

# 運輸におけるエネルギーフロー

## Energy Flow in Transportation Sector

佐川直人\*

Naoto Sagawa

### はじめに

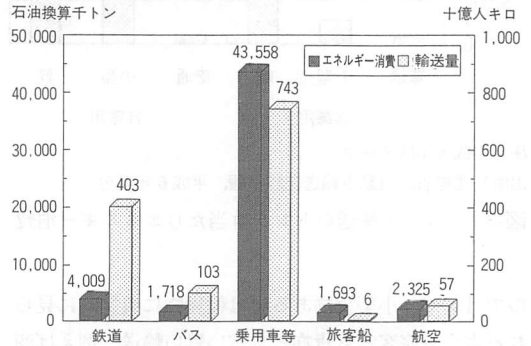
運輸部門のエネルギーフローは、そのエネルギー消費がわが国全体のエネルギー消費の4分の1を占めるにもかかわらず、必ずしも十分明らかにになっていない。ここでは運輸活動全体とエネルギー消費の関係をできるだけ幅広く捉え、交通機関の直接エネルギー消費のみでなく、間接エネルギー消費も考察していく。

### 1. 運輸部門の直接エネルギー消費

始めに統計から見た直接エネルギー消費を簡単に整理しておこう。運輸関連のエネルギー消費の資料には運輸省のデータと通産省のデータがあるが、より運輸部門について詳しい運輸省のデータを示す（電力は一次エネルギー換算としている）。わが国の運輸部門の直接エネルギー消費は石油換算1億5百万トン程度（平成5年度）でこのうち旅客がほぼ6割、貨物が4割であり、国内輸送が8割強、国際輸送が2割弱という状況である。また輸送機関別には道路輸送が全体の7割強を占め、航空輸送、鉄道輸送、船舶輸送が各々7%、4%、16%づつを占めている（国際輸送を含めた場合）。

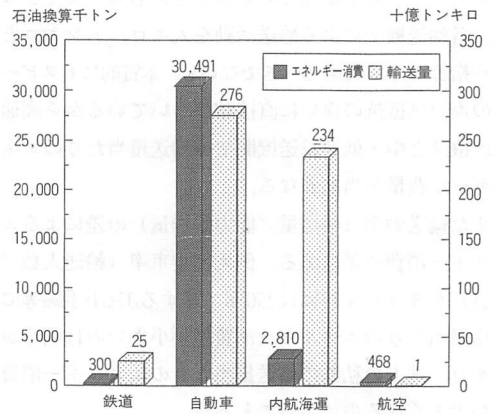
国内輸送のエネルギー消費量と輸送量を図-1、図-2に示す。なお、この他に国際輸送として海運で石油換算1,119万トン、航空で407万トンの石油が消費されている。

図-1に見られるように旅客部門における輸送量の6割弱が乗用車等により分担され、鉄道が3割を分担しているがエネルギー消費量では乗用車等が8割強を占め、鉄道は1割に満たない。図-2の貨物部門では自動車の輸送量が全輸送量の5割強を占め、内航海運が4割強を占めているが、エネルギー消費量では、自動車



注) 乗用車等には自家用トラックのうち、旅客輸送分を含む。国内輸送のみ。  
出所) 運輸省, 運輸関係エネルギー要覧, 平成7年版

図-1 旅客部門のエネルギー消費と輸送量(1993年度)



注) 国内輸送のみ 出所) 図-1に同じ

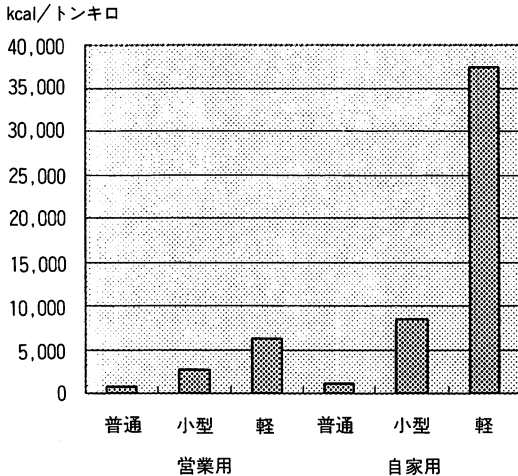
図-2 貨物部門のエネルギー消費量の輸送量(1993年度)

が9割を占めている。

よく言われているように道路輸送の輸送量当たりのエネルギー消費が大きく、鉄道輸送や船舶による貨物輸送のそれは小さい。

なお、こうした統計上の区分は必ずしも絶対的なもの

\* 財団法人日本エネルギー経済研究所 総合研究部研究主幹  
〒105 東京都港区虎ノ門4-3-13



注)平成6年度データ  
出所)運輸省,自動車輸送統計年報,平成6年度分  
図-3 トラック輸送のトンキロ当たりエネルギー消費

のではなく,小型貨物あるいは軽貨物に典型的に見られるような旅客とも貨物とも言い難い輸送,例えば商品見本を積んで営業に回っている等,が現実には行われているので,一応の目安と考えるべきであろう。

しかし上述のような輸送量当たりのエネルギー消費の大小を輸送機関ごとに比較することをもって,単純にエネルギー効率の差と考えることはもちろんできない。各輸送機関による輸送活動を人キロ,トンキロという指標のみで捉えるべきでないし,本質的にもスピードの違いは抵抗の違いに直接結びついているから高速輸送機関と中・低速輸送機関では輸送量当たりのエネルギー消費量が当然異なる。

また輸送効率(輸送量/能力輸送量)の差によるエネルギー消費の差もある。例えば乗車率(輸送人数/定員)がラッシュ時には250%に達するJR山手線等の輸送量当たりのエネルギー消費量が小さいのは明らかであり,地方の私鉄の輸送量当たりのエネルギー消費量が大きくなるのは当然であろう。

この一例が図-3に見られるようなトラック輸送の輸送量(トンキロ)当たりエネルギー消費量の顕著な差に見られる。この差は積載効率の差と小型車や軽では市街地走行が多いことによる実燃費の悪さに起因している。

この積載率とエネルギー消費との関係は以下のように考えられる。運輸部門のエネルギー消費は,移動体を移動させるためのエネルギー消費が大部分を占めるが,ペイロードの重量あるいは体積は,それが積載能

力内であればあまりエネルギー消費に影響を及ぼさないから(後述するように陸上輸送の転がり抵抗と航空輸送のエネルギーが総重量に比例するが,このペイロード部分のトータルエネルギー消費に占める割合は少ない),積載率は輸送量当たりのエネルギー消費量にはほぼ反比例すると考えて良い。

## 2. 運輸部門のエネルギー消費の特徴

運輸部門の直接エネルギー消費をより細かく見ると,その基本構造は次式のようなになる。

$$\begin{aligned} \text{運輸部門の直接エネルギー消費} = & \\ & \text{移動体の消費するエネルギー} \\ & \quad (\text{推進のエネルギー} + \text{補機類のエネルギー}) \\ & + \text{運輸関連施設の消費するエネルギー} \end{aligned}$$

このうち,運輸関連施設のエネルギー消費は,鉄道の駅舎,高速道路の照明などであり,統計上の区分は必ずしも明確でないが,移動体の消費するエネルギーに対してそのウエイトは小さく,また補機類のエネルギー消費も推進のエネルギーに比較してそのウエイトは小さい。以下では主な輸送機関ごとに推進のエネルギー消費を決定する要因を簡単にまとめておく。

なお,輸送機関の推進エネルギー消費は輸送機関が移動する際に受ける抵抗に打ちかかってする仕事のために必要なエネルギー消費が基本になり,これを原動機から推進機関への伝達効率,原動機効率で除したものが所要エネルギー源量を決定する。ただし,船舶においては推進機関であるプロペラの効率が分離されて議論される。

### 自動車輸送

自動車輸送のエネルギー消費は転がり抵抗,空気抵抗,加速抵抗によって主として決定される。このうち,転がり抵抗はほぼ重量に比例し(時速120kmを超えるあたりから,スタンディングウエーブ現象により急速に増加する),空気抵抗は速度の自乗に比例し,加速抵抗は重量,加速度に比例する。式で書けば以下の通りである。

$$\begin{aligned} \text{転がり抵抗 } R_r &= \mu_r W \\ \text{空気抵抗 } R_a &= 0.5 \cdot \rho C_d A v^2 \\ \text{加速抵抗 } R_{ac} &= W a \end{aligned}$$

ただし,  $W$  は総重量,  $\mu_r$  は転がり抵抗係数,  $\rho$  は空気密度,  $C_d$  は空気抵抗係数,  $A$  は自動車の正面投影面積,  $v$  は速度,  $a$  は加速度である。

この抵抗をエネルギー消費の面から見ると,まず転がり抵抗係数が比較的大きいために転がり抵抗のウエ

イトが中低速域では大きく、乗用車のようにペイロード（旅客の重量）に対する自重が大きい自動車ではペイロード当たりの抵抗が大きくなる。また、空気抵抗係数は乗用車で0.3程度、トラック・バスで0.4～0.8であるが、乗用車の場合、トラック・バスに比べて正面投影面積が車両の全体的な大きさに比較して相対的に大きくなるので、乗用車の方が中高速度での空気抵抗のウェイトが大きくなる。

加速抵抗は自動車に限らずすべての輸送機関に共通であるが、市街地を走行する自動車の特性として加減速の頻度が著しく大きいこと、減速時のエネルギー回収が困難であることから、自動車における加速抵抗は一般に大きく、自動車輸送のエネルギー効率を著しく悪化させている。

また、原動機としてはガソリン機関と小型ディーゼル機関が主体となるため、原動機としての機械効率が比較的低い。

#### 鉄道輸送

鉄道輸送のエネルギー消費は基本的には自動車輸送と同様に転がり抵抗と空気抵抗といういわゆる走行抵抗により引き起こされ、加速抵抗も当然エネルギー消費に関連する。また、細かく見れば出発抵抗、曲線抵抗等もある。

鉄道輸送の特徴は転がり抵抗が小さいことと、その形状から空気抵抗も小さいことである。またペイロードに対する自重も比較的小さい。このため自動車輸送に比べてペイロード当たりのエネルギー消費は小さくなる。

また、鉄道輸送の場合、加速抵抗の一部は再生ブレーキにより電力回収できるため、加速抵抗に基づくエネルギー消費も小さくできる。

#### 船舶輸送

船舶輸送のエネルギー消費は水との摩擦により大半が引き起こされる。陸上輸送との大きな違いは空気抵抗が無視できるほど小さいことで、水との抵抗はまた、摩擦抵抗、造波抵抗、その他の抵抗（渦抵抗）に分割される。このうち、摩擦抵抗は浸水面積に比例し、速度の1.8乗程度に比例する。造波抵抗は複雑であるが、速度の2乗以上に増加する。また、速長比（速度／船体の長さの平方根）により造波抵抗係数が決定されるため、船長が長い（通常は大きい船）の方が相対的に抵抗が小さくなる。

いずれにしてもペイロードに対して船長、浸水面積は比例しては増加しないので、船舶による大規模・重

量物輸送の場合の相対的なエネルギー消費は著しく小さくなる。

また、船舶輸送の場合、抵抗は速度の2乗以上に増加する成分のみと考えて良く、他の輸送機関に比べて高速化によるエネルギー消費の増大が著しい。

#### 航空輸送

航空輸送のエネルギー消費は空気抵抗だけといえるが、一定の揚力を維持するための速度も必要であり、この速度がもたらす空気抵抗（抗力）と推力をバランスさせる速度で巡航する。巡航時には航空機は高空を飛ぶために、空気密度が低下し、空気抵抗は減少する。式で表せば

$$T = W / (L / D)$$

ただし、Tは巡航時の推力、Wは全重量、Lは揚力、Dは抗力で、推力は重量を揚抗比（L/D）で除したものに等しい。即ち、エネルギー消費は巡航時には重量に比例し、揚抗比に反比例する。なお、音速に近づくると急速に抗力が増すために亜音速で高空を飛行するのが効率がよい（揚力、抗力ともに速度の自乗に比例するが高空では空気密度が低下し揚力が減少するために同一推力で高速になる）。このため経済速度で巡航する場合には高速であるにもかかわらず、輸送量当たりのエネルギー消費は陸上の大量輸送機関並みになる。

航空輸送の主体となる旅客輸送を考慮すると、重量は座席数に比例しないしは若干重量より大きく増加するが、機体の大型化によるレイノルズ数の増大も生じるため、座席数とエネルギー消費はほぼ比例する。

また、上昇時に蓄えられた位置エネルギーを降下時に用いるため、ある程度のエネルギー回収が行われている。

なお、総重量は燃料の積載量により大きく変わるが、代表的機種であるボーイング747で200～300トン程度であり乗客の重量20～30トンは無視しうるオーダーなので座席利用率に人キロ当たり燃料消費はほぼ反比例する。

以上見てきたように輸送機関のエネルギー効率を決定する要因は各輸送機関ごとに異なり、この特性に応じた利用のされ方がされている。

### 3. 産業連関表から見た運輸部門のエネルギー消費

運輸部門のエネルギーフローを検討する場合、以上述べたような直接運行にかかわるエネルギー消費のみならず運輸システムとしてのエネルギー消費を考える

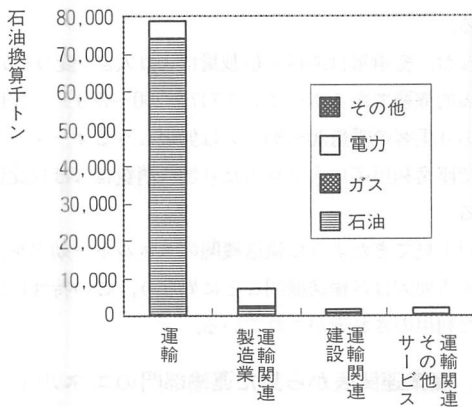
必要があろう。また、輸送活動に対する依存度がどの産業において高いかといった点も明らかになり、産業連関表を利用することにより、わが国経済における輸送用エネルギー消費の構造を、輸送活動のニーズ、輸送機関の分担、輸送用エネルギー消費といった要素に分解して把握できるようになる。

また、ここでは自動車製造業、運輸付帯サービスなど運輸関連の諸産業のエネルギー消費（直接エネルギー消費）を産業連関表から推定する。また、直接エネルギーのみでなく、運輸関連の産業の生産により誘発される間接エネルギー消費、道路建設など運輸関連の投資に伴う間接エネルギー消費も推計してみる。

まず、直接エネルギー消費としては最終消費のうちのガソリン、軽油を運輸関連の直接エネルギー消費と考えることができよう。また、輸送機械製造業、運輸業、運輸付帯サービス、倉庫業等が中間投入として消費するエネルギーも直接エネルギー消費となる。これを推定したものが図-4である。図に見られるように直接エネルギー消費としては、大半のエネルギーが輸送機関の運行用のエネルギーとして消費されており、自動車製造業などのその他のエネルギー消費はごく小さいものである。

また図-4には家計が消費するいわゆるマイカーの石油消費が含まれているが、この推計ではこれが石油換算2,100万トン程度存在している。

図-4に見られる運輸のエネルギー消費には運輸業のエネルギー消費のみならず産業連関表で言う自家輸送のエネルギー消費も含まれる。図-3に見られるように、

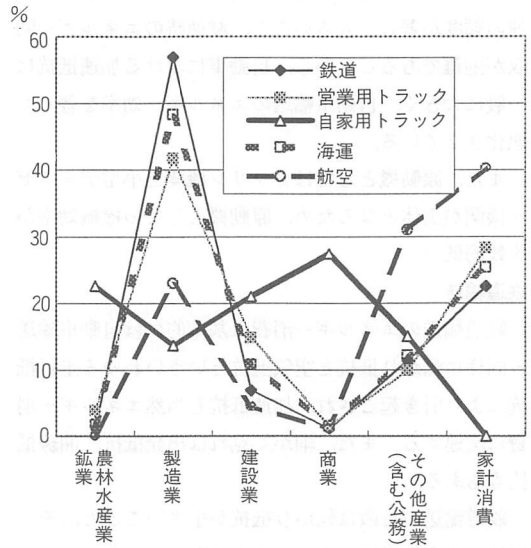


注) 運輸には家計消費のガソリン、軽油を含む  
出所) 総理府、平成2年産業連関表

図-4 産業連関表から見た運輸関連産業の直接エネルギー消費（1990年）

トラック輸送においては自家輸送のエネルギー効率性は良くないから、自家用の運輸サービスの利用の程度が産業別の運輸用エネルギー消費をある程度規定している。

図-5はこうした、貨物輸送の産業別シェア（産業には家計も含む）を推計したものである。自家用トラックは商業、農林水産業、建設業により、多く用いられ、他の輸送機関の利用が多い製造業と著しい対照を示している。

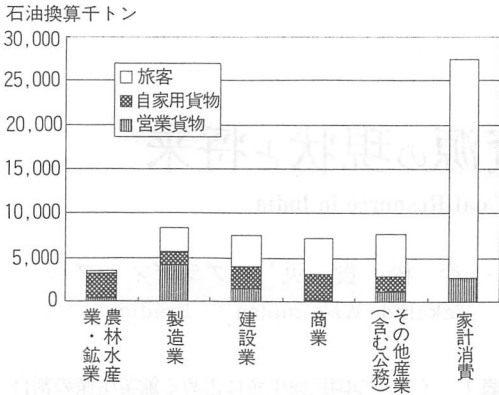


出所) 図-4と同じ

図-5 貨物輸送の部門別投入のシェア

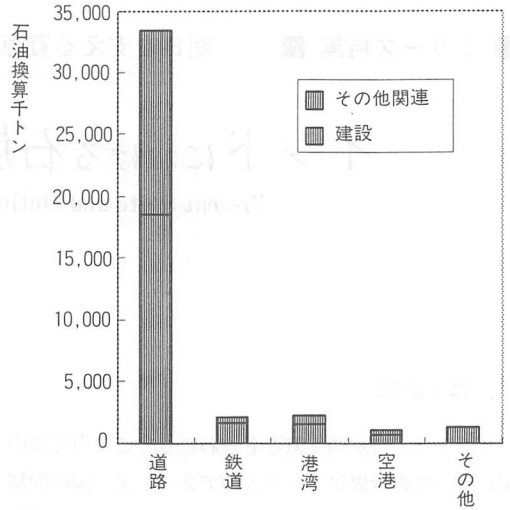
このような輸送機関の利用は、当然エネルギー消費に影響を及ぼす。図-6は各産業の投入に占める運輸業と自家輸送データを用いて、各産業が直接・間接に消費する道路輸送用のエネルギー（ガソリン、軽油、タクシー用LPG）消費を示したものである。（自家輸送のガソリン等の消費とその産業が消費した営業用の輸送活動分に対応する運輸業のガソリン等の消費を足したもの）。ここでも、建設業、商業のウエイトが高く、図-5と関連したエネルギー消費の構造になっていることが見て取れる。なお、もう一つの特徴として家計消費に起因する道路輸送用エネルギー消費が大きいという点に留意すべきであろう。家計が直接消費するガソリン、軽油は石油換算2,100万トン程度であるから、残りは宅配便などの利用による燃料消費と、バス・タクシー等の利用による燃料消費になる。

最後に、運輸活動で直接消費されるエネルギーに加



出所) 図-4と同じ。基本表と自家輸送マトリックス物量表から推計

図-6 産業別道路輸送用エネルギー消費



注) その他関連には輸送機械製造業、運輸付帯サービス、倉庫業等を含む。

出所) 図-4と同じ

図-7 運輸関連産業及び交通インフラ整備により誘発されるエネルギー消費 (1990年)

えて、間接エネルギー消費を検討しておく。これを図-7に示す。間接エネルギー消費としては、運輸業以外の運輸関連製造業、運輸付帯サービス等の国内需要が誘発するエネルギー消費と道路建設、鉄道軌道建設などの交通インフラ建設が誘発する(建設等のために必要とされる)エネルギー消費を示す(これらのエネルギー消費には図-4の各部門の直接エネルギー消費の一部(国内需要相当分)が含まれている)。

これから明らかのようにインフラ建設等のためのエネルギー消費は膨大であり、運輸活動の直接エネルギー投入のみを考慮することは、運輸システム全体のエネルギー消費を考える上で甚だ不十分であることになる。

なお、この間接エネルギー消費は平成2年の自動車製造、道路投資等が誘発しているエネルギー消費であり、これが所与の輸送活動を支えるための定常的投資

と一致する保証はないので、一つの目安と考えるべき数字である。

おわりに

運輸部門は多様であり、エネルギーフローを一括して議論するのは難しい。ここでは断片的な議論になってしまったが、単純な議論ではなく輸送活動、輸送機関の特性を十分考慮した包括的な議論が今後ますます必要になるかと思われる。

協賛行事ごあんない

「第5 動力・エネルギー技術シンポジウム」

<主催> 日本機械学会

<協賛> 省エネルギーセンター、  
日本原子力学会他

<開催日> 1996年11月13日(水)~14日(木)

<会場> 川崎市産業振興会館

<問い合わせ先>

社団法人日本機械学会事業課 増田 一夫

Tel 03-5360-3506, Fax 03-5360-3508