犠牲量モデルを用いた国内フェリー・RORO航路需要のネットワーク解析手法に関する研究

正員 久保 登^{*}
菅 直往^{**}
李 永雨^{****}

正員 勝原光治郎^{*}
正員 金 相賢^{***}

Analysis of Demands of Ferry or RORO-ship Lines by Sacrifice and Networking Model

by Noboru Kubo, *Member* Mitujirou Katuhara, *Member*
Naoyuki Suga Sang-Hyun Kim, *Member*
Youngwoo Lee

Summary

We show a new method which can simulate the quantities of the domestic unit-load freight in Japan by trains, trucks and ships. The method is working with "sacrifice model" and "Dijkstra method". We found that the method showed a sensible simulation for the actual domestic freight flow and it could be useful to estimate a proper plan for a future car ferry route etc.

1. はじめに

1.1 研究の背景

近年、国内物流では、荷役の作業性、輸送の効率性などから、荷物を特定形状の外函（トラック、トレーラシャーシ、コンテナ、パレットなど）に納めた「ユニットロード貨物」の比率が高まってきている。平成7年度物流センサス（全国貨物純流動調査）¹⁾によれば、国内ユニットロード物流はトンベースで全体の83%を占めている。ユニットロード貨物は、荷物内容にかかわらず荷物形状が一定であるので、輸送機関を特定の交通モードに限定する必要性が小さく、在来の輸送経路にとらわれない新しい物流経路が生み出されるきっかけとなった。また、1980年ごろから盛んになってきた小口宅配貨物

（宅配便など）²⁾の、集配拠点間輸送なども、それ以前には存在しなかった新規物流需要といえる。

このような物流需要のうち、長距離経路のものを航路に分担させれば、エネルギー資源の有効利用や、二酸化炭素排出などの環境負荷軽減、道路渋滞の軽減などが相当程度期待できる³⁾。上述のような物流の新経路や新規物流需要は、末端に近い陸上路では、トラックやセミトレーラーが用いられることが多い。そこで、これらの物流を分担する航路をカーフェリーやRORO船（車両航送貨物船）とすれば、煩雑な積み替えなどを省いた陸海陸一貫輸送がおこなえる。

トンキロベースで長距離（300km以上）ユニットロード物流は全ユニットロード物流の約53%、長距離ユニットロードフェリー物流は約9%、長距離ユニットロードRORO物流は約1.4%、長距離ユニットロードコンテナ物流は約0.7%、長距離ユニットロード鉄道コンテナ物流は約5.3%となっている。長距離フェリー・RORO航路が国内物流に占める役割は少なくない。

1.2 研究の目的

航路によって国内物流を分担する場合、その航路を事業として存続してゆくためには、既存の航路であっても新規航路であっても、それらの効率や採算を適切に評価

* 独立行政法人 海上技術安全研究所

** (株) 日通総合研究所

*** 海洋システム安全研究所(韓国)

(研究当時 船舶技術研究所)

**** (株) パパビーン (韓国)

(研究当時 運輸施設整備事業団)

原稿受理 平成14年1月10日

春季講演会において講演 平成14年5月15, 16日

し、見積もることが重要である。本研究では、このような効率・採算などを評価するための基礎量となる、物流経路ごとの物流量を、所与の設定条件に従って計算し、求める手法の開発を目的とする。

本手法を用いれば、設定した任意の国内物流経路の物流量を推定することができ、既存・新規の国内航路の効率や採算性を評価することができるようになる。また、当然、陸上物流経路の評価にも役立てることができる。

1.3 従来の研究と比べた本研究の特色

従来のフェリー航路の需要予測にはヒヤリングや推定（経済成長率、機関分担率、貨物量）によるもの⁹⁾、ロジットモデルによる機関分担率計算式などの例⁹⁾があるが、いずれも、ネットワークを作成していないので、航路の競合関係を表現できず、また運賃や速度などの航路条件を考慮した評価もなかった。

また、交通量の経路交通量配分モデルとして、転換率、ロジットモデル、犠牲量モデル、キルヒホッフモデル、重力モデル、エントロピーモデルなどがあり、機関分担率の計算にこれらのモデルを使用した例も多い。しかし、いずれの手法にも一長一短があり優劣を付けがたく、データの収束は旅客と物流では異なっている。

本研究は、ネットワークの経路選択モデルとして拡張犠牲量モデルを採用した。このモデルは、コストと所要時間の2つから犠牲量を決定する通常の犠牲量モデルに、フェリー航路を含む経路の端末距離（荷物の発地・着地から、フェリーの発港・着港までの陸路）も加えたものである。本研究は、このモデルを用いて航路条件によって需要量の変化する日本列島規模の大きな系を構築した点が特色である。

2. 物流需要量の予測方法

2.1 物流経路ネットワーク

国内ユニットロード物流を精確に記述するために、精緻なネットワークを作る必要がある。そこで本研究では、道路（高速道路・一般道など）・航路・鉄道を、ノードとパスから構成される経路ネットワークに組み込んだ。全国貨物の発着地（OD地点）を1都道府県に1点ずつ設定した（北海道のみ4点）。このOD地点を含め道路の結節点や港湾など346点をノードとし、実際の交通路に従ってそれらを結び、パスとした。鉄道のパスはJR貨物を想定し、OD地点間を直接結んだ。航路のパスは長距離フェリー・RORO航路としたが、このほかに中・短距離でも輸送量の多い航路もパスとして採用した。パスの属性は距離・種類・料金・所要時間・両端ノード番号である。パス数は約500である（Fig.1）。

2.2 犠牲量モデル

物流需要量の予測をするには、ある荷物が、その荷物の起点から終点まで、どのような経路をたどるかを計算機に求めさせればよい。荷物が何種類かの経路を選択できる場合、それぞれの経路に何らかの評価量を定めておけば、計算機によって最もよい評価量を示す経路を選ぶことができる。

現実に国内ユニットロード物流を担うのは、運送業者・荷主自営、船社、JR貨物などの運輸事業者であるが、荷主から運送委託を受ける運送業者の営業トラックが最も多い。この場合、この営業トラックが航路や鉄道を選択する場合が多く、これらのトラックの運行管理者が輸送経路選択の決定権をもっていることになる。運行管理者は貨物の運送料金（収入）の多寡を考慮する以前に、

Fig.1 The network of nodes and paths (road and ferry: left, JR lines: right)

コストや所要時間などの運送に伴う負担を最小にする選択を第一に行うと考えられる。

本研究では、このような負担を運送事業者の「犠牲量」としてとらえ、1.3で触れたように、拡張犠牲量モデルを用いることにした。犠牲量は、運送業者に対しては運送コスト（航路運賃含む）、所要時間、航路に対しては航路以外の端末陸上距離の長さなどである。以下に本研究で扱う犠牲量の定義を示す。

1バスの犠牲量（円） $G_p = C + T \cdot w$

1経路の犠牲量（円） $\Sigma G_p + a \cdot L$

（ただし、C：コスト、T：所要時間、w：時間価値、a：端末距離係数、L：端末距離）

この定義によれば、ある1つの経路全体の犠牲量はそれを構成する各バスごとの犠牲量の和となる。

コストは高速道路料金⁷⁾、フェリー・RORO船運賃⁸⁾、鉄道運賃⁹⁾、トラック燃料費・保守費、運転手人件費、固定費、フェリーは無人航走とし端末はトラック運転の引き返さないし迎えの費用、陸路8時間以上の運転手は2人乗務の経費などである。具体的コスト数値はTable 1のように設定した。

Table 1 Calculation constants of cost

1) 道路
車種：特大(12m)
高速道路料金：67.75円/km+ターミナルチャージ300円
有料道路・高速道路特定区間：規定額
燃料費+補修費：23円/km
人件費：3300円/h (8時間以上は2人乗務・除無人航送)
固定費：350円/h
2) フェリー
フェリー料金：規定額 (無人航送の場合は運転手帰路を考慮して燃料費+修繕費、人件費、固定費を加算)
3) 鉄道
運賃：規定額
通送料金：発送料+到着料(10トン、10km)
20000円 (5トンコンテナ1個をトラック1台に換算)

所要時間は道路時刻表⁹⁾に記載のない場合はトラック所定速度走行を仮定し、航路ではダイヤおよび荷役時間を設定した。

端末距離Lと端末距離定数aは、航路選択の際の港から離れたODの場合の選択にくさを補正する項である。

時間価値wは、所要時間1時間をコストに換算すると何円相当かという価値判断で、詳細は次節で説明する。

時間価値w(円/hr)によって、ある荷物経路の犠牲量も変化するから、時間価値が変化することによって、同一起終点荷物の最小犠牲量経路が複数通り存在しうる。最小犠牲量の経路がその時間価値範囲での貨物を受け持つと考え、時間価値の社会的分布量を知れば、経路の貨物配分率を決めることができる(Fig. 2)。

各バスの犠牲量をネットワークのバスの重みと考えれば、ある荷物の最小犠牲量経路の発見は、設定したネットワークについての「重みつき最短経路探索」に帰着する。本研究では、この探索手法として、よく知られている「ダイクストラ法(Dijkstra method)」を用いた。

2.3 時間価値分布関数

平成7年度物流センサスデータを用いて、貨物の経路選択データから時間価値分布関数を求める。一般に、時間価値分布関数は(1)式のような対数正規分布に従うと言われている。これは時間価値の社会的広がりを示すので、これを用いればネットワークの条件が変わったときでも貨物の経路配分が求められる。また、計算精度を上げるため品類ごとに時間価値分布を求めた。品類およびODごとに経路の貨物配分率を求め、その経路が変化するとき（経路に含まれるバスの種類が変わるとき）の時間価値wから(2)式のような分布関数の累積関数を求めれば、Fig.2に示すように、経路ごとの輸送分担率が分かる。

$$p(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma w} \exp\left(-\frac{(\log w - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

$$P(w) = \int p(w)dw \quad (2)$$

Fig.2 Finding a route sharing ratio

ある荷物を通る輸送経路を、複数の経路のうちの最小犠牲量経路とすると、時間価値の大小で犠牲量G(w)が変化する。輸送経路が変化する（図の上半の、犠牲量Gの直線の傾きが変化した部分）。このとき、時間価値分布関数p(w)の、それぞれの経路に対応する累積値（図下半）を求めれば、経路の輸送分担率が求められる。

品類ごとの分布形はTable 2の通りである。なお、林産品・鉱産品・特殊品はデータ数が十分になく長距離ユニットロード輸送量も少ないので省略した。

得られた時間価値累積分布関数とデータの一致度の例をFig.3に示す。

Table 2 Terms of the time value distribution function

	平均	分散	相関係数	サンプル数	平均時間価値 (円/10トン・時)
	μ	σ	r	n	$\exp(\mu)$
農水産品	8.593	3.325	0.674	35	5.393
金属機械工業品	8.901	3.202	0.736	40	7.336
化学工業品	8.648	2.784	0.814	55	5.700
軽工業品	7.376	3.364	0.704	78	1.597
雑工業品	7.135	7.111	0.455	17	1.255

Fig.3 Data and cumulative distribution curve of the time value

2.4 プログラム概要

作成したプログラムの大まかなフローチャートをFig.4に示す。

入力ファイルは、ユニットロード8品類別輸送量OD表、鉄道コンテナ運賃OD表、同所要時間OD表、ネットワークパス情報表、フェリー航路運賃表、有料道路運賃表などである。出力ファイルは、品類・OD別のパス輸送量となる。なお、OD表(輸送量)は前述の平成7年度物流センサスデータから作成した。

プログラムでは、品目別、OD別、上下別に計算を進めるが、まず時間価値を与え、パスの犠牲量を求め、犠牲量最小の経路を探す、これに時間価値分布関数から経路への配分率を求め、各パスに物流量を貼り付ける。この物流量を合計するとパスに通る物流量が分かる。このパスを航路に採れば航路の需要を求められる。

Fig.4 Flow chart of the program

3. シミュレーション結果

3.1 国内長距離フェリー航路の検証

3.1.1 航路修正係数 f の導入

国内長距離フェリー航路(航路長300km以上)について、単純に、2節の犠牲量定義式通りで需要予測計算を行ったところ、各フェリー航路の輸送量計算値は実績値とは大きな隔たりがあった。これは、各航路固有の諸条件(端末コスト、航送形態、荷役時間、便数、平均待ち時間、運賃割引など)を、プログラム上では一律に設定しているためと考えられる。そこで、フェリー航路のパスに限って、以下のような修正項を付加した犠牲量を用いることにした。

$$1 \text{ パスの犠牲量 (円)} G_p = C + T \cdot w + f \cdot C_f$$

(f: 航路修正係数、Cf: 航路運賃)

f・Cfの項は、見かけ上はフェリー運賃の割引・割増を表しているが、実際にはフェリー航路を通る輸送経路の犠牲量全体を調整する役目を果たしている。

3.1.2 航路修正係数 f の調整とそれによる計算結果

航路運賃係数 f (以下 f 値) を調整することで、輸送量計算値を実績値に近づけることができる(Table 3)。この計算結果は、平成7年度物流センサスの状況を再現していると考えられる。そこで、既存フェリー航路については、以後この状態のプログラムを用い、所要時間や運

Table 3 Actual and calculated cargo demand with f value

f値を用いた国内フェリー航路の計算輸送量と実績値を示す。値は上り下り合計値で単位はトン／3日。表中、☆※●の同じ記号同士の航路は互いに競合関係にある。3.1.3参照。

地域名・航路名・競合	計算値	実績値	f値
北日本(太平洋)			
苫小牧ー大洗☆1	9531	8522	-0.41
苫小牧ー東京☆2	27758	22806	-0.61
室蘭ー大洗☆3	6903	4183	-0.50
苫小牧ー仙台☆4	4020	3985	-0.45
室蘭ー八戸☆5	7993	6513	-0.75
苫小牧ー八戸☆6	3350	6088	-0.49
名古屋ー仙台	3061	2390	-0.26
名古屋ー苫小牧	3970	3311	-0.40
釧路ー東京	6284	3477	-0.24

北日本(日本海)	計算値	実績値	f値
新潟ー小樽	4889	2998	0.15
舞鶴ー小樽	11313	9744	0.15
岩内ー直江津※1	2237	547	0.31
直江津ー室蘭※2	1404	676	0.42

瀬戸内	計算値	実績値	f値
神戸ー高松	28524	22480	-0.08
大分ー松山	1869	655	1.50
松山ー神戸	8191	6226	-0.04
大分ー神戸	7251	4049	0.31
宮崎ー大阪	2403	1496	0.32
新門司ー大阪南港●1	8437	12779	0.02
新門司ー堺泉北●2	11361	9224	0.13
新門司ー神戸●3	7960	3337	0.14

西日本(太平洋)	計算値	実績値	f値
川崎ー宮崎	2393	923	-0.10
東京ー高知	34	140	-0.09
新門司ー徳島	1031	84	0.05
徳島ー東京	778	530	0.51
新門司ー東京	6018	4390	0.14
甲浦ー大阪	104	126	-0.32
細島ー川崎	1003	569	0.14

Fig.5 Competitive ferry route

発地・着地がそれぞれ近接している航路は、f値(航路運賃係数)のわずかな変化に対しても、需要予測量が大きく変動した。上図の3航路は、この変動の極端な例だが、これはモデルの特性から生じる現象と考えられ、必ずしも実際の競合を表すものではない。(上図の横軸は3航路に与えられたf値の組み合わせを表す。たとえば、グラフ左端の(-0.3,-0.4,-0.4)は、新門司・神戸が3割引、北九州・大阪が4割引、新門司・堺泉北が4割引、を意味する)

賃などの入力パラメータを変更することで、種々の輸送需要量予測を行うことにする。新規航路の需要予測については実績値が存在しないため、この方法ではf値が決定できないが、これについては3.2で説明する。

3.1.3 競業航路における需要量変化

前項のf値に関して、特徴的な現象が見いだされた。Table 3の表中、☆1、※2などと記したフェリー航路の組は、それぞれの組の中で近接した発港・着港を持っていて、航路全体が互いに競合している。このような競業航路の組については、計算機上でも、f値の変更で、大量の荷物が一つの航路から他の航路へ移る、という現象が見られ、発港・着港同士が接近している航路ほど顕著であった(Fig.5)。大量貨物のODを共有し、航路条件が似た航路では、現実にも競合関係が生ずるので、本研究のネットワークモデルでこれが示せたものと考えられる。しかし、極端な需要量変化は、犠牲量モデルの特性上生じたものとも考えられ、必ずしも現実の航路競合の状況を再現しているのではないことに注意を要する。

3.2 既存航路の需要予測

3.1.2で触れたように、本プログラムでは、既存フェリー航路の設定値を変化させて平成7年度物流センサス時点での状況下での需要量の変化予測を行うことができる。そこで、一例として、東京ー苫小牧航路の運賃と所要時間を各々3通りずつ設定して、需要量の変化を計算させた。設定した運賃、所要時間は以下の通りである。

(運賃) 140,320円、175,400円、210,480円

(所要時間) 21時間、29時間、33時間

運賃は12m車のもの、所要時間は片道である。両方とも、2番目の値が実際値である。

計算結果をFig.6に示す。計算結果からは、所要時間の短縮化よりも、運賃の割引が必要増につながる事が分かる。

Fig.6 Estimate for cargo demand of an actual ferry route (Tokyo - Tomakomai)

3.3 新規航路の需要予測

前節と同様に、今度は、ネットワークに新規航路のパスを追加して、需要量予測を行った。設定した新規航路は、直江津－博多航路と東京－大分航路の2種類である。

3.1.2で触れたように、新規航路では実績値を参考に f 値を決定することができない。既存航路の輸送実績値を参考に求めた f 値は、Table 3に示されるようにかなりのばらつきがあり、各航路の種々のパラメータ（航路長や便数など）ともほとんど無関係であった。しかし、各既存航路について f 値と輸送実績との関係を見ると、

Fig.7 Actual cargo demand vs f value

+1.5から-0.75までばらついている f 値について、輸送実績値との関係を見た。図中の点が、本文で述べた4つの地域ごとにまとまっていることが分かる。ある新規航路の f 値は、その航路が属している地域の f 値の平均を用いることにした。なお、図中の直江津－博多航路については3.3.1参照。

Fig. 7のように、航路の通る地域によって4つの航路群すなわち、北日本（太平洋）航路群、北日本（日本海）航路群、瀬戸内航路群、西日本（太平洋）航路群、を形成していることが分かった。

Fig. 7も、 f 値と輸送実績との関係を示したものであるから、輸送実績のない新規航路には直ちに適用はできない。そこで、今回は直江津－博多航路を北日本（日本海）航路群、東京－大分航路を西日本（太平洋）航路群と考え、Fig. 7上でのそれぞれの航路群の f 値の平均を両者の f 値とした。

3.3.1 直江津－博多航路

この航路は、平成7年純流動調査の行われたときは未開業で、その後の平成8年4月に実際に開業した航路である。そのため、本予測結果と現実の需要量を実際に比較することができる。フェリー航路の設定値は全て実際値に準じた（運賃12m車106210円、所要時間20.5時間）。

計算結果と実際値との比較および、他のフェリー航路への影響を示したグラフをFig.8に示す。

前項で述べたように、この航路の f 値を北日本（日本海）航路群の平均値:0.27として計算すると、需要予測結果は4638トン／3日となった。この航路の平成8年～11年の平均輸送実績は上下合計約2400トン／3日であり、需要予測結果の約半分である。

なお、この計算において、試みに f 値をわずかずつ変化させて需要予測を行ったところ、それらの関係を示すグラフ上の点は、Fig. 7に示すように北日本（日本海）航路群付近に位置した。

Fig.8 Estimation for cargo demand of a future ferry route (Naoetsu-Hakata) and actual routes

（直江津－博多航路の開業による新規需要は約4600トン／3日と計算された。また、この航路の開業は、他の既存航路の需要予測にはほとんど影響していないことが分かる。図中の☆●は、競合航路を示す（3.1.3参照））

3.3.2 東京一大分航路

この航路は本研究のために仮想的に設定した航路である。運賃と所要時間の設定は以下の通りとした。f 値は西日本（太平洋）航路群の平均:0.053である。

（運賃）10万円、13万円、16万円

（所要時間）20時間、24.9時間、30時間

計算結果をFig.9に、他のフェリー航路への影響を示したグラフをFig.10に示す。

この航路の新規需要量が最大になるのは、運賃が最低で所要時間が最小の設定となり、それ以外では運賃が安い方が需要が多くなることが分かる。また、他航路への影響では、所要時間最小、運賃最小の場合に、この航路と競合する新門司－東京航路と川崎－宮崎航路の需要がほぼ全量失われていることが分かる。また、東京一大分航路に集まった新規需要量が、他航路全ての需要量減の

Fig.9 Estimation for cargo demand of an imaginary ferry route (Tokyo-Oita)

合計よりも大きいので、それまで鉄道・道路の陸上経路を通過していた需要が航路に移った「モーダルシフト」を再現しているものと考えられる。

4. おわりに

4.1 まとめ

本研究で開発した手法によって、平成7年度物流センサス時点の国内長距離フェリー航路需要を再現できた。また、種々の設定を変更した国内物流需要量の予測がおおむね妥当に行え、さらに、モーダルシフトなどの需要量変化も計算機上で再現することができた。

4.2 今後の課題と展望

現状では本手法にはフェリー各航路の便数や平均待ち時間などの要素が取り入れられていない。これらの時間的概念を盛り込むことで、さらに実態に即した需要予測が行えるものと期待できる。

また、本手法で得られる物流需要量予測は、国内フェリー航路をはじめとする、国内輸送機関の事業計画、採算見積もりなどに直接応用できるので、今後、これらの輸送機関に対して事業計画の策定を支援するような計算機手法を開発してゆく予定である。

目下のところは、国内フェリーの船隊・船型・採算計算を自動的に行うシステムの開発に着手している。

Fig.10 Changes of cargo demands of actual ferry routes with an imaginary route (Tokyo-Oita)

（東京一大分航路の大量の新規予測需要の影響を受けて、新門司－東京航路や川崎－宮崎航路の需要予測量が大幅に減少している。また、他航路の需要減の合計よりも、東京一大分航路の新規需要量が大きいのは、陸上需要が航路に移ったモーダルシフトを表していると考えられる。図中の☆●は、競合航路を示す（3.1.3参照））

謝 辞

本研究は、運輸施設整備事業団の基礎研究制度による助成、(社)日本造船研究協会SR501、運輸施設整備事業団研究会、科振費重点基礎の助成を受けた。ここに謝意を示す。

また、九越フェリー(株)からは、直江津-博多航路の実績輸送量の提供を受けた。東京大学大学院・大和裕幸教授からご指導を頂いた。あわせて感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 運輸省・建設省編、第6回物流センサス(平成7年全国貨物純流動調査、平成9年9月)
- 2) 「運輸経済統計要覧」平成7年度、運輸省運輸政策局情報管理部編
- 3) 運輸省運輸政策局『21世紀に向けた環境・エネルギーと運輸1997』大蔵省印刷局、1997年
- 4) カーフェリーに関する研究、運輸経済研究資料440115 昭和45年3月 (財)運輸経済研究センター
- 5) 運輸省海上交通局、新たな需要構造に対応した長・中距離フェリーネットワーク整備のあり方に関する調査報告書、平成5年
- 6) '97JR貨物時刻表、日本貨物鉄道株式会社
- 7) 「年報-平成6年-事業と道路統計」日本道路公団
- 8) 「全国フェリー・旅客船ガイド」1997上期号、日刊海事通信社
- 9) 「道路時刻表」1997、道路整備促進期成同盟会全国協議会発行
- 10) 勝原光治郎、フェリー航路の国内物流ネットワーク分析、海運経済研究第32号、日本海運経済学会、1998年10月