

# 日本の国内輸送も組み込んだアジア圏国際コンテナ貨物流動モデル

## An Asian-Range Model of International Container Shipping Including Domestic Transport in Japan

家田 仁\*・柴崎隆一\*\*・内藤智樹\*\*\*

By IEDA Hitoshi\*, SHIBASAKI Ryuichi\*\* and NAITO Satoki\*\*\*

### 1. はじめに

近年、アジア諸国の経済的成長に伴い、国際海上コンテナ輸送におけるアジア地域発着の貨物の割合が増大している。香港、シンガポール、高雄、釜山といった巨大港の港湾取扱貨物量は今や世界一、二を争い、欧米や日本の諸港に代わる地位を占めている。同時に、規模の経済性を追求してコンテナ船が大型化し、大水深のバースと効率的な荷役システムを持った巨大港に貨物が集中するという、階層化された輸送システム、いわゆるハブ&スポーク型輸送が定着した。また、各船社は、規模の経済性を追求して、従来の海運同盟から一歩踏み込んだ「グローバルアライアンス」を結び、グループ内船社相互のオペレーションを徹底して統合する方向に進んでいる。このような潮流の中で、日本の港湾整備にあたっては、戦略的に、かつ効率良く、科学的な検討を行うことが求められている。

こうした背景のもとに、筆者らは、コンテナの港湾発着ベースの OD 表を与えたときに、異なる船型利用やトランシップなどを含めた各港湾間のコンテナリンクフローを、ネットワーク表現を用いて出力するモデルを開発してきた<sup>1)4)</sup>。このモデルは、アジア圏の港湾を対象とし、輸送における「規模の経済性効果」や、港湾整備水準に起因する「バースの混雑効果」をリンクコストに導入するとともに、船社のグローバルアライアンスも考慮して、対欧米豪の流動を含めたコンテナフローの状況を再現・予測するモデルである。これにより、アジア圏を対象とした、日本と外国諸港湾間のコンテナ貨物の流動を概括的に再現することができた。この結果、①国際コンテナ流動の現状分析や、②港湾整備投資のような各種の政策に対する、輸送船舶のサイズ選択等の海上輸送形態や、コンテナ流動パターン、トランシップ等の港湾利用形態などの変化を、船舶の運用における整数計画問題やゲーム理論等<sup>5)6)</sup>に立ち入ることなく、極めて簡便に予測する道を開いた。

しかし、この既存モデルには、陸上輸送や内航海運と

いった、日本国内におけるコンテナフィーダー輸送のメカニズムが組み込まれていない、という問題点があった。このため、日本国内の荷主やフォワーダーの利用港湾や船社グループの選択行動を表現できず、国内港湾間の競争や役割分担の分析、あるいはそれらをふまえた港湾投資効果の判定に難があることを意味し、政策評価ツールとしての既存モデルの有効性を限定させてきた。

そこで本研究では、既存モデルを発展させ、日本国内の陸上・海上フィーダー輸送も含めた総合的なアジア圏国際コンテナ貨物流動モデルを構築する。次に、荷主やフォワーダー、船社の行動を同時に取り込み、かつその相互干渉が表現可能な、複数のネットワーク配分仮説を比較し、最も現状再現性の高い仮説を選択する。そして、選択した仮説に基づいたモデルによって、現状のコンテナ輸送の分析を行う。最後に、モデルの応用例として、3種類のシナリオ分析を行う。

### 2. 既存モデルの概要と新たなモデルの提案

#### (1) 既存モデルの概要

##### (a) ネットワークの構成

既存モデル<sup>1)4)</sup>は、現状の国際コンテナの複雑な流動をネットワーク上の交通フローに見立てて表現し、港湾間の OD 貨物量を所与として、船舶間のトランシップ（積替）や、サイズの異なる種々の船舶の効率的な運用を含めた、コンテナ流動の分析や将来予測を目的として開発された。具体的には、コンテナが出発港から目的港までネットワーク上を移動し、通過したリンクのコストの和

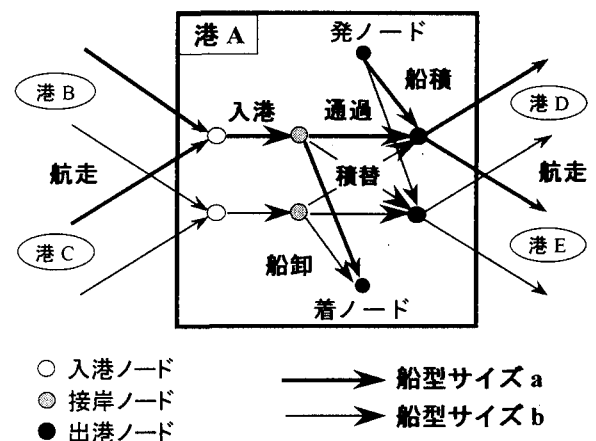


図1 既存モデル<sup>1)4)</sup>のネットワーク構成のイメージ

キーワードズ: 物資流動, ネットワーク交通流, 港湾計画, 海上交通  
\*正会員, 工博, 東京大学大学院社会基盤工学専攻交通研究室  
\*\*学生会員, 工修, 東京大学大学院交通研究室  
\*\*\*正会員, 工修, 西日本旅客鉄道  
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, TEL:03-5841-6119, FAX:03-5841-8506)

が広義の輸送コストとなるように、ネットワーク上のOD交通量の配分問題として定式化した。図1に、既存モデルで構築したネットワークのイメージを示す。ここで、既存モデルの対象とした港湾は、日本の8大港を含むアジア圏の20港と、北米、欧州、豪州を表す3つの仮想港湾の合計23港である。

#### (b) リンクコストの性質

リンクはフロー依存型コストを持つリンク（航走・入港）と非依存型コストを持つリンク（船積・船卸・通過・積替）に分けられる。

入港リンクコストは、バース数の制約により、フローに対して増加関数となる。大型船は大水深のバースにししか接岸できないのに対し、小型船はバースの制約が少ない。船舶の入港頻度が増大すると、水深別のバース数に応じて入港時に待ち時間が発生する。

一方、航走リンクコストは、船舶に「規模の経済性」が作用するため、フローに対して減少関数となる。船舶の走行抵抗は面積、すなわちサイズの2乗で効くのに対し、輸送能力は3乗で効くので、船舶の大型化は基本的に輸送コストを低減させる。また、一定の船型サイズの下での輸送規模の拡大は、消席率が増加することにより効率的となるか、あるいは消席率が変わらなければ寄港頻度が増加することにより荷主の輸送コストを下げる。

このようなリンクコストのフローに対する増加あるいは減少といった性質により、既存モデルでは、フローディペンデントなネットワーク配分問題を、初期値依存型のFrank-Wolfeの最適化アルゴリズムを用いて解いた。

#### (c) ネットワークの配分仮説

既存モデルでは、船社、フォワーダー、荷主の行動原理が明示的に、あるいは内包された形で取り込まれた、複数のネットワークの配分仮説を仮定した。具体的には、以下の3種類である。

①システム最適配分仮説(SO)；唯一の統合的意志決定者がコンテナ輸送全体を統括するとした場合に相当し、ネットワーク全体のコストの最小化を図る。

②利用者均衡配分仮説(UE)；無数の小さな船社、フォワーダー、荷主が存在し、市場に対してそのいずれも影響力を行使できないとした場合に相当する。このとき、各コンテナの荷主は、そのコンテナのコストを最小化するように、利用する船舶のサイズや輸送パターン（直航かトランシップを介するか等）の選択も含めた経路選択を行う。

③船社グループごとのシステム最適配分仮説(GSO)；実際のコンテナ輸送は、グローバルアライアンスと呼ばれる複数の世界的船社同盟によって共同運航が行われている。GSOにおいては各船社グループは、グループ内の総コスト最小化を図る。ただし、各グループ別のフローは、入港リンクのフロー依存性のため、相互に干渉する。

以上の3種類の配分仮説について、現状再現性を比較

した結果、船社グループごとのシステム最適配分仮説(GSO)が、現状を最も良く再現する配分仮説であることが明らかにされた。

#### (2) 新たなモデルの提案

今回新たに提案するモデルは、基本的には既存モデルの構築方針を踏襲し、日本国内において陸上輸送や内航海運による国際コンテナのフィーダー輸送を取り込んだものとなる。そこで、OD貨物量の発着地を、日本国内においては各都道府県とし、国外においては各港湾として、ネットワーク上のOD交通量の配分問題として定式化する。また、ネットワークの配分仮説として、全ネットワークを対象とした利用者均衡配分と、外貿部分のみのネットワークを対象とした配分（複数の配分仮説を用意）を交互に行うことにより、模式的ではあるが、荷主・フォワーダーと船社の行動を同時に考慮することが可能となる。

#### (3) 国内フィーダー輸送に関する既往の研究と本研究の位置づけ

国際コンテナの国内フィーダー輸送に関する研究は、木村<sup>7)</sup>、渡邊<sup>8)</sup>、稲村ら<sup>9)</sup>が代表的である。木村<sup>7)</sup>は、荷主の港湾選択行動と船社の寄港地選定行動をともに考慮し、日本における外貿コンテナ港湾配置計画の評価を行っており、荷主と船社の行動をモデル化した先駆的な研究として評価されている。渡邊<sup>8)</sup>は、都市における輸出入コンテナ輸送を対象にして、陸上コンテナ輸送が道路交通に与える影響や港湾物流施設の立地特性などを分析した。また、稲村ら<sup>9)</sup>は、国内生産地発（着）—外国着（発）のOD貨物量を所与とし、荷主と船社の行動原理を用いて外航船積込港までの輸送経路別の貨物量を求めるモデルを構築した。稲村らの研究は本研究に最も近いが、仙台港を中心とした局所的な研究にとどまっており、日本全体を含めた港湾整備計画を評価するといったニーズには必ずしも対応できない。そこで、本研究は、アジア圏全体を対象とした国際コンテナ輸送問題を扱い、総合的なコンテナ流動モデルを構築することを目的として、日本国内の陸上・海上フィーダー輸送をネットワークに取り込むこととする。これにより、従来の研究では不可能であった、全国レベルの港湾整備計画の評価や荷主の行動、アジア圏全体をにらんだ船社の行動原理などが表現可能となる。

### 3. モデルの構成

#### (1) 国内輸送のネットワーク表現と対象港湾

本モデルのネットワークは、基本的に既存モデル<sup>14)</sup>と同様の構造を持つが、日本国内においては陸上輸送や内航海運によるフィーダー輸送を追加したものとなる。本モデルにおいて構築するネットワークのうち、日本国

内におけるノードとリンクを以下のように定義する。また、日本国内のネットワーク構成のイメージを図2に示す。なお、外国港湾については既存モデルと同様のネットワーク構成とした。

・ノード

- (1) 発ノード 各都道府県
- (2) 着ノード //
- (3) 都道府県ノード //
- (4) 入港ノード
- 各港湾, 外航 (4種の船型サイズごと)・内航別
- (5) 接岸ノード //
- (6) 出港ノード //
- (7) CY (Container Yard) ノード

各港湾, 外航・内航別

・リンク

- (1) 航走リンク
- 港湾間, 外航 (4種の船型サイズごと)・内航別
- (2) 船積・船卸リンク
- 各港湾, 外航 (4種の船型サイズごと)・内航別
- (3) 入港リンク //
- (4) 通過リンク //
- (5) 積替リンク 各港湾, 外航の異なる船型サイズ間
- (6) 積込・荷卸リンク 各都道府県
- (7) 陸上輸送リンク 隣接する都道府県間
- (8) 搬入・搬出リンク 各港湾, 外航・内航別
- (9) 内外積替リンク

各港湾, 外航と内航のCYノード間

コンテナの発着地は、日本国内においては各都道府県、国外においては各港湾とした。日本国内における各都道府県のコンテナの発着地と都道府県ノードは、いずれも

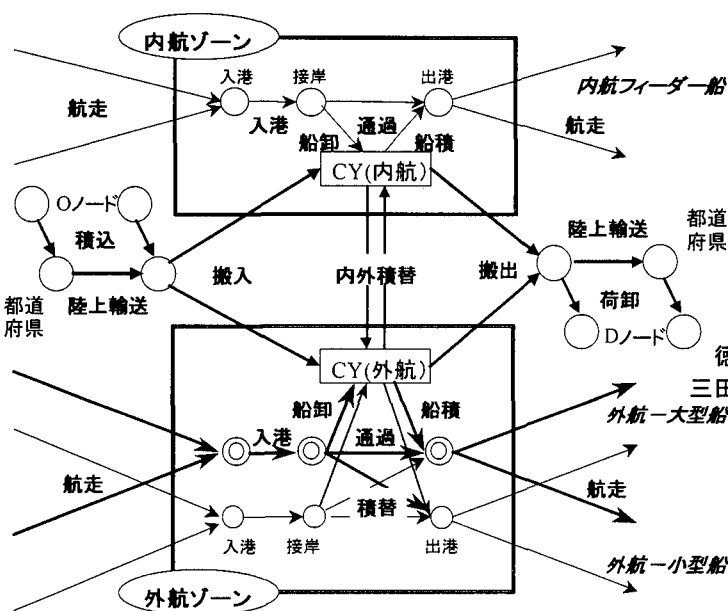


図2 本モデルのネットワーク構成  
(日本国内のイメージ; 太字がリンク名、細字がノード名を表す)

各都道府県の県庁所在地で代表させた。そして、各都道府県の発(着)ノードと当該都道府県ノード間を積込(荷卸)リンク、隣接する都道府県ノード間を陸上輸送リンク、都道府県ノードと港湾内の外航・内航の各CYノードとの間を搬入及び搬出リンクで結んだ。また、国内港湾間を内航航走リンクで、港湾内の外航と内航のCYノード間を内外積替リンクで結んだ。ただし、内航の航走リンクについては、実状を踏まえて、リンクを設定する港湾の組み合わせを限定することで、リンク数を減少させた。ここで、船型サイズの種類は、外航のリンクに関しては既存モデルと同様に4種類(①1,000TEU以下、②1,000TEU—2,250TEU、③2,250TEU—4,000TEU、④4,000TEU以上)とし、内航に関しては、現状では就航船舶の種別があまり多くないことから、1種類とした。また、モデルの対象範囲としては、既存モデルで扱ったアジア・日本の主要港湾と北米・欧州・豪州を表す3つの仮想港の計23港に、タイのレムチャバン港と日本の中核・地方港湾22港を追加し合計46港とした。国内の対象港湾と、陸上・内航フィーダー輸送ネットワークの構成を図3に示す。以上により、本モデルのネットワークは、ノード総数875、リンク総数10,546となる。

(2) リンクコスト関数の定式化

全てのリンクコスト関数は、コンテナ1TEUあたりの平均費用として表現され、金銭的費用と時間的費用の線形和となる。以下に、各リンクコスト関数を定式化する。ここで、航走リンク、入港リンク、船積・船卸・通過・積替リンクのコスト関数については、既存モデルと共通である。本モデルでは、陸上輸送リンク、搬入・搬出リンク、内外積替リンクのコスト関数を新しく定式化

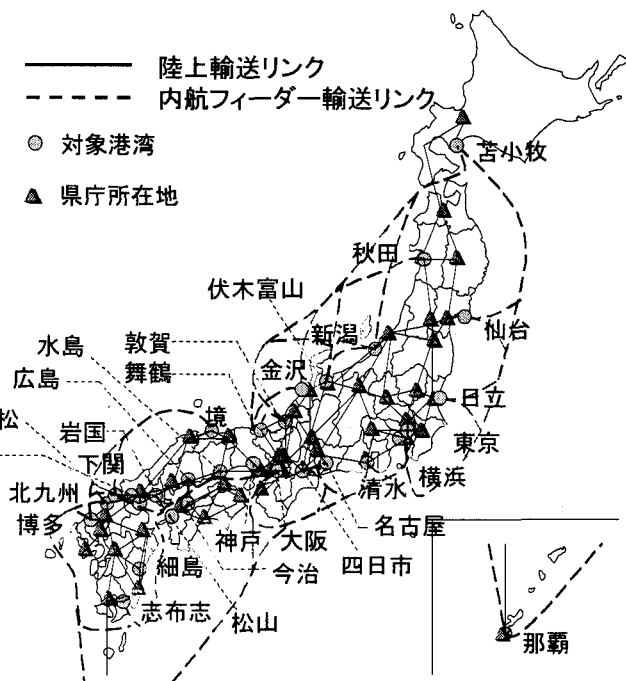


図3 日本国内の対象港湾と陸上・内航のフィーダー輸送ネットワーク

した。また、積込・荷卸リンクは各都道府県の発・着ノードと都道府県ノードを結ぶ仮想的なリンクであり、コストはゼロとした。

(a) 航走リンクコスト

航走リンクコストは、金銭的費用としての船舶の運行費用（船型サイズに応じた規模の経済性が発揮される）と、時間的費用としての航走時間と出港待ち時間（寄港頻度の逆数）に時間価値（未知パラメータ  $v_t$  とする）を乗じたものの和で表される。ここで出港待ち時間に関しては、消席率が一定であると仮定し、輸送規模の拡大が寄港頻度を増大させるという利便性の向上を考慮した。この効果に関して未知パラメータ  $b_1, b_2$  を導入した。従って、航走リンクコストはフローに対して減少関数となる。

$i$  を出発港、 $j$  を到着港、 $k$  を船型サイズのカテゴリー、 $n$  を船社グループとし、船社グループ  $n$  の船型サイズ  $k$ （本研究では外航4船型（1,000 TEU 以下： $k=1, \dots, 4,000$  TEU 以上： $k=4$ ）、内航1船型）における  $ij$  港湾間の航走リンクを  $a$  としたとき、1 TEU あたりの航走リンクコストを以下のように定式化する。

$$C_{1a} = \frac{a_{1k} + a_{2k}}{f_a \cdot cap_k} \cdot l_a + v_t \cdot \left\{ \frac{l_a}{v} + b_1 \cdot \left( \frac{T \cdot f_a \cdot cap_k}{2q_{ak}} \right)^{b_2} \right\} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$q_{ak}$  : 船型サイズ  $k$  における航走リンク  $a$  の年間フロー (TEU)

$l_a$  :  $ij$  港湾間の距離 (NM)

$v$  : 船速 (ノット)

$cap_k$  : 船型サイズ  $k$  の船腹量 (TEU / vessel, カテゴリー内の船舶の平均値)

$f_a$  : リンク  $a$  の消席率

$T$  : 時間単位 (ここでは1年 = 8,760時間とする)

$v_t$  : 輸送されるコンテナの時間価値 (1,000円 / 時間 / TEU)

$a_{1k}$  : 船型サイズ  $k$  の運営費用 (1,000円 / NM / vessel)

$a_{2k}$  : 船型サイズ  $k$  の資本費用 (1,000円 / NM / vessel)

$b_1, b_2$  : 運航頻度に係るパラメータ ( $b_1, b_2 > 0$ )

(b) 入港リンクコスト

入港リンクコストは、入港費用と、入港待ち時間に時間価値を乗じたものの和で表される。コンテナ船の入港頻度が增大すると、外航・内航別のバース数に応じて入港の待ち時間が発生する。従って、入港リンクコストはフローに対して増加関数となる。ここで、入港待ち時間は厳密には待ち行列理論式で表されるが、ここでは簡便化のため、以下のように未知パラメータ  $b_3, b_4$  を含む近似式で表した<sup>1)</sup>。

港湾  $i$  における船型サイズ  $k$  の入港リンクを  $a$  とした

とき、入港リンク  $a$  の1 TEU あたりのコストを以下のように定式化する。

$$C_{2a} = \frac{f_{pik}}{f_a \cdot cap_k} + v_t \cdot w_a \cdot \frac{24}{h_i} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$f_{pik}$  : 港湾  $i$  における船型サイズ  $k$  の入港費 (1,000円 / vessel)

$w_a$  : リンク  $a$  の期待待ち時間 (時間)

$h_i$  : 港湾  $i$  の営業時間 (時間/日)

ここで、リンク  $a$  の期待待ち時間  $w_a$  は以下のように表現される。

①外航の場合

$$w_a = b_3 \cdot \left( \frac{t_{anc} \cdot r_m}{n_{bmk}} \right)^{b_4} \quad \text{if} \quad \frac{r_1}{n_{b1k}} < \frac{r_2}{n_{b2k}}$$

$$= b_3 \cdot \left( \frac{t_{anc} \cdot \sum_m r_m}{\sum_m n_{bmk}} \right)^{b_4} \quad \text{if} \quad \frac{r_1}{n_{b1k}} \geq \frac{r_2}{n_{b2k}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$n_{bmk}$  : 港湾  $i$  におけるカテゴリー  $m$  のバース数  
カテゴリー1は小型バースで、  
小型船 (2,250 TEU以下) のみ接岸可能  
カテゴリー2は大型バースで、  
全コンテナ船が接岸可能

$t_{anc}$  : 1隻あたりの港湾における荷役時間 (時間 / vessel)

$r_m$  : 港湾  $i$  におけるカテゴリー  $m$  の単位時間あたり入港船舶数 (vessels / 時間)

$b_3, b_4$  : 待ち時間に関するパラメータ ( $b_3, b_4 > 0$ )  
単位時間あたり入港船舶数  $r_m$  は以下のように表現される。

$$r_m = \frac{\sum_{k=2m-1}^{2m} q_{ak}}{f_a \cdot cap_k \cdot T} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$q_{ak}$  : 全グループ合計の、港湾  $i$  における船型サイズ  $k$  の入港リンクの年間フロー (TEU) で、全入港リンクフロー  $q_a$  は  $q_{ak}$  の和

②内航の場合

$$w_a = b_3 \cdot \left( \frac{t_{anc} \cdot r}{n_b} \right)^{b_4} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$n_b$  : 港湾  $i$  における内航バース数

$t_{anc}$  : 1隻あたりの港湾における荷役時間 (時間 / vessel)

$r$  : 港湾  $i$  における単位時間あたり内航船舶入港船舶数 (vessels / 時間)

$b_3, b_4$  : 待ち時間に関するパラメータ ( $b_3, b_4 > 0$ )

単位時間あたり入港船舶数  $r$  は以下のように表現される。

$$r = \frac{q_a}{f_a \cdot cap \cdot T} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$q_a$  : 港湾iにおける内航船舶の年間入港フロー (TEU)

(c) 船積・船卸・積替及び通過リンクコスト

船積・船卸・積替リンクコストは、荷役料金と荷役時間からなる。一方、通過リンクコストは出発までの待ち時間のみで表される。よって、

$$C_{3a} = d_a \cdot f_{li} + v_t \cdot t_{anc} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$f_{li}$  : 港湾iにおける1 TEUあたりの荷役費用 (1,000円 / TEU)  
 $d_a$  : リンク a の種別を表すダミー変数  
 = 0 (通過リンク)  
 = 1 (船積・船卸リンク)  
 = 2 (積替リンク)

(d) 搬入・搬出及び陸上輸送リンクコスト

これらのリンクコストは、金銭的費用としての自動車による運賃<sup>(注1)</sup>と、時間的費用としての輸送時間(輸送距離に比例)とで構成される。運賃においては、図4に示すように、コンテナ1個あたりの運賃を輸送距離の一次関数として近似できる。そこで、これを距離比例運賃と固定運賃に分け、固定運賃は、コンテナの陸上流動において一度だけ通過する、搬入または搬出リンク上に計上する<sup>(注2)</sup>こととした。

$$C_{4a} = p_1 \cdot l_a + d_a \cdot p_2 + v_t \cdot \frac{l_a}{v_{car}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$l_a$  : リンク a の距離 (km)  
 $v_{car}$  : 自動車走行速度 (km / 時間)  
 $p_1$  : 0.295 (1,000円 / km) (図4参照)  
 $p_2$  : 30.27 (1,000円)  
 $d_a$  : リンク a の種別を表すダミー変数  
 = 0 (陸上走行リンク),  
 = 1 (搬入, 搬出リンク)

(e) 内外積替リンクコスト

外航の積替リンクコストと同様に、1 TEU あたりの内外積替時の荷役料金と荷役時間の和で表される。荷役料金と荷役時間はいずれも、文献調査やヒアリングにより港湾ごとに推定した。

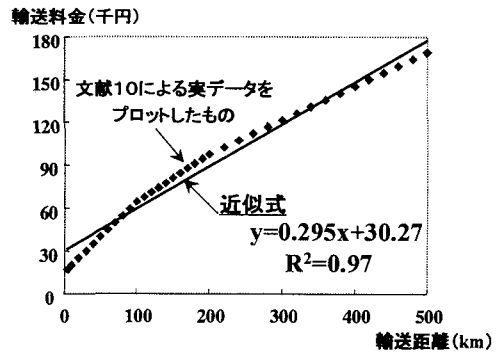


図4 コンテナ1TEUあたりの自動車輸送料金<sup>10)</sup>

$$C_{5a} = f_{dfi} + v_t \cdot t_{df} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$f_{dfi}$  : 内外積替費用 (1,000円 / TEU)  
 $t_{df}$  : 内外積替時間 (時間)

4. 各種のネットワーク配分仮説とモデルの推定

(1) ネットワークの配分仮説

既存モデルでは、3種類のネットワーク配分仮説のうち、各船社グループがそれぞれの総流動コストの最小化を図る状態を表現した、グループ別システム最適配分仮説(GSO)が、現実の状況の再現性が高いという結果を得た。本研究においては、日本国内における外航船舶にコンテナを積み込むまでの荷主(ないしは、フォワーダー)の行動も考慮し、配分原理として、以下の(a)~(e)の5種類の仮説を用意した。

(a) SOALL 仮説

本配分仮説においては、ネットワーク全体のコストの最小化を図る。これは、唯一の統合的意志決定者が、日本国内における陸上輸送や内航海運によるフィーダー輸送も含め、アジア圏のコンテナ輸送全体を統括するとした仮想的な状況に該当する。

(b) UEALL 仮説

本配分仮説においては、利用者均衡配分によってネットワーク全体の配分を行う。これは、無数の小さな船社、フォワーダー、荷主が存在し、市場に対してそのいずれも影響力を行使できないという仮想的な状況に該当する。このとき、各コンテナの荷主は、そのコンテナのコストを最小化するように、日本国内における陸上輸送や内航海運によるフィーダー輸送経路と、利用する外航船舶のサイズや輸送パターン(直航かトランシップを介するか等)の選択も含めた経路選択を行う。

以下の(c)~(e)の配分仮説においては、2段階の配分を行う。はじめに、第1ステップとして、日本国内においては都道府県、その他の地域においては港湾発着の、全船社グループ合計のOD貨物量を所与として、陸上・海上を含めたネットワーク全域を対象とした仮の配分を行う。第1ステップにおいては、コンテナ輸送業界が基本的に激しい競争状態にあることを念頭に置き、利用者

(注1) 本モデルの陸上輸送においては、基本的に無数の輸送業者が競争状態にあると仮定し、運賃=コストとみなしている。

(注2) 本モデルにおいては、発着地がともに日本国内であるコンテナ貨物は考慮しないため、日本国内発(着)の国際コンテナは、搬出(搬入)リンクを一度だけ通過する。

均衡配分 (UE) を基準とした。これによって、日本の都道府県発着コンテナは、陸上輸送や内航海運を経て、いずれかの国内外貿港湾を発着地とする OD 貨物量に帰着される。次に、第2ステップとして、こうして得られた国内外貿港湾発着の OD 貨物量を、外貿部分のネットワーク上で配分する。ここで、航走リンクコストがフローの減少関数であるため、本研究の問題は初期値依存問題となる。そこで、上記の第2ステップで得られた外貿部分のネットワークリンクフローによって第1ステップのリンクフローを更新し、第1、第2ステップをもう一度繰り返す。ただし、それでも解が初期フローに依存し唯一性が保証されないという問題が生じるが、本研究は文献 3)、4)と同様に、初期解としてコンテナ流動パターンの(推定)現状値を使用することとする。

また、(c)・(d)の配分においては、船社グループごとの配分計算を行うため、以下の2点に留意する必要がある。①港の混雑効果も含めた入港リンクのコストは、各船社グループごとに計算された入港リンクフローの合計値を用いて計算されるから、この合計値が収束するまで、船社グループごとの配分計算を繰り返す必要がある。②第2ステップにおいて船社グループごとの配分計算を行うために、第1ステップ配分(全域ネットワーク)の結果より、船社グループごとに、港湾ベースの OD 表を作成する必要がある。第1ステップ配分により決定された、各港湾における全船社グループ合計の発生(集中)貨物量を、船社グループごとの、当該港湾から出港(入港)するコンテナフローの和に応じて比例配分することで、各船社グループの発生(集中)貨物量を得る。こうして得られた船社グループごとの各港湾の発生・集中貨物量をもとに、フレーター法を用いて港湾間分布貨物量を推定する。

#### (c) UE-GSO 仮説

第1ステップ配分においては、利用者均衡配分(UE)によって行う。第2ステップ配分においては、船社グループ別にシステム最適配分(GSO)によって行う。

#### (d) UE-GSO-MAXFLOW 仮説

第1・第2ステップともに(c)と同様の配分原理に基づいてネットワーク配分を行うが、第2回目の第1ステップ配分(全域ネットワーク)において入力初期値となる全船社合計の航走リンクフローを以下の方法で得る。すなわち、各船社グループのコストを、各航走リンクごとに、第1回目第2ステップで得られたコストの最も小さい船社グループのコストに更新してから、全船社について合計する。これは、各船社グループが厳しい競争状態にあることを想定し、各船社グループは、最もコストの低いグループの料金水準(すなわち、最もフローの多い)グループに行動を合わせるとする仮定によるものである。

#### (e) UE-SO 仮説

第1ステップ配分においては、利用者均衡配分(UE)によって行う。第2ステップ配分においては、全船社会

計のシステム最適配分(SO)によって行う。これは、外航輸送を統合的意志決定者が行っているという仮想的な状況に該当する。

## (2) 入力データの整理・加工

本モデルの計算においては、OD 貨物量あるいはリンクフローについて種々のデータの加工や推定が必要である。その方法については文献 3) Appendix を参照されたい。ここでは、日本国内発着の OD 貨物量と、陸上・海上のフィーダー輸送における初期リンクフローの推定方法について、以下に述べる。

### (a) 日本国内発着の OD 貨物量

文献 3)では、日本国内における港湾発着の OD 貨物量の推定方法について述べた。本モデルでは、都道府県発着の OD 貨物量を推定する必要がある。ここでは、運輸省港湾局による調査報告書<sup>11)</sup>により、都道府県発—外国(国ベース)着、外国(国ベース)発—都道府県着のトンベース OD 貨物量が得られるので、文献 3)と同様の手順に従って、都道府県発—外国港湾着、外国港湾発—都道府県着の TEU ベース OD 貨物量を推定した。

### (b) 内航航走リンクの初期フロー

日本コンテナ協会による調査報告書<sup>12)</sup>により、航路別に、内航フィーダー船の寄港ルート、輸送頻度、就航船舶のサイズ、輸送実績が得られる。そこで、航路別の実績コンテナ輸送量を、当該航路に就航している各内航フィーダー船ごとに、輸送頻度と船舶サイズの積によって得られる単位時間あたりの輸送能力に比例して配分した。そして、各内航フィーダー船の寄港ルートに従って、当該フィーダー船の実績コンテナ輸送量を初期リンクフローとして与えた。また、船積港(船卸港)が複数存在する場合は、各港湾で船積(船卸)される内航フィーダー貨物量を、各港湾の輸出(輸入)貨物量で比例配分することによって各港湾間のリンクフローを求めた。

### (c) 陸上輸送リンクの初期フロー

運輸省港湾局による調査報告書<sup>13)</sup>により、都道府県発—船積港着の輸出コンテナと、船卸港発—都道府県着の輸入コンテナの、トンベース OD 貨物量(OD 表 A)が得られる。また、(b)より、内航フィーダー船によって輸送されるコンテナの輸出入別 OD 貨物量(OD 表 B)が得られる。(ただし、内航フィーダー船によって輸送されるコンテナの発着地は、フィーダー港の存在する都道府県であると仮定する。) OD 表 A を TEU ベースに変換し、OD 表 B を差し引くことで、都道府県発—船積港着の輸出コンテナと、船卸港発—都道府県着の輸入コンテナの、TEU ベース陸上輸送 OD 貨物量(OD 表 C)を得た。そして、OD 表 C を入力データとして、陸上輸送リンクによって構成されるネットワーク上で最短経路配分することによって、各陸上輸送リンクの初期フローを得た。

### (3) 変数の設定と未知パラメータの推定

前章で述べたように、リンクコスト関数は多数の変数やパラメータを含んでいる。大部分は船社へのインタビュー調査と文献調査に基づいて定めた。スペースの都合上、これらのうち、各港湾共通の変数のみを表1に示す。価格は1995年をベースとした。また、(1)で述べた5種類の配分仮説について、リンクコスト関数に含まれる5種類の未知パラメータを、外航海運における現状推定リンクフローとモデルにより出力される航走リンクフローとの平均二乗誤差を最小化するように推定した(UE-GSOとUE-GSO-MAXFLOWの場合には全船社グループ

プについて合計した各航走リンクフローを評価に用いる)。パラメータの推定結果についても表1に示す。入港待ち時間に関するパラメータについては、いずれの配分仮説とも同じ値となった。また、UEALL仮説を除くいずれの配分仮説とも、コンテナの時間価値  $v_t$  は千円前後の値となった。現実の貨物の時間価値から考えると、数値が多少高いが、本モデルではすべてのコンテナ貨物の時間価値を同一として扱っているため、時間価値の高い貨物に数値が引きずられた可能性が考えられる。

表1 設定された変数(一部)と推定されたパラメータ

船型サイズ (TEU)	$a_1+a_2$ (1,000円/NM/vessel)	cap (TEU)	tanc (時間/ves)	$v$ (ノット)
4,000-	105	4260	12	20
2,250-4,000	83	2970	12	20
1,000-2,250	54	1530	12	20
-1,000	27	580	12	20
内航船	12	120	4	18

配分原理仮説	$v_t$ (1,000円/時間/TEU)	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
a SOALL	0.9	13	0.9	120	5
b UEALL	0.6	12.5	0.7	120	5
c UE-GSO	1	13.5	0.4	120	5
d UE-GSO-MAXFLOW	0.9	13	0.3	120	5
e UE-SO	1.1	13	0.7	120	5

### (4) 現状再現性の確認と配分仮説の選択

推定されたパラメータを用いて配分計算を行ったときの、航走リンクフローの推定現状値((2)で得た現状の推定値)と計算結果との相関を図5に示す。5種類の配分仮説のうち、UE-GSO仮説が、現状再現性が最も高かった。また、配分仮説ごとの、各港の港湾取扱量の推定現状値と計算結果との相関を表2に示す。ここでも、UE-GSO仮説が、現状再現性が最も高かった。以上の結果から、以降では、本モデルの配分方法としてUE-GSO仮説を採用して、分析を行うこととする。国際コンテナ輸送市場は現在激しい競争状態にあるが、現実には必ずしも輸送面のみで「合理的行動」が完全に成立しているとは限らない。このような側面も考慮すると、国際コンテナ輸送の分析ツールとしての、本モデルの再現性能は高いと考えられる。

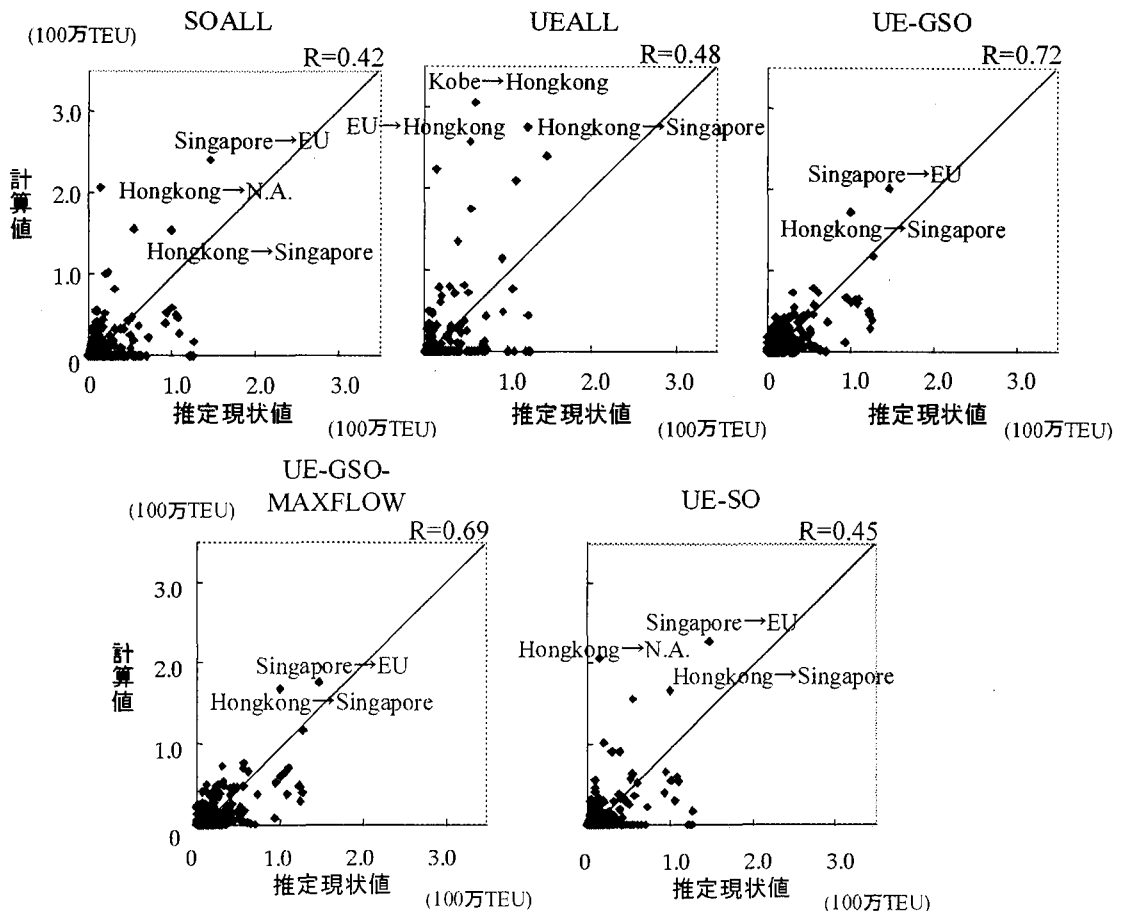


図5 船型サイズ別航走リンクフローの推定現状値と各配分仮説に基づく出力結果の関係

表2 配分仮説別の、各港の港湾取扱量における  
推定現状値と計算値の相関

配分原理仮説	相関係数
a SOALL	0.89
b UEALL	0.92
c UE-GSO	0.96
d UE-GSO-MAXFLOW	0.94
e UE-SO	0.89

5. モデルの分析と応用

(1) モデルによる現状分析

図6は外国港湾について、港湾取扱量（輸出入貨物量＋トランシップ貨物量）の推定現状値と UE-GSO 仮説に基づいた計算結果とを比較したものである。また、トランシップ貨物量を図7に示した。外国港湾については輸出入貨物量を所与としているため、トランシップ貨物量の比較によって考察する。現状でトランシップが行われているのは、釜山、高雄、香港、シンガポールの4港のみであるが、UE-GSO 仮説に基づいた計算では、その他の港湾でも多少のトランシップが行われるとの結果を得た。これは、現在トランシップが行われていない港湾においても条件が揃えばトランシップが可能であることを示唆するものと考えられる。また、釜山港と香港港ではトランシップ貨物量の計算結果が過大推計になっているのに対し、シンガポール港では過小推計になっている。香港港とシンガポール港に関する誤差の要因としては、次のことが理由として考えられる。香港港は、トランシップされる多くのコンテナを再輸出という形で処理する、独特の港湾運営方式を採用している。このため、本来トランシップ貨物量に計上されるべきコンテナの多

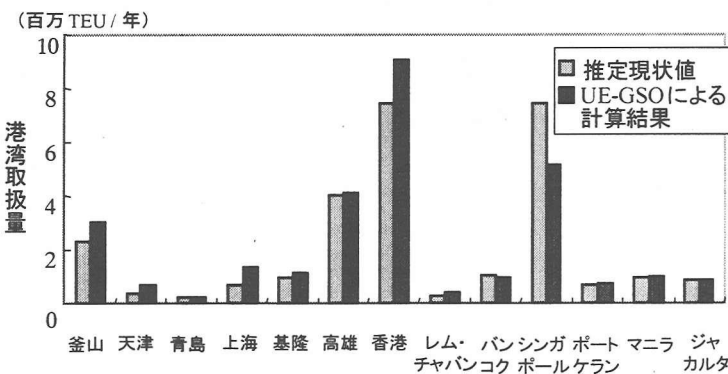


図6 港湾取扱量の比較～外国港湾～

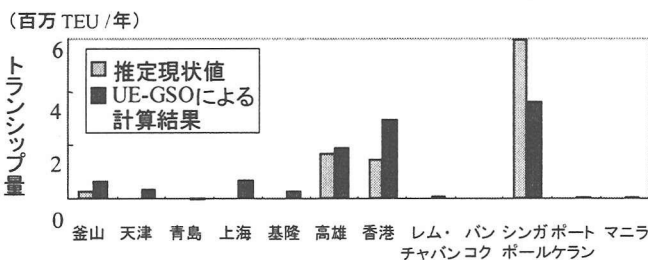


図7 トランシップ量の比較～外国港湾～

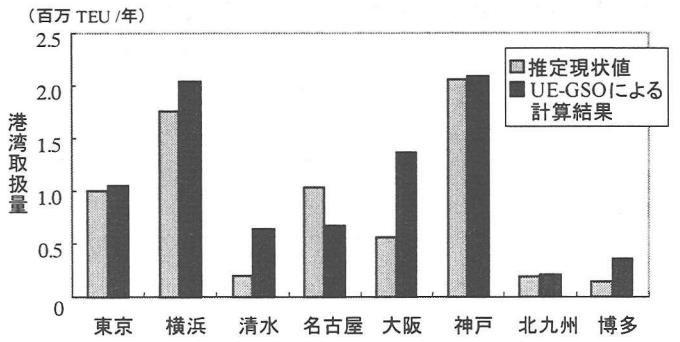


図8 港湾取扱量の比較～日本の8大港～

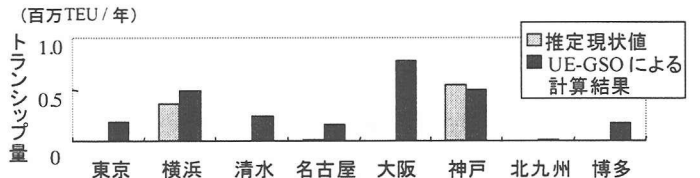


図9 トランシップ量の比較～日本の8大港～

くが、本モデルにおいて輸出入貨物量に計上され、香港港を発着地とするコンテナ貨物の需要（＝香港港発着の全航走リンクフローの最小値）が過大推計される。従って、航走リンクが規模の経済性を持つことを考慮すると、航走リンクフローが（従ってトランシップ貨物量も）、現状よりも過大推計される可能性が大きくなる。また、その結果、ライバル港であるシンガポール港のトランシップ需要も引きつけていると考えられる。

日本国内主要8港湾についての港湾取扱貨物量とトランシップ貨物量を図8・図9に示す。輸出入貨物量についてはどの港湾でも現状がそれなりに再現されているのに対し、トランシップに関しては、図7と同様に、現状ではトランシップが行われていない港湾でも、トランシップが行われる結果となった。

内で8大港湾に次ぐ港湾と位置付けられている中核国際港湾について、港湾取扱貨物量（外航＋内航）を図10に示す。ただし、UE-GSO 仮説に基づいた計算結果によると、8大港湾以外の国内港湾においては外航による取扱貨物量がすべてゼロとなった。これは、現状の外航の取扱貨物量のうち、8大港湾で全体の9割以上を占め、その他の港湾の取扱量は、増加傾向にはあるものの、モデル全体から見ると非常に少量であるため、モデルの精度的に取扱量の表現が困難であったことが主な原因と考

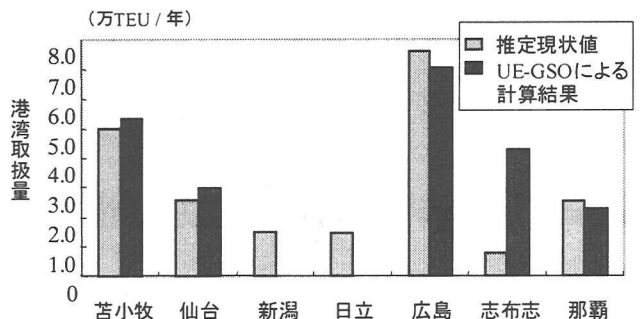


図10 港湾取扱量の比較～中核国際港湾～



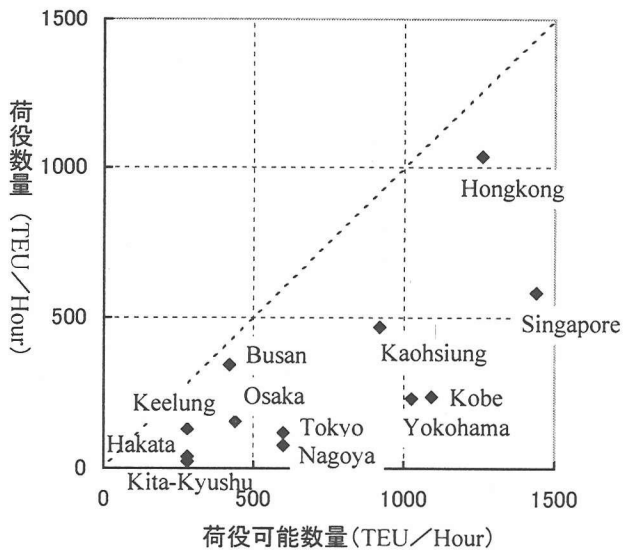


図 11 主要港湾における荷役可能数量と UE-GSO 仮説に基づいた計算で推定された現状の荷役数量との関係

えられる。しかし、本モデルの結果から、今後外航船社グループがコストの圧縮をさらに徹底した場合、外航船舶が地方港湾には寄港しなくなる傾向へ進むことが予想される。内航フィーダー船による取扱貨物量も含めて比較すると、一部の港湾で取扱貨物量がゼロとなるものの、比較的高い再現性が得られた。すなわち、本モデルより、現状のコンテナ流動を前提にした場合、現状の中核国際港湾における取扱貨物は、内航フィーダー船で十分輸送可能であり、また、内航フィーダー船であれば寄港がリーズナブルであることがわかる。これらの港湾では、現状では盛んに外航定期航路の開設に努力しているところではあるが、内航と外航を連携して活用するような整備方針を検討する意義もあると考えられる。

また、主要港湾の1時間あたりの荷役量について、バース数と1バースあたりの荷役能率の積で表される荷役可能数量と、UE-GSO 仮説に基づいた計算結果によって求められた1時間あたりの荷役数量の関係を図 11 に示す。図中の斜め 45 度線に近い港湾ほど、常にコンテナ船がバースに接岸していて、港湾運営が効率的であるといえる。図 11 より、香港や釜山、基隆といった港湾では、場合によっては混雑が生じている可能性もあるが、基本的には非常に効率的な運営が行われている。これに対し、日本の国内港湾、特に神戸港や横浜港は非効率で、機械の空き時間が大きいことが予想される。逆にいえば、日本の港湾は、ハード的には十分余裕があるとも解釈可能で、需要を呼び込むためにはソフト面の対策が必要であることが示唆される。また、シンガポール港については、UE-GSO 仮説に基づいたトランシップ貨物量の計算結果が過小になっていることを考慮すると、実際の効率性は図に示されているものより高いと予想される。

## (2) モデルの応用事例

### (a) シナリオ 1—内航フィーダー輸送の合理化

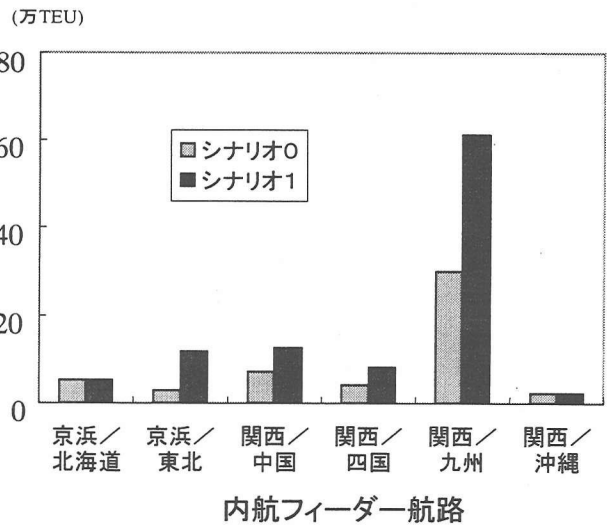


図 12 シナリオ分析 1  
～内航フィーダー輸送の合理化～

内航フィーダー船によるコンテナ輸送は、自動車による陸上輸送と比較して、1 TEU あたりの輸送コストや輸送による環境負荷が低いとされている。しかし、内航船と外航船の積替コストが高いために、内航フィーダー輸送があまり利用されない指摘されている。そこで、①内外積替リンクのコストがゼロ、かつ②陸上輸送の費用が現状の 1.5 倍、というシナリオを想定し、UE-GSO 仮説に基づいた計算を行った。ここで①は、内航フィーダー船が外航バースに直接入れるようになり、しかも待ち時間なしで外航船舶とコンテナをやりとり可能、という状況を想定している。また、②については、環境対策としてのガソリン税の値上げや人件費の高騰といった状況を想定している。シナリオ分析の結果のうち、航路別の内航フィーダー船によるコンテナ輸送量について図 12 に示す。ここで、シナリオ 0 は、何もしない状態の UE-GSO 仮説に基づいた計算結果である。

図 12 によると、京浜/東北航路において輸送量が 4 倍近く増加しているのをはじめとして、西日本の各航路においても 2 倍近い伸び率を示している。これにより、内航船と外航船の積替コストの削減等によって、コンテナ輸送が自動車から内航フィーダー船へ相当量シフトすることが示された。

### (b) シナリオ 2—地震による首都圏の被災

1995 年 1 月に発生した兵庫県南部地震では、国内最大港湾である神戸港が壊滅的な打撃を受け、荷主や船社が利用港湾を変更し、特に釜山港においてトランシップ量が増加したとされている。一度取扱貨物が移転すると、今度はその状態を初期値として貨物流動パターンが変化すると考えられるため、神戸港の諸設備が元通りに回復したとしても、取扱貨物量が被災前の水準に回復する保証がない。そこで、首都圏で大地震が発生したことを想定し、①東京港と横浜港の使用可能バース数が通常時に比べ半減、かつ②荷役効率の低下により、船舶の平均停泊時間が通常時の 2 倍、というシナリオを想定した。

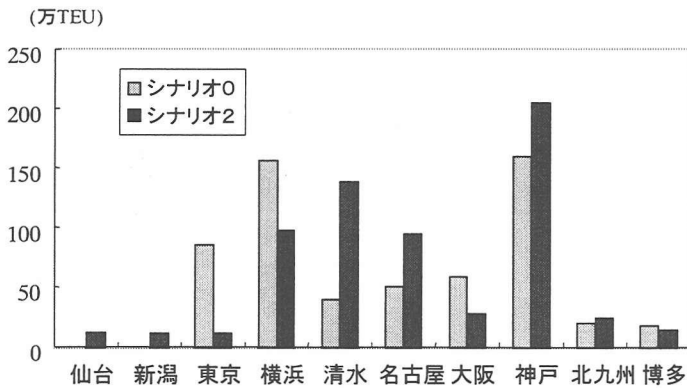


図 13 シナリオ分析 2

～地震による首都圏の被災；国内港湾の取扱貨物量～

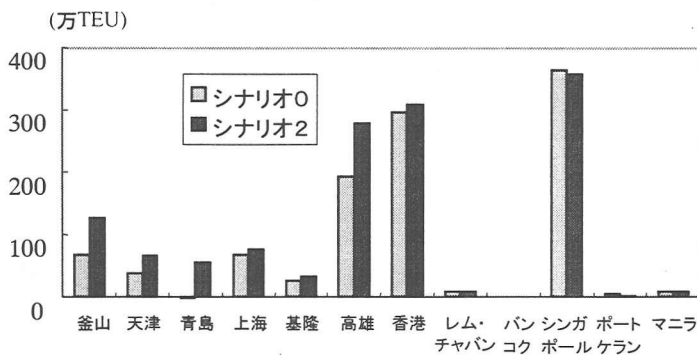


図 14 シナリオ分析 2

～地震による首都圏の被災；  
外国港湾のトランシップ貨物量～

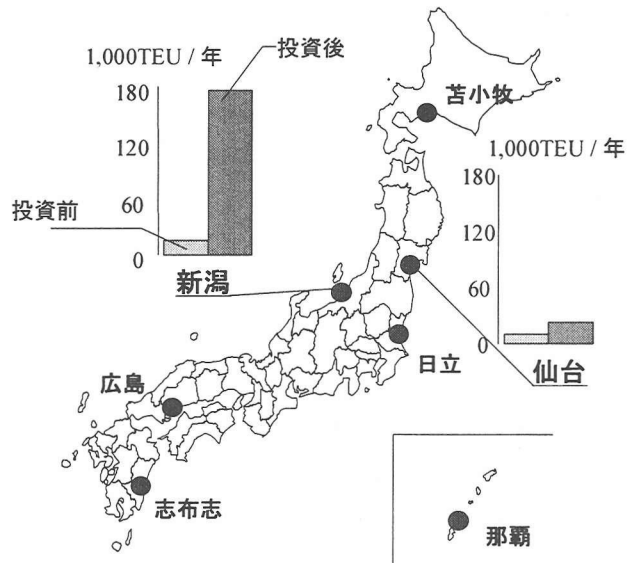


図 15 シナリオ分析 3～中核国際港湾への投資～

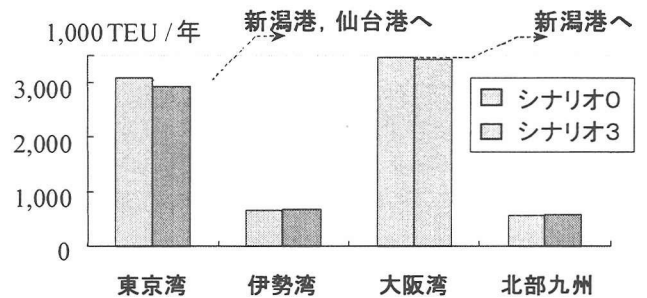


図 16 中核国際港湾への投資の影響

UE-GSO 仮説に基づいたシナリオ分析の結果のうち、日本国内各港湾における外航船舶の取扱貨物量について図 13 に示す。

図に示すように、外航船舶が、仙台港や新潟港に新たに寄港する。また、東京湾に地理的に近い清水港や名古屋港において取扱貨物量が大きく増加し、東京湾の港湾の代替港湾としての機能を果たしていることがわかる。

また、図 14 に、外国港湾におけるトランシップ貨物量の変化を示す。図より、釜山や天津といった日本に近い港湾でトランシップ量が倍増していることがわかる。すなわち、本シナリオにおいては、神戸港の被災時の実態と同様、東京港や横浜港の取扱貨物が、釜山等の外国港湾にも相当量移転することがわかる。

### (c) シナリオ 3—中核国際港湾への投資

現在実際に計画されている、中核国際港湾への投資を実施したことを想定し、UE-GSO 仮説に基づいて、シミュレーションを行った結果を図 15 に示す。この中で、取扱貨物量に有意な変化がみられたのは仙台港と新潟港の 2 港のみであった。この投資前後の日本の 4 大湾の港湾取扱貨物量を図 16 に示す。これによると、東京湾と大阪湾で取扱貨物量が減少しており、この減少分が仙台港や新潟港経由の増加分と考えられる。また、外国港湾においては、釜山港や高雄港で多少の増減はあるものの、全体的に大きな変化はない。つまり、こうした中核国際港湾への投資によって国際コンテナフローの変化はもた

らされるが、海外の港湾トランシップ貨物を日本に誘引するまでの機能は有さないといえる。以上で見る限り、中核港湾への投資計画は、仙台港と新潟港の 2 港に関しては、4 大湾に集中するコンテナを日本国内に分散させる効果はあることが予想される。特に新潟港の投資前後の変化は大きい。

## 6. 結論

本研究で得られた結論と今後の課題を以下にまとめる。

- ① これまでに筆者らが開発したアジア圏国際コンテナ貨物流動モデルを発展させ、日本国内の陸上輸送や内航海運によるフィーダー輸送も含めた総合的なアジア圏国際コンテナ貨物流動モデルを構築した。具体的には、既存モデルにおいては、日本国内・国外ともに港湾間の OD 貨物量を所与として、ネットワーク上の OD 交通量の配分問題として定式化したのに対し、本モデルにおいては、OD 貨物量の発着地を、日本国内においては各都道府県、国外においては各港湾として、国内フィーダー輸送網を表現するネットワークを追加した。これにより、既存モデルでは困難であった、日本国内における荷主やフォワーダーの利用港湾や船社グループの選択行動が表現でき、国内港湾間の競争や役割分担の分析や、あるいはそれらをふまえた港湾投資効果の判定が可能となる。

② 国際コンテナ市場における荷主やフォワーダー、船社の行動をふまえ、本モデルにおいて構築したネットワークの配分仮説として、5種類の配分仮説を用意し、現状再現性を比較した。その結果、ネットワーク全域を対象とした利用者均衡配分(UE)と、外貿部分のネットワークのみを対象とした船社グループごとのシステム最適配分(GSO)を交互に行う、UE-GSO 仮説が最も現状に適合し、再現性も高いとの結論を得た。

③ 本モデルを用いて、日本国内の陸上輸送や内航海運によるフィーダー輸送も含めた、国際コンテナ貨物流動の現状を分析した。また、簡単なシナリオ分析を行うことにより、日本国内の国際コンテナ貨物の需要やフィーダー輸送システムの変化、あるいは港湾への投資政策が国際コンテナ貨物の流動に及ぼす影響について考察した。

④ 今後の課題としては、たとえば以下の内容があげられる。本研究では、現状の国際コンテナ貨物輸送を表現するために、個々のコンテナが出発地から目的地までネットワーク上を移動するとの仮定のもとに、モデルを構築した。本モデルにおいては、各コンテナの待ち時間が船舶の寄港頻度の逆数で表現されているので、コンテナ輸送が船舶単位で行われることは考慮されているが、就航船舶数の制約やスケジューリングについては考慮していない。また、現状のコンテナ輸送では大きな課題となっている空コンテナの回送問題についても、本モデルでは明示的に考慮していない。今後は、これらの要素が表現可能なモデルを構築していく必要があると考えられる。

#### <参考文献>

- 1) MISHIMA,D., IEDA,H.: Container Flow Simulation Model of International Transport in Asian Region for Demand Estimation and Port/Shipping Policy Evaluation, *International Conference on Urban Engineering in Asian Cities in the 21<sup>st</sup> Century*, 1996.
- 2) 家田仁・柴崎隆一・内藤智樹: アジア圏コンテナ流動モデルとその配分原理に応じた特性比較, 土木計画学講演集, 1997.11.
- 3) 家田仁・柴崎隆一・内藤智樹・三島大輔: アジア圏コンテナ流動モデルの構築とその配分仮説に応じた特性分析, 土木計画学論文集, 1998.9.
- 4) IEDA,H., SHIBASAKI,R., NAITO,S., MISHIMA,D.: Model Development for East Asian Container Shipping considering Multifarious Use of Vessels and Ports, *8<sup>th</sup> World Conference on Transport Research*, 投稿中.
- 5) IMAI,A., NAGAIWA,K. and W.T.CHAN: Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia, *Journal of Advanced Transportation*, Vol.31, No.1, pp.75-94, 1997.
- 6) 黒田勝彦・楊賛・竹林幹雄: フィーダーサービスによるコンテナ貨物流動分析, 土木計画学研究論文集, No.14, pp.551-558, 1997.
- 7) 木村東一, 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.
- 8) 渡邊豊, 都市における輸出入コンテナ輸送に関する基礎的研究, 東京大学学位論文, 1993.
- 9) 稲村肇・中村匡宏・具滋永, 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, 土木学会論文集, No.562/IV-35, pp.133-140, 1997.
- 10) 貨物運賃と各種料金表 1995, 交通日本社
- 11) 全国輸出入コンテナ貨物流動調査報告書, 運輸省港湾局, 1993.
- 12) 国際貨物コンテナの国内海路輸送実態調査報告書, 日本コンテナ協会, 1997.

---

## 日本の国内輸送も組み込んだアジア圏国際コンテナ貨物流動モデル

家田 仁・柴崎隆一・内藤智樹

本研究では、これまでに筆者らが開発したモデルを発展させ、日本国内の陸上・海上フィーダー輸送も含めた総合的なアジア圏国際コンテナ貨物流動モデルを構築した。これにより、既存モデルでは困難であった、日本国内における荷主やフォワーダーの利用港湾や船社グループの選択行動が表現でき、国内港湾間の競争や役割分担の分析や、あるいはそれらをふまえた港湾投資効果の判定が可能となる。また、本モデルのネットワーク配分方法については、ネットワーク全域を対象とした利用者均衡配分と、外貿部分のネットワークのみを対象とした船社グループごとのシステム最適配分を交互に行う方法が現状を最もよく説明することを示した。

---

## An Asian-Range Model of International Container Shipping Including Domestic Transport in Japan

IEDA Hitoshi, SHIBASAKI Ryuichi and NAITO Satoki

The authors proposed an Asian-ranged model of international container shipping including domestic land / sea transport in Japan. In this model, we consider about the activities for domestic shippers or freight forwarders to select ports and shipping companies which they utilize. By the model, we can analyze the competition among ports in Japan, the role of each port and the effect of port improvement. And we chose GSO hypothesis as a assignment rule of the network, by the best fitness to reality, which is a complex method with user equilibrium assignment on the whole network and the per-group (of shipping company) system optimum assignment on international sea-flow.