ディーゼル車両のエネルギー消費原単位簡易計算法

○［機］近藤　稔　　村上　浩一　　［電］小川　知行　　宮部　実（鉄道総合技術研究所）

An Energy Consumption Evaluation Method for Diesel Railcars

○ Minoru Kondo, Kouichi Murakami, Tomoyuki Ogawa, Minoru Miyabe,
(Railway Technical Research Institute)

The estimation of the energy consumption of railway vehicles is essential in planning energy-saving programs in railway companies. We have been developing an energy consumption evaluation method for such purposes. The method does not need to run a detailed running simulation but uses some empirical equations to simplify the calculation process. In this paper, the method is applied to diesel cars and the effectiveness of the method is verified through the comparison with measurement results.

キーワード：エネルギー消費原単位，ディーゼル車両，トルクコンバータ
Key Words：Energy consumption rate, diesel car, torque converter

1．はじめに

鉄道車両の省エネを推進するためには車両のエネルギー消費を評価する尺度が必要であり，改正省エネ法ではエネルギー消費原単位という尺度を用いている。エネルギー消費原単位は走行距離あたりのエネルギー消費を編成両数で割って1両1km走行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，新旧の車両のエネルギー消費原単位の差に，導入車両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。

そこで，著者らは走行シミュレーションを行わずに鉄道車両のエネルギー消費原単位を簡易に計算する方法を開発し，発表している[1)2)]。本論文では，その研究開発成果のうちディーゼル車を対象とした簡易計算法について紹介するとともに，新たな実測値との比較結果や本計算法を用いたエネルギー消費の内訳分析方法について報告する。

2．簡易計算法の基本的考え方[1)2)]

2.1 電車の簡易計算法の基本的考え方[1)]

図1は平坦な線区で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の変化の例を示したものである。走行シミュレーションでエネルギー消費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エネルギー消費を計算する。

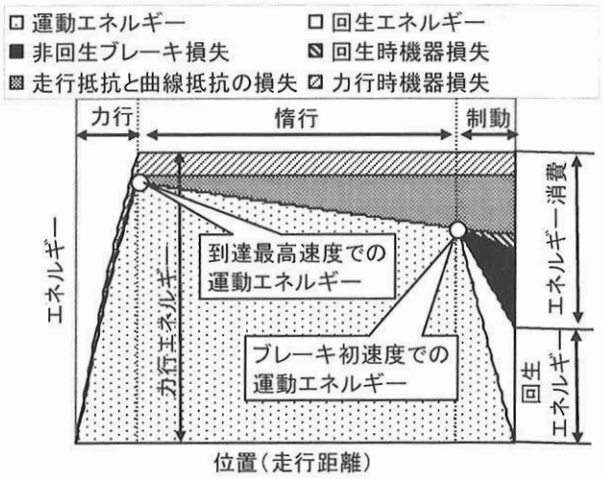

図1　電車走行時のエネルギーの変化

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エネルギー消費の計算が可能である。この方法では，エネルギー消費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，実際の運転パターンは図1のように単純では無い。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。そこで，本計算法では，等価ブレーキ初速度[1]という量を定義して，実際の運転を図1のような運転に置き換えてエネルギーの計算をする。

また，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。そして，対象とする走行の走行距離と走行時間を駅間の数で割ることにより，平均駅間距離と平均駅間走行時間を計算する。そして，さらに平均駅間距離を平均走行時間で割ることで時間平均速度を算出し，これらをエネルギー計算に用いる。

ここで，図1のような運転を前提にすると，到達最高速度における車両の運動エネルギーと車両の機器効率から力行時の機器損失を簡単に計算することができる。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，実際の運転データを分析して，到達最高速度や等価ブレーキ初速度と時間平均速度の関係を表す回帰式を予め求めておき，その回帰式を用いて時間平均速度から到達最高速度等を算出して機器損失等の計算に用いている。

また，走行抵抗による損失も同様に，実際の運転データを分析して得られた回帰式を用いて，時間平均速度から損失計算に必要な距離平均速度を算出し，これと走行抵抗式から損失を計算することで，走行シミュレーションを不要にしている。

これらの計算法の基本的な部分ついては，既発表文献[1)2)]にて紹介しているので，そちらを参照頂きたい。

2.2 ディーゼル車の簡易計算法の基本的考え方[2)]

ディーゼル車の場合にも，電車の場合と同じ考え方でエネルギー消費の計算ができると考えられる。ただし，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ている。そして，その変換の際にはエネルギーの多くの割合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。

そこで，ディーゼル車の計算においては，まず，機関損失を除く全ての損失を計算し，それを合計して得られる全エネルギー消費供給する際に発生する機関損失を計算する。そして，その機関損失も加えて得られるディーゼル機関への入力エネルギーを計算し，そのエネルギーに対応する燃料消費量を計算する。

さらに，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[ℓ/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。

3．ディーゼル車両の効率の計算

3.1 変速機の効率

電車の場合には入力電力が機械的な動力として出力される際の損失を機器損失として計算した。一方，ディーゼル車両の場合にはディーゼル機関から動力がトルクコンバータを内蔵した変速機に入力され，その出力が減速機を介して輪軸に伝えられる。その際に，変速機や減速機では動力伝達時に機器損失が発生する。ディーゼル車両の計算においては，これらの損失を機器損失として計算する。機器損失のうち，変速機や減速機の歯車損失については一定値の歯車効率を用いて概算できる。しかし，トルクコンバータの効率は動作状態により大きく変わるため，計算時に用いる効率の求め方が課題となる。

一方，電車用の簡易計算法では，主電動機等の電気機器における機器損失を計算するために使用する効率として，積算効率という考え方を採用し，電車の電気機器の損失計算に用いている。積算効率とは，速度ゼロから到達最高速度まで加速する際の，出力を積算した全出力エネルギーを，入力を積算した全入力エネルギーで割ったものである。この考え方はトルクコンバータのように動作点によって効率が変動する機器に対して有効な方法である。そこで，本計算法ではトルクコンバータについては積算効率を用いて損失を計算している。以下ではトルクコンバータの積算効率の具体的計算方法について説明する。

トルクコンバータの特性と組み合わせるエンジンの特性が分かっているとき，トルクコンバータの効率は，出力軸回転速度の関数として，図2に示すような形で表すことができる。

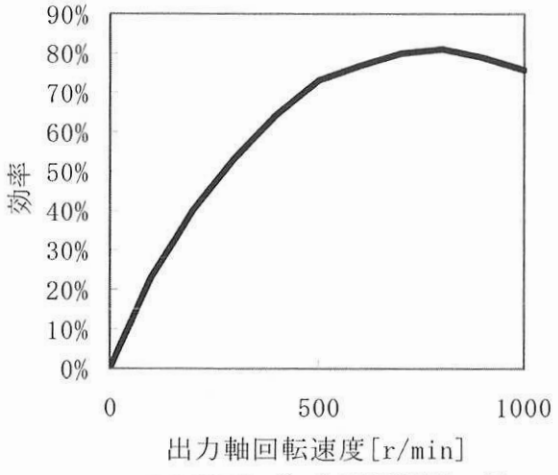

図2　トルクコンバータの効率特性の例

以下では，この図に示されるような効率特性を用いて，液体式変速機と減速機で構成される動力伝達装置の積算効率を算出する方法について述べる。

まず，車両が速度ゼロから加速して変速段終端速度（力行加速時に変速段から直結段に切り替わる速度）まで加速する際の，トルクコンバータの積算効率を求める。

トルクコンバータの出力軸回転速度 N_o は発車時刻 t_1 に

おいて0であり，時刻t_2において列車速度は変速段終端速度まで到達して，その際N_oはN_{max}まで到達するものとする。このときの変速機の全出力エネルギーE_oは，出力軸トルクをT_oとすると次式で計算できる。

$$E_o = \int_{t1}^{t2} (2\pi N_o T_o) dt \quad \cdots\cdots (1)$$

更に，各回転速度Nでの効率$\eta_c(N_o)$が与えられている場合，全入力エネルギーE_iは次式で計算できる。

$$E_i = \int_{t1}^{t2} (2\pi N_o T_o / \eta_c(N_o)) dt \quad \cdots\cdots (2)$$

ここで，加速時の列車抵抗を無視し，変速機や減速機の歯車効率が一定であると仮定すると，列車の加速度は出力軸トルクに比例すると考えることができるので次式の関係が得られる。

$$\frac{dN_o}{dt} = \alpha T_o \quad \cdots\cdots (3)$$

ただし，αは比例定数で一定値である。

この関係を利用してE_oとE_iの式を変形すると以下のようになる。

$$E_o = \int_0^{N_{max}} \frac{2\pi N_o}{\alpha} dN_o \quad \cdots\cdots (4)$$

$$E_i = \int_0^{N_{max}} \frac{2\pi N_o}{\alpha \eta_c(N_o)} dN_o \quad \cdots\cdots (5)$$

よって，変速機の積算効率は次式で計算できる。

$$\eta_{ci} = \frac{E_o}{E_i} = \frac{\int_0^{N_{max}} N_o \, dN_o}{\int_0^{N_{max}} (N_o / \eta_c(N_o)) dN_o} \quad (6)$$

一例として図2のトルクコンバータについて積算効率を計算すると，71%となる。

ある到達最高速度まで加速する場合の機器損失を計算する場合には，まず，変速段終端速度に到達するまでに発生する機器損失を計算し，その後，そこから到達最高速度に到達するまでの機器損失を計算する。そのとき，前者の計算ではトルクコンバータの積算効率に変速機と減速機の歯車効率を掛けたものを機器効率として機器損失を計算し，後者の計算では変速機と減速機の歯車効率のみを掛けたものを機器効率として機器損失を計算する。

3.2 ディーゼル機関の熱効率[2)]

ディーゼル機関の熱効率η_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。

$$\eta_e = 57.5/q \quad \cdots\cdots (7)$$

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。

$$L_e = L_\Sigma (1 - \eta_e) / \eta_e \quad \cdots\cdots (8)$$

ただし，L_Σは電車用簡易計算と同様に，走行抵抗による損失や機器損失などの走行に伴うエネルギー損失を計算して合計した値であり，ディーゼル機関からの全出力エネルギーに等しい。

なお，エネルギー消費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]から燃料消費量[ℓ]への換算は換算係数 38.2[MJ/ℓ]を用いて行う。

4．計算結果の例

4.1 計算結果と実測結果の比較

本計算法を用いてエネルギー消費原単位を計算した例を対応する実測結果とともに図3に示す。計算と実測の比較は表1に示すA～Dの4種類の車両・運用条件について実施した。

表1　計算に用いた入力データ

入力項目	A	B	C	D
編成質量[t]	71.6	27.7	27.7	36.4
編成両数[両]	2	1	1	1
編成定員[人]	224	112	112	96
機関効率[%]	25.4	37	37	37
トルコン効率[%]	75.1	70	70	65
歯車効率[%]	91	91	91	91
変速段終端速度[km/h]	60	45	45	45
補機消費電力[kW]	0	16	16	0
アイドル時燃料消費[ℓ /h]	3.8	3	3	3
平均駅間距離[km]	2.67	5.55	4.33	5.32
時間平均速度[km/h]	45.2	51.9	46.5	47.1
乗車率[%]	0	20	20	20
等価平均勾配[‰]	0	8.4	3.82	7.89
等価曲率半径[m]	1000	1086	664	880
運用時間/走行時間[%]	110	121	138	135

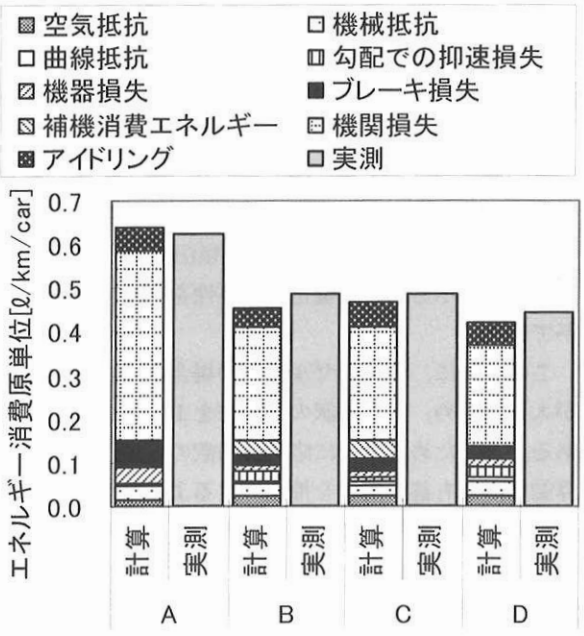

図3　計算結果と実測結果の比較

図3によると，計算結果と実測結果は概ね一致しており，本計算法によりエネルギー消費原単位が計算できることが確認できる。

また，図3から明らかなように，エネルギー消費原単位の内訳の中では機関損失が大きな割合を占めている。車両Aに比べ車両B～Dのエネルギー消費原単位が小さい主な理由としては，車両B～Dの方が比較的高い機関効率であることが挙げられる。機関損失はディーゼル車両のエネルギー消費の大きな割合を占めており，ディーゼル車両の省エネのためには効率の高いディーゼル機関を使用することが極めて重要であるといえる。

4.2 内訳の分析

前節で見たように，機関損失は大きな割合を占めている。しかし，だからといって，走行抵抗による損失や機器損失が重要でないという訳ではない。式(8)に示したように，機関損失は走行抵抗による損失や機器損失を合計したものに比例する。しかし，図3の損失分類法（分類法A）ではそのことが明示的に示されていないため，例えば，走行抵抗を低減した場合にどの程度のエネルギー消費原単位低減効果が得られそうかといった見通しを得ることができない。

そこで，機関損失を独立した内訳の項目とはせずに，機関損失をその原因となる各エネルギー損失に割り振ることで，機関損失以外のエネルギー損失の寄与度を明示することができると考えられる（分類法B）。この分類法で計算結果を表示したグラフを図4に示す。図4から確認できるように，分類法Bでは各損失の寄与度を容易に確認でき，省エネ対策を検討する上で有益な情報を得ることができることが分かる。

一方，省エネ化の代表的な方策である軽量化の効果がどの程度期待できそうかは，上記の分類法でも明示されない。しかし，実際には空気抵抗による損失，アイドリングによる損失，補機負荷以外のすべてのエネルギー消費は概ね質量に比例する項となっている。そこで，分類法B中のそれらの項を「質量比例損失」として表示することで，軽量化でどの程度の省エネが期待できそうか明示できると考えられる（分類法C）。この分類法で計算結果を表示したグラフを図5に示す。図5によると，分類法Cでは質量に比例する成分が明示され，軽量化の重要性を容易に確認することができる。

このように，ディーゼル車両の場合には機関損失の割合が大きいため，特に内訳の分類法を工夫することが重要である。そのため，目的に応じて内訳の分類法を工夫し，計算結果から有益な情報を抽出できるようにすることが，ディーゼル車両の場合には特に重要になると考えられる。

5．おわりに

ディーゼル車両の簡易計算法について，その計算法の特徴について述べ，これを用いた計算結果の例や内訳分析の例を示し，その有効性を示した。

本計算法が鉄道会社におけるディーゼル車両の省エネ化推進に役立つことを期待する。

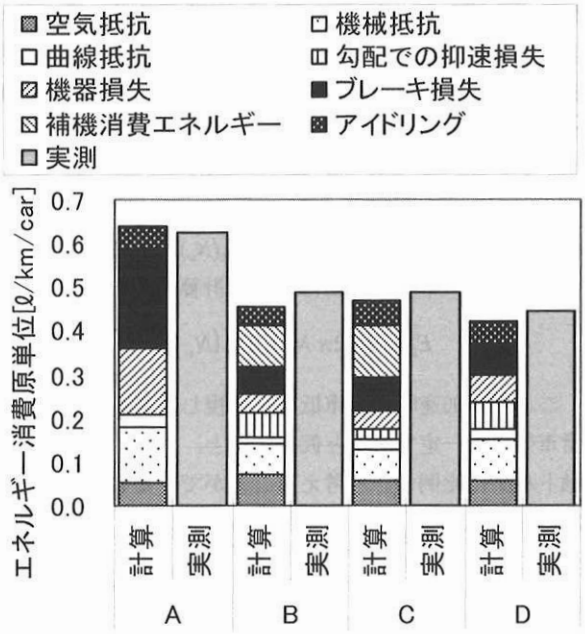

図4　分類法Bによる計算結果の表示

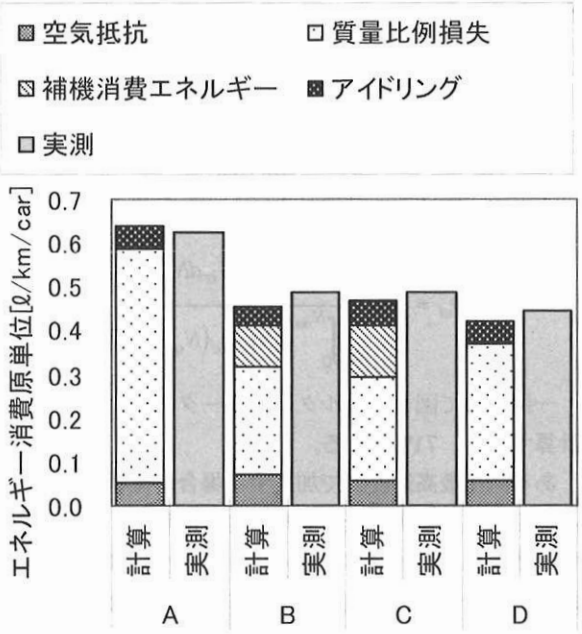

図5　分類法Cによる計算結果の表示

参　考　文　献

1) 近藤稔，小川知行：在来線電車のエネルギー消費簡易計算法，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) 近藤稔，小川知行，村上浩一：鉄道車両のエネルギー消費簡易計算法，鉄道総研報告，Vol.25, No.8, pp.41-46, 2011.