

海上フィーダー輸送を考慮した外貿コンテナ貨物の需要予測モデル

稲村 肇¹・中村匡宏²・具 滋永³

¹正会員 工博 東北大学教授 情報科学研究科 (〒980 仙台市青葉区青葉)
²正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ 東北支社 (〒980 仙台市若林区新寺1-4-5)
³学生会員 工修 東北大学大学院 情報科学研究科 (〒980 仙台市青葉区青葉)

コンテナ本船の寄港地はかなり限定されており、コンテナを本船寄港港まで陸上輸送するか、荷主の近くの港湾にコンテナを集めそこから内航船で本船寄港港まで輸送する。本研究では、外貿コンテナ貨物の国内流動におけるフィーダー輸送のモデル化を行い、それをを用いて需要予測を行う。本船寄港港までの輸送コストはロットサイズの関数、また在庫コストは貨物価格の関数で表され、ロットサイズと貨物価格により輸送手段、コンテナ詰め地、本船積み港湾が決定される。また各港湾でのコンテナ本船、内航船の寄港頻度と貨物需要量の関係を検討する。分析はフィーダー実績の多い関西で、需要予測は仙台港を中心に行った。

Key Words : feeder container transport, demand forecasting, commodity price and lot size

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

現在コンテナ貨物の需要は輸出入共に増加しており、地方港湾においても国内・国際フィーダー、国際本船航路の導入をめざし、コンテナ埠頭の整備を急速に進めている。東北においても、仙台、小名浜、常陸那珂、八戸等の地方港湾においてもその整備計画は目白押しである。コンテナ貨物需要の予測においては、輸送費が陸上輸送を含む国内輸送費と国際輸送費が一体として科されるため、コンテナ本船に積み込む前あるいは積み下ろし後の貨物流動を考慮する必要がある。

輸出貨物の本船に積み込みまでの輸送(図-1)、輸入貨物の本船から積み下ろし後の輸送をフィーダー輸送という。現在のフィーダー輸送はトラックが中心となっているが、それを海上輸送等にシフトする動きが高まりつつある。

貨物の輸送方法は荷主、船会社の経済的合理性により決定される。例えば、新規のコンテナ港湾が供用されたとき、本船が直接寄港する航路もあれば(仙台港:北米輸入)、本船が寄港せず、大港湾への海上輸送(苫小牧港:東京海上フィーダー輸送)ルートができる航路もある。本研究ではコンテナ貨物国内フィーダー輸送に着目して港湾の貨物需要推計を行い、同時にコンテナ本船の寄港地の配置を行うことにより最適な輸送ネットワークを計画することを目的としている。

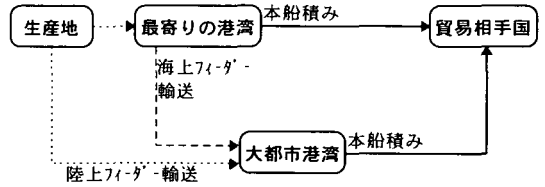


図-1 フィーダー輸送のしくみ

表-1 研究対象の比較

	Friez	木村	黒田	渡辺	三木	本研究
フィーダーを考慮 (詰め地の選択) (輸送頻度選択)		○		○		○
輸送業者の行動 (本船の積込) (内航船の積込)	○	○	○		○	○
荷主の行動 (港湾の選択)	○	○	○			○

(2) 本研究の特徴

貨物の需要予測は一般に荷主と輸送業者の関係をモデル化して行う。従来研究の比較を表-1に示す。Friez¹⁾は個々の荷主が貨物のCIF価格を最小化するような輸送経路を各々に決定し、輸送業者が輸送ネットワーク全体の総輸送コストが最小となると仮定して貨物需要を推計するモデルを提案している。しかしCIF価格は港湾費用や国内運賃を含まず、荷主の行動を表現しているとは言えない。船の運行パターンを決定する方法は、船会社の運行利益最大化問題として考えられる。三木ら²⁾は一定期間のコンテナ輸送個数最大化を目的とし、また木村³⁾,

黒田ら⁴⁾は船会社の利益最大化を目的とし各港湾へのコンテナ本船の配船を計画している。更に、木村³⁾、黒田ら⁴⁾は荷主の国内陸上流通費用最小化を目的関数としコンテナ貨物の輸送経路選択を行い、船会社の運行利益最大化を目的関数としコンテナ本船の配置を検討している。

しかし国内のフィーダー輸送では陸上輸送と海上輸送が競合しており、海上フィーダー輸送のネットワークは本船の運行パターンにより変動する。上記の研究では地方港湾の国内海上フィーダー拠点としての発展を見たとき、それを取り入れてない点が大きな問題点であり、また国内フィーダーの輸送機関選択は一回の輸送量（ロットサイズ）と運賃負担力（商品価格）に大きく影響されることが広く知られている⁸⁾がそれが考慮されていない。

以上により、本研究の特徴は次の2点に集約される。

- 1) 海上フィーダー輸送ネットワークの計画（内航船の配船）を取り入れてフィーダー輸送経路の決定を行うことにより、各港湾におけるコンテナ本船と内航船の貨物需要を推計する。
- 2) フィーダー輸送の経路選択（輸送機関選択）の決定過程に、貨物のロットサイズ及び価格を導入している。

2. 国内フィーダー輸送の現状分析

(1) 分析方法

コンテナ貨物の国内フィーダー輸送は地域ごとに特徴があり、その輸送方法は貨物の量（ロットサイズ）や単位重量当り価格等の貨物の特性により決定される。そこで平成5年度コンテナ貨物流動調査を用いて、その影響を分析する。

a) ロットサイズによる輸送手段選択

ロットサイズを3段階（0～10t, 10～100t, 100t～）に分け、貨物のロットサイズによるフィーダー輸送手段選択の違いを示す。本船荷揚げ～消費地（生産地～本船積み込み）までのコンテナ貨物の輸送手段を次の3種類とし、その分担率を調べる。輸入と輸出の挙動はそれぞれ順序が逆転するだけで基本的に同様であるため、以下の説明は簡略化のため、必要のない限り輸入に限定して説明を行う。

- 1) 普通トラック：本船寄港地周辺でコンテナ取出す。本船寄港地～消費地の輸送は普通トラック
- 2) コンテナトレーラー：消費地周辺でコンテナ取出す。本船寄港地～消費地はトラックによりコンテナを輸送
- 3) 内航船：内航船によりコンテナを輸送する。内航船の寄港地～消費地はトラック輸送

b) 単価による輸送手段選択

貨物の単価を3段階（0～5万円/t, 5～50万円/t, 50万円/t～）に分けることにより、貨物の価格による輸送手段選択の違いを示す。

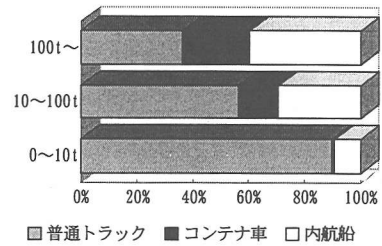


図-2 福岡～阪神港のロットサイズ別輸送機関分担 (輸出)

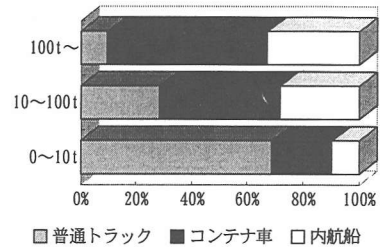


図-3 福岡～阪神港のロットサイズ別輸送機関分担 (輸入)

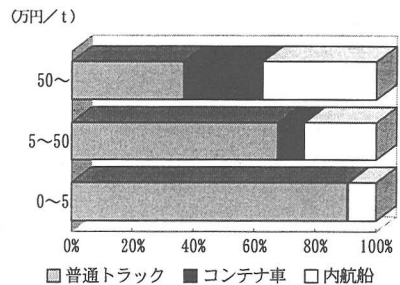


図-4 福岡～阪神港の単価別輸送機関分担 (輸出)

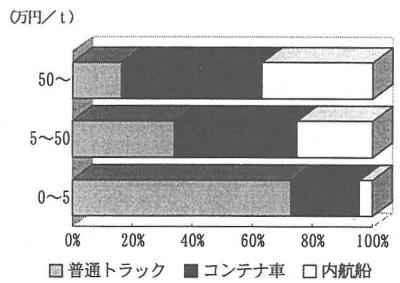


図-5 福岡～阪神港の単価別輸送機関分担 (輸入)

(2) 分析結果

a) ロットサイズによる輸送手段選択

生産・消費地が福岡で阪神港で本船積み・揚げされる輸出・輸入コンテナ貨物のロットサイズ別フィーダー輸送機関選択結果（件数比）を図-2、図-3に示す。輸入貨物は消費地周辺でコンテナ取出しする貨物が多いのに対し、輸出貨物は本船積み込港周辺でコンテナ詰めされる貨物が多いことから、輸出では普通トラックの分担率が大きいのに対し、輸入ではコンテナトレーラーの分担率が

大きいことが分かる。また、トレーラーはロットサイズが小さいとき分担率は低く、ロットサイズの増大につれて分担率が上がっている。コンテナ貨物は荷主1人で1個以上のコンテナとなるFCL貨物と、小口貨物でコンテナ1個に満たないLCL貨物に分けられる。ロットサイズの小さいLCL貨物は本船の寄港する港湾周辺でコンテナ詰めされる場合が多い。ロットサイズ増大につれて生産地でコンテナ詰めする貨物が多くなること分かる。内航船の分担率はロットサイズが小さい貨物では低いが、ロットサイズが大きい貨物では高い。ロットサイズ増大につれて内航船を利用する貨物が増加することが分かる。

b) 単価による輸送手段選択

輸出コンテナ貨物の単価別フィーダー輸送機関選択結果(件数比)を図-4に、また輸入を図-5に示す。単価が安いとき普通トラックの分担率が大きく、高い貨物はコンテナトレーラーも内航船も分担率が増える。従価運賃が多いため単価の高い貨物は、生産・消費地周辺でコンテナ詰め・取出するのが輸送運賃制度上、有利であることの結果である。

3. 定式化

一般に貨物輸送においては荷主が貨物の特性(ロットサイズ、単位重量当り価格)に応じて輸送手段を決定すると言われている。輸送機関選択のモデル化にロジットモデルを用いた研究は多い⁵⁾⁶⁾⁷⁾。家田⁸⁾は価格とロットサイズに着目した輸送機関分担モデルを提案し、品目別に価格分布を与えることにより、最適流動ロットサイズ及び輸送機関選択確率を求めている。

本研究のモデルでは外国～消費地(生産地～外国)の分布貨物量から輸送経路別の配分貨物量を求める。外国～消費地の分布貨物量をロットサイズ別単価別に与え、貨物のロットサイズと単価からリンクコストを算定する。求めたリンクコストから費用最小となる流動パターンを各ロットサイズ各単価ごとに求め、リンク貨物流動量を算定する。リンク貨物流動量より最適寄港頻度が求められる。以上の流れを図-6に示す。

定式化を行う上で次の各項を前提条件とした。

- 1) コンテナ船の配船は船会社の負担と荷主の負担の和が最小となるように、つまり船の運行費用増による運賃増と船待ち時間による在庫費用の和を最小とするように、本船や内航船を配船する。(寄港頻度の決定)
- 2) 寄港頻度(配船数)を増加することにより、船待ちによる滞留時間を減少させることができる。つまり在庫コストを減少させることができる。
- 3) 寄港頻度を増加させると船の寄港費用は増加する。船の寄港費用は、船の運行費用増による輸送運賃増と定義する。

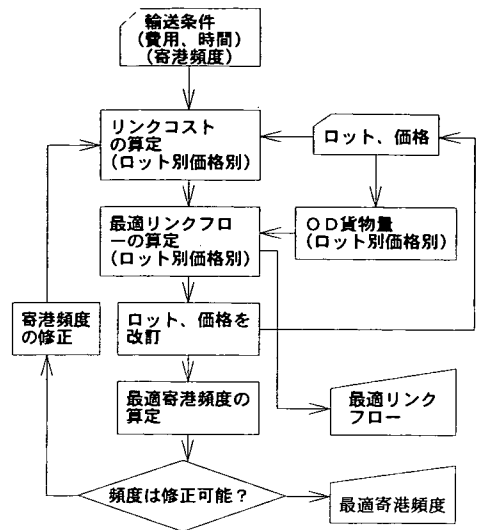


図-6 計算手順

- 4) 輸入貨物は外国→本船港→詰め地→消費地，輸出貨物は生産地→詰め地→本船港→外国，という流動パターンを構成している。フィーダー輸送機関はトラックと内航船とする。
- 5) コンテナ貨物を輸送するもの(荷主)は、貨物の特性(ロットサイズ、価格)に応じて外国～消費地の総費用が最小となる経路(取出地、荷揚げ港、輸送機関)を選択する。(輸送経路の決定)
- 6) 貨物のOD(外国～消費地)、つまり分布貨物量はロットサイズ別価格別に与件である。
- 7) 各リンクの総費用は貨物の特性により変化する。
- 8) 寄港する船の大きさは総貨物量を考慮し、ある一定の頻度が確保されるようにリンクごとに一定とする。船の寄港頻度のみによりサービスレベルが決定されるものとする。大きい船を利用するリンクは頻度を増加させるための費用が大きい。

(1) フィーダー輸送における流動コスト

外国から消費地までの輸入コンテナ貨物には、コンテナ取出地、本船荷揚げ港湾、輸送手段によって様々な輸送経路が存在する。そこで、ノードを消費地、コンテナ取出地(以下取出地)、本船荷揚げ港湾(以下本船港)、外国の4種類に分けて考える。k:貨物の形態(1:コンテナ取出後, 2:前, 3:本船), m:輸送機関(1:トラック, 2:内航船), a:輸送区間、とすればリンクはk m aで構成される。

輸送経路選択を行うために、リンクの輸送抵抗を定式化する必要がある。輸送抵抗となるのは運賃、輸送時間(価値)などの流動コストである。流動コストは貨物の特性や輸送手段により異なるコストとする。フィーダー輸送において考慮すべき流動コストとして以下を考える。

a) 運賃単価

輸送業者は固定コストと貨物の量（ロットサイズ）により変化する変動コストから輸送運賃を決定する。従って運賃単価は固定コストと変動コストを用いれば、次のようなロットサイズの関数⁹⁾として定義できる。

$$u_a^{km}(w) = \frac{fix_a^{km}}{w} + var_a^{km} \quad (1)$$

$u_a^{km}(w)$: 運賃単価(円/t), w : ロットサイズ(t)

fix_a^{km} : 固定コスト(円), var_a^{km} : 変動コスト(円/t)

固定, 変動コストはそれぞれ, 距離に対して次の関係が成り立つ。

$$fix_a^{km} = \beta_1^{km} + \beta_2^{km} d_a^k \quad (2)$$

$$var_a^{km} = \beta_3^{km} + \beta_4^{km} d_a^k \quad (3)$$

β_i^{km} : パラメータ ($i=1, 2, 3, 4$), d_a^k : 距離

b) 在庫コスト

輸送時間及び滞留時間をコストに換算するために次のように定義する¹⁰⁾。

$v_a^{km}(w, p) = (\text{金利}) \times (\text{単価}) \times (\text{輸送時間} + \text{滞留時間})$

トラック: ロットサイズが消費量を上回るとき, 滞留が生ずると考えられる。

$$v_a^{km}(w, p) = rp \left(t_a^{km} + \frac{w}{2q_a^{km}} \right) \quad (4)$$

内航船: 内航船の輸送容量は無量大とする。しかし, 内航船はある間隔で寄港するので, 船待ちによる滞留が生じる。

$$v_a^{km}(p) = rp \left(t_a^{km} + \frac{y_a^k}{2} \right) = rp \left(t_a^{km} + \frac{1}{2f_a^k} \right) \quad (5)$$

$v_a^{km}(w, p)$: 在庫コスト(円/t), r : 金利

p : 品目価格(円/t), t_a^{km} : 輸送時間

q_a^{km} : 消費量(t/時間)

y_a^k : 内航船の寄港周期(時間)

f_a^k : 内航船の寄港頻度(隻/時間)

c) 荷役コスト

本船荷揚げされる港湾及び内航船荷揚げされる港湾(=コンテナ揚げ地)において荷役を考慮する。

n^{km} : 荷役コスト(円/t)

(2) 目的関数及び制約条件

2段階計画モデルとして定式化される。主問題(P)では内航船の寄港頻度の決定を行い, 子問題(S)では輸送経路の決定を行う。

$$\begin{aligned} (P) \quad \min Q_1(f) &= \sum_k \sum_a V_a^k(f_a^k, x_a^{km}) + \sum_k \sum_a G_a^k(f_a^k) \\ &= \sum_k \sum_a \frac{r}{2f_a^k} \int_w \int_p x_a^{km}(w, p) p \, dw dp \\ &\quad + \sum_k \sum_a g_a^k f_a^k \end{aligned} \quad (6)$$

ここに $x_a^{km}(w, p)^*$ は, 子問題(S)により与えられる。

$$\begin{aligned} (S) \quad \min Q_2(x) &= \sum_k \sum_m \sum_a \int_w \int_p c_a^{km}(w, p) x_a^{km}(w, p) \, dw dp \quad (7) \\ m \in M_k \quad a \in A_k \\ s. t. \quad A^{ij} &= \int_w \int_p a^{ij}(w, p) \, dw dp \\ a^{ij}(w, p) &= \sum_b h_b^{ij}(w, p) \\ x_a^{km}(w, p) &= \sum_{ij} \sum_b \delta_a^{kmij} h_b^{ij}(w, p) \\ b \in B_{ij} \end{aligned}$$

ここに,

$$c_a^{km}(w, p) = u_a^{km}(w) + v_a^{km}(w, p) + n^{km} \quad (8)$$

$k = \begin{cases} 1: \text{取出地} \sim \text{消費地} \\ 2: \text{本船港} \sim \text{取出地} \\ 3: \text{外国} \sim \text{本船港} \end{cases}$

ij : ODペア, m : 輸送機関, a : 輸送区間

w : ロットサイズ(t), p : 価格(円/t)

r : 金利

$c_a^{km}(w, p)$: リンクコスト(w と p の関数)

$x_a^{km}(w, p)$: リンクの貨物流動量(t)

(ロットサイズ w 価格 p の時のリンクフロー)

f_a^k : 内航船の寄港頻度(隻/時間)

$V_a^k(f_a^k, x_a^{km})$: 船待ちによる在庫費用(円)

$G_a^k(f_a^k)$: 内航船の寄港費用(円)

g_a^k : 寄港頻度を1単位増加する費用(円/隻)

A_k : 輸送区間 a の集合

M_k : 輸送機関 m の集合

A^{ij} : ij 間の分布貨物量(t)

$a^{ij}(w, p)$: ij 間のロットサイズ w 価格 p の分布貨物量

B_{ij} : ODペア ij の輸送経路(パス) b の集合

$h_b^{ij}(w, p)$: ODペア ij の輸送経路 b の貨物量

$\delta_a^{kmij} = \begin{cases} 1 : \text{リンク} a \text{ がパス} b \text{ を利用する} \\ 0 : \text{利用しない} \end{cases}$

主問題(P)は, 船待ちによる在庫費用と船の寄港費用の和を最小とするように, 船の寄港頻度を求めるシステム最適化問題である。一方子問題(S)は, 各々の貨物が外国から消費地まで費用最小となる経路を選択したときのリンク貨物流動量を求める利用者最適化問題であり, 制約条件はODフローの保存条件及びパスフローとリンクフローの関係式である。

4. 計算手順

(1) リンクコストの算定

輸入貨物の各段階(外国→本船港→取出地→消費地)のリンクコストを具体的に示す。

a) コンテナ取出地→消費地 ($k=1$)

消費地=取出地(一貫輸送)のときコンテナのまま消

費地まで輸送されるので総コストは0である。輸送機関 m はトラックのみである。 ($M_1=1$)

$$c_a^{11}(w, p) = u_a^{11}(w) + v_a^{11}(w, p) \quad (9)$$

b) 本船荷揚げ港湾→コンテナ取出地 ($k=2$)

輸送機関 m はトラックと内航船が存在する。内航船では荷役コストを考慮する。 ($M_2=2$)

トラック ($m=1$) :

$$c_a^{21}(w, p) = u_a^{21}(w) + v_a^{21}(w, p) \quad (10)$$

内航船利用 ($m=2$) : ロットサイズが大きいとき、運賃単価及び荷役コストは幾らか割引かかれていると考えられる。

$$c_a^{22}(w, p) = [u_a^{22}(w) + n^{22}] \exp(-\alpha w) + v_a^{22}(p) \quad (11)$$

α : 大口ロットの割引率

c) 外国→本船荷揚げ港湾 ($k=3$)

輸送機関はコンテナ本船のみである。 ($M_3=1$)

$$c_a^{31}(p) = u_a^{31} + v_a^{31}(p) \quad (12)$$

※外国→本船港の運賃単価、輸送時間は航路別に各港湾一定の値を与える。

(2) リンクフローの算定

リンクコストより、各々の貨物が外国から消費地まで費用最小となる経路を選択し、利用者にとって最適なリンク貨物流動量を求める。

$$\min [z_b^{ij}(w, p) | b \in B_{ij}] \quad \forall ij, w, p \quad (13)$$

$$s. t. z_b^{ij}(w, p) = \sum_k \sum_m \sum_a \lambda_{ba}^{ijkm} c_a^{km}(w, p)$$

$z_b^{ij}(w, p)$: 経路 b の総コスト

$$\lambda_{ba}^{ijkm} = \begin{cases} 1 : \text{パス } b \text{ がリンク } a \text{ を利用する} \\ 0 : \text{利用しない} \end{cases}$$

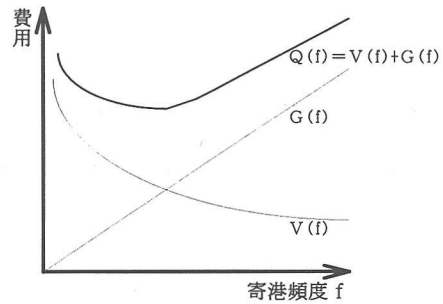
により、費用最小経路 b を求める。最適パスフロー $h_b^{ij}(w, p)^*$ より、最適リンクフロー $x_a^{km}(w, p)^*$ を求める。

$$x_a^{km}(w, p)^* = \sum_{ij} \sum_b \delta_{ab}^{kmij} h_b^{ij}(w, p)^* \quad (14)$$

(3) 寄港頻度の最適化

実際のネットワークに適用するために、朝倉¹¹⁾の解法を参考にして、ヒューリスティックな解法を示す。主問題の目的関数は、図-7のような凸関数となる。この凸関数 $Q(f)$ が最小となるとき f が最適寄港頻度となる。リンクフロー $x_a^{km}(w, p)$ が与えられたとき、主問題の各リンクにおける目的関数値 Q_a^k を最小にする寄港頻度 (配船数) f_a^k は次のようにして求めることができる。

$$\begin{aligned} Q_a^k &= V_a^k(f_a^k, x_a^{km}) + G_a^k(f_a^k) \\ &= \frac{r}{2f_a^k} \int_w \int_p x_a^{km}(w, p)^* pdwdp + g_a^k f_a^k \end{aligned} \quad (15)$$



V(f) : 船待ちによる在庫費用 G(f) : 船の寄港費用

図-7 寄港頻度と目的関数 (主問題) の関係

各リンクにおいて Q_a^k が最小となるとき、 $\partial Q_a^k / \partial f_a^k = 0$ が成り立つことより、最適な寄港頻度は、

$$f_a^{k*} = \sqrt{\frac{r}{2g_a^k} \int_w \int_p x_a^{km}(w, p)^* pdwdp} \quad (16)$$

以上により、計算手順は次のように書くことができる。

Step1. f^k の初期値 f^{k0} を適当に与える。 $n=0$

Step2. それぞれの f^{k0} に対し子問題を解き、 x の初期値 x^0 を求める。

Step3. x^n を用いて、主問題の目的関数の値を最小にする f を次式により求める。

$$f_a^{k*} = \sqrt{\frac{r}{2g_a^k} \int_w \int_p x_a^{km}(w, p)^* pdwdp} \quad (17)$$

Step4. 収束判定

$$|f^{kn} - f| < \epsilon$$

であれば終了、そうでなければ

$$f^{kn+1} = f$$

とにおいて、Step5.へ

Step5. f に対し子問題を解く。解を x^n とおく。 $n=n+1$ とにおいて、Step3.へ

Step6. 終了、 z を最適解とする。

5. 輸送経路選択モデル (子問題) の適用

(1) コンテナ船寄港地の想定

輸送経路の選択を行う子問題 (S) を用いて東北6県のコンテナ貨物流動を予測する。本船の寄港地を図-8に示す。本船の寄港する港湾を東京、横浜港とし、仙台湾～東京港の内航船寄港頻度を週1 ($f=4.0$ 隻/月) とする。この時、東北発着の貨物量は非常に小さく、本船の頻度には影響がないものとする。

(2) 計算に用いるデータ

a) ノード

消費地: 6 (東北6県)

本船港: 2 (東京港, 横浜港)

取出地: 9 (消費地+本船港)

外国: 3 (欧州, 北米, 豪州)

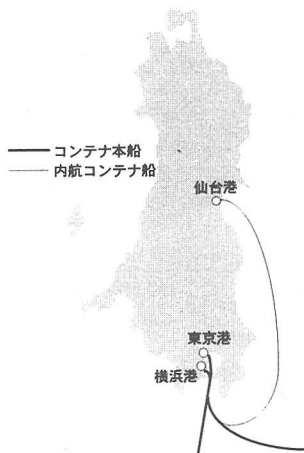


図-8 船の寄港の想定

b) リンク

取出地→消費地：普通トラック または 利用しない，本船港→取出地：コンテナトレーラー または 内航船，外国→本船港：欧州，北米，豪州航路

c) パラメータ

トラック，内航船の運賃単価のパラメータ及び内航船については t 値と重相関係数を表-2に示す。設定方法は次の通り。この際，ロットサイズ帯は4区分に分割し，価格は品目ごとに与えた。

トラック：一般区域貨物自動車運送事業の運賃料金¹²⁾を基に距離及びロットサイズに対する運賃を平均し，距離とロットサイズのパラメータとした。定数項は運賃表に示された最小の料金（コンテナトレーラーの場合距離10km，ロットサイズ5 t以下の輸送料金）とした。

内航船：ロットサイズ15t（20' コンテナ本分）以下で定数及び距離に関するパラメータを，15t以上でロットサイズ及びd・wに関するパラメータを，それぞれ重回帰分析により推定する。20' コンテナの片道運賃水準¹³⁾を用いて推定。大口ロットの割引率はロットサイズ100tのとき約10～20%割引かけられると仮定し， $\alpha = 0.001, 0.002$ とした。

金利：r=0.15 (1year)，消費量：q=10 (t/hour)

内航船の陸上輸送距離：dis=10 (km)

d) 入力データ

区間距離：取出地→消費地の各区間の距離は，県庁または港湾所在地→県庁所在地までの距離とする。本船港→取出地の距離は，港湾所在地→県庁または港湾所在地までの距離とする。

輸送時間：各区間の輸送時間は最短輸送時間を考える。

荷役料金：港湾での荷役料金を適用する。

コンテナ船の寄港頻度（表-3）：

各港湾の配船数（一ヶ月）より求める。

ロットサイズ別価格別OD分布貨物量：

平成5年コンテナ貨物流動調査より

表-2 運賃単価のパラメータ

	定数項	距離d	ロットw	d・w	割引 α
普通T	4760	162.4	1350	9.9	0
コンテナT	16990	338.4	550.6	10.81	0
内航船S (t 値)	26072 (5.93)	51.58 (8.78)	1738 (2.72)	3.439 (4.03)	0.001

内航船のパラメータの重相関係数は0.818

表-3 本船の寄港頻度（単位：隻/月）

	欧州	北米	豪州
東京港	33	69	2
横浜港	14	65	23

表-4 輸入品ロットサイズ別輸送機関選択結果（単位：t）

輸送機関 (取出)	普通T (京浜港周辺)	コンテナT (消費地周辺)	内航船 (消費地周辺)
京浜港→宮城	2115 (1.0～57.0)	3257 (57.0～258)	1355 (全ロット帯)

〇はロットサイズの分布

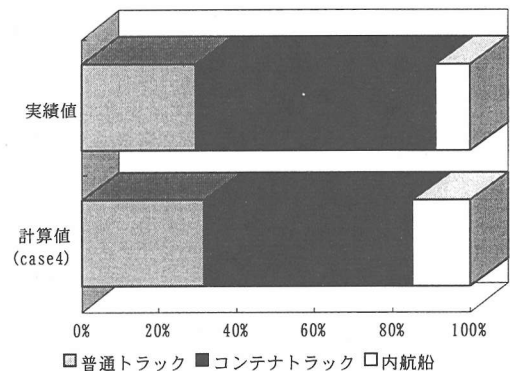


図-9 京浜港→宮城のフィーダー輸送機関分担（輸入）

表-5 輸送機関選択結果（単位：t）

消費地	普通T	コンテナT	内航船S
青森	1837	0	0
岩手	426	0	0
宮城	2080	3257	1390
秋田	808	0	12
山形	1129	564	0
福島	1545	4161	0

※ $\alpha = 0.002$ のとき

(3) 計算結果

東北地方における京浜港経由の輸出・輸入を予測するが，ここでは主に輸入に絞って検証を行う。

a) ロットサイズと輸送機関選択の関係

宮城で消費される貨物のコンテナ取出地選択結果及び貨物のロットサイズ分布を表-4に示す。ロットサイズが50t以下の貨物は，東京港あるいは横浜港周辺でコンテナ取出される傾向がある。これに対し，ロットサイズが50t以上の貨物は消費地でコンテナ取出される傾向がある。ロットサイズが小さい貨物は本船港からコンテナ取出して輸送するのが有利であるのに対し，ロットサイズが大きい貨物は本船港から消費地までコンテナ詰めされ

たまま輸送するのが有利であることを示している。またこの輸送機関選択結果と平成5年度コンテナ貨物流動調査の実績との比較を図-9に示す。内航船の分担率が多少高いが、実際の分担率に近い結果が得られている。

b) 消費地と輸送機関選択の関係

本船港～消費地の輸送機関選択結果を表-5に示す。宮城、岩手、秋田で消費される貨物の一部は内航船を利用する。内航船を利用する貨物は宮城で消費される貨物が多いことも分かる。青森で消費される貨物はいずれもロットサイズが小さいので内航船を利用する貨物は見られなかった。また山形、福島で消費される貨物に内航船を利用する貨物が見られないのは、内航船を利用するのが距離及び時間増となるためである。

6. 経路選択と寄港頻度の同時決定モデルの適用

(1) 計算に用いるデータ

上のモデルでは内航船の寄港頻度を想定して計算を行ったが、経路選択結果から得られる内航船の貨物需要から最適な内航船寄港頻度が求められることができる。そこで経路選択と内航船寄港頻度を同時に決定するモデルを適用する。本船の寄港を東京、横浜港のみとし、内航船の寄港する港湾は仙台港と常陸那珂港を考える。

a) ノード

消費地：13（東北6県、関東7県）

本船港：2（東京港、横浜港）

取用地：17（消費地+本船港+仙台港+常陸那珂港）

外国：3（欧州、北米、豪州）

b) パラメータ

大口ロットの割引率 α と内航船の寄港頻度増による費用増 g をパラメトリックに変化させ感度分析を行う。 g は内航船の代表的サイズ2種類の入港料にほぼ近い1000と5000を考え、 g と α の組合せで表-6に示す4つのケースを考える。

(2) 計算結果

仙台港～東京港の内航船最適寄港頻度を表-7に示す。常陸那珂港～東京港は全ケースで最適頻度0となった。

a) 費用増 g と最適寄港頻度及び輸送機関選択の関係

g が大きくなると、頻度増により寄港費用は増加するので内航船の最適寄港頻度は小さくなる。最適寄港頻度が小さくなると、内航船を利用する貨物は少なくなる。表-7より最適寄港頻度はパラメータ g の値によって大きく変化することが分かる。

b) 割引率 α と最適寄港頻度及び輸送機関選択の関係

α が大きくなるとロットサイズが大きき時の内航船の運賃単価が小さくなり、内航船を利用する貨物は増加する。また内航船の貨物需要が増えれば、最適寄港頻度

表-6 計算に用いるパラメータ

	case1	case2	case3	case4
費用増 g	1000	1000	5000	5000
割引率 α	0.001	0.002	0.001	0.002

表-7 仙台港～東京港の内航船最適寄港頻度

	case1	case2	case3	case4
最適頻度	2.703	3.178	0.447	0.852
計算回数	4	4	5	9

(単位：隻/月)

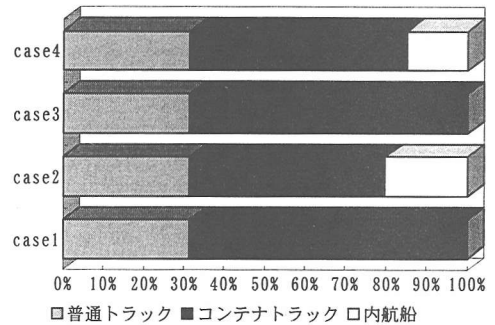


図-10 京浜港～宮城の輸送機関選択結果

表-8 フィーダー輸送機関分担 (単位：t)

消費地	普通T	コンテナT	内航船S
青森	1837	0	0
岩手	426	0	0
宮城	2115	3257	1355
秋田	818	0	2
山形	1129	564	0
福島	1545	4161	0

は大きくなる。図-10より内航船の貨物需要はパラメータ α の値によって大きく変化することが分かる。

c) フィーダー輸送機関分担について

最適頻度変化のもっとも小さな同時決定モデル(case2)により求められる本船港～消費地のフィーダー輸送機関選択結果を表-8に示す。輸送経路選択のみで計算した場合(表-5)と比べて内航船の貨物需要が多少減少しているのが分かる。寄港頻度の最適化により内航船の寄港頻度が減少したためである。

d) 東北地方における海上フィーダーの可能性

フィーダー用コンテナ船(内航船)の大きさは100個積み2000t程度のもので500個積み10000t程度まで様々である。東京港～仙台港に内航船が就航するとき、内航船を利用する貨物需要は約2000(t/月)、また最適な寄港頻度はcase2で約3.2(隻/月)と推計された。つまり内航船を利用するコンテナの数は20フィートコンテナ換算で150(TEU/月)程度であり、内航船一回の寄港で荷揚げされるコンテナの数は40個となる。仮に100個積みの内航船(2000t)が寄港するとすると仙台港単独では需要が少ない。しかし八戸、仙台、小名浜3港を経由する内航航路を考えれば十分採算が取れる範囲である。

e) 輸出における実績値との比較

以上と同様の計算を輸出についても行った。宮城からの輸出についての輸送機関分担結果を図-11に示す。内航船の分担率は実績値に近い値が得られている。しかし計算値ではコンテナトレーラーの分担率が50%以上占めているのに対し、実績値では10%以下となっている。これは本モデルでトラック輸送の割引を考慮していない点に問題がある。ヒアリング調査によるとその割引率は35~50%であるが、品目、距離、ロットサイズにより異なるため本モデルでは考慮できなかった。輸出品はロットサイズが大きく、トラック輸送時に大幅に割引が行われ、内航船よりも安く輸送できるためであろう。

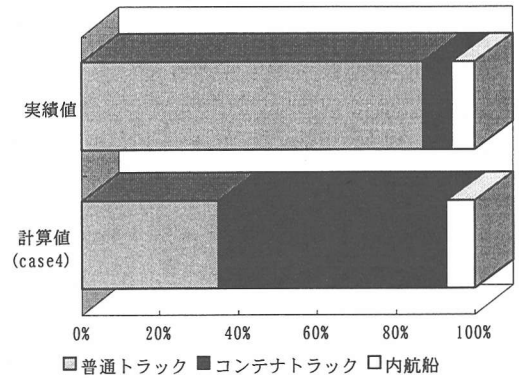


図-11 宮城～京浜港のフィーダー輸送機関分担（輸出）

7. 結論

本研究の結論は以下のように集約される。

- 1) 貨物のロットサイズと価格からフィーダー輸送経路を決定することにより海上フィーダー輸送を考慮してコンテナ貨物の需要を推計するモデルを提案した。本モデルは内航船を利用するコンテナ貨物需要と内航船の最適寄港頻度を同時に求めることができる。
- 2) 貨物のロットサイズによってフィーダー輸送方法は異なることを表現できた。
- 3) 地方港への内航船によるフィーダー輸送、本船の寄港を想定して東北地方における外貿コンテナ貨物の国内流動を予測できた。

本研究では運賃はロットサイズと距離によって決定されるという一般的な原理を前提としているためモデルの構造自体に問題は無い。また輸送機関選択や寄港頻度の最適化に影響の大きいパラメータを変化させて感度分析を行ったが値の想定には問題が残されている。

参考文献

- 1) T.L.Friesz : A Sequential Shipper-Carrier Network Model for Predicting Freight Flow. Transportation Science, vol.20, pp80-91, 1986.
- 2) 三木・吉川：国際コンテナ輸送システムの最適化に関する考察，土木計画学研究・講演集 No.5, pp609-615, 1983.
- 3) 木村：外貿港湾選択評価手法とその応用に関する研究，京都大学学位論文，1985.
- 4) 黒田：国際ハブ・コンテナ・ターミナルの最適ネットワーク計画，Discussion Paper of ARSC, 1994.
- 5) 渡辺・苦瀬・新谷：輸出入コンテナ貨物の陸上輸送における一貫輸送と積み替え輸送の選択に関する研究，土木計画学研究・講演集 No.12, pp473-480, 1989.
- 6) 要藤・鹿島：幹線貨物の輸送手段分担率モデルの作成，土木学会年次学術講演会講演概要集 No, pp133-134, 1983.
- 7) 高田・渡辺・山田：海上貨物輸送機関の利用特性に関する研究，土木計画学研究・講演集 No.15(1), pp623-628, 1992.
- 8) 家田・佐野・小林：商品価格と流動ロットに着目した都市間貨物機関分担モデル
- 9) R.W.Hall : Dependence between Shipment Size and Mode in Freight Transportation. Transportation Science, vol.19, pp436-444, 1985.
- 10) C.F.Daganzo : Analyzing Trade-offs between Transportation Inventory and Production Costs on Freight Networks. Transportation Research B, pp361-380, 1985.
- 11) 朝倉：交通混雑を考慮した最適道路網計画モデルとその適用，土木計画学研究・論文集 No2, pp.157-164, 1985
- 12) 交通日本社：貨物運賃と各種料金表，1991.
- 13) 横浜市港湾局：海運・港湾事情調査報告書，1992.

(1996.2.22 受付)

AN INTERNATIONAL CONTAINER CARGO DEMAND MODELING TAKING ACCOUNT OF COASTAL FEEDER TRANSPORT

Hajime INAMURA, Masahiro NAKAMURA and GU Ja-Yeong

Since the calling ports of mother container vessels are quite limited, some container cargo are transported directly to a calling port and the others are gathered the nearest feeder port and shipped to a calling port. This paper proposes a modal choice model of feeder transportation of international container freight. Transportation cost is defined as a function of lot size. Inventory cost is defined as a function of required time and varies by commodity price. Feeder transportation mode is decided by lot size and commodity price. Applying the model to the real world, frequency of container services and container cargo demand are discussed.