

# 鉄道車両の消費エネルギー簡易計算法

近藤 稔\* 小川 知行\* 村上 浩一\*

## A Simplified Calculation Method of Energy Consumption for Railway Vehicles

Minoru KONDO Tomoyuki OGAWA Kouichi MURAKAMI

It is very important to estimate the energy consumption of trains when promoting energy saving in railway vehicles. The energy consumption of a train can be estimated through measurements or numerical simulations. However, these methods require a lot of time and efforts. Therefore, we have developed a simplified calculation method that can estimate the energy consumption without numerical simulations. The comparison between the measurement results and the calculation results of the proposed method shows that the differences are less than 9%.

キーワード：エネルギー消費原単位，省エネ車両，消費エネルギー計算，列車抵抗

### 1. はじめに

近年，地球環境問題の観点から，あらゆる場面で省エネルギー化の推進が求められており，鉄道車両についても省エネルギー化を進めていく必要がある。

省エネルギー化を推進するためには車両の消費エネルギーを評価する尺度が必要であり，省エネ法ではエネルギー消費原単位という尺度が用いられている。エネルギー消費原単位は走行距離あたりの消費エネルギーを編成両数で割って1両あたりの値を計算したものである。

これを用いると，例えば，省エネ車両の導入による効果を評価する際には，その車両と置き換えられる車両のエネルギー消費原単位の差に，置き換える車両の数と年間走行距離を乗じることで年間の省エネ効果を計算することができる。

このエネルギー消費原単位は実測データや走行シミュレーション等から算出することが可能であるが，これらの方法は手間がかかる。特に走行シミュレーションにより車両のエネルギー消費原単位を計算する場合には，以下のような課題がある。

まず，走行シミュレーションを行うためには，駅間の勾配，曲線，分岐器，信号等について具体的にデータを入力する必要がある。走行路線長が長い場合には膨大なデータ入力が必要となる。一方，エネルギー消費原単位を計算する際には最終的な消費エネルギーが分かれば良く，走行途中の詳細な状況を知る必要は無いため，走行シミュレーションを用いる方法は冗長である。

また，走行シミュレーションを実施する際には，速度制限内で最高の速度で運転する（最速運転）場合について計算するのが簡便であるが，実際の営業運転時の走行

は最速運転よりも遅い速度で走るため，最速運転で計算すると消費エネルギーが実際よりも多くなる傾向がある。これを防ぐためには，計算される運転曲線を実際の運転と一致させる必要があるが，実際の運転は状況によって大きく変化する。エネルギー消費原単位の計算で求めたいのは平均的な走行に対する消費エネルギーの計算であるため，走行シミュレーションでそれを計算するためには平均的な走行を行うアルゴリズムの開発が課題となる。

そのため，走行シミュレーションを用いない，もっと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，著者らは車両の消費エネルギー原単位を簡易に計算する方法を開発しており，これまでに電車を対象として開発した計算法について発表している<sup>1)</sup>。本論文では，ディーゼル車についても統一的に適用できるように，この計算法を発展させた計算法について紹介する。以下では，本計算法について説明するとともに，実測との比較により計算法の妥当性を検証した結果について報告する。

### 2. 簡易計算法の基本的な考え方

図1は平坦な明かり区間において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変化の概念を示したものである。走行シミュレーションで消費エネルギー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消費エネル

\* 車両制御技術研究部 動力システム研究室

特集：車両技術

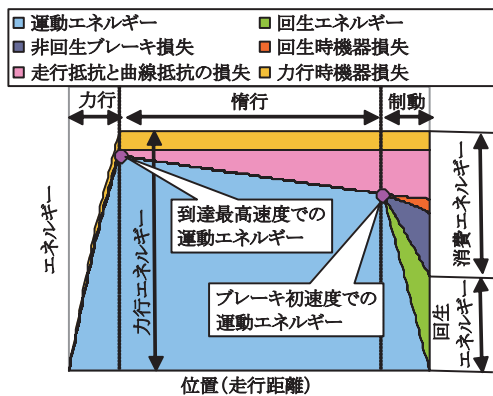


図1 走行時のエネルギー変化の概念

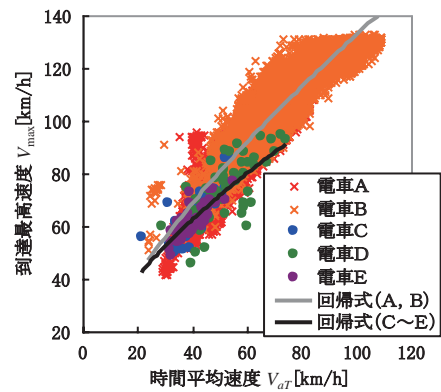


図2 到達最高速度と時間平均速度の関係

ギーを計算する。

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消費エネルギーの計算が可能である。この方法では、消費エネルギー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必要最低限の情報として、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、走行時間、駅間の数から、平均駅間距離  $X_a$  [km] と平均駅間走行時間  $T_a$  [h] を計算する。そして、実際の運用を、駅間距離  $X_a$  の駅間を図1のような運転パターンに従い走行時間  $T_a$  で走行する運用に置き換え、その走行について計算を行う。

ここで、機器損失の計算について考えると、車両の総合的な効率  $\eta_t$  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  $(1-\eta_t)/\eta_t$  を乗じることで力行時の機器損失を計算できる。(ただし、この計算では走行抵抗等の寄与が含まれないため、その効果は別途計算する。) 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。

すなわち、到達最高速度やブレーキ初速度が分かれば、各位置での速度情報は不要であり、走行シミュレーションが不要である。そこで、本計算法では到達最高速度やブレーキ初速度を後述する回帰式により求めて計算に用いる。ただし、実際の運転パターンは図1のように単純ではなく、例えば停車時には、一旦ある程度の速度までブレーキにより減速した後に惰行し、その後再びブレーキをかけて停止するといった運転が行われる。これを図1のような単純化された走行に置き換えて考えるために等価ブレーキ初速度という量を定義して用いる。

以下ではこの等価ブレーキ初速度や到達最高速度を算出する具体的方法について説明する。

まず、平均駅間距離  $X_a$  と平均駅間走行時間  $T_a$  を用いると、車両の時間平均速度  $V_{at}$  [km/h] は次式で計算できる。

$$V_{at} = X_a / T_a \quad (1)$$

時間平均速度が高い走行であれば、当然、到達最高速度も高いことが予想され、両者の間には強い相関があると考えられる。図2は複数の電車の実走行データから、駅間毎に時間平均速度を計算し、対応する到達最高速度を抽出してプロットした図の例である。

図2から、時間平均速度と到達最高速度の間には強い相関があることが確認できる。

そこで、これらの実走行データからその相関を表現する回帰式を予め導出しておけば、到達最高速度  $V_{max}$  [km/h] の期待値を時間平均速度の関数として表現することができ、エネルギー計算に必要な到達最高速度を時間平均速度から算出することができる。本計算法ではその回帰式として次式を用い、実走行データを用いて最小二乗法により係数  $C_{v1}$ 、 $C_{v2}$  を求める。

$$V_{max} = C_{v1} V_{at}^{C_{v2}} \quad (2)$$

なお、図2に示した電車のうち、AとBはインバータ車両でC～Eは直流電動機を用いた車両であり、その2グループの間で相関の傾向が若干異なるため、図2中に示したように、それぞれに対して回帰式を作成し、車種に応じて回帰式を使い分けている。また、ディーゼル車についても同様の方法で別途回帰式を作成して用いている。

次に、ブレーキ初速度については、ブレーキによりエネルギー変換される車両の運動エネルギーを表現する量として、等価ブレーキ初速度という概念を導入する。等価ブレーキ初速度とは、ある区間を走行した際にブレーキにより吸収されたエネルギー量の合計と等しい運動エネルギーを持つ車両の列車速度である。

等価ブレーキ初速度は、到達最高速度が高いほど高くなることが予想される。そこで、実走行データを分析して等価ブレーキ初速度と到達最高速度の関係を調べたところ、両者の間には直線的な相関が見られたため、等価

ブレーキ初速度  $V_B$  [km/h] と到達最高速度  $V_{max}$  の関係を次式で表現し、計算の際には到達最高速度から等価ブレーキ初速度を求めることとした。

$$V_B = k_B V_{max} \quad (3)$$

$k_B$  は比例係数であり、インバータ電車の実走行データからその値を算出したところ通勤電車において 96%、近郊電車において 79% であった。本簡易計算では、これらの値を基に駅間距離に応じて  $k_B$  を算出して用いている<sup>1)</sup>。

以上述べた方法により、時間平均速度から到達最高速度や等価ブレーキ初速度を計算できるので、機器損失やブレーキ時の損失の計算ができる。

一方、走行抵抗による損失は、一般的な走行抵抗式を用いて平均的な速度に対応する走行抵抗を求めることで概算可能と考えられる。しかし、その場合の平均的な速度とは時間平均速度  $V_{AT}$  では無く、後述する距離平均速度とした方が正確である。そこで、到達最高速度の場合と同様に回帰式を用いて距離平均速度を求めて用いる。

また、曲線や勾配といった消費エネルギーに影響をあたえる路線データについても、そのまま用いるのではなく、後述する等価曲率半径の曲線や等価平均勾配といった概念を導入し、路線の特徴を単純化して計算に用いる。

次章ではこれらの量を用いて各損失を計算する方法について説明する。

### 3. 各エネルギー損失の計算

#### 3.1 走行抵抗による損失の計算

まず、走行抵抗による損失を計算する方法について説明する。走行抵抗は車両が直線平坦区間を走行している際に発生する列車抵抗で、以下のような速度に対する 2 次式で表現するのが一般的である。

$$R_r = (a + bV)W + cV^2 \quad (4)$$

ただし、 $R_r$ ：走行抵抗 [N]、 $V$ ：速度 [km/h]、 $W$ ：車両質量 [t]、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ ：定数である。一般に、速度の 2 乗に比例する項は空気抵抗を、その他の項は機械抵抗を表すと考えられている。

走行抵抗式の定数は車両によって異なるが、本計算法では、日本で在来線電車用に一般的に用いられている走行抵抗式<sup>2)</sup>の値を使用する。なお、トンネル区間では走行抵抗が増加するため、その効果が無視できない場合には、トンネル区間の走行抵抗式等を用いてその効果を考慮する必要がある。しかし、本論文ではそのような場合は対象から除外し、明かり区間の走行抵抗式のみを用いる。

走行距離あたりの走行抵抗によるエネルギー損失を計算するには、各位置における速度を用いて各位置における走行抵抗を計算し、その走行抵抗を距離で積分し、走

行距離で割ればよい。

$$L_m = aW + bW \frac{1}{X_s} \int_0^{X_s} V dx, L_a = c \frac{1}{X_s} \int_0^{X_s} V^2 dx \quad (5)$$

ただし、 $L_m$ ：走行距離あたりの機械抵抗による損失 [kJ/km]、 $L_a$ ：走行距離あたりの空気抵抗による損失 [kJ/km]、 $x$ ：位置 [km]、 $X_s$ ：駅間距離 [km] である。ここで、次式の平均速度を導入する。

$$V_{ave1} = \frac{1}{X_s} \int_0^{X_s} V dx, V_{ave2} = \sqrt{\frac{1}{X_s} \int_0^{X_s} V^2 dx} \quad (6)$$

ただし、 $V_{ave1}$ ：距離平均速度 [km/h]、 $V_{ave2}$ ：距離 2 乗平均速度 [km/h] である。

これらを用いるとエネルギー損失は次式となる。

$$L_m = aW + bW V_{ave1}, L_a = cW V_{ave2}^2 \quad (7)$$

これらの距離平均速度は時間平均速度  $V_{AT}$  と強い相関があると予想される。図 3 は実走行データから 1 回の駅間走行ごとに  $V_{ave1}$  と  $V_{ave2}$  を計算し、 $V_{AT}$  に対してプロットした例である。

図 3 より距離平均速度と時間平均速度の間には直線的な相関がみられるため、その相関を表す 1 次関数の回帰式を最小二乗法により導出し、距離平均速度の期待値を時間平均速度の関数として表すことができる。そして、消費エネルギー計算の際には、その関数を用いて時間平均速度から距離平均速度を算出し、式 (5) により走行抵抗による損失を計算することができる。複数の電車について回帰式を導出した結果、回帰式の値はほぼ同じであったため、本計算法では電車の車種によらず同じ回帰式を用いている。ディーゼル車についても同様に、ディーゼル車共通の回帰式を導出して用いている。

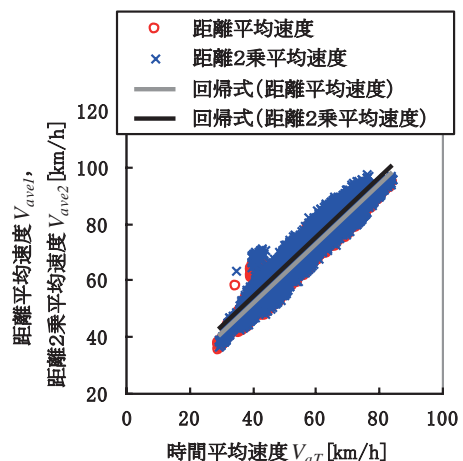


図 3 距離平均速度と時間平均速度の関係

#### 3.2 曲線の簡易表現と曲線抵抗による損失の計算

次に、曲線により発生する曲線抵抗を考慮するための曲線の簡易表現とそれを用いた曲線抵抗による損失の算出法について述べる。

特集：車両技術

日本国内では次式が曲線抵抗式として一般的に用いられている<sup>2)</sup>。

$$R_c = (800/r)gW \quad (8)$$

ただし、 $R_c$ ：曲線抵抗[N]、 $r$ ：曲率半径[m]、 $g$ ：重力加速度[m/s<sup>2</sup>]である。

よって、全走行距離  $X_t$ [km] の走行区間に  $n_c$  個の曲線があり、 $i_c$  番目の曲線区間の距離が  $x_{ic}$ [km] で曲率半径が  $r_{ic}$ [m] であるとすると、走行距離あたりの曲線抵抗による損失  $L_c$ [kJ/km] は次式で表現される。

$$L_c = \frac{1}{X_t} \sum_{i_c=1}^{n_c} x_{ic} \frac{800}{r_{ic}} gW = 800gW \frac{1}{X_t} \sum_{i_c=1}^{n_c} \frac{x_{ic}}{r_{ic}} \quad (9)$$

ここで、等価曲率半径  $r_e$ [m] を次式にて定義する。

$$\frac{1}{r_e} = \frac{1}{X_t} \sum_{i_c=1}^{n_c} \frac{x_{ic}}{r_{ic}} \quad (10)$$

この等価曲率半径を用いるとその走行区間における式(9)の曲線抵抗による損失は次式となる。

$$L_c = (800/r_e)gW \quad (11)$$

よって、線区ごとにあらかじめ等価曲率半径を計算しておけば、走行シミュレーションを行わなくとも曲線抵抗によるエネルギー損失を簡易に計算できる。

3.3 勾配の簡易表現と連続下り勾配による損失の計算

次に、勾配の影響により発生する損失の計算について述べる。上り勾配を走行する場合には、位置エネルギーの増加の分、多くのエネルギーを投入する必要がある。しかし、同じ区間を下る際には、その位置エネルギーにより車両が加速される。つまり、車両が同区間を往復する場合には位置エネルギーの影響が上り下りで相殺されるため、本計算法では勾配の影響を基本的に無視する。

しかし、比較的駅間が長い走行で連続の下り勾配がある場合には、列車が最高速度に到達した後、列車が下り勾配によりそれ以上加速してしまわないようにするためにブレーキをかける必要がある。このとき使用されるブレーキが回生ブレーキで無い場合、位置エネルギーはそのまま熱等に変換されて捨てられるため、その分を消費エネルギーとして加算する必要がある。

このような状況は特急運用されるディーゼル車において多く見受けられるため、本計算法ではディーゼル車である程度駅間が長い場合(具体的には2km以上)に連続下り勾配での損失計算を行う。その際には、連続下り勾配の平均的な勾配を簡易に表現するため、以下の式で算出する等価平均勾配  $g_e$ [‰] を使用する。

$$g_e = (h_{\max} - h_{\min}) / (X_t / 2) \quad (12)$$

ただし、 $h_{\max}$ ：最高地点の標高[m]、 $h_{\min}$ ：最低地点の標高[m]である。この等価平均勾配は、ディーゼル車の場合によく見られる山を越えて走行する図4に示すような線区を想定した平均勾配の計算方法であり、走行の前半で山を上り後半で山を下る場合を想定した式である。図4のような路線の場合、実際の路線データを用いて本方法で計算した勾配は、勾配の大きさを勾配区間の長さで重み付けして平均した平均勾配と概ね一致する。本方法で等価平均勾配を算出すれば、膨大な路線の勾配データを用いた計算をせずに、簡易に算出できる。

このような形で与えられた等価平均勾配が走行の後半において連続していると考えた場合、到達最高速度で連続走行する際のブレーキによる損失  $L_g$ [kJ/km] は次式で計算できる。

$$L_g = (1/2)g_e g_e W (X_a - X_{ab}) / X_a \quad (13)$$

ここで、 $X_{ab}$  は到達最高速度まで加速する距離と停止のために減速する距離の合計を表しており、実際の走行路線を参考にして2kmの値を計算に用いることとしている。

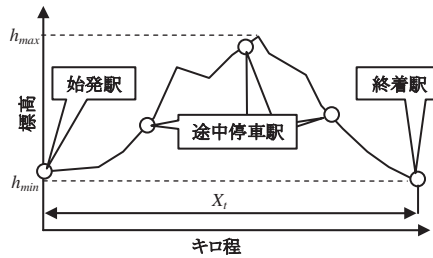


図4 山を越えて走行する線区

3.4 積算効率を用いた機器損失の計算

次に、機器損失の計算方法について説明する。

本計算法では、列車を加速する際の機器損失を計算する場合に用いる車両の総合的な効率  $\eta_t$  を求めるために、積算効率という考え方を導入する。積算効率は速度0から車両を加速して、ある到達最高速度まで到達した際の、駆動システムの全出力エネルギーを全入力エネルギーで割ったものである。

電車の場合には主回路への入力電力量を、ディーゼル車の場合にはディーゼル機関から変速機へ入力された全エネルギーを全入力エネルギーと考える(機関損失は別途計算する)。一方、全出力エネルギーは踏面出力を時間で積分して積算したものである。

実際の誘導主電動機で実車使用時相当の運転をした際の主回路効率を測定した例によると、積算効率は速度40km/hから速度120km/hにおいて概ね90%であった<sup>1)</sup>。車両全体の積算効率を算出する際には、この主回路効率にこの歯車効率(IEC規格<sup>3)</sup>を参考にし98%を用いる。

積算効率の考え方に従い、総合的な効率  $\eta_t$  を予め求め

ておけば、加速して到達最高速度に到達するまでに発生する機器損失  $L_{pa}$ [kJ/km] は次式により計算できる。

$$L_{pa} = (1/X_a)(1/2)W_e (V_{max}/3.6)^2 (1-\eta_t)/\eta_t \quad (14)$$

ただし、 $W_e$ [t] は回転慣性の効果を考慮するための慣性係数<sup>2)</sup> を乗じた車両の等価質量である。

なお、この積算効率を用いた機器損失計算は、駆動システムの構成に応じた計算を行う必要がある。例えば、抵抗制御の電車の場合には、直流電動機の損失に加え、低速域での抵抗挿入による損失も別途計算して加える<sup>1)</sup>。液体式ディーゼル車の場合にも同様に、変速機や減速機の歯車損失に加え、低速域でのトルクコンバータの損失も別途計算する。駆動システムの構成や各機器の効率は車両によって異なるため、可能な限り実際の機器の特性を調査して積算効率等を算出することが望ましい。

一方、到達最高速度に到達した後に、走行抵抗等に打ち勝って速度を維持するために力行する場合もある。また、到達最高速度に到達するまでの間も走行抵抗等の分だけ多くのエネルギーを投入する必要がある、その分機器損失が多く発生する。そこで、これらの効果を考慮するため、走行抵抗等による損失の合計値と高速域における機器の総合効率  $\eta_{th}$  を用いて次式により算出される機器損失  $L_{pc}$ [kJ/km] を計算し、これと  $L_{pa}$  の合計を力行時の機器損失とする。

$$L_{pc} = (L_a + L_m + L_c + L_g)(1-\eta_{th})/\eta_{th} \quad (15)$$

### 3.5 回生性能の簡易表現とブレーキ時の損失計算

ブレーキ時には発電ブレーキや機械ブレーキ等の非回生ブレーキにより車両の運動エネルギーが熱エネルギー等に変換されエネルギー損失となる。回生ブレーキが使用される場合、車両の運動エネルギーは電気エネルギーに変換され補機や他の車両等で使用可能であるためエネルギー損失とはならないが、その場合でも主回路機器において機器効率に応じてエネルギー損失が発生する。

全ブレーキに占める回生ブレーキのエネルギー負担割合を  $k_{RB}$  とすると、ブレーキ時の非回生ブレーキによるエネルギー損失  $L_{bm}$ [kJ/km] および回生ブレーキ時の主回路機器でのエネルギー損失  $L_{br}$ [kJ/km] は、式(3)で計算される等価ブレーキ初速度  $V_B$  を用いて次式で計算できる。

$$L_{bm} = (1/X_a)(1/2)W_e (V_B/3.6)^2 (1-k_{RB}) \quad (16)$$

$$L_{br} = (1/X_a)(1/2)W_e (V_B/3.6)^2 k_{RB} (1-\eta_t) \quad (17)$$

なお、回生ブレーキの負担割合  $k_{RB}$  は車両のブレーキシステムによって異なるため、回生ブレーキシステムの実態を考慮して値を設定する<sup>1)</sup>。

### 3.6 ディーゼル車における機関損失等の計算

ディーゼル車の場合には、ディーゼル機関により燃料

のエネルギーを動力に変換して車両の走行に用いる。その変換の際にはエネルギーの一部が熱として捨てられ機関損失となるため、その損失を計算する必要がある。

機関損失を計算する場合には、これまでに説明した全ての損失を合計したエネルギー  $L_\Sigma$  を計算し、そのエネルギーを供給する際に発生する機関損失を計算する。なお、補機が消費するエネルギー  $L_{aux}$  を駆動用のディーゼル機関が供給している場合には、それも  $L_\Sigma$  に加えてから機関損失を計算する。  $L_\Sigma$  は次式で表される。

$$L_\Sigma = L_a + L_m + L_c + L_g + L_{pa} + L_{pc} + L_{br} + L_{bm} + L_{aux} \quad (18)$$

ディーゼル機関の熱効率  $\eta_e$  は機関の性能を表すのに通常用いられている燃料消費率  $q$ [g/PSH] の値から次式により計算できる。

$$\eta_e = 57.5/q \quad (19)$$

実際に用いられている鉄道用ディーゼル機関について熱効率を計算すると、33%～38%程度の値であった。熱効率の値はディーゼル機関により異なり、その値は計算結果に大きな影響を与えるため、計算にあたっては実際に使用されているディーゼル機関の熱効率を調査して、その値を使用することが望ましい。機関損失  $L_e$ [kJ/km] はこの熱効率を用いて次式で計算できる。

$$L_e = L_\Sigma (1-\eta_e)/\eta_e \quad (20)$$

なお、消費エネルギーを最終的に実測値と比較する場合には、燃料消費量で比較する必要がある。エネルギーの単位 [MJ] と燃料消費量 [ $\ell$ ] への換算は換算係数 38.2[MJ/ $\ell$ ] を用いて行う。

また、最終的な燃料消費量を計算する場合にはアイドリング時の燃料消費量も考慮する必要がある。本計算法では、まず、時間平均速度の逆数から距離あたりの走行時間を計算し、さらに停車時間も考慮してアイドリング時間を算出する。そして、アイドリング時の燃料消費量(補機の負荷が無い場合の実測値を参考に 3[ $\ell/h$ ] を設定値として用いる)に算出したアイドリング時間を乗じてアイドリング時の燃料消費量を計算している。

## 4. 簡易計算法のまとめおよび計算例と実測との比較

以上説明した本計算法で計算する各消費エネルギーの項目とその計算方法を表1にまとめる。表1に示した各式を用いて各損失を計算し、それらを合計することで車両の消費エネルギーを算出できる。

本計算法の妥当性を検証するため、電車およびディーゼル車について、おのおの計算結果と消費電力量の実測値を比較した。対象とした電車の方式と運用条件(表2)、

特集：車両技術

計算結果（図5）および、対象としたディーゼル車の方式と運用条件（表3）、計算結果（図6）を以下に示す。なお、電車の場合に関しては既発表文献<sup>(1)</sup>にてより詳細な説明をしているので詳細はそちらを参照頂きたい。計算に必要な入力データは基本的に実測等に基づく実態に即した値を使用しているが、車両Hについては乗車率と補機の動作状況が把握できなかった。そのため、過去の地方旅客鉄道の全国平均値を参考にして乗車率を20%と仮定し、補機については冷房動作時に相当する16kWの補機消費エネルギーを仮定し、計算を行った。

図5、図6によると、計算と実測は概ね一致しており、最も誤差が大きい場合（車両H）でも誤差は9%である。これにより、本計算法が電車とディーゼル車双方について、消費エネルギーの概算法として有効であることが確認できた。

表1 簡易計算法のまとめ

項目	記号	計算式
空気抵抗損失	$L_a$	式(5)
機械抵抗損失	$L_m$	式(5)
曲線抵抗損失	$L_c$	式(11)
勾配抵抗損失	$L_g$	式(13)
力行時機器損失	$L_{ps} + L_{pc}$	式(14), 式(15)
回生時機器損失	$L_{sr}$	式(17)
非回生ブレーキ損失	$L_{brn}$	式(16)
補機消費エネルギー	$L_{aux}$	—
機関損失	$L_e$	式(20)

表2 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		チョップ	添加励磁	抵抗制御	
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

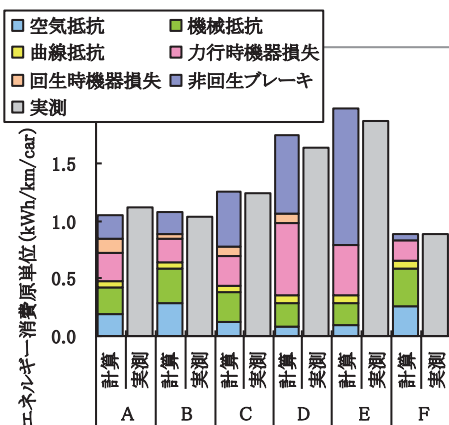


図5 計算と実測の比較（電車）

5. まとめ

走行シミュレーションを行わずに車両の消費エネルギー原単位の計算を簡易に行う手法を開発し、実測との

表3 計算対象としたディーゼル車の方式と運用条件

車両	G	H
燃焼方式	予燃焼室式	直接噴射式
平均駅間距離 [km]	2.67	5.55
時間平均速度 [km/h]	45.2	51.9

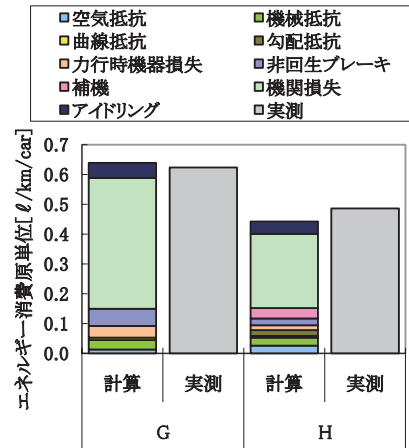


図6 計算と実測の比較（ディーゼル車）

比較によりその有効性を確認した。

ただし、本計算法はあくまでも簡易計算法であり、より詳細な計算を必要とする場合には走行シミュレーションによるべきである。本計算法を用いる場合には以下のような点に注意が必要である。

本計算法は実走行時の列車速度を分析して得られた回帰式を用いている。そのため、運転方法や加速性能が大きく異なる場合には新たに回帰式を作成する必要がある。

走行抵抗による損失の計算では実用的なものとして旧来からある一般的な走行抵抗式を用いている。そのため、実際の走行抵抗が大きく異なる場合には、計算誤差が大きくなる。

また、通勤電車のような比較的単純な走行パターンの場合を想定して計算法を構築しており、特急車両等では単純に本計算法を適用できない場合もある。よって、適用範囲の拡大のためには更なる改良が必要であると考えられる。今後は、更に実測データの収集と分析を進め、本計算法の適用範囲を拡大できるように改良を進めていきたい。

文献

- 1) 近藤稔, 小川知行: 在来線電車の消費エネルギー簡易計算法, 電気学会研究会資料 交通・電気鉄道研究会, TER-10-020, pp.23-28, 2010
- 2) 運転理論研究会編著: 運転理論(改訂版) — 基礎知識と応用実務一, 日本鉄道運転協会, 2002
- 3) IEC 60349-2 Electric traction — Rotating electrical machines for rail and road vehicles — Part 2: Electronic convertor-fed alternating current motors, p.45, 2002.