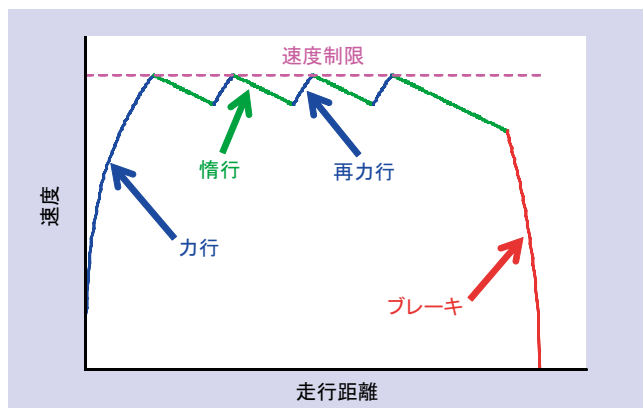


図1 基本的な運転操作

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。再力行で速度が上がったら、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。

力行するときには、運転士がマスコンハンドルを操作することによって、モータやエンジンからの出力を選ぶことができます。マスコンハンドルは、通常5段階程度の出力を設定することができ、その段階をノッチと呼びます。1ノッチが最も小さく、ノッチが上がっていくにつれて大きな出力で車両を加速させることができます。

## 3. 鉄道車両の消費エネルギー

次に、鉄道車両の走行に伴う消費エネルギーと走行時間の関係を紹介いたします。ここでは、エンジンを動力源とする気動車の燃料消費量の計算例をもとに、鉄道車両の消費エネルギーについて概要を紹介いたします。図2と図3は、途中で再力行がある場合とない場合に走行時間と燃料消費量を比較した例です。再力行をすると速く走ることができますが、その分、エンジンから力を出している時間が長くなり、燃料消費量が大きくなります。つまり、一般に速く走ろうとすると消費エネルギーが大きくなるという傾向があります。一方、図4は、図2と同じ走行時間ですが燃料消費量が異なっています。図2では、5ノッチで短い時間再力行していたのですが、図4では、2ノッチで長い時間再力行しています。両方とも同じ走行時間にはなるのですが、2ノッチの方が機器の効率が悪いので燃料消費量が多くなってしまいます。

このように、機器の効率の影響によって、同じ走行時間でも運転の仕方が異なるだけで消費エネルギーが変わってきてしまいます。そこで、運転の仕方と機器の効率の関係に注目した消費エネルギーに関する分析の手法について紹介します。

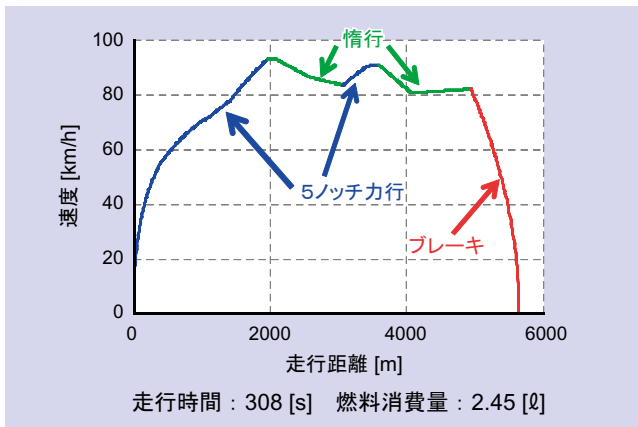


図2 再力行がある場合の運転(5ノッチでの再力行)

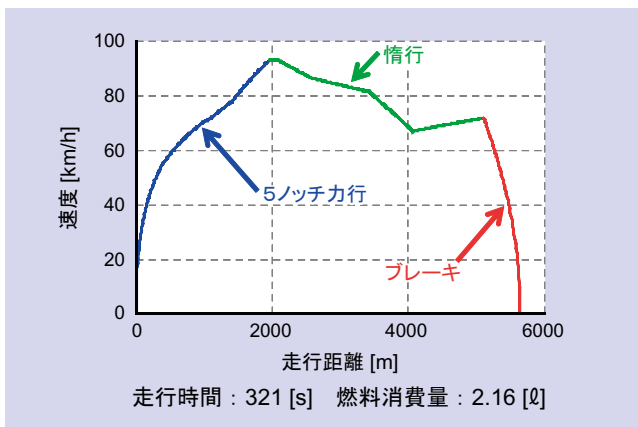


図3 再力行がない場合の運転

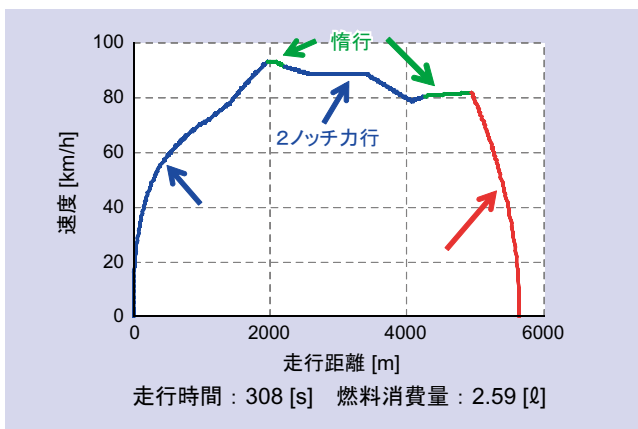


図4 2ノッチでの再力行の運転

#### 4. 定速運転とのこぎり運転

最近の車両には一定の速度を保持して走行する定速制御機能が付いているものが増えてきました。定速制御機能が付いている車両では、図5のように駅出発後にある程度の速度まで加速したら、定速制御機能を使って定速運転を行い、駅が近くなったらブレーキをかけるといった運転が可

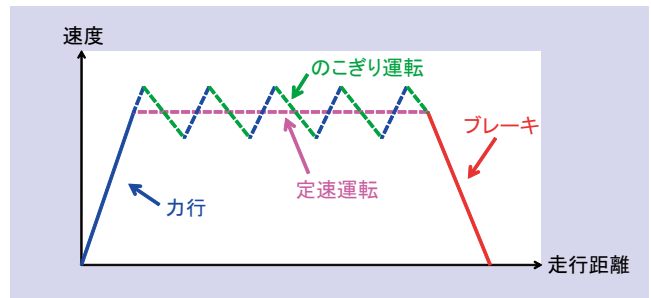


図5 定速運転とのこぎり運転の概念図

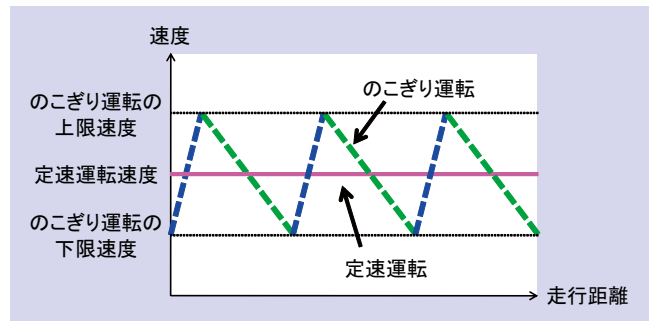


図6 定速運転とのこぎり運転のパラメータ

能となります。車両が惰行で走っている場合には空気抵抗や摩擦抵抗などによる列車抵抗の分だけ速度が低下しますから、定速制御機能によって列車抵抗と同じだけの力をモータやエンジンから出力することで、一定の速度を保持して走行することができます。以前の車両はモータやエンジンから出力する力を段階的にしか設定することができなかったのですが、最近の車両は出力する力を細かく調整することが可能になってきています。これにより、列車抵抗に合わせた力を出して定速運転が可能になります。

定速運転に対して、従来から使われる運転の仕方がいわゆるのこぎり運転となります。図5のように力行と惰行を繰り返すことで走行をしていく運転の仕方です。今回は、この定速運転とのこぎり運転を比べて同じ時間で走行した場合に、どちらが消費エネルギーの面で優れているかを考えてみます。

#### 5. 運転操作に関する計算モデル

定速運転とのこぎり運転の消費エネルギーを比較するために当たって、まず運転操作に関する計算モデルを考えてみます。最初に計算例を紹介したように、走行時間が異なると、消費エネルギーが異なってしまうのが当然です。そこで、走行時間が等しくなるように速度にパラメータを設定しました。具体的には、図6に示すように、駅出発後の加速と、駅到着前の減速の部分を除いて、駅と駅の間を定速運転もしくはの

こぎり運転をしている部分を計算対象として考えることにしました。このときに、理想的な定速制御であれば一定の速度になっていると考えられますので、その時の速度を定速運転速度というパラメータとしました。一方、のこぎり運転では、上限速度と下限速度の間を力行と惰行を繰り返していると考え、上限速度と下限速度をパラメータとしました。その上で、定速運転とのこぎり運転での走行時間が等しくなるように、パラメータの組み合わせを選んで、比較を行いました。

## 6. 機器特性に関する計算モデル

続いて、車両の機器特性に関する計算モデルを考えます。今回は、直流電車と気動車を対象に考えます。直流電車は、図7のように、架線からの直流の電気をインバータ装置によって交流に変換して、交流モータを駆動します。今回の検討では、直流電車の機器の中で、負荷による効率の変動が大きいと考えられるモータの機器特性について紹介します。また、気動車は、図8のように、エンジンから変速機を通じて車輪に動力を伝えています。変速機の中に効率の低いトルクコンバータという機器がありますが、これは変速段という出発直後の速度の低い運転状態で使われるものです。今回の検討では、直結段が使用される速度の高い状

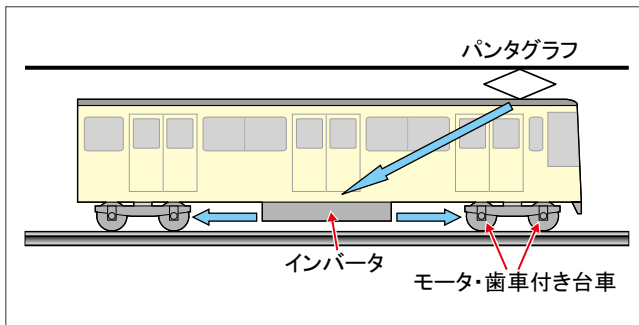


図7 直流電車の構成

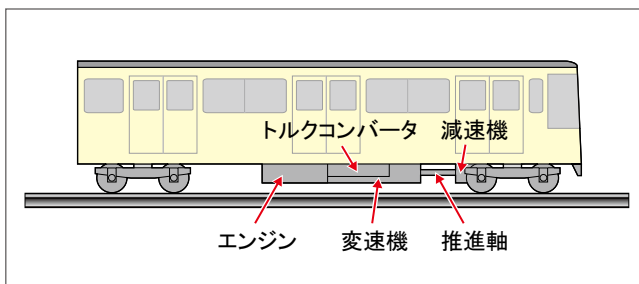


図8 気動車の構成

態での消費エネルギーの検討ですから、トルクコンバータは使用されません。トルクコンバータの使用がない状態では、効率に大きく影響するのはエンジンの特性ですので、エンジンの特性について紹介します。

図9に示すのがモータの効率になります。速度毎に効率を示し、横軸は最大負荷に対する負荷の割合を示しています。モータの効率は、速度によって大きく異なりますが、負荷率によってもある程度の範囲で変化していることが確認できます。のこぎり運転では、最大のノッチで力行することを想定したため、負荷率は100[%]となります。定速運転では、列車抵抗に合わせた出力となりますので、列車抵抗に応じて負荷率が変わるものとして考えられます。なお、ここで示した効率は、力行時も惰行時も発生する機械損は除いてあります。機械損は列車抵抗に含まれていると考えられるため、定速運転とのこぎり運転の比較のためには機械損を除いた方が分かりやすくなりますが、図9に示す効率は一般に示される機械損を含んだモータの効率よりも、高い値となっていますので注意が必要です。

図10に示すのがエンジンの効率に関する指標となる燃

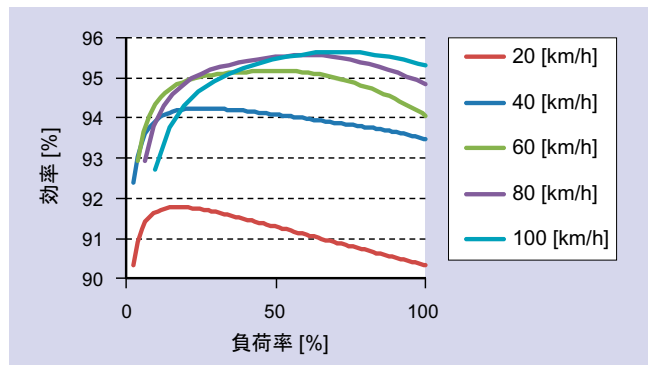


図9 機械損を除いたモータの効率

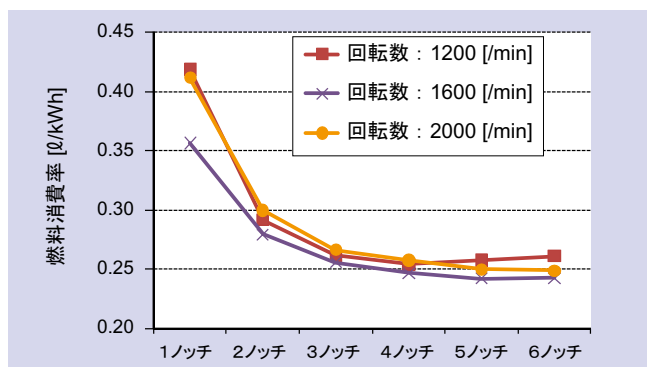


図10 エンジンの効率

料消費率になります。この値は、1[kWh]のエネルギーを出力するのに必要な燃料を示しており、値が小さいほど効率が良いことになります。高いノッチでは効率は良くなりますが、低いノッチでは効率が悪くなります。定速運転では、低いノッチが選ばれる可能性がありますので燃費に影響することが考えられます。また、3章で述べたように、2ノッチで長い時間再力行した場合の方が、5ノッチで短い時間再力行した場合よりも燃料消費量が多くなるのは、ここで示したエンジン効率の違いによる影響と考えられます。

## 7. 計算結果の例

図9のモータの特性と図10のエンジンの特性を用い、定速運転とのこぎり運転を使って1km走行する場合の1両当たりの消費エネルギーを計算した例を紹介します。この計算例は、在来線の特急や快速列車をイメージして、高い速度で走り続けている場合を想定しています。なお、定速運転とのこぎり運転の比較を目的にしたため、車両の加減速に使われるエネルギーは含まれていませんので、加減

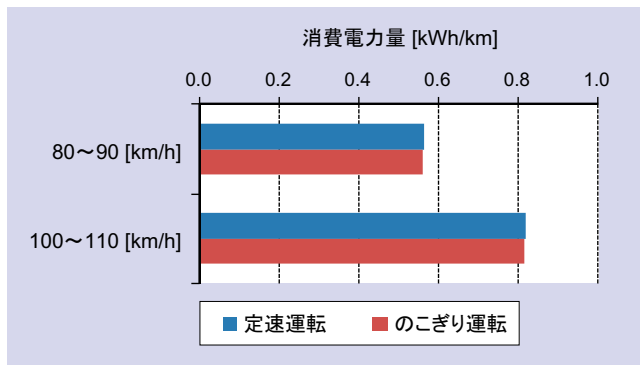


図11 直流電車が1km走行する場合の消費電力量

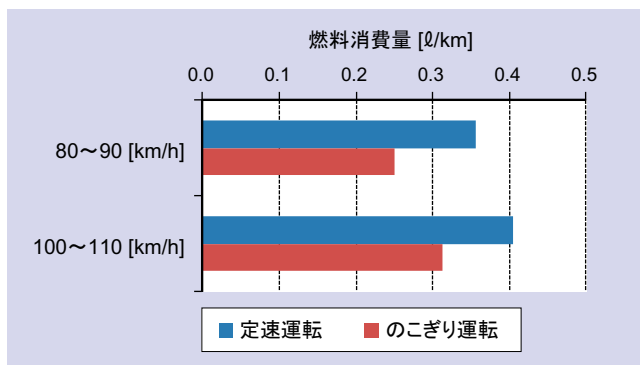


図12 気動車が1km走行する場合の燃料消費量

速も含めて実測や計算される消費エネルギーとは異なってきます。

図11に直流電車の消費電力量を、図12に気動車の燃料消費量を示します。直流電車でも気動車でも速度が高くなると消費エネルギーが多くなっていることが確認できます。これは、速度が高い方が空気抵抗や摩擦抵抗が大きくなるためです。次に、定速運転とのこぎり運転を比較してみます。直流電車では、定速運転とのこぎり運転ではほとんど消費電力量の違いは見られません。一方、気動車では、定速運転の方が燃料消費量では2~3割程度多くなることが分かります。これは図10で示したように、エンジン効率の悪い低いノッチが多用されるためであると考えられます。このため、気動車の定速運転は、消費エネルギーの観点では改善の余地があり、現状では、エンジン効率の良い高いノッチによる力行と惰行を繰り返すのこぎり運転が有利であると言えます。

## 8. おわりに

鉄道車両の運転の仕方と機器の効率に注目して消費エネルギーに関する分析を紹介しました。運転操作と機器特性の組み合わせによっては、消費エネルギーが多くなってしまふ場合があることが分かってきています。消費エネルギー削減のため、機器の効率が悪い状態での運転はなるべく避けるように運転の仕方を工夫することが重要であるといえます。しかしながら、それによって運転士への負担が大きくなったり、乗客の乗り心地が悪化したりするようでは望ましくありません。そこで、車両を駆動する機器に注目して、実際の使用頻度が高い運転状態での機器の効率を向上させる工夫も求められます。今後、こうした分析結果をもとに、両者の方法を適切に取り入れながら、鉄道車両の消費エネルギー低減のための研究を行っていきたいと思います。RRR

### 文献

- 1) 宇田賢吉：「電車の運転」, 中央公論新社, pp.47-61, 2008
- 2) 小川知行, 近藤稔：「電車の消費エネルギーを計算する」, RRR, pp.14-17, 2009.3