

# 規模の経済と多層ネットワークを考慮した 海上コンテナ輸送モデルの開発と適用

石黒 一彦<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 神戸大学大学院海事科学研究科 (〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町5-1-1)

E-mail: ishiguro@maritime.kobe-u.ac.jp

港湾の機能を寄港する船舶の船型に応じて国際ハブ機能、地域ハブ機能、フィーダー機能の3種類に分けることにより、多層性を持つ輸送ネットワークのモデル化を行った。また、積み替えにおける規模の経済性を考慮することにより、現状のハブ&スポーク輸送の再現を試みた。本モデルは、規模の経済性を考慮したため、非凸非線形計画問題として定式化されている。その解法として、比較的簡便な分割配分法を改良した手法を提案した。解の最適性は保証されないが、初期値の与え方次第で実現性の高い解が得られる。現状ではモデルの再現性はそれ程高くないものの、モデル適用例として船舶の大型化の進展や燃料価格の上昇が海上コンテナ輸送ネットワークに及ぼす影響の推計においては妥当な結果が得られており、今後の発展性を示すことができた。

**Key Words :** multi-layer transportation network, economy of scale, transshipment, container cargo

## 1. はじめに

アジア域内の海上コンテナ輸送は、中小型船舶による直航輸送の他、ハブ港湾におけるトランシップを行うことによるハブ&スポーク型輸送、アジア北米航路やアジア欧州航路などの基幹航路の大型船舶による輸送が混在している。これらは一時的な競争状態ではなく、それぞれが荷主の支持を得てある一定のシェアを獲得するに至っており、定常状態に近いと考えられる。本研究では、このようなアジア域内における多様なサービスから構成される海上コンテナ輸送ネットワークを定式化し、船舶の大型化の進展および燃料価格の上昇が海上コンテナ輸送ネットワークに及ぼす影響を推計し、今後の海運・港湾政策検討に資する考察を行うことを目的とする。

本研究で提案するモデルは、西垣ら<sup>1)</sup>が提案している、物流量の変化に伴う規模の経済性による物流費用の変化を明示的に組み込み、広域物流拠点の適正な立地場所と規模を決定するモデルを、国際海上コンテナ輸送ネットワークに適用できるように、特に積み替えの表現を改良したものである。この点は、家田ら<sup>2)</sup>が国際コンテナ貨物を対象に、積み替えをノードではなくリンクで表現することで複雑な貨物流動を再現したモデルを参考にして、積み替えを考慮した輸送ネットワークモデルは、主に陸上輸送を対象とした研究が多い。地域間輸送の拠

点となる広域物流拠点に関する研究として、山田<sup>3)</sup>は物流拠点の配置と規模を同時に決定する手法を構築している。輸送費の面から立地問題を考察した研究では、Cooper<sup>4)</sup>が総輸送費を最小とするような複数施設配置を求めるために立地配分問題を定式化したものが先駆的とされている。以来、集配ターミナルの配置選択行動を内包した、都市内の集配活動のモデル化に関する研究<sup>5)</sup>や、宅配システムにおける広域物流拠点への集荷費用の最小化を評価基準とした集配センターの配置と輸送経路を決定するモデルを提案した研究<sup>6)</sup>がある。これらの研究では、積み替えは考慮されているものの、積み替えにおける規模の経済や、ネットワークの階層性が明示的に考慮されていない点が問題であり、本研究はこれらを考慮した点が特徴である。

## 2. 海上コンテナ輸送ネットワークの想定

### (1) 輸送ネットワークの多層性

本研究で想定する多層性を持つ輸送ネットワークの概要を図-1に示す。

#### a) 物流の結節点施設としての港湾

多数のトランシップ貨物を集める国際的なハブ港湾から末端の小規模港湾まで、港湾は機能別に分類できる。

本研究では広域をカバーする国際ハブ港湾、それに準ずる規模の地域ハブ港湾、長距離基幹航路の寄港が少ないフィーダー港湾の3種類を想定する。

貨物の発生集中場所は、各港湾の直背後地とする。発生集中地においては、最寄りの港湾を積み卸し港湾として利用し、港湾選択は行わないものとする。これらを輸送貨物の発生集中地点として発着ノードと定義する。

### b) 海上コンテナ輸送ネットワーク

港湾とそれらを結ぶリンクから構成される海上輸送ネットワークは、その機能により長距離基幹航路ネットワーク、地域基幹航路ネットワーク、フィーダーネットワークに分けられる。長距離基幹航路ネットワークは船型の大きな船舶によってアジア欧州間の主に国際ハブ港湾間を結ぶネットワークである。地域基幹航路ネットワークは中型の船舶による輸送ネットワークを想定しているが、地域内に限らず、アジア欧州間の輸送も行うネットワークとして定義する。アジア欧州間においては、長距離基幹航路ネットワークと地域基幹航路ネットワークのいずれでも輸送が可能とする。フィーダーネットワークは地域内輸送に限定した輸送ネットワークとして定義される。輸送単価は長距離基幹航路ネットワークが最も安く、フィーダーネットワークが最も高い。多くの港湾間において、フィーダーネットワークにより国際ハブ港湾までフィーダー輸送を行い、長距離基幹航路ネットワークを利用するか、地域基幹航路ネットワークを利用して直接長距離輸送を行うかの選択肢が用意される。

### (2) 物流費用における規模の経済性

#### a) 物流に関する諸費用

物流費用は、大きく固定費と変動費に分類することができる。固定費には減価償却費や固定人件費などが含まれる。コンテナターミナル等の物流施設では固定費の中でも施設などの減価償却費が大きな割合を占めるなど、固定費は全物流費用の大部分を占める。

#### b) 規模の経済性

物流需要は季節変動、週間変動、日変動が大きい、顧客のニーズに対して的確に応えるためには、需要のピークに合わせた施設整備が必要であり、コンテナターミナルや船舶などの稼働率は低くなりがちである。従って、取扱量を増やし稼働率を上げるなど効率的な運用を行うことができれば、物流単価を大幅に低下させられる。

機能が同じターミナルが複数ある場合には、ターミナルを集約化することによってターミナルの管理コストや業務人員数の削減が可能である。さらに、地域によっては共同配船が可能であり、これによってターミナル集約化と同様な効果が期待でき、いずれの場合においても規模の経済が働きやすと考えられる。

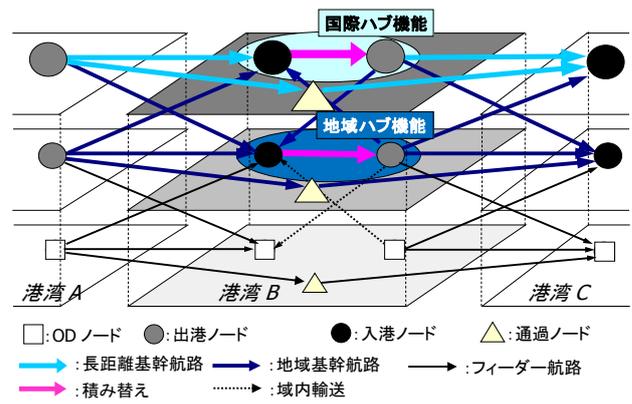


図-1 多層ネットワークの概要

## 3. モデルの定式化

### (1) 前提条件

#### a) 船社

現実には複数の船社が存在し、シェアも変動するものであるが、簡単化のために、単一の船社が、需要に対する全ての貨物を輸送することとする。これは、船社別に固定OD貨物量を与えているとの位置づけである。

#### b) 貨物特性

業種や品目別の貨物特性は考慮せず、コンテナの個数（TEU）のみを考える。

#### c) 輸送単位費用

輸送にかかる単位距離あたりの輸送費を船型別に与えることで規模の経済を表現する。具体的には、長距離基幹航路ネットワーク、地域基幹航路ネットワーク、フィーダーネットワークのそれぞれについて、地域によらず一定の輸送単位費用を設定する。

#### d) 港湾

国際ハブ港湾および地域ハブ港湾は、各地域に1つつ立地できるものとする。モデルの計算結果として、各地域において国際ハブ港湾および地域ハブ港湾の取扱量がそれぞれ求まることを想定する。結果としていずれの取扱量も0となった場合にはハブ機能は有さない港湾であると解釈する。同様に、地域ハブ港湾としての取扱量が存在するが、国際ハブ港湾としての取扱量が0となる港湾は、地域ハブ港湾であると解釈する。

#### e) トランシップ費用

港湾では取扱貨物量に応じて単位積替費用が変化すると考え、港湾での規模の経済を明示的に表現する。取扱量に応じた施設整備が迅速に行われることを想定し、混雑等による規模の不経済は考慮しない。

#### f) ネットワークの階層性

地域ハブ港湾でトランシップを行った後に、地域基幹航路ネットワークを通じて国際ハブ港湾に輸送された貨

物のみが、国際ハブ港湾でのトランシップを行えるものとする。

$$\frac{C}{q} = \frac{CF}{q} + CV \quad (2)$$

### (1) 輸送ネットワークの構成

本研究では、東・東南アジアと北欧州・地中海を対象地域とする。本モデルでの輸送ネットワークの特徴は、①一般的な輸送ネットワークにおいては1つのノードとして表現される港湾を、入荷と出荷のための2つのノードと、その間の積み替えを表すリンクで表現している点、②各地域に通過ノードを設定している点、③地域間輸送を行えるネットワークとして長距離基幹航路ネットワーク、地域基幹航路ネットワークの2階層構造を想定している点、④港湾での積み替えをリンクで表現する点の4点が挙げられる。

全ての地域にはノードとして発ノード、着ノード、3種類（長距離基幹航路、地域基幹航路、フィーダー航路）の通過ノード、国際ハブ港湾と地域ハブ港湾それぞれの入港ノードと出港ノードをすべて1つずつ設けてあり、それらが適宜リンクで結ばれている。

#### a) ノード

発ノードは貨物の発生ノード、着ノードは貨物の集中ノードであり、それぞれ貨物が通過しない端点である。ネットワークの各階層に対応した3種類の通過ノードは、隣接しない地域間で効率的な輸送が可能となるようにするための中継点である。貨物の積み替えを行う港湾の入港ノードと出港ノードは、各ハブ港湾にそれぞれ設けられている。

#### b) リンク

貨物の発生地点から同地域の地域ハブ港湾入港ノードの間と、地域ハブ港湾出港ノードと同地域内にある貨物の集中ノードとの間を結ぶリンクを域内輸送リンクとする。フィーダーリンクは各ハブ港湾以外の地域間輸送を表現したリンクである。

費用関数などの設定を容易にするために、規模の違う船舶間の積み替えを、距離を持たない積替リンクとして表現している。このリンクでは規模の経済が働く。

### (2) 費用関数

#### a) 港湾費用

物流費用 (C) は取扱量に依存しない固定費と、取扱量に依存する変動費の和として表される (式(1))。これを取扱量で除することにより平均費用 (式(2)) が得られる。取扱量が増えるほど、単位あたりの費用が逓減する。固定費の占める割合が大きければ大きいほど、規模の経済が強く働くことになる

$$C = CF + CV \cdot q \quad (1)$$

CF: 固定費, CV: 単位変動費, q: 取扱量

港湾の固定費の中には、管理施設や情報基盤など、初期投資額が規模にあまり依存しない施設があるため、全体としては規模の経済が働く。これを式(3)、式(4)のように定式化する。施設規模が大きくなるほど、固定費の平均費用は小さくなる。ただしいくら規模が小さくても最低限ある一定の施設が必要であるため、港湾を運営する上で最低限必要な費用を基準固定費として与え、ある最低取扱量までは固定費は一定であると考えられる。

$$CF(x) = \int \delta_1^{x-q_1} \cdot CF_1 dx \quad (x > q_1) \quad (3)$$

$$= \frac{CF_1}{\delta_1^{q_1} \cdot \log \delta_1} \cdot (\delta_1^x - 1) \quad (x > q_1) \quad (4)$$

$$CF(x) = CF_1 \quad (x < q_1) \quad (5)$$

CF(x): 固定費, CF<sub>1</sub>: 基準固定費

x: 施設規模, q<sub>1</sub>: 最低取扱量

δ<sub>1</sub> (<1): 単位費用逓減に関するパラメータ

変動費では人件費が大きな割合を占めるが、取扱量が多ければ作業の効率化や共同化により人員を削減できるため、やはり規模の経済が働く。固定費の場合と同様に、施設規模が大きくなるほど、単位変動費も小さくなる。ただし、単位変動費がゼロになることはなく、ある最低値に漸近するように定式化する。固定費と同様、ある一定の取扱量までは単位変動費は一定とする。

$$CV(x) = \delta_2^{x-q_1} \cdot CV_a + CV_b \quad (x > q_1) \quad (6)$$

$$CV(x) = CV_1 (= CV_a + CV_b) \quad (x < q_1) \quad (7)$$

CV(x): 単位変動費, CV<sub>1</sub>: 基準単位変動費

CV<sub>a</sub>: 単位変動費 (逓減項), CV<sub>b</sub>: 最低単位変動費

δ<sub>2</sub> (<1): 単位費用逓減に関するパラメータ

取扱量に対して常に適切な設備投資が行われる(x=q)と仮定すると、式(3)、式(4)、式(5)、式(6)、式(7)より費用関数は次のように表される。

$$C = CF(q) + CV(q) \cdot q \quad (q > q_1) \quad (8)$$

$$C = CF_1 + CV_1 \cdot q \quad (q < q_1) \quad (9)$$

これは、様々な施設規模に対応する費用曲線の包絡線

を結んだものである。この費用関数(式(8), 式(9))を取扱量で除することにより, 平均費用関数(式(10), 式(11), 式(12))が得られる。

$$\frac{C}{q} = \frac{CF(q)}{q} + CV(q) \quad (q > q_1) \quad (10)$$

$$= \frac{CF_1(\delta_1^q - 1)}{\delta_1^{q_1} \cdot q \cdot \log \delta_1} + \delta_2^{q-q_1} \cdot CV_a + CV_b \quad (q > q_1) \quad (11)$$

$$\frac{C}{q} = \frac{CF_1}{q} + CV_1 \quad (q < q_1) \quad (12)$$

#### b) 積み替え費用と輸送費用

積替リンクコスト(LC<sub>k</sub>)は, 単位重量あたりの費用とし, 港湾種類毎に固定費(式(3), 式(4))と変動費(式(10))の和で表すことができる。国際ハブ港湾と地域ハブ港湾では一つの港湾に対する規模あたりの従業者数も異なるため, 規模の経済の働き方に違いがあると考えられる。国際ハブ港湾は建設費などの固定費は大きい, 取り扱う貨物の量が多いことで, 規模の経済性が高いと考えられる。一方, 地域ハブ港湾は変動費の水準が高く規模の経済性は低いと考えられる。両港湾において費用関数の式体系は同じとするが, 異なるパラメータを用いて積替リンクコストを式(13)で表現する。

$$LC_{k_m} = \frac{CF_{m1}(\delta_{m1}^{q_{k_m}} - 1)}{\delta_{m1}^{q_{m1}} \cdot q^{k_m} \cdot \log \delta_{m1}} + \delta_{m2}^{q_{k_m} - q_{m1}} \cdot CV_{ma} + CV_{mb} \quad (13)$$

$k_m$ : 国際ハブ港湾( $m=1$ ), 地域ハブ港湾( $m=2$ )

単位輸送コストにあたる輸送リンクコスト(LC<sub>ij</sub>)は輸送単位費用と( $\beta_h$ )と距離( $d_{ij}$ )の積で表される(式(14))。

$$LC_{ij} = \beta_h \times d_{ij} \quad (14)$$

$h$ : リンク種別

(1: 長距離基幹航路, 2: 地域基幹航路, 3: フィーダー航路, 4: 域内輸送)

$ij$ : ノード

## 4. モデルの適用

### (1) データセットとパラメータ推定

Global Insightによる2008年コンテナ流動量推計値および2008年全国輸出入コンテナ貨物流動調査からODデータ

を作成する。これを基に, 現況再現性が最も高くなるようなパラメータの組み合わせを探索した。その際, 文献4において, 固定費と単位変動費の比率が500:1と示されていることや, コンテナターミナル会社へのヒアリングで得た運営費用などを参考とした。与えたパラメータを以下に示す。

#### a) 積み替えに関するパラメータ

・国際ハブ機能

固定費:  $CF_{1f}=8,273,700$ 円/日

単位変動費:  $CV_{1f}=16,545$ 円/TEU・日

最低単位変動費:  $CV_{1b}=1,450$ 円/TEU・日

単位変動費低減項:  $CV_{1c}=15,095$ 円/TEU・日

・地域ハブ機能

固定費:  $CF_{2f}=1,654,740$ 円/日

単位変動費:  $CV_{2f}=6,206$ 円/TEU・日

最低単位変動費:  $CV_{2b}=2,900$ 円/TEU・日

単位変動費低減項:  $CV_{2c}=406$ 円/TEU・日

#### b) 輸送に関するパラメータ

長距離基幹航路単位輸送費用:  $\beta_1=10.0$ 円/TEU・M

地域基幹航路単位輸送費用:  $\beta_2=20.0$ 円/TEU・M

フィーダー航路単位輸送費用:  $\beta_3=40.0$ 円/TEU・M

域内輸送単位費用:  $\beta_4=40.0$ 円/TEU・M

## (2) 解法

本研究では, ネットワーク交通量配分で広く用いられている分割配分法により輸送費用最小化に基づく港湾取扱量を求める。通常の方法では, 各回の配分の貨物量が少ないため, 規模の経済を享受するだけの貨物量がハブ港湾に集まらず, 明らかに高コストな解となる。そこで, 港湾での費用の中で大きな割合を占める固定費を初期配分時には著しく低く設定し, 一定の割合で固定費を高く更新しながら繰り返し計算を行う方法を提案する。この際, 一度配分が終了した段階で, 各港湾で取扱われた貨物量を次回更新された固定費を与えた費用関数に代入し, 初期積替単位費用として次回の分割配分で与え, 前回の貨物量より多く取扱われるまで一定であるとする。

## 5. 結果と考察

### (1) 現況再現性の確認

モデルにより得られた東アジア主要諸国のコンテナ取扱量の推計値を実績値とともに図-2に示す。規模の経済に関するパラメータが比較的敏感に働く定式化となっているようで, 中国, 香港, シンガポールなど, 現在のコンテナ取扱量が多い国・地域の推計値がより大きくなっている。逆に, 相対的に規模の大きくない国・地域については, 過小推計となっている。以降のケーススタディ

においては、モデルの現況再現性についての問題を踏まえつつ、各ケースの影響のみを抽出して議論するため、ここで現況再現のために用いた推計値をベンチマークとして用いることとする。

### (2) 船舶大型化による基幹航路の輸送コスト削減

船舶の大型化が進み、国際基幹航路および地域基幹航路の輸送コストが20%削減される状況を想定する。これは平均船型がおおよそ2倍に大型化されることに想定していることになる。その結果として得られた東アジア主要諸国のコンテナ取扱量の推計値をベンチマークの値とともに図-3に示す。地域内輸送におけるコスト削減は、直行輸送の減少とトランシップの増加をもたらす。従って、与えたOD貨物量は一定のままだが、港湾取扱量の合計はトランシップの増加の分だけ増加している。中国の規模が大きいため、規模の経済の効果により、中国の港湾により集中する結果となっている。日本については、対北米輸送におけるトランシップ貨物の増加がもたらされた結果、取扱量が増加している。また、日本欧州間の輸送については、中国でトランシップされる貨物が増加するが、規模の経済の効果によりトランシップ費用が低下し、全体としての輸送コストは低下している。

### (3) 燃料価格高騰による輸送コスト上昇

アメリカ合衆国政府がとりまとめているOK原油先物価格は、2000年初頭には1バレル約25ドルであったものが、2010年初頭には約81ドルと、10年で3倍以上に高騰している。その間、2008年には140ドルを超える価格にまで上昇したこともあり、今後もさらに上昇する可能性が考えられる。また、需給逼迫による原油価格上昇のほか、地球温暖化対策としての政策である燃料税増税や排出権価格上昇なども考えられ、今後の燃料価格は上昇する可能性が高いと考えられる。ここでは燃料価格が3倍に高騰した状況を想定する。その結果として得られた東アジア主要諸国のコンテナ取扱量の推計値をベンチマークの値とともに図-4に示す。すべての船型において輸送コストは上昇するが、相対的に大型船が有利となるため、結果としては船舶大型化による影響と同様の傾向となった。燃料価格高騰はそれ自身が船舶大型化による効率性向上への動機ともなる。ここで考慮した2つのケーススタディがいずれも同様の結果をもたらすことより、港湾取扱量において今回の推計結果のような傾向の変化が生じることは十分に考えられる。

## 6. 結論

本研究では、規模の経済と多層的なネットワークを考

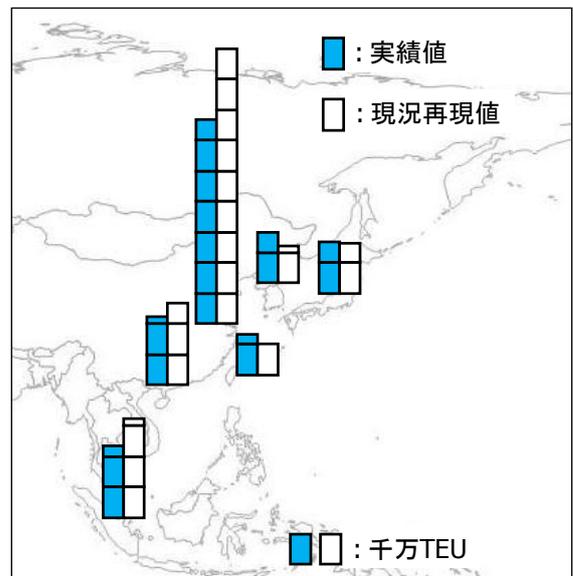


図-2 現況再現性

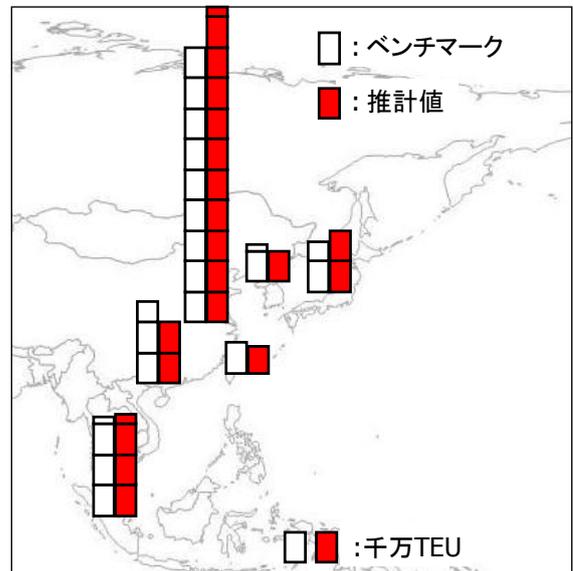


図-3 基幹航路輸送コスト削減の影響

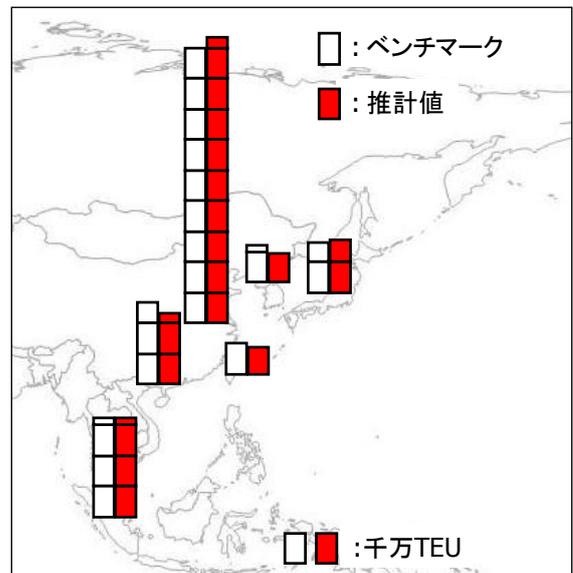


図-4 燃料価格高騰の影響

慮することにより現実に近い物流形態を表現した国際海上コンテナ輸送モデルを構築した。比較的簡便な分割配分法を応用した解法により、最適性は保障できないまでも受容可能な解を求めることが可能であることを示した。

今後はより現況再現性が高くなるようなパラメータの組み合わせの探索、各種政策のモデルにおける表現が課題として残されているため、それらの検討をさらに進めるとともに、モデルの定式化およびその解法についての精緻化も進めていく。

#### 参考文献

- 1) 西垣雅弘・石黒一彦・小谷通泰・秋田直也：規模の経済と多層ネットワークを考慮した広域物流拠点配置モデルの開発，土木計画学研究・論文集，Vol.26，No.4，pp.753-762，2009.
- 2) 家田仁・柴崎隆一・内藤智樹：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，土木計画学研究・論文集，No.16，pp.731-741，1999.
- 3) 山田忠史：道路交通システムから見た都市圏物流拠点の規模・配置計画に関する方法論的研究，京都大学博士学位論文，1998.
- 4) Cooper, L.: Location-allocation problem, *Operations Research*, 11, pp.331-343, 1963.
- 5) 家田仁・佐野可寸志・小林信司：詰合わせトラック物流における都市内集配送活動のモデル化とその推定，土木計画学研究・論文集，No.11，pp.215-222，1993.
- 6) 徳永幸之・岡田龍二・須田熙：宅配輸送におけるセンター配置及び輸送経路決定モデル，土木計画学研究・論文集，No.12，pp.519-525，1995.
- 7) 宮下國夫：日本物流業のグローバル競争，千倉書房，2002.
- 8) Imai, A., Papadimitriou, S.: A containerized liner routing in eastern Asia. *Infrastructure Planning Review*, 14, pp.843-850, 1997.
- 9) Leachman, R. C.: Port and modal allocation of waterborne containerized imports from Asia to the United States. *Transportation Research Part E*, 44 (2), pp.313-331, 2008.
- 10) Osman M. A., Inamura, H.: Port choice selection based on cargo physical distribution for export promotion. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2(1), pp.127-139, 1997.
- 11) Osman, M. A., Ishiguro, K., Inamura, H. : Container port location strategy based on domestic port choice modeling and optimal liner routing approach. *Infrastructure Planning Review*, 16, pp.627-636, 1999.
- 12) Shibasaki, R., Kadono, T., Ieda, H.: Model Improvement of International Maritime Container Cargo Flow and Policy Evaluation for International Logistics in Eastern Asia. *First International Conference on Transport Logistics*, Singapore, 2005.
- 13) Song, D., Zhang, J., Carter, J., Field, T., Marshall, J., Polak, J., Schumacher, K., Sinha-Ray, P., Woods, J.: On Cost-Efficiency of the Global Container Shipping Network. *Maritime Policy & Management*, 32 (1), pp.15-30, 2005.
- 14) Taniguchi, E., Noritake, M., Yamada, T., Izumitani, T.: Optimal size and location planning of public logistics terminals. *Transportation Research E*, 35(3), pp.207-222, 1999.