

交通モード間のエネルギー効率の比較

九州大学工学部 ○学生員 廣松 新
九州大学工学部 正 員 角 知憲

1. はじめに

近年エネルギー問題への関心がたかまってきており、交通システムにおいても省エネルギーの必要性が重要視されている。異なった交通機関のエネルギー効率を比較するための指標は各種提案されているが本研究では、推進という仕事に要したエネルギーを物理的に計算して、各交通機関のエネルギー効率を比較してみた。

2. エネルギー効率の定義

(1) エネルギー消費原単位

交通モード間のエネルギー効率を表す指標としてよくもちいられるものにエネルギー消費原単位がある。しかしながらこれはあくまでマクロ的な数値であり、また、交通サービスにとって重要な要素である速度の概念が欠けている。

表-1 主要輸送機関別エネルギー消費原単位²⁾

自家用乗用車	507
営業用バス	174
鉄道	100

エネルギー消費原単位 = (輸送機関別エネルギー消費量(kcal)) / (輸送機関別輸送量(人キロ))

(2) カルマン線図

交通機関の乗物効率を示すものとして有名なのがカルマン線図である。これはHP/WV(動力/重量*速力)を、速力Vに対してプロットしたものである。しかしながら一般に交通機関がその最高速度で常時運行したり、最高出力を常時発生させるのは稀なケースで、最高速度に達する前に減速することが多い。したがってカルマン線図の内容は特に自動車において現実にそぐわない部分が多い。

(3) L/D

航空機の輸送効率を表す指標に揚坑比(lift-drag ratio)L/Dがある。この値が大きいほど輸送効率はよい。航空機では

$$W=L, HP=D*V/\eta$$

(W:全備重量、L:揚力、HP:出力、D:抗力、V:速度、 η :推進効率)

であるから

$$WV/HP=(L/D)*\eta$$

となる。航空機以外の各交通機関においても、重量

と走行抵抗の比をとってL/Dとして計算すると、以下のような値となり、低速時では船舶の、中速時では鉄道の輸送効率がよいことがわかる。

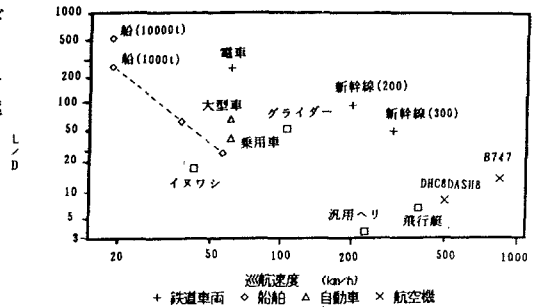


図-1 L/Dの値

(4) 本研究での指標

HP/WV及びL/Bは交通機関が定速で走行するときの効率を表す指標であるが、これらの指標には加速に要するエネルギーの要素が含まれていない。本研究では、ある走行パターンを仮定して走行抵抗分及び加速抵抗分の仕事量を計算し、この値で全備重量と移動距離の積及びベイロードと移動距離の積を除いた値、すなわち単位エネルギー当たりの輸送量(kg * m/j)を効率を表す指標とし、この値を、その走行パターンにおける平均速度、すなわち表定速度に対してプロットした。

3. 計算

(1) 鉄道

列車の走行抵抗には、車輪とレールの間の転がり摩擦抵抗、車両の軸受けや歯車装置の摩擦抵抗、空気抵抗などが主なものであり、速度を変数とする二次式で表される。本研究では一般的にシュミレーション計算に使用されている以下の式を用いた。

$$\text{○電車 } R_r = (16.2 + 0.242V)M_d + (7.65 + 0.0275V)M_t + \{0.275 + 0.076(n-1)\}$$

$$\text{○新幹線電車 } R_r = (11.8 + 0.22V)M + (0.127 + 0.00284L)V^2 \quad (\text{トンネル外})$$

ここに、 R_r :走行抵抗(N)、 V :車両の速度(km/h)、 M :車両の質量(t)、 M_d :モーター付電車の質量(t)、 M_t :モーター無し電車の質量(t)、 n :編成両数、 L :列車の長さ(m)

走行抵抗と加速抵抗の和は列車の引張力に等しい。加速抵抗は以下の式で表される。

$$\bigcirc F = \phi M \alpha$$

ここに、 F : 引張力(N)、 ϕ : 質量 M の補正係数($\phi=1.094$)、 M : 列車の質量(kg)、 α : 加速度(m/s^2)

以上の式を用いて列車が停止→加速→定速走行→減速→停止というパターンで走行したときの引張力がした仕事量を求め効率を計算した。このとき巡航速度を一定に保ったまま、定速走行する時間を変化させることによって平均速度を変え、そのときの効率の変化を調べた。電車では、回生ブレーキを使用することで加速に要するエネルギーを節約できるのでこの点も考慮に入れた(回生率を30%と設定)。

(2) 自動車

現在の都市部の道路状況では鉄道で計算したときのような走行パターンを自動車に当てはめるのは非現実的なので、平滑なアスファルト舗装路上で10モードを走行したときの転がり抵抗、空気抵抗、加速抵抗の和を引張力に等しいと置き、この引張力がした仕事量を求めた。各抵抗の計算には以下の式を用いた。

$$\bigcirc \text{転がり抵抗 } R = \mu W \quad (N)$$

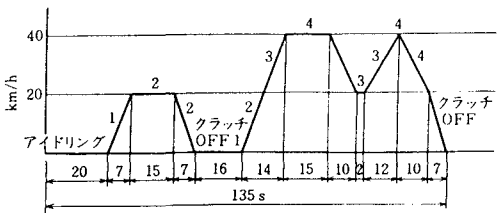
$$\bigcirc \text{空気抵抗 } F = Cd \rho V^2 A / 2 \quad (N)$$

$$\bigcirc \text{加速抵抗 } F = \phi M \alpha \quad (N)$$

ここに、 μ : 転がり抵抗係数(0.01)、 W : 鉛直荷重(N)、 Cd : 空気抵抗係数、 ρ : 空気密度(kg/m^3)、 V : 速度(m/s)、 A : 正面投影面積(m^2)、 ϕ : 回転部分による見掛けの質量増加係数(1速:2.70、2速:1.54、3速:1.20)、 M : 質量(kg)、 α : 加速度(m/s^2)

10モード走行サイクルは以下の通りである。

鉄道、自動車のデータは一般的な値を代入し、乗車率を100%として計算した。



(14中の数字1, 2, 3, 4はそれぞれ変速段を示す)

図-2 10モード走行サイクル

5. 結果及び考察

計算結果をまとめたものを図-3、4に示す。鉄道車両、特に都市内鉄道では加速抵抗が走行抵抗に比べて大きいので定速走行時間が短い走行パターンでは加速に必要なエネルギーが走行に必要な全エネルギーの大部分を占める。したがって、定速走行時間を長くして表定速度を巡航速度に近づけるほど効率が良くなるといえる。

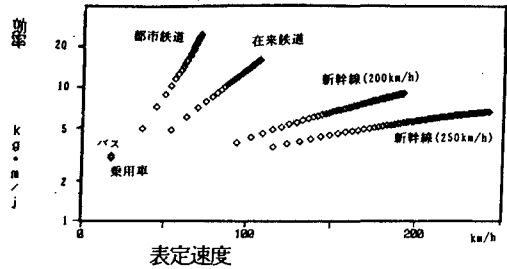


図-3 鉄道と自動車のエネルギー効率
(全備重量、乗車率100%)

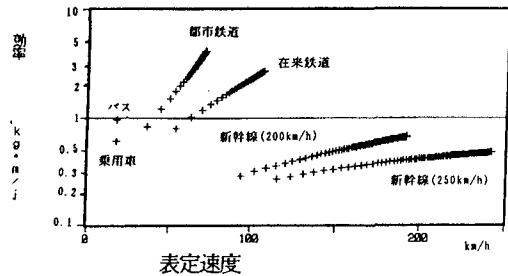


図-4 鉄道と自動車のエネルギー効率
(ペイロード、乗車率100%)

旅客輸送においては有効な仕事量は輸送人員と輸送距離の積で表される。よって図-4の方が実際の効率に近いといえる。図-3、4を比較するとペイロードあたりの効率は相対的にはバスが良いことがわかる。これはバスの乗車率100%時の全備重量に占めるペイロードの割合が他の交通機関と比較して大きいためである。このペイロードと全備重量の比は乗車率に依存するので今後は乗車率を変えて効率を検討する必要がある。

5. 今後の課題

本研究では平坦な直線上の走行を仮定したが現実には即して勾配抵抗や曲線抵抗等を考慮して計算する必要がある。

今後は航空機、船舶、電気自動車などの他の交通機関の旅客輸送効率、及び貨物輸送効率についての計算をするつもりである。

【参考文献】

- 1) 日本機学会編：新版機工学便覧 C2-交通
- 2) 運輸省運輸政策局：運輸関係エネルギー要覧
- 3) 赤木新介著：機工学体系51 交通機関論