

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*
*A Simulation Model of International Container Shipping in Eastern Asia
and Comparative Analysis of Network Assignment Rules**

家田 仁**・柴崎隆一***・内藤智樹***・三島大輔****

By IEDA Hitoshi**, SHIBASAKI Ryuzichi***, NAITO Satoki*** and MISHIMA Daisuke****

1. はじめに

近年、アジア諸国が経済的に急速に成長するにつれて、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。1990年代に入ると、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。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。一方、日本においては、阪神・淡路大震災の際に被災した神戸港から釜山港へ貨物の取扱が劇的に移転したことを受け、アジア諸港の発展に取り残されないための重点的な港湾投資が注目されている。

従来のコンテナ輸送に関する研究は、率直に言ってコンテナ輸送の現状分析を中心に行われてきた¹⁾。モデルを用いた解析的研究は数が限られており、その大部分もコンテナ船の運航スケジュールや船社や荷主の港湾選択行動を、整数計画法やゲーム理論によって解くもので、未だ十分実用的政策サジェスションを与えるレベルには至っていない^{2), 3)}。その中で、

Friesz の研究⁴⁾は、複雑な現状のフローパターンを、ネットワーク解析により再現しようとする点で、ラフではあるが先駆的であった。しかし、現実の広範囲にわたる国際コンテナ輸送問題をネットワーク上で扱い、港湾の施設レベルに応じた混雑効果や、船舶の「規模の経済性」を明示的に取り込んだ研究はみあたらない。

そこで本研究では、アジア圏の重要港湾群を対象として、港湾整備投資のような各種の政策が、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に与える影響を予測するためのモデルを開発する。本モデルはまた、データが存在しないために従来は困難であった、コンテナ輸送の流動状況の現状分析にも有効となる。

本研究では、はじめにモデルの基本構成を示す。次に、モデル内のリンクコスト関数を定式化し、関数中の変数の設定とパラメータの推定を行う。さらに、コンテナ輸送市場の性質を表現するいくつかの仮説を、現状再現性を見ることにより比較し、アジア諸港湾の特性をモデルの出力結果から分析する。最後に、モデルの応用例として、港湾パフォーマンスの改善効果のシミュレーションを行う。

2. コンテナ流動モデルの基本構成

(1) 港湾群及びコンテナ輸送のネットワーク表現

本研究の目的は、港湾間のOD貨物量を所与とし、現状のコンテナ輸送システムを前提として、船舶間のトランシップ(積替)と、異なるサイズの船舶の効率的な運用を含む、国際貨物輸送市場におけるコンテナ流動を再現すること、あるいは将来予測を行うことである。そこで、現状のコンテナの複雑な流動をネットワーク上の交通流に見立てて表現し、以下のようにノー

*キーワード: 物資流動、経路選択、港湾計画

**正員 工博 東京大学大学院社会基盤工学専攻 TRIP 交通研究室

***学生員 東京大学大学院社会基盤工学専攻 TRIP 交通研究室

(〒113 東京都文京区本郷7-3-1, TEL:03-3812-2111 ext.6119,

FAX:03-5800-6868)

****正員 工修 (株)東日本旅客鉄道

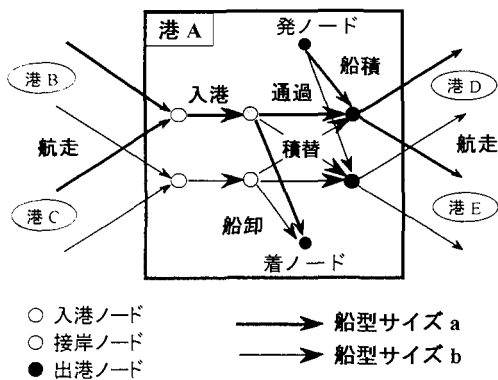


図-1 ネットワークの構成

ドとリンクを定義する。その概念図を図1に示す。

・ノード

- (1) 発ノード 各港ごと
- (2) 着ノード 〃
- (3) 入港ノード 各港, 船型サイズごと
- (4) 出港ノード 〃
- (5) 接岸ノード 〃

・リンク

- (1) 航走リンク 港湾間, 船型サイズごと
- (2) 船積リンク 各港, 船型サイズごと
- (3) 船卸リンク 各港, 船型サイズごと
- (4) 入港リンク 〃
- (5) 通過リンク 〃
- (6) 積替リンク 各港, 異なる船型サイズ間

リンクはフロー依存型コストを持つリンクと非依存型コストを持つリンクに分けられる。コンテナは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が輸送コストとして定義される。すなわち、本モデルは、各リンクのコスト関数が定義された、ネットワーク上の OD 交通量の配分問題として定式化される。

(2) リンクコストの性質

本モデルの特徴は、リンクコストの定義とネットワークの配分原理にある。リンクコストの定義においては留意すべき点が二点ある。第一は、各港のバース数の制約である。大型船は大水深のバースに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。コ

ンテナ船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の待ち時間が発生する。すなわち、入港リンクのコストはフローが増大するにつれて増加する。

一方で船舶には「規模の経済性」が作用する。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。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。

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、本モデルは、フローディペンデントなネットワーク配分問題を、たとえば Frank-Wolfe の最適化アルゴリズムを用いて解くことになる。ところで本モデルは、フローに対して減少するリンクコスト関数が存在するため、解が初期フローに依存し唯一性が保証されない。この問題に対しては以下のように考えることができる。もしコンテナ輸送市場が規模と集積の経済性によって支配されているとすれば、現実の輸送形態というのは、その歴史的経緯に依存するはずである。たとえば、香港やシンガポールといった巨大港の現在の地位は、地理的に有利な位置にあるという先天的な要因のみでは説明できず、早い時期から港が開発され経済が発展してきた歴史的事実に深く依存するはずである。また、そもそも将来予測というものは現状に立脚してなされるべきである。そこで本研究では、初期解としてコンテナ流動パターン(推定)現状値を使用することとする。

(3) ネットワーク配分原理の仮説

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、港湾間 OD 貨物量の配分原理を仮定する。最初に理想的な二つのケースについて述べる。ひとつは、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である。このとき、この意志決定者はネットワーク全体のコストの最小化を図るであろう。これがシステム最適(SO)と呼ばれる原理で、問題は全リンクコストの和を最小化するフローパターンを求めることに帰着さ

れる。もうひとつは、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した場合である。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であろう。この状況は個々のドライバーが自分自身のコストを最小化するように経路選択を行う、典型的な道路交通シミュレーションにおける利用者均衡配分(UE)により得られる状況と考えられよう。

実際のコンテナ輸送は、これら両極端のケースの間の、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。この現状を再現するために、船社グループごとのシステム最適(GSO)という配分原理を定義する。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。ここで、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、計算を繰り返す必要がある。これら3種類の配分原理を後で比較する。

(4) モデルの基本的仮定

本研究ではモデル構築上、以下を仮定する。

- ① コンテナの単位は TEU(20フィート換算コンテナ個数)を使用する。
- ② 対象港は日本の8大港を含むアジア圏の20港と、北米・欧州・豪州を表す3つの仮想港の合計23港とする。
- ③ 船型サイズは、コンテナ積載容量(船腹量)によって、4,000 TEU 以上、2,250 - 4,000 TEU, 1,000 - 2,250 TEU, 1,000 TEU 以下の4船型とする。なお、各カテゴリーの境界は、カテゴリー内の船腹量(TEU ベース)や船舶数が概ね均等になるように設定した。
- ④ 各港のバースを水深によって大小2種類に分ける。大水深のバースにはすべてのサイズのコンテナ船が接岸可能であるが、小水深のバースには 2,250 TEU 以下のコンテナ船(本研究のカテゴリーでは船型の小さい方から2種類)のみ接岸可能とする。
- ⑤ 船社グループは MAERSK 社(デンマーク)と SEA-LAND 社(アメリカ合衆国)のグループなど、8

船社グループを対象とする。この8船社グループの輸送シェアはアジア地域からの北米航路・欧州航路で8割以上、アジア域内航路で7割以上を占める。

- ⑥ 本ネットワークのノード・リンク数はそれぞれ322, 2668である。
- ⑦ 各リンクごとに、各種のコストを表現したリンクコスト関数を予め設定する。
- ⑧ リンクフローは、船社グループごとの港湾間あるいは地域間 OD 貨物量を所与として、3種類の配分原理の仮説(GSO,SO,UE)に基づいて計算される。GSO の場合は、入港リンクにおいて、船社グループ間におけるフローおよびコストの相互作用が生じる。
- ⑨ 本モデルの目的関数にはフローに対して多数の局地解が存在するため、本モデルは、初期値として現状のフローパターンを与えることで、現状にもっとも近い解を求めることとする。

3. リンクコスト関数の定式化とモデルの推定

(1) リンクコスト関数の定式化

国際コンテナ輸送船社へのインタビュー調査等による現状分析に基づいて、本モデルのリンクコスト関数を定式化した。航走リンクコストと入港リンクコストはフローディペンデントであるが、船積リンク、船卸リンク、積替リンク、通過リンクのコストはフローインディペンデントとなっている。航走リンクコスト関数は、全船社グループの合計フローに対する計算においても、船社グループごとのフローに対する計算においても同様に適用可能である。一方、入港リンクコスト関数は全船社グループ合計のフローに対してのみ意味を持つため、船社グループごとの配分を行う GSO では以下のような手順で計算することとする。①グループごとに配分計算し、②入港リンクにおける各グループのフローの和をとり収束判定を行い、③入港リンクフローの改訂をして、①に戻り計算を繰り返す。

(a) 航走リンクコスト

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4ランク)における ij 港湾間の航走リンクを a としたとき、1TEU あたりの航走リンクコス

トを以下のように定式化する。

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

ここで、

C_{1a} : 1TEUあたりの航走リンクaのコスト
(1,000円 / TEU)

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_i : 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 ($b_1, b_2 > 0$)

(1)式の第一項は1TEU あたりの船舶の金銭的費用を表し、運営費用には燃料費・人件費等、資本費用には船舶の減価償却費等が含まれる。大かっこの中の第一項は航走中のコンテナ船の運航所要時間に伴うコストを表し、第二項はリンク a を就航する船舶の運航頻度に依存する利便性の良し悪しに関するコストを表す。第二項のかっこ内は、平均運航間隔の1/2 である。ここで、荷主や船社は、コンテナ船の寄港スケジュールを考慮しながら調整して発送することを鑑みて、この利便性にかかわるコストの算定には、未知パラメータ b_1, b_2 を導入する。

(b) 入港リンクコスト

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1TEU あたりのコストを以下のように定式化する。

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

ここで、

C_{2a} : 入港リンク a における1TEUあたりのコスト

f_{pk} : 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)

$24 / h_i$ は、港湾の営業時間の制限がもたらす入港待ち時間の増幅を表現している。待ち行列理論によると、期待待ち時間は窓口の数と単位時間あたりの平均サービス率、単位時間あたりの利用者の平均到着率の3変数により表されるが、これは筆者ら^{6), 7)}により示されたとおり、べき関数で近似される。そこで、平均サービス率をコンテナの積卸や積替(トランシッブ)に要する荷役時間の逆数として、待ち時間を以下のように定式化する。

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

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

ここで、

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できる。

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

ここで、

q_{ak} : 全グループ合計の、港湾*i*における船型サイズ k (1,000 TEU以下: $k=1$, ..., 4,000 TEU以上: $k=4$)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

(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時間的費用(荷役時間)と金銭的費用(荷役料金)からなる。一方、積卸も積替もされないコンテナを表す通過リンクのコストは出発までの待ち時間のみである。よって、

$$C_{3a} = d_a \cdot f_{li} + v_i \cdot t_{anc} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、

- C_{3a} : リンク a の1TEUあたりのコスト
- f_{li} : 港湾*i*における1TEU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
 - = 0(通過リンク)
 - = 1(船積・船卸リンク)
 - = 2(積替リンク)

(2) 入力データの準備

本モデルの未知パラメータの推定計算には、リンクフローデータ、港湾間 OD 貨物量データ、リンクコストにかかる変数のデータ、の三種類のデータが必要である。しかし、コンテナ輸送市場においては、国際的かつ系統的な基礎統計資料が欠落していることや、データが船社の企業秘密扱いであることなどから、入手可能なデータが極めて限定されている。また、本モデルの対象地域が極めて広いため、独自の調査によってデータを収集することも現実的ではない。そこで、入手可能なデータを入力データとして加工する必要がある。

リンクフローデータについては、消席率を所与とすれば、コンテナ船の運航表(配船表)⁸⁾から、船社グループ別・船型サイズ別の航走リンクフロー(TEUベース)を求めることができる。消席率 f は船社へのインタビュー調査の結果、次のように定めた。すなわち、アジア域内航路においては全区間で $f = 0.8$ 、アジア圏から他地域への航路は、アジア域内では $f = 0.4$ 、アジア圏最終寄港港の出発時で $f = 0.8$ とす

る。船社グループごとの港湾間 OD 表は、多国間貿易統計、港湾統計や、部分的に得られる全船社合計の港湾間 OD 表等の、入手可能なデータを用いて算定する。(詳しくは Appendix を参照されたい。)リンクコストの変数については、系統だったデータはほとんど存在しないので、多くは船社へのインタビュー調査によりデータを収集し、文献⁹⁾などを一部参考にして求めた。

(3) リンクコスト関数中の変数の設定とパラメータの推定

(1)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年のものである。また、 b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , v_i は、コスト認知に関する未知パラメータで、以下に述べる手順で求めた。はじめに、船社へのインタビュー調査などをふまえて各パラメータの変域を想定する。その範囲内でパラメータを変動させ、航走リンクフローの誤差の二乗和(各パラメータ群ごとに求められるモデルの出力結果と、前項で述べた方法で作成した推定現状値)を計算し、最小化させるパラメータ群を選定する。この計算を各配分原理ごとに行う。この結果得られたパラメータも表1に示す。

計算によって求められた5種類の未知パラメータの感度分析結果のうち、GSO 仮説における例を図2に示す。コンテナの時間価値を表すパラメータや運航頻度にかかる利便性を表すパラメータにおいては、誤差に対する弾力性が 1/4 程度の値となっている。

表-1 設定された変数と推定されたパラメータ

船型サイズ (TEU)	v (ノット)	t_{anc} (時間/vessel)	$a1+a2$ (1,000円 /NM/vessel)	cap (TEU)
4000-	20	12	105	4260
2250-4000	20	12	83	2970
1000-2250	20	12	54	1530
-1000	20	12	28	580

配分原理仮説	v_i (1,000円/時間/TEU)	b_1	b_2	b_3	b_4
GSO	0.5	12.5	0.8	120	5
SO	0.8	14.5	0.7	120	5
UE	0.2	14.5	0.7	120	5

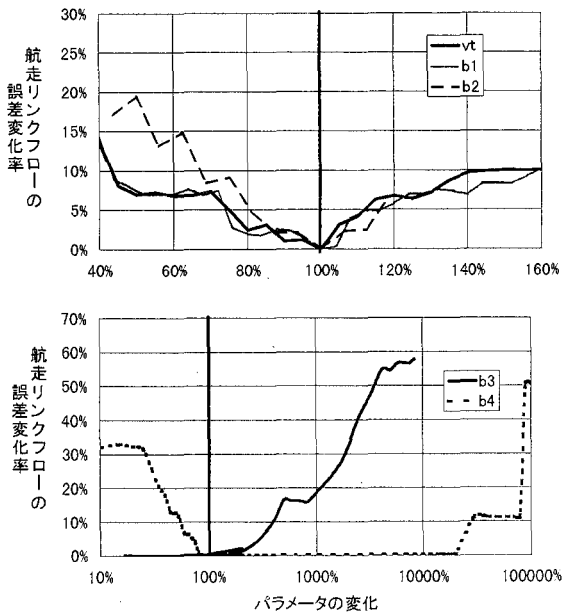


図-2 GSO 仮説下でのパラメータの感度分析

一方、入港リンクコストに含まれるパラメータの感度は極めて鈍く、多少のオーダーの変動では結果が変化しない。また、(3)式のかっこ内の値も非常に小さな値となっている。これより、現状では顕著な入港待ち混雑があまり生じていないことが推察され、事実上(2)式の第二項は無視しても差し支えないものと考えられる。

4. モデルの現状再現結果の考察

(1) 配分仮説の比較

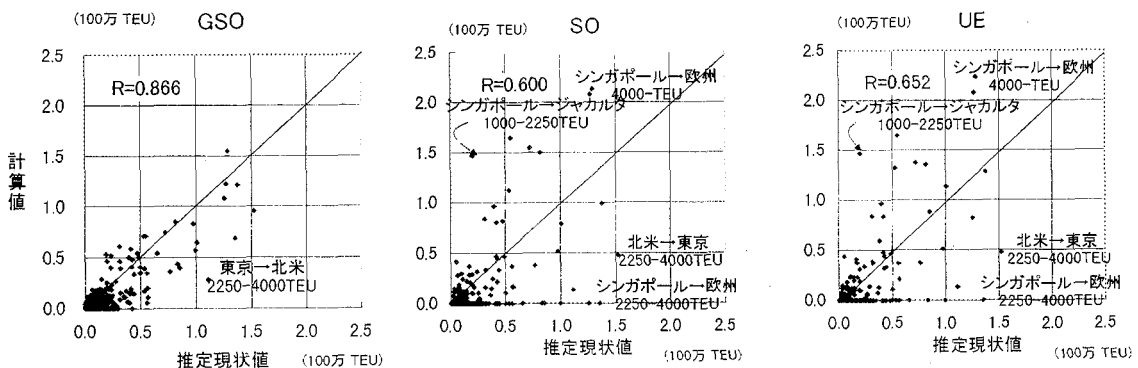


図-3 船型サイズ別航走リンクフローの推定現状値と各配分仮説に基づく出力結果の関係

前節で推定された、各配分仮説の下でのモデルの現状再現計算結果における総コストを比較すると、最も低かったのが SO で、ついで UE、GSO の順であった。GSO の総コストは SO よりも10%程度高かった。次に、3.2節で算出した船型サイズ別航走リンクフローの推定現状値と、各配分仮説に基づいた計算結果との比較を図3に示す。これをみると、GSO(船社グループごとの総コスト最小化)が明らかに現状に最も適合し、SO や UE では過大推計または過小推計されるリンクが多いことがわかる。フローの変動幅も、GSO や推定現状値に比べ、SO や UE では大きい。ゼロフローとなる航走リンク数、すなわち全くコンテナ船が就航しないリンクの数は、SO や UE では現状や GSO よりも10%から20%も増加する。すなわち、理想的な総コスト最小化(SO)や完全競争状態(UE)においては、より「規模の経済性」が追求され、特定のリンクにフローが集中する傾向があるといえよう。

各港の港湾取扱貨物量(輸出入貨物量+トランシップ貨物量)とトランシップ貨物量を、図4に示す。トランシップ貨物量については、香港と釜山ですべての配分仮説において過大評価されることがわかる。

(2) アジア諸港の特性分析

図5に、現状と GSO 仮説による港湾間コンテナフロー(両方向、全船型サイズの合計)を示す。フローパターンの全体的な傾向は、モデルにより概ね再現されている。ただし、たとえば、釜山—高雄、基隆—香港、神戸—北米、ポートケラン—欧州間や、日本の港湾間のリンクフローは、現状よりもモデルの出力結果が小さい。

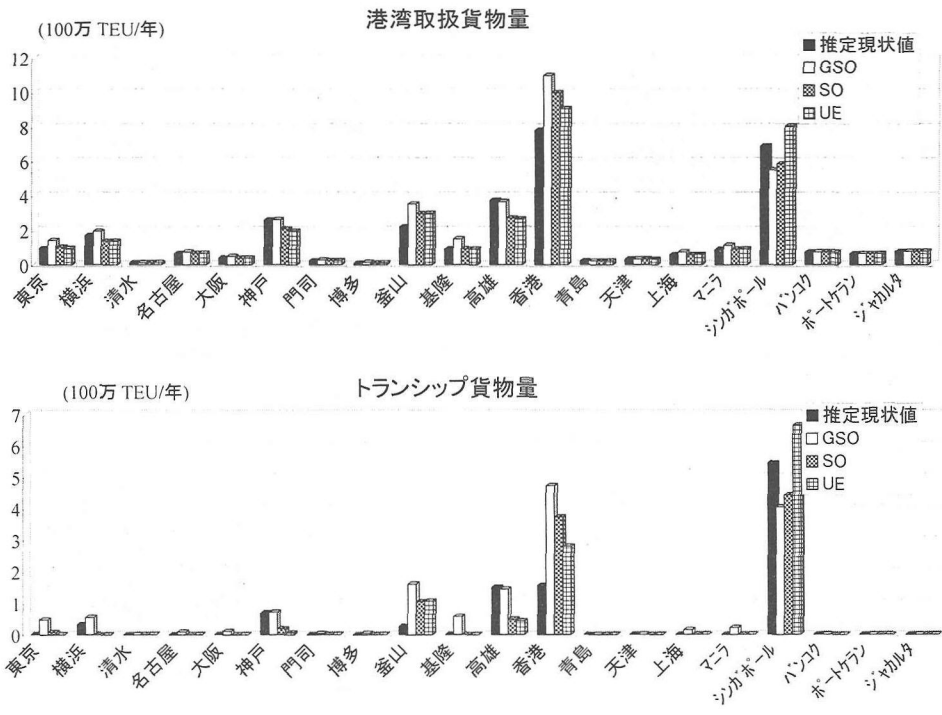


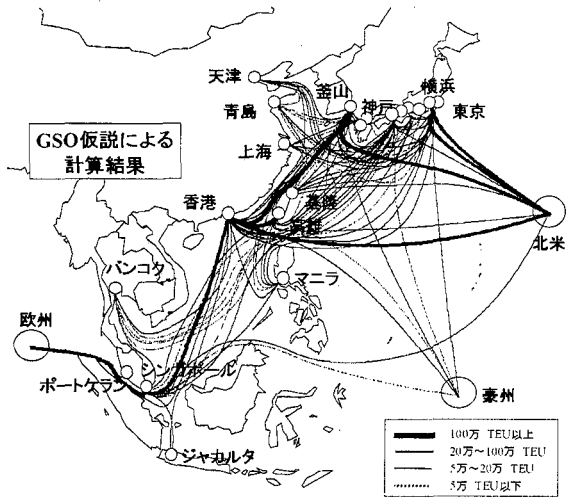
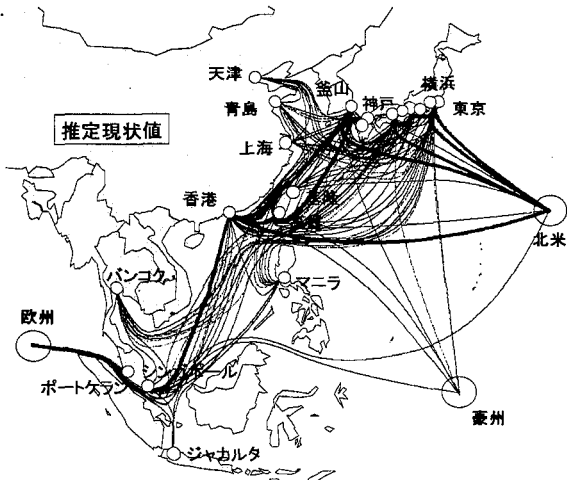
図-4 各港湾の港湾取扱貨物量とトランシップ貨物量

図6に、GSO 仮説の下に推定された、横浜とシンガポールの港湾内の現状のコンテナ流動を示す。ここに各港湾の特徴がよく表れている。横浜港では、トランシップ貨物量と通過貨物量の、港湾取扱貨物量に対する割合はそれぞれ29%、56%であり、またこの二つの、入港フローと出港フローの平均値に対する割合は、27%、53%である。一方、シンガポール港では、各数値は74%と44%、79%と47%であり、対照的な結果となる。図7に、トランシップ率(=トランシップ貨物量/港湾取扱貨物量)と、通過貨物率(=通過貨物量/(通過貨物量+港湾取扱貨物量))の関係を示す。アジアの巨大港湾においては、トランシップ率は非常に高いが通過貨物率は比較的低く、確かにハブ港の役割を果たしているといえる。ところが、日本の主要港湾においては、通過貨物率は高いがトランシップ率が低く、寄港タイプの船舶運用が主流となっていることがわかる。このため、トランシップも含めた港湾取扱量はあまり多くない割に、大型船が多数寄港するという構造になっていて、日本の港湾はこのような大型船の寄港に備えた投資をしていかなければならないことが示唆されている。そうでないと、大型

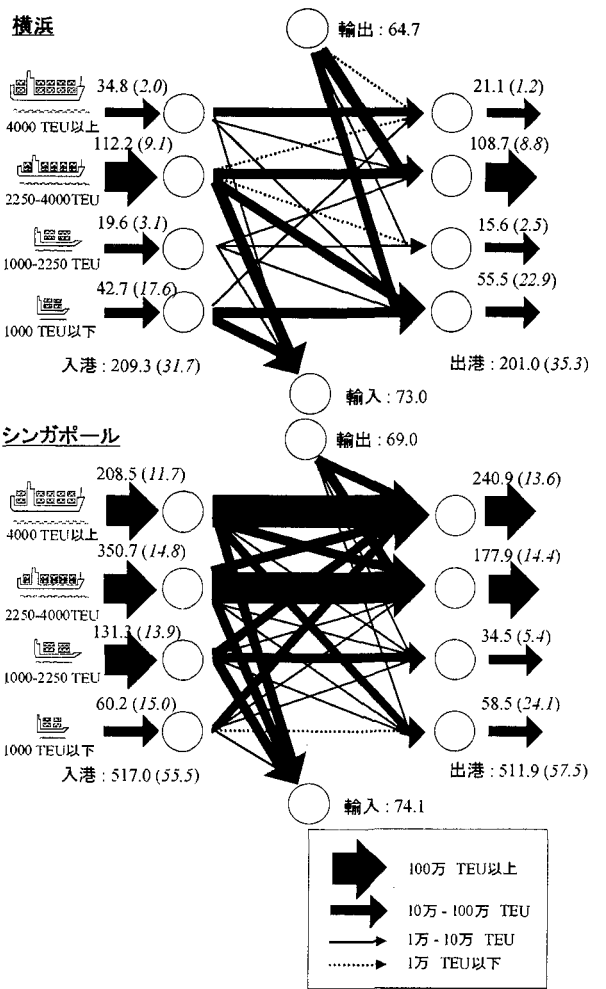
船の日本への寄港が減少し、日本の港湾の地位はセカンダリーポートに低下し、その結果日本の産業コストの上昇・競争力の低下をもたらすことが懸念される。

図8に、全航走リンクフローにおける、船型サイズの構成比を示す。すべての配分仮説の計算結果において、大型船舶の利用割合が現状よりも増加しているが、最も推定現状値に近いのは GSO となっている。現状が、船社の経営体質等においてまだ改善の余地のある状態にあると考えれば、今後、船社がさらに効率化を図るため、より徹底した共同運航体制を組んだり(GSO)、船社間の提携・合併を行った場合(GSO, SO)や、あるいはコンテナ輸送市場がさらに激しい競争状態に陥った場合(UE)は、船舶の大型化がさらに進むことが示唆されている。この大型化の傾向に対応できない港湾はとり残されて行かざるを得ない。

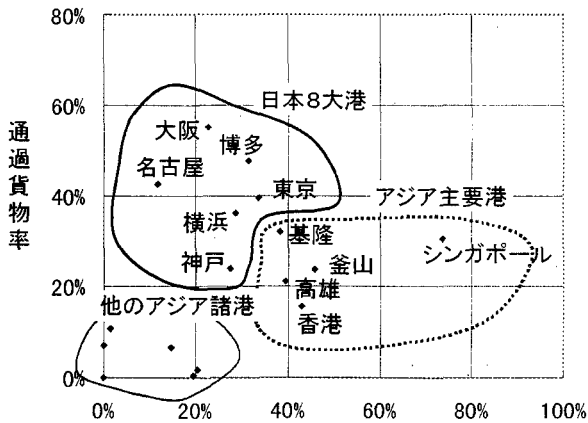
図9に、施設レベルの異なる、典型的な日本とアジア諸国の港湾における、入港フローと出港フローの和の、船型サイズの構成比(TEU ベース)を示す。その結果から、シンガポールや横浜といった大規模港



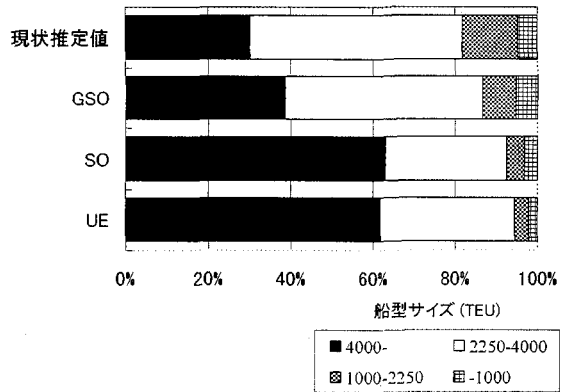
図—5 推定現状値とGSO仮説による計算結果の港湾間リンクフロー(両方向, 全船舶サイズの合計)



図—6 横浜港とシンガポール港における港湾内コンテナ流動の推定結果(単位:1万 TEU/年 (vessels/週))

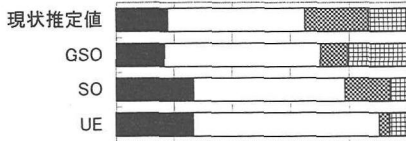


図—7 各港湾のトランシップ率と通過貨物率の関係 (GSO仮説による計算)

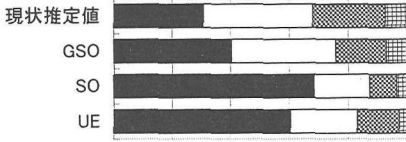


図—8 全航走コンテナフローの船型サイズ構成比 (単位:TEU-NM)

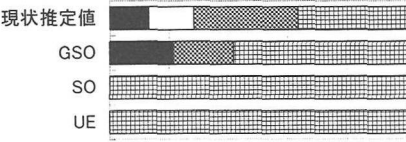
横浜



シンガポール



門司



上海

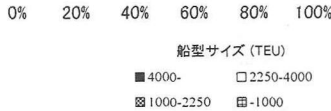
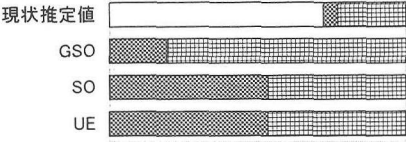


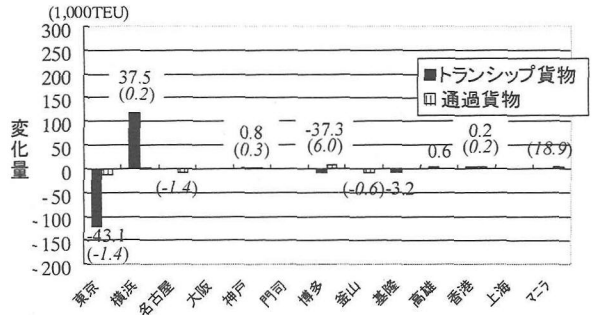
図-9 各港湾における入出港フローの船型サイズ構成比(TEUベース)

湾では、今後一層の大型化が予想されるのに対して、たとえば門司港や上海港は、現状の諸条件を前提にする限り、フィーダー港としての役割に特化し、小型船の利用が卓越していくことが予想される。

(3) 港湾パフォーマンスの改善シミュレーション

港湾整備などにより、リンクコスト関数中の各変数が改善された場合の影響を分析する。ここでは、例として、①横浜港の荷役時間(停泊時間)が50%短縮されるケース、②横浜港の荷役費が50%削減されるケースをとりあげる。この二ケースについて、それぞれGSOにより計算し、何も行わないケース①のGSOによる計算結果と比較した。その結果、トランシップ貨物量と通過貨物量に無視できない変化があった港湾について図10にケース①との差を示す。横浜港について改善したケース①、②については、ともに横浜

ケース①: 横浜港の荷役時間50%短縮の影響



ケース②: 横浜港の荷役費50%削減の影響

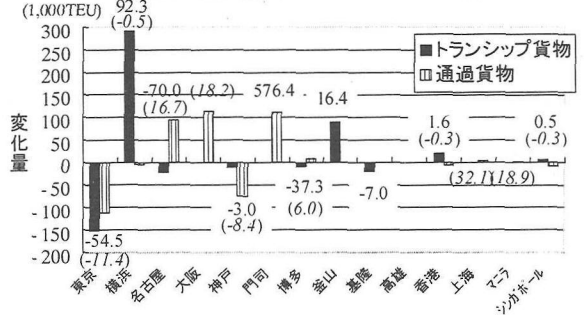


図-10 横浜港の港湾パフォーマンス改善の影響

(図中の数字はトランシップ貨物量の増減率(%), かつこ内は通過貨物量の増減率(%))

港のトランシップ貨物量が増加するが、ケース①では、単に東京港とのトランシップの取り合いになっているのに対し、ケース②では、改善効果の影響を受けトランシップ貨物量や通過貨物量が増加する港湾が、釜山港など広い地域にまで及ぶことがわかる。

次に、複合的な港湾パフォーマンスの改善効果の特性を分析するために、以下の仮想的な日本8大港湾の改善シナリオに従って、GSO 仮説の下に計算を行った。すなわち、大型バース数を50%増加し、入港費と荷役費を3割削減させ(日本の港湾諸費用は、アジア諸港に比べ現在2,3倍高い)、すべての港湾を24時間営業化する(東京や横浜等の大規模港湾も現状では24時間化されていない)。計算の結果、トランシップ貨物量と通過貨物量に無視できない変化があった港湾について図11にケース①との差を示す。これより、港湾間 OD 表が所与であるにもかかわらず、トランシップ貨物量や通過貨物量が少なからず変化し、コンテナのフローハターン、ひいては船舶の運航パターンも複雑に変化しているのがわかる。また、

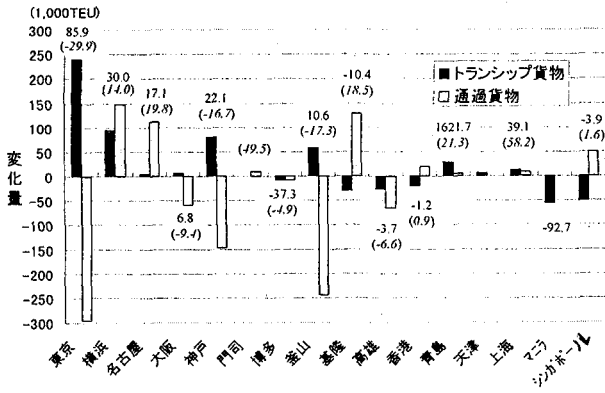


図-11 日本8大港湾の港湾パフォーマンス改善の影響

改善シナリオは日本の8大港湾を対象としたにもかかわらず、港湾取扱貨物量の上での効果は東京・横浜・神戸港のみで顕著にあらわれることが分かる。なお、アジア圏ネットワーク全体での総コストは、このシナリオにより1.1%削減されている。

5. 結論

- ① アジア圏を対象とした、総合的なネットワーク分析を主体とした、国際コンテナ流動を再現するモデルを構築した。本モデルを発展させることにより、現状のコンテナ輸送システムの評価や、港湾改善効果の予測が可能となろう。特にその定式化において、船舶の「規模の経済性」、コンテナのトランシップ、港湾混雑効果、各種港湾サービスのレベル、船社間のグローバルアライアンスが取り込まれていることが本モデルの特長である。
- ② コンテナ市場の特性をふまえた3種類の配分仮説の下に、モデルの計算を行った。その結果、船社グループごとの総コスト最小化原則に基づく計算(GSO)の結果が、もっとも推定現状値に適合することがわかり、再現性も概ね確かめられた。また、現状では入港時の混雑効果は無視しうるが示された。
- ③ 本モデルを用いて、アジアの主要港湾と日本の港湾との特徴の違い、特にトランシップと、異なるサイズの船舶の利用パターンの違いを分析した。そして、船社間の競争の激化やコストダウン志向によっ

て、各港湾がハブ港やフィーダー港に特化していく蓋然性を示した。また、港湾パフォーマンス改善が、トランシップの増加や海上輸送の集中化等の、広域的で複雑なフローパターンの変化といった影響をもたらすことを示した。

- ④ 限定されたデータをもとに、船社グループごとの港湾間 OD 貨物量(TEU ベース)や、船社別・船型サイズ別のリンクフロー等、コンテナ輸送市場に関する各種のデータを推定する手法を見出した。
- ⑤ 今後の課題としては、陸上輸送や内航海運を含めた国内の港湾選択行動を本モデルに内生化することなどがあげられる。一部は筆者¹⁰⁾により現在とりまとめられている。

Appendix

(1) 多国間 OD コンテナ貨物量(TEU ベース)の推定法

日本の各港発着のコンテナ貨物のうち、北米航路とアジア域内航路については、港湾間 OD 貨物量がトンベース¹¹⁾・TEU ベース^{12), 13)}ともに入手可能である(これを OD ペア A とする)。日本の各港発着で他の地域との間の航路上の港湾間 OD 貨物量(OD ペア B とする)は、トンベースのデータのみが既知であるので、これを北米航路やアジア域内航路における OD 貨物量のトン/TEU 比の平均を用いて、TEU ベースに変換する。OD ペア A と OD ペア B をあわせて、日本を O または D とするペアについての、TEU ベースの日本対多国間 OD 表が得られる(OD 表 a)。

日本以外の各国相互間の OD ペア(OD ペア C とする)については、トンベース・TEU ベースともに入手できないケースが存在するため、これについては、金額ベースの多国間貿易輸出入統計^{14), 15)}をもとに、以下の手順に従って求める。①各港のトランシップ貨物量(TEU ベース)を推定する。日本の諸港湾や釜山、高雄港等についてはトランシップ貨物量が得られる^{16), 17), 18)}。香港、シンガポール港についてはデータが得られないので、港湾取扱貨物量に、文献¹⁹⁾により得られたトランシップ率推定値を乗じた値を使用する。②各港湾について得られる、TEU ベースの積出貨物量(輸入貨物とトランシップ貨物の和)と積込貨物量(輸出貨物とトランシップ貨物の和)²⁰⁾から、

①で求めたトランシップ貨物量を引くことにより、各港湾のコンテナの輸入貨物量(TEU ベース)と輸出貨物量(TEU ベース)を求める。これを集計して、各国の輸入・輸出コンテナ貨物量(TEU ベース)を求める。

③金額ベースの多国間貿易 OD 表の各数値に、輸出国における総輸出貿易額と②で求めた輸出コンテナ貨物量(TEU ベース)の比と、輸入国の総輸入貿易額と輸入コンテナ貨物量(TEU ベース)の比の平均値を乗じることにより、TEU ベースの多国間 OD 表に変換する(OD 表 b)。

以上二つの TEU ベースの多国間 OD 表(OD 表 a および b)をひとつにまとめ、②で得られた TEU ベースの各国の輸入コンテナ貨物量と輸出コンテナ貨物量を発生量・集中度制約として、フレーター法により修正する(OD 表 c)。

(2) 港湾間 OD 貨物量(TEU ベース)の推定法

前述のように、OD ペア A に対しては、TEU ベースの港湾間 OD 貨物量が得られている(OD 表 d)。OD ペア B については、前項の手順で得られた多国間 TEU ベース OD 表(OD 表 c)を、各港湾間トベース OD 貨物量の、当該国間トベース OD 貨物量に対するシェアを用いて、TEU ベースの港湾間 OD 貨物量に細分化する(OD 表 e)。OD ペア C については、多国間 TEU ベース OD 貨物量(OD 表 c)を、出発港の港湾取扱貨物量(輸出貨物+輸入貨物+トランシップ貨物)が当該国内全港湾の総量に占めるシェアを用いて出発港別に細分化し、次に到着港についても同様の方法で到着港別に細分化して、港湾間 TEU ベース OD 貨物量を求める(OD 表 f)。以上三種類の OD 表(OD 表 d, e, f)をひとつにまとめ、港湾間 TEU ベース OD 表が得られる(OD 表 g)。

(3) 船社グループ別の港湾間 OD 貨物量の推定法

各港における各船社グループの利用実績をもとに、港湾間 TEU ベース OD 表(OD 表 g)を、各船社グループ別の港湾間 TEU ベース OD 表に振り分ける。まず、航走リンクにおける消席率をインタビュー調査等によって想定し、船社グループ別・船型サイズ別の航走リンクフローを計算する。次に、グループごとに港湾間リンクフローを全船型サイズについて足し合わせ、

これより、船社グループ k における港湾 i の全入港フロー $F_{in,k}^i$ と全出港フロー $F_{out,k}^i$ を求める。これら二指標 $F_{in,k}^i$ 、 $F_{out,k}^i$ は、船社グループ k の輸入・輸出それぞれにおける港湾 i の利用実績を表している。

そして、港湾間 TEU ベース OD 表(OD 表 g)における港湾 i の集中貨物量を、全船社グループ合計の入港フロー($\sum_k F_{in,k}^i$)に対する $F_{in,k}^i$ のシェアによって、各船社グループに振り分ける。同様に、 $F_{out,k}^i$ のシェアにより、発生貨物量を各船社グループに振り分ける。最後に、各船社グループ別の各港湾の集中貨物量・発生貨物量を制約とし、港湾間 TEU ベース OD 表(OD 表 g)を初期値として、フレーター法により各船社グループごとの港湾間 TEU ベース OD 表群(OD 表 h)を求める。

参考文献

- 1) Inamura, H., Ishiguro, K. and M.A. Osman: Asian container transportation network and its effects on the Japanese shipping industry, *IATSS Research*, Vol.21, No.2, pp.100-108, 1997.
- 2) Imai, A., K. Nagaiwa 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.
- 3) 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.
- 4) Friesz, T.L., J.A. Gottfried and E.K. Morlok: A sequential shipper-carrier network model for predicting freight flows, *Transportation Science*, Vol.20, No.2, pp.80-91, 1986.
- 5) 稲村肇・中村匡宏: 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.
- 6) 三島大輔: 港湾整備水準を考慮したアジア圏外貿コンテナ貨物流動シミュレーションモデルの開発, 東京大学修士論文, 1996.
- 7) 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 21st Century*, 1996.
- 8) 国際輸送ハンドブック, Ocean Commerce, 1996.
- 9) たとえば, Container Market Report. Market Statistics and Trends Container Tonnage, Maersk Broker, Copenhagen, 1st and 2nd quarter of 1996. など.
- 10) 内藤智樹: 国内フィーダー輸送を考慮したアジア圏コンテナ貨物流動モデルの開発とその応用, 東京大学修士論文, 1998.

- 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) Feeder and Short Sea Container Shipping, Drewry Shipping Consultants, 1995.
- 13) 世界の主要地域間定期船荷動き量調査報告, 海事産業研究所, 1995.
- 14) Yearbook of International Trade Statistics, United Nations, 1993.
- 15) Taiwan Statistical Data Book, Council for Economic Planning and Development, Republic of China, 1996.
- 16) たとえば, 横浜港統計年報, 横浜市港湾局, 1995. など, 日本の各港については港湾統計が入手可能である.
- 17) 海運統計要覧, 海運産業研究所, 大韓民国, 1995.
- 18) 平成5年度 世界のコンテナターミナル調査報告書, 港湾空間高度化センター, 1994.
- 19) 国際ハブ港湾に関する調査委員会資料, 運輸経済研究所, 1996.
- 20) Containerization Year Book, Emap Business Communications, 1993.

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

家田 仁・柴崎隆一・内藤智樹・三島大輔

アジア圏を対象として, 総合的なネットワーク分析を主体とした, 国際コンテナ流動を再現するモデルを構築した. モデルには, コンテナ輸送の特徴である船舶の規模の経済性やコンテナのトランシップ, 港湾混雑効果, 各種港湾サービスのレベル, 船社間のグローバルアライアンスを取り込んだ. また, コンテナ輸送市場の特性をふまえた3種類の配分仮説を提案し, そのうち船社グループごとの総コスト最小化原則に基づく配分方法が現状を最もよく説明することを示した. さらにモデルを用いて, アジア諸港湾の特性を分析し, 将来の環境変化による各港湾の蓋然的な動向や, 港湾パフォーマンスの改善による広域的かつ複雑なコンテナ流動パターンへの影響を示した.

A Simulation Model of International Container Shipping in Eastern Asia and Comparative Analysis of Network Assignment Rules

IEDA Hitoshi, SHIBASAKI Ryuichi, NAITO Satoki and MISHIMA Daisuke

The authors proposed an international container shipping model in Eastern Asia, based on a comprehensive network analysis. In this model, the scale economy of vessel size, transshipment of containers, congestion effect on ports, various factors pertaining to port performance and the global alliances of shipping companies are considered. Three hypotheses in traffic assignment based on the situation of the container market were tested, and it was concluded that the per-group system optimum hypothesis provided the best fitness to reality. Characteristics of Asian ports were analyzed and it was shown how the function of ports changes in future. It was also found that port improvement causes changes of wide range container flow-patterns.