

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 494

January 2009

コンテナ船およびRORO貨物船の燃料消費量と
長距離内航RORO貨物船輸送における燃料価格上昇の影響

鈴木 武

Fuel Consumption of Container Ship and RORO Cargo Ship
and Effect of Oil Price Rise on Domestic RORO Cargo Ship Transportation of Long Distance Routes

Takeshi SUZUKI

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

コンテナ船および RORO 貨物船の燃料消費量と 長距離内航 RORO 貨物船輸送における燃料価格上昇の影響

鈴木 武*

要 旨

海上貨物輸送分野において GHG 削減の動きや燃料価格上昇などに適切な対応をしていくための施策検討を可能にするため、外航コンテナ船、内航 RORO 貨物船、内航コンテナ船の仕様と燃料消費を調べ、それらをもとに各船種の燃料消費関数を作成した。

燃料価格の上昇による輸送機関ごとの貨物輸送量の変化の傾向を知るため、長距離輸送区間(北海道＝愛知、北海道＝大阪、東京＝福岡、愛知＝福岡)を対象に一般貨物の輸送機関分担モデルを構築した。

構築したモデルに燃料価格上昇等のインパクトを与え、輸送機関の分担関係がどのように変化し、それらに伴い化石燃料消費がどのように変化するかの傾向を調べた。その結果、設定した計算条件の範囲内では、化石燃料価格上昇等のインパクトがあった場合の1次的影響として次のような傾向の変化が起こる可能性があることが分かった。

それは、①船舶よる貨物の輸送量が若干減少する、②船舶の運航速度が低下する、③これらの変化にともなう貨物輸送にともなう化石燃料消費が減少する、というものである。

キーワード：貨物輸送，コンテナ船，RORO 貨物船，燃料消費，CO2 排出，燃料価格

* 沿岸海洋研究部

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土技術政策総合研究所

電話：046-844-5025， Fax：046-844-5074， E-mail：suzuki-t92y3@ysk.nilim.go.jp

Fuel Consumption of Container Ship and RORO Cargo Ship and Effect of Oil Price Rise on Domestic RORO Cargo Ship Transportation of Long Distance Routes

Takeshi SUZUKI*

Synopsis

To enable to consider measures for Green House Gases reduction and for adapting oil price rise, the author surveyed specifications and fuel consumption of international container ship, domestic RORO cargo ship and domestic container ship. And the author estimated functions to produce fuel consumption of those ships.

To detect change of transportation load of each mode due to oil price rise, a modal split model for general cargo transportation of long distance routes in Japan was built. The long distance routes were 4, which were Hokkaido – Nagoya, Hokkaido – Osaka, Tokyo – Fukuoka, Nagoya – Fukuoka.

Using the model, the author calculated transportation load of each mode with high oil price, and estimated fossil fuel consumption. Tendencies of those changes were analyzed.

The primary effects on the long distance cargo transportation under oil price rise are as bellows.

(1) The shipping cargo load decreases a little in total. (2) The shipping companies decrease the ship navigation speed. (3) The fossil fuel consumption from the cargo transportation decreases associated with the changes of modal share.

Key Words: Cargo transportation, container ship, RORO cargo ship, fuel consumption, CO2 emission, oil price

* Head, Coastal and Marine Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan National Institute for Land and Infrastructure Management
Phone : +81-46-8445025 Fax : +81-46-8445074 e-mail : suzuki-t92y3@ysk.nilim.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 船舶の燃料消費量	1
2.1 外航コンテナ船	2
2.2 内航RORO貨物船	5
2.3 内航コンテナ船	10
3. 3. 燃料価格上昇による一般貨物の国内流動への影響	11
3.1 モデルの構成	11
3.2 モデルの適合性	12
3.3 影響の分析	12
4. まとめ	14
謝辞	15
参考文献	15

1. はじめに

2008年7月には洞爺湖サミットにおいて温室効果ガスの削減が主要テーマの一つにとりあげられるなど、温室効果ガスの削減に対して世界的に関心が高まっている。また、2008年10月には日本でも排出量取引の国内統合市場の試行が開始されるなど、京都議定書第一約束期間における温室効果ガスの削減に向けた取り組みが強められつつある。

一方、2004年のイラク戦争の後、燃料油価格は急激に上昇した。例えば、主要な船舶燃料であるC重油の価格は、輸入CIF価格でみると2004年には25¥/lであったが2008年8月には93¥/lと3.7倍に上昇した。こうした燃料価格の上昇は、内航海運の経営に深刻な影響をもたらすと同時に、輸送技術の変化や輸送機関の分担関係の変化をもたらし、それらを通してエネルギー消費量とCO2の排出量の変化をもたらす。

燃料油価格が決まる背景にある原油の価格は、原油の輸入CIF価格でみれば図-1のとおりである。原油の輸入価格は2003年頃まで20\$/Bであったが、2004年ごろから上昇を始め、2008年8月には135\$/Bを記録し、その後、下落に転じた。ニューヨーク原油先物市場におけるWTI価格では、2008年7月上旬に145\$/Bを記録した後、米国のサブプライムローン問題を契機とする世界的な経済停滞や原油先物市場に対する規制の動きなどで価格が急速に低下し、2008年9月2日には110\$/Bとなっている（日本エネルギー経済研究所、2008）。原油価格は、世界的な経済停滞と投機的資金の引き上げによって、一時期の高値が沈静化しつつある。しかし、新興国の発展などによる世界的な石油需要の高まりや資源の有限性を考慮するならば、石油価格が2003年の水準まで戻りそしてその水準を維持し続ける、とは考えにくい。現に、IEA（2008）もエネルギー白書で2030年に原油価格が200\$/Bに上昇すると予測している。

そうした状況において海上輸送分野で適切な対応策を講じていくための検討を可能にするため、外航コンテナ

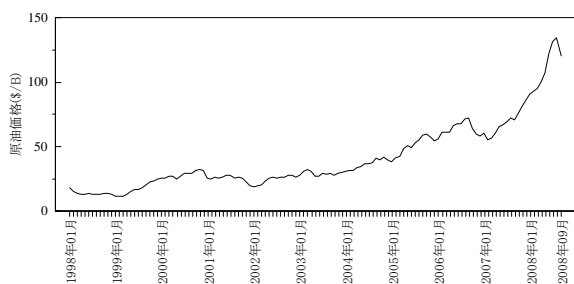


図-1 原油価格の推移

船、内航 RORO 貨物船、内航コンテナ船の燃料消費を調べ、それらをもとに複数の説明変数を組み込んだ燃料消費関数を作成した。また、CO2削減に向けた動きや燃料価格の上昇による輸送機関ごとの貨物輸送量の変化の傾向を知るため、海上輸送が重要な役割を果たしている輸送距離 800km 以上の長距離輸送区間（北海道＝愛知、北海道＝大阪、東京＝福岡、愛知＝福岡）を対象に貨物輸送の輸送機関分担モデルを構築し、燃料価格上昇等のインパクトを与え、輸送機関の分担関係がどのように変化し、化石燃料消費がどのように変化するかの傾向を調べた。

2. 船舶の燃料消費量

船舶は、内燃機関を動かすことによって航行のための推進力、搭載機器のための動力、厨房・照明等のための一般電源を獲得し、またボイラを燃やすことによって居住区と燃料を温めている。船舶は、そうした内燃機関とボイラを稼働させるために燃料を消費し、燃料を燃焼させることによって CO2 を排出している。

八島ら（1997）は、航路別に船舶の DWT を設定し、DWT と主機馬力の関係、主機馬力と燃料消費量の関係、主機馬力と航行速度の関係を使って外航海運の燃料消費量と航行速度を求め、航路別の貨物量及び航路距離から航路別に年間の燃料消費量を求め、そこから日本発着貨物の海上輸送に伴う CO2 の排出量を推計した。ここで用いられた方法は、船舶の DWT を航路別に固定して関係式を作っているため、任意のサイズおよび速度の船舶を仮定して推計を行うことが困難であり、様々な施策を評価しようとする場合には適していない。

公害研究対策センター（2000）の方法による船舶の燃料消費量の推計は、船舶の GT から主機馬力および補機馬力を推定し、それに負荷率と稼働時間を乗じることによって主機及び補機の燃料消費量を求める。そして、GT とボイラ燃料消費量の関係からボイラ燃料消費量を求める。この方法では航行速度の違いを負荷率として与えることになり、航行速度と負荷率の関係についての情報が別途必要になる。

こうした問題を克服し、船舶の燃料消費量を比較的容易に推定することができるようにするため、燃料消費量を決定するうえで重要な要因と考えられる幾つの変数を説明変数とし、それらを与えた場合に燃料消費量を出力する関数を作成した。ここでは一般貨物の海上輸送に着目し、その主要な船種である外航コンテナ船、内航

RORO 貨物船、内航コンテナ船を燃料消費関数作成の対象にした。

2.1 外航コンテナ船

(1) 主機の燃料消費

船舶は、燃料の燃焼をシャフトの回転力に変換し、その回転力でスクルーを回し推進力を獲得し、その力を使うことによって船体を受ける海水の流体抵抗等に抗して船体を移動させる。風による抵抗は通常それほど大きくないため、船舶の航行に必要な単位時間あたりの燃料消費量は、船体を受ける海水の流体抵抗に抗するための単位時間あたりの仕事量に比例する。海水の流体抵抗の主なものは摩擦抵抗と造波抵抗である。摩擦抵抗は断面積に速度の 2 乗を乗じたものに比例する。造波抵抗は船長の 0.5 乗に対して船速が大きくなると急激に大きくなるため、一般にこの値が一定値以下になるように船体は設計されている。このような条件の下では、造波抵抗は断面積に速度の 2 乗を乗じたものに概ね比例する。同じ船種の場合、船体形状は概ね相似と考えられるため、断面積は船舶の排水量の 2/3 乗に比例すると考えられる。また、積載量が変化した場合、喫水のみが変化するので、断面積は満載排水量に対する航海時排水量の割合に比例する。エンジンの必要馬力はこのほかにプロペラの推進損失、シャフトの伝達損失、エンジンの熱損失、シーマージンを加えて考えることになるが、これらは推進抵抗、即ち海水の流体抵抗に主に比例すると考えられるため最終的に燃料消費量は海水の流体抵抗に比例する。以上をまとめると 1 の運航区間（港から港まで）における船舶の主機の燃料消費量は次式のように定式することができる。

$$FO = k_{c0} \cdot [DSP - (1 - k_{c1} \cdot LF) \cdot DWT] \cdot DSP^{-1/3} \cdot V^2 \quad (1)$$

FO は船舶の主機の運航時燃料消費量 (Kg/Km), k_{c0} と k_{c1} は定数, DSP は船舶の満載排水量 (t), DWT は船舶の載貨重量トン (t), LF は TEU 基準の消席率, V は航行速度 (Km/h) である。

この式を仮定し、入手することができた外航コンテナ船の燃料消費量実績 (2003 年) から k_{c0} を求めた (A 推定)。結果は表-1 のとおりである。時間あたり燃料消費量 (Kg/h) の測定値と推定値の関係は図-2 のとおりである。なお、 k_{c0} の t 値は 6.87 である。

入手したデータには満載排水量がなかったため、赤倉ら (1998) のデータから最小自乗法で DWT と満載排水

表-1 外航コンテナ船主機燃料消費式の係数推定結果 A

係数	係数值	Cor	N	DWT	V	Yb
k_{c0}	6.87×10^{-5}	0.984	25	17,700	25.0	1977
k_{c1}	0.65			74,400	42.0	2003
				45,300	35.2	1992
				18,030	4.5	6.76

注 1) Cor は燃料消費量の測定値に対する推計値の相関係数である。

注 2) N はサンプル数, DWT は(t), V は航行速度で(Km/h), Yb は建造年である。

注 3) DWT, V および Yb は、上段から順に最小、最大、平均および標準偏差である。

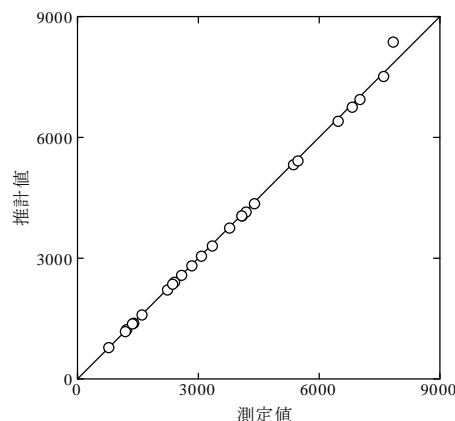


図-2 外航コンテナ船の主機燃料消費量の測定値と推計値

量の関係式を求め、それによって満載排水量を推定して使用した。使用した DWT (t) と満載排水量 DSP (t) の関係式は次のとおりである。

$$DSP = 1.37 \cdot DWT + 1660 \quad (2)$$

この関係式を求めるために使用したデータの数は 11, 相関係数は 1.000 である。

コンテナ船の場合、消席率は TEU 基準のものを使用するのが一般的である。これに対して重量基準の消席率、つまり DWT に対するコンテナの積載重量は、コンテナ 1 個あたりの重量がコンテナの最大積載重量よりも小さくなるため、TEU 消席率に比べて小さい値となる。平岡・亀山 (2005) が調査した北米航路および欧州航路のコンテナ船における TEU 基準の消席率と重量基準の消席率から求めた k_{c1} の平均値が 0.65 であったため、この値を使用した。

経年的な技術の向上を仮定して建造年の指数を式 (1) に乗じた式を作成し、実績値と推計値の相関係数を求めると 0.977 となり、式 (1) と等しい値となった。そのため、燃料消費量推定式に建造年の項を追加することは必要ないと判断した。

燃料消費量を分析するために必要となる DWT (t) と積載能力 CAP (TEU) の関係式を、収集できた実船データから最小自乗法によって求めると次式のとおりとなった。

$$DWT = 10.8 \cdot CAP + 12400 \quad (3)$$

使用したデータの数は 25, 相関係数は 0.973 である。

利用者の利便を考慮し, k_{c1} を 0.65, LF を 0.8 とした場合でコンテナ積載能力が 1000TEU, 2800TEU, 4000TEU, 6600TEU, 12000TEU の場合の燃料消費量を計算し, その結果をもとにグラフを作成した (図-3)。このグラフを使えば, 外航コンテナ船の燃料消費量を直ちに把握することができる。

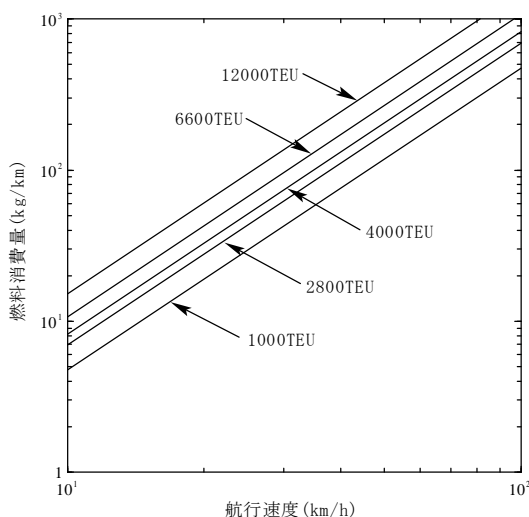


図-3 外航コンテナ船の主機燃料消費量

燃料消費量を推定するためには船型別に航行速度を設定する必要がある。船舶の主機の運航時燃料消費量 FO は式(1)で表されるから, DWT と DSP が TEU に比例するとみなし, 消費率が一定であるとするならば, V と TEU の間には次の関係が成り立つ。

$$FO = k_v \cdot TEU^{2/3} \cdot V^2 \quad (4)$$

ここで, k_v は定数である。

ある時点で経済環境が許容する TEU あたりの燃料消費量が船型によらず概ね一定の値以下に制限されると仮定すると, TEU と V の関係は次式のとおりとなる。

$$V = k_{v0} \cdot TEU^{1/6} \quad (5)$$

ここで, k_{v0} は定数である。

式(5)の k_{v0} と TEU の累乗数を未知数 k_{v1} として, 最小自乗法で値を推定すると表-2 のとおりとなった。実測値と推計値の相関係数は 0.885 と高く, 式(5)によって船型別の航行速度をかなり精度良く推定することができる。また k_{v1} の値は 1/6 に極めて近い値になっている。このことは TEU あたりの燃料消費量が船型によらず一定であるという式(5)の仮定の妥当性を示す証拠の一つだと考えることができる。

表-2 外航コンテナ船運航速度式の係数推定結果

係数	計数値	Cor	N	TEU	V	Yb
k_{v0}	9.93	0.885	25	240	25.0	1977
k_{v1}	0.161			5,600	42.0	2003
				3,042	35.2	1992
				1,624	4.5	6.76

注1) Cor は航行速度の測定値に対する推計値の相関係数である。

注2) N はサンプル数, TEU は船舶の積載能力(TEU), V は航行速度(Km/h), Yb は建造年である。

注3) TEU, V および Yb は, 上段から順に最小, 最大, 平均および標準偏差である。

貨物輸送量から簡易に燃料消費量を求めるという場合には, $t \cdot Km$ あたりの燃料消費量を求めておくことが便利である。平岡・亀山 (2005) は, アブストラクトログ (運航記録) をもとに燃料消費量を求め, 各港の揚積データから積載重量を求め, それと航走距離から $t \cdot mile$ を求め, 燃料消費量を $t \cdot mile$ で除すことによって外航コンテナ船の航海時の燃料消費原単位を作成した。対象にした船舶の諸元は表-3 のとおりで, 燃料消費原単位は表-4

表-3 対象船舶の基本情報

項目	C6100	C4700
就航年月	1998年1月	1995年2月
GT	76,847t	60,117t
満載排水量	110,715t	87,050t
DWT	82,275t	63,014t
積載能力	6,148TEU	4,743TEU
満載航海速度	23.0knot	23.5knot
主機	52,956KW	43,620KW
発電機	D/G:4, T/G:1, S/G:1	D/G:4, T/G:1, S/G:1
補助ボイラ	有	有
排ガスエコマイザ*	有	有

注) D/G はディーゼル発電機, T/G はターボ発電機, S/G は軸発電機で, 各数値は発電機の基数を表す。

表-4 船型別航路別の燃料消費率

項目	C6100			C4700		
	北米	欧州	平均	北米	欧州	平均
燃料消費量 g/t/Km	7.3	4.5	5.9	7.6	4.8	6.2
燃料消費量 g/TEU/Km	40.7	37.5	39.1	40.2	36.2	38.2

注) t は輸送貨物の重量(M/T), Km は航走距離, TEU は輸送コンテナの 20ft 換算個数である。燃料は C 重油と A 重油の合計である。

のとおりである。

積載能力を 6100TEU として式(2)および(3)より DWT と満載排水量を求め、消席率を 0.9, 航走速度を平岡・亀山 (2005) のデータの平均値に相当する 42Km/h とし、TEU あたりの貨物積載重量を北米航路で 7.4t/TEU, 欧州航路で 10t/TEU とし、式(1)の係数を表-1 の値として t・Km あたりの燃料消費量を求めると、北米航路が 4.8g/t/Km, 欧州航路が 3.5g/t/Km となる。同様に、積載能力を 4600TEU, 消席率を 0.9, 航行速度を 38Km/h, TEU あたりの貨物積載重量を北米航路 7.2t/TEU, 欧州航路 9.3t/TEU とし、t・Km あたりの燃料消費量を求めると、北米航路が 4.5g/t/Km, 欧州航路が 3.5g/t/Km となる。それらは、表-4 の値に比べると若干小さい。

平岡・亀山 (2005) が集めたデータをもとに、式(1)の燃料消費関数を仮定し、 k_{c1} を 0.65 とし、最小自乗法で燃料消費係数 k_{c0} を推定した (B 推定)。推定に際し、幹線区間の消席率を A 推定と同じ 0.9 であると仮定し、コンテナの揚積データからコンテナの積載 TEU を推定した。燃料消費係数の推定結果は表-5 のとおりである。この推計で使用したサンプル数は 4 と小さいが、 k_{c0} は推定結果 A (表-1) の 6.87×10^{-5} とよく一致している。その事実は推定された燃料消費関数が妥当であることの確信を 1 段階高めるものである。

表-5 外航コンテナ船主機燃料消費式の係数推定結果 B

係数	計数値	Cor	N
k_{c0}	6.33×10^{-5}	0.998	4
k_{c1}	0.65		

注) Cor は燃料消費量の測定値に対する推計値の相関係数, N はサンプル数である。

(2) その他の燃料消費

外航コンテナ船の場合、補機は搭載機器動力 (積荷冷凍・冷却・加温, コンプレッサー等の動力), 厨房・照明等の一般電源に電力を供給するための装置である。積荷の冷凍・冷却・加温に使われる電力量は主にリーファの数によって変化する。それ以外の電力は安定的に消費される。しかし、外航コンテナ船はターボ発電機と軸発電機を搭載していることが一般的であるため、航海中はそれらによる発電量の不足分を補機で発電することになり、補機による燃料消費量は小さい。停泊中は補機によって電力を供給することになるため、補機の時間あたりの燃料消費量は停泊中の方が大きい(平岡・亀山, 2005)。加えて補機は状況に応じて C 重油とディーゼル油を使い分けるため、ディーゼル油の使用料はそれらによっても大きく変化する。そのため、ディーゼル油の消費量は、

輸送形態を考慮したモデル化を行わず、単に船舶の大小から線形関数でディーゼル油の消費量を求めることとし、以下の式を仮定した。

$$DO = a_0 + a_1 \cdot DWT \tag{4}$$

ここで、DO はディーゼル油消費量 (Kg/h), a_0 および a_1 は推定パラメータである。

ディーゼル油の消費量をみると、他と比べて著しく消費量が大きいサンプルが 3 つある (図-4)。

消費量が突出している 3 サンプルのうち、1970 年代末に建造された 2 サンプルは、他サンプルと比べると DWT に対するコンテナ積載能力の比が著しく小さいため、以前はフルコン船ではなかった可能性が考えられる。1990 年代の 1 サンプルは、同年代建造の同型船と比べるとディーゼル油消費量が突出している。入手できた輸送に関する基本的な指標からその理由を見つけることはできないが、コンテナ船におけるディーゼル油の使われ方を考えると何らかの特殊な事情があったと考えることは不可能ではない。そのためこれらの 3 サンプルを除外して燃料消費量を求める式を推定した。

ディーゼル油消費量推定式のパラメータの推定結果は表-6 のとおりである。

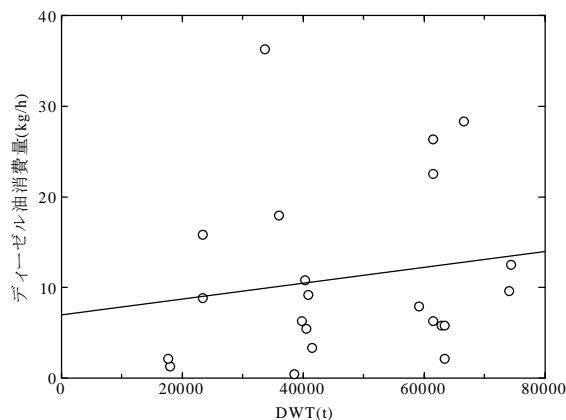
表-6 外航コンテナ船補機燃料消費式の係数推定結果

係数	計数値	Cor	N	DWT	Yb
a_0	7.01	0.162	22	17,700	1977
				74,400	2003
a_1	8.68×10^{-5}			47,353	1994
				18,037	5.54

注 1) Cor は燃料消費量の測定値に対する推計値の相関係数である。

注 2) N はサンプル数, DWT は(t), Yb は建造年である。

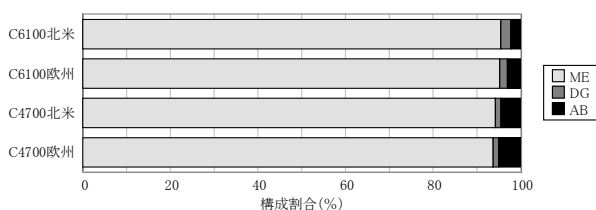
注 3) DWT および Yb は、上段から順に最小, 最大, 平均および標準偏差である。



注) 実線はディーゼル油消費量推定式の値である。

図-4 外航コンテナ船の補機燃料消費量

平岡・亀山（2005）によれば、停泊時を含む航路1周分の外航コンテナ船の燃料消費量の機関別割合は図-5のとおりである。C6100の場合の主機の燃料消費量の割合は約95%，C4700の場合でも約94%であるため、主機以外の機関による燃料消費量は、主機以外の機関に注目する場合を除き重要なものとはいえない。そのため主機による燃料消費量を求め、その値を船舶の全機関に対する主機の燃料消費割合で除すことによって船舶の燃料消費量を求めることで、実務上はまず問題ないであろう。



注) MEは主機，DGはディーゼル発電機，ABはボイラーである。

図-5 外航コンテナ船の燃料消費の機関別割合

2.2 内航 RORO 貨物船

(1) 調査の概要

内航 RORO 貨物船の燃料消費量推定式を作るため、内航 RORO 貨物船を運航している船社に対し2007年12月にアンケート調査を実施した。回答を求めた項目は①港間航海時間，②1ラウンドの燃料消費量である。10社に調査票を発送し，9社から回答を得た。回答のあった船舶の中には LOLO 用貨物区画を持つ船舶があったため，それらの船舶を除いた船舶を分析の対象とした。対象とした船舶指標の基本統計量は表-7，航路指標の基本統計量は表-8，航路区間指標の基本統計量は表-9のとおりである。

ここでは，航路距離は航路1周の距離である。貨物積載能力は，12m シャンの貨物積載量を 11t，8t トラックの貨物積載量を 2.6t，乗用車を 1.5t としたときの重量基準での貨物の積載能力である。貨物積載量は，区間ごと

表-7 内航 RORO 貨物船の船舶指標の基本統計量

項目	GT	DW	船長	船幅	満載喫水	速力	建造年	主機出力
N	32	32	32	32	32	32	32	32
Min	2,242	2,300	114.5	16.7	5.0	18.0	1992	4,531
Max	13,950	6,969	199.0	27.0	7.2	30.0	2007	47,647
Mean	9,477	5,774	157.9	24.3	6.7	22.1	2001	16,011
SD	3,087	1,074	17.4	2.5	0.5	2.0	3.9	7,002

注1) Nは標本数，Minは最小値，Maxは最大値，Meanは平均値，SDは標準偏差である。

注2) 単位は，GT，DWTがt，船長，船幅満載喫水がm，速力がknot，主機出力がKWである。

表-8 内航 RORO 貨物船の航路指標の基本統計量

項目	航路距離	貨物積載能力	貨物積載量	運航速度
N	32	32	32	32
Min	1,132	639	368	31.0
Max	4,435	2,633	2,441	50.6
Mean	2,420	1,917	1,551	37.4
SD	883	520	550	5.0

注1) Nは標本数，Minは最小値，Maxは最大値，Meanは平均値，SDは標準偏差である。

注2) 単位は，航路距離がKm，貨物積載能力と貨物積載量がt，運航速度がKm/hである。

表-9 内航 RORO 貨物船の航路区間指標の基本統計量

項目	距離	運航時間	平均速度	積載率
N	116	116	116	116
Min	72.2	2.4	21.0	0.00
Max	1313.1	37.0	51.2	1.00
Mean	667.7	18.6	35.2	0.73
SD	330.1	8.2	6.0	0.26

注1) Nは標本数，Minは最小値，Maxは最大値，Meanは平均値，SDは標準偏差である。

注2) 単位は，距離がKm，運航時間がh，平均速度がKm/hである。

の貨物積載量を区間距離を重みにして航路1周分を平均したものである。運航速度は，航路距離を運航時間で除して求めた区間平均速度を2乗し，区間距離を重みにして航路1周分を平均したものを1/2乗した値である。

(2) 船舶の特徴

GTとDWTの頻度分布を図-6～7に示す。GTの頻度は中央部と右端に多いが，DWTの頻度は右端に多く，GTとDWTの頻度分布の形状はやや異なる。しかし，DWTとGTの散布図(図-8)はかなり良い相関を示し，相関係数は0.87である。そのため，大局的には，船舶の大きさを表す指標として，DWTとGTのどちらを使っても大きな違いはないとみることができる。

船長，船幅，満載喫水の頻度分布は図-9～11のとおりである。船長は160m代に飛び抜けて大きなピークがあり，船幅は大部分が24～28mの範囲内にある。満載喫水はほとんどの船舶が6.5～7.5mの範囲内に収まっている。

航海速力，運航速度，主機出力，建造年の頻度分布を図-12～15に示す。航海速力はほとんどの船舶が20～24knotの範囲にあるが，30knot以上の速力を有する船舶も存在している。運航速度はほとんどの船が30～41Km/hの範囲にあるが，50Km/h以上の速度で運航している船舶もある。主機出力はほとんどの船舶が10000～20000KWの範囲にあるが，主機出力が50000KW弱の船舶も存在する。主機出力が50000KW弱の船舶の航海速力は30knot以上で非常に高速な船舶である。この船舶は燃料を多く消費するため，原油価格が高まっている近年の状況では特異な船舶といえる。実際，この船舶の平均

運航速度は 19knot で、主機の能力を十分に発揮している
 とはいえない状況である。建造年は 1999 年から 2004 年

が高い水準であった。

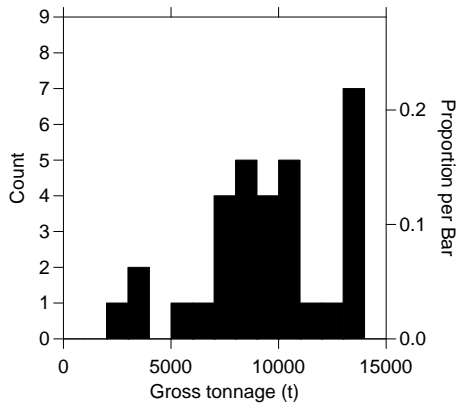


図-6 内航 RORO 貨物船の GT

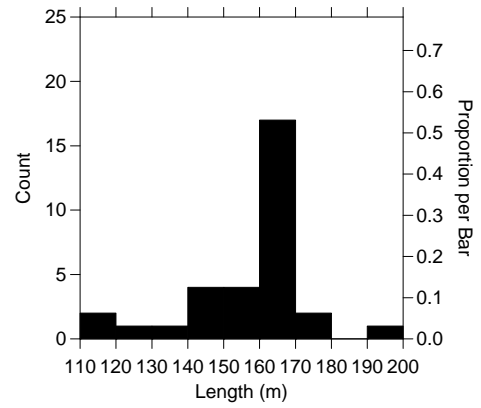


図-9 内航 RORO 貨物船の船長

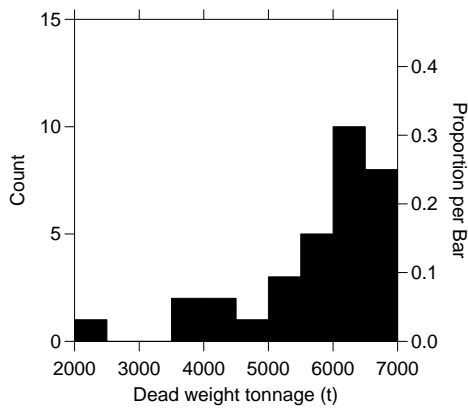


図-7 内航 RORO 貨物船の DWT

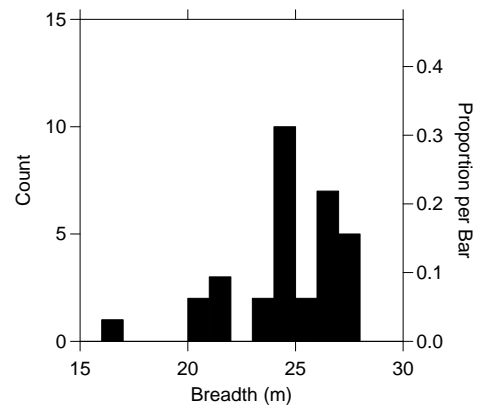


図-10 内航 RORO 貨物船の船幅

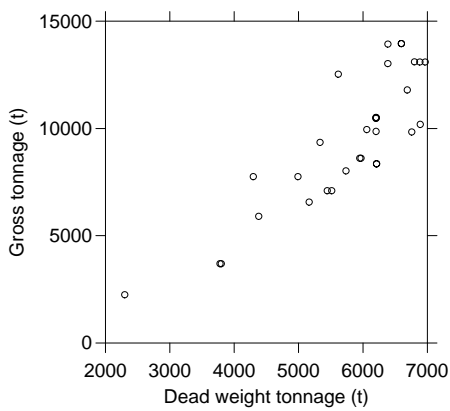


図-8 内航 RORO 貨物船の DWT と GT

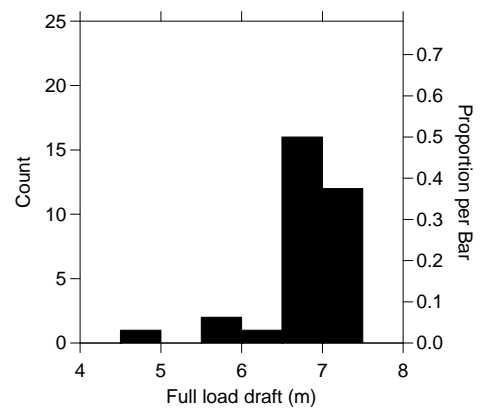


図-11 内航 RORO 貨物船の満載喫水

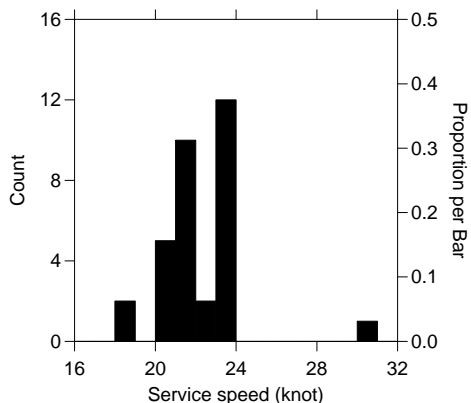


図-12 内航 RORO 貨物船の航海速度

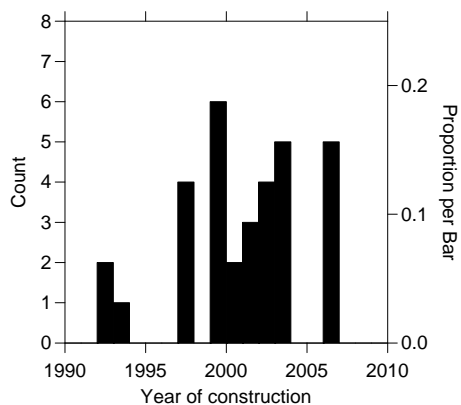


図-15 内航 RORO 貨物船の建造年

(3) 運航区間の特徴

区間ごとの消席率，平均速度の頻度分布を図-16～17に示す。平均速度は，区間距離を区間運航時間で除したものである。

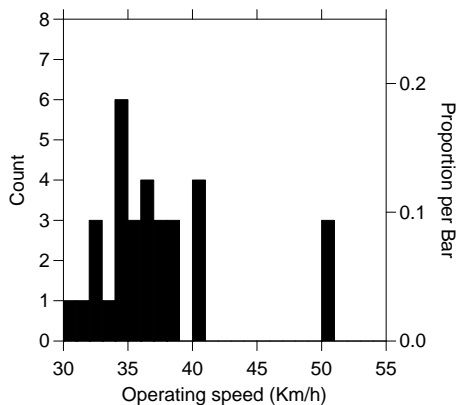


図-13 内航 RORO 貨物船の運航速度

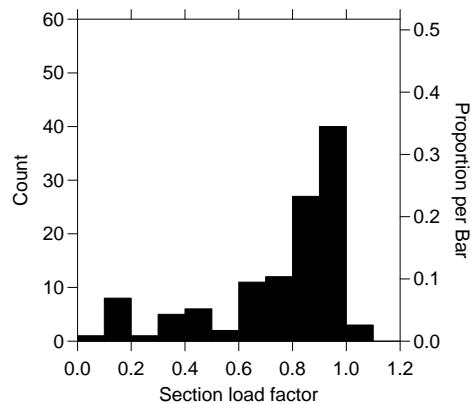


図-16 内航 RORO 貨物船の区間消席率

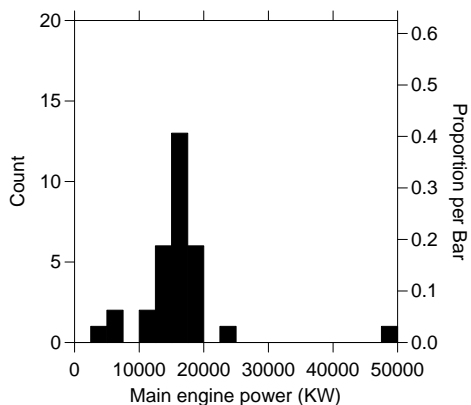


図-14 内航 RORO 貨物船の主機出力

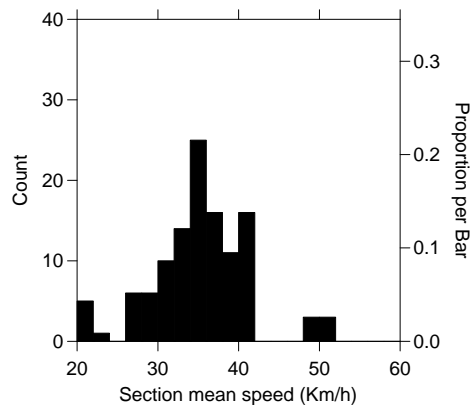


図-17 内航 RORO 貨物船の区間平均速度

消席率はほとんどが 0.6~1.0 の範囲内にある。消席率が低いのは、端末での短距離区間の運航の場合に見られる。これは、着荷と発荷の港が一致せず、船舶が陸揚港から船積港に移動するために起こる状態であると考えられる。

区間平均速度はほとんどが 26~42Km/h の範囲内にある。50Km/h 前後の極めて運航速度の高い区間や 20Km/h 強の運航速度の小さい区間も存在する。

(4) 燃料消費

長い距離を運航する船舶においては、船舶の航走にともない発生する海水の流体抵抗が、船舶が航行中に消費するエネルギーの中で最も大きなエネルギー消費要素である。そのため、船舶の燃料消費量は海水の流体抵抗に概ね比例すると考えられる。海水の流体抵抗は船舶の前面投影面積と速度の 2 乗に比例する。船舶の前面投影面積は、船舶の形状が概ね相似であれば、船舶の総重量の 2/3 乗に比例する。また、内航 RORO 貨物船は積載貨物重量が船体重量に比して大きくないため、内航 RORO 貨物船の総重量はその GT あるいは DWT に概ね比例する。それらより、1 区間（港から港まで）ごとの内航 RORO 貨物船の燃料消費量を以下のように定式した。

$$FO = k_{r1} \cdot DWT^{2/3} \cdot V^2 \tag{5a}$$

$$FO = k_{r2} \cdot GT^{2/3} \cdot V^2 \tag{5b}$$

FO は船舶の航海時の燃料消費量で A 重油と C 重油の合計 (Kg/Km), k_{r1} と k_{r2} は定数, DWT は船舶の載貨重量トン (t), GT は船舶の総トン (t), V は区間平均速度 (Km/h) である。

船舶ごとの DWT または GT, 1 ラウンドの燃料消費量, 区間距離と区間平均速度を使い, 最小自乗法で式(5)の係数を推定した。

表-10 内航 RORO 貨物船燃料消費式の係数推定結果

係数	係数值	Cor	N
k_{r1}	1.25×10^{-4}	0.68	32
k_{r2}	9.01×10^{-5}	0.78	32

注 1) Cor は燃料消費量の観測値に対する推計値の相関係数である。
 注 2) N はサンプル数である。

推定された係数の値は, k_{r1} が 1.25×10^{-4} , k_{r2} が 9.01×10^{-5} である (表-10)。その値を使って推計した燃料消費量と調査によって得た燃料消費量を比較すれば, 図-18~19 のとおりであり, それぞれの場合の相関係数は 0.68

および 0.78 である。また推定に使用したサンプルの数は 32 である。

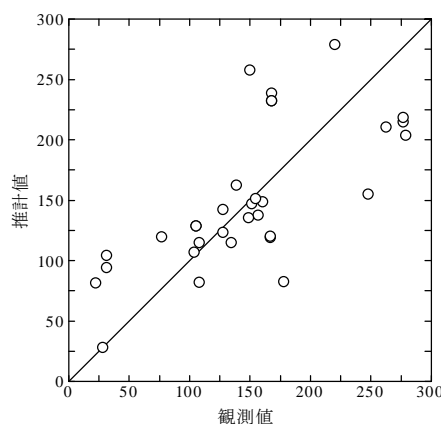


図-18 内航 RORO 貨物船の燃料消費量の観測値と推計値 (DWT を使用した場合)

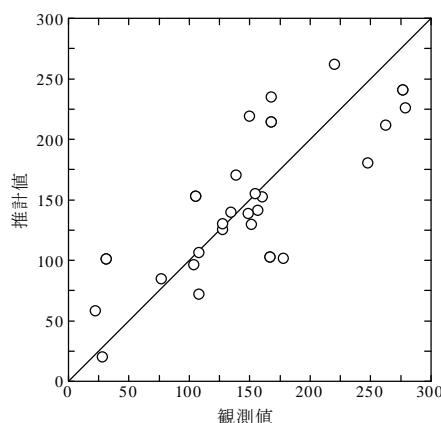


図-19 内航 RORO 貨物船の燃料消費量の観測値と推計値 (GT を使用した場合)

利用者の利便を考慮し, 船舶の大きさが 2000DWT, 3000DWT, 4000DWT, 5000DWT, 6000DWT, 7000DWT および 3000GT, 5000GT, 8000GT, 10000GT, 14000GT の場合の燃料消費量を計算し, その結果をグラフにした (図-20 および 21)。このグラフを使えば内航 RORO 貨物船の燃料消費量を直ちに把握することができる。

DWT および運航速度の平均値を式(5a)に代入して距離あたりの船舶の燃料消費量を求め, それを貨物積載量の平均値で除すことにより, t・Km あたりの燃料消費量が 0.036Kg と求められる。

内航海運輸送統計 (国土交通省, 2008) では, 貨物船の燃料消費量が 2008 年 2 月時点で 0.015l/t/Km となっている。C 重油の密度が 0.96Kg/l (石油連盟, 2008) であるから, 燃料消費量は 0.014Kg/t/Km になる。その燃料消

費量に対し内航 RORO 貨物船の燃料消費量は 2.6 倍である。

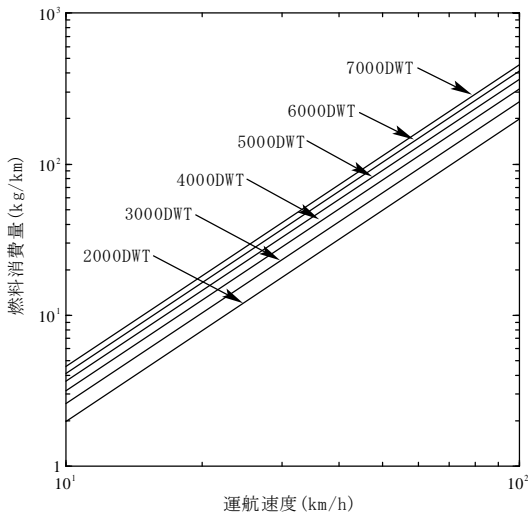


図-20 内航 RORO 貨物船の燃料消費 (DWT 別)

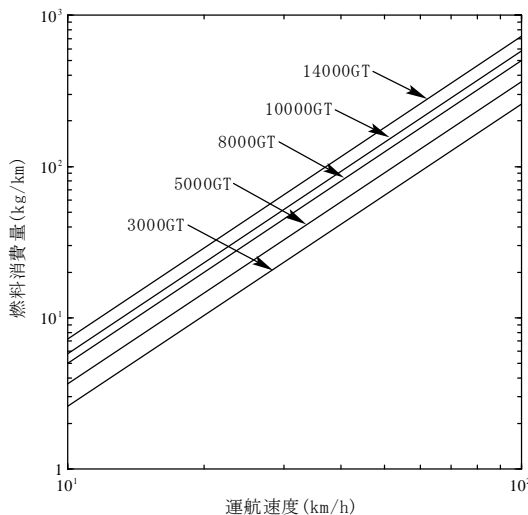


図-21 内航 RORO 貨物船の燃料消費 (GT 別)

消席率は船舶の輸送を特徴づける重要な要素の一つで、貨物輸送を分析する際に考慮する要素となることが多い。消席率の変化は船舶の総重量を変化させ燃料消費量を変化させるため、燃料消費関数の中に消席率が組み込まれることが望ましい。

内航 RORO 貨物船の貨物積載能力や貨物積載量は基本的に体積で規定される。燃料消費量を予測しようとするときには、それらに対応する重量の値が必要になるが、貨物の体積を重量に換算する作業はかなり面倒な手間であるし、そのためにさらに多くの助変数が必要になる。また、そうした手間をかけたとしても、体積と重量の関係の全体像を把握することが困難なため、推定結果にか

りの誤算偏差が含まれることになる。

そのため消席率を使って演繹的に積載重量を推計する機構を燃料消費関数に組み込むことは現実的ではない。しかし、貨物積載能力と DWT (もしくは GT)、体積基準の消席率と重量基準の消席率は概ね比例すると考えることができるため、次のような形で消席率を燃料消費関数に組み込むことは可能である。

$$FO = k_{r10} \cdot (1 + k_{r11} \cdot LF)^{2/3} \cdot DWT^{2/3} \cdot V^2 \quad (6a)$$

$$FO = k_{r20} \cdot (1 + k_{r21} \cdot LF)^{2/3} \cdot GT^{2/3} \cdot V^2 \quad (6b)$$

ここで k_{r10} , k_{r11} , k_{r20} , k_{r21} は定数, LF は体積基準の消席率である。

これらの式を使い、式(5)と同様の方法で k_{r10} , k_{r11} , k_{r20} , k_{r21} を推定した。

表-11 内航 RORO 貨物船燃料消費式の係数推定結果

係数	計数値	Cor	N
k_{r10}	8.86×10^{-5}	0.70	32
k_{r11}	0.789		
k_{r20}	7.43×10^{-5}	0.79	32
k_{r21}	0.396		

注 1) Cor は燃料消費量の観測値に対する推計値の相関係数である。
注 2) N はサンプル数である。

得られた値は、 k_{r10} が 8.86×10^{-5} , k_{r11} が 0.789, k_{r20} が 7.43×10^{-5} , k_{r21} が 0.396 である。そしてそれぞれの式を使った場合の相関係数は 0.70 および 0.79 である。また推定に使用したサンプルの数は 32 である (表-11)。

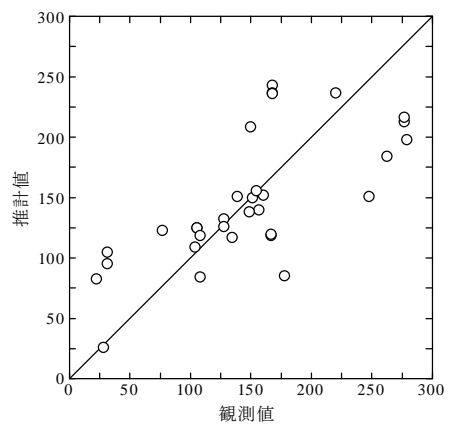


図-22 内航 RORO 貨物船の燃料消費量の観測値と推計値 (DWT, LF を使用した場合)

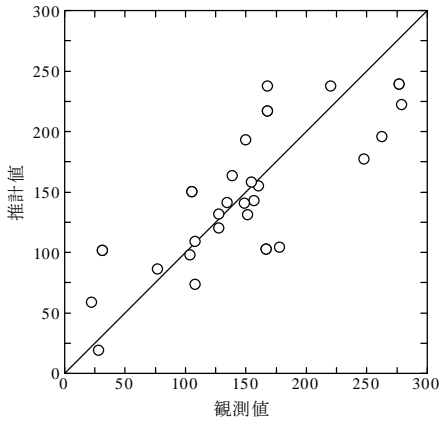


図-23 内航 RORO 貨物船の燃料消費量の観測値と推計値 (GT, LF を使用した場合)

2.3 内航コンテナ船

現在就航している内航コンテナ船の諸元データを使い、内航 RORO 貨物船の燃料消費関数をもとに内航コンテナ船の燃料消費関数を推定した。

収集することができた内航コンテナ船のデータを燃料消費関数の推定に使用した。収集したデータの項目および統計量は表-12 のとおりである。

表-12 内航コンテナ船の諸元の基本統計量

項目	GT	DW	積載能力	速度	主機出力	建造年
N	18	18	18	18	18	18
Min	498	1,224	120	12.5	2,719	1993
Max	5,818	4,150	270	20.6	18,464	2008
Mean	1,144	1,866	189	14.6	4,878	2002
SD	1,488	730	58.6	2.3	4,414	5.0

注 1) N は標本数, Min は最小, Max は最大, Mean は平均, SD は標準偏差である。

注 2) 単位は, GT, DWT が t, 積載能力が TEU, 航海速度が knot, 主機出力が KW である。

内航コンテナ船と内航 RORO 貨物船は、主機の出力あたりの燃料消費量と航海速度で航行する場合の主機の負荷率が等しいと仮定すると、航海速度で航行する場合には主機の出力あたりの燃料消費量が等しいと考えることができる。そこで、式(5a)を用いて航海速度で航行する際の内航 RORO 貨物船の燃料消費量を求め、主機出力あたりの燃料消費量を求めた (表-13)。

表-13 内航 RORO 貨物船の主機出力あたり燃料消費量

項目	主機出力あたり燃料消費量
N	32
Min	0.142
Max	0.243
Mean	0.182
SD	0.025

注 1) N は標本数, Min は最小, Max は最大, Mean は平均, SD は標準偏差である。

注 2) 単位は Kg/KWh である。

得られた主機出力あたりの燃料消費量を使って内航コンテナ船の航海速度で航行する際の燃料消費量を求め、次式を仮定して最小自乗法により燃料消費関数を推定した。

$$FO = k_{c2} \cdot (DWT + k_{c3})^{2/3} \cdot V^2 \quad (7)$$

ここで FO は船舶の航海時の燃料消費量 (Kg/Km), k_{c2} と k_{c3} は定数, DWT は船舶の載貨重量トン (t), V は平均速度 (Km/h) である。

小型の内航コンテナ船の場合、船体重量に対して貨物積載重量がかなり大きいので、満載排水量が DWT と比例すると考えると推定精度が悪くなる。そのため、満載排水量と DWT の間には DWT と比例しない一定量の部分があると考え、燃料消費量推定式にその項を組み込んだ。

推定されたパラメータの値は、 k_{c2} が 2.11×10^{-4} , k_{c3} が 557 であった (表-14)。その値を使って推計した燃料消費量と調査によって得た燃料消費量を比較すれば、図-24 のとおりであり、相関係数は 0.997 であった。なお、推定に使用したサンプルの数は 18 である。

利用者の利便を考慮し、船舶の大きさが 1000DWT, 1400DWT, 1800DWT, 2000DWT, 3000DWT, 4000DWT の場合の燃料消費量を計算し、その結果をグラフにした (図-25)。このグラフを使えば、内航コンテナ船の燃料消費量を直ちに把握することができる。

表-14 内航コンテナ船燃料消費式の係数推定結果

k_{c2}	k_{c3}	Cor	N
2.11×10^{-4}	557	0.997	18

注 1) Cor は燃料消費量の観測値に対する推計値の相関係数である。

注 2) N はサンプル数である。

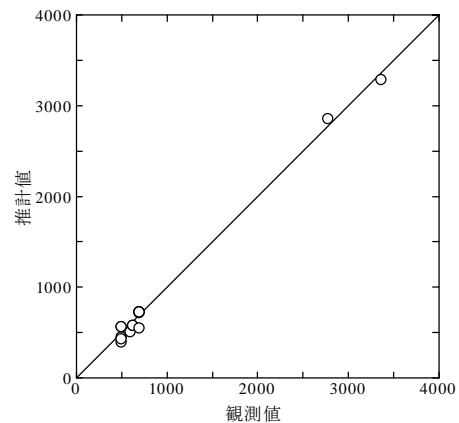


図-24 内航コンテナ船の燃料消費量の観測値と推計値

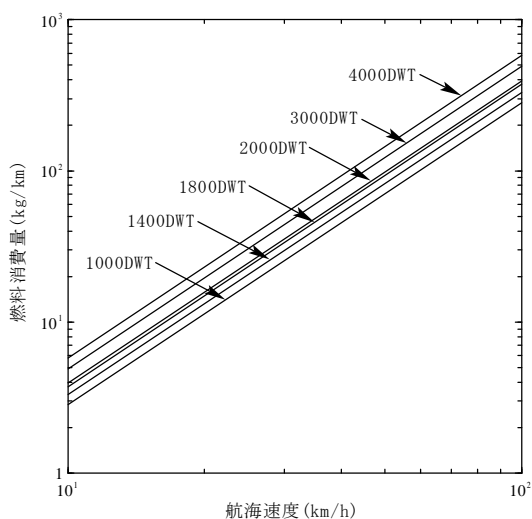


図-25 内航コンテナ船の燃料消費

DWT および運航速度の平均値を式(7)に代入して距離あたりの船舶の燃料消費量を求め、TEU ベースの消費率を 0.8, 20ft コンテナを想定し、コンテナの貨物積載重量を 8.4t, コンテナの総重量を 10.3t として t・Km あたりの燃料消費量を求めると 0.023Kg であった。それは内航 RORO 貨物船の 0.64 倍の値であり、内航コンテナ船が内航 RORO 貨物船よりもエネルギー効率が低いことを表している。

3. 燃料価格上昇による一般貨物の国内流動への影響

2004 年のイラク戦争の後、燃料油価格は急激に上昇した。主要な船舶燃料である C 重油は 2004 年に 25¥/l (輸入 CIF 価格) であったが、2008 年 8 月には 93¥/l と 3.7 倍になった。C 重油は原油価格の上昇に加え、中越沖地震等による原子力発電所の運転停止に伴う火力発電所用の燃料として需要が大きく増加し、燃料油の中でも価格上昇が大きかった。

輸送産業は燃料を多量に消費する産業であるため、燃料価格の上昇は輸送産業に大きな影響を与える。輸送産業への影響は様々な形で現れることになるが、一次的な影響としては、化石燃料価格の上昇によって輸送コストが増大し、輸送価格の上昇が起これ、輸送機関ごとの輸送量のシェアが変化するという構図を考えることができる。そうした状態の変化の傾向を見るため、一般貨物の長距離国内輸送を対象に輸送機関分担モデルを構築し、そのモデルを使って輸送機関分担の変化を予測し、その

特徴を分析した。

3.1 モデルの構成

撒荷貨物は製品価格が低くコスト負担力が小さいことと輸送ロットが大きいことから、撒荷貨物の輸送においては運賃と大ロットへの対応の可否で使用する輸送機関がほぼ決まる。そのため燃料価格の上昇が輸送機関分担に及ぼす影響はそれほど大きくない。それに対して一般貨物は運賃負担力が高く、複数の輸送機関が貨物を奪い合っているため、燃料価格の上昇が輸送機関分担等に与える影響は相対的に大きい。そのため、一般貨物の輸送について、燃料価格が上昇した場合、輸送機関の分担関係がどのように変化するかを予測し、その変化の特徴を予め把握しておくことが重要である。

一般貨物の輸送で海上輸送が比較的大きな割合を占めるのは、輸送距離が長い区間である。輸送距離が長い区間の中で流動量が大いなのは、東京都、愛知県、大阪府と北海道、福岡県間の貨物流動である(参考:表-15)。それらの区間のうち大阪府=福岡県は県庁所在地間の距離が 600Km 強と他の区間に比べると輸送距離が短い。また、北海道=東京都は輸送パターンが他の区間より複雑で、シンプルなモデルでは再現が困難である。こうした点を考慮し、本研究では北海道=愛知県、北海道=大阪府、東京都=福岡県、愛知県=福岡県をモデル分析の対象にした。

表-15 一般貨物の地域間流動

着発	北海道	東北	関東	北陸	東海	近畿	中国	四国	九州	全国
北海道		1,359	7,293	393	2,278	3,005	241	185	520	15,274
東北	1,393	48	6,117	71	4,349	2,202	472	374	1,356	16,383
関東	8,681	7,219	308	87	233	14,785	5,385	4,468	8,592	49,758
北陸	314	76	6		98	1,371	651	327	602	3,445
東海	2,583	5,490	257	226	76	110	3,719	1,209	5,755	19,426
近畿	2,338	2,520	17,017	1,439	67	231	305	26	10,900	34,841
中国	481	1,132	7,644	669	4,338	365	68	4	1,118	15,819
四国	99	488	6,892	511	1,449	73	25		1,298	10,834
九州	226	857	6,461	311	4,985	8185	822	1,013	133	22,994
全国	16,115	19,189	51,995	3,707	17,874	30,326	11,688	7,606	30,275	188,775

注) 高橋(2007)が推計した H16 年度の一般貨物の地域間流動量である。貨物流動量の単位は Kt (Mt) である。

貨物輸送における時間の価値が分布を持つと考え、輸送にかかる費用と輸送にかかる時間が与えられたとき、一般化費用が最小となるように輸送機関が選択されると考えるモデル(犠牲量モデル)を使い、輸送機関の分担の状況を再現し、予測した。使用した犠牲量モデルの式系は次式のとおりである。

$$G_i = C_i + v \cdot T_i \tag{8a}$$

$$P_j = \int_{v|G_j=\min(G_i)} \psi(v) dv \quad (8b)$$

$$\psi(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma v} \exp\left\{-\frac{(\log v - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (8c)$$

ここで、 G_i は i 輸送機関の一般化費用、 C_i は i 輸送機関の運賃、 v は時間価値、 T_i は i 輸送機関の輸送時間、 P_j は j 輸送機関の輸送割合、 ψ は時間価値の確率密度分布、 μ および σ は確率分布の母数である。

各輸送機関のサービス水準は、海上輸送は現在運航されている内航 RORO 貨物船輸送における 12m シャシで、鉄道は 10t コンテナによる輸送で、トラックは特大 12m の 1 車貸切で代表させた。

海上区間では、輸送時間を各船会社が提供している船舶運航時刻表から求め、乗降船等の港での時間を 2h/港（運輸政策研究機構，2001）とし、内航距離表（日本海運集会所，1996）による港間距離に船会社のヒアリングをもとに設定した運賃単価 11¥/t/Km を乗じて運賃を設定した。鉄道では、JR 貨物時刻表（鉄道貨物協会，2006）から輸送時間と運賃を設定した。トラック輸送は、勝原（2003）をもとに運賃を設定し、輸送時間は道路距離を一般道路 34Km/h、高速道路 75Km/h（交通工学研究会，2001）で除した値とした。端末輸送の代表距離は、県域をカバーすることを想定して 25Km と設定した。

時間価値分布は広く使われている対数正規分布とし、北海道ルートと福岡県ルートでは分布が異なるものとした。

3.2 モデルの適合性

高橋（2007）の手法により、貨物地域流動調査、内航船舶輸送実績調査等を用いて、2005 年度の北海道=愛知県、北海道=大阪府、東京都=福岡県、愛知県=福岡県間の貨物の輸送量を海上輸送、鉄道輸送、トラック輸送に分けて算定し、それらを対象に輸送機関分担モデルによる再現計算を行った。推定の条件と結果は表-16 のとおりである。観測値とモデルによる計算値の相関係数は 0.973 である。また、推定された時間価値分布関数の母数は表-17 のとおりである。

3.3 影響の分析

燃料価格の上昇は輸送産業に大きな影響をもたらすが、それは様々な形で現れる。1 次的な影響としては、化石

表-16 輸送機関分担の再現計算の条件と結果

No	区間	機関	貨物量	距離	時間	費用	シェア観測値	シェア計算値
1	北海道=愛知	船	2,911	1,326	39.9	15,149	0.908	0.904
2	北海道=愛知	鉄道	295	1,584	31.0	16,910	0.092	0.091
3	北海道=愛知	トラック	0	1,321	28.1	38,895	0.000	0.005
4	北海道=大阪	船	1,598	1,620	70.5	18,383	0.762	0.772
5	北海道=大阪	鉄道	455	1,994	38.0	19,926	0.217	0.226
6	北海道=大阪	トラック	43	1,764	35.6	51,867	0.021	0.003
7	東京=福岡	船	739	1,228	38.5	14,071	0.334	0.420
8	東京=福岡	鉄道	776	1,205	24.7	14,412	0.351	0.304
9	東京=福岡	トラック	697	1,116	15.3	27,141	0.315	0.277
10	愛知=福岡	船	2,792	798	34.2	9,341	0.651	0.540
11	愛知=福岡	鉄道	199	851	19.9	11,626	0.046	0.160
12	愛知=福岡	トラック	1,296	833	11.5	20,248	0.302	0.300

注) 単位は、貨物量が Kt (M/t)、距離が Km、時間が h、費用が¥/t である。

表-17 時間価値分布

項目	北海道	九州
平均	2.63	4.99
標準偏差	2.16	3.74

注) 単位は¥/t/h である。

燃料価格の上昇によって輸送コストが増大し、輸送価格の上昇が起こり、輸送機関ごとの輸送量のシェアが変化するという構図を考えることができる。実際には輸送に関する他の要素の影響や社会・荷主による影響などもあるため、前述のとおり形で影響が発現するとは限らない。さらには、影響が様々なところに波及し、一般均衡の状態に進んでいくため、影響はさらに別の様相に展開していく。しかし、多くの要素を組み込んだモデルを構築することは困難を伴うし、インパクト発生の直後における影響発現についての予見だけでも社会にとって有益な情報である。そのため、インパクト発生の直後における影響発現の一つのパターンとして前述した 1 次的な影響を想定し、そうした影響を対象に予測を行った。具体的には、燃料価格の上昇が起こり、その分だけ運賃が上昇するものとし、その場合に輸送機関ごとの輸送量のシェアがどれだけ変化するかを輸送機関分担モデルを使って計算した。

各輸送機関が使用する燃料油は、船舶が C 重油、トラックが軽油であるとし、鉄道は電力を使用し、その電力を得るために石炭、原油、重油、LNG を使用するとして計算を行った。

船舶の燃料消費量は、6500DWT の内航 RORO 貨物船が 2500t 貨物を積載し、平均速度 35Km/h で運航すると

想定し、式(5a)より求めた。鉄道の電力消費量は497KJ/t/Km(2004年度値、鉄道統計年報)とした。なお、鉄道の電力消費量の値は鉄道貨物輸送全体の値であるため、一般貨物輸送の場合はこれよりも大きな値となる可能性がある。トラックの燃料消費量は、車両最大総重量25tのトレーラが11tの貨物を積載し、一般道路を34Km/h、高速道路を75Km/h程度の平均速度で走行するものとし、鈴木(2004)の陸上コンテナトレーラーの燃費グラフをもとに燃料消費量を0.035l/t/Kmと設定した。

船舶が使用するC重油の価格は29¥/l(2004年内航燃料価格)とし、トラックの軽油価格は91¥/l(2004年小売価格)とした。1KWhを発電するために使用する燃料の量は2002年のエネルギーバランス表(資源エネルギー庁, 2005)の事業発電の比率に従うものとし、石炭を0.082Kg, 原油を0.009l, 重油を0.015l, LNGを0.042Kg消費するものとした。各燃料の単価はそれぞれ6¥/Kg(2004年一般炭輸入CIF価格), 26¥/l(2004年原油輸入CIF価格), 26¥/l(2004年C重油卸売価格), 30¥/Kg(2004年LNG輸入CIF価格)とした(日本エネルギー経済研究所, 2008)。(表-18~20)。

表-18 船舶の運賃上昇

DWT	速度	貨物積載量	燃料消費量	C重油密度	C重油単価
6500	35	2500	0.021	0.96	29

注) 単位は、DWTがt, 速度がKm/h, 貨物積載量がt(M/t), 燃料消費量がKg/t/Km, C重油密度がKg/l, C重油単価が¥/lである。

表-19 鉄道の運賃上昇

電力消費	燃料単価
0.14	2.4

注) 単位は、電力消費がKWh/t/Km, 燃料単価が¥/KWhである。燃料単価は、1KWhの電力を供給するために必要となる化石燃料の価格である。

表-20 トラックの運賃上昇

車両最大総重量	貨物積載量	燃料消費量	軽油単価
25	11	0.035	91

注) 単位は、車両最大総重量がt, 貨物積載量がt, 燃料消費量がl/t/Km, 軽油単価が¥/lである。

2004年時点をBaseとし、化石燃料価格が2004年時点の2倍に上昇する状態をCase1, Case1に高速道路料金を30%低減する状態がCase2, Case2の状態船舶の運賃収入(Baseの運賃×貨物量)が最大になるように船舶の運航速度を決定する状態をCase3と想定した(表-21)。Case3は、化石燃料価格の上昇分が運賃に転嫁され、運賃上昇による収入増加と化石燃料価格の上昇による支出増加が相殺されるという想定である。また船舶の運航速度は航海速度以下の値しかとることができないと想定し

た。

各Caseの条件のもとでt・Kmあたりの運賃上昇の増分と化石燃料消費を求めると表-22~23のとおりとなった。Case1~3においては船舶運賃が0.64¥/t/Km, 鉄道運賃が0.33¥/t/Km, トラック運賃が1.33~3.18¥/t/Km上昇すると見積もられている。これらの条件変化を与えたとき輸送機関ごとの貨物輸送量のシェアがどのように変化するかを、作成した輸送機関分担モデルによって計算した。

表-21 ケース設定

ケース	化石燃料価格指数	高速道路料金指数	船舶運航速度
Base	1	1	35
Case1	2	1	35
Case2	2	0.7	35
Case3	2	0.7	-

注) 化石燃料価格指数はBaseでの燃料価格を1としたときの指数である。船舶運航速度の単位はKm/hである。-は推定の結果定まる値である。

表-22 運賃上昇

機関	Case1	Case2	Case3
船舶	0.64	0.64	-
鉄道	0.33	0.33	0.33
トラック	3.18	1.33	1.33

注) 単位は¥/t/Kmである。-は推定の結果定まる値である。

表-23 化石燃料消費量

機関	Case1	Case2	Case3
船舶	0.93	0.93	-
鉄道	0.75	0.75	0.75
トラック	1.34	1.34	1.34

注) 単位はMJ/t/Kmである。-は推定の結果定まる値である。

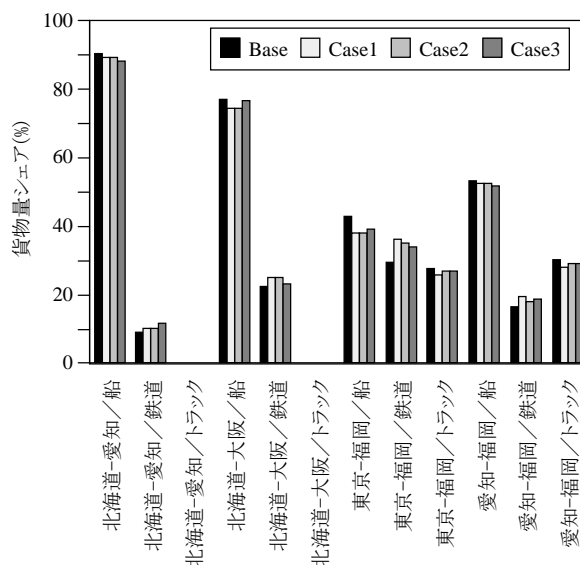


図-26 ケースごとの輸送機関の分担率

輸送機関分担モデルで輸送機関ごとの貨物量シェアを計算した結果は図-26 のとおりである。

本研究で作成した輸送機関分担モデルでは、化石燃料価格の上昇が単に生じた場合 (Case1 の場合)、本研究で対象とする全 4 区間で船舶輸送の貨物量シェアが減少し、鉄道輸送のシェアが増加する。そして、トラック輸送のシェアが存在する東京=福岡県、愛知県=福岡県間ではトラック輸送のシェアも減少する、という結果になった。

この輸送機関分担モデルで設定している各輸送機関の燃料消費構造では、化石燃料の使用が最も多いのがトラック輸送、次に多いのが船舶輸送、最も少ないのが鉄道輸送である。そのため、化石燃料価格が上昇すると、化石燃料の使用が多い輸送機関ほど輸送費用の上昇が大きくなる。そうした状況の下で犠牲性モデルの特性に従い、運賃上昇が中位にある船舶輸送も貨物量シェアを減じ、鉄道輸送がシェアを増加するという傾向が現れたと考えられる。

化石燃料価格が上昇した状態で高速道路料金が 30% 減額された場合 (Case2 の場合)、鉄道輸送の貨物量シェアが減少してトラック輸送のシェアが増加し、それによってトラック輸送のシェアの減少が小さくなる。

化石燃料価格が上昇し高速道路料金が 30% 減額された状態で、運賃を Base の水準として求めた船舶の ¥・Km の対象 4 区間の合計が最大になるように船舶の運航速度が決定される場合 (Case3 の場合)、船舶の運航速度は 32.4Km/h、船舶の運賃上昇は 0.46¥/t/Km、化石燃料消費量は 0.79MJ/t/Km となった。そのとき対象 4 区間合計の船舶の貨物量は Base に対して 3% 減少する一方で、化石燃料消費量は Base の 7.9PJ から 6.8PJ へと 14% 減少する (表-24)。また、4 区間のうち短距離の区間である北海道=愛知、愛知=福岡は船舶輸送の貨物量シェアが低下する一方で、長距離の区間である北海道=大阪、東京=福岡は貨物量シェアが増加している。

表-24 対象 4 区間の船舶貨物量と化石燃料消費量

項目	Base	Case1	Case2	Case3
船舶貨物量	7,754	7,527	7,527	7,526
化石燃料消費量	7,854	7,717	7,739	6,842

注) 単位は船舶貨物量が Kt (M/t)、化石燃料消費量が GJ である。

以上をまとめると、国内の長距離一般貨物輸送においては、化石燃料価格の上昇によって①運航費用が上昇し船舶による貨物の輸送量が若干減少する、②船会社は利益低下を抑えるため船舶の運航速度を低下させる、③これらの変化にともない貨物輸送全体における化石燃料消費は減少する、という方向に変化を起こす可能性がある

という推測が得られたといえる。

輸送機関ごとの輸送量については、今回設定した範囲の輸送環境の変化であれば目を見張るような変化は生じない可能性がある。それを前提にして考えるならば、各輸送機関における燃料価格上昇分のコストを運賃に適切に転嫁することやエネルギー効率の向上、運航速度の調整などによるコストの低減や CO2 排出の削減を模索することが、輸送における重要な課題であることが示唆されたといえよう。

そうした示唆が得られたわけではあるが、運航速度の変更は航路の距離と各港での発着時間の関係や輸送頻度の都合などでどのような運航速度にでも設定できるわけではない。輸送需要の変化に対しても各輸送機関の輸送能力がうまく対応できない場合もある。また、燃料消費に関する設定にも不確実性がかなりある。モデルはシンプルなものであり、条件が変化した場合の状態を十分定量的に表現する力を持っているとはいきれるものではない。さらに、今回考慮した以外の輸送を取り巻く条件も燃料価格の上昇と連動してあるいは無関係に変化するのが現実である。そのため、このモデルから得られた輸送機関ごとのシェアの変化は、モデルをフィッティングした状態から条件を若干変化させた場合に、どのような変化が起きる傾向があるかを知るためのシグナルでしかないと理解することが必要である。ここで得られた知見を参考とし、具体的区間を対象に現実の様々な要素を考慮して輸送の改善を検討し、より良い輸送の実現に繋げていくことが重要である。

4. まとめ

海上貨物輸送分野において GHG 削減の動きや燃料価格上昇などに適切に対応していくための施策検討を可能にするため、外航コンテナ船、内航 RORO 貨物船、内航コンテナ船の仕様と燃料消費を調べ、それらをもとに複数の変数を組み込んだ燃料消費関数を作成した。燃料消費関数を内航 RORO 貨物船と内航コンテナ船で比較すると、内航コンテナ船が内航 RORO 貨物船よりも燃料消費効率が良いことが分かった。そのことは、燃料消費量の削減、ひいては CO2 排出量の削減に向け、内航 RORO 貨物船の利点を活かすように燃料消費効率をさらに高めること、および内航コンテナ船の活用範囲を広げていくことが、重要な意味を持つことを示唆している。

燃料価格上昇等による輸送機関ごとの貨物輸送量の変化の傾向を知るため、長距離輸送区間 (北海道=愛知、北海道=大阪、東京=福岡、愛知=福岡) を対象に一般

貨物の輸送機関分担モデルを構築した。

構築したモデルに化石燃料価格上昇等のインパクトを与え、輸送機関の分担関係がどのように変化し、化石燃料消費がどのように変化するかの傾向を調べた。その結果、設定した計算条件の範囲内では、化石燃料価格上昇等のインパクトがあった場合の1次的影響として次のような変化の傾向が起こる可能性があることが分かった。

それは、①運航費用が上昇し船舶よる貨物の輸送量が若干減少する、②船会社は利益低下を抑えるため船舶の運航速度を低下させる、③これらの変化にともない貨物輸送全体における化石燃料消費は減少する、というものである。

今回設定した範囲の輸送環境の変化であれば、輸送機関ごとの輸送量に目を見張るような変化は生じない可能性があるという推測が得られた。それを前提に考えるならば、各輸送機関における燃料価格上昇分のコストを運賃に適切に転嫁することやエネルギー効率の向上、運航速度の調整などによるコストの低減やCO2排出の削減を模索することが、輸送における重要な課題であることが示唆されたといえよう。

以上のような結果を得たが、構築した輸送機関分担モデルはシンプルなモデルであり、多くの要素が捨象されている。そのため、このモデルから予測された変化は、十分に定量的な精度を持つものではなく、輸送条件を若干変化させた場合に輸送機関分担がどのように変化する傾向があるかを知るためのシグナルでしかないということを理解しておく必要がある。ここで得られた知見を参考とし、具体的な区間を対象に現実の様々な要素を考慮して輸送の改善を検討し、より良い輸送の実現に繋げていくことが重要である。

(2008年11月14日受付)

謝辞

本研究を進めるにあたり、港湾研究部主任研究官赤倉康寛氏には種々の物流関係データを提供頂いた。各船会社の方々には、内航RORO貨物船データの収集に協力を頂いた。その他、様々な方々に様々な形で協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

赤倉康寛・高橋宏直・中本隆(1998):統計解析等による対象船舶の諸元,港湾技研資料, No.910.
運輸政策研究機構(2001):長期輸送需要予測に関する調査報告書。

戒能一成(2008):総合エネルギー統計の解説 2006年度改訂版,経済産業研究所。

勝原光治郎(2003):国内物流ネットワークに関する研究,海上技術安全研究所報告, Vol.3, No.3.

交通工学研究会(2001):平成11年度道路交通センサス。

国土交通省(2004):環境負荷の小さい物流体系の構築を目指す実証実験補助制度におけるCO2排出削減量の算出方法について。

国土交通省(2007):交通関係エネルギー要覧 平成19年度版。

国土交通省(2008):内項海運輸送統計。

資源エネルギー庁長官官房総合政策課(2005):総合エネルギー統計 平成15年度版,通商産業研究社。

鈴木武(2004):ユニットロードを対象とする港湾整備に伴うエネルギー消費量とCO2排出量の推計体系の基礎的整理,国土技術政策総合研究所資料, No.192.

鈴木武(2005):コンテナクレーンの電力消費モデルの構築と電力消費原単位の推計,国土技術政策総合研究所資料, No.214.

石油連盟(2008):流出油性状変化データベース,石油連盟HP.

高橋宏直(2007):モーダルシフト化率の推計方法と動向分析,国土技術政策総合研究所資料, No.407.

鉄道貨物協会(2006):JR貨物時刻表 2006年3月。

日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット(2008):石油製品卸売価格,エネルギー・経済統計要覧 2008年度版,省エネルギーセンター。

日本エネルギー経済研究所石油情報センター(2008):世界の石油事情 原油価格動向,石油情報 2008秋。

日本海運集会所(1996):内航距離表。

平岡克英・亀山道弘・城田英之・木原洸・千田哲也・福元正明・津久見都(2000)船舶の運航に関するインベントリー分析,船舶技術研究所研究発表会講演集, No.74, pp.335-340.

平岡克英・亀山道弘(2005):LCA解析のための外航貨物船の運航状況分析と海上輸送の大気環境負荷物質の排出係数,海上技術安全研究所報告, Vol.5, No.3.

八島弘倫・松本亨・井村秀文(1997):国際物流にともなうエネルギー消費量及びCO2排出量の評価,環境システム研究, Vol.25, 土木学会, pp.303~309.

International Energy Agency (IEA) (2008): World Energy Outlook 2008.

国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 494 January 2009

編集・発行 = 国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019