

交通機関のエネルギー効率に関わる技術的性格に関する検討

価格政策や補助政策を通じて交通機関をよりエネルギー効率の優れたものに誘導してゆくことは、今後さらに重要となってくるものと考えられる。このような政策を適正に推進するためには、インフラストラクチャーの整備水準の不足や需給不均衡と切り離して、交通技術のエネルギー消費に関する基本的な性格を認識する必要がある。本論文は、交通機関の支持・推進の力学と動力供給のシステムの性格を組み合わせ、基本的に要求される運用方法のもとにおけるエネルギー効率を比較したものである。

キーワード エネルギー効率, 交通機関, 運行, 車両の力学, 回生ブレーキ

角 知憲
SUMI, Tomonori

工博 九州大学大学院工学研究科教授

広松 新
HIROMATSU, Arata

工修 建設省土木研究所

厲 国権
LI, Guoquan

工博 運輸政策研究所研究員

大枝義直
OHEDA, Yoshinao

工博 九州大学大学院工学研究科講師

1 はじめに

気候変動枠組条約第3回締約国会議が京都議定書を採択して以来、交通に関しても、いわゆる「税制のグリーン化」が話題にのぼるようになってきた¹⁾。燃料価格や自動車課税とエネルギー消費やCO₂排出量の関係も大きな関心を呼んでいる^{2),3)}。価格政策や助成その他の政策は自動車購買行動の制御のみならず、電気自動車のようなエネルギー効率を改善する新しい技術開発を誘導したり、道路整備や公共交通機関への補助などとバランスさせるなどの目的に適用する必要があるものと考えられる。本論文は、このような政策を効果的に立案するための基礎資料として、交通機関の基本的な技術特性をエネルギー効率の観点から比較しようとするものである。交通機関のエネルギー消費に関しては、公共交通機関を含めた考慮や、運行のみならず固定施設の建設や維持も含めたLCE概念への拡張などが精力的に行われているが^{4),5),6),7)}、これらは、マクロなデータや平均的な運行から、平均的な燃料消費を仮定して議論を行うものが多い。しかし、マクロなエネルギー効率指標は、交通施設の整備水準の不足や需給不均衡の効果を含むので、交通機関の技術的性格を十分には表さない。より好ましい技術が、技術外の要因による需給不均衡のため、みかけの効率性が損なわれたり、あるいはその逆の事態が生じているとしたら、その技術的性格と需給不均衡の効果を区別して評価する必要がある。また、近年の技術の進歩は、交通機関のタイプや動力装置にさまざまな組

み合わせの自由度を生み、多くのバリエーションを考慮する必要も生じている。本論文では、このような観点に立つ著者らのこれまでの報告に基づき⁸⁾、エネルギー効率改善に大きな期待が集まる回生ブレーキの効果を追加して考察し、合わせて現実には避けられない交通渋滞における電気自動車の効果を中心に、交通技術の力学的性格と動力装置の効率評価を結合して、エネルギー効率を検討する。

2 エネルギー効率から見た支持・推進の力学と動力装置の性格⁸⁾

2.1 支持・推進の力学と効率

交通需要には、その需要が要求する基本的な運行プロファイルがある。運行プロファイルとは、乗客を搭載して、発進、加速、巡航、減速、停止という運転を行う、その時間的な変化のパターンを呼ぶ。そのプロファイルのうち、起終点を結ぶもっとも単純なものをミッションプロファイルと呼ぼう。図 1は、横軸を時間、縦軸を速

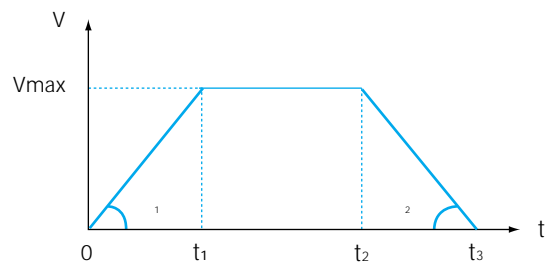


図 1 ミッションプロファイル

度にとって、これを示したものである。これは概念的なもので、図の領域が加速、が巡航、が減速を表す。これは交通機関の特性によって相違する。たとえば、乗客が立っている可能性がある公共交通機関では加減速度(、の直線の勾配)が小さいし、変速を行う自動車では、は直線ではなく曲線、むしろ折線になる。自動車の燃料効率を計る際に用いられる10モードとか11・15モードなども、都市内、近郊を走行するための運行プロファイルであるが、これらは交通機関が本来要求されるものでなく、需給不均衡によって変化するので、ミッションプロファイルとは考えない。さて、ミッションプロファイルは交通機関の効率を大きく支配し、それに適したシステムの選択を通してエネルギー効率を向上することができる。換言すれば、同じミッションプロファイルを用いれば、異なる交通機関の運行の力学的効率性や動力装置の効率性といった交通機関の技術的性格を相互に比較することができる。このような比較は、定常運行を前提としたカルマン - ガブリエリの指標や⁹⁾、揚抗比あるいは乗り物効率といった指標¹⁰⁾では表現できない。交通機関は、人を収容する容器であるキャビンを持し、推進し、案内し、停止させる機能を持つ。エネルギー効率は、基本的に支持・推進・案内の力学特性とエネルギーを発生する動力装置の効率に依存する。そこで、著者らは次のような効率性の指標を採用している⁸⁾。

一般に、機関内部抵抗やパワートレインの抵抗を除く走行抵抗 R_p は次のように表される。

$$R_p = R_0 + R_1V + R_2V^2 + R \quad (1)$$

ここに、 R_0 は速度に依存しない成分、 R_1V 、 R_2V^2 は速度およびその2乗に比例する成分、 R は加速抵抗、 V

は速度である。 R_0 は、通常必ずしも大きくないが、いろいろな部分で起きる固体摩擦などである。また、 R_1V は、ベアリングの抵抗や空気の摩擦抵抗などの流体抵抗、 R_2V^2 は主に空気の圧力抵抗である。 R は、通常、次のように表される。

$$R = m_e \quad (2)$$

$$m_e = (1 + \quad)m + m_p \quad (3)$$

ここに m_e は回転部分の慣性を補正した実効質量、は補正係数、 m は車両質量、 m_p はペイロード、は加速度である。これらの計算法はパラメータの数値とともに文献¹¹⁾などに示されているが、基本的に支持・推進、あるいは車両の連結などの運行に関わる力学的性格を表す。同時に、走行抵抗は動力装置の発生する駆動力に等しく、したがって $R_p \cdot V$ は推進のため費やされる仕事率を表す。一方、車両の重量を W 、有償搭載量 W_p とすれば、 $W \cdot V$ 、あるいは $W_p \cdot V$ は、交通機関を動かすことの本来の目的である仕事率を表すといえる。そこで、推進・支持の力学的エネルギー効率の指標として、 $W \cdot V$ あるいは $W_p \cdot V$ をミッションプロファイルに沿って積分した値と、 $R_p \cdot V$ を同じく積分した値(2つの値は、いずれも仕事[エネルギー]の次元を持つ。)の比をとる。以下、有償搭載量に対する効率を主として考えることとして、

$$E_p = \frac{W_p \cdot V dt}{R_p \cdot V dt} = \frac{W_p \cdot L}{R_p \cdot V dt} \quad (4)$$

を使用する。ここに、 L は運行プロファイルで与えられる走行距離(以下、1運行距離と呼ぶ。)である。この指標の計算には、次のような方法を採用した。

乗用車の加速パターンは文献¹²⁾に示された代表的な測定結果に従い、バスは文献¹³⁾を参考に同様の变速段

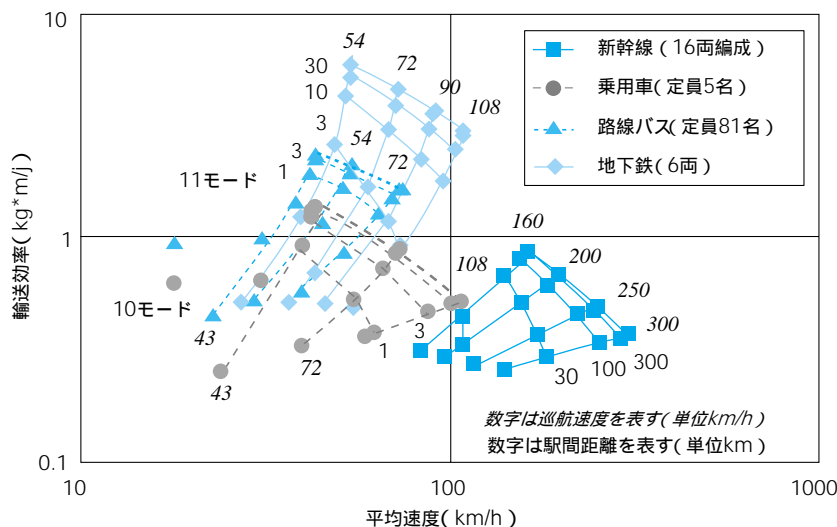


図 2 支持・推進の力学に関わるエネルギー効率

位ごとに異なる加速度を用いた。したがって、前に述べたように加速期間が1本の直線ではなく、数段に分かれた折線となる。鉄道の運行は、基本的に車両ごとの設計仕様に従うものとした。

図 2は、ミッションプロファイルを規定する二つの変数、巡航速度とプロファイルから求まる1運行距離(鉄道なら駅間距離に相当する。)をパラメトリックに変化させ、(4)式から支持・推進の力学的特性に関わるエネルギー効率を計算した結果を示したものである。図の横軸は平均速度[単位: km/h]、縦軸は E_p [kgf・m/J]で、「輸送効率」と表記してある。図中の数字のうち斜体は巡航速度[km/h]、立体は1運行距離[km]を示す。縦軸は、対数尺度になっていることを注記しておく。また、参考のため、乗用車、路線バスについて、10モード、11モードの効率も示している。この計算に使用した代表的な鉄道車両の主要な諸元とミッションプロファイルの設定値を表 1に、また、同様に自動車、バスに関する数値を、表 2に、さらに表 3には、自動車の回転部分の慣性に関する補正値を示しておく。表 3中のデータはトラックであるが、パワーローディングの点から、バスは乗用車よりトラックに近いので、この数値を流用する。鉄道車両は変速装置を用いないのでこの数値は一定で、1.15の程度であると言われている。

この計算では、運行の全エネルギーに対して、案内のために増加するエネルギー量は小さいため、案内の効率の差を無視している。加速のために使われるエネルギー(加速抵抗)は、一部は摩擦抵抗の増加などで失われるものの、かなりの部分はヴィークルの運動エネルギーに変換されて保存され、その後惰性運行によって回収され、残りは最終的にブレーキによって捨てられる。また、登坂は、動力装置が発生するエネルギーを位置のポテンシャルとして蓄えるもので、いずれ坂を下るとすれば動力に変換して回収される。そこで、勾配の影響は無視し、エネルギー消費としては加速抵抗のみを考慮した。減速度はエネルギー消費の計算には不要で、区間平均速度にのみ関係する。また、重量は定員乗車を仮定している。周知のように個人用自動車の平均乗車人員は1.2、あるいは1.4の程度であり、一方、東京や大阪の都市鉄道は、しばしば乗車率は200%を超えるので、両者を定員乗車の条件で比較することは不適当に思われる。ただ、乗車率をこの指標にかければ、それぞれのエネルギー効率をただちに修正することができる。

図より、運行の速度領域が重なる範囲では、鉄道が自動車、バスに比べて大きく優れること、乗り合いのバスが自動車に比してやはり優れること、速度領域が異なるとはいえ、新幹線の効率が小さいことが分かる。ただ、地下鉄のような都市鉄道のミッションである駅間0.5~1kmでは都市型バス(図では「路線バス」と表示してある)と同等もしくは劣ることが分かる。これは、乗客当たり自重が鉄道が大きく、加速抵抗に相当するロスが大きいためである。輸送力の点でバスは鉄道に劣るので大量の大都市型の輸送需要には向かないが、専用道路を多数連結して運行するバス型のシステムは、高い効率を持つ可能性がある。電気自動車の力学的な性格は通常の自動車と同じであるので、この図は電気自動車を記載していない。電気自動車は、おそらく変速操作は必要としないし、回転部分の慣性に関する補正は鉄道に近いものと考えられるが、一般に電気自動車は電池のため重量が大きいので、有償搭載量と全重量の比が小さく、普通の乗用車とは有意に差が生じることを付記しておく。

図より、運行の速度領域が重なる範囲では、鉄道が自動車、バスに比べて大きく優れること、乗り合いのバスが自動車に比してやはり優れること、速度領域が異なるとはいえ、新幹線の効率が小さいことが分かる。ただ、地下鉄のような都市鉄道のミッションである駅間0.5~1kmでは都市型バス(図では「路線バス」と表示してある)と同等もしくは劣ることが分かる。これは、乗客当たり自重が鉄道が大きく、加速抵抗に相当するロスが大きいためである。輸送力の点でバスは鉄道に劣るので大量の大都市型の輸送需要には向かないが、専用道路を多数連結して運行するバス型のシステムは、高い効率を持つ可能性がある。電気自動車の力学的な性格は通常の自動車と同じであるので、この図は電気自動車を記載していない。電気自動車は、おそらく変速操作は必要としないし、回転部分の慣性に関する補正は鉄道に近いものと考えられるが、一般に電気自動車は電池のため重量が大きいので、有償搭載量と全重量の比が小さく、普通の乗用車とは有意に差が生じることを付記しておく。

表 1 代表的鉄道車両に関する諸元

形式	地下鉄	在来線	新幹線(100系)
編成	4M2T	6M2T	16
質量(t/両)	40(M) 34(T)	39.7(M) 34(T)	54.2
定員(人)	136(先頭車) 144(中間車)	136(先頭車) 144(中間車)	普通席 1,153 グリーン席124
加速度(m/s ²)	0.889	0.667 (乗車率100%) 0.500 (乗車率300%)	0.278

表 2 代表的な自動車、バスの諸元

車種	乗用車	路線バス	高速バス
車両重量(kg)	1,020	9,800	12,870
乗車定員(人)	5	81	55
車両総重量(kgf)	1,295	14,255	15,895
排気量(ml)	2,000	9,880*	20,781*
加速度(m/s ²)			
1速	2.0	1.2	1.2
2速	1.25	1.0	1.0
3速	0.8	0.8	0.8
4速	0.8	0.6	0.6
減速度(m/s ²)	1.3	1.0	1.0
変速速度			
1速 2速	5.0	5.0	5.0
2速 3速	8.5	8.5	8.5
3速 4速	11.1	11.1	11.1
空気抵抗係数	0.35	0.65	0.65
前面投影面積(m ²)	2.0	7.3	8.1
転がり抵抗係数	0.010	0.010	0.010

注) *印はディーゼルエンジンである。

表 3 自動車の回転部分の慣性に関する補正(1+)の値

	乗用車	トラック
第1速	2.70	2.56
第2速	1.54	1.46
第3速	1.20	1.20
第4速	1.10	1.10

2.2 動力装置の性格と効率

自動車のエンジン(内燃機関)は、動力を発生する必要がない停止時にもアイドルを続けなければならない

いし、減速中にも燃料を消費する。また、熱効率がエンジンの出力と回転数に依存し、効率の高い領域は比較的狭い。一方、電気モータはエネルギー効率が非常に高いが、重量が大きく、給電のために長距離送電、したがって送電ロスを生じる。このように、動力装置によって燃料から動力へのエネルギー変換の効率が相違する。そこで、動力装置を含めた全体の効率を次のように考える。

いま、内燃機関を想定して見よう。ある時点で動力装置の発生するパワー P と R_p の間には、

$$R_p \cdot V = \eta_t \cdot P \quad (5)$$

の関係がある。ここに η_t は動力装置から駆動装置までの伝達効率である。熱機関の場合、 P はさらに熱効率 η_h によって燃料消費率 f [kg/sec] との関係が、

$$P = \eta_h \cdot f \quad (6)$$

と表される。さらに f は原油からの精製や輸送、供給の効率を次々とたどることにより、原油 f_p に換算することができる。

$$f = \eta_c \cdot f_p \quad (7)$$

ここに η_c は原油から熱機関用燃料への総合的変換効率である。(6)式の P が運行プロファイルによって与えられるので、(7)式を運行プロファイルにしたがって計算することができる。これを(4)式の R_p のかわりに用いれば、消費される原油に換算した効率指標を得ることができる。動力装置が電気モータの場合には、(6)式右辺に変わり電力供給とモータの効率の積が用いられることにな

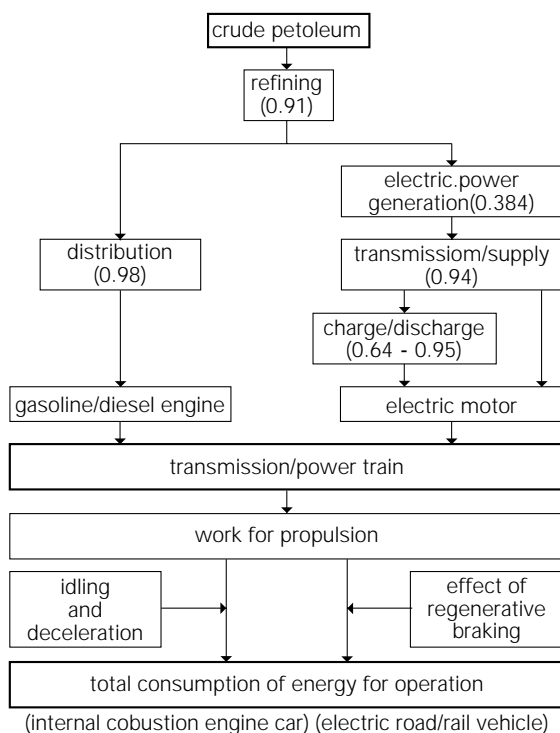


図 3 交通機関へ供給されるエネルギーの流れと変換効率

るが、さらに送電効率、発電所の熱効率とたどって最終的に原油消費率に換算することができる。そこで、以下では、エネルギーが原油由来のものであることを仮定し、加工、動力発生・伝達のプロセスの効率を考慮して、最終的に消費される原油に換算した効率 E_t を採用する。もちろん、電力には水力、原子力、地熱などの発電方法があるが、どんな電力でも品質に相違がなく相互に代替可能であるとすれば、火力発電を仮定しても問題はない。ここで想定した原油からのエネルギー変換過程と効率を図 3 に示す。この図と数値は文献¹⁴⁾から得ている。

また、内燃機関の熱効率が出力と回転数に依存する性質を、厳密ではないが次のように考慮する。

図 4 は、あるタイプのガソリン機関、ディーゼル機関の燃料消費率試験の結果から、平均有効圧力 P_a (トルク/排気量を平均有効圧力と呼ぶ^{15), 16)}。これはエンジンの容量の差に関わらない指標である。と熱効率 η_e の関係を統計的に求めたものである。この種の性能は設計によってある程度相違すると予想されるが、詳細な燃料消費率試験結果は公開されないことが多く、目下のところ利用できるデータは少ない。そこで、図 4 の曲線のような近似式を適用する。この近似式は、

$$\begin{aligned} \eta_e &= 0.9516P_a^3 - 1.9921P_a^2 + 1.3273P_a, && \text{(ガソリン機関)} \\ &= 1.0883P_a^3 - 2.3822P_a^2 + 1.6614P_a, && \text{(ディーゼル機関)} \end{aligned} \quad (8)$$

である。また、通常の自動車は、停止中にも減速中にも燃料を消費し続ける。本報告では、いくつかのデータと文献から¹⁷⁾、次の仮定を設ける。

1. ガソリン車のアイドリング中の燃料消費率は、エンジン排気量とアイドリング回転数に比例する。
2. アイドリング回転数は、エンジン排気量のほぼ $(-1/6)$ 乗に比例する。

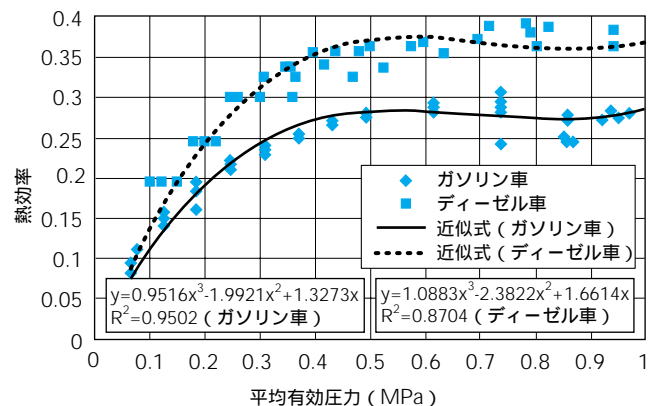


図 4 内燃機関の熱効率

3. ディーゼルエンジンとガソリンエンジンの差は、空気過剰率に比例する。

アイドリング中の燃料流量 g_{id} (cc/sec) は、

$$g_{id} = 6.202 \times 10^{-4} \cdot C \cdot V^{5/6} \quad (9)$$

である。ここに、 C は空気過剰率を代表する定数、 V はエンジン排気量(cc)である。 C はガソリンエンジンがほぼ理論空燃比に近い範囲で運転されるのに対してディーゼルは空気が大幅に大きいことから、簡単のためガソリン車 $C=1$ 、ディーゼル車 $C=0.5$ とした。定数は、この数値を用いるための修正係数である。

また、減速中の消費率は文献に示された排気量2,000ccの自動車の例¹⁷⁾にならって、アイドリング時の1.16倍であるものとする。

図5は、バスの2タイプと地下鉄車両について、図2と同様に、ただし縦軸に E_r をとって原油消費量に換算した効率を比較したものである。縦軸は、「区間輸送総合効率」と表記してある。バスの曲線に微妙な変化があるのは、上記の内燃機関の熱効率を考慮したためである。この効率が高くないにも関わらず、この図と図2に見られる鉄道・バスの関係には大きな変化がない。これは、発電・送電というプロセスを考慮した結果である。

図6は、電気自動車をバスと乗用車と比較したものである。この図には2つのタイプの電気自動車を考慮している。1つはNi - Cd電池を用いるもの(EV1)、他は硫酸 - 鉛電池を用いるもの(EV2)である。電気自動車には、二次電池(蓄電池)を用いるものと燃料電池を用いるものがあり、両者とも精力的な開発が続けられている

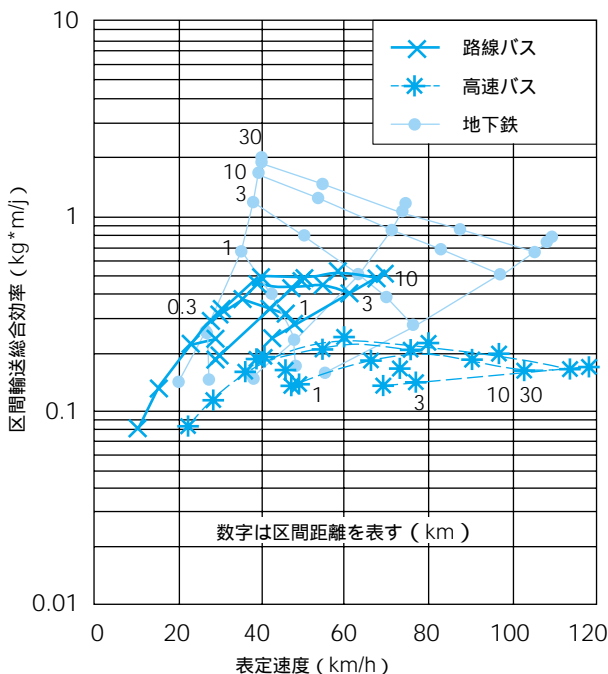


図5 バスと地下鉄の総合効率の比較

が、技術的に完成度が高く実用車が存在するのは前者である。技術的な情報が入手しやすいこともあり、この章で取り上げたのは、このタイプの2種で、その諸元は表4に示したとおりである。特に表5には、電池の種類に応じた充放電効率を示しておく。また、電気自動車に関しては、二次電池(蓄電池)、燃料電池の急速な進歩とともに、搭載されるモータの進歩も注目される。表6には、使用されるモータの効率を示しておく。

前に述べたように、電気自動車はおそらく変速操作は必要としないが、高速度まで急加速を続けるとは思えないので、通常の自動車との比較を重視して同じ加減速パターンを与えている。概してEV1の方が優れるが、これ

表4 電気自動車諸元

	EV1	EV2
前面投影面積(m)	1.76	2.3
空気抵抗係数	0.19	0.40
空虚重量(kg)	1,573	1,460
総重量(kg)	1,793	1,680
モータタイプ	ブラシレスDC	ブラシレスDC
出力(kw)	25kw × 4	45kw
最大トルク(kg・m)	42.5	165
最高速度(km/h)	176	125
電池種類	Ni-Cd	硫酸 - 鉛
電池重量	531	480
駆動方式	in-wheel-direct-drive	FF
変速機	-	-
タイヤ転がり抵抗	0.007	0.01

表5 二次電池の充放電効率

種類	硫酸 - 鉛	Ni - Cd	リチウム
効率	0.64	0.87	0.95

表6 モータのエネルギー効率

種類	加速時	定速時
永久磁石型	0.6	0.8
ブラシレスDC	0.7	0.9

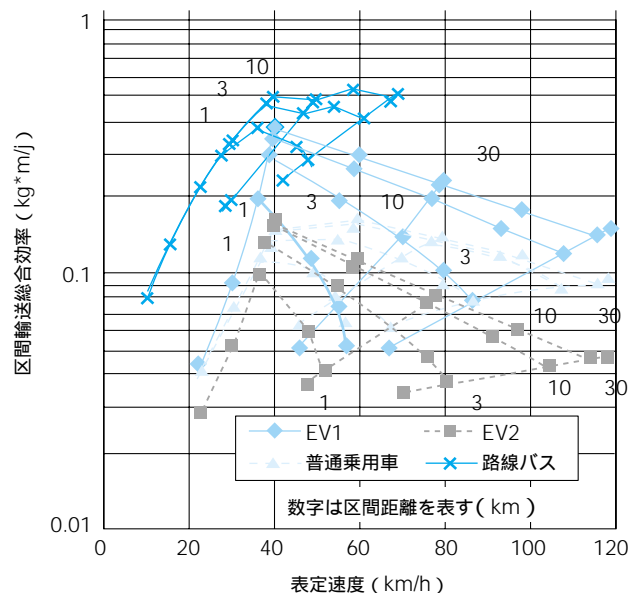


図6 電気自動車と乗用車、バスの効率

は電池の性能によるところが大きい。

また、図 7には、参考までに新幹線電車の計算結果と文献中の航空機(ターボファン旅客機)の燃料消費データ¹⁸⁾から得た効率を比較して示す。この航空機は、近代的な設計の中・短距離用機(航空機としては、大陸間輸送用の機種に比べれば燃料搭載量が少なく輸送効率が高い)であるが、新幹線の効率がやはり圧倒的に優れている。ただ、図中の表記は省略しているが巡航速度は図 2と同様に設定しており、一番右の曲線が300km/hである。ヨーロッパでは、鉄道を巡航速度400km/h、500km/hを超える速度で走らせる実験が成功しているが、駅間距離をきわめて大きくとつても図 7の曲線をその速度まで外挿すると、航空機に近いところまで急速に効率が低下すると予想される。これは、鉄道が多数車両を連結して1両当たりでは空気抵抗を小さくできるとはいえ、空気密度の高い地表を走行するためであって、航空機は、空気密度が1/3の高度10,000m付近を運航している。

図 2~7から、次のようにいうことができる。

- 1) 一般に力学的には、鉄道は自動車より優れている。しかし、巡航速度が高く区間距離が短い運行プロファイルでは、優位性が低下してくる。区間距離1km前後以下の都市型のプロファイルでは、むしろバスの方が優れる可能性がある。これは、一般に単位輸送量当たりの車両重量が鉄道の方が大きいためである。
- 2) 動力装置の効率まで含めると、内燃機関が必ずしも効率が良くない領域で使用されることの影響が現れる。
- 3) 動力装置の効率まで含めても、鉄道の効率の方が

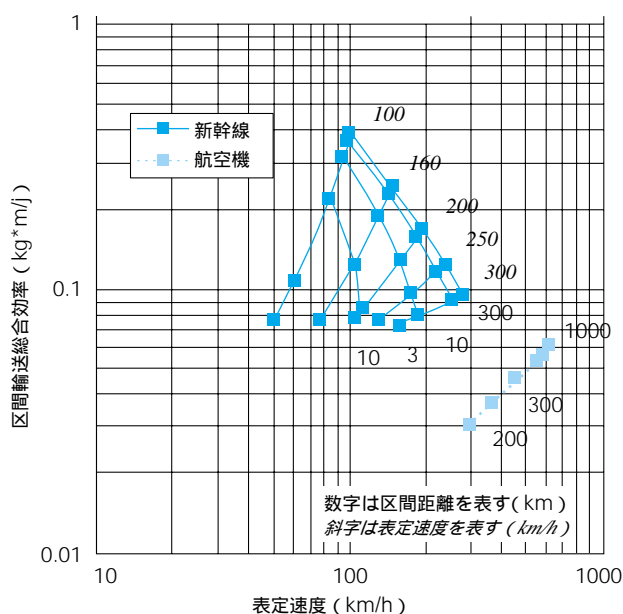


図 7 新幹線と航空機のエネルギー効率

自動車より優れるが、鉄道の動力である電気モータと内燃機関の相違はそれほど大きくない。モータの効率は高いが、発・送電を考慮すると内燃機関との差は小さくなる。

- 4) 電気自動車の効率の相違は主として電池の種類による。硫酸 - 鉛電池を使用すれば、通常の乗用車と大差なく、ある場合には劣る。
- 5) 新幹線は航空機には勝っている。ただし、表示速度を高い方に外挿すれば効率は急速に低下し、航空機が向上してくると対照をなす。

3 深刻な交通渋滞における電気自動車の効率

電気自動車に関しては、二次電池(蓄電池)やモータの進歩について、先に触れた。一般に交通機関の動力が全力運転されることは少なく、効率最高の状態で運転されることも少ない。特に渋滞した道路を走行する自動車では、アイドリングを含めて内燃機関の効率が小さい範囲で運転されることが多いのに比べ、電気モータは広い負荷範囲で効率がよいという利点を有する。一方、重い電池を搭載する必要がある電気自動車では、加速・減速によって捨てられる運動エネルギーが大きくなり、渋滞すると不利になる要素もある。そこで、10モードや11モードとともに、さらに深刻な交通渋滞を想定したモードを仮定して、電気自動車のエネルギー効率を試算して、通常の自動車と比較してみることにする。

図 8は、試算に採用した4つのモード(A~D)を示す。10モード、11モードの平均速度は、それぞれ17.7km/h、30.6km/hであるが、このA~Dのモードは一定の周期で一定の巡航速度に達するまで加速し、一定時間の巡航ののち減速、停止を繰り返すもので、深刻な渋滞中のアコーディオンモーションを想定したものである。平均速度、1サイクルの区間距離、その他の数値を

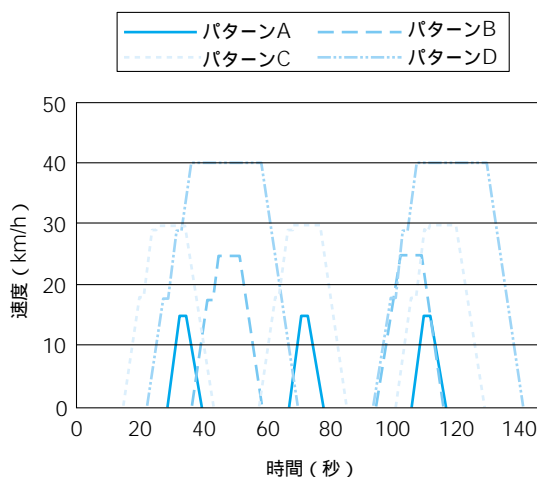


図 8 交通渋滞を想定した自動車走行パターン(A~D)

10, 11モードと比較して表 7に示す。電気自動車は普通の自動車のような変速操作は不要であるが、渋滞列中で前後の自動車に走行パターンを規定されることもあり、簡単のため通常の自動車と同じ加速パターンを適用した。図 9は、図 2と同様に(有償荷重×輸送距離)/(走行抵抗を克服するために必要な力学的エネルギーの総和)で表したエネルギー効率を通常の自動車、バスと比較したものである。前述のミッションプロファイルに対する結果と対比すると、著しく小さいことが分かる。それでも、電気自動車と通常の自動車の差は大きくなく、比較的平均速度が大きい走行モードDや10モード, 11モードの場合には、むしろ通常の自動車の方が優れている。また、比較のために同様に計算して記載した路線型バスの効率の良さが読みとれる。この電気自動車の効率の低さは、電池重量が大きく、有償荷重以外の重量を運搬するエネルギーが大きいことである。これを動力装置の差異を考慮して、最終的な原油消費量に対する効率に換算したものが図 10である。通常の自動車は停止中減速中もエネルギー消費のため効率が低下するのに対し、それが無い電気自動車の優位が目立ってくるが、それでも走行モードDや10モード, 11モードでは、通常の自動車と大差がない。電気自動車の優位が認められる範囲は、比較的限られるようである。ただし、この計算では、電気自動車に回生ブレーキを採用する可能性を無視している。次章で述べるように回生ブレーキの効果は限定的ではあるが、発進、停止を頻繁に行うほど、回

生ブレーキの効果が大きいので、できるだけ低速まで有効な回生ブレーキを採用することが望ましい。また、電池の種類によっては充放電履歴に依存して容量が低下することがあり、発電ブレーキで小刻みに充電することが容易でないものもある。

4 動力回生技術の効果

交通機関の動力装置の出力を決める要因の一つは、発進・加速の際の加速抵抗である。すでに述べたように、加速のために必要なエネルギーは車両各部の前進の運動エネルギーおよび回転機構の運動エネルギーに変換され蓄えられているので、減速に際してこれを回収すればエネルギー効率を高めることができる。そのために最も便利なのが電気モータで、電気モータは電力供給を断って外部から回転させれば発電機として使うことができる。電気モータを発電機として電力回収を行う、いわゆる回生ブレーキは、電化された鉄道でこれまでも使用されてきたし、今後開発が予定される電気自動車やハイブリッド自動車でも利用することがあり得る。

回生ブレーキの使用に際しては、次のような性質が現れると考えられる。

回転速度が小さくなると発電性能は下がってブレーキ力が低下するのが普通で、機械ブレーキと併用する必要がある。したがって、回収エネルギーに限界がある。

回収した電気エネルギーを貯蔵するために二次電池を用いると、充放電効率が必ずしも大きくない。電力線から電力を受ける交通機関の場合、電力線を通じて他のモータや消費者に回生電力を返すとすると、昇圧や整流(直流の場合)、周波数変換などの装置を別に必要とする。もし、同じ電力線に別の消費者がいなければ、その給電区間の外に供給するために、さらに設備が必要である。

車輪と路面の摩擦によらずリアモータによって駆

表 7 交通渋滞を想定した自動車走行パターン

パターン種別	A	B	C	D	10モード	11モード
巡航速度(km/h)	15	25	30	40	20/40	40 - 80
平均速度(km/h)	2.47	6.17	10.7	20.9	17.7	30.6
1サイクル時間(s)	36.8	55.4	40.9	68.0	135	120
1サイクル距離(m)	25	95	121	388	660	1020
停止時間率(%)	72.2	62.3	33.7	30.7	26.7	21.5
加速時間率(%)	11.3	14.4	25.7	22.8	24.4	34.2
定速時間率(%)	5.2	10.8	20.2	30.2	23.7	13.3
減速時間率(%)	11.3	12.5	20.4	16.3	25.2	30.8

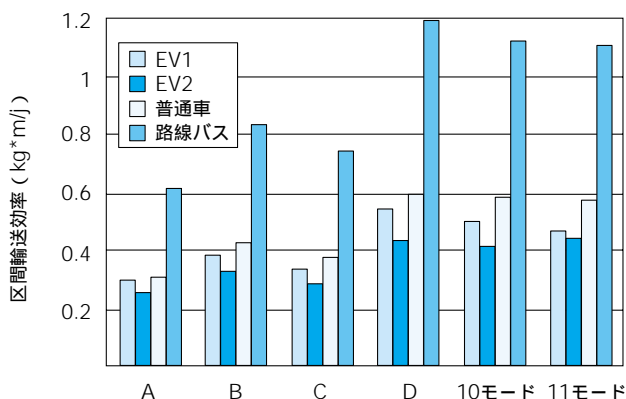


図 9 交通渋滞を想定した力学的エネルギー効率

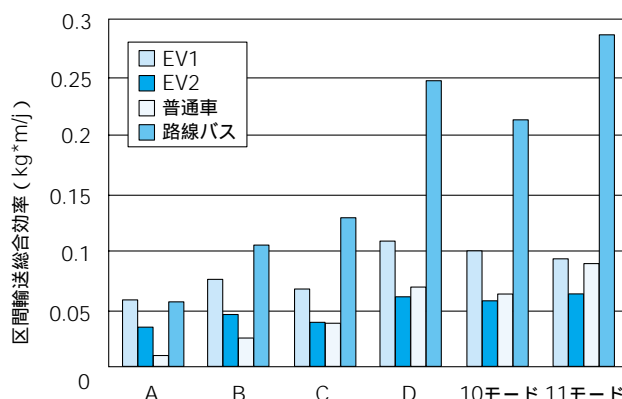


図 10 交通渋滞を想定した総合エネルギー効率

動・減速を行うなどのシステムを除けば、どのみち減速中には車輪と路面の間に大きな摩擦力が作用するが、これは原理的に回収できないエネルギーのロスである。

これらの事情を考慮すると、動力回生による効率の改善は限定的なものと考えられるが、比較的大きな加減速度で短距離の運行を繰り返す場合には、ある程度の効率改善があり得る。そこで、有償荷重に比べて自重が大きく回生ブレーキの効果が出やすい駅間距離が小さい鉄道を想定して、代表的な列車の走行中の運動エネルギーに対する回収率をパラメトリックに変えて、エネルギー効率の変化を試算してみた。適用した車両は表 1 中の「在来線」と表記されたものである。計算の際に用いた巡航速度は、20m/s(72km/h)とした。図 11 は、横軸を平均速度にとり、縦軸をエネルギー効率にとって、回収率0、30、50%の場合を比較したものである。ここでは、動力装置は共通として力学的な効率のみを考慮し、また同一車両を想定するところから、効率指標には有償荷重ではなく車両全重量を用いているが、単に比例計算で有償荷重に関する結果に変換できることは言うまでもない。図中の数字は駅間距離を表す。図より、駅間距離が小さく頻繁に発進・停止を繰り返すミッションほど回生の効果が大きいことがわかる。駅間距離が1km以下で効率改善効果が小さいのは、この列車の加速度が小さく巡航速度に達する前に減速することになるため、さらに加減速度が大きい地下鉄などの車両では、こ

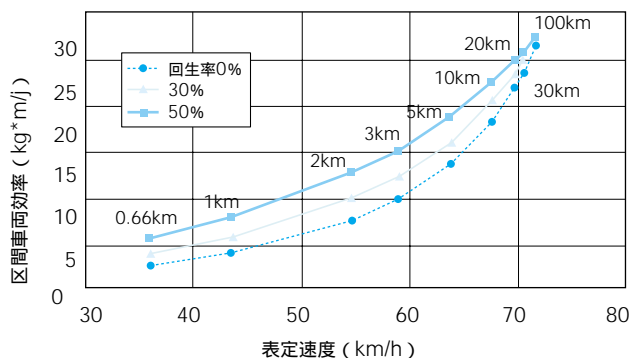


図 11 回生ブレーキによる効率改善効果(1)

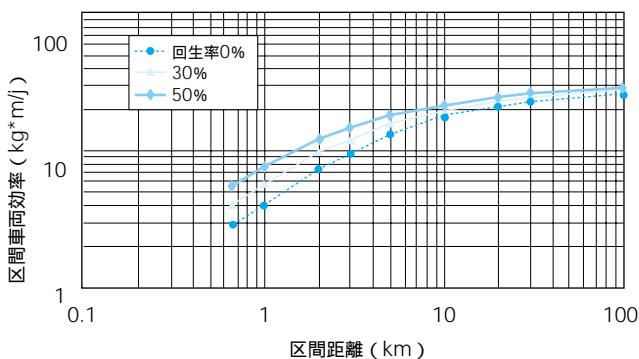


図 12 回生ブレーキによる効率改善効果(2)

れより大きい効果が得られる。それにしても、効率改善の効果は限定的であると言えようし、この事情は、鉄道と同様に回生が期待される電気自動車にもあてはまることであろう。図 12 は、同じ結果を横軸を駅間距離に変え、両軸を対数軸にとって表現したものである。

5 まとめ

本報告は、CO₂排出量削減のために、交通に関わる新しい技術の開発や普及を適切に促進したり誘導する政策の策定や、異なる技術の間でそれらの促進誘導を適正にバランスさせる政策立案に資することを目的として、交通の需給不均衡の影響を排除して本来の技術的性格を反映するような運行パターンを想定しながら、エネルギー効率を比較したものである。本報告では、交通機関の性格を、力学的特性を動力供給の特性から区別して評価し、次いで両者を総合するという方法を採用した。また、目下エネルギー効率の改善に期待が高まっている技術のうち、電気自動車と電力回生ブレーキを取り上げ、その可能性を検討した。主な結論は次のようにまとめられよう。

- 1) 一般に鉄道やバスといった集合的サービスは、個別輸送の自動車に比べてエネルギー効率が高い。これは、主として有償荷重すなわち搭載する旅客の重量に比べて車両の重量が小さいためである。もちろん、旅客が少なければ効率は低下するので、鉄道やバスを有効に利用することが、エネルギー効率の面からも有効である。
- 2) 電気動力の鉄道と内燃機関のバスを比較して、1km以下の短い間隔で停車するような運行では、鉄道の効率はバスに劣る可能性がある。動力に関しては、内燃機関と発・送電過程を考慮した電力とでは、大差は無さそうであるが、鉄道は、旅客重量に比較した自重がバスより大きいため、この結果が生じている。
- 3) いずれにせよ、車両に関しては有意な重量の削減が効果的である。
- 4) 電気自動車は、通常の自動車に比べて、部分負荷時のモータの効率が内燃機関より優れているという利点を有するが、それが発揮されるのは、アイドリングや減速中のエネルギー消費が無視できない、かなり深刻な交通渋滞の場合に限られそうである。この事情を決定するのは電池の重量が大きいため、ここでもまた車両の重量が大きな影響を与えることがわかる。
- 5) 電池重量のほか、電気自動車の効率は充放電効率

に依存するので、充放電効率の高い電池を見いだすことが重要である。

6) 回生ブレーキによる効率改善効果もそれほど大きくないと見られる。電気自動車について本報告では試算を行っていないが、鉄道電車より不利な面がある。それは、回生電力を電池に充電するためにロスを伴うほか、電池によっては回生エネルギーを回収しにくいタイプがあることである。

本報告で行った試算は、理論的にそれほど厳密ではない。運行プロファイルや動力装置・エネルギー供給過程の効率も、おおまかな仮定に基づくものであるし、動力装置の性質と車両の力学的特性を区別するといいたしながら、その重量特性に動力種別の影響が皆無とは言えない。しかし、たとえば効率比較のためのほとんどの軸は対数軸であり、多少の誤差があっても極端な結論の変化はないであろう。また、エネルギー効率は、車両の運行だけでなく、旅客サービスや運行管理・保安、施設の維持管理などを総合して考慮する必要があるし、ライフサイクル評価も求められる。ライフサイクル評価について、すでにある程度の試算があり、著者らも試算したが、結果的に車両の製造、管理、廃棄などのためのエネルギーは運行エネルギーに比べれば小さい。ただ、インフラストラクチャーの建設に関わるエネルギー消費は大きいものといわれ、これをいかに扱うかは今後の課題である。さらに、本報告では、技術情報の不備のためであっても、ハイブリッド自動車やリニアモーター駆動列車などの新技術を取り上げていない。これらも今後検討する必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 運輸政策審議会総合部会：運輸部門における地球温暖化への対応方策について、運輸政策審議会総合部会報告，1997。
- 2) 吉岡正道：エネルギー価格変動下における自動車交通の動向に関する基礎調査，道路交通経済，No.10，1980。
- 3) 林良嗣，加藤博和，上野洋一：自動車関連税の課税レベルと税間バランスによるCO₂削減効果の差異に関する分析，運輸政策研究，Vol.2，No.1，pp2-13，1999。
- 4) OECD:Automobile Fuel Consumption(in Actual Conditions)Director of Information, OECD, 1982.
- 5) Society of Automobile Engineers: Proceedings of the 1995 Total Life Cycle Conference, Global Mobility Database, 1995.
- 6) 運輸省運輸政策局情報管理部：平成8年版運輸関係エネルギー要覧，p8，1996。
- 7) 吉本秀幸(監修)：大都市生活のライフサイクルエネルギー，資源協会，1998。
- 8) Sumi,T., A. Hiromatsu, and Y. Oheda: Energy Efficiencies of Transportation Modes Considering Operation Profiles and Power Supply Systems, Proc. of 1st Asia Pacific Conference on Transportation and Environment, pp329-337, 1998.
- 9) Gabrielli, G. and TH. von KARMAN: What Price Speed, Mechanical Engng., 72-10, pp775-781, ASME, 1950.
- 10) 赤木新介：新交通機関論，コロナ社，1995。
- 11) 日本機械学会：機械工学便覧，C2 - 交通，1988。
- 12) 角 知憲ほか：信号交差点を発進する車群先頭車のマン・マシン・システム・モデル，土木学会論文集，No.530/ -30，pp99-107，1996。
- 13) Vuchic, V.R.(田仲博・訳)：都市の公共交通機関 - そのシステムとテクノロジー，技報堂，1990。
- 14) 谷辰夫，小山茂夫，大野吉弘：エネルギー変換工学，コロナ社，1996。
- 15) 日本機械学会：機械工学便覧，B7 - 内燃機関，1988。
- 16) 富塚清：交通機械工学，山海堂，1972。
- 17) 谷口正明：高速道路料金自動収受システムの省エネルギー効果の試算，車と情報，15巻，pp16-17，自動車走行電子技術協会，1996。
- 18) Kemp, R.: The European high speed network, Passenger Transport after 2000 AD(Ed: G. Feiden, A. Wikens, and I. Yates), p78, The Loyal Society, 1995。

(原稿受付 1999年11月17日)

A Consideration on Fundamental Features of Energy Efficiency for Transportation Modes

By Tomonori SUMI, Arata HIROMATSU, Guoquan LI and Yoshinao OHEDA

Energy efficiency of transportation is in great concern from the viewpoint of environment since energy consumption of transportation is a significant part of carbon dioxide generation. Development of new technologies to reduce the energy consumption must be accelerated according to suitable prospects and policies. The energy efficiency of transportation depends on the imbalance between the travel demand and supply, and its technical features is not clearly represented by the macroscopic statistics. This technical report examines the efficiencies in vehicle dynamics and power supply systems. These examination suggested the possibilities and limits of new technologies applicable to transportation systems, such as electric vehicle and regenerative braking. It was also revealed that rail systems were much advantageous than road vehicles of personal use, and, the used of rubber-tired train provided high efficiencies in some cases with short distance operations.

Key Words: *energy efficiency, transportation modes, operation, vehicle dynamics, regenerative braking*

この号の目次へ <http://www.jterc.or.jp/kenkyusyo/product/tpsr/bn/no08.html>