

■ 研究論文 ■

貨物輸送におけるモーダルシフトによる省エネルギー効果の分析

Evaluation of Energy Conservation Potential of the Modal-Shift in Freight Traffic

手塚 哲央*・原田 邦治**・西川 禎一***

Tetsuo Tezuka Kuniharu Harada Yoshikazu Nishikawa

(1993年6月10日 原稿受理)

1. はじめに

我が国の平成元年度の全エネルギー消費量の内、輸送部門は23%を占めており、その輸送部門の中で貨物輸送部門は41%を占めている¹⁾。そして今後も貨物輸送需要の着実な伸びと、それに伴うエネルギー消費量の増大が見込まれるため、貨物輸送において何らかの省エネルギー対策を講じる必要があると考えられる。

さて、貨物輸送部門のトンキロ当りのエネルギー消費原単位については、表1に示すように鉄道と内航海運に比べて営業用トラックと自家用トラックの原単位が極端に悪いという特徴が見られる。特に、自家用トラックはトンキロ当り、鉄道の15倍、営業用トラックと比べても3倍のエネルギーを消費している。

そこで、有効な省エネルギーの手段として

1. トラックから鉄道へのモーダルシフト
2. トラックから内航海運へのモーダルシフト

が考えられる。ここでモーダルシフト(modal shift)とは、輸送機関の代替を意味する用語である。

モーダルシフトによる省エネルギー効果の分析例には、最近のものとして文献2)及び3)がある。文献2)では輸送機関別の交通需要予測のための全国規模の計量モデルを構築し、温室効果ガス削減効果について検討している。文献3)では、貨物地域流動調査²⁾の輸

送機関別地域間貨物輸送量に基づいて、その各地域間輸送量が全国的に同じ割合でトラックから鉄道及び船舶にシフトした場合の温室効果ガス削減効果について検討している。

ただし、いずれも、各貨物輸送がどの路線を利用するか、そして、どこにどのような貨物路線を設置することが有効か、という点に関する分析まではなされていない。また、文献4)(の貨物輸送モデル)では全国貨物純流動調査に基づいて地域間貨物輸送量を推定し、産業構造、輸送機関分担モデルを含めた詳細かつ大規模な予測モデルを構築している。そして、地域間輸送量を重力型のモデルで推定するために、地域間移動の路線を想定しその間の移動時間を求めている点が特徴の一つとなっている。ただし、そこではエネルギー消費量の推定まではなされていない。

そこで、本論文では、地域間の輸送経路を限定することにより路線毎の貨物輸送量及びそのエネルギー消費量を推定する手法を提案する。そしてその結果に基づいて、ある区間における貨物用鉄道路線の整備によって生じるモーダルシフトの省エネルギーポテンシャル(すなわち当該区間におけるトラックによる貨物輸送を全て鉄道に代替させた場合の省エネルギー量)を推定する。以下、第2節では輸送機関別・輸送区間別の貨物輸送用エネルギー消費量を推定する手法、及びその推定結果について述べる。そして、第3節では、その結果に基づいてモーダルシフトによる省エネルギー量を定量的に推定する手法について述べた後、推定結果とその利用法について検討を加える。

2. 輸送機関別・輸送区間別の貨物輸送用エネルギー消費量の推定

現状の輸送機関別の貨物輸送用エネルギー総消費量

表1 各輸送機関のエネルギー消費原単位¹⁾
[kcal/t・km]

内航海運	鉄道(JR貨物)
118.8	135.4

営業用トラック	自家用トラック	トラック平均
617.4	1997.1	1030

* 京都大学原子エネルギー研究所講師

〒611 宇治市五ヶ庄

** 京都大学工学部電気工学教室(現在、日本航空機

整備本部勤務)

*** 京都大学工学部電気工学教室教授

〒606-01 京都市左京区吉田本町

については、文献1)に推定結果が示されている。しかし、ある輸送区間(以下では出発地を*i*、到着地を*j*と表す)ごとにモーダルシフトによる貨物輸送用エネルギー消費量の削減効果を考えるには、その輸送区間での輸送機関別の貨物輸送用エネルギー消費量 $E_k(i, j)$ を求める必要がある。ここで、添字*k*は輸送機関の種類を表すものとする。そして、そのエネルギー消費量 $E_k(i, j)$ は、輸送機関別・輸送区間別輸送量 $T_k(i, j)[t]$ と輸送区間距離 $D_k(i, j)[km]$ との積に比例するものと仮定する。以下、その各々の値の求め方について説明する。

2.1 地域間貨物輸送用エネルギー消費量の推定方法

(1) 輸送機関別・輸送区間別輸送量

輸送機関別・輸送区間別輸送量 $T_k(i, j)[t]$ については、貨物地域流動調査⁹⁾によって全国を53地域(北海道7地域と46都府県)に、輸送機関を3種類(鉄道、トラック、海運)に分けた場合の、輸送機関別・輸送区間別の年間貨物輸送量が既に推定されているので、その値を用いる。ただし、このままではトラックの種類による燃費の差が考慮できないという問題が生じることになるが、これは今後の課題としたい。

(2) 輸送区間距離

輸送区間距離 $D_k(i, j)[km]$ については、次の仮定に基づいて推定する。

- 輸送機関別に地域毎に地域中心を定め、異なる地域間の貨物輸送は地域中心間でのみ行われるものとする。これは各地域間における貨物の輸送形態を大幅に簡略化することを意味している。すなわち、以下に述べる手法が短距離区間におけるモーダルシフトの効果分析には不向きであることを示すものである。ただし、モーダルシフトは比較的長距離区間の輸送において有効と考えられるので、これはそれほど重要な問題ではないと予想される。
- 地域*i*と地域*j*との間の輸送経路の内で選択される可能性が一番高いと思われる経路を、地理的、物理的要因を考慮して輸送機関毎に一つずつ設定する。従って、この輸送経路は現実のものとは異なる可能性がある。

以下では鉄道とトラック輸送における輸送経路の設定方法について述べる。

<鉄道輸送における輸送経路の設定方法>

鉄道輸送における輸送経路の設定に関しては、以下の取り決めに従うものとする。

- 輸送は全てJR貨物によって行われる。これは、表

表2 JR貨物と他全社の貨物輸送トンキロ¹⁾
[10⁶t・km/年]

JR貨物	全他社
24675	461

2に示すように、他社の貨物輸送トンキロはJR貨物に比べ極めて小さな値だからである。

- 輸送経路はJR貨物の路線上に設定する。なお、JR貨物の路線と路線距離については、鉄道要覧⁸⁾とJR時刻表⁷⁾を参照した。
 - 53地域の内、奈良、徳島、沖縄は、鉄道による貨物輸送がほとんどまたは全く行われていないので、除外した。従って地域数は50となる。
- なお、ここで用いた鉄道の路線図を図-2に示す。

a) 地域中心の設定

地域中心は以下のような方法で設定する。

- 原則として県庁(北海道の場合は支庁)所在地、または、それに準ずる地点に近い駅を地域中心と定める。
- ただし、それに該当する駅の近くに路線が分岐する駅があれば、それを地域中心と定める。こうすることによって、以下に述べる輸送経路の分割区間数を減らすことができる。
- 駅は貨物取扱駅であることが望ましいが、そうでない場合も地域中心として認めることにする。

b) 輸送経路の分割

地域*i*から地域*j*への輸送について考える場合、地域中心と定められた駅あるいは路線の分岐点に該当する駅を境として輸送経路を分割する。

次に、分割された区間ごとに番号を割り当てて、各

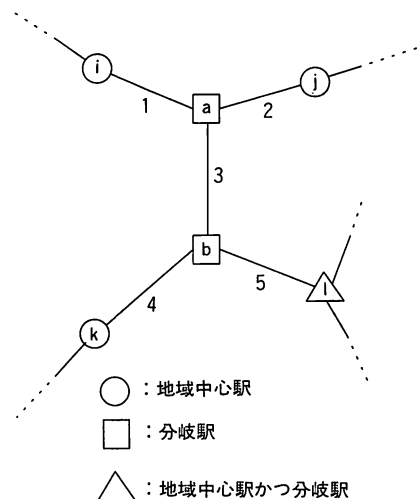


図-1 鉄道の輸送経路分割の概念図

輸送経路を区間番号列で表す。例えば、図-1において、

- ・輸送区間が (i, j) の場合、区間番号列は1-2、
 - ・輸送区間が (i, k) の場合、区間番号列は1-3-4、
- となる。

そして、その分割された区間距離を調べることで、輸送区間距離 $D_k(i, j)$ を求めることができる。このように地域間の輸送経路をいくつかの区間に分割する理由は、全ての地域間距離を計算する際に共通の区間を含む地域間の距離の計算を容易にするためである。

<トラック輸送における輸送経路の設定方法>

トラック輸送における輸送経路の設定に関しては、以下の取り決めに従うものとする。

- ・輸送経路は高速道路及び国道に限定する。なお、高速道路及び国道の路線と路線距離については、全日本道路地図⁹⁾を参照した。
- ・カーフェリーの利用は考慮しない。これは、トラック輸送におけるカーフェリーの利用率に関するデータが得られなかったためであるが、今後、更に検討すべきところである。そして、北海道・本州間の輸送は函館と青森を経由するものとしその距離は0とする。また、四国以外の地域と四国との間の輸送は全て瀬戸大橋を利用するものとする。北海道と本州との間の輸送距離を0とおいたのは、後に述べる全国の貨物輸送用エネルギー消費量の推定値の比較に都合がよいためであるが、このために北海道を含む区間のモーダルシフトの省エネルギー効果の評価の信頼性が低下することになる。
- ・地域数は沖縄を除く52地域とする。

輸送経路の分割・設定は、鉄道の場合とほとんど同様の方法で行なうことができる。ただし、地域中心については、原則として県庁(北海道の場合は支庁)所在地、または、それに準ずる地点に設定することとする。

ここで用いたトラックの路線図を図-3に示す。

(3) 地域間の貨物輸送用エネルギー消費量の推定
地域 i, j 間の貨物輸送用エネルギー消費量 $E_k(i, j)$ は

$$E_k(i, j) = T_k(i, j) \times D_k(i, j) \times (\text{エネルギー消費原単位}) \quad (1)$$

として求められる。なお、各輸送機関のエネルギー消費原単位には次の値を用いる¹⁾

$$\begin{aligned} \text{鉄道} &: 135.4[\text{kcal}/\text{t}\cdot\text{km}] \\ \text{トラック} &: 1030.0[\text{kcal}/\text{t}\cdot\text{km}] \end{aligned}$$

2.2 トラックの地域内貨物輸送用エネルギー消費量の推定

前節に述べた方法の妥当性を確認するためには、その結果を用いて全国の輸送用エネルギー消費量を求め、それを他の方法で推定した値と比較するというマクロチェックを行うのが有効である。ただし、前節で求めた輸送区間別エネルギー消費量から全国の輸送用エネルギー消費量を求めようとすれば、地域内貨物輸送用エネルギー消費量を加えることが必要となる。

鉄道では、表3に示すように地域内輸送量は地域間輸送量に比べて十分小さいため無視することができるが、トラックでは、表4に示すように地域内輸送量が地域間輸送量より格段に多いため、それを無視することはできない。

表3 鉄道の地域内・地域間輸送量⁵⁾ [10⁶t/年]

地域内輸送量	地域間輸送量
8	50

表4 トラックの地域内・地域間輸送量⁵⁾ [10⁶t/年]

地域内輸送量	地域間輸送量
5043	1070

トラックの地域内貨物輸送用エネルギー消費量を求めるためには地域内輸送距離の値が必要になるが、そのようなデータがないので、以下の仮定に基づいてトラックの地域内輸送距離を推定することとする^{*1)}。

1. 各地域の形はその面積に等しい正方形とする。
2. 地域内の二地点間の区間距離はユークリッド距離とする。
3. 地域内の貨物輸送OD発生量は、中心点の周りに正規分布に近い形状で分布するものとする。

上記の1～3の仮定は各地域の経済的中心が1ヶ所である場合に有効と考えられるが、中心が2ヶ所以上に分散している場合には大きな誤差を伴う。ここで用いた仮定の有効性については各都道府県で個別に検討する必要があり、今後の課題である。すなわち、ここで述べた方法は極めて粗い近似を行ったものであり、結果の解釈については注意が必要である。

^{註*1)}文献11)では、この他の仮定に基づいた場合についても検討している。

2.3 全国の貨物輸送用エネルギー消費量の推定結果と文献1)の推定値との比較

<鉄道>

前節までの方法を用いて、鉄道の全国における貨物輸送用エネルギー消費量を推定した結果と、文献1)の推定値とを比較して表5に示す。推定結果と文献1)の推定値とは極めて近い値となっているが、この原因としては以下のことが考えられる。

表5 鉄道の輸送用エネルギー消費量の推定結果と文献1)の値との比較 [10⁹kcal/年]

文献1)の値	本研究の推定値
334	344

1. 長距離輸送の比率が比較的高いために、地域間輸送を地域中心間輸送と考えることによる誤差が小さい。
2. 設定した輸送経路と実際に使用される輸送経路との違いは小さいものと推測される。これは、鉄道の路線が格子状になっていないので、ほとんど一意的に輸送経路が決まるからである。

<トラック>

全国におけるトラックの貨物輸送用エネルギー消費量を推定した結果と、文献1)の推定値を表6に示す。両者を比べると推定値のオーダーこそ同じであるが、約40%程度の違いが生じている。この原因としては以下の点が挙げられる。

表6 トラックの輸送用エネルギー消費量の推定結果と文献1)の値との比較 [10¹²kcal/年]

文献1)の値	本研究の推定値
270	382

1. 設定した輸送経路が実際に使用される輸送経路と異なる場合が多い。これは、トラックの路線が鉄道に比べて格子状に近い形になっているので、一意的に輸送経路が決まらないからである。また、貨物輸送を地域中心間でのみ評価している点も一因であろう。
2. フェリーの利用を考慮していない。
3. 2.2節で述べたように、地域内輸送用エネルギーの推定における、平均輸送距離の推定誤差が大きい。
4. 路線及び車種の違いによるエネルギー消費原単

位の差を考慮していない。例えば、長距離輸送のエネルギー消費原単位は短距離輸送に比べて向上すると考えられる。

このように、鉄道、トラックともに全国における貨物輸送用エネルギー消費量の推定値については、トラック輸送で多少誤差を伴うものの文献1)の推定値とオーダーは合っていることから、この推定結果をおおむね妥当なものと考え、以下では、本節で用いた貨物輸送量データ、エネルギー消費原単位及び設定した地域間距離を用いて、貨物輸送におけるモーダルシフトによる省エネルギー効果を推定する。

3. 地域間貨物輸送におけるモーダルシフトによる省エネルギーポテンシャル

3.1 特定区間におけるモーダルシフトの省エネルギーポテンシャルの推定

本節では、ある区間(a, b)を通過するトラックによる貨物輸送を全て鉄道に代替させることによる貨物輸送用エネルギーの削減量を推定する。ここで、a及びbを「中継地」と呼ぶこととする。この場合、出発地と中継地aとの間のアクセス輸送と中継地bと到着地との間のイグレス輸送が発生するが、ともにトラックによる輸送と考えれば、貨物輸送用の省エネルギー量推定の際にはこの点について特に考慮する必要はない。また、モーダルシフト区間(a, b)内に地域中心駅があっても、その駅では貨物の積み込み・積み下ろしは認めないものとする。

モーダルシフト区間(a, b)において、

$P(a, b)$ [t] : トラックによる通過輸送量

$D_t(a, b)$ [km] : トラックによる輸送距離

$D_r(a, b)$ [km] : 鉄道による輸送距離

F_{et} [kcal/t·km] : トラックのエネルギー消費原単位

F_{er} [kcal/t·km] : 鉄道のエネルギー消費原単位

とすれば、モーダルシフトによる省エネルギーポテンシャル $E_d(a, b)$ は次式によって求められる。

$$E_d(a, b) = P(a, b) (D_t(a, b) \cdot F_{et} - D_r(a, b) \cdot F_{er}) \quad (2)$$

区間(a, b)におけるトラック通過輸送量 $P(a, b)$ [t] を求めるには、まず、地域a, b間を結ぶトラック路線の区間番号列が地域i, j間を結ぶトラック路線の区間番号列に完全に含まれるかどうか調べ、含まれれば $P(a, b)$ にi, j間の輸送量 $T(i, j)$ を加える。この操作を全てのi, jについて行う。

表7 地域間輸送におけるモーダルシフトによる省エネルギーポテンシャルの推定結果 [10⁹kcal/年]

中継地 <i>a</i>	中継地 <i>b</i>						
	青森	宮城	東京	愛知	大阪	岡山	福岡
青森	—	1053	1455	689	494	88	119
宮城	1113	—	2940	1479	850	78	261
東京	1356	3376	—	8583	7023	1604	2836
愛知	688	1996	10972	—	6684	2125	3906
大阪	380	1215	8519	6643	—	2873	5352
岡山	45	277	2171	2428	2976	—	755
福岡	49	241	3156	3650	4901	551	—

例えば路線(*a, b*)の区間番号列が3-4-5であり路線(*i, j*)の区間番号列が1-2-3-4-5-6-7である場合には、 $P(a, b)$ に i, j 間の輸送量 $T(i, j)$ を加えることになる。

省エネルギーポテンシャルの推定結果の一部を表7に示す²。推定結果について注意すべき点を以下に列挙する。

1. 地域内輸送のモーダルシフトは考えていないので、その輸送用エネルギー削減量は0とした。
2. 輸送区間が北海道・本州間の場合には省エネルギー量に負の値が生じることがあるが、これは函館・青森間の距離をトラックの場合には0 kmとしたためである。
3. 輸送区間が九州内の県どうしの場合は、JR貨物の営業路線の関係上、鉄道の方が大幅に遠回りとなる場合があるため、あまり意味のない値となる場合が生じる。他の区間でも多くの場合、鉄道とトラックの輸送経路が異なることが多く、結果の解釈に当たっては注意を要する(3.3節参照)。
4. 中継地が兵庫の場合の省エネルギー効果が大阪、岡山を中継地とする場合の省エネルギー効果に比べて非常に小さくなる可能性があるが、これは兵庫のトラック輸送の中心地である神戸が中国自動車道にないため、兵庫をはさむトラック輸送が神戸を通らないことによるものである(図-2、及び図-3参照)。また、中継地が広島の場合についても同様の現象が生じる。

3.2 路線1 km当たりの省エネルギーポテンシャルの推定

3.1節の結果をもとにして、モーダルシフトによる路線1 km当たりの省エネルギーポテンシャルを推定

する。

区間距離が300km以上で1 km当たりの省エネルギーポテンシャルが多いモーダルシフト区間を、多いものから順に上位20区間まで表8に示す。表8より、1 km当たりの省エネルギー効果が大きい輸送区間は、東名・名神高速道路、中国・東北自動車道上に非常に多くあり、そのほか関越自動車道にもあることが分かる。

これらの推定結果とともに各輸送区間の1 km当たりの鉄道整備コストを考慮すると、代替輸送区間を設定した場合のコストパフォーマンスを評価することが

表8 1 km当たりのエネルギー削減量が多いモーダルシフト区間(距離300km以上で上位20区間) [10⁶kcal/km・年]

順位	区間	距離	削減量
1	神奈・愛知	347	67308
2	東京・愛知	359	54470
3	静岡・京都	333	49948
4	神奈・滋賀	427	45070
5	神奈・岐阜	378	45039
6	静岡・大阪	372	44911
7	神奈・京都	495	37658
8	東京・岐阜	389	36203
9	東京・滋賀	439	36011
10	神奈・大阪	534	34430
11	東京・京都	506	30640
12	東京・大阪	545	28517
13	大阪・山口	474	20299
14	宮城・東京	359	17593
15	大阪・福岡	623	16457
16	京都・山口	513	14296
17	埼玉・愛知	397	14193
18	岐阜・岡山	336	13157
19	愛知・岡山	366	12439
20	滋賀・山口	581	12397

註² 実際には約50×50の大きさの表が得られる。

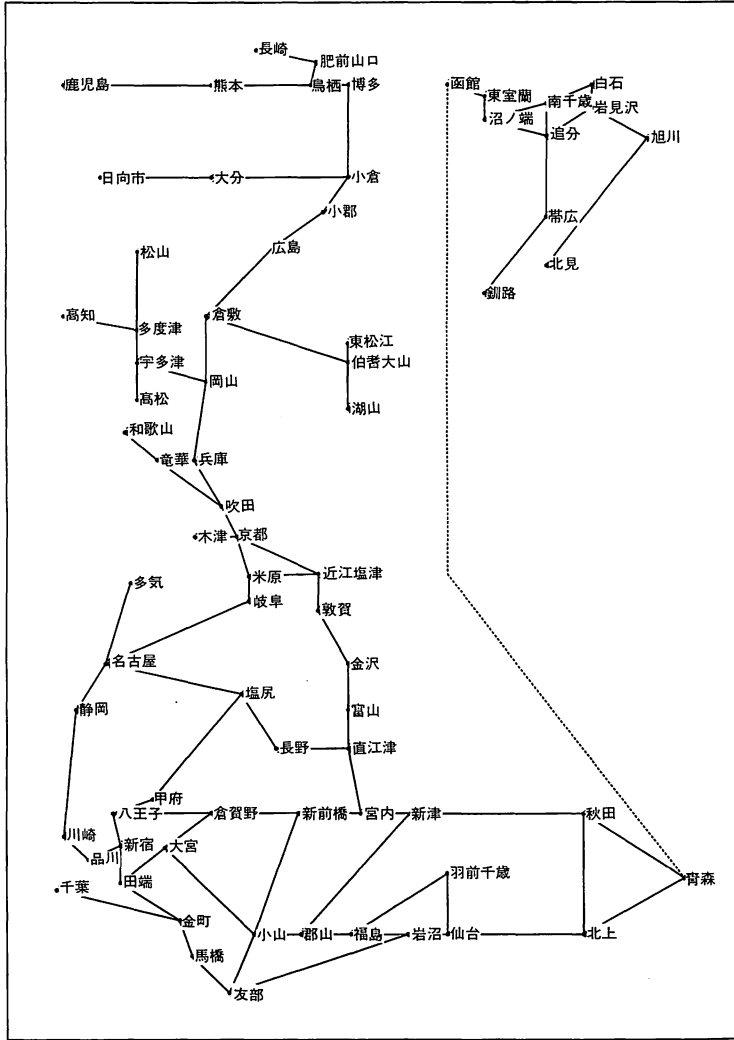


図-2 鉄道の路線図

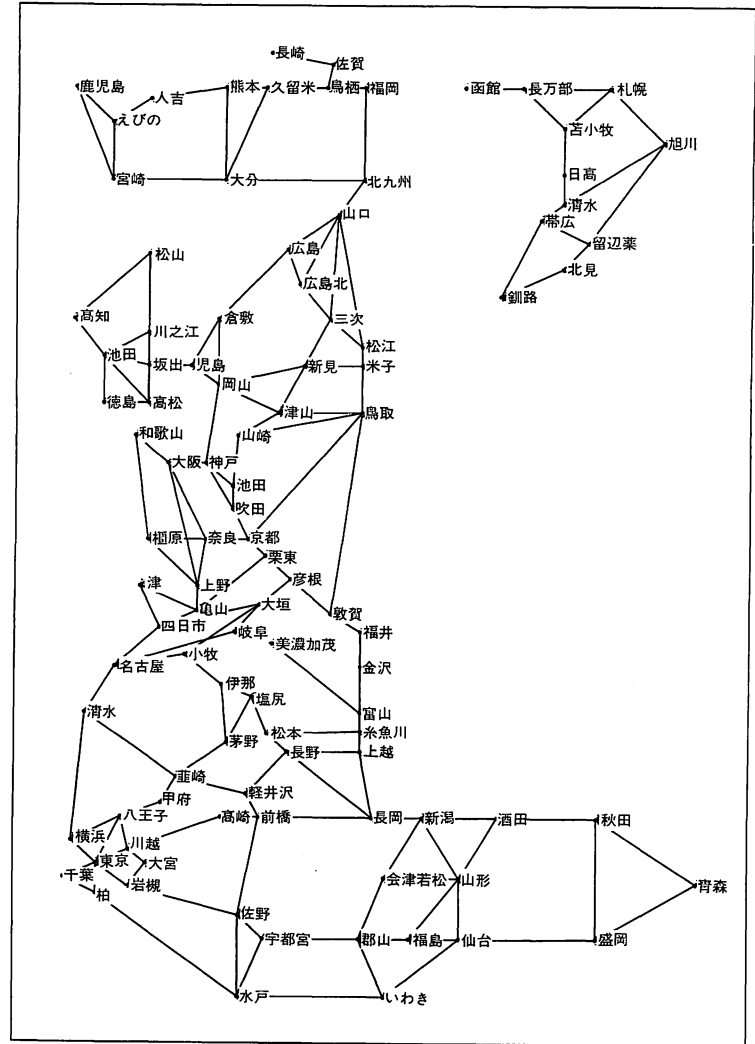


図-3 トラックの路線図

できる。また、エネルギーコストでみると、素材の製造エネルギーも含めた鉄道路線の建設エネルギー¹²⁾が約 20×10^9 kcal/kmであることから¹²⁾、路線の建設エネルギーを考慮しても、モーダルシフトによる省エネルギー効果は十分に期待できることが分る。

3.3 仙台・博多間に貨物列車専用線を設けた場合の省エネルギーポテンシャルの推定

3.1節の結果の利用法の一例として、次のような場合の省エネルギーポテンシャルを推定することとする。

1. 仙台博多間に貨物列車専用線を設ける。
2. 停車駅は仙台(宮城)、品川(東京)、名古屋(愛知)、大阪、岡山及び博多(福岡)とし、そこで貨物の積み込み積み下ろしが可能であるとする。
3. 停車駅が中心駅となっている都府県の間を通過するトラック輸送を、各駅間で鉄道輸送で代替する。

推定方法は以下の通りである。

1. 表7の推定結果より、鉄道輸送で代替する各区分間における省エネルギー量を求める。
2. 各区分間の省エネルギー量を合計する。すなわち、宮城・東京間、東京・愛知間、愛知・大阪間、大阪・岡山間、岡山・福岡間及び大阪・福岡間(これは、大阪・福岡間のトラック輸送が岡山市を經由しないために付け加えられたものである)の各区分間における省エネルギーポテンシャルの総和を計算する。

以上の手順による省エネルギーポテンシャルの推定結果は 5.7×10^{13} [kcal/年]となる。これはトラックの貨物輸送用エネルギー消費量 2.7×10^{14} [kcal/年]¹¹⁾の21%に相当する。

このように、3.1節で求めた地域間貨物輸送におけるモーダルシフトによる省エネルギーポテンシャルの推定値があれば、ある区間のトラック輸送を鉄道に代替させた場合の省エネルギーポテンシャルを、途中で貨物の積み込み・積み下ろしができる駅を任意に設定した場合について容易に推定できる。

¹²⁾ このように間接投入分を含めた製造エネルギーを、エネルギー集約度、エネルギー濃度などと呼ぶ。また、この値を求めることをエネルギーアナリシスという。

4. おわりに

本論文では、貨物用鉄道路線のもつ省エネルギーポテンシャルについて定量的に検討する手法について述べ、その推定結果の一部を示した。また、推定結果の利用法について述べ、本論文の手法の有効性を示した。

実際には、鉄道ダイヤからの制約があり、ここで求めた省エネルギー量を実現するためには相当量の設備投資が必要となる。この点に関する経済性の分析は今後の課題としたい。ただし、現状で想定される制約を安易にそのまま将来に適用することは、モーダルシフトによる将来の省エネルギー効果を強く限定することになるので、この点については慎重な考慮を要する。そして、環境問題などエネルギーシステムを取り巻く種々の状況を考えた場合に、やはりモーダルシフトは有効な対策の一つと考えられ、ここで述べた方法は、3節に述べた問題点に対してよりミクロな観点から改良を加えることにより有効な分析手法となりうるであろう。

最後に、本研究を進めるにあたって討論頂いた京都大学工学部 喜多 一博士に謝意を表する。

参考文献

- 1) 平成3年版運輸関係エネルギー要覧, 運輸省運輸政策局情報管理部(1992)
- 2) 地球温暖化防止等の観点からの運輸部門におけるエネルギー対策のあり方に関する調査, (財)運輸経済研究センター(1991)
- 3) 地球温暖化防止対策ハンドブック 4, 交通編, 地球温暖化対策技術評価検討会報告書, 環境庁企画調整局地球環境部編(1992)
- 4) 21世紀のわが国の交通需要, (財)運輸経済研究センター(1991)
- 5) 平成2年度貨物地域流動調査, 運輸省政策局情報管理部(1992)
- 6) 平成3年度鉄道要覧, 運輸省鉄道局(1992)
- 7) JR時刻表, 弘済出版社(1992)
- 8) 全日本道路地図, 昭文社(1990)
- 9) 新版日本国勢地図, 建設省国土地理院(1990)
- 10) 平成2年度自動車輸送統計年報, 運輸省運輸政策局情報管理部(1991)
- 11) 原田: 貨物輸送用エネルギー消費量のモーダルシフトによる削減効果, 京都大学工学部電気工学教室学士論文(1993)
- 12) 茅: エネルギー・アナリシス, 電力新報社(1980)