

3212 在来線電車の消費エネルギー簡易計算法

正 [機・電] ○近藤 稔 (鉄道総研)

正 [電] 小川 知行 (鉄道総研)

An Energy Consumption Evaluation Method for Conventional Electric Trains

Minoru KONDO, Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo

Tomoyuki OGAWA, Railway Technical Research Institute

Running simulations are the most commonly used evaluation method for energy consumption of electric trains. However, it takes a lot of effort and technical knowledge to conduct an appropriate running simulation. Moreover, what matters is the total energy consumption, not the detailed running states in each moment. Therefore, we propose a simple but reliable method that is not use a running simulation. The comparison with measurement suggests that the error of the proposed method is less than 10%.

Keywords: energy consumption, electric train, running resistance, efficiency, regenerative brake

1. はじめに

近年、地球環境問題の観点からあらゆる分野で省エネルギーへの取り組みが行われており、省エネ法では一定規模以上の鉄道事業者に対して省エネ対策とその効果を記載した計画書の提出を義務づけている。そのため、該当する鉄道事業者では、省エネ車両への置き換えによる省エネ効果を算出する必要があり、車両の消費エネルギーを簡易に計算できる方法があると便利である。

車両の消費エネルギーを計算する方法としては走行シミュレーションによる方法が一般的である。しかし、そのためには、線路等の地上設備のデータ、車両のデータ、運転方法に関するデータ等を入力する必要があり、多くの専門知識と労力を必要とする。一方、最終的に計算したいのは年間の消費エネルギーであるため、個々の走行を正確に計算する走行シミュレーションは必要無い。

そこで、本研究開発では、在来線電車を対象に、具体的な走行シミュレーションをせずに、簡易な計算で概略の消費エネルギーを計算できる方法を確立することを目指す。具体的には、車両質量、乗車率、走行距離、走行時間、停車駅数といった、必要最小限の基本的な情報から消費エネルギーを簡易計算する方法を提案する。

2. 簡易計算の方法

2.1 簡易計算の考え方

電車の走行時には様々なエネルギー損失が発生する。本計算法では、それらのエネルギー損失を空気抵抗等の列車抵抗による損失と車両機器での損失に大別し、それぞれの損失を計算していく。そして、その損失計算においては走行シミュレーションを行うことなく、基本的な情報のみで計算を行う。

なお、本計算法では、列車抵抗のうち出発抵抗、こう配抵抗、トンネル抵抗については考慮しない。

まず、出発抵抗は、出発時にしか作用しないためエネルギーの観点からは無視可能であり、考慮しない。次に、こう配抵抗については、これに対して投入したエネルギーは熱に変換されるのではなく位置エネルギーに変換される。そのため、直接エネルギー損失とはならないので

計算の対象としない。トンネル抵抗はトンネルの存在による空気抵抗の増大を表しているが、速度の低い在来線ではトンネル抵抗の大きさも小さいため、その影響は小さいと考え計算の対象としない。

よって、本計算では、残る走行抵抗と曲線抵抗についてエネルギー損失を計算する。なお、エネルギー損失は最終的にはエネルギー消費原単位で算出するため、エネルギー損失は走行距離あたりの数値を計算する。

2.2 走行抵抗によるエネルギー損失の計算法

まず、走行抵抗によるエネルギー損失の計算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抵抗であり、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。

$$R_r = (a + bV)W + cV^2 \quad (1)$$

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。

走行抵抗式の定数は、車両の種類等に応じて様々な値が提案されているが、本計算では、日本の在来線電車用に一般的に用いられている値¹⁾を使用する。

走行曲線が得られている場合、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、走行曲線から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。

$$L_r = aW + bW \frac{1}{X} \int_0^X V dx + c \frac{1}{X} \int_0^X V^2 dx \quad (2)$$

ただし、 L_r : 走行距離あたりの走行抵抗によるエネルギー損失 (kJ/km), x : 位置 (km), X : 走行距離 (km) である。ここで、次式の平均速度を導入する。

$$V_{ave1} \equiv \frac{1}{X} \int_0^X V dx, \quad V_{ave2} \equiv \sqrt{\frac{1}{X} \int_0^X V^2 dx} \quad (3)$$

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 L_r は次式となる。

$$L_r = \frac{1}{X} \int_0^X R_r dx = (a + bV_{ave1})W + cV_{ave2}^2 \quad (4)$$

走行シミュレーションによりエネルギー損失を計算する場合は、走行曲線から V_{ave1} と V_{ave2} を計算し、これらと走行抵抗式によりエネルギー損失の計算ができる。しかし、本計算法では走行シミュレーションを行わないため走行曲線が無い前提で計算する必要がある。一方、本計算法では基本的な情報として走行距離と走行時間が与えられているとしている。そこで、走行距離と走行時間から時間平均速度が計算できる。

$$V_{ave0} \equiv \frac{1}{T} \int_0^T V dt = \frac{X}{T} \quad (5)$$

ただし、 V_{ave0} : 時間平均速度 (km/h)、 T : 走行時間 (h) である。

時間平均速度 V_{ave0} は時間平均であり V_{ave1} と V_{ave2} とは異なる。しかし、それらはいずれも平均速度であり、強い相関があると想定される。そこで、実際の走行曲線からそれらの平均速度を計算して関係を表す回帰式を作成できれば、走行曲線が無い場合でも時間平均速度 V_{ave0} から V_{ave1} と V_{ave2} を算出でき、エネルギー損失が計算できると考えられる。この考えに基づき、実際の営業電車走行時の走行データ（以下、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_{ave0} に対してプロットした例を、回帰直線とともに図1に示す。

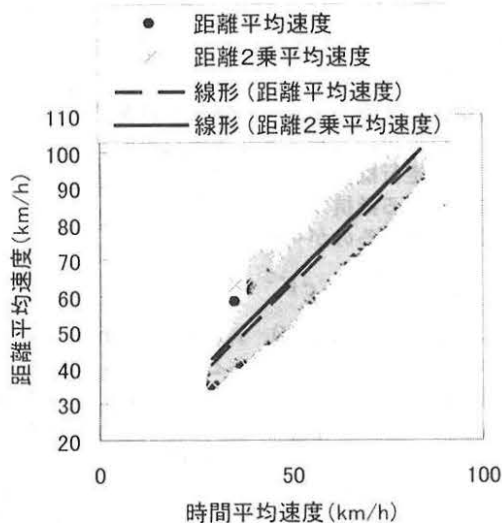


図1 時間平均速度と距離平均速度の関係

図1によると、時間平均速度 V_{ave0} と V_{ave1} および V_{ave2} との間には直線的な相関がある。また、 V_{ave1} と V_{ave2} はほぼ同じ値となり、回帰式もほぼ同じものとなる。よって、本計算法では、両回帰式の係数を平均した回帰式をもちいて2つの距離平均速度を算出する。

2.3 曲線抵抗によるエネルギー損失の計算法

次に曲線抵抗によるエネルギー損失について説明する。

曲線抵抗式は歴史的には様々な式が提案されているが、国内で電車用に一般的に用いられている曲線抵抗式は次式である¹⁾。

$$R_c = \frac{800}{r} gW \quad (6)$$

ただし、 R_c : 曲線抵抗(N)、 r : 曲率半径(m)、 g : 重力加速度 (m/s^2) である。

よって、走行距離 X 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_{i_c} (km) で曲率半径が r_{i_c} (m) であるとする、走行距離あたりの曲線抵抗によるエネルギー損失 L_c (kJ/km) は次式で表現される。

$$L_c = \frac{1}{X} \sum_{i_c=1}^{n_c} x_{i_c} \frac{800}{r_{i_c}} gW = 800 gW \frac{1}{X} \sum_{i_c=1}^{n_c} \frac{x_{i_c}}{r_{i_c}} \quad (7)$$

ここで、等価曲率半径 r_e (m) を次式にて定義する。

$$\frac{1}{r_e} \equiv \frac{1}{X} \sum_{i_c=1}^{n_c} \frac{x_{i_c}}{r_{i_c}} \quad (8)$$

この等価曲率半径を用いるとその走行区間における曲線抵抗による消費エネルギー増加は次式で計算できる。

$$L_c = \frac{800}{r_e} gW \quad (9)$$

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計算できる。

2.4 力行時損失の計算

ある駅間に着目し、起動⇒力行加速⇒惰行⇒ブレーキ⇒停止、という簡易な運転パターンを想定した場合、力行加速時の車両機器における走行距離あたりのエネルギー損失 L_a (kJ/km) は力行加速後の到達最高速度 V_{max} (km/h) に対応する車両の運動エネルギーと車両効率 η (一定値を仮定) から次式により求めることができる。

$$L_a = \frac{1}{X_s} \frac{1}{2} M_e \left(\frac{V_{max}}{3.6} \right)^2 \frac{1-\eta}{\eta} \quad (10)$$

ただし、 M_e : 等価慣性質量(t)、 X_s : 平均駅間距離(km)であり、式中の 3.6 は速度の単位を換算するための係数である。

そこで、本計算法では、まず、時間平均速度から、期待される到達最高速度を算出し、これを用いて力行時損失を計算する。実走行データを用いて時間平均速度に対して到達最高速度をプロットした例を図2に示す。

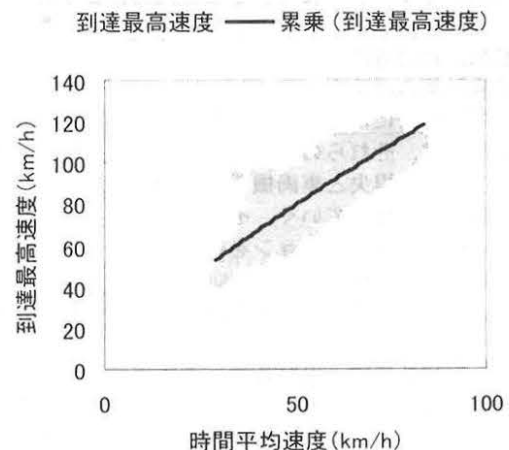


図2 到達最高速度と時間平均速度の関係

図2中に示したとおり、時間平均速度と到達最高速度の間には強い相関があり、その相関を表す回帰曲線を用いれば時間平均速度から到達最高速度を概算できる。

次に車両効率の値について述べる。車両効率とは車両の駆動用機器のエネルギー変換効率であり、電車の場合には電気機器の効率（主回路効率）と歯車装置の効率の積となる。実際の主回路効率は一定では無いが、誘導電動機や直流電動機の効率は負荷が変動しても比較的变化が少なく、概ね一定とみなしても大きな誤差にはならない。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を図3に示す。

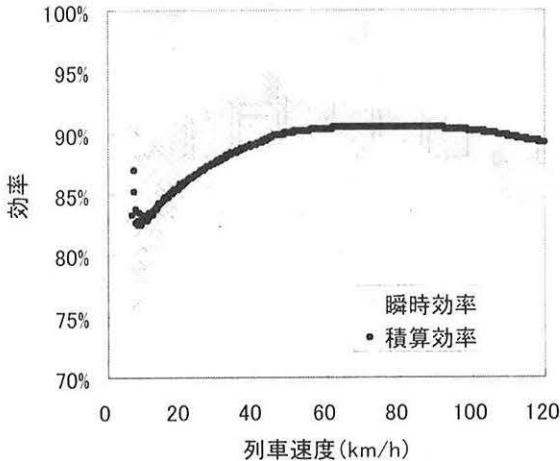


図3 インバータ電車における力行加速効率の実測例

図3で示した瞬間効率は、各時刻における機械出力を入力電力で割ったものである。また、積算効率は機械出力の時間積分値を入力電力の時間積分値で割ったものである。本計算で用いる車両効率は、停車状態からある速度まで加速する際の効率であり、積算効率が車両効率に対応する量である。積算効率は速度40km/hから速度120km/hにおいて概ね90%であるといえる。一方、直流電動機の場合については、主電動機効率が90%前後であることから、主回路効率は同じく90%程度と考えられる。車両効率を算出する際には、これらの主回路効率にこの歯車効率を乗じたものを用いる。歯車効率の値はIEC規格²⁾に準じ98%とする。

なお、抵抗制御車の場合には、主抵抗器でのエネルギー損失も考慮する必要がある。抵抗挿入が行われる低速域での主電動機電圧は、概ね図4のように制御される³⁾。

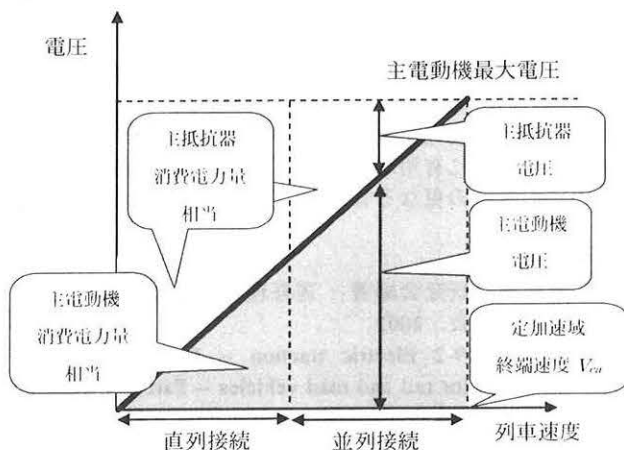


図4 抵抗制御時の主回路電圧

この領域ではほぼ定加速であるため図4の横軸は時間と読み替えることもできる。また、この領域では主電動機電圧が概ね一定に制御されることを考えると、電圧を消費電力と読み替えることができる。よって、主抵抗器と主電動機の消費電力量の比は図4中に示した三角形の面積比となり、主電動機消費電力量の半分が主抵抗器消費電力となる。よって、主抵抗器のエネルギー損失（走行距離あたり） L_{MR} (kJ/km) は車両効率 η と定加速域終端速度 V_{ca} (km/h) を用いて、次式で表すことができる。 V_{ca} の値は通常40km/h程度である。

$$L_{MR} = \frac{1}{X_s} \frac{1}{2} \frac{1}{\eta} \left\{ \frac{1}{2} M_e \left(\frac{V_{ca}}{3.6} \right)^2 \right\} \quad (11)$$

以上は列車を起動し、加速する際のエネルギー損失である。一方、特急列車のように駅間距離が長い走行の場合には速度を維持するために力行するため、その際に発生する損失も考慮する必要がある。この損失は、走行抵抗や曲線抵抗による損失による速度低下を補うための力行時に発生すると考えることができる。この速度維持のための走行距離あたりの損失 L_k (kJ/km) は概ね次式で計算できる。

$$L_k = (L_r + L_c) (1 - \eta/\eta) \quad (12)$$

これらを全て合計し、走行距離あたりの力行時の損失 L_p (kJ/km) は次式で計算できる（抵抗制御を用いない車両では L_{MR} は0）。

$$L_p = L_a + L_{MR} + L_k \quad (13)$$

2.6 ブレーキ時損失の計算

次に、ブレーキ時のエネルギー損失について述べる。本計算法では、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エネルギー変換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 V_B (km/h) は実走行データを用いて次式により算出できる。

$$V_B = \sqrt{2 \int_0^N (D_B \cdot 3600) dx} \quad (14)$$

ただし、 D_B ：ブレーキ力に対応するブレーキ減速度 (km/h/s) であり、応荷重制御付の電気指令式ブレーキで減速度がブレーキノッチに比例する場合、 D_B はブレーキノッチ指令値 N_B を用いて次式で計算できる。

$$D_B = D_{B_max} (N_B / N_{B_max}) \quad (15)$$

このようにして求めた等価ブレーキ初速度と到達最高速度の関係を実走行データから調べたところ次式のような直線的な相関があった。

$$V_B = k_B V_{max} \quad (16)$$

k_B は比例係数であり、その値は通勤電車において96%、近郊電車において79%であった。よって、時間平均速度から求めた到達最高速度にこの係数を乗じて等価ブレーキ初速度を算出することができる。さらに、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の大きさ（走行距離あたり）は次式で計算できる。

$$E_B = \frac{1}{X_s} \frac{1}{2} M_e V_B^2 \quad (17)$$

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においてエネルギー変換に伴う損失が発生する。

そして、全エネルギーに占める回生ブレーキの負担割合を 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_{MB} 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_{RB} は次式で計算できる。

$$L_{MB} = E_B (1 - k_{RB}) \quad (18)$$

$$L_{RB} = E_B k_{RB} (1 - \eta) \quad (19)$$

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り、回生ブレーキの有効速度範囲や、遅れ込み制御の有無と電動車割合等から概算する。

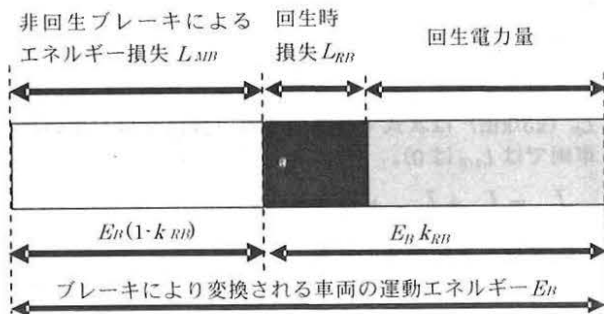


図5 プレーキ時のエネルギー変換の考え方

3. 簡易計算法による計算例

以上の計算法により各エネルギー損失を計算し、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。本手法の有効性を検証するため、本計算手法による計算結果と消費電力量の実測値を比較した。車両条件、走行条件を表1に示す。

表1 計算条件

	A	B	C	D	E
空車質量(t)	124.4	388	315.3	251.4	251
荷重(t)	8.3	0.0	4.5	4.5	0.0
編成両数	4	10	10	8	6
主回路方式	インバータ	チョップ	添加励磁	抵抗制御	抵抗制御
回生割合	100%	55%	46%	0%	0%
平均駅間距離(km)	2.3	2.1	1.2	1.2	19.3
時間平均速度(km/h)	74.0	52.6	41.8	41.2	76.7
等価曲率半径(m)	1400	1600	960	960	1600

比較対象とした実測値は、Aについては実際の営業列車での実測結果を用いており、A以外は新車製造時の性能試験結果を用いている。Aの乗車率については、各駅間の乗車率測定値に駅間距離をかけたものを合計し、それを総走行距離で割って求めたものを用いている。

表1の計算条件に対する計算結果を、エネルギー消費

原単位を単位として表示したものを図6に示す。

□ 走行抵抗 □ 曲線抵抗 ▨ 力行時機器損失
▩ 回生時機器損失 ■ 非回生ブレーキ □ 実測

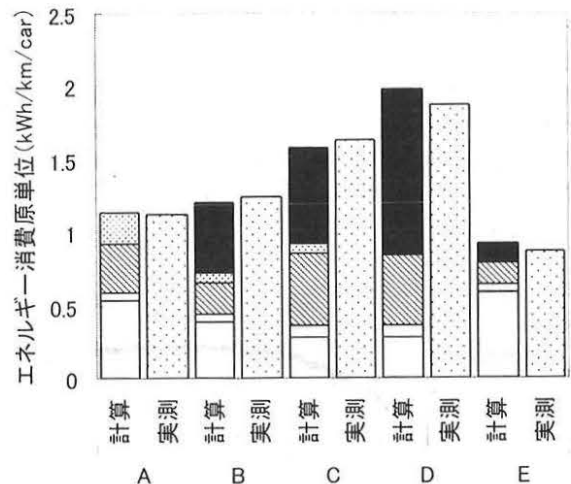


図6 計算と実測の比較

図6によると、計算と実測は良く一致しており、最も誤差が大きいDでも誤差は6%である。これにより、本計算法が概算法として有効であることが確認できた。

なお、本計算法では到達最高速度の計算に回帰式を用いているがB～EはB～Dの試験結果から作成した共通の式を用いているのに対し、Aのみ別の式(Aの実測結果より作成)を用いている。これは、Aがインバータ車で他の車両に比べて加減速性能が大きく異なるためである。一方、距離平均速度算出用の回帰式はA～Eで共通であり、Aの実測結果から作成した回帰式を用いている。

このように、本計算法では少ない入力データから、簡単に消費エネルギーを計算できる反面、回帰式を作成するための実測データが必要となる。しかし、その実測データとしては速度とブレーキノッチがあれば良いので、運転状況記録装置等を用いて簡単に得ることができ、多くの事業者で容易に実施可能である。

また、本計算法ではエネルギー消費の内訳が分かるため、省エネ化のための指針を得ることができる。例えば、図6に示した例からは、通勤電車では回生割合の向上や車両効率の向上が重要であることや、特急列車では走行抵抗の低減が重要であること等が容易に分かる。

4. おわりに

走行シミュレーションを行わずに簡易な計算で消費エネルギーの計算を行う計算手法を提案し、実測との比較によりその有効性を確認した。本手法は鉄道事業者の省エネ計画作成に有用なツールとなることが期待される。本手法が鉄道の更なる省エネに貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) 運転理論研究会編著：運転理論，pp.83-98，日本鉄道運転協会，2002
- 2) IEC 60349-2 Electric traction -- Rotating electrical machines for rail and road vehicles -- Part 2: Electronic converter-fed alternating current motors, p.45, 2002
- 3) 電気学会編：最新 電気鉄道工学, p.42, コロナ社, 2000