Original Paper

Evaluation of Energy Efficiency in Transportation
by the Use of Overall Friction CoefficientIchiro DAIGO^{*1,2}, Takashi WAKAMATSU^{*1}, Eiji YAMASUE^{*1}, and Keiichi N. ISHIHARA^{*1}

(Received September 1, 2003)

仮想摩擦係数を用いた旅客輸送におけるエネルギー効率の統合的評価

醍醐市朗^{*1,2}, 若松貴史^{*1}, 山末英嗣^{*1}, 石原慶一^{*1}

The improving energy efficiency for transportation sector in Japan is an important factor to resolve the problem of global warming. However, there are few researchers considering physical as well as sociological evaluation of the energy efficiency with respect to various kinds of transportations. The purpose of this study is to evaluate the physical and sociological energy loss by the use of "overall friction coefficient" (OFC). It is defined as the energy used for transportation divided by transported mass, transported distance and gravitational constant. The data concerning automobiles, trains, ships and planes are collected for both passenger and cargo. Each value of OFC is plotted as a function of the average speed. Three expressions are presented for three different transportations; ideal cargo transportation, ideal passenger transportation and real passenger transportation. It is noted that the OFC for the passenger transportation shows a minimum around an average speed of 110 km/h showing the best energy efficiency at around this speed.

Key Words

Overall friction coefficient, Energy efficiency, Transportation, Sociological evaluation, Average speed

1. 緒言

2001年の日本のエネルギー消費の約4分の1(24.7%)は運輸部門が占めている。1973年から2001年への日本におけるエネルギー消費量変化を見ると、産業部門で3%,民生部門で106%の伸びが見られるのに対して、運輸部門は109%と最も高い伸びを示している¹⁾。このように運輸部門におけるエネルギー消費の増大が喫緊の課題となっている。また、COP3に先だって開かれた“地球温暖化問題への国内対策に関する関係審議会合同会議”では、部門毎にCO₂排出量目標値が設定されている。運輸部門においては、2010年には、何の対策も取らなければ1990年度実績比約40%の増加見込みであるところを、17%増に抑制することを目標としている²⁾。この削減目標を達成するために盛り込まれた種々の施策のうち、“個別輸送機器のエネルギー消費効率の向上”²⁾による削減量が最も大きな割合を占めている。このように、運輸部門におけるエネルギー高効率化は地球温暖化対策の一施策として重要な役割を担っている。

近年の運輸部門におけるエネルギー高効率化に資する研究の動向として、輸送機関の燃費向上³⁾、貨物の共同集配、モーダルシフト、ロードプライシングなどの交通需要マネジメント(TDM)⁴⁾⁵⁾に関する研究や、交通インフラの整備も含むライフサイクルにおける環境負荷に関する研究⁶⁾⁷⁾、個別輸送機関における物理的エネルギー損失のミクロな要因分析⁸⁾、さらには都市分布や都市形態を考慮したエネルギー消費の要因分析や旅客輸送の効率化や省エネの可能性に関する研究⁹⁾¹⁰⁾などが行われている。また、輸送機関のエネルギーの消費効率を評価する指標としては、単一の輸送機関に限られる評価の場合、単位距離走行あたりのエネルギー消費量³⁾⁸⁾が多く用いられ、複数の輸送機関にまたがる評価の場合、主に人キロ、トンキロあたりのエネルギー消費量¹⁾¹¹⁾が、類似指標として、移動数、移動距離あたりのエネルギー消費量¹⁰⁾が用いられている。

本研究では、社会における交通システムのエネルギー損失要因を包括的に分析し、全輸送手段を対象としたマクロな評

*1 Graduate School of Energy Science, Kyoto University
Yoshida Hon-machi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan
*2 Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

*1 京都大学大学院エネルギー科学研究所
〒606-8501 京都市左京区吉田本町
*2 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

価のできる指標の開発を目的とする。指標には、新しい概念である“仮想摩擦係数”を導入し、摩擦係数に類する物理量としての指標を導出した。そのため、物理的要因とともに社会的要因による損失を物理量として考慮でき、他の物理量と比較できる特長を有する。

また、交通システムにおけるエネルギー高効率化への提言と、それによる省エネルギーの可能性の試算が可能となる。

2. 仮想摩擦係数の定義

物理法則としての摩擦力は、2 固体間に変位があるとき、接触している面に運動に対する抵抗力として働く力として定義されている。摩擦によってエネルギーが消費される過程は不可逆過程であり、ほとんどが熱に変換される。また、摩擦係数は摩擦力を垂直抗力で除した値として定義される。これを踏まえ、輸送機関におけるエネルギー損失を見ると、輸送機関におけるエネルギー損失は、大別して2つの要因が考えられる。1つは物理的な要因によるものであり、空気、水、接地面から受ける摩擦抵抗によるエネルギー損失、熱機関におけるエネルギー転換時の損失などがある。もう一方は、社会的な要因によるエネルギー損失であり、停発車やアイドリング、乗車（搭載）率などの運行条件による損失を挙げることができる。これら摩擦以外の種々のエネルギー損失も、貨物や旅客を運行するのに必要なエネルギーとしてとらえることができる。そこで、当該物体の運動エネルギーに変換されたエネルギーを除くエネルギーは、移動距離により除算されることにより、推進に伴う概念的な抵抗力として、摩擦力と同じ次元に変換できる。そこで本研究では、摩擦の概念を物理法則としての摩擦による摩擦力だけでなく、その他のエネルギー損失を仮想的な抵抗力とみなして摩擦ととらえることにより、仮想摩擦係数を定義した。仮想摩擦係数の概念を Fig. 1 に示す。そして、消費エネルギー量、輸送質量、輸送距離から、式(1)のように仮想摩擦係数を導出した。

$$\mu_{OFC} = \frac{Q}{m \cdot g \cdot L} \quad (1)$$

μ_{OFC} [-] : 仮想摩擦係数

Q [J] : 消費エネルギー量

m [kg] : 輸送質量

g [m/s²] : 重力加速度 (= 9.8)

L [m] : 輸送距離

この式は、仮想摩擦係数が大きいほど、輸送におけるエネ

Fig. 1 Schematic concept of Overall Friction Coefficient

ルギー効率が低いことを意味する。また、仮想摩擦係数の概念では、実益をとまって輸送されているのは貨物や旅客の質量分であるため、輸送質量とは貨物や旅客の質量を指し、輸送するのに必要な輸送機関自身やそれに付帯する設備、営業旅客の運行に従事する人員の質量は考慮しない。計算の過程では、重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$ とし、旅客一人当たり質量を60 kgで換算した。理解の一助として、付録Aに仮想摩擦係数の試算例を示した。

3. データ収集および評価方法

本研究で調査対象とした輸送機関は、日本における自動車・鉄道・船舶・航空機の4種である。交通システムを横断的に比較するには、様々な交通システムをなるべく同じ条件で比較することが望まれる。仮想摩擦係数の導出には、式(1)で示したように、エネルギー消費量などの値が必要であり、本研究では日本における実際の運行の結果として得られるエネルギー消費量、輸送距離、輸送質量、旅行速度と輸送機器の製造時に想定された最も高いエネルギー消費効率、走行速度をデータとして用いた。それらデータは、収集された情報源によって2種類に区分された。1つは統計、センサス、時刻表などから得られるデータ（以下、統計値と呼ぶ）であり、もう1つは年鑑、ガイドブック、パンフレットなどから得られるデータ（以下、性能値と呼ぶ）である。統計値は実社会における運行条件を反映した全国平均値あるいは当該地域平均値である。営業開始地点における発車から営業終了地点における停車までの停発車、車内の照明、空調などに費やされるエネルギー量による影響も含んでいる。一方、性能値は理想的な性能を発揮している状態での運行を想定しているため、物理的なエネルギー損失のみが反映されている。そのため、各輸送機関のデータは、統計値と性能値、また旅客輸送と貨物輸送に区分して収集した。以後、旅客輸送における統計値を“旅客統計値”のように表す。本研究において調査の対象とした輸送機関を Table 1 に示す。

本研究で収集したデータは、仮想摩擦係数の導出に必要なエネルギー消費量、輸送距離、輸送質量と、便益として評価の軸とした速度である。しかしながら統計値と性能値では、

Table 1 Objects of the investigation

		Passenger transportation	Cargo transportation
Real value	Car	Personal car Bus, Taxi	Small freight truck Large freight truck
	Train	JR, Major private railway	JR cargo
	Ship	Passenger inland ship	Cargo inland ship
	Plane	Passenger jet	Cargo jet
	Car	Personal car	Freight truck (2 tons)
Ideal value	Train	Conventional railway Shinkansen line	Cargo train
	Ship	Ferry Passenger ship	Oil tanker, Dry freight ship, Ore freight ship, Container ship
	Plane	Passenger jet	Cargo jet

各々のデータの性質上、必要なデータの条件に違いがある。統計値に必要なデータは、実搭載質量や人員とそれらが輸送された距離、あるいはそれらの積算値(トンキロ)、その際に消費したエネルギー量、その際の旅行速度(停止時間も考慮に入れた平均速度)である。また、性能値に必要なデータは、最適走行時の単位距離あたりのエネルギー消費量(燃料消費率)、最大可載質量および人員、あるいは定員、最適走行時の速度である。先にも述べたように、収集されるデータは全ての輸送機関について同じ前提条件であることが理想である。しかし実際には、輸送機関によっては同じ前提条件のデータが得られない場合があったため、推計により条件を統一させるを試みた。付録Bに、この前提条件に適した値が得られなかったものについての推計方法を個別に示す。

4. 結果

4.1 速度と仮想摩擦係数

各輸送機関の仮想摩擦係数を、速度を横軸に取り Fig. 2 にプロットした。図から仮想摩擦係数は概ね 0.001 ~ 10 の範囲に存在していることがわかる。次に、Fig. 2 のデータを旅客統計値、旅客性能値、貨物統計値、貨物性能値の 4 区分に分類し、統計値と性能値の別は白抜きと塗りつぶしで分け、旅客輸送と貨物輸送の別は○と□の形状で分けた。ただし、全ての統計値と性能値、または旅客輸送と貨物輸送が 1 対 1 で対応しているわけではない。

4.2 輸送モデルの構築

輸送モデルを構築するにあたり、統計値の示す傾向から得られる輸送モデルを実社会の輸送モデル、性能値の示す傾向から得られる輸送モデルを理想状態の輸送モデルと呼ぶこととする。統計旅客値から得られる実社会の旅客輸送モデルを構築するにあたり、まず理想状態における輸送モデルを構築した。関係式の構築にあたっては、それぞれ同じ重みを持っていないものの、データ収集時の制約下でなるべく多くの

データを収集したため無作為抽出と仮定し、さらに測定値の誤差に偏りはないものと仮定し、分析した。また、回帰分析から得られたパラメータの妥当性、ならびにそれらの持つ意味について考察した。

(1) 理想状態の貨物輸送モデル

はじめに、貨物性能値から理想状態の貨物輸送モデルを構築した。貨物性能値のデータ群は、両対数グラフにおいてほぼ直線をなしていることがわかる。よって、理想状態の貨物輸送における仮想摩擦係数 $\mu_{\text{ideal cargo}}$ は速度 (km/h) に対し指数関数をなすことが予想される。すなわち α , β を定数として式(2)のように表すことができる。

$$\mu_{\text{ideal cargo}} = \beta \cdot v^{\alpha} \quad (2)$$

両辺の対数を取って重回帰分析をおこなった結果、各パラメータは、 $\alpha = 1.565$, $\beta = 1.416 \times 10^{-5}$ と算出され、相関係数は 0.9959 となり、Fig. 2 に示すように、貨物性能値のデータ群によく合致した関係式が得られた。

(2) 理想状態の旅客輸送モデル

次に、旅客性能値から理想状態の旅客輸送モデルを構築した。旅客輸送では、旅客のために空間的なゆとりが必要であるため、同じ質量を輸送する場合でも、貨物輸送より多くのエネルギーが必要となる。この輸送効率の比率を γ とすると、理想状態の旅客輸送における仮想摩擦係数 $\mu_{\text{ideal passenger}}$ は、式(2)に γ をかけて式(3)のように表すことができる。

$$\mu_{\text{ideal passenger}} = \gamma \cdot \beta \cdot v^{\alpha} \quad (3)$$

2つのパラメータ α , β が既に決定されていることから、回帰分析により $\gamma = 4.230$ が得られ、そのときの相関係数は 0.9058 となり、Fig. 2 に示すように、旅客性能値のデータ群に沿った関係式が得られた。

(3) 実社会の旅客輸送モデル

ここでは、以上のように決定したモデルを基に、実社会の

Fig. 2 Overall Friction Loss as a function of average speed with three equations

旅客輸送モデルを構築した。Fig. 2より、旅客性能値の乗用車のデータ群は他の輸送機関の傾向から大きく乖離していることがわかる。これは、乗用車の優れた加速性能や減速性能、停止頻度の多さ、少人数の輸送、戸口輸送ができるなど、他にない機能を持つためと考えられる。そこで、ここでは乗用車は除外し、乗合用輸送機関についてモデルの構築を試みた。

実社会の旅客輸送モデルは、理想状態の旅客輸送モデルに追加的なエネルギー損失があると考えられる。まず、その損失が理想状態の旅客輸送モデルにおける損失に比例すると考え、式(3)にさらに係数を乗じた。そのときの回帰分析による結果は、便宜上係数を逆数にとり $1/\delta_0$ とすると、 $\delta_0=0.3855$ と得られたが、そのときの相関は見られなかった。

$$\mu_{\text{real passenger}} = (1/\delta_0) \gamma \cdot \beta \cdot v^\alpha \quad (4)$$

そこで、実際の輸送機関の運行に際して他に考えられる、仮想摩擦が生ずる要因を考える。まず、要因として大きく寄与していると考えられるアメニティ項 μ_{amenity} を考えた。快適性のために費やされるエネルギー消費量は、輸送機関の速度によらず単位時間あたり一定であると考えられるため、速度に反比例すると考えられ、アメニティ項は式(5)のように速度の逆数に比例すると考えられる。

$$\mu_{\text{amenity}} = \zeta \cdot v^{-1} \quad (5)$$

そこで、式(4)に式(5)で示した項を加え、重回帰分析により係数を決定した。その結果、 (δ_1, ζ) は(0.4504, 37.64)となった。また、そのときの相関係数は0.6281となり、旅客統計値のデータ群によく合致する関係式(6)を導くことができた。

$$\mu_{\text{real passenger}} = (1/\delta_1) \gamma \cdot \beta \cdot v^\alpha + \zeta \cdot v^{-1} \quad (6)$$

さらに、他の要因として停発車に伴う仮想摩擦係数の増分 μ_{stop} が想定され、これは運動エネルギーに比例すると考えられるため、 ε を定数として式(7)のように表わされる。

$$\mu_{\text{stop}} = \varepsilon \cdot v^2, (\varepsilon > 0) \quad (7)$$

式(6)に式(7)を加え、重回帰分析により係数を求めた。しかしながら、 ε は負の値となり、 $\varepsilon > 0$ の条件下で残差平方和を $\varepsilon = 0$ より小さくする $(\delta_1, \zeta, \varepsilon)$ の組み合わせはなかった。よって、この項は加えず、式(6)を旅客統計値のデータ群を示す関係式とし、Fig. 2に示した。

5. 考 察

結果から仮想摩擦係数は概ね0.001～10の範囲に存在していることがわかったが、物理量として既知の摩擦係数と比較すると、例えば、貨物タンカーの0.06は雪の上をヒッコリーのスキー板で滑ったときの乾燥摩擦係数(0.04～0.06)¹²⁾程度の値であり、旅客ジェットの2.0～3.0は、ゴムでゴムを摩擦したときの静乾燥摩擦係数(1.2～1.6)¹²⁾よりも大きいエネルギー損失をともなっていることが分かる。また、鉄道がいくらレール上の転がり摩擦係数(0.002～0.004)¹³⁾を減少する努力をしても、付随する社会的要因が大きいため、ポリエチレンの丸棒でポリエチレンの平板を摩擦したときの乾燥摩擦係数(0.1)¹²⁾程度であり、牽引以外の省エネルギーによる削減効果も考える必要があることが分かる。

本研究における理想状態とは、輸送機関が等速度運動をし、理想的な性能を発揮している状態である。そのときの主なエネルギー損失要因は、空気や水、地面や軌道から受ける抵抗である。交通システムにより抵抗を受ける要因が異なることと、粘性流体からの抵抗が速度の2乗、転がり抵抗が速度の1乗に比例することを考えると、指数 α が1.565となり1と2の間の適当な値を取ることとなり、結果の妥当性が確認できた。

次に、式(3)における、 $\gamma = 4.230$ から、国内における輸送では、旅客は、空間的ゆとりのために、同質量を有する貨物の約4.2倍のエネルギー消費があることがわかった。これも、貨物と旅客の積載を考えた際の空間と密度から、結果は妥当であると考えられる。

ここまでは、理想状態における関係式について考察してきた。次に、実際の輸送機関の運行に際しては、物理的な仮想摩擦に加え、社会的な要因による仮想摩擦が生ずると考えられる。社会的な要因による仮想摩擦係数を μ_{social} とすると、実社会の旅客輸送における仮想摩擦係数 $\mu_{\text{real passenger}}$ は式(8)のように表わされる。

$$\mu_{\text{real passenger}} = \mu_{\text{ideal passenger}} + \mu_{\text{social}} \quad (8)$$

社会的な要因としては定員に対する搭載人員の割合である占有率(乗車率)、空調や照明など快適性のために費やされるエネルギーの2つの要因が考慮されており、社会的な要因による仮想摩擦係数は式(9)のように表せる。また、停発車によるエネルギー損失が相関性を持たなかったのは、乗用車を除いたことにより、運行中に停発車のない航空機や船舶、一部回生ブレーキを有する鉄道が評価対象であるためと考えられる。それゆえ、乗用車がこの関係式から乖離しているのは、停発車による要因が1つとして考えられる。

$$\mu_{\text{social}} = \left(\frac{1 - \delta_1}{\delta_1} \right) \gamma \cdot \beta \cdot v^\alpha + \zeta \cdot v^{-1} \quad (9)$$

式(3)で表された旅客性能値は最大(定員)搭載時の値であるため、式(6)における $\delta_1=0.45$ は、国内の乗合用輸送機関が約45%の占有率(乗車率)で運行されていることを示す。実際の鉄道の占有率(混雑率)は個別の値は得られず車両あたりの定員を150人として平均値で33%程度¹⁴⁾、新幹線で約57%¹⁴⁾であり、航空機の占有率(座席利用率)は国内定期線が63.5%¹⁵⁾、国際線が74.1%¹⁵⁾であり、航空機は関係式よりも少し下にプロットされており、鉄道は関係式の上下にばらついているのがわかる。これより、パラメータの妥当性が確認できた。

式(6)における $\zeta = 37.64$ から、輸送中の快適性を保持するためのエネルギーは、家庭の居住空間の快適性を保つためのエネルギーの約5.49倍程度のエネルギー量を消費していることがわかった(付録C参照)。

Fig. 2において $\mu_{\text{ideal passenger}}$ と μ_{social} の大きさを比較すると、輸送機関の速度が201km/h以下のときに、つまり、現行の社会システムでは航空機以外の輸送機関において、 $\mu_{\text{real passenger}}$ のうち μ_{social} の仮想摩擦の占める割合が3分の2よりも大きいことがわかった。また、輸送機関の速度が81.9km/h以下のときには、 μ_{social} の仮想摩擦の占める割合が9割より大きい。これ

より、現存の輸送機関では、社会システム由来の仮想摩擦が相対的に大きいことから、輸送効率や停発車、また旅客のための居住空間の維持などといった、社会システムにおけるエネルギー消費およびエネルギー損失が大きく、牽引に対する技術的な省エネよりも、その他のエネルギー効率化や交通システムの変革が省エネに大きな可能性を持つことが分かる。このように、社会的要因によるエネルギー損失も摩擦係数と見ること、物理的要因と同様に速度の関数として示せ、輸送機関の速度による相対的な寄与割合の変化が明らかになった。

式(6)を微分することにより、 $\mu_{\text{real passenger}}$ は112km/hにおいて最小値を示すことがわかった。これは実社会における旅客輸送のモデル式には、快適性のために消費されるエネルギーを考慮する項が加算されたために最小値を持つ結果となった。よってこの速度は、エネルギー効率の観点から、日本の現行社会における旅客輸送の最適旅行速度である。112km/h以上の旅行速度では物理的な抵抗が増すので、仮想摩擦係数は増大する。また、112km/h以下の旅行速度では物理的な抵抗は小さくなるものの、単位距離の輸送時間が長くなることにより快適性に費やされるエネルギー消費が大きくなるため、仮想摩擦係数は増大する。よって、旅行速度110km/h程度の輸送機関となるようなシステムがエネルギー消費の観点からは最適である。

例えば、現行で旅行速度が49km/h程度の民間鉄道において、旅行速度が60km/hとなるシステムを築くことができれば、仮想摩擦係数が約16.8%減少し、その割合分の省エネルギー効果があると試算される。このように、仮想摩擦係数は、牽引にかかるエネルギーの増加分と時間短縮による室内空間の快適性を維持するためのエネルギーの削減効果を、包括的に評価していることとなる。

6. まとめ

本研究では、輸送機関における包括的エネルギー効率の評価を目的として、仮想摩擦係数という新しい概念を用い、速度に応じたエネルギー効率に関するモデルの構築を試みた。その結果、種々の輸送機関のエネルギー効率を統一的に評価し、牽引にかかる物理的エネルギーと室内空間の快適性を維持するためなどの社会的エネルギーを区別し、かつ包括的に評価できる手法を確立し、マクロ分析により、現行の社会システムにおける輸送機関の仮想摩擦係数(エネルギー効率)と旅行速度に相関関係があることを導いた。

本研究の結果が旅客輸送に対し示唆することは、現行の社会システムの、特に快適性に現状のエネルギーを投入するという前提条件においては、旅行時速が110km/h程度となるような輸送機関が最も輸送効率がよいことである。つまり、既存の各輸送機関の旅行速度ではなく、交通システムを構築する際には、信号や停車駅間隔などのインフラの設計、道路交通法などの制度設計、輸送機のエンジンやフォルム設計において、旅行速度が110km/hに近づくよう設計することにより、輸送時のエネルギー効率が高くなると推測される。

7. 展望

旅客性能値の解析において、他の輸送機関にない機能を持つため、全体の傾向から大きく乖離しているとし、解析対象から除外した乗用車のデータ群について考察する。ここで、乗用車の平均乗車人数が1.6人¹⁶⁾であることを考慮すると、占有率は32.0%(軽自動車では40.0%)となり、占有率45%としている式(6)との占有率の違いを考慮に入れて推計するとTable 2に示すような推計値が得られた。まだ推計値と統計値の乖離が大きいのは、乗用車の優れた加速性能や減速性能、停止頻度の多さ、多くの携行物を運搬できるなど、他の輸送機関にない機能によるものだと考えられる。

本研究では、全てのエネルギー損失要因を包括的に見たことにより、輸送物あたりの輸送機器自体の重量比や抵抗を受ける形態など、さまざまな輸送機関が持つ異なった要因を考えることなく評価できた。その反面、要因を抽出して考慮できたのは占有率と快適性に消費するエネルギーだけであり、個別の要因を積み上げて分析することは困難となった。輸送部門のエネルギー消費において寄与割合の大きい乗用車の仮想摩擦のうち約3分の2を、本研究では対象とできなかったことは否めないが、乗用車の接地面における摩擦、空気抵抗、輸送機器の重量などの要因によるエネルギー消費の高効率化による影響については、個別に評価する必要があるだろう。

Table 2 Comparison of Statistical Overall Friction Coefficient of Personal car with Estimated

	Statistics	Estimation
Personal car	4.41	1.54
(Light car)	3.47	1.23

謝 辞

本研究は、21世紀COEプログラムの一部として得られた成果である。また、本研究を進めるにあたり、資料や情報の提供にご協力いただいた西日本旅客鉄道(株)車両部、東海旅客鉄道(株)、日本貨物鉄道(株)、三菱重工業(株)造船技術部、(株)本田技研工業、各社の方々はこの場を借りて御礼申し上げます。

付録 A

例として、トラックで2トンの貨物を3 km輸送するのに、1 リットルの燃料(軽油)を消費した場合の仮想摩擦係数の算出方法を説明する。この場合、Qは輸送に費やした軽油の高位発熱量 $3.9 \times 10^7 \text{ J}$ 、mは2000kg、Lは3000mとなり、式(1)から仮想摩擦係数 μ は0.65と算出できる。このように、実際に消費したエネルギー量から仮想摩擦係数を計算することにより、上記の例では車体が空気の受ける流体摩擦、地面から受ける転がり摩擦、信号待ちによるアイドリング中のエネルギー消費、冷暖房のエネルギー消費など、輸送過程における種々のエネルギー損失要因を包括的に考慮した評価が可能となる。

付録B

<自動車>

- ・統計値における速度は、統計¹⁷⁾から得られるいくつかの道路におけるピーク時平均旅行速度を、交通量による重み付けをおこなった加重平均値とした。
- ・性能値における燃料消費率は、それぞれの60km/h定地走行燃費のデータを用いた¹⁸⁾。

<鉄 道>

- ・エネルギー消費量は、統計¹⁴⁾から得られる電力消費量および軽油消費量を用い、電力消費量は発電効率38%とし、一次エネルギー換算した。
- ・貨物輸送の統計値における速度は、最高速度が110km/hであること¹⁹⁾と、運行中に速度制限があることを考慮して100km/hとした。
- ・旅客輸送の統計値における速度は、任意の区間における列車種別(特急・普通など)の時刻表の運行距離と運行時間から得た平均速度を、運行本数で重みをつけて算出した²⁰⁾。なお、新幹線を運行する鉄道会社の統計値は、在来線と新幹線で別個に平均速度を求めた後、旅客輸送量で重みをつけて算出した。

<船 舶>

- ・旅客輸送の統計値(フェリー)の速度は、国内で航路距離が300km以上の20路線の平均値を、時刻表から得られる航行距離と所要時間から算出した²¹⁾。
- ・貨物輸送の統計値(貨物海運)の速度は、総トン数15万トンクラスの油送船を想定し、その平均的な速度である15ノット(28km/h)とした²²⁾。
- ・貨物輸送の性能値(油送船、乾貨物兼用船、鉱石専用船、コンテナ船)における燃料消費率は、過去の調査研究²³⁾を参考にし、船種別に各クラスの平均的な燃料消費率を適用した。

<航空機>

- ・統計値の速度は、統計の運行時間と飛行距離から算出した¹⁵⁾。なお、これらのデータは統計書の区分上、旅客輸送と貨物輸送に分けて得られなかったため、どちらも同じ速度となっている。
- ・性能値の速度とエネルギー消費量は、同機種で異なるエンジンを搭載したタイプが複数存在する場合がある²⁴⁾ので、それらのうち1種類をもって代表とした。

付録C

家庭におけるエネルギー消費量などの統計^{1) 25)}から、平均的に1日に12時間在宅しているとすると、1人当たりの家庭におけるエネルギー消費量は1秒あたり1.12kJと算出できる。また、1人の体重を60kgとすると、家庭における人1kg当たり1秒に消費するエネルギーは18.7Jとなる。これは、家庭における冷暖房、給湯、厨房、動力などに消費されるエネルギー量である。一方、本研究より算出された γ が37.64であったことから、

$$37.64 \text{ J/s} \cdot \text{km} / \text{kgm}^2 \cdot \text{h} \times \frac{1000 \text{ m} / \text{km}}{3600 \text{ s} / \text{h}} \times 9.8 \text{ m} / \text{s}^2 = 102.5 \text{ J} / \text{kg}$$

と計算でき、輸送機関内において旅客1kgが、空調、照明、テレビ・ラジオ・アナウンスなどのために、1秒に消費するエネルギーは、102.5Jと分かった。これより、旅客の居住性を保持するために消費するエネルギー量が家庭の約5.49倍であると試算された。

文 献：References

- 1) 日本エネルギー経済研究所計量分析部編, EDMC エネルギー・経済統計要覧(2003年版), (省エネルギーセンター), p.34, 76, 116-117(2003); The energy data and modeling center, EDMC Enerugi-Keizai Toukei Youran 2003, (ECCJ), p.34, 76, 116-117(2003)
- 2) 地球温暖化対策推進本部, 地球温暖化対策推進大綱, (環境省地球環境局), p.13(2002); Chikyu Ondanka Suisin Honbu, The global warming prevention headquarters Government of Japan, Climate change policy programme, p.13(2002)
- 3) 岩井信夫, 21世紀フォーラム, **75**, 40-45(2000); Iwai, N., *21st Century Forum*, **75**, 40-45(2000)
- 4) 国土交通省, http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/tdm/tdm_.html, Status 2003/Jun/4; Minister of Land, Infrastructure and Transport, http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/tdm/tdm_.html, Status 2003/Jun/4
- 5) 黒川久幸, 松浦伸枝, 鶴田三郎, 風間富一, 日本造船学会論文集, **189**, 405-412(2001); Kurokawa, H., Matsuura, N., Tsurumi, S., Kazama, T., *Journal of the society of naval architects of Japan*, **189**, 405-412(2001)
- 6) 行澤義弘, 毛利誠信, 山田孝弘, 佐藤豊, 鉄道総研報告, **16**(10), 7-12(2002); Ikisawa, Y., Mori, M., Yamada, T., Sato, Y., *RTRI report*, **16**(10), 7-12(2002)
- 7) 相原直樹, 辻村太郎, 鉄道総研報告, **16**(10), 13-18(2002); Aizawa, N., Tsujimura, T., *RTRI report*, **16**(10), 13-18(2002)
- 8) Vuchic, V. R., 田中博訳, 都市の交通旅客輸送, (技報堂出版), p.131-137(1990); Vuchic, V. R., *Urban Public Transportation*, (Gihodoshuppan), p.131-137(1990)
- 9) 森本章倫, 古池弘隆, 土木学会第25回土木系各学会研究発表会・講演集(CD-ROM), (2002); Morimoto, A., and Koike, H., *Proceedings of infrastructure planning*, 25(CD-ROM), (2002)
- 10) 田頭直人, 第33回日本都市計画学会学術研究論文集, p.225-228(1998); Tagashira, N., *Journal of the city planning institute of Japan*, **33**, 225-228(1998)
- 11) 国土交通省総合政策局情報管理部編, 交通関係エネルギー要覧平成13・14年度版, (財務省印刷局), p.19-20(2002); Information and Research Department Policy Bureau Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *The Survey on Transport Energy 2001-2002*, National Printing Bureau, p.19-20(2002)

- 12) 曾田範宗, 摩擦と潤滑, (岩波書店), p. 255-262(1954): Soda, M., Masatu to Junkatu, (Iwanami Shoten), p. 255-262 (1954)
- 13) 角田和雄, 摩擦の世界, (岩波書店), p. 109(1994): Kakuta, K., Masatu no Sekai, (Iwanami Shoten), p. 109(1994)
- 14) 運輸省運輸政策局情報管理部統計課編, 鉄道輸送統計年報平成12年, (運輸省運輸政策局情報管理部統計課), p. 12, 17, 24-33(2000): Information and Research Department Policy Bureau MLIT, Tetsudo Yuso Tokei Nenpo, (Information and Research Department Policy Bureau MLIT), p. 12, 17, 24-33(2000)
- 15) 運輸省大臣官房統計調査部編, 航空輸送統計年報平成12年, (運輸省大臣官房統計調査部), p. 2(2000): Information and Research Department Policy Bureau MLIT, Koku Yuso Tokei Nenpo, (Information and Research Department Policy Bureau MLIT), p. 2(2000)
- 16) (財)国土技術研究センター, <http://www.jice.or.jp/census/census2/p14.html>, Status 2004/JAN/28: Japan Institute of Construction Engineering, <http://www.jice.or.jp/census/census2/p14.html>, Status 2004/JAN/28
- 17) 建設省道路局編, 平成9年道路交通センサス(一般交通量調査), (建設省道路局), p. 65(1998): Road Bureau MLIT, Heisei 9nen Douro Koutsu Sensasu(Ippan Koutsu-ryou Chosa), (Kensetusho Dourokyoku), p. 65(1998)
- 18) 自動車工業振興会, 自動車ガイドブック1999-2000, 46(自動車工業振興会), p. 201-390(1999): Jidousha Kougyoukai, Jidousha Guidebook 1999-2000, 46(Jidousha Kogyo Sinkokai), p. 201-390(1999)
- 19) 川崎重工業(株), http://www.khi.co.jp/sharyo/pro_final/pro.html, Status 2003/Mar/25: Kawasaki Heavy Industries, Ltd., http://www.khi.co.jp/sharyo/pro_final/pro.html, Status 2003/Mar/25
- 20) JR時刻表2003年4月, (交通新聞社), p. 811-817, 846-849(2003): JR Jikokuhyo April 2003, (Kotsu Shinbunsha), p. 811-817, 846-849(2003)
- 21) 日本船主協会, 海運統計要覧, (日本船主協会), p. 216-217(2001): The Japan Shipowners' Association, Kaiun Toukei Yoran, (The Japan Shipowners' Association), p. 216-217(2001)
- 22) 日本船主協会, 日本商船船腹統計, (日本船主協会), p. 49-50(1998): The Japan Shipowners' Association, Nihon Shosen Senpuku Tokei, (The Japan Shipowners' Association), p. 49-50(1998)
- 23) シップ・アンド・オーシャン財団, 船舶から発生するCO₂の抑制に関する調査研究報告書, (シップ・アンド・オーシャン財団), p. 24-35(1999): Ship and Ocean Foundation, Senpaku kara Hasseisuru CO₂ no Yokusei Ni Kansuru Chosa Houkokusho, (Ship and Ocean Foundation), p. 24-35(1999)
- 24) 航空情報編集部, 世界航空機年鑑, (酣燈社), p. 382-397(1998): Koku Joho Henshubu, Sekai Kokuki Nenkan, (Kantosha), p. 382-397(1998)
- 25) 総務省統計局, 国勢調査, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/>, Status 2003/Jul/25: Ministry of Public Management, Home Affairs, Posts and Telecommunications, Population Census, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/>, Status 2003/Jul/25