

国土技術政策総合研究所 研究報告

RESEARCH REPORT of National Institute for Land and Infrastructure Management

No.37

January 2009

東アジア圏を中心とした国際海上コンテナ貨物流動
シミュレーションモデルの構築

柴崎隆一・渡部富博

**Model Development of International Maritime Container Cargo Flow
Simulation Focused on Eastern Asia**

Ryuichi SHIBASAKI, Tomihiro WATANABE

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

東アジア圏を中心とした国際海上コンテナ貨物流動 シミュレーションモデルの構築

柴崎隆一*・渡部富博**

要 旨

近年、アジア地域の急激な経済成長に伴い、アジア地域を発着とする貿易や貨物量も急激に増加している。特に、海上コンテナについてみれば、近年、アジア各国・各港において大規模なコンテナターミナルの開発投資が行われ、港湾間・ターミナル間競争が激しくなっていることも背景に、各港のコンテナ貨物取扱量の伸びは著しい。一方で、同じアジア地域に属しながらも、日本の港湾や2007年に遂に上海港に抜かれ中国第1位の座を譲り渡した香港など、伝統的な港湾の中には地位が低下しつつあるものも見られる。

このような状況のなか、わが国を含め、東アジア地域の各国・各港湾は、ライバル港との競争に打ち勝ち、あるいは、自国港湾の相対的な地位低下に伴い、自国発着貨物の輸送や延いては自国産業の国際競争力という観点から不利益をもたらさないために、活発な投資や関連施策を実施している。このような政策実施の効果について効率的に議論を行うためには、政策実施が国際物流や各国経済に及ぼす影響について、定量的なシミュレーションを行うことができるモデルを用いることが有効であると考えられる。そこで本研究は、港湾投資や料金割引などハード・ソフト両面の様々な政策の実施により、東アジア地域における国際海上コンテナ貨物の流動がどのように変化するかをシミュレーションが可能なモデルを構築することを目的とした。

構築したモデルにより、現状の日本各港における輸出入貨物量やアジア各港におけるトランシップ貨物量をおおむね再現できた。さらに、港湾のリードタイムや利用料金などの政策変数を変化させることによって、各港の取扱貨物量の変化を分析した。得られた結果は、おおむね妥当と評価できるものであった。

キーワード： 国際海上コンテナ、流動モデル、東アジア、ネットワーク配分、港湾政策シミュレーション

* 港湾研究部主任研究官

** 港湾研究部港湾システム研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土技術政策総合研究所

電話：046-844-5028 Fax：046-844-6029 E-mail：shibasaki-r92y2@ysk.nilim.go.jp

Model Development of International Maritime Container Cargo Flow Simulation Focused on Eastern Asia

Ryuichi SHIBASAKI*
Tomihiro WATANABE**

Synopsis

Recently, due to rapid economic growths in Asian region, the volume of international trade and international cargo shipping from/to Asian region have also rapidly grown. In particular, growth rates of the volume of maritime container cargo handled in Asian ports become unexpectedly larger, due to much investment for development of new terminals and/or expansion of existing terminals as well as escalation of competition among neighbor ports and terminals. On the other hand, some traditional ports such as Japanese ports and Hong Kong which lost the first position in Chinese ports by port of Shanghai in 2007 have become less competitive.

Under this circumstance, East Asian countries and ports including Japan still invest to the port and implement related policies actively, in order to succeed in competition among rival ports or avoid to being disadvantaged in international competitiveness of country's industry. For efficient discussion on the effect of these policies, usage of a model which can quantitatively predict their impact on international logistics and economics of each country must be quite useful. In this paper, authors developed a model which can simulate what international maritime container movement in Eastern Asia will change, by implementation of various policies such as port investment and discounting port charges.

As a result, the model which can reproduce the actual situation in terms of the amount of container cargo handled in ports including export, import, and transshipment containers was developed. In addition, a validity of the developed model was confirmed by some policy simulation as sensitivity analysis to achieve reasonable results.

Key Words: international maritime container, cargo flow model, East Asia, network assignment, simulation for port policy implementation

* Senior Researcher, Port and Harbor Department

** Head of Port Systems Division, Port and Harbor Department

National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism
Nagase 3-1-1, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5028 Fax : +81-46-844-6029 E-mail : shibasaki-r92y2@ysk.nilim.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 既往の関連研究と本研究の特徴	1
2.1 港湾取扱貨物量の予測に関する既往の研究	1
2.2 荷主や輸送業者の行動を考慮したネットワークモデルに関する既往の研究	3
2.3 国際海上コンテナ輸送市場を対象としたネットワークモデルに関する既往の研究と 本研究の特徴	3
3. モデルの構成	4
3.1 モデルの全体構成	4
3.2 荷主サブモデル	5
3.3 外航船社サブモデル	8
3.4 荷主サブモデルと船社サブモデルの相互関係および収束計算の方法	18
4. 入力データの準備	20
4.1 モデル対象港湾・地域	20
4.2 地域間OD貨物量	21
4.3 海上・陸上輸送ネットワーク	22
4.4 輸送費用	23
4.5 輸送時間	24
4.6 現状フロー・港湾間OD等	25
5. 未知パラメータの推計とモデルパフォーマンスの検証	28
5.1 未知パラメータの推計方法と結果	28
5.2 モデル計算における収束状況の確認	30
5.3 モデル現状再現性の確認	33
6. モデルを用いた政策シミュレーション例	37
6.1 日本の主要港湾における搬出入時間等の短縮	37
6.2 日本および海外の主要港湾における搬出入時間等の短縮	37
6.3 日本の主要港湾における港湾利用諸料金の低減	37
6.4 荷主の時間価値変化のシミュレーション	39
6.5 シミュレーション結果のまとめ	40
7. 本研究の成果と今後の課題	41
7.1 本研究の成果	41
7.2 今後の課題	41
謝辞	41
参考文献	41
記号表	44
付録	46

1. はじめに

近年、中国をはじめとするアジア地域の急激な経済成長に伴い、アジア地域を発着とする貿易や貨物量も急激に増加している。特に、海上コンテナについてみれば、近年、中国をはじめとする各国・各港において大規模なコンテナターミナルの開発投資が行われ、港湾間・ターミナル間競争が激しくなっていることも背景に、各港のコンテナ貨物取扱量の伸びは著しい。表-1に示す2007年の世界の海上コンテナ取扱量ランキング（上位30港）をみると、上位5港をはじめ、30港中20港がアジア地域の港湾であることがわかる。特に、中国の港湾は9港がランクインしており、「世界の工場」であるという状況を如実に物語っている。また、ドバイ（8位、アラブ首長国連邦）やジャワハルラル・ネルー（24位、インド）を代表とする、中東や南アジアの港湾も最近急激に取扱量を伸ばしている。一方で、同じアジア地域に属しながらも、日本の港湾（東京の25位が最高）や2007年に遂に上海港に抜かれ中国第1位の座を譲り渡した香港など、伝統的な港湾の中には地位が低下しつつあるものも見られる。

このような状況のなか、わが国を含め、韓国・中国・アセアン諸国など、東アジア地域の各国・各港湾は、ライバル港との競争に打ち勝ち、あるいは遅れを取らないために、また、自国港湾の相対的な地位低下に伴い、自国発着貨物の輸送や延いては自国産業の国際競争力という観点から不利益をもたらさず、逆に優位性を得るために、活発な投資やさまざまな関連施策を実施している。では、はたして、このような政策の実施によりどの程度の効果が見込めるのだろうか？ その効果について効率的に議論を行うためには、これらの政策実施が国際物流や各国経済に及ぼす影響を、定量的に出力することが可能なシミュレーションモデルが非常に有効であると考えられる。そこで、本研究は、港湾投資や料金割引などハード・ソフト両面の様々な政策の実施により、東アジア地域における国際海上コンテナ貨物の流動がどのように変化するかについてシミュレーションが可能なモデルを構築することを目的とする。

本稿の構成は、下記のとおりである。はじめに、2.で本研究と同様の目的を持つ既往の研究を整理し、それとの対比において本研究の特徴を述べ、3.でモデルの基本的構成を述べる。4.で、実際に計算を行うために必要な入力データの内容と作成方法を述べ、5.で、実際にモデル計算を行い、モデルが実際に収束しているか、あるいは現状を再現できるか（現状再現性）について検証を行う。以上で構築されたモデルをもとに、6.で、感度分析的な政策シミュレーションとして、日本の主要港湾における貨物搬出入時間

（リードタイム）や利用料金の引き下げによる貨物流動変化シミュレーションの結果を示す。最後に、7.で本研究の結論および今後の課題について述べる。

表-1 海上コンテナ取扱量世界上位30港（2007年、Containerisation International March 2008による）

2007年 順位	2006年 順位	港湾名	国	2007年 取扱量 (万TEU)	対前年 増加率
1	1	シンガポール	シンガポール	2,790	12.5%
2	3	上海	中国	2,615	20.5%
3	2	香港	中国	2,388	1.4%
4	4	深圳	中国	2,110	14.2%
5	5	釜山	韓国	1,327	10.3%
6	7	ロッテルダム	オランダ	1,079	11.8%
7	8	ドバイ	UAE	1,065	19.4%
8	6	高雄	台湾	1,026	5.0%
9	9	ハンブルク	ドイツ	990	11.7%
10	11	青島	中国	946	22.9%
11	13	寧波・舟山	中国	936	32.4%
12	15	広州	中国	920	39.4%
13	10	ロサンゼルス	米国	836	-1.3%
14	14	アントワープ	ベルギー	818	16.5%
15	12	ロングビーチ	米国	731	0.3%
16	16	クラン	マレーシア	712	12.5%
17	17	天津	中国	710	19.3%
18	19	タンジュンペラパス	マレーシア	550	15.3%
19	18	NY/NJ*	米国	540	6.1%
20	20	ブレーメン	ドイツ	489	10.4%
21	21	ランチャバン	タイ	465	12.9%
22	22	厦門	中国	463	15.2%
23	24	タンジュンプリオク	インドネシア	390	8.3%
24	28	ジャワハルラル・ネルー	インド	389	26.3%
25	23	東京	日本	382	-3.8%
26	26	大連	中国	381	18.7%
27	32	ジョリアタウロ	イタリア	345	17.3%
28	25	アルヘシラス	スペイン	344	5.5%
29	29	コロンボ	スリランカ	338	9.7%
30	30	フェリクスター	英国	330	10.0%

*ニューヨーク・ニュージャージー

2. 既往の関連研究と本研究の特徴

2.1 港湾取扱貨物量の予測に関する既往の研究

本モデルのような、貨物需要（OD貨物量ともよばれる）を所与とし、輸送ルートやその一環としての各港湾の取扱量を出力することを目的とするモデルは、交通需要予測における4段階推定法¹のうち、最後の配分モデル（経路選択モデル）に該当するものである。この配分モデルには、本研究で応用するロジットモデルやネットワーク配分モデルを含め、様々な方法が存在する。以下では、港湾取扱貨物量の予測にこれまで用いられてきた手法を中心に概観する²。

¹ 4段階推定法の内容については、たとえば森地・山形¹⁾等を参照されたい。

² 海外の港湾需要予測のレビューについては、たとえば

港湾取扱貨物量の予測手法として最も原始的なのは、上記配分モデルには該当しないものの、これまでのトレンドを外挿して将来推計値とするものである。港湾貨物取扱量と各国や地域のGDPの間には、比較的強い相関関係が存在することが多いため、精度的にみればかならずしも悪い手法とはいえない場合もあるものの、説明変数がGDPなどの社会経済状況を示す指標などに極端に限られるため、本研究の目的でもある、さまざまな政策実施効果のシミュレーションが困難であるという問題点がある。同様の問題は、より多くの説明変数を考慮可能な、多変量解析等の計量経済的手法に基づく予測においても指摘できる。これは、これらのモデルが、投資やソフト的施策によってインフラの利便性が向上した際に、荷主や船会社がどのように行動を変えるのかという点を考慮していないことに起因する。

そこで、荷主や船会社の行動を考慮可能なモデルが、先に述べた配分モデルの主流となる。最も単純な配分モデルは、費用（あるいは所要時間など）が最小となるルートにすべての貨物が配分されるという、最短経路探索³に基づく考え方である。これは、ルートごとに、すべての貨物が配分されるか、ゼロとなるかという二者択一のため、All or nothing配分、あるいは確定的配分とよばれることもある。この場合、モデル化は非常に簡単であるものの、何らかの政策が実施された結果、あるルート（港湾）の費用が他のルート（港湾）よりも、ほんの僅かでも有利になっただけですべての貨物が改善されたルートを利用することになり、政策シミュレーションとして用いるには不十分であることが多い。

貨物流動パターンがこのように極端に変化しないよう工夫されたものが、ロジットモデル⁴に代表される確率的配分モデルや犠牲量モデル⁵等の重ね合わせの配分モデルである。確率的配分モデルは、モデル構築者が観測できない要因などにより、各貨物は、最少費用のルートだけでなく、ある一定の確率で多少費用の高いルートも流れると仮定するものである。また、犠牲量モデルは、たとえば貨物の時間価値にばらつきを認めることで、様々なルート選択パターンを産み出すものである。これらのモデルは、構成がシンプルで直観的に理解しやすいという点、場合によっては高い

再現精度を実現することも可能であることから、港湾局における需要予測⁶など、特に実務において用いられることが多かった。しかしながら、予め選択肢（予想利用ルート）を与える必要があることから、部分的（地域限定的）な分析にとどまることが多く、政策実施によりどの程度遠方まで効果が波及するかなど、大規模な計算には不向きである。また、これらはあくまで荷主側のモデルであり、船社の行動は考慮されないかアプリアリ（先験的）に与えられる程度であることから、船社の行動に影響を与えるような政策のシミュレーションには不十分であり、計算も煩雑になる、などの課題がある。

一方で、船社の行動モデルに着目した研究としては、寄港地選択問題を整数計画法などを用いて厳密に解くことや、あるいはGA（遺伝的アルゴリズム）等のいわゆるヒューリスティックな解法を用いて解くことなどが試みられている⁷。しかしながら、これらのモデルについても、大規模な計算を行おうとすると、モデルの構造的に選択肢が非常に多くなってしまふことなどから、困難が多いものと思われる。

⁶ たとえば、国土交通省港湾局⁷や渡部ら⁸を参照されたい。ここでは、日本国内発着貨物の輸出入港湾選択問題に対しては犠牲量モデルが、海外発着貨物のトランシップ港選択問題に対してはロジットモデルが適用されている。渡部ら⁸には各モデルの概要も示されている。

⁷ 船会社の行動モデルについては、Christiansen et al.(2004⁹), 2007¹⁰)やHaralambides¹¹)によくまとめられている。このうちChristiansen et al.¹⁰)では、戦略計画決定段階（Strategic planning：輸送ネットワーク・ハブ港や寄港地の決定）と戦術計画決定段階（Tactical Planning：投入船舶やスケジュールの決定）に分けて定航船の典型的なモデルを紹介している。また、Haralambides¹¹)によれば、これらのモデルを難しくしている決定的な要因は、船舶に積まれるコンテナにとっての最適解が船舶のそれとは一致しない点にあると指摘している。これらの文脈で本研究を整理すれば、本研究で提案するモデルは、船舶数一致制約を緩和し船舶スケジューリングの最適化を諦めるというように、船舶よりはコンテナのフローに着目して、ハブ港や寄港地の決定といった戦略計画と投入船舶サイズという戦術計画の一部を同時に求めるモデルと位置づけられる。

なお、近年の船会社の行動モデル研究の例としては、東南アジア航路¹²)や北米航路¹³)を対象に最適船舶サイズを求めたもの、寄港地とスケジューリングの同時決定問題とヒューリスティックな解法を提案しアジア＝欧州航路に適用したものの¹⁴)などがあげられる。また、船社の行動モデルではないが、Kim et al.¹⁵)は、政府の立場から、韓国国内の国際海上コンテナ輸送ネットワークの最適化問題を混合整数計画法によって解いている。我が国における船会社の行動モデル研究の代表例としては、竹林・黒田ら¹⁶)によるアジア発着各航路の寄港地選択問題を厳密解法によって解いたもの、新谷・今井ら¹⁷)による空コンテナを考慮した寄港地選択問題をGAによって解いたもの、などがあげられる。

Meersman et al.²⁰)などにまとめられている。

³ 最短経路探索を実行するための代表的なアルゴリズムとしては、ダイクストラ法やラベル修正法などがある。詳しくは土木学会²¹)や8.1節や久保²²)4章（ダイクストラ法のみ）等を参照されたい。なお、本モデル内での最短経路探索計算はラベル修正法を用いている。

⁴ ロジットモデルの詳細については、交通工学研究会²³)や土木学会²⁴)を参照されたい。

⁵ 犠牲量モデルの詳細については、前出の森地・山形²⁵)等を参照されたい。

2.2 荷主や輸送業者の行動を考慮したネットワークモデルに関する既往の研究

港湾貨物流動量の予測に限らず、本研究で構築するような、荷主と輸送業者の行動やその相互作用を考慮したネットワークモデルの代表的なものとして、Crainicらによって開発された、輸送業者の側に立った戦略的輸送計画モデルSTAN¹⁸⁾⁻²²⁾や、Frieszらによって提案された荷主と輸送業者の段階モデルであるFNEM^{23),24)} (Freight Network Equilibrium Model: 貨物ネットワーク均衡モデル)、あるいはその発展形としての両者の同時均衡モデル²⁵⁾およびGSPEM^{26),27)} (Generalized Special Price Equilibrium Model: 一般空間価格均衡モデル)などがあげられる⁸⁾。Friez and Kwon²⁸⁾によれば、FNEMやSTANは、米国やカナダ等の政府機関によって今なお利用されている一方、GSPEMについては、Crainic et al.²⁰⁾⁻²²⁾も指摘するように、計算量が膨大になることなどから実用化が難しく、実問題への適用例は、Frieszら自身による米国における石炭産業と鉄道輸送を対象とした例³¹⁾に限定される。最近では、より高度な理論モデルの開発と簡単な仮想ネットワークを対象とした数値実験が主流となっている³²⁾⁻³⁵⁾。

一方で、現実の貨物流動を表現するモデルとしては、上記のFNEMやSTANのようなネットワークモデルに加え、単純な非集計モデルや最短経路探索モデルも用いられている³⁶⁾⁻³⁸⁾。また近年では、計算機性能の急激な進歩を背景に、サプライチェーン全体を数理的に最適化することを目的としたロジスティクス・ネットワーク設計モデル^{21),39),40)}に関する研究も行われるようになってきている。これは、製品の原材料生産から最終商品の配送までを含む大規模なサプライチェーンネットワーク上で、各製品の集配拠点や工場の配置や生産量を決定するモデルであり、STAN等と同様、輸送業者の側に立った全体最適化モデルと位置づけられる。これらのモデルは、各貨物の実情などが捨象された抽象的なモデルとの批判⁴¹⁾もあるものの、大規模な実ネットワークに適用することを目的に解法の開発が行われており、実用的なアプローチといえるだろう。

2.3 国際海上コンテナ輸送市場を対象としたネットワークモデルに関する既往の研究と本研究の特徴

前節までで見たように、実問題への適用を念頭に置いたモデル化においては、①実務上有効であるために、ある程度まとまった数の政策変数や対象地域をカバーし、②モデ

ル系全体がなるべく理論的に整合しているという条件のもとで、③現実的な所要時間内で計算可能であること、が必要となる。国際海上コンテナ輸送市場は、輸送会社(船社)の数がある程度限定されており(=寡占市場)、輸送会社数に依存する部分の計算量が少なく済むことから、FNEMのように荷主と輸送業者の双方の行動を考慮したネットワークモデルが、広範な対象地域かつ政策変数を多く含む実現可能なモデルとして有効と考えられる。

実際の国際コンテナ貨物流動を対象に、上記のようなネットワークモデルによって表現することを試みた研究として、稲村ら⁴²⁾、家田・柴崎ら^{43),44)}、黒田・竹林ら⁴⁵⁾などがある。このうち、稲村ら⁴²⁾においては荷主と船社の均衡の概念は存在せず、家田・柴崎ら^{43),44)}は、同一のネットワークに対し荷主と船社のいずれか一方の行動原理を仮定して比較するにとどまっている。また、黒田・竹林ら⁴⁵⁾においては、荷主と船社の同時均衡をモデル化しているものの、無数の船社による完全競争市場を仮定した計算となっており、国際コンテナ貨物輸送市場は寡占状態であるという現状を反映していない。

そこで本研究は、家田・柴崎ら^{43),44)}において構築された輸送ネットワークをベースとしつつ、無数の荷主と少数の船社グループから構成される国際コンテナ貨物市場において、荷主による各自の貨物輸送コストの最小化行動と各船社グループによる自グループの利潤最大化行動の結果、相手の行動を変えることなしに自分の行動をこれ以上最適化することができない、いわゆるナッシュ均衡状態にあると想定し⁹⁾、コンテナ貨物を配分するモデルを構築するものである。具体的には、荷主サブモデルにおいては、シンプルながらも再現精度の高いロジックモデルのような確率的配分モデルと計算が簡便な確定的な最短経路探索モデルの両者のメリットを生かすため、確率的ネットワーク配分モデルに基づく段階的選択モデルを構築する。また、船社サブモデルについては、大規模ネットワークにおける計算可能性を優先し、ベルトラン型寡占市場モデルに基づく収入最大化モデルと、システム最適ネットワーク均衡配分モデルに基づく費用最小化モデルに分割して、均衡解を求めることとする。

⁸⁾ これらのモデルの特徴の比較については、Friez and Kwon²⁸⁾を参照されたい。我が国においても土木学会³⁾や松本・渡辺²⁹⁾等で紹介されている。また、我が国における空間価格均衡モデルの例としては、溝上³⁰⁾があげられる(ただし溝上³⁰⁾は、ネットワーク型均衡モデルではない)。

⁹⁾ 本研究のモデルとFNEMの最大の違いは、均衡を想定した荷主・輸送業者両モデルの繰り返し計算を行うか否かにある。一方で、本モデルは、大規模ネットワークにおける計算可能性を優先し、GSPEMのように同時最適化計算を行うモデルとはせず、段階的に両モデルの均衡解を求めるものとする。

3. モデルの構成

3.1 モデルの全体構成

本モデルは、図-1に示すように、地域間貨物需要（OD貨物量）や水深別バース数や利用料金などの各港湾のサービスレベル、さらには輸送ネットワークに関する情報（輸送費用・時間など）を所与として、海上および陸上のコンテナ貨物の輸送パターンを出力するものである。この出力を、港湾ごとに集計すれば、港湾別の取扱量やトランシップ貨物量が算出できる。

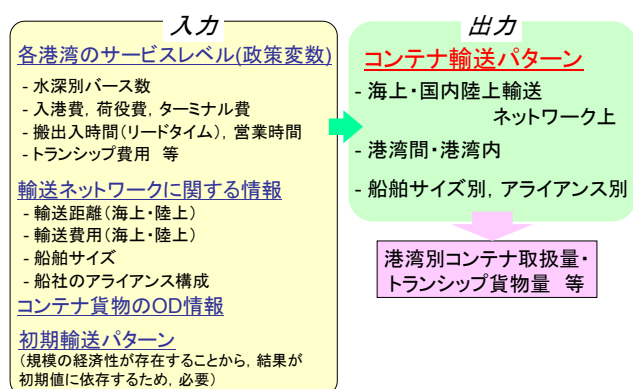


図-1 本モデルの入力と出力

図-2 に本モデルの全体構成を示す。前章でも触れたように、本モデルにおいては、国際海上コンテナ貨物輸送市場の主たる行動主体である「荷主」と「外航船社」の行動に着目する¹⁰。両者は、図-2 に示されるように、地域間貨物需要を所与として、航路ごとの運賃・所要時間や需要等によってたがいに関係付けられるなか、それぞれ異なる原理（目的関数）にしたがって最適化行動をとり、相手の行動を所与とした場合、最終的に自己の目的関数をこれ以上最適化することのできない、ナッシュ均衡状態に至ると仮定される。

「荷主」は、個別の貨物ごとに、各外航船社グループが提示する航路別運賃や所要時間も参照しながら、費用や輸送時間にくわえ、モデル構築者が観測できない要因も含めた「認知された一般化費用」が最小となるように、輸出入時の利用港湾や海上輸送における外航船社を選択する。そこで、モデル構築者が観測できない要因も誤差項として含めることが可能な確率配分型のモデルを採用し、輸出入利用港湾の選択と外航船社グループの選択の2段階の選択行動モデルを構築する。このうち、第1段

階（下位問題）の外航船社グループ選択問題においては、ロジットモデルを適用する。また、第2段階（上位問題）の港湾選択問題においては、通常のロジットモデルでは選択肢が膨大になり計算が困難になることから、確率的ネットワーク配分モデルを適用する。なお、第2段階では、第1段階（下位問題）の船社グループ選択の行動結果が、全船社合計の合成された航路別費用として組み込まれる、いわゆるネスティッド・ロジット型のモデルとなっている。

一方、「外航船社」は、貨物需要を所与として、アライアンス（外航船社グループ）ごとに利潤が最大となるよう行動するものと仮定し、自グループの利潤（＝収入－費用）が最大となるように、他グループの行動（運賃等）や荷主の船会社選択行動を考慮しながら、海上輸送経路（寄港地やトランシップ港）や輸送船舶サイズ、航路別運賃等を決定するものとする。ここでは、後で述べるように、利潤最大化行動を直接解くことが難しいため、航路別の収入最大化問題と総費用最小化問題に分割して解くものとする¹¹。収入最大化問題については、各グループの航路別輸送費用・時間や他グループの運賃、荷主の船社選択行動を所与として自グループの収入が最大となる運賃を決定する¹²。これは、サービスレベルが異なるという差別化された財における寡占市場下の価格競争モデル（ベルトラン均衡モデル）と位置づけられる。また、総費用最小化問題については、各グループの航路別貨物需要を所与として、自グループの総輸送費用が最小となるように、輸送経路やサイズなどの輸送パターンを決定する。この問題には、リンクフロー依存型コストを持つシステム最適ネットワーク均衡配分モデルを適用する。

¹⁰ このほかの行動主体として、「フォワードヤード」、「港湾オペレーター（港湾運送事業者）」や「陸上輸送業者」なども存在するものの、モデルの簡略化のためここでは割愛する。

¹¹ ただし、後述するように、この解法は、一方を固定してもう一方を解くことを繰り返すことによって収束解を得るというものであり、ここで得られた解もナッシュ均衡解（局所解）に相当するため、実行可能解の中で最も利潤が大きくなっているという保証はない。

¹² このようにして得られた各船社グループの航路別運賃も、他グループの運賃決定行動を所与とした場合にこれ以上収入を最大化することができないという意味で、ナッシュ均衡解に相当する。

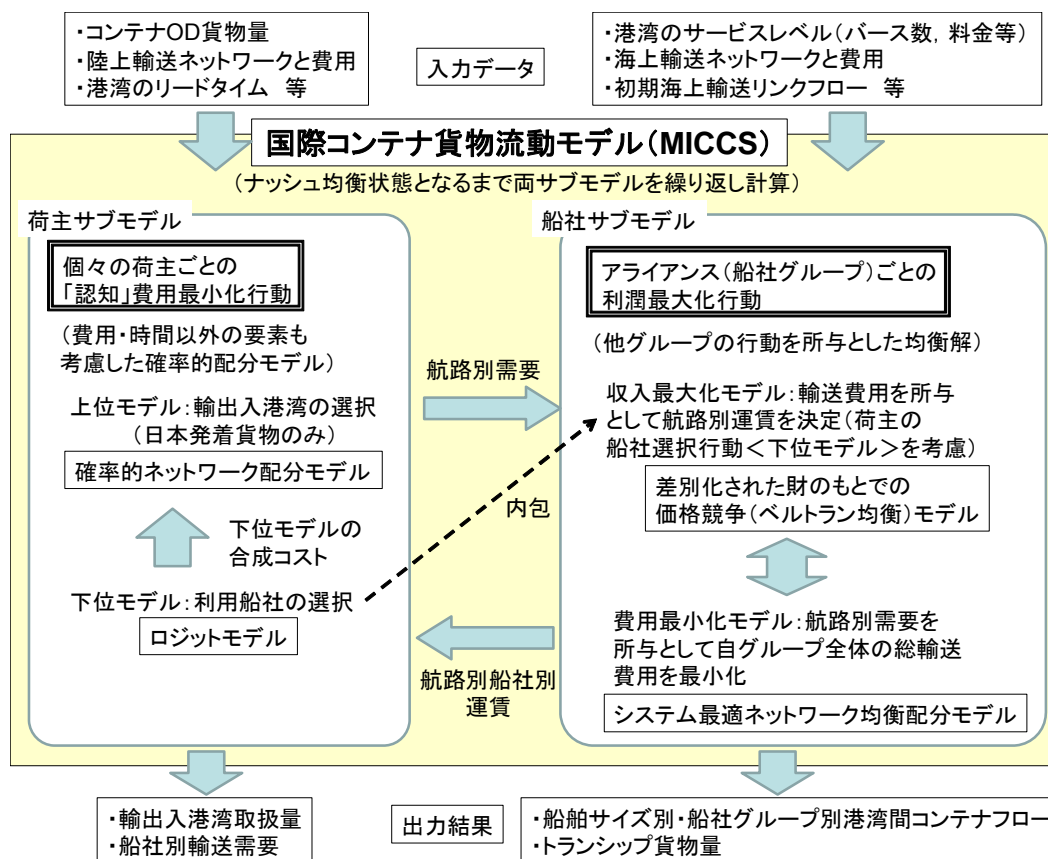


図-2 本モデルの全体構成

3.2 荷主サブモデル

3.2.1 荷主サブモデルの概要

前節で述べたように、荷主は、自己の貨物における「認知された一般化費用」が最小となるように、輸出入時の利用港湾や海上輸送における外航船社を選択すると仮定する。このため、モデル構築者が観測できない要因も誤差項として含めることが可能な確率配分型のモデルを採用し、利用港湾と利用船社の選択を2段階の選択行動として記述する配分モデルを構築する。

下位問題の船社選択モデルとしては、ロジットモデルを用いる。上位問題の港湾選択モデルにおいては、通常ロジットモデルでは選択枝が膨大になり計算が困難になることから、確率的ネットワーク配分モデルを用いる。これらのモデルは、下位問題の船社選択モデルの結果(合成された航路別費用)が、上位問題におけるコストとして組み込まれる、いわゆるネステッド・ロジット型のモデルとなっている。

3.2.2 上位モデル：輸出入港湾選択モデル

(1)前提

この段階のモデルでは、図-3 に示されるようなネットワーク上における貨物量の配分を考える。ここで、海上輸送リンクは、実際の海上輸送経路や利用船社に関わらず、輸出港と輸入港を直接結ぶものと定義する(本研究においては、この海上リンク一本一本に相当するものを、「航路」と定義する)。なお、本モデルにおいて、モデル構築者の観測できない要因も考慮可能な確率的交通配分モデルとして、広く利用されているロジットモデルではなく、確率的ネットワーク配分モデルを用いた¹³のは、本モデルや今後の拡張モデルで想定するような大規模な輸送ネットワークにおいては、輸送経路を予め列挙する必要のあるロジットモデルでは、選択枝数が膨大になり計算が困難になると考えられるためである。

荷主は、陸上および海上輸送の運賃や所要時間を所与

¹³ ただし、土木学会³⁾に述べられているように、本モデルで採用する Dial⁴⁶⁾のアルゴリズムに基づく配分においては、経路(選択枝)の限定方法を除けば、通常ロジットモデルと等価となる。

14として、期待輸送費用が最小となるルートを選択する。図-3で省略されている、各港湾内のネットワーク構成を図-4に示す。ここでは、各港湾のリードタイム（搬入時・搬出時）を考慮するため、搬入・搬出リンクが設定されている。また、荷主サイドで意思決定する中継地での積替¹⁵を考慮するため、船社間積替リンク¹⁶も設定する。

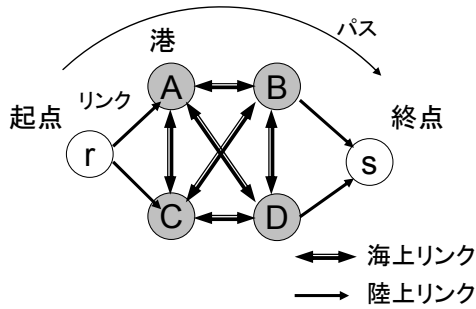


図-3 荷主サブモデル・上位モデルのネットワーク構成（概念図）

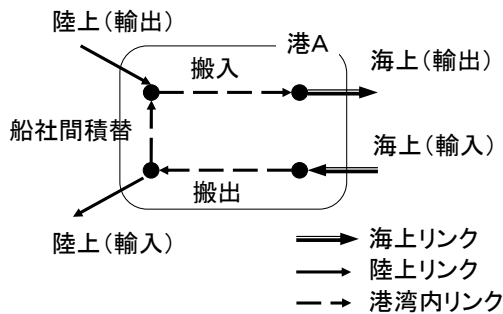


図-4 荷主サブモデル・上位モデルの港湾内ネットワーク構成

(2)定式化

本モデルにおける荷主の選択行動を定式化すれば以下のように表される。

$$f_{rsk} = Q_{rs} \cdot \frac{\exp(-\theta \cdot c_{rsk})}{\sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta \cdot c_{rsk})} \quad (1)$$

ここで、

14 正確には、あとで見る(式(3)参照)ように、海上輸送運賃については、下位問題における各船社の合成費用として表される。

15 荷主の希望する港湾間において単一の船社グループで提供されるサービスが存在しないため、中継港においてグループ間を跨ぐ積替を行うような状況に相当する。

16 後ほど船社モデルで登場する(同一船社内)積替リンクとは別個のものであることに注意が必要である。なお、本リンクは荷主側の手配を前提としていることから、同一船社内の積替に比べ抵抗(費用)は大きいことが想定される。

f_{rsk} : OD ペア rs 間の経路(パス) k の経路貨物量,
 Q_{rs} : OD ペア rs 間の貨物需要* (OD 貨物量, TEU) ,
 θ : 分散パラメータ,

c_{rsk} : OD ペア rs 間の経路(パス) k の輸送コスト (円/TEU) ,

K_{rs} : OD ペア rs 間の経路選択肢集合

である。このうち、OD ペアごとの地域間貨物需要 Q_{rs} は、3.1でも述べたように、本モデルでは常に所与(外生変数)である。以下では、外生変数には*をつけて区分し、4.でその推計(設定)方法について述べる¹⁷。また、分散パラメータ θ は、モデル内の未知パラメータとして扱われ、現状を最も良く再現するように後ほど推計される。

経路ごとの輸送コスト c_{rsk} については、以下の式で表される。

$$c_{rsk} = \sum_{a \in k} \Lambda_a + \sum_{b \in k} CL_b + \sum_{i \in k} CP_i \quad (2)$$

ここで、 Λ_a は、経路 k に含まれる海上リンク a の期待最小コスト(合成コスト)であり、後述の下位モデルの選択結果を反映したログサム変数¹⁸である。具体的には、

$$\Lambda_a = -\frac{1}{\theta} \cdot \ln \sum_{g \in G} \exp(-\theta \cdot CM_{ag}) + \zeta \quad (3)$$

ただし、

CM_{ag} : 海上航路 a において船社グループ g を利用した際の費用(運賃+時間費用, 円/TEU, 詳細の定義は3.2.3で述べる) ,

G : 船社グループの集合* ,

ζ : ログサム変数が負とならないための調整項である。

また、 CL_b は、経路 k に含まれる陸上リンク b の輸送コスト(一般化費用)であり、以下の式で表される。

$$CL_b = CLcost_b + vt_{shpr} \cdot CLtime_b \quad (4)$$

ただし、

$CLcost_b$: 陸上リンク b の輸送運賃* (円/TEU) ,

$CLtime_b$: 陸上リンク b の輸送時間* (時) ,

vt_{shpr} : 荷主の時間価値* (円/TEU・時) .

さらに、 CP_i は、経路 k に含まれる港湾内リンク i (搬出・搬入・船社間積替リンク) のコストであり、以

17 一方、外生変数および未知パラメータ以外の変数は、モデル内で内生的に決定される変数(内生変数)である。すべての内生変数は、本論文のいずれかの式で定義されている。

18 段階選択モデルの上位モデルと下位モデルの接続における期待最小コストやログサム変数の定式化については、前出のロジットモデルの解説^{5),6)}のネスティッド・ロジットモデルの項を参照されたい。

下の式で表される。

i) 搬入リンクの場合

$$CP_i = vt_{shpr} \cdot LTL_i \quad (5)$$

ただし、

LTL_i : 港湾 i の搬入時リードタイム* (時)。

ii) 搬出リンクの場合

$$CP_i = vt_{shpr} \cdot LTU_i \quad (6)$$

ただし、

LTU_i : 港湾 i の搬出時リードタイム* (時)。

iii) 船社間積替リンクの場合

$$CP_i = CTcost_i + vt_{shpr} \cdot CTime_i \quad (7)$$

ただし、

$CTcost_i$: 船社間積替リンク i の輸送費用* (円/TEU) ,

$CTime_i$: 船社間積替リンク i の輸送時間* (時)。

(3)解法

以上で見たように、本モデルは、確率的ネットワーク配分問題となるため、Dial⁴⁶⁾のアルゴリズムによって各リンクの輸送量 y を求める。なお、フロー依存リンクをもたない確率的ネットワーク配分は、我が国では適用例があまり多くなく (例外として飯田・高山⁴⁷⁾など)、日本語の適切な解説書は少ない¹⁹⁾ものの、海外では教科書でもよくとりあげられている (たとえば Cascetta⁴⁹⁾など)。

3.2.3 下位モデル：外航船社アライアンス選択モデル

(1)前提

この段階のモデルでは、輸出・輸入港湾 (起点・終点港湾) を所与として、荷主が船社グループを選択する。なお、荷主は各グループの提供するサービスレベル (運賃、頻度、所要時間等) に基づいた選択を行い、各船社グループが実際にどのような運航 (輸送ルートや使用船舶など) を行うかについては関知しないと想定する。

(2)定式化

本モデルは、次式で表される通常のロジットモデルで

表現される。

$$q_{ag} = d_a \cdot prob_{ag} \quad (8)$$

ここで、

q_{ag} : 航路 a における船社グループ g の輸送量、

d_a : 航路 a の貨物需要、

$prob_{ag}$: 航路 a における船社グループ g の選択確率であり、 $prob_{ag}$ は以下の式で表わされる。

$$prob_{ag} = \frac{\exp(-\theta \cdot CM_{ag})}{\sum_{g \in G} \exp(-\theta \cdot CM_{ag})} \quad (9)$$

また、各航路の貨物需要 d_a は、次式で上位モデルの配分結果と結び付けられる²⁰⁾。

$$d_a = \sum_{rs \in \Omega} \sum_{k \in K_{rs}} \delta_{rsk}^a \cdot f_{rsk}, \quad \forall a \in A \quad (10)$$

ただし、

δ_{rsk}^a : クロネッカーのデルタ (OD ペア rs 間の経路 k にリンク a が含まれるとき 1, 含まれないとき 0) ,

Ω : OD ペアの集合* ,

A : 航路の集合* (港湾数 \times (港湾数 - 1) の次元)。

また、海上航路 a において船社グループ g を利用した際の費用 CM_{ag} は以下の式で表される。

$$CM_{ag} = p_{ag} + vt_{shpr} \cdot CTime_{ag} \quad (11)$$

ただし、

p_{ag} : 航路 a において船社グループ g が提示する運賃 (円/TEU) ,

$CTime_{ag}$: 航路 a における船社グループ g の総輸送時間 (待ち時間等も含む, 時)。

これら両変数 p_{ag} , $CTime_{ag}$ は、次節の外航船社サブモデルのアウトプットとして荷主サブモデルでは外生的に与えられる。ここで、金銭的費用として、船社が実際に各航路の運航でかかった費用ではなく、次節で述べる船社の収入最大化行動によって決定された運賃 p_{ag} を用いている点に、特に注意されたい。

(3)解法

(8)式より、航路 a における船社グループ g の輸送量 $q_{a,g}$ を得る。

¹⁹⁾ Dial のアルゴリズムについては、土木学会 (1998³⁾, 2004⁴⁸⁾) における確率的ネットワーク「均衡」配分の解説中で取り上げられているので、興味のある読者は参照されたい。

²⁰⁾ なお、実際の計算にあたっては、上位モデルの海上リンクが輸出港と輸入港をダイレクトに結ぶリンクとして表現されているため、上位モデルの計算結果から、海上リンクフロー a がそのまま d_a として取り扱われる。

3.3 外航船社サブモデル

3.3.1 外航船社サブモデルの概要

(1)前提

3.1 で述べたように、外航船社は、アライアンス（船社グループ）ごとに、荷主の選択行動や、その結果としての船社グループ別港湾間OD貨物量を所与として、利潤が最大となるように航路ごとの運賃や輸送パターン（輸送経路・寄港地、積替港、使用船舶サイズ）を決定する。

ここで、モデル計算を可能とするために、国際海上コンテナ輸送市場を構成する外航船社アライアンスについて、さらに以下のような仮定を置くものとする。

1) 国際海上コンテナ輸送市場における寡占市場を想定

し、外航船社は、かならずいづれかのグループに属するものとする。なお、単独で運航を行う船社については1船社で1グループとする。この仮定は、特に長距離（基幹）航路を念頭に置いたものであり、アジア圏と欧米を結ぶ基幹航路を中心とした分析には適していると考えられるものの、特に近距離航路については、実際には多数の船社が競争している状況にあることから、近距離の国際海上コンテナ貨物輸送市場における供給者の影響力については過大評価されていると考えられる。これに対応したモデルへの改良については、今後の課題としたい。

2) グループ内の各船社は、配船やスペースの融通、運賃戦略などにおいて完全に一体となった最適化行動を行う。

そういった意味では、各船社グループは、その構成船社をすべて統合した巨大船社とみなすこともできる。一方で、異なるグループ間においては、スペースの融通等も含め、一切の協力的行為は行われなものと仮定する。

3) 各港湾の全コンテナバースについて、すべての船社グループが使用可能であると仮定する。

一般には、大船社ほど専用バースを使用する傾向にあるものの、モデルが相当に複雑になると予想されることから、専用バースは存在しないものとして取り扱う。したがって、入港待ち混雑（船混み）が発生するかどうかは、当該港湾に入港する全船社グループの総入港隻数に依存することとなる。

(2)定式化

船社グループごとの利潤最大化行動は、以下のように表される。

$$\max_{p,x} \pi_g, \quad \forall g \in G \quad (12)$$

$$s.t. \pi_g = \sum_{a \in A} P_{ag} \cdot q_{ag}(p_{a1}, \dots, p_{ag}, \dots, p_{aG}) - \sum_{v \in V} x_{vg} \cdot t_{vg}(x_{11}, \dots, x_{vg}, \dots, x_{VG}) \quad (13)$$

すなわち、各グループ g の利潤 π_g は、総収入（(13)式右辺第1項）と総費用（同第2項）の差で表される。ここで、

x_{vg} :グループ g , リンク v のフロー,

$t_{vg}(x_{11}, \dots, x_{vg}, \dots, x_{VG})$:グループ g , リンク v のコスト,

V :リンクの集合

である。なお、各リンクのコスト関数 t_{vg} は、当該リンクのフロー x_{vg} だけでなく、同じグループの他のリンクや他グループのリンクのフローにも依存する場合がある²¹（詳細は後述）ことに注意されたい。

また、(13)式に含まれる貨物需要²² q_{ag} と輸送量 x_{vg} については、全貨物を輸送する必要があることから、以下の関係が成立する。

$$q_{ag} = \sum_{k \in K_{ag}} h_{akg} \quad (14)$$

$$x_{vg} = \sum_{a \in A} \sum_{k \in K_{ag}} \lambda_{akg}^v h_{akg} \quad (15)$$

ここで、

h_{akg} :航路 a , グループ g の OD 貨物量における経路（パス） k の経路貨物量,

λ_{akg}^v :クロネッカーのデルタ（航路 a , グループ g の OD の経路 k にリンク v が含まれるとき1, 含まれないとき0),

K_{ag} :航路 a , グループ g の OD の選択肢集合である。

(3)解法

通常、(12)式を解く際は、 $\frac{\partial \pi_g}{\partial x} = 0$ や $\frac{\partial \pi_g}{\partial p} = 0$ などによ

り解くものの、 $p(q(x))$ ($=q^{-1}(p(x))$:逆需要関数)を x について微分したり、 $t(x)$ を x や p について微分するのは、きわめて困難であるため、本モデルでは、緩和的解法として、(13)式の第1項で表される総収入の最大化と、

²¹ したがって、すべての船社グループにおいて(12)式が成立するということは、他グループの行動基準（(12)式）を所与とした場合にこれ以上自グループの利潤を高めることのできない、いわゆるナッシュ均衡状態にあるといえる。

²² (8)式の定義も参照のこと。

第2項で表される総費用の最小化を、それぞれ個別に解くこととする。具体的な手順は以下の通りである。

Step 0. $n = 0$ とし、初期の船社グループ別航路別貨物需

要 $\{q_{ag}^{(0)}\}$ 、および運賃 $\{p_{ag}^{(0)}\}$ を計算する。なお、運賃の初期値（現状推計値）を直接与えることは難しいため、初期フロー $\{x_{vg}^{(0)}\}$ において定義される各リンクコスト $\{t_{vg}^{(0)}\}$ 下での最少費用経路における金銭費用の総和で代用する。

Step 1. $n = n + 1$

Step 2. 一期前の貨物需要 $\{q_{ag}^{(n-1)}\}$ および運賃 $\{p_{ag}^{(n-1)}\}$ を固

定して費用最小化問題（3.3.3 参照）を解く。すなわち、

$$\begin{aligned} \max_{p,x} \pi_g \\ \text{s.t. } \pi_g &= \sum_{a \in A} p_{ag}^{(n-1)} \cdot \bar{q}_{ag}^{(n-1)}(p_{a1}^{(n-1)}, \dots, p_{ag}^{(n-1)}, \dots, p_{aG}^{(n-1)}) \\ &\quad - \sum_{v \in V'} x_{vg}^{(n)} \cdot t_{vg}^{(n)}(x_{11}^{(n)}, \dots, x_{vg}^{(n)}, \dots, x_{VG}^{(n)}) \\ \Leftrightarrow \min_x &\left\{ \sum_{v \in V'} x_{vg}^{(n)} \cdot t_{vg}^{(n)}(x_{11}^{(n)}, \dots, x_{vg}^{(n)}, \dots, x_{VG}^{(n)}) \right\} \\ &\quad \forall g \in G \end{aligned}$$

Step 3. Step 2 で得られたフロー $\{x_{vg}^{(n)}\}$ およびコスト

$\{t_{vg}^{(n)}\}$ を固定して収入最大化問題（3.3.2 参照）を解く。すなわち、

$$\begin{aligned} \max_{p,x} \pi_g \\ \text{s.t. } \pi_g &= \sum_{a \in A} p_{ag}^{(n)} \cdot q_{ag}^{(n)}(p_{a1}^{(n)}, \dots, p_{ag}^{(n)}, \dots, p_{aG}^{(n)}) \\ &\quad - \sum_{v \in V'} \bar{x}_{vg}^{(n)} \cdot t_{vg}^{(n)}(\bar{x}_{11}^{(n)}, \dots, \bar{x}_{vg}^{(n)}, \dots, \bar{x}_{VG}^{(n)}) \\ \Leftrightarrow \max_p &\left\{ \sum_{a \in A} p_{ag}^{(n)} \cdot q_{ag}^{(n)}(p_{a1}^{(n)}, \dots, p_{ag}^{(n)}, \dots, p_{aG}^{(n)}) \right\} \\ \Leftrightarrow \max_p &\left\{ p_{ag}^{(n)} \cdot q_{ag}^{(n)}(p_{a1}^{(n)}, \dots, p_{ag}^{(n)}, \dots, p_{aG}^{(n)}) \right\} \\ &\quad \forall a \in A, \forall g \in G \end{aligned}$$

ここで、2段目から3段目への変換は、各グループとも各航路の運賃を他の航路の運賃とは独立に決定

することを示している²³。

Step 4. Step 3 で得られた貨物需要 $\{q_{ag}^{(n)}\}$ を一期前の需

$$\text{要 } \{q_{ag}^{(n-1)}\} \text{ と比較して収束 } \left(\sqrt{\frac{\sum_g \sum_a \{q_{ag}^{(n)} - q_{ag}^{(n-1)}\}^2}{\sum_g \sum_a q_{ag}^{(n)}}} < \varepsilon_G \right),$$

ε_G は収束判定基準となる微小な正の数) しているか、繰り返し回数 n が上限値に達していれば終了²⁴、収束していなければ Step1 へ戻る。

以上のような手順により収束が確認されれば、そのときのフロー $\{x_{vg}^{(n)}\}$ や需要 $\{q_{ag}^{(n)}\}$ のもとでは、各船社グループの収入最大化と費用最小化が同時に実現されている²⁵ こととなり、利潤が（少なくとも局所的には）最大化されていることを意味する。

以下では、各航路の収入最大化行動モデルと、全航路を対象とした総費用最小化行動モデルについて述べる。

3.3.2 収入最大化行動モデル：航路別運賃の決定

(1)前提

前述のように、本研究では、国際海上コンテナ輸送市場は複数少数の外航船社および船社グループ（アライアンス）による寡占市場であると想定する。また、ここでは、各船社グループが、他グループの運賃を参考にしながら自グループの運賃を決定する²⁶ という、いわゆるベルトラン均衡²⁷的なモデルを想定する。ただし、ここで

²³ (8), (9)式に示されるように、各グループ g の航路 a の運賃 p_{ag} は、他グループの同一航路の運賃 $p_{ag'}$ ($g' \in G$) には依存するものの、自グループや他グループの他の航路の運賃 $p_{a'g}$, $p_{a'g'}$ ($a' \in A$) とは無関係である。

²⁴ 具体的な繰り返し計算回数の上限值や、収束判定基準値については、モデルの振る舞いも確認しながら試行錯誤的に決定する。最終的な設定値については、3.4の表-2を参照されたい。

²⁵ このような状況下では、支出最小化行動を変化させずに収入をこれ以上増加させることはできないし、収入最大化行動を変化させずに支出をこれ以上減少させることができない。これもある種のナッシュ均衡的状況といえる。

²⁶ ここでは、前項で述べたように、収入最大化モデルが費用最小化モデルと切り離された形で構築されているため、収入最大化モデルにおける各航路の費用は、固定されているとみなせる。

²⁷ 寡占市場において、各寡占企業が価格競争を行っている想定できる場合をベルトラン均衡という。財が完全に同質な場合、価格が最も安い企業が全需要を独占することとなるため、ベルトラン均衡においては各企業の価格は最終的に一致する。ただし、本研究で想定するように、財が差別化されている場合には、最終的な価格は企業によって異なる。一方、

供給される輸送サービスは、価格指標以外のさまざまな要素も考えられるため、当該航路における運賃の最も安いグループが全需要を総取りするのではなく、運賃が相対的に高いグループにもある程度の需要が見込まれるものと想定する（具体的には、(8)、(9)式に示したように、供給量 q が価格 p を説明変数とする確率モデルで表わされる）。すなわち、運賃以外の要素で差別化された財におけるベルトラン均衡（価格競争）モデルの一種となる。

(2)定式化

各船社グループ g は、航路（輸出港と輸入港の組み合わせを指す）ごとの総需要 d_a を所与として、荷主の船社選択行動²⁸や同一航路の他グループ g' （ $\forall g' \in G, g' \neq g$ ）の運賃 $p_{ag'}$ も参考にしながら、航路ごとの収入が最大となるよう運賃 p_{ag} を決定する。すなわち、

$$\max_{p_{ag}} \{p_{ag} \cdot q_{ag}(p_{a1}, \dots, p_{ag}, \dots, p_{aG})\} \\ \forall a \in A, \forall g \in G \quad (16)$$

$$s.t. \quad q_{ag} = d_a \cdot prob_{ag} \quad ((8)式の再掲)$$

(3)解法

具体的な解法は、以下の通りである。本手順によって得られた収束解も、他社の行動を所与として互いに最適化されたナッシュ均衡解である。

Step 0. $n = 0$ とし、 p_{ag} の初期値 $\{p_{ag}^{(0)}\} (\forall g \in G)$ を与える²⁹。

Step 1. $n = n + 1$

Step 2. 任意のグループ g について、自社の運賃以外を所与（1期前の運賃に固定、すなわち、

$$\bar{p}_{ag}^{(n-1)}, \forall g' \neq g) \text{ としたとき、1階の収入最大条件}$$

供給量の競争が仮定できる場合をクールノー均衡という。理論的な観点からの両者の比較考察については、Binger and Hoffman⁵¹⁾、太田⁵²⁾等を参照されたい。太田⁵²⁾では、差別化された財の下でのベルトラン均衡を扱っている。また、土井⁵³⁾は、海運市場を対象にクールノー均衡とベルトラン均衡の考察を行っている。また、金本ら⁵⁴⁾は、電力市場を対象に両者のモデルの定量的な比較分析を行っている。

²⁸ (16)式で(8)式が与件とされているということは、(8)式で表される荷主の行動原理を、各船社グループが十分把握していると仮定されていることを意味している。

²⁹ 全体の収束計算の初回においては、便宜的に各航路の金銭費用（3.3.1(3)解法のStep 0参照）を与え、それ以降の計算においては、1回前の計算で求めた各航路の運賃を与える。

$$\frac{\partial \{p_{ag}^{(n)} \cdot q_{ag}(\bar{p}_{a1}^{(n-1)}, \dots, p_{ag}^{(n)}, \dots, \bar{p}_{aG}^{(n-1)})\}}{\partial p_{ag}^{(n)}} = 0 \quad (17)$$

を準ニュートン法に基づいて解き³⁰、 n 期の自社運賃 $p_{ag}^{(n)}$ を得る。

Step 3. すべての船社の運賃 $p_{ag}^{(n)}, \forall g \in G$ に関する収束

条件 $(\sum_g \{prob_{ag}^{(n)} - prob_{ag}^{(n-1)}\}^2 < \varepsilon_R)$ を満たしている

か、繰り返し回数 n が上限値に達していれば終了、そうでなければStep 1へ戻る。

3.3.3 総費用最小化行動モデル：海上輸送パターンの決定

(1)前提

3.3.1 Step 3 に示される総費用最小化問題は、総収入最大化問題と異なり、航路別の最適化ではなく、輸送システム系全体の最適化問題である。各船社グループは航路別の貨物需要を所与として、自グループの総輸送費用が最小となるように、輸送経路やサイズなどの輸送パターンを決定する。この問題は、リンクフロー依存型コストを持つシステム最適ネットワーク均衡配分モデルとして定式化される。また、本モデルも、3.3.1(1)前提の3)で述べたような入出港時における船混みや、総取扱量に依存する1貨物あたりのターミナル利用料を通じて、収入最大化モデルと同様、他グループの行動結果に影響を受けると仮定される。

(2)定式化

船社グループごとの総費用最小化行動は、以下のようにならわされる。

$$\min_x \left\{ \sum_{v \in I'} x_{vg} \cdot t_{vg}(x_{11}, \dots, x_{vg}, \dots, x_{vG}) \right\} \quad \forall g \in G \quad (18)$$

これは、交通ネットワーク均衡配分手法におけるシステム最適配分 (System Optimum) に相当する。ここで、既述のように、各リンクのコスト関数 t_{vg} は、当該リンクのフロー x_{vg} だけでなく、同じグループの他のリ

³⁰ (17)式に(8)、(9)、(10)式を代入して解けば $prob_{ag}^{(n)} \neq 0$ のとき

$$prob_{ag}^{(n)} + \frac{1}{\theta \cdot p_{ag}^{(n)}} - 1 = 0 \text{ となるので、関数}$$

$$f(p_{ag}) = prob_{ag} + \frac{1}{\theta \cdot p_{ag}} - 1 \text{ 上の点 } \{p_{ag}^{(n-1)} f(p_{ag}^{(n-1)})\} \text{ における接線の } y$$

切片 $(-f(p_{ag}^{(n-1)})/f'(p_{ag}^{(n-1)}) + p_{ag}^{(n-1)})$ が $p_{ag}^{(n)}$ となる。

リンク $x_{vg}, \forall v' \in V$ や他グループのリンクのフロー $x_{vg}, \forall g' \in G$ にも依存する必要があることに注意が必要である。すなわち、他のリンクのフローの干渉があるネットワーク均衡配分問題となる。

(3) ネットワーク構成

図-5 に船社総費用最小化行動モデルのネットワーク構成を示す。これらのネットワークが、船社グループごとに設定されている。以下に各リンクの概要を述べる。

i) 航走リンク：港と港を結ぶリンクである。すべての港湾の組み合わせについて結ばれる。また、船舶サイズ別に設定されており、通過したリンクをみれば輸送船舶サイズがわかる。さらに、港湾内リンクとのネットワーク構成上、以下の4種類に分けられる(図-6も参照のこと)。

- ① 停泊-航走-停泊リンク：前後の港どちらにおいても荷役されず、船舶に積まれたままとなる貨物が通過するリンクである。前後の港においてそれぞれ停泊リンクを通過し、船卸・船積リンクは通過しないように設定される。
- ② 船積-航走-船卸リンク：出発港で荷役されて船積され、到着港でも荷役され船卸される貨物が通過するリンクである。出発港においては船積リンクを通過し、到着港においては船卸リンクを通過するように設定される。
- ③ 停泊-航走-船卸リンク：出発港では荷役されず船舶に積まれたままであるが、到着港では荷役され、船卸される貨物が通過するリンクである。出発港においては停泊リンクを通過し、到着港においては船卸リンクを通過するように設定される。
- ④ 船積-航走-停泊リンク：出発港で荷役され、船積されたが、到着港では荷役されずに船舶に積まれたま

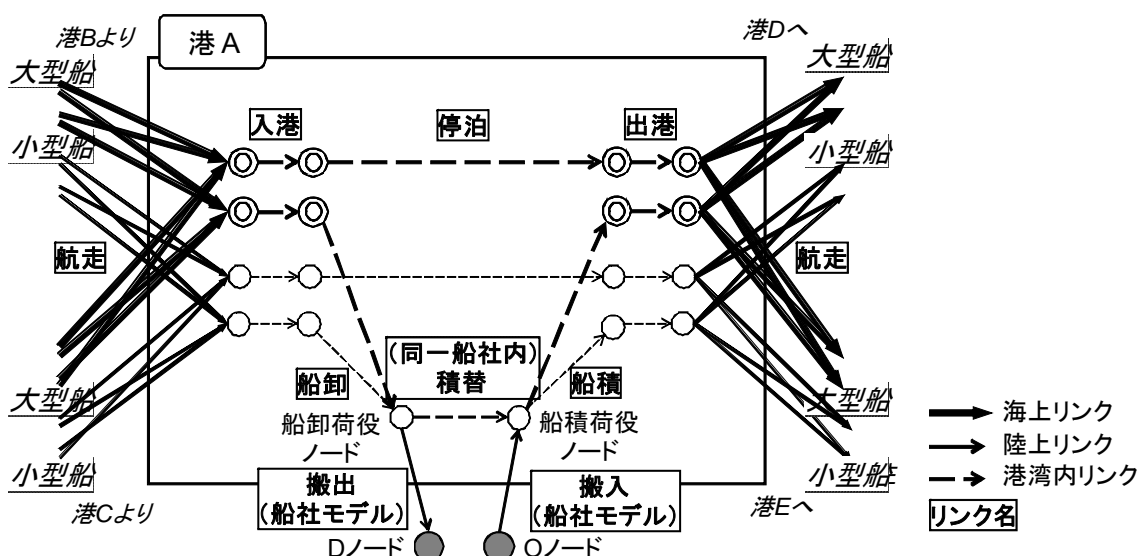


図-5 船社総費用最小化モデルのネットワーク構成 (その1・特に港湾内ネットワークに着眼)

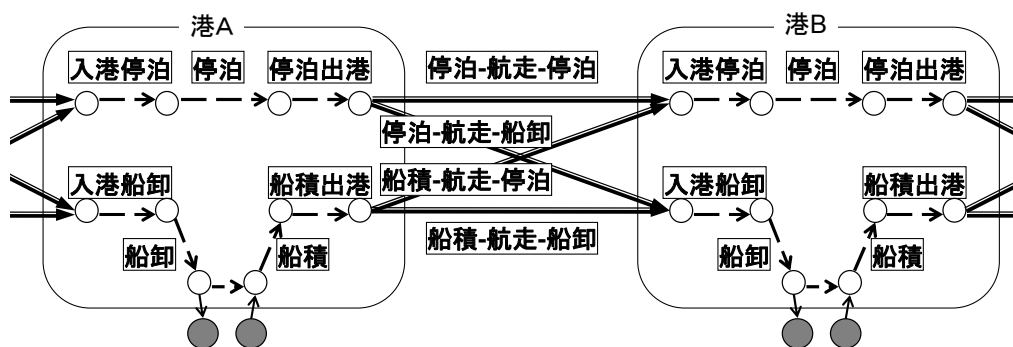


図-6 船社総費用最小化モデルのネットワーク構成 (その2・特に4種類の航走リンクに着眼, 船型サイズの区分は省略)

まとなる貨物通過するリンクである。出発港においては船積リンクを通過し、到着港においては停泊リンクを通過するように設定される。

- ii) 入港リンクおよび出港リンク：各港湾における船舶の入出港を表現するリンクである。航走リンクと同様、船舶サイズごとに設定される。また、航走リンクを4種類に区分したのと同様の考えに基づき、港湾内で荷役されるか否かによって、①入港停泊（停泊出港）リンク、②入港船卸（船積出港）リンクの2種類に分けられる。なお、3.3.1で述べたように、入港リンクおよび出港リンクのコストにおいて、専用バースは想定していないため、他船社の入港および出港フローにも影響される。また、当該港湾に入出港可能な水深のバースが存在しない場合、当該サイズ以上の船舶は原則として入出港できない。
- iii) 停泊リンク：入港停泊リンクと停泊出港リンクを結ぶ。船舶サイズごとに設定される。
- iv) 船卸リンク：各サイズの入港船卸リンクと搬出リンクおよび同一船社内積替リンクを結ぶ。船舶サイズごとに設定される。ただし、終点の船卸荷役ノードは各港湾に一つの設定である。
- v) 船積リンク：船卸リンクと逆で、搬入リンクおよび同一船社内積替リンクと各サイズの船積出港リンクを結ぶ。船舶サイズごとに設定される。ただし、起点の船積荷役ノードは各港湾に一つの設定である。
- vi) (同一船社内) 積替リンク；船卸荷役ノードを起点とし、船積荷役ノードを終点とする。各港湾に1本ずつ設定される。
- vii) 搬出リンクおよび搬入リンク；搬出リンクは、船卸荷役ノードを起点とし、D（集中）ノードを終点とする。搬入リンクは、O（発生）ノードを起点とし、船積荷役ノードを終点とする。すなわち、当該港湾を発地または着地とする貨物は必ず通過する。各港湾にそれぞれ1本ずつ設定される。

(4) リンクコスト関数

各リンクのコスト関数は、基本的に、各リンクに係る金銭費用と時間費用から構成される。ここで、各船社グループの費用最小化行動の対象となる費用について、金銭的費用だけでなく、時間費用（所要時間×金銭時間換算係数）も含めるのは、保険料など、輸送時間に比例して発生する費用もあるものと考えられるためである。なお、以下で示す各リンクのコスト関数において、金銭時間換算係数（船社にとっての時間価値） vt_{carr} は、各船社グループ間で同じ数値と仮定す

る。さらに、実態に基づき実際の数値を特定することは困難と考えられるため、荷主サブモデルの分散パラメータ θ と同様、未知パラメータとしてモデルに含め、現状を最もよく再現する値をのちほど推計することとする（詳細は5.のパラメータ推計を参照）。

i) 航走リンク

海上輸送時の金銭費用と時間費用を考える。出発港や到着港において船積・船卸されるか、あるいは船に積まれたまま停泊しているかで異なるのは、サービス頻度に関わる項を考慮するか否かという点である。貨物が当該港で船積・船卸される際は、海上輸送時間に加え、（頻度の逆数×1/2）で表される期待待ち時間を考慮する。すなわち、海上輸送全体の所要時間には、出港するまでの待ち時間も含めることとする。一方、貨物が当該港において船に積まれたまま停泊している場合は、荷役の要する時間だけ停泊した後、直ちに出港すると考えられることから、出港までの待ち時間は考慮しない。これは、一度船に積まれた貨物は、船社の船舶スケジューリング等の都合で当該貨物の船卸地でない港湾に入港することがあっても、サービス頻度に依存する出港待ち時間は、2回以上加算されないことを意味している。

① 停泊-航走-停泊（Passing-Cruising-Passing: PCP）リンク

$$GPCP_{vg} = \left\{ \frac{CR_{wg}}{lf_{ijwg} \cdot cap_w} + vt_{carr} \right\} \cdot \frac{l_{ij}}{vl_w} \quad (19)$$

ここで、

$GPCP_{vg}$: リンク $v (=ijw)$, 船社グループ g のコンテナ 1TEU あたりの停泊-航走-停泊リンクコスト (円/TEU) ,

w : 船舶サイズを表す変数,

i : 出発港を表す変数,

j : 到着港を表す変数,

CR_{wg} : 船舶サイズ w , グループ g の単位時間あたり航行時費用* (円/時/隻) ,

lf_{ijwg} : 出発港 i , 到着港 j , 船舶サイズ w , グループ g の消席率 (ロードファクター, 4種類の航走リンク共通) ,

cap_w : 船舶サイズ w の船腹量* (キャパシティ, TEU/隻) ,

vt_{carr} : 金銭時間換算係数 (船社の時間価値) (円/時/TEU) ,

l_{ij} : 港湾 ij 間の距離* (カイリ) ,

vl_w : 船舶サイズ w の船速* (ノット)
である。

(19)式右辺{ }内の第1項は、海上輸送に関わる運航費用、第2項は時間費用を表す。運航費用は、1隻あたり単位時間あたりの航行時費用として定義される CR_{wg} を、1隻あたりのコンテナ輸送量 ($lf_{ijwg} \times cap_w$) で除することで、1 TEU あたりのコストを算出する。また、輸送時間は (リンク距離/船速) で表されている。

上記変数のうち、 CR_{wg} , cap_w , l_{ij} , vl_w は、外生的に与えられるものの、消席率 lf_{ijwg} については、当該船社・船舶サイズ・港湾間の4種類の航走リンクコストの和が最小となるよう、内生的に決定されるものとする

(ただし、 $0.1 \leq lf_{ijwg} \leq 0.9$)。詳細については、付録 A を参照されたい。

② 船積・航走・船卸 (Loading-Cruising-Unloading: LCU) リンク

$$GLCU_{vg} = \left\{ \frac{CR_{wg}}{lf_{ijwg} \cdot cap_w} + vt_{carr} \right\} \cdot \frac{l_{ij}}{vl_w} + vt_{carr} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{XC_{ijwg}}{lf_{ijwg} \cdot cap_w} \quad (20)$$

$$XC_{ijwg} = XLCU_{ijwg} + XPCU_{ijwg} + XLCP_{ijwg} + XPCP_{ijwg} \quad (21)$$

ここで、

$GLCU_{vg}$: リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの船積・航走・船卸リンクコスト (円/TEU),

XC_{ijwg} : 出発港 i , 到着港 j , 船舶サイズ w , グループ g における、全航走リンクフローの合計値 (TEU/時),

$XLCU_{ijwg}$, $XPCU_{ijwg}$, $XLCP_{ijwg}$, $XPCP_{ijwg}$: 出発港 i , 到着港 j , 船舶サイズ w , グループ g における、船積・航走・船卸リンクフロー, 停泊・航走・船卸リンクフロー, 船積・航走・停泊リンクフロー, 停泊・航走・停泊リンクフロー (TEU/時)。

(20)式で表される船積・航走・船卸リンクコスト $GLCU_{vg}$ は、(19)式で表される停泊・航走・停泊リンクコスト $GPCU_{vg}$ に、船積出港時の平均待ち時間を表す第2項を追加した形になっている。すなわち、単位時間あたりフローを、1隻あたりのコンテナ輸送量で除することで、

単位時間あたりのサービス頻度 ($\frac{XC_{ijwg}}{lf_{ijwg} \cdot cap_w}$) が算出

される。これの逆数の $1/2$ が、船積出港時において必要な平均待ち時間となる。なお、ここで、単位時間あたりフロー XC_{ijwg} は、当該リンク (船積・航走・船卸リンク) フロー $XLCU_{ijwg}$ だけでなく、同一港湾間、同一サイズ、同一船社グループのフローの総計となることに注意が必要である³¹。

③ 停泊・航走・船卸 (PCU) リンクおよび④ 船積・航走・停泊 (LCP) リンク

$$GPCU_{vg} = GLCP_{vg}$$

$$= \left\{ \frac{CR_{wg}}{lf_{ijwg} \cdot cap_w} + vt_{carr} \right\} \cdot \frac{l_{ij}}{vl_w} + vt_{carr} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{XC_{ijwg}}{lf_{ijwg} \cdot cap_w} \quad (22)$$

ここで、

$GPCU_{vg}$: リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの停泊・航走・船卸リンクコスト (円/TEU),

$GLCP_{vg}$: リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの船積・航走・停泊リンクコスト (円/TEU)。

基本的には(20)式と同様の考え方に基づく。ただし、リンクコストの対称性をもたせるため、出港待ち時間を船積側と船卸側に等分する。すなわち、各リンクの期待

出発待ち時間が $\frac{1}{4} \cdot \frac{XC_{ijwg}}{lf_{ijwg} \cdot cap_w}$ となる。

ii) 入港リンクおよび出港リンク

入出港時にかかる港湾費用と船混みによる入出港待ち時間を考える。航走リンクと停泊、船積、船卸の各リンクを結ぶリンクのため、図-5 および図-6 に示されるように、入港リンクは入港停泊リンクと入港船卸リンク、出港リンクは停泊出港リンクと船積出港リンクのそれぞれ2つに分けられる。ただし、これらのリンクのコスト関数は同一である。

³¹ 同じコンテナ船の中に、直前の寄港地で積み込まれた貨物やそうでない貨物、次の寄港地で卸される貨物やそうでない貨物が混載されて輸送されていることを意味している。

①入港停泊 (Arriving-Passing: AP) リンクおよび②入港船卸 (Arriving-Unloading: AU) リンク

$$GAP_{vg} = GAU_{vg} = \frac{CE_{iw}/2}{\overline{lfa}_{i'wg} \cdot cap_w} + \left(\frac{CA_{wg}}{\overline{lfa}_{i'wg} \cdot cap_w} + vt_{carr} \right) \cdot TWA_{iw} \cdot \frac{24}{op_i} \quad (23)$$

ここで、

GAP_{vg} : リンク v ($=iw$), グループ g のコンテナ 1TEU あたりの入港停泊リンクコスト (円/TEU),

GAU_{vg} : リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの入港船卸リンクコスト (円/TEU),

CE_{iw} : 港湾 i , 船舶サイズ w の入出港費用* (円/隻),

CA_{wg} : 船舶サイズ w , グループ g の単位時間あたり停泊時費用* (円/時/隻),

$\overline{lfa}_{i'wg}$: 港湾 i に入港する船舶サイズ w , グループ g の船舶の平均消席率,

op_i : 港湾 i のターミナル内荷役における一日あたり平均オペレーション時間* (時/日),

TWA_{iw} : 港湾 i , 船舶サイズ w の船混みによる平均入港待ち時間 (時).

(23)式最右辺第1項は、コンテナ船の入港費を表す。1隻あたりの入港費として定義される $CE_{iw}/2$ を³², 1隻あたりのコンテナ輸送量で除することで、1 TEU あたりのコストを算出する。また、港湾 i に入港する船舶サイズ w , グループ g の平均消席率 $\overline{lfa}_{i'wg}$ は、各航走リンクの消席率 $lf_{i'wg}$ (i' は直前の寄港地) を用いて以下のように表される。

$$\overline{lfa}_{i'wg} = \frac{\sum_i \{XC_{i'wg} \cdot lf_{i'wg}\}}{\sum_i XC_{i'wg}} \quad (24)$$

(23)式最右辺第2項は、入港待ち混雑による費用を表す。待ち時間に関係する費用としては、単位時間あたり停泊時船舶費用 $\frac{CA_{wg}}{\overline{lfa}_{i'wg} \cdot cap_w}$ およびその他の時間費用 (金銭時間換算係数 vt_{carr}) が含まれる。また、一日のうち荷役作業を行う時間 (平均オペレーション時間) に応じて、実際の入港待ち時間が増大する。

船混みによる平均入港待ち時間 TWA_{iw} は、待ち行列

理論等から厳密解を算出するという方法も考えられるものの、計算の簡便のため、ここでは、(25)式に示されるべき乗形の関数で表現する³³。

$$TWA_{iw} = \gamma_1 \cdot \left\{ \phi(NVA_{iw}, TU_{iw}, NB_{iu}^{-1}) \right\}^{\gamma_2} \quad (25)$$

ここで、

γ_1, γ_2 : 入港待ち時間関数に関するパラメータ*,

NVA_{iw} : 港湾 i , 船舶サイズ w の単位時間あたりの入港隻数 (隻/時),

TU_{iw} : 港湾 i , 船舶サイズ w の一隻あたりの船卸荷役時間 (時/隻),

NB_{iu} : 港湾 i , バース水深カテゴリ u のバース数*,

$\phi(NVA_{iw}, TU_{iw}, NB_{iu}^{-1})$: バース処理能力に関する関数。

(25)式に表されるように、入港待ち時間は、単位時間あたりの入港隻数 NVA_{iw} と一隻あたりの船卸荷役時間 TU_{iw} に比例し、バース数 NB_{iu} に反比例するものと考えられる。このうち、単位時間あたりの入港隻数 NVA_{iw} は以下のように表される。

$$NVA_{iw} = \sum_g \left(\frac{XAP_{i'wg} + XAU_{i'wg}}{\overline{lfa}_{i'wg} \cdot cap_w} \right) \quad (26)$$

$XAP_{i'wg}, XAU_{i'wg}$: 港湾 i , サイズ w , グループ g の入港停泊リンクフローおよび入港船卸リンクフロー (TEU/時)

ここで、前述のように、各港湾の全バースにおいて、すべての船社グループが共同で使用するという仮定に基づき、 NVA_{iw} は全グループの合計値として定義されていることに注意されたい。

また、一隻あたりの荷役時間 TU_{iw} は以下の式で表される。

$$TU_{iw} = TAU_{iw} + \frac{\overline{lfa}_{i'wg} \cdot cap_w}{prod_i \cdot NC_{iw}} \cdot \frac{XU_{iw}}{XU_{iw} + XP_{iw}} \quad (27)$$

ここで、

TAU_{iw} : 港湾 i における船舶サイズ w の入港時に最低限必要な時間* (時),

$\overline{lfa}_{i'wg}$: 港湾 i に入港する船舶サイズ w の船舶の平均消席率,

$prod_i$: 港湾 i における1クレーンあたりの荷役効率* (プロダクティビティ, TEU/時),

NC_{iw} : 港湾 i におけるサイズ w の船舶の荷役における使用クレーン数*,

³² 入出港時の合計が港費 CE_{iw} に一致するよう設定する。

³³ なお、アジア地域以外の港湾については、地域代表港としての仮想的な設定であることから、入出港待ち時間は想定しない ($TWA_{iw} = 0$) 。

XU_{iw}, XP_{iw} : 港湾 i における船舶サイズ w の船卸および停泊貨物量 (TEU/時)

である. なお, \overline{lfag}_{iw} は,

$$\overline{lfag}_{iw} = \frac{\sum_g \sum_{i'} \{XC_{i'wg} \cdot lf_{i'wg}\}}{\sum_g \sum_{i'} XC_{i'wg}} \quad (28)$$

と表わされる.

(27)式は、一隻あたりの荷役時間が、入港時にピロットや接岸作業等で最低限必要な時間 TAU_{iw} と、荷役個数に比例する荷役作業時間の和で表されることを意味している. また、荷役作業時間は、1隻あたりの平均船卸貨物個数 $\overline{lfag}_{iw} \cdot cap_w \cdot \frac{XU_{iw}}{XU_{iw} + XP_{iw}}$ を単位時間・1バースあたりの処理能力 $prod_i \cdot NC_{iw}$ で除することで得ている.

さてここで、(25)式において、バース処理能力に関する関数を明確化せず $\phi(NVA_{iw}, TU_{iw}, NB_{iw}^{-1})$ と記述したのは、状況によって関数形が異なると考えられるためである. 具体的には、バースの水深ランクとサイズ別の入港船舶数が1対1関係ではないことに起因する. すなわち、大水深のバースには大型・小型のサイズを問わず船舶が入港可能であるが、水深が浅いバースには小型船舶しか入港できない. この関係を2種類の船舶サイズおよびバース水深ランクにおいて模式的に表したものが図-7である. この状況において、大型バースの方が相対的に混雑している場合 ($\frac{NVA_{iL} \cdot TU_{iL}}{NB_{iL}} > \frac{NVA_{iS} \cdot TU_{iS}}{NB_{iS}}$) には、大型

船舶は大型バース、小型船は小型バースに入港するため、それぞれのバース処理能力は以下のように表される.

$$\phi_L(NVA_{iL}, TU_{iL}, NB_{iL}^{-1}) = \frac{NVA_{iL} \cdot TU_{iL}}{NB_{iL}},$$

$$\phi_S(NVA_{iS}, TU_{iS}, NB_{iS}^{-1}) = \frac{NVA_{iS} \cdot TU_{iS}}{NB_{iS}}.$$

一方で、小型バースの方が相対的に混雑している場合 ($\frac{NVA_{iL} \cdot TU_{iL}}{NB_{iL}} < \frac{NVA_{iS} \cdot TU_{iS}}{NB_{iS}}$) は、混雑が均等化される

ように一定割合 α の小型船が大型バースを利用し、結果として両バースの混雑待ち時間は等しくなる. すなわち、

$$\phi_L(NVA_{iL}, TU_{iL}, NB_{iL}^{-1}) = (NVA_{iL} + \alpha \cdot NVA_{iS}) \cdot \frac{TU_{iL}}{NB_{iL}},$$

$$\phi_S(NVA_{iS}, TU_{iS}, NB_{iS}^{-1}) = (1 - \alpha) \cdot NVA_{iS} \cdot \frac{TU_{iS}}{NB_{iS}},$$

$$\phi_L = \phi_S$$

より α を消去して、

$$\phi_L = \phi_S = (NVA_{iL} + NVA_{iS}) \cdot \frac{TU_{iL} + TU_{iS}}{NB_{iL} + NB_{iS}}$$

となる.

なお、ここで示した式は2つの船舶サイズを考慮した場合の結果であり、船舶サイズのカテゴリ数が3以上の場合は、より複雑な手順が必要となる. 詳細は付録Bを参照されたい.

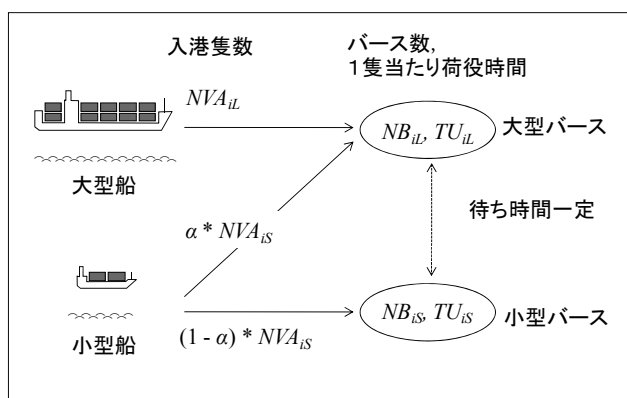


図-7 バース水深と入港待ち混雑の関係

③停泊出港 (Departing-Passing: DP) リンクおよび④船積出港 (Departing-Loading: DL) リンク
入港停泊リンクおよび入港船卸リンクと同様に定義する.

$$GDP_{vg} = GDU_{vg} = \frac{CE_{iw}/2}{\overline{lf}_{i'wg} \cdot cap_w} + \left(\frac{CA_{wg}}{\overline{lf}_{i'wg} \cdot cap_w} + vt_{carr} \right) \cdot TWD_{iw} \cdot \frac{24}{op_i} \quad (29)$$

ここで、

GDP_{vg} : リンク v ($=iw$) , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの停泊出港リンクコスト (円/TEU) ,

GDU_{vg} : リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの船積出港リンクコスト (円/TEU) ,

$\overline{lf}_{i'wg}$: 港湾 i を出港する船舶サイズ w , グループ g の

船舶の平均消席率,

TWD_{iw} : 港湾 i 船舶サイズ w の船混みによる平均出港待ち時間 (時)

であり、このうち $\overline{lf}_{i'wg}$, TWD_{iw} はそれぞれ、

$$\overline{lfd}_{iwg} = \frac{\sum_{i'} \{XC_{ii'wg} \cdot lf_{ii'wg}\}}{\sum_{i'} XC_{ii'wg}}, \quad (30)$$

$$TWD_{iw} = \gamma_1 \cdot \left\{ \phi(NVD_{iw}, TL_{iw}, NB_{iu}^{-1}) \right\}^2, \quad (31)$$

ここで、

NVD_{iw} : 港湾 i , 船舶サイズ w の単位時間あたりの出港隻数 (隻/時),

TL_{iw} : 港湾 i , 船舶サイズ w の一隻あたりの船積荷役時間 (時/隻)

と表わされる。またこれらは、

$$NVD_{iw} = \sum_g \left(\frac{XDP_{iwg} + XDU_{iwg}}{\overline{lfd}_{iwg} \cdot cap_w} \right) \quad (32)$$

ただし、

XDP_{iwg} , XDU_{iwg} : 港湾 i , サイズ w , グループ g の停泊出港リンクフローおよび船積出港リンクフロー (TEU/時),

と表わされ、一方、

$$TL_{iw} = TAL_{iw} + \frac{\overline{lfd}_{iw} \cdot cap_w}{prod_i \cdot NC_{iw}} \cdot \frac{XL_{iw}}{XL_{iw} + XP_{iw}} \quad (33)$$

ただし、

TAL_{iw} : 港湾 i における船舶サイズ w の出港時に最低限必要な時間* (時),

\overline{lfd}_{iw} : 港湾 i を出港する船舶サイズ w の船舶の平均消席率,

XL_{iw} : 港湾 i におけるサイズ w の船積貨物量 (TEU/時),

ここで、

$$\overline{lfd}_{iw} = \frac{\sum_g \sum_{i'} \{XC_{ii'wg} \cdot lf_{ii'wg}\}}{\sum_g \sum_{i'} XC_{ii'wg}} \quad (34)$$

と表わされる。

iii) 停泊 (Passing) リンク

停泊中の船舶費用およびその他の時間費用を考慮する。また荷役時間は、船社グループ別³⁴の船卸に要する時間 TUG_{iwg} と船積に要する時間 TLG_{iwg} の合計である。

³⁴ (27), (33)式で定義される入港・出港リンクにおける船積・船卸時間 TU_{iw} , TL_{iw} は全船社共通に設定されており、以下の TUG_{iwg} , TLG_{iwg} とは異なることに注意が必要である。

$$GP_{vg} = \left(\frac{CA_{wg}}{\overline{lfa}_{iwg} \cdot cap_w} + vt_{carr} \right) \cdot TUG_{iwg} + \left(\frac{CA_{wg}}{\overline{lfd}_{iwg} \cdot cap_w} + vt_{carr} \right) \cdot TLG_{iwg} \quad (35)$$

ここで、

GP_{vg} : リンク $v (=iw)$, グループ g のコンテナ 1TEU あたりの停泊リンクコスト (円/TEU),

$$TUG_{iwg} = TAU_{iw} + \frac{\overline{lfa}_{iwg} \cdot cap_w}{prod_i \cdot NC_{iw}} \cdot \frac{XUG_{iwg}}{XUG_{iwg} + XPG_{iwg}},$$

$$TLG_{iwg} = TAL_{iw} + \frac{\overline{lfd}_{iwg} \cdot cap_w}{prod_i \cdot NC_{iw}} \cdot \frac{XLG_{iwg}}{XLG_{iwg} + XPG_{iwg}}.$$

iv) 船卸 (Unloading) リンク

船卸に要する時間 TUG_{iwg} に関係する費用 (停泊時の船舶費用およびその他の費用) に加え、ターミナルの利用に伴う費用 (ターミナル費) も考慮する。具体的には、下式で表される。

$$GU_{vg} = \frac{CT_i}{XH_i} + \left(\frac{CA_{wg}}{\overline{lfa}_{iwg} \cdot cap_w} + vt_{carr} \right) \cdot TUG_{iwg} \quad (36)$$

ここで、

GU_{vg} : リンク $v (=iw)$, グループ g のコンテナ 1TEU あたりの船卸リンクコスト (円/TEU),

CT_i : 港湾 i の単位時間あたりターミナル費用* (円/時),

XH_i : 下式で定義される港湾 i の総取扱量 (TEU/時)

$$XH_i = \sum_w XL_{iw} + \sum_w XU_{iw} \quad (37)$$

本リンクでは、取扱量によらず予め決められている固的な施設利用料をターミナル費と定義し、貨物 1 個を取り扱うごとに発生する荷役費用と区別する³⁵。本モデルでは各コスト関数は 1 TEU あたりのコストとして定義されるため、1 TEU あたりターミナル費用についてみれば、取扱量が増えるほど減少するという、規模の経済が働く。

v) 船積 (Loading) リンク

船卸リンクと同様の考え方による。

³⁵ 荷役費用は、トランシップ貨物の荷役料金の設定の必要上、本リンクには含めず、搬入・搬出・積替リンクに含める。

$$GL_{vg} = \frac{CT_i}{XH_i} + \left(\frac{CA_{wg}}{lfd_{iwg} \cdot cap_w} + vt_{carr} \right) \cdot TLG_{iwg} \quad (38)$$

ここで、

GL_{vg} : リンク v ($=iw$) , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの船積リンクコスト (円/TEU) .

vi) 積替 (Transshipment) リンク

$$GT_{vg} = 1.5 \cdot CH_i + vt_{carr} \cdot TT_i \quad (39)$$

ここで、

GT_{vg} : リンク v ($=i$) , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの積替リンクコスト (円/TEU) ,

CH_i : 港湾 i における搬出・搬入貨物の 1TEU あたり荷役費用* (円/TEU) ,

TT_i : 港湾 i における積替作業時間* (時) .

なおここで、積替貨物の荷役費用は、港湾投資の評価に関する解説書 2004⁵⁶⁾の記述等に基づき、搬出・搬入貨物の荷役費用の 1.5 倍と仮定している。

vii) 搬出リンクおよび搬入リンク

$$GO_{vg} = GD_{vg} = CH_i \quad (40)$$

ここで、

GO_{vg} : リンク v ($=i$) , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの搬入リンクコスト (円/TEU) ,

GD_{vg} : リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの搬出リンクコスト (円/TEU) .

(5)解法

一般的なフロー依存型システム最適ネットワーク均衡配分の計算手法³⁶⁾に基づき各リンクフローの計算結果を得る。ただし、(4)でみたように、各リンクにおいてリンク間の相互干渉 (あるリンクのコストが、当該リンクのフローだけでなく、他リンクのフローにも依存する状況) があるため、緩和法³⁷⁾によって求める。

また、配分計算の単位は船社グループであるものの、入出港リンクや船積・船卸・停泊リンクにおいては、全船社合計の入出港船舶数や貨物取扱量に依存したコスト関数となっているため、各船社グループについて、他グ

ループのフローを固定して配分計算を行い、これを順に繰り返すことにより、グループ間のフローの干渉を考慮するものとする。具体的な手順は、以下のとおりである。

Step 0. $n = 0$ とし、初期フロー $\{x_{vg}^{(0)}\}$ に対するリンクコ

スト $\{t_{vg}^{(0)}\}$ を求める。

Step 1. $n = n + 1$

Step 2. 自グループ g 以外の各グループ g' ($g, g' \in G$,

$g \neq g'$) のフローを一期前のフロー $\{x_{vg'}^{(n-1)}\}$ に固定し

て自グループの費用最小化問題を解く。すなわち、

$$\min_x \left\{ \sum_{v \in V} x_{vg}^{(n)} \cdot t_{vg}^{(n)} \left(\begin{array}{c} x_{11}^{(n-1)}, \dots, x_{V1}^{(n-1)}, \\ \dots, \\ x_{1g}^{(n)}, \dots, x_{vg}^{(n)}, \dots, x_{Vg}^{(n)}, \\ \dots, \\ x_{1G}^{(n-1)}, \dots, x_{VG}^{(n-1)} \end{array} \right) \right\}, \forall g \in G$$

これを全グループについて行う。

Step 3. Step 2 で得られたフロー $\{x_{vg}^{(n)}\}$ を一期前のフロ

$$\{x_{vg}^{(n-1)}\} \text{ と比較して収束 } \left(\sqrt{\frac{\sum_g \sum_v \{x_{vg}^{(n)} - x_{vg}^{(n-1)}\}^2}{\sum_g \sum_v x_{vg}^{(n)}}} < \varepsilon_C \right),$$

ε_C は収束判定基準となる微小な正の数) しているか、繰り返し回数 n が上限値に達していれば終了、収束していなければ Step1 へ戻る。

なお、航走リンクや船積・船卸リンクのように、リンクコストがフローに対して反比例の関係 (すなわち、規模の経済性が働いている状況) となっているリンクもあることから、ネットワーク均衡配分計算上の凸性が保障されず、得られる解は局所解であり、最適解とは限らない。そのため、本モデルにおいては、現状のリンクフローを初期値として与え、これを起点に配分計算を行うことで、現状を出発点とした場合の (現状の近傍にある) 最適解を得るものと位置づけられる。

³⁶⁾ システム最適ネットワーク均衡配分モデルの具体的な求解方法については、土木学会 (1998³⁾, 2004⁴⁸⁾) や Sheffi⁵⁵⁾を参照されたい。

³⁷⁾ 他リンクのフローを一期前のものに固定し、当該リンクのコスト関数への影響を取り除く方法。詳細な解法については、土木学会³⁾を参照のこと。

3.4 荷主サブモデルと船社サブモデルの相互関係および収束計算の方法

3.4.1 概要

前節までに、荷主サブモデルと船社サブモデルの構成について述べた。3.1 で述べたように、荷主は、船社サブモデルの出力である船社グループ別の港湾間運賃 p_{ag} や所要時間 $CMtime_{ag}$ を参照して、港湾や船社の選択を行う。ここで、船社グループ別航路（輸出入港湾ペア）別所要時間 $CMtime_{ag}$ は、3.3.3 で述べた総輸送費用最小化行動の結果、船社別航路別に荷主にとっての（＝荷主の時間価値を用いて計算された）一般化費用を最小にするルートの所要時間とする。一方、外航船社は、荷主の選択行動（(8)式）や、その結果としての船社グループ別港湾間 OD 貨物量 q_{ag} を所与として、利潤が最大となるよう行動する。

最終的に本モデル計算において到達したい状況は、すべての荷主にとっても、またすべての外航船社グループにとっても、自らの目的関数（輸送費用や利潤など）が最適化されているパレート効率的状況であるが、そのような究極の解を得ることは容易でないため、ここでは、すべての荷主とすべての外航船社にとって、他者の行動を所与とした場合に自らの目的関数をこれ以上高めることができない、というナッシュ均衡解を得ることを目標とする。

また、本研究では、荷主サブモデルと船社サブモデルの両者を含めたモデル全体の最適化計算においても、前節で述べた外航船社の費用最小化行動モデルの計算と同様の考え方により、現状を出発点とし、両サブモデルの計算を繰り返しながら局所解としての収束解を得ることとする。

3.4.2 収束計算の方法

図-8 に計算手順の概要を示す（ただし、図-8 では、全体の見通しを良くするために、計算の出発点は描かれていない³⁸）。荷主サブモデルが港湾と船社の2段階選択モデル、船社サブモデルが収入最大化と輸送費用最小化の2つのモデルから成っていることから、やや複雑な手順となっている。すなわち、図-8 中の①に示される、荷主の第1段階選択（港湾選択）は、(3)式に示された航路別の期待最小コスト（当該航路における各船社の運

賃や所要時間の合成変数）や陸上輸送コストを参照しながら、実行される。この結果を受け、②に示されるように、得られた各航路の貨物需要 d_a （船社別需要 q_{ag} ではないことに注意）に対し、各外航船社は航路別の収入が最大となるように運賃 p_{ag} を決定する。この際、船社の収入最大化行動には、荷主の船社選択行動（(8)式）が内包化されている（しかし、上位の港湾選択行動は考慮されていない）。これによって決定された船社グループ別港湾間 OD 貨物量 q_{ag} を所与として、③で各船社グループが総費用最小となるよう輸送パターンを決定し、船社グループ別航路（輸出入港湾ペア）別所要時間 $CMtime_{ag}$ や運航費用 $CMcost_{ag}$ を出力する。

ここで、繰り返し計算の手順として、単純に①→②→③→①→…と繰り返していくと、船社の収入最大化行動モデルと費用最小化行動モデルの間に必ず荷主の港湾選択モデルが挟まることになり、船社サブモデルのおおもとの行動原理である利潤最大化が、より実現されにくくなることが考えられる。また、船社の運賃や輸送パターンの決定、荷主の船社選択行動に比べると、荷主の港湾選択行動は、実際に利用港湾を変更する際には、事務拠点や倉庫などを移す必要があるなど、様々な手続きや費用がかかると考えられることから、他の決定に比べ、やや長期的なスパンで行われるものと考えられる。以上より、ここでは、1か月～四半期程度の短期的スパンを念頭に置いた、船社の運賃や輸送パターンの決定および荷主の船社選択行動の計算（図-8 中の②、③に相当）と、半年～1年程度の中期的スパンを念頭に置いた、荷主の港湾選択行動の計算（図-8 中の①に相当）を入れ子の構造とした計算を行う³⁹。具体的には、以下の手順で計算する。

Step 0. $n = 0$ とし、初期フロー $\{x_{vg}^{(0)}\}$ に対するリンクコ

スト $\{f_{vg}^{(0)}\}$ および船社グループ別港湾間 OD 貨物量

（航路別需要） $\{q_{ag}^{(0)}\}$ の初期値（現状値）を与え、

3.3.1(3) の Step 1～4 に示した解法にしたがって、初回の船社サブモデルの計算を行う。これにより、

船社グループ別航路別の所要時間 $\{CMtime_{ag}^{(0)}\}$ や運賃

³⁸ 実際の収束計算において出発点となるのは、計算手順の Step 0 でも述べられているように、図-8 中の③である。これは、入れ子構造の最も下位に位置するモデルから計算すること、収束計算の安定を図るためである。

³⁹ このような入れ子構造を仮定することが、船社の行動モデルに、荷主の船社選択行動は内包化されているものの、港湾選択行動の方は考慮していない、というモデル構造の説明にもなっている。すなわち、船社は、自らが短期的なスパンで最適化行動を行っているため、荷主の船社選択という短期的な行動は把握可能であるものの、中期的なスパンでなされる

$\{p_{ag}^{(0)}\}$ を求める。なお、この段階ではあくまで初期解を求めることが目的のため、ここでの繰り返し計算は3回を上限とする。

Step 1. $n = n + 1$

Step 2. 前回計算された船社グループ別航路別の所要時間 $\{CMtime_{ag}^{(n-1)}\}$ や運賃 $\{p_{ag}^{(n-1)}\}$ に基づき、3.2.2 に示される荷主の輸出入港湾選択モデルの計算を行う。これにより、船社グループ合計の航路別貨物需要 $\{d_a^{(n)}\}$ を得る。

Step 3. Step 2 で得た船社グループ合計の航路別貨物需要 $\{d_a^{(n)}\}$ 、および前回計算された運賃 $\{p_{ag}^{(n-1)}\}$ を初期値とし、3.3.2(3) の Step 1~3 に示された船社の収入最大化行動モデルの解法にしたがい、船社グループ別の貨物需要 $\{q_{ag}^{(n)}\}$ を求める。

Step 4. Step 3 で得た船社グループ別航路別貨物需要 $\{q_{ag}^{(n)}\}$ 、および前回計算された運賃 $\{p_{ag}^{(n-1)}\}$ を初期値とし、3.3.1(3) の Step 1~4 に示された解法にしたがい、船社サブモデルの計算を行う。船社サブモデルの計算が収束するか、繰り返し計算回数の上限に達するまで計算を繰り返す。これにより、船社の費用最小化モデル・ネットワークにおけるリンクフロー $\{x_{vg}^{(n)}\}$ や、船社グループ別航路別の所要時間 $\{CMtime_{ag}^{(n)}\}$ や運賃 $\{p_{ag}^{(n)}\}$ を得る。

Step 5. Step 4 で得られた船社の費用最小化モデル・ネットワークにおける4種類の航走リンクフローの和 $\{XC_{ijsg}^{(n)}\}$ を一期前のリンクフローの和 $\{XC_{ijsg}^{(n-1)}\}$ と比較

$$\text{して収束} \left(\sqrt{\frac{\sum_g \sum_s \sum_j \sum_i \{XC_{ijsg}^{(n)} - XC_{ijsg}^{(n-1)}\}^2}{\sum_g \sum_s \sum_j \sum_i XC_{ijsg}^{(n-1)}}} < \varepsilon, \varepsilon \text{ は}$$

収束判定基準となる微小な正の数) しているか、繰り返し回数 n が上限値に達していれば終了、収束していなければ Step1 へ戻る。

表-2 に、モデル計算における試行錯誤を通じて最終的に決定した、各収束計算における計算条件（繰り返し計算回数の上限、収束判定の対象とする変数、判定条件）を示す。

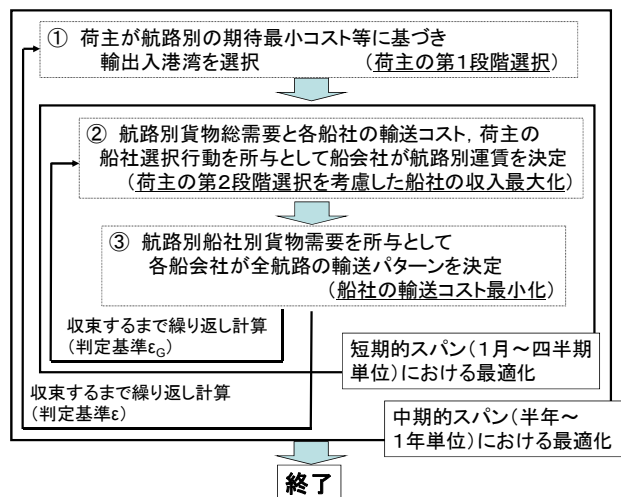


図-8 モデル全体の計算手順の概念図

表-2 本モデルの各収束計算における計算条件

○船社の収入最大化行動モデル	
繰り返し計算回数の上限	10
収束判定対象となる変数	$prob_{ag}$
収束判定基準 ε_R	1.0×10^{-10}
○船社の総費用最小化行動モデル	
船社グループ別配分計算の繰り返し計算回数の上限	10
収束判定対象となる変数	x_{vg}
収束判定基準 ε_G	1.0×10^{-6}
○船社サブモデル全体(図-3における②と③の繰り返し計算)	
繰り返し計算回数の上限	10
収束判定対象となる変数	q_{ag}
収束判定基準 ε_G	1.0×10^{-4}
○モデル全体(図-3における①と②・③の繰り返し計算)	
繰り返し計算回数の上限	5
収束判定対象となる変数	XC_{ijsg}
収束判定基準 ε	1.0×10^{-4}

港湾選択行動は把握できない、という状況を想定している。

4. 入力データの準備

本章では、本モデルの計算にあたって必要な、さまざまな入力データの作成方法について述べる。3.で説明した様々な変数のうち、外生的に与える必要のある変数、および現状に最も合うように後ほど推計する未知パラメータについて、表-3 に示す。そのほかの変数は、モデルの中で内生的に決められる。

表-3 本モデルにおいて外生的に与えられる変数の一覧

○モデルの外生変数		
変数	説明	初出の式
Q_{rs}	ODペアrs間の貨物需要(OD貨物量)	1
G	船社グループの集合	3
$CLcost_b$	陸上リンクbの輸送運賃(円/TEU)	4
$CLtime_b$	陸上リンクbの輸送時間(時)	4
vt_{shp}	荷主の時間価値(円/TEU・時)	4
LTL_i	港湾iの搬入時リードタイム(時)	5
LTL_o	港湾iの搬出時リードタイム(時)	6
$CTcost_t$	船社間積替リンクiの輸送費用(円/TEU)	7
$CTtime_t$	船社間積替リンクiの輸送時間(時)	7
Ω	ODペアの集合	10
A	航路の集合	10
CR_{sg}	船舶サイズs、グループgの単位時間当たり航行時費用(円/時/隻)	19
cap_s	船舶サイズsの船腹量(キャパシティ)(TEU/vessel)	19
l_{ij}	港湾ij間の距離(NM)	19
vl_s	船舶サイズsの船速(knot)	19
CE_{is}	港湾i、船舶サイズsの入出港費用(円/隻)	23
CA_{sg}	船舶サイズsグループgの単位時間当たり停泊時費用(円/時/隻)	23
op_i	港湾iのターミナル内荷役にに関する平均業務時間(時/日)	23
γ_1, γ_2	入港待ち時間関数に関するパラメータ	25
NB_{iu}	港湾i、バースカテゴリuのバース数	25
TAU_{is}	港湾iにおける船舶サイズsの入港時に最低限必要な時間(時)	27
prod _i	港湾iにおける1クレーンあたりの荷役効率(TEU/時)	27
NC_{is}	港湾iにおけるバースカテゴリsの1バースあたりクレーン数	27
TAL_{is}	港湾iにおける船舶サイズsの出港時に最低限必要な時間(時)	33
CT_i	港湾iの単位時間あたりターミナル費用(円/時)	36
CH_i	港湾iにおける搬出・搬入貨物の1TEUあたり荷役費用(円/TEU)	39
TT_i	港湾iにおける積替作業時間(時)	39
○未知パラメータ		
変数	説明	初出の式
θ	分散パラメータ	1
ζ	ログサム変数の調整項	3
vt_{sarr}	金銭時間換算係数(船社の時間価値)(円/時/TEU)	19

4.1 モデル対象港湾・地域

貨物需要 (OD 貨物量) の対象ゾーンは、日本は 47 都道府県ベースとする。また、日本以外の諸国については、国際海上輸送のみを取り扱い背後の陸上輸送等は考慮しないこととし、貨物の発着地は各港湾に一致するものとする。すなわち、各港湾を代表地とするゾーン設定とする。

モデル対象港湾は、多くの港湾を含めることが可能な点が、本シミュレーションモデルの特徴のひとつであることを考慮しつつも、計算時間短縮のためあまり数が増えすぎないように、わが国については図-9 に示す 17 港を、わが国以外の東・南アジア地域については図-10 に示す 23 港を、その他の地域については図-11 に示す 10 港を

対象とする。ただし、アジア以外の 10 港は、地域代表港として便宜的に設定するものであり、対象となる港湾の個別情報 (パース数など) はほとんど考慮しない。

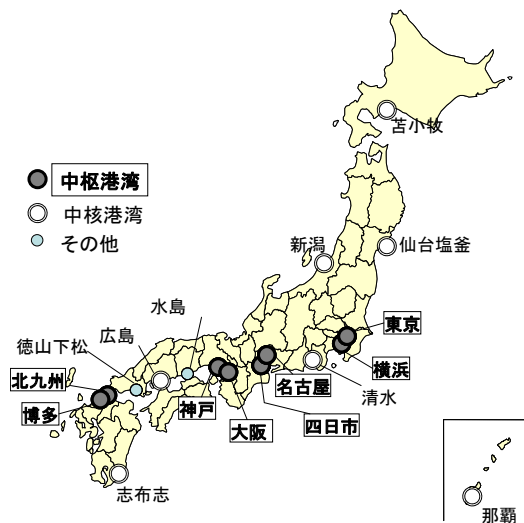


図-9 モデル対象港湾 (日本)

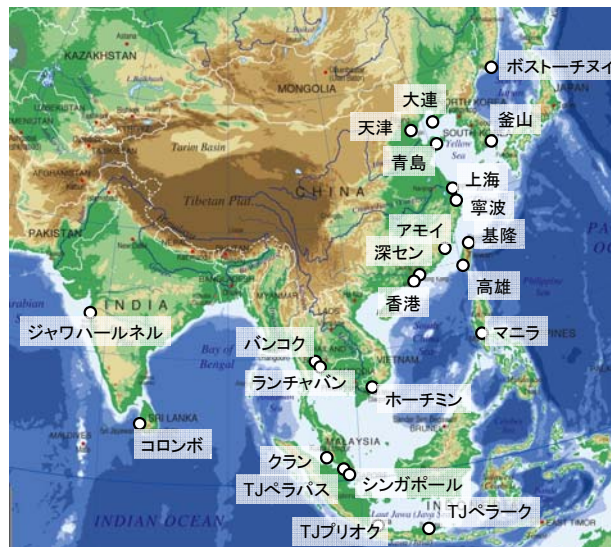


図-10 モデル対象港湾 (日本以外の東・南アジア諸国)

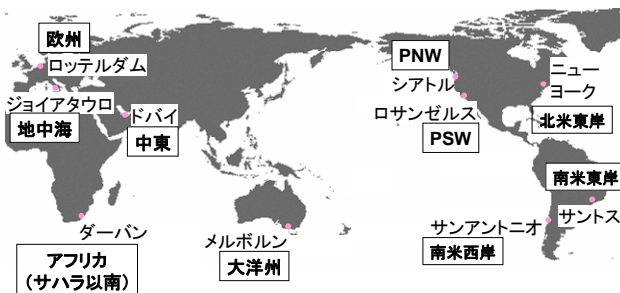


図-11 モデル対象港湾 (その他地域)

4.2 地域間OD貨物量⁴⁰

4.2.1 2国間国際海上コンテナ貨物輸送量

基本的な方針としては、2国間貿易額データを出発点に、輸送機関分担率やコンテナ化率を乗じることによって作成する。ここで、本研究におけるデータ作成の基準年は、後述のコンテナ流動調査⁵⁸⁾の実施年である2003年とする。

出発点となる2国間貿易額は、今後の経済政策シミュレーションや将来予測実施との整合性を考慮し、GTAPデータベース⁵⁹⁾の貿易額データ(ver 6.0, 2001年ベース)を用いる。GTAP(Global Trade Analysis Project:世界貿易分析プロジェクト)は、全世界87ヶ国・52品目を対象とした応用一般均衡モデルおよびそのデータベースから構成されており、ここでは、米本・柴崎ら⁶⁰⁾に示される日本8地域・中国7地域への分割を含む全世界48ヶ国・地域、10品目(うち貿易財5品目)の貿易額データを用いることとする。

この品目別2国間(日本・中国については地域別。以下同様)貿易額をもとに、Global Insight社のGlobal Trade Navigatorデータ⁶¹⁾から得られる、2国間貿易額、輸送機関別2国間貿易額、2国間輸出入貨物量を用いて、2003年ベースの2国間国際海上コンテナ貨物輸送量データを作成する。具体的な手順は以下のとおりである。

- ① GTAPデータベースより得られる2001年ベースの品目別2国間貿易額に、Global Trade Navigatorデータの2001年と2003年の貿易額データより得られる品目別輸出入国別⁴¹⁾の貿易額の伸び率を乗じることにより、2003年ベースの品目別2国間貿易額(31カ国・地域⁴²⁾、5貿易財品目)を得る。
- ② ①の品目別2国間貿易額(2003年ベース)を、Global Trade Navigatorデータより得られる品目別輸出入国別の、海上輸送分担率⁴³⁾、海上輸送貨物のトン・金額換算係数、海上コンテナ分担率⁴⁴⁾、

TEU・トン換算係数を順に乘じることにより、2国間国際海上コンテナ貨物輸送量データ(2003年、TEUベース)を作成する。なお、本研究のデータベースは、原則としてFOB価格で構築するものとし、輸出国側と輸入国側でデータが一致しない場合には、輸出国側のデータを採用するものとする。

4.2.2 地域間貨物量への変換

以上で、2国間の国際海上コンテナ貨物輸送量データは作成できたものの、Global Trade Navigatorデータを含め、国より細かい各地域レベルにおける、2地域間貿易額や2地域間輸出入貨物量に関するデータは存在しない。せいぜい、日本のコンテナ貨物流動調査データ⁵⁸⁾や、あるいは中国⁶³⁾やアメリカ⁶⁴⁾の税関データのように、自国地域別相手国別の輸出入コンテナ貨物量や貿易額がわかる程度である。しかも、多くの国においては、このようなデータも存在しない。そこで、本研究では、上記で得られた2国間国際海上コンテナ貨物輸送量をベースに、以下の手順で地域間貨物需要(地域間OD貨物量) Q_{rs} を推計する。

- ① 日本発着貨物については、上述のように、コンテナ貨物流動調査⁵⁸⁾により、自国地域別相手国別輸出入コンテナ貨物量が得られるため、このシェアを用いて、日本8地域別の発着相手国別コンテナ貨物量を、都道府県別相手国別貨物量に比例配分する。
- ② アジア各港発着貨物については、自国のコンテナ貨物取扱量(ただしトランシップ貨物量は除く。港湾取扱量の推計方法については、4.6を参照のこと)に占める自港のシェア⁴⁵⁾を用いて、2国間国際海上コンテナ貨物輸送量を比例配分することで、自国港湾別相手国別(日本が相手国の場合は47地域別)輸出入コンテナ貨物量を推計する。なお、相手国側も日本を除くアジア各港である場合は、相手国側についても同様の操作を行い、自国港湾別相手国港湾別輸出入コンテナ貨物量を得る。
- ③ アジア地域外発着貨物については、当該地域に含まれるすべての国の貨物を集計し、相手国が日本の場合は、大陸別日本47地域別貨物量を、相手国が日本以外の東・南アジア諸国の場合は大陸別相手港湾別貨物量を作成する。なお、アジア地域外同士を発着する貨物は本モデルの計算対象外とし、ゼロとす

⁴⁰ 本節および4.6の内容については、柴崎・渡部ら⁵⁷⁾も参照されたい。ただし、データ推計の方法や手順等が大幅に変更されている箇所もある。

⁴¹ Global Trade Navigatorデータは全世界70ヶ国・77品目データを対象としており、このデータを上記GTAPベースの貿易額データと整合するように集計して用いる。

⁴² 本研究の計算対象とならない国については、全世界48ヶ国・地域のGTAPデータベースを、GTAデータ⁶²⁾等を用いて分割するなどしたうえで、データベースから除外する。

⁴³ Global Trade Navigatorデータには、海上、航空、陸上およびその他、の3種類の輸送機関別の貿易額データが収録されている。

⁴⁴ Global Trade Navigatorデータには、4種類(Dry Bulk,

Liquid Bulk, General Cargo/Neo Bulk, Container)の輸送形態別の海上輸送貨物量データが収録されている。

⁴⁵ 本モデルの対象港湾のみを集計の対象とする。したがって、ある国のモデル対象港が1港しかない場合は、その国に占める当該港のシェアは100%となる。

る。また、北米（本研究では、パナマ以北を指す）については、各国を最大で PNW, PSW, 北米東岸の3地域に分割した貨物量データを作成する必要があるため、各国の主要港の取扱量を参考にして、上記3地域のシェアを各国別に算出し、それを集約することとする。

地域間貨物量（全 80 ゾーン）の推計結果を、付録 C に示す。

4.3 海上・陸上輸送ネットワーク

4.3.1 海上輸送ネットワーク

海上ネットワークデータとしては、本モデルの対象港全 50 港間相互の距離 l_{ij} (NM) を用意する必要がある。すなわち、必要データ数は、 $50 \times 49 \div 2 = 1225$ となる。これらのデータについては、距離表⁶⁵⁾や Netpas Distance⁶⁶⁾等を用いて整理した。その結果を、付録 D に示す。

本研究において考慮する船舶サイズとしては、表-4 に示すような4区分（すなわち、 $W = 4$ ）とする。また、これらのサイズに対応するバース水深カテゴリと、その関係についても表-4 に示す。

さらに、計算対象とする船社グループとしては、表-5 に示す8グループ（ $G = 8$ ）とする。これは、モデル計算対象年である 2003 年時点のアライアンス構成等を参考に設定したものである。

表-4 本研究で設定するコンテナ船サイズとバース水深カテゴリ

○コンテナ船				○バース	
w	サイズ (TEU)	平均サイズ cap_w (TEU)	入港可能なバースカテゴリ	u	水深 (m)
1	- 1000	500	1-4すべて	1	11.0以下
2	1000 - 2500	1750	2,3,4	2	11.0 - 13.0
3	2500 - 4000	3250	3,4	3	13.0 - 14.0
4	4000 -	6000	4	4	14.0以上

表-5 本研究で設定する船社グループ

グループ	アライアンス名	主な構成船社
A	単独	Maersk
B	単独	Evergreen, LT
C	単独	MSC
D	Grand Alliance	MOL, APL, Hyundai, NOL
E	New World	HAPAG-LLOYD, MISC, NYK, OOCL, P&O
F	CKYH	COSCO, KL, Yang Ming, Hanjing
G	(その他アジア系)	Cho Yang, CSAV, Heung-A, Namsung, UASC, Sinotrans, Wan Hai
H	(その他アジア以外系)	CMA-CGM, PIL, ZIM, Wilhelmsen

サイズ別やグループ別の船腹量等のシェアについては、4.6 で述べる。

4.3.2 陸上輸送ネットワーク

陸上ネットワークデータについては、4.1 で述べたように、本モデルにおいて背後輸送ネットワークを考慮するのは日本だけなので、日本のデータのみ用意する必要がある。筆者ら⁶⁷⁾は、これまでに、わが国の国内道路輸送ネットワークデータを作成し、一般化費用が最小となる経路探索等を行ってきた。本モデルにおいて、この既往ネットワークをそのまま利用することは、7万リンク以上というネットワークの規模や、今回のモデルでは、4.4.3 に示すように、対距離低減型⁴⁶⁾の陸上リンクコスト関数を設定することから考えると、やや不適切である。そこで、あらかじめ、既往ネットワークにおいて、以下に示す条件のもとで、生産消費地である都道府県（47）とモデル対象港湾（17）間の経路探索を行い、全都道府県と対象港湾の組み合わせ（ 47×17 ）におけるトラック走行距離 lg_b 、所要時間 tm_b 、および有料道路料金 tl_b を算出し、このマトリックスを仮想的陸上輸送ネットワークとして今回のモデル計算ネットワークに組み込むこととする。

- ・対象ネットワーク：平成 16 年度道路情報便覧データ⁶⁸⁾に基づくネットワークに、筆者らが独自に設定した臨港道路を追加したネットワーク。ここで、海上コンテナ貨物の約半数は海上コンテナ以外の形態で輸送されていることを考慮し、海上コンテナ搭載車両の通行可能ネットワークではなく、全ネットワークを対象とした検索を行っている。
- ・探索条件：一般化費用（時間評価値×所要時間＋有料道路料金）を最小とする経路をダイクストラ法^{3),4)}で探索した。ここで、時間評価値としては、国土交通省道路局で使用されている 101 円/分（普通貨物車、平成 11 年価格）を用いた⁴⁷⁾。また、有料道路料金や走行速度についても、各道路や種別、地域によって異なる値を設定している。

陸上走行距離、所要時間および有料道路料金の推計結果を、付録 E に示す。

⁴⁶⁾ 輸送距離が長くなるにつれて、距離の増加率に対する運賃の増加率の比が小さくなることをさす。

⁴⁷⁾ ここでの経路探索における時間評価値は、上記一般化費用の定義をみてもわかるように、貨物の時間価値に加え運賃等の金銭費用も含まれ、本研究の荷主サブモデルにおける、純粋な輸送時間に対する時間価値とは性格が異なるものである。

4.4 輸送費用

4.4.1 海上輸送費用

海上輸送費用については、黒川ら⁶⁹⁾、森ら⁷⁰⁾等に基づき、以下のように設定する。なお、ここでは、船社グループ g によらず費用は同一と仮定する。

(1) 航行時運航費用 CR_w

変動費用である運航時燃料費 $CRFU_w$ (円/時) と固定費用である船費 CSP_w (円/時) に分けられる。

$$CR_w = CRFU_w + CSP_w \quad (41)$$

$$CRFU_w = c1 \cdot c2 \cdot (c3 \cdot cap_w)^{\frac{2}{3}} \cdot vl_w^3 \quad (42)$$

$$CSP_w = (c4_w + c5_w + c6_w + c7 + c8 + c9 + c10_w + c11_w) \cdot (1 + re) / D / 24 \quad (43)$$

ここで、変数 $c1 \sim c11$, re , D の説明およびここでの設定値について表-6 にまとめる。

また、サイズ別の船速 vl_w については、実際のコンテナ船のデータに基づき推計した以下のような近似式を用いる。

$$vl_w = 5.836 \cdot cap_w^{0.167} \quad (44)$$

表-6 海上輸送費用式 ((41)-(43)式) における変数の設定値一覧

変数	説明	単位	設定値
c1	燃料油単価	円/t	8925 (=85US\$/t*105円/US\$)
c2	燃料消費量係数	-	$2.380 \cdot 10^{-7}$
c3	排水量換算係数	DWT/TEU	19.07
$c4_w$	船価 (元利均等払)	円/年	総額: $\{-6.966 \cdot \ln(GT) + 89.36\} \cdot GT \cdot 10^4$ (ここで, $GT_w = (cap_w + 15.13) / 0.0680$) 耐用年数14年, 年率4.5%の複利計算 により年間定期支払額を算出
$c5_w$	船員費	円/年	船員数*船員給与*12 船員数: $2.959 \cdot \ln(GT_w) - 8.477$ 船員給与: 58.3万円 (=185(US\$/日)*105*30(日))
$c6_w$	船用用品費	円/年	$624.7 \cdot GT_w + 2108$
c7	修繕費	円/年	毎年, 船価総額の2%
c8	船舶保険費	円/年	毎年, 船価総額の0.3%
c9	固定資産税	円/年	船価総額*1.1/耐用年数/2*税率(1.4%)
$c10_w$	雑費	円/年	$648.6 \cdot GT_w - 1574$
$c11_w$	投滑油費	円/年	必要燃料油(t/時)*1.0%*24*稼働日数D *単価(20万円) 必要燃料油: $c2 \cdot (c3 \cdot cap_w)^{\frac{2}{3}} \cdot vl_w^3$
re	営業経費率	-	9.0%
D	年間稼働日数	日/年	350

(2) 停泊時運航費用 CA_w

航行時運航費用と同様に、変動費用である停泊時燃料費 $CAFU_w$ (円/時) と固定費用である船費にわけられる。このうち、船費については、航行時運航費用における船費と一致する。すなわち、

$$CA_w = CAFU_w + CSP_w \quad (45)$$

$$CAFU_w = 0.17 \cdot (PS_w \cdot 0.09) \cdot 0.98 \quad (46)$$

ここで、 PS_w は補機出力であり、

$$PS_w = 1.2 \cdot GT_w^{0.6} \cdot 2 \quad (47)$$

と表わされる。

4.4.2 港湾費用

港湾費用については、前章で述べたとおり、1TEU あたりの費用として定義される荷役費 CH_i (円/TEU), 1隻あたりの費用として船舶サイズ別に定義される入出港費 $CE_{i,w}$ (円/隻), 1ターミナルあたりの費用として定義されるターミナル費 CT_i (円/時) の3種類に分けられる。これらの入力値については、各種資料を参考に、表-7 の通り設定した。なお、これらの数値は、あくまで筆者らによる想定値であり、現実と異なる可能性もあることを注記しておく。今後、これらのデータの精度を高めることで、モデルの信頼性をより向上させることができると考えている。

また、荷主サブモデルにおける船社間積替費用 $CTcost_i$ については、ターミナル間の短距離ドレージ費用を想定し、4.4.3 の陸上輸送費用における「輸送距離10km 以下の際の固定費用」である 24,475(円/TEU)を適用することとする。

4.4.3 陸上輸送費用

我が国におけるトラック輸送による輸送費用 $CLcost_b$ (円/TEU) については、港湾投資の評価に関する解説書 2004⁵⁶⁾ の記載をもとに、以下のように設定した。なお以下の各式で、輸送距離を2倍するのは、トラックが生産消費地と輸出入港湾間を往復する(すなわち、片道は空)と想定しているためである。

i) 往復輸送距離 ($2 \cdot lg_b$) が 10km 以下の場合

$$CLcost_b = 1116 \cdot (2 \cdot lg_b) + 24475$$

ii) 往復輸送距離が 10~100km の場合

$$CLcost_b = 877.7 \cdot (2 \cdot lg_b) + 26846$$

iii) 往復輸送距離が 100~200km の場合

$$CLcost_b = 568.8 \cdot (2 \cdot lg_b) + 57735$$

iv) 往復輸送距離が 200~500km の場合

$$CLcost_b = 405.3 \cdot (2 \cdot lg_b) + 90453$$

iv) 往復輸送距離が 500km より大きい場合

$$CLcost_b = 272.0 \cdot (2 \cdot lg_b) + 157100$$

表-7 本モデルにおける各港湾の費用の設定値
(本文中と表記単位が異なる点に注意されたい)

i	港湾名		荷役費 CH _i (千円/ TEU)	入出港費 (千円/隻)				ターミ ナル費 CT _i (百万 円/年)
				CE ₁	CE ₂	CE ₃	CE ₄	
1	日本	苫小牧	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
2	日本	塩釜	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
3	日本	東京	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
4	日本	横浜	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
5	日本	新潟	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
6	日本	清水	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
7	日本	名古屋	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
8	日本	四日市	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
9	日本	大阪	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
10	日本	神戸	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
11	日本	水島	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
12	日本	広島	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
13	日本	徳山下松	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
14	日本	博多	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
15	日本	北九州	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
16	日本	志布志	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
17	日本	那覇	15.0	1,762	2,054	2,492	3,369	1,080
18	韓国	釜山	8.0	650	942	1,380	2,257	690
19	ロシア	ウオストチーヌイ	2.0	746	1,038	1,477	2,353	500
20	中国	大連	5.0	675	967	1,405	2,282	500
21	中国	天津	5.0	675	967	1,405	2,282	500
22	中国	青島	5.0	675	967	1,405	2,282	500
23	中国	上海	5.0	675	967	1,405	2,282	500
24	中国	寧波	5.0	675	967	1,405	2,282	500
25	中国	廈門	5.0	675	967	1,405	2,282	500
26	中国	深セン	5.0	675	967	1,405	2,282	500
27	中国	香港	10.0	1,577	1,869	2,307	3,184	2,262
28	台湾	基隆	12.0	1,237	1,529	1,968	2,844	870
29	台湾	高雄	12.0	1,237	1,529	1,968	2,844	870
30	フィリピン	マニラ	3.0	655	947	1,385	2,262	500
31	ベトナム	ホーチミン	7.2	646	938	1,377	2,253	150
32	タイ	ランチャパン	8.4	731	1,024	1,462	2,339	160
33	タイ	バンコク	8.4	731	1,024	1,462	2,339	160
34	マレーシア	TJペラバス	4.0	965	1,258	1,696	2,573	350
35	マレーシア	ポートケラン	6.0	965	1,258	1,696	2,573	500
36	シンガポール	シンガポール	7.0	1,008	1,300	1,738	2,615	622
37	インドネシア	TJペラーク	5.0	774	1,066	1,504	2,381	500
38	インドネシア	TJプリオク	5.0	774	1,066	1,504	2,381	500
39	インド	ジャワハールネル	5.0	746	1,038	1,477	2,353	351
40	スリランカ	コロンボ	8.0	746	1,038	1,477	2,353	500
41	PNW		27.0	1,650	1,942	2,381	3,257	500
42	PSW		27.0	1,650	1,942	2,381	3,257	500
43	北米東岸		27.0	1,650	1,942	2,381	3,257	500
44	南米西岸		5.0	746	1,038	1,477	2,353	500
45	南米東岸		5.0	746	1,038	1,477	2,353	500
46	中東		5.0	746	1,038	1,477	2,353	500
47	地中海		13.0	1,309	1,602	2,040	2,917	500
48	欧州		13.0	1,309	1,602	2,040	2,917	500
49	アフリカ		5.0	646	938	1,377	2,253	500
50	大洋州		11.0	931	1,223	1,661	2,538	500

4.5 輸送時間

4.5.1 海上輸送時間

海上輸送時間を算出するための変数 (l_{ij} , vl_w 等) については、前節までですべて説明されている。

4.5.2 港湾内における必要時間

入港・出港混雑待ち時間の算出に必要な、各港湾におけるカテゴリ別のバース数 NB_{iw} については、Containerisation International Yearbook⁷¹⁾や各港 HP などを参考に表-8 に示すとおり設定した。

また、各港湾における搬入時および搬出時リードタイム LTL_i , LTU_i (時)、船積積替時間 $CTime_i$ (時)、ターミナル内荷役に関する平均業務時間 op_i (時/日)、入港時および出港時に最低限必要な時間 TAU_{iw} , TAL_{iw} (時、ここでは、船舶サイズによらず一定と仮定する)、(同一船社内) 積替作業時間 TT_i (時) については、個別の港湾についての情報が少ないことから、以下のような手順で設定した。すなわち、はじめに、港湾の規模や発展段階、あるいはトランシップ貨物の比率 (トランシップ貨物を重視したオペレーションを行っているかどうかの代理指標とみなす) 等に基づいて総合的に勘案し、各港湾のサービスレベルを、表-8 に示す4段階に設定した。そして、上記各変数について、このサービスレベルごとに、表-8 下段に示すように試行錯誤的に設定した。

さらに、1クレーンあたりの荷役効率 $prod_i$ (TEU/時)、バースカテゴリ別の1バースあたりクレーン数 NC_{iw} についても、データが少ないため、各港共通の設定 ($prod_i = 45$, $NC_{iw} = w + 1$) とした。また、入港待ち時間関数に関するパラメータ γ_1 , γ_2 は、筆者らのこれまでの試行錯誤的計算に基づき、 $\gamma_1 = 120.0$, $\gamma_2 = 5.0$ で固定した⁴⁸⁾。

4.5.3 陸上輸送時間

陸上輸送時間 $CLTime_b$ については、4.3.2 で算出した t_{jb} をそのまま用いることとする。また、荷主の時間価値 vt_{shpr} については、港湾投資の評価に関する解説書 2004⁵⁶⁾を参考に、全貨物共通で 1,348 (円/TEU・時) に設定した。

⁴⁸⁾ 過去には分散パラメータ θ 等と同様に未知パラメータとして推計の対象としたこともあったが、計算ケースによる推計結果の変化があまりみられないことから、今回は最初から固定することとした。

表-8 本研究で設定した港湾諸元
(費用に関する変数を除く)

i	港湾名		サービスレベル	バース数			
				NB _{i1}	NB _{i2}	NB _{i3}	NB _{i4}
1	日本	苫小牧	3	0	0	0	1
2	日本	塩釜	3	0	1	0	1
3	日本	東京	3	3	2	0	10
4	日本	横浜	3	0	7	10	6
5	日本	新潟	3	4	1	0	0
6	日本	清水	3	0	5	0	1
7	日本	名古屋	3	3	6	0	2
8	日本	四日市	3	0	2	0	0
9	日本	大阪	3	3	4	5	3
10	日本	神戸	3	5	8	5	10
11	日本	水島	3	5	0	0	0
12	日本	広島	3	7	0	0	1
13	日本	徳山下松	3	0	1	0	0
14	日本	博多	3	0	1	2	1
15	日本	北九州	3	3	4	0	0
16	日本	志布志	3	4	0	0	0
17	日本	那覇	3	0	0	1	0
18	韓国	釜山	2	0	7	2	11
19	ロシア	ウオストチーヌイ	4	0	2	2	0
20	中国	大連	4	0	3	4	0
21	中国	天津	4	0	1	4	3
22	中国	青島	4	0	2	0	6
23	中国	上海	4	7	6	5	4
24	中国	寧波	4	0	0	3	3
25	中国	廈門	4	0	2	3	0
26	中国	深セン	4	0	1	0	10
27	中国	香港	1	0	0	0	23
28	台湾	基隆	3	0	14	0	0
29	台湾	高雄	2	4	5	0	10
30	フィリピン	マニラ	4	19	7	2	1
31	ベトナム	ホーチミン	4	10	6	2	0
32	タイ	ランチャパン	3	0	0	0	7
33	タイ	バンコク	4	21	0	0	0
34	マレーシア	TJペラパス	1	0	0	0	6
35	マレーシア	ポートケラン	1	0	0	0	19
36	シンガポール	シンガポール	1	6	15	4	18
37	インドネシア	TJペラーク	4	11	0	0	0
38	インドネシア	TJプリオク	4	2	4	0	6
39	インド	ジャワハールネル	4	0	5	0	0
40	スリランカ	コロンボ	2	4	1	2	4
41	PNW		2	0	0	0	100
42	PSW		2	0	0	0	100
43	北米東岸		2	0	0	0	100
44	南米西岸		2	0	0	0	100
45	南米東岸		2	0	0	0	100
46	中東		2	0	0	0	100
47	地中海		2	0	0	0	100
48	欧州		2	0	0	0	100
49	アフリカ		2	0	0	0	100
50	大洋州		2	0	0	0	100

サービスレベル	搬入時リードタイム	搬出時リードタイム	同一船社内積替時間	船社間積替時間	ターミナル内荷役に関する平均オペレーション時間	入港時および出港時に最低限必要な時間*
	LTL _i (時)	LTU _i (時)	TT _i (時)	CTtime _i (時)	op _i (時/日)	TAU _{iw} , TAL _{iw} (時)
1	24	24	12	24	24	1
2	48	24	24	48	24	1
3	48	48	48	96	24	1
4	72	72	72	144	24	1

*船船サイズによらず共通

4.6 現状フロー・港湾間OD等

本節では、本研究のモデルが何らかの状態を起点に収束計算を行う必要があること (3.4 参照) や、サブモデ

ルのなかに初期依存性を持つものがある (3.3.3(4)参照) ことから必要となる、各内生変数の初期値の推計方法について述べる。具体的に、初期値が必要な変数は、1回目の船社サブモデル計算において外生的に与える必要のある航路別・船社グループ別の貨物輸送需要 (船社別港湾間 OD 貨物量) $q_{ag}^{(0)}$ 、および船社の総費用最小化行動モデルにおいて、フロー依存型のコスト関数を持つリンクのフロー (4種類各航走リンクのフロー $XPCP_{ijsg}^{(0)}$, $XLCU_{ijsg}^{(0)}$, $XPCU_{ijsg}^{(0)}$, $XLCP_{ijsg}^{(0)}$ および港湾総取扱量 $XH_i^{(0)}$) である。以下では、手順の関係から、港湾総取扱量、航走リンクフロー、船社別港湾間 OD 貨物量の順に推計方法を説明する。

4.6.1 港湾総取扱量

4.1 で推計方法を述べた地域間 OD 貨物量 Q_{rs} は、日本発着貨物については 47 都道府県別、日本以外の発着貨物については港湾別の貨物量であった。ここでは、日本発着貨物についても、コンテナ貨物流動調査データ⁵⁸⁾を用いて、日本以外発着貨物と同様の考え方 (2 国間貨物量データを港湾別シェアで比例配分する。ただし、ここでは日本 8 地域別データではなく、日本全体の貨物量を比例配分するものとする) により、本モデルの対象港湾 17 港を発着地とする港湾別の貨物量データを作成する。これを、港湾間 (全船社合計) OD 貨物量とよぶ (付録 F に推計結果を示す)。これを港湾別に集計したものが、モデルの初期値としての各港湾の輸出・輸入貨物量となる。これに対し、各港の統計等より別途推計した各港のトランシップ貨物率⁴⁹⁾を考慮することで、総取扱貨物量 (= 輸出入貨物量 / (1 - トランシップ貨物率)) が得られる。このようにして設定された港湾別貨物量を、表-9 に示す。ここで、表に示された取扱量が、実際の各港の 2003 年における実入りコンテナ取扱貨物量と多少異なるのは、①地域間 OD 貨物量推計時点での誤差 (特に GTAP データベースと Global Trade Navigator の貿易額データの間に多少の相違があることに起因する誤差)、②モデルで考慮されていない国々との輸出入貨物を考慮していないことに起因する誤差 (過小推計)、③モデルで考慮されている国については、逆に、モデルに含まれない中小港湾の取扱貨物もモデル対象港湾で取り扱われる、と仮定されていることに起因する誤差 (過大推計) 等が存在するためである。

⁴⁹⁾ 柴崎・渡部ら⁵⁷⁾を参照されたい。

表-9 本研究で設定した各港の初期取扱量とその内訳

i	港湾名		貨物量(千TEU, 2003年)				トランシ ップ率
			総取扱量 X _{H_i}	輸出	輸入	トランシ ップ	
1	日本	苫小牧	101	36	65	0	0%
2	日本	塩釜	68	39	29	0	0%
3	日本	東京	2,538	905	1,324	308	12%
4	日本	横浜	1,831	776	837	218	12%
5	日本	新潟	82	20	62	0	0%
6	日本	清水	411	254	157	0	0%
7	日本	名古屋	2,017	1,071	946	0	0%
8	日本	四日市	147	82	65	0	0%
9	日本	大阪	1,193	320	829	44	4%
10	日本	神戸	1,554	784	730	40	3%
11	日本	水島	70	38	32	0	0%
12	日本	広島	111	71	41	0	0%
13	日本	徳山下松	70	49	20	0	0%
14	日本	博多	308	123	185	0	0%
15	日本	北九州	310	165	145	0	0%
16	日本	志布志	19	3	16	0	0%
17	日本	那覇	29	4	25	0	0%
18	韓国	釜山	12,102	4,212	2,805	5,084	42%
19	ロシア	ウオストチーヌイ	449	348	102	0	0%
20	中国	大連	1,314	803	511	0	0%
21	中国	天津	2,265	1,384	880	0	0%
22	中国	青島	3,302	2,019	1,284	0	0%
23	中国	上海	8,829	5,397	3,432	0	0%
24	中国	寧波	2,050	1,253	797	0	0%
25	中国	廈門	1,963	1,200	763	0	0%
26	中国	深セン	6,558	4,008	2,549	0	0%
27	中国	香港	14,499	370	1,441	12,687	88%
28	台湾	基隆	2,322	1,045	1,206	71	3%
29	台湾	高雄	7,656	2,482	2,863	2,312	30%
30	フィリピン	マニラ	2,332	574	1,024	733	31%
31	ベトナム	ホーチミン	1,635	897	738	0	0%
32	タイ	ランチャバン	2,650	1,662	877	112	4%
33	タイ	バンコク	1,182	746	393	43	4%
34	マレーシア	TJペラパス	5,257	139	98	5,020	95%
35	マレーシア	ポートケラン	9,282	2,545	1,787	4,950	53%
36	シンガポール	シンガポール	12,985	1,482	986	10,518	81%
37	インドネシア	TJペラーク	1,658	1,058	600	0	0%
38	インドネシア	TJプリオク	2,812	1,795	1,017	0	0%
39	インド	ジャワハールネル	3,186	1,577	1,609	0	0%
40	スリランカ	コロンボ	1,450	229	217	1,003	69%
41	PNW		3,140	1,091	2,049	0	0%
42	PSW		9,313	2,633	6,680	0	0%
43	北米東岸		4,307	1,234	3,072	0	0%
44	南米西岸		465	266	199	0	0%
45	南米東岸		839	482	357	0	0%
46	中東		4,767	3,120	1,647	0	0%
47	地中海		2,615	587	2,028	0	0%
48	欧州		8,589	3,221	5,368	0	0%
49	アフリカ		1,382	633	749	0	0%
50	大洋州		2,097	1,250	847	0	0%

4.6.2 航走リンクフロー

船舶サイズ別船社グループ別の港湾間輸送実績は、MDS Transmodal 社の航路別船社別寄港実績データ⁷²⁾から明らかとなる寄港地順・頻度・船舶サイズを整理する⁵⁰⁾ことで、船舶サイズ別船社グループ別港湾間年間就航船腹量 (TEU ベース) を求め、これに消席率を乗じることで得られる。ここで、消席率については実績デー

⁵⁰⁾ モデル対象港湾でない寄港地を寄港地リストから「飛ばす」(削除していく)ことで、モデル対象港湾間だけの就航船腹量データを作成する。ただし、この作業の結果、寄港地リストにおいて同一の寄港地が連続することとなった場合は、その間のフローはゼロとして取り扱う。

タが得られないため、外航船社へのインタビュー調査等により、アジア域内航路については全区間 0.8, アジア域内と域外を結ぶ航路については、そのうちアジア域内区間は 0.4, その他の区間 (アジア域内外を跨ぐ区間およびアジア域外相互間) は 0.8 と設定した⁵¹⁾。

図-12 に、このようにして得られたアジア地域発着全リンクの合計延べ就航船舶数および輸送貨物量 (リンクフロー) に対する船舶サイズ別内訳を、また図-13 にリンクフローの船社グループ別内訳を示す。さらに、図-14 に、全世界の港湾間リンクフロー (サイズ・船社合計、往復も合計) の推計図を示す (なお、各リンクの具体的な推計値については、膨大なデータとなるため本論文への掲載は省略した)。

図-12 に示されるサイズ別内訳をみれば、輸送貨物量のほうが延べ就航船舶数よりも若干大型船のシェアが大きいものの、サイズカテゴリ 4 (4000TEU 以上) が 4 割程度、カテゴリ 2 (1000-2500TEU) およびカテゴリ 3 (2500-4000TEU) が約 1/4~3 割程度を占め、カテゴリ 1 (1000TEU 以下) のシェアがもっとも小さいという傾向は同じであることがわかる。また、図-13 に示される船社別内訳をみれば、グループ A, E, H などのシェアが比較的大きいことがわかる。

このようにして得られたフローを、4 種類の航走リンクフロー (①停泊-航走-停泊リンク, ②船積-航走-船卸リンク, ③停泊-航走-船卸リンク, ④船積-航走-停泊リンク) へ分割する方法については、実績データを収集することは困難であることから、以下の方法で推計する。i) 当該港湾間の推計フロー XC_{ijwg} に対する、4 種類のフローのシェアをそれぞれ $r1_{ij}$, $r2_{ij}$, $r3_{ij}$, $r4_{ij}$ (ただし、 $0 \leq r_{ij} < 1, n=1,2,3,4$) とする。このとき、以下の式が成り立つのは自明である。

$$r1_{ij} + r2_{ij} + r3_{ij} + r4_{ij} = 1 \quad (48)$$

ii) 発港 i の出港フローの合計を F_i , 着港 j の到着フローの合計を F_j とする。すなわち、

$$F_i = \sum_g \sum_w \sum_j XC_{ijwg} \quad (49)$$

$$F_j = \sum_g \sum_w \sum_i XC_{ijwg} \quad (50)$$

⁵¹⁾ アジア域内外を結ぶ航路のアジア域内区間における消席率を 0.4 と設定したのは、アジア域内外を結ぶような長距離航路では、アジア域内の各港で順に貨物を積み (または順に貨物を卸し)、アジア域内外を跨ぐ際の消席率が 0.8 となるようなルーティングを想定しており、最初の区間の消席率 0 と最後の区間の消席率 0.8 の平均をとったためである。

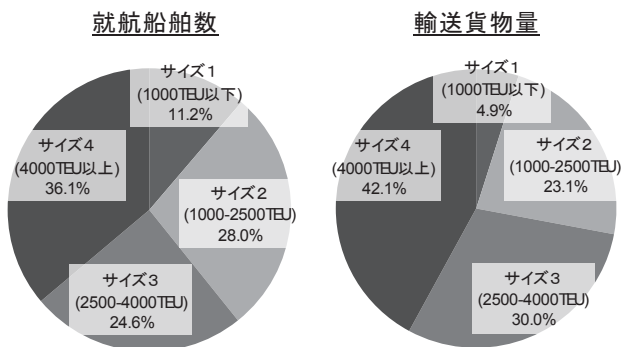


図-12 航走リンクにおける延べ就航船舶数および輸送貨物量 (リンクフロー) のサイズ別内訳 (現状推計値)

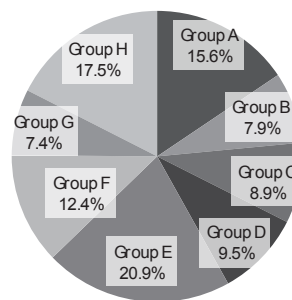


図-13 航走リンクにおける輸送貨物量 (リンクフロー) の船社グループ別内訳 (現状推計値)

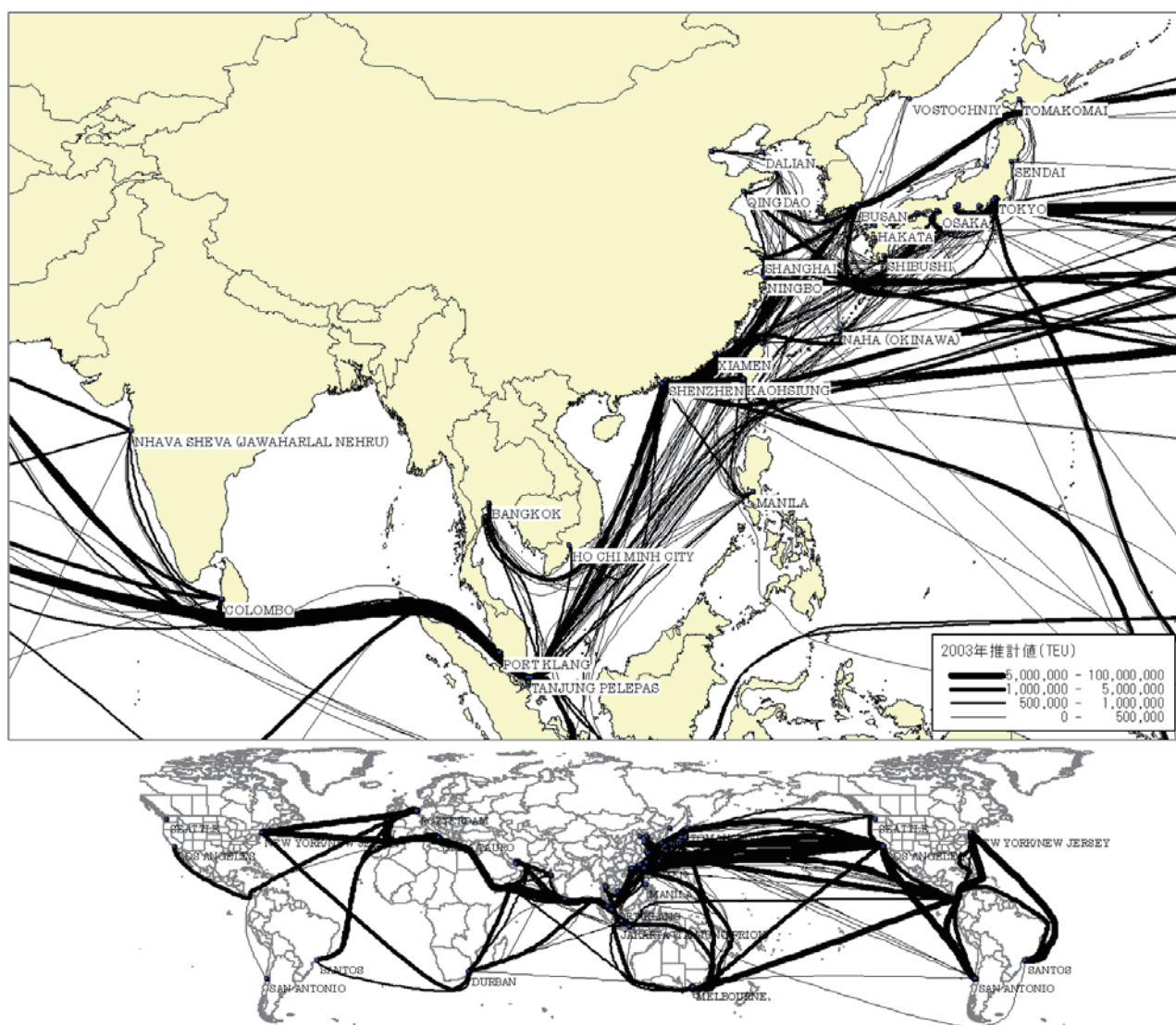


図-14 港湾間リンクフロー現状推計図 (2003 年年間値)

また、4.6.1より得られる発港 i の船積貨物量（輸出貨物量+トランシップ貨物量/2）を Y_i 、着港 j の船卸貨物量（輸入貨物量+トランシップ貨物量/2）を Y_j とする。

iii) このとき、停泊リンクフローと船積または船卸リンクフローの関係より、下式を仮定する。

$$r2_{ij} + r4_{ij} = \frac{Y_i}{F_i} \quad (51)$$

$$r2_{ij} + r3_{ij} = \frac{Y_j}{F_j} \quad (52)$$

上式は、全取扱貨物量に対する船積・船卸貨物量の比（右辺）が、各航路（相手港湾別）にも相似的に成り立つ（左辺）との仮定に基づくものである。

iv) さらに、停泊-航走-停泊リンクと船積-航走-船卸リンクの関係にも同様の相関係係を仮定する。

$$\frac{r2_{ij}}{r1_{ij} + r2_{ij}} = \frac{Y_i + Y_j}{F_i + F_j} \quad (53)$$

v) (48), (51), (52), (53)式の連立方程式より、 $r1_{ij}$, $r2_{ij}$, $r3_{ij}$, $r4_{ij}$ を求める。

vi) ただし、v)で求めた $r1_{ij}$, $r2_{ij}$, $r3_{ij}$, $r4_{ij}$ のいずれかが $0 \leq r_{ij} < 1$ を満たさない場合には、以下の方法で解を得る。

① $Y_i/F_i < Y_j/F_j$ の場合、 $r4_{ij} = 0$ として、(53)式の仮定を除く。すなわち、

$$\begin{aligned} r1_{ij} &= 1 - Y_j/F_j (> 0) \\ r2_{ij} &= Y_i/F_i (> 0) \\ r3_{ij} &= Y_i/F_i - Y_j/F_j (> 0) \\ r4_{ij} &= 0 \end{aligned}$$

② $Y_i/F_i > Y_j/F_j$ の場合は、 $r3_{ij} = 0$ として、(53)式の仮定を除く。すなわち、

$$\begin{aligned} r1_{ij} &= 1 - Y_i/F_i (> 0) \\ r2_{ij} &= Y_j/F_j (> 0) \\ r3_{ij} &= 0 \\ r4_{ij} &= Y_i/F_i - Y_j/F_j (> 0) \end{aligned}$$

なお、(51), (52), (53)式の仮定は非常に強いものであるが、他に推定の方法がないため便宜的に置いているものであることに注意されたい⁵²。

4.6.3 船社別港湾間 OD 貨物量

4.6.1で作成した全船社合計港湾間 OD 貨物量を初期値とし、同じく4.6.1で作成した輸出入港湾取扱貨物量（トランシップ貨物量は除く）を船社グループ別の入出港フローで比例配分した、船社グループ別港湾別輸出・輸入貨物取扱量をコントロールトータルとして、フレター法により、船社グループ別港湾間 OD 貨物量を算出する。なお、スペースの都合上、推計結果の掲載は省略する。

5. 未知パラメータの推計とモデルパフォーマンスの検証

5.1 未知パラメータの推計方法と結果

5.1.1 推計方法

本モデルに含まれるパラメータ（4.の表-3 参照）のうち、荷主の選択行動モデル（(1)式および(8)式）に含まれる分散パラメータ θ 、荷主の下位モデルの選択結果を反映するログサム変数（(3)式）が負とならないための調整パラメータ ζ 、および船社の費用最小化行動モデルに含まれる金銭時間換算係数（船社にとっての時間価値） vt_{carr} の3つは、外生的に与える必要がある変数の中でも、どのような値を設定すればよいかの根拠材料に乏しいことから、未知パラメータとして、モデルの計算結果が現状をもっともよく再現するように決定することとする。

このうち、分散パラメータ θ は、確率配分型モデルにおける誤差項の分布形を規定するもので、(1)式や(9)式を見ても明らかのように、値が大きいほど、各選択肢（ルート）の費用差がより反映されるようになり、最少費用ルートに流れるフローが大きくなるなど、確定的配分に近づく。一方、値が小さくなると、ルート間の費用差が重要でなくなり、どのルートも同程度に選ばれやすくなる。

また、ログサム変数の調整パラメータ ζ は、(3)式で表わされる各航路 a のログサム変数 A_a が、「当該航路における各船社グループのサービスレベルを考慮した全体的な使いやすさ（に反比例するコスト）」を表しており、調整パラメータを考慮しない場合、各グループのサービスレベルが全体的に向上すると負になることもあり得ることから、便宜的に導入するものである。ただし、輸出入事務にかかわる手続き費用や諸経費など、荷主が

⁵² このため、次章の未知パラメータ推計における現状再現性検証の対象となる航走リンクフローは、4種類合計のフローとする。

国際海上輸送を利用する際にならざる費用と解釈することもできるだろう。

さらに、船社にとっての時間価値 vt_{carr} についてみれば、 $vt_{carr} = 0$ の場合は、各船社にとっては、どんなに時間がかかっても、輸送費用を安くすることへのインセンティブが働くことを意味し、直観的に考えてやや非現実的な状況となる。一方で、荷主と比べれば、時間のウェイトはより小さくなる（すなわち、4.5 で設定した荷主の時間価値 $vt_{shpr} = 1,348$ 円/TEU/時よりは小さい）ことが予想される。

ここで、未知パラメータ推計において比較対象とする現状値としては、4種類の船社グループ別船舶サイズ別のアジア地域を発地または着地とする⁵³航走リンクフローの和を用いる。この現状値と推計値の誤差二乗和の平方の、現状のフローに対する比を目的関数値とし、これが最小となるパラメータの組み合わせを求める。ここで、上記の3つの未知パラメータのうち、ログサム変数の調整パラメータ ζ については、最も A_a が小さい航路において、 A_a が実際のコスト（運賃+時間費用）とおおむね等しくなることも考慮し、試行錯誤的に $\zeta = 200,000$ （円）と設定した。残りの2つの未知パラメータについては、両者が目的関数値に対して比較的トレードオフの関係にあることも考慮し、以下に示す最急降下法（最適勾配法）⁵⁴によって求めることとする。

- i) パラメータの探索範囲を設定する。探索範囲は適切に設定することが必要である。範囲が広すぎると解が非現実的な値となったり、計算が不可能になることもあり、また、計算時間もかかる。一方で、範囲が狭すぎると適切な解が見つけられない可能性がある。
- ii) 格子探索（グリッドサーチ）によって、探索範囲内で目的関数が最小となるパラメータの組み合わせを求める。これを初期解とする。
- iii) 初期解を起点とした1次元（直線的）探索方向を決定する。最急降下法では、通常、初期解における目的関数の微分値を計算することにより降下方向（最適勾配方向）を求めるが、本モデルにおいては微分計算が不可能であるため、各パラメータについて、それぞれ

初期解から微小変化させた場合の目的関数の変化量を求め、これらを合成することにより探索方向を決定する。

- iv) 初期解を片方の端点とし、探索方向と i) で設定した探索範囲の交点をもう一方の端点とした直線上において、目的関数値が最小となる点を求める。ここでは、計算速度を速めるため、黄金分割法を用いて探索した。
- v) iv) で得た点を新たな初期解として、目的関数値が収束判定基準（表-11 参照）以下となるか、予め決めておいた繰り返し計算回数の上限に達するまで、iii) に戻り計算を繰り返す。この際、繰り返し回数が進むにつれて、1次元探索の距離を徐々に短くすることで収束を早める。

5.1.2 推計結果

上記手順 ii) の格子探索を、 $2.0 \times 10^{-6} \leq \theta \leq 1.0 \times 10^{-5}$ （円）、 $10 \leq vt_{carr} \leq 1,000$ （円/TEU/時）の範囲内で行った結果を表-10に示す。表に示されるように、 $\theta = 6.0 \times 10^{-6}$ （円）、 $vt_{carr} = 100$ （円/TEU/時）のとき目的関数が最小となった。

次に、この点を出発点に、試行錯誤的に決定した表-11に示す条件のもとで、5.1.1の手順 iii)~v) にしたがって推計計算を行った。その結果、 $\theta = 5.98 \times 10^{-6}$ （円⁻¹）、 $vt_{carr} = 97.1$ （円/TEU/時）⁵⁵のとき目的関数が 4.190×10^{-2} となり最小となった。

表-10 未知パラメータに関する格子探索結果
(目的関数値, 10^{-2})

θ (10^{-6})	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
vt_{carr} 10	5.228	4.978	4.696	4.495	4.449	4.539	4.762	4.870	4.903
100	4.652	4.484	4.342	4.245	4.208	4.224	4.293	4.355	4.428
1000	4.559	4.527	4.438	4.342	4.305	4.347	4.309	4.346	4.405

表-11 未知パラメータ推計計算における計算条件

1次元探索における探索計算(黄金分割法)回数の上限	15
1次元探索の打ち切り基準(前回の航走リンクフローとの誤差二乗和の平方の、前回リンクフローの和に対する比)	1.0×10^{-4}
最急降下計算の繰り返し回数の上限	3
目的関数値の収束判定基準	1.0×10^{-4}

⁵³ ここで、目的関数値の計算を「アジア地域を発地または着地とする」航走リンクフローに限定したのは、4.2.2で述べたように、アジア地域外同士を発着する貨物は本モデルの計算対象外としたため、アジア地域外発着のフローについては、再現性を問うことが難しいことによる。

⁵⁴ 最急降下法や最適勾配法については、たとえば長尾⁷⁹⁾を参照されたい。また、交通ネットワーク均衡配分計算における求解方法として最も一般的に利用される Frank-Wolfe アルゴリズムも、最急降下法（最適勾配法）の一種である（探索方向を求める際に前回の解（リンクフロー）を用いている）。

なお、本モデルの計算時間は、Dell Precision T7400（CPU: クワッドコア・インテル Xeon プロセッサ（2x6GB L2 キャッシュ, 3.16GHz, 1333MHz FSB）x2, メモリ 16GB）を使用した場合で、1ケース（1つのパラメータの組み合わせ）ごとに 10~15 分程度かか

⁵⁵ 荷主の時間価値の約 7.2%に相当する。

る。したがって、30～50 ケース程度の計算が必要となる格子探索や最急降下法によるパラメータ推計計算では、PC の性能によっても大きく異なるものの、おおむね6 時間～半日程度要する。

5.2 モデル計算における収束状況の確認

これまで述べてきたように、本モデルは、何重もの収束計算が入れ子構造になっており、これを繰り返して最終的な均衡解（ナッシュ均衡解）を求めるものである。いずれの収束計算においても、理論的に必ず収束するという保証はなく、実際に解が収束し、ナッシュ均衡状態となっているか、事後的に確認する必要がある。

以下では、1) 船社の収入最大化モデルにおける各船社の航路別運賃、2) 船社の総費用最小化モデルにおける各船社の入港リンクフロー、3) 船社サブモデル全体の収束計算（収入最大化モデルと総費用最小化モデルの交互計算）における船社別航路別貨物需要、4) モデル全体収束計算（荷主サブモデルと船社サブモデルの交互計算）における航路リンクフローについて、計算の収束状況を確認する。なお、以下の検証にあたっては、前節で推計した最終的な均衡（と思われる）解周辺における収束状況を確認することとする。

5.2.1 船社の収入最大化モデルにおける収束状況

3.3.2 で述べた船社の収入最大化モデルにおいては、各船社グループは、他グループの運賃を参照しながら自グループの運賃を決定する。

図-15 に、一例として、収束解における、横浜－香港航路（貨物輸送需要：77,598 TEU/年）の各船社グループの運賃と年間収入の関係を示す。ここでは、直感的に理解しやすいよう、モデル計算で得られた運賃を基準にその変化率と収入の関係を示している。図より、いずれの船社グループにおいても、現在の運賃において収入が最大となっており、ナッシュ均衡状態にあることがわかる。他の航路についても、同様の状況である。

また、本研究の収入最大化モデルにおいては、費用が運賃を上回る、いわゆる赤字航路においても、当該航路から特に撤退することはないものと想定している⁵⁶。このような想定は、寡占市場のモデルにおいてはやや奇異な仮定と受け止められるかもしれないが、ここでは、コンテナ船のスケジューリングが、1 ループで複数の寄港地を周回することが多く、特定の航路（特定の港湾間）だけ撤退することはサービス維持の観点から難しい、と

いう現実の状況を想定している。確認のため、図-16 に、本モデルによって計算された各航路における船社別の1 TEU あたりの利潤（＝運賃－費用）の分布を示す。全体の約 3/4（76.2%）の航路において、利潤が正となっている。さらに、ここではスペースの都合上図表で示すことはしないが、赤字航路はフローの小さいものが多いため、航路別の収益で見ると、赤字航路における総赤字額は、黒字航路における総黒字額の 0.5%程度にすぎない（船社グループ別に見ても、赤字航路が最も多いグループでも総黒字額の 3%程度となっている）。この結果は、本モデルにおいて、多少の赤字航路を他の黒字航路でカバーするという船社の配船戦略を再現しているとも解釈できよう⁵⁷。

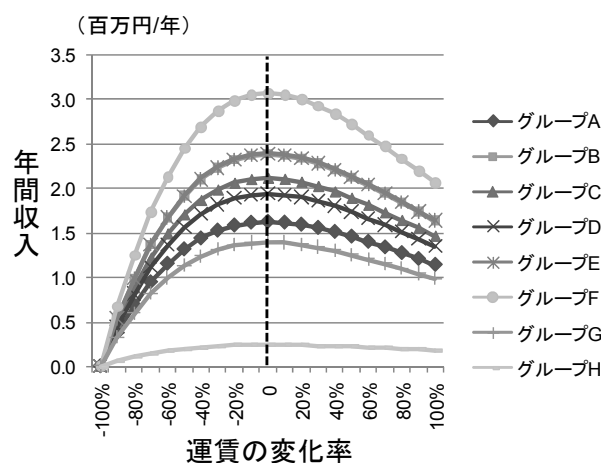


図-15 横浜－香港航路（貨物輸送需要：77,598 TEU/年）における各船社グループの運賃と年間収入

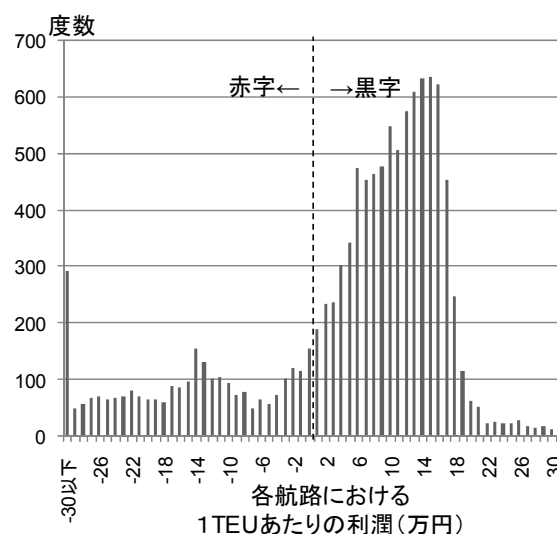


図-16 各航路（船社別）の利潤の分布

⁵⁶ 3.3.2(3)に示される収入最大化モデルの解法においても、赤字航路からの撤退処理等の手順は含まれていない。

⁵⁷ 赤字航路からは撤退するとの仮定に基づいたモデル計算も可能である。今後の課題としたい。

5.2.2 船社の総費用最小化モデルにおける収束状況

3.3.3 で述べた船社の総費用最小化モデルにおいては、航走リンクフローの和 XC_{iwig} を含む、船積-航走-船卸、停泊-航走-船卸、船積-航走-停泊の3つの航走リンクや、総港湾取扱量 XH_i を含む船卸・船積リンクなど、フローの減少関数となるコストをもつリンクに加え、入港リンクフロー $XAP_{iwig}+XAU_{iwig}$ や出港リンクフロー $XDP_{iwig}+XDL_{iwig}$ を含む入港停泊・入港船卸リンクおよび出港停泊・出港船積リンクや、船卸貨物量 XUG_{iwig} や船積貨物量 XLG_{iwig} を含む船卸リンクや船積リンクなど、フローの増加関数となるコストを持つリンクも含まれる。さらに、入港停泊・入港船卸リンクおよび出港停泊・出港船積リンクにおいては、他船社 g' の入港リンクフロー $XAP_{iwig'}+XAU_{iwig'}$ や出港リンクフロー $XDP_{iwig'}+XDL_{iwig'}$ も含まれる。

このため、5.1 で得られたパラメータのもとでのモデル計算における、各船社の総費用最小化モデルの収束状況を図-17 に示す。図より、船社の総費用最小化モデルにおいては、おおむね5~10回程度の繰り返し計算で収束することがわかる⁵⁸。

また図-18 に、本モデルで推計された、各港湾における船舶入出港時混雑⁵⁹の待ち時間を示す。図より、深セン・天津等といった中国の港湾や釜山港において、特に出港時に相当の混雑がみられる。ただし、船社の時間価値（金銭時間換算係数）が小さいため、船社の総費用最小化モデルの収束速度に対しては、ほとんど影響していないものと考えられる。

目的関数値(全リンクフローにおける前回計算との誤差)

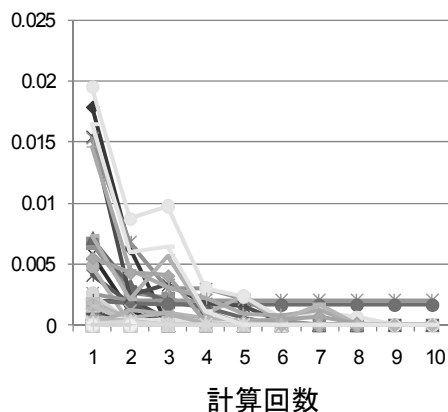


図-17 船社の総輸送費用最小化モデルにおける収束状況

5.2.3 船社サブモデル全体の計算における収束状況

図-19 に、目的関数値（航路別船社別需要 q_{ag} の前回計算結果との誤差二乗和の平方の、需要の総和に対する比）の収束状況を示す。図より、2~3回の繰り返し計算で目的関数値が 10^{-3} 以下とはなるものの、計算回数を増やしてもそれ以上はあまり収束しない傾向がよみとれる。

図-20 に、繰り返し計算の初回および最終回における、航路別船社別貨物需要の一期前との比較を示す。図より、計算の最終段階においては、貨物需要は一期前の計算結果からほとんど変化せず、図-19 に示される状況（目的関数値が $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 程度）でも十分収束しているといえることがわかる。

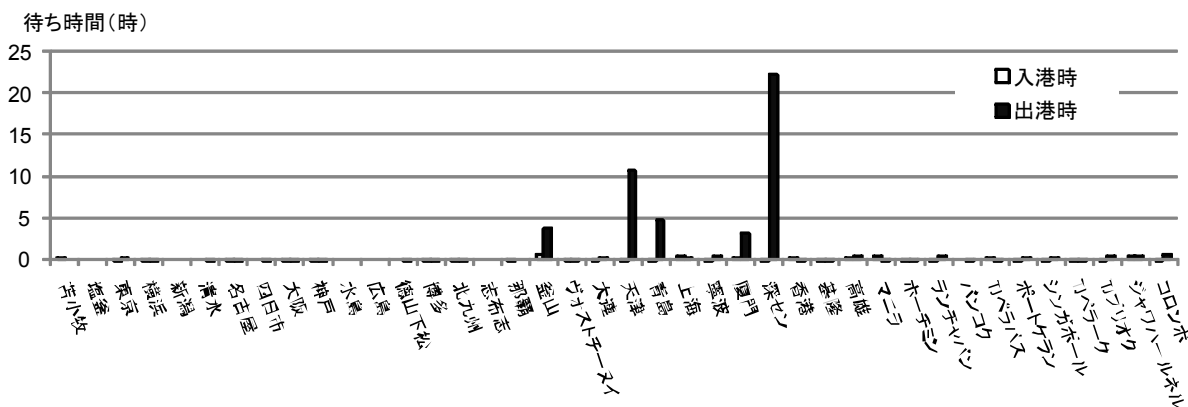


図-18 本モデルで推計された各港湾における船舶入出港混雑の待ち時間

⁵⁸ 3.4 の表-2 に示される収束計算の条件（繰り返し回数上限10回、収束判定基準 10^{-6} ）も、このような収束の状況等を確認しながら、試行錯誤的に決定したものである。

⁵⁹ なお、入港時と出港時で混雑による待ち時間が異なるのは、3.3.3 の船社の総費用最小化モデルにおいて、入港リンクと出港リンクが別々に設定され、両者の船舶数の一致制約が考慮されていないことによる。

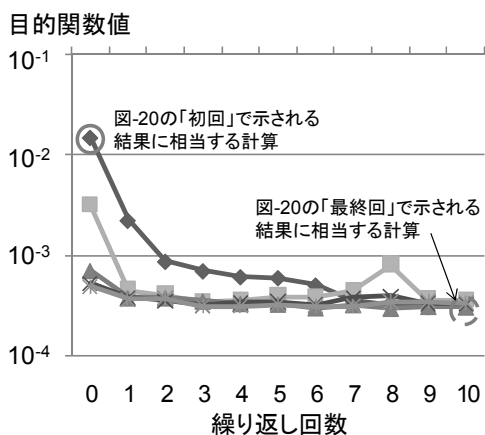


図-19 船社サブモデル全体計算における収束状況

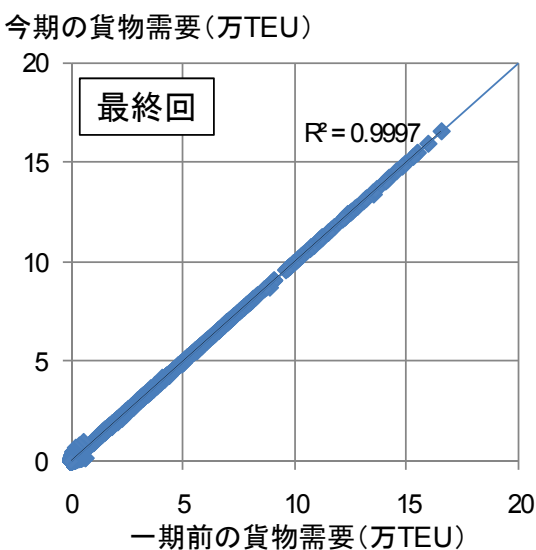
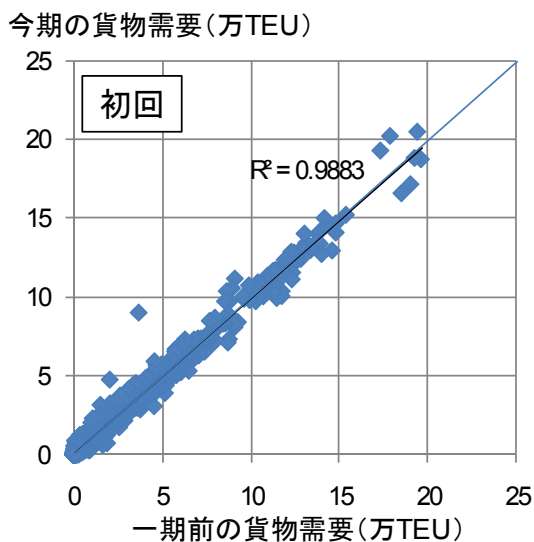


図-20 船社サブモデル繰り返し計算における一期前の航路別船社別貨物需要との比較

5.2.4 モデル全体の計算における収束状況

図-21 に、目的関数値（船社別航走リンクフロー XC_{ijwg} の前回計算結果との誤差二乗和の平方の、リンクフローの総和に対する比）の収束状況を示す。なお、図-21 には、参考として、未知パラメータ推計計算の初期値 ($\theta = 6.0 \cdot 10^{-6}$, $vt_{carr} = 100$) における収束状況も示す。図より、4～5回の繰り返し計算で目的関数値が 10^{-3} 以下となり、その後は船社サブモデルの全体計算と同様に頭打ちとなる傾向がわかる。

図-22 に、繰り返し計算の初回および最終回（5回目）における、船社別航走リンクフローの一期前との比較を示す。図より、船社サブモデルの全体計算と同様、計算の最終段階においては、航走リンクフローは一期前の計算結果からほとんど変化していないことがわかる。

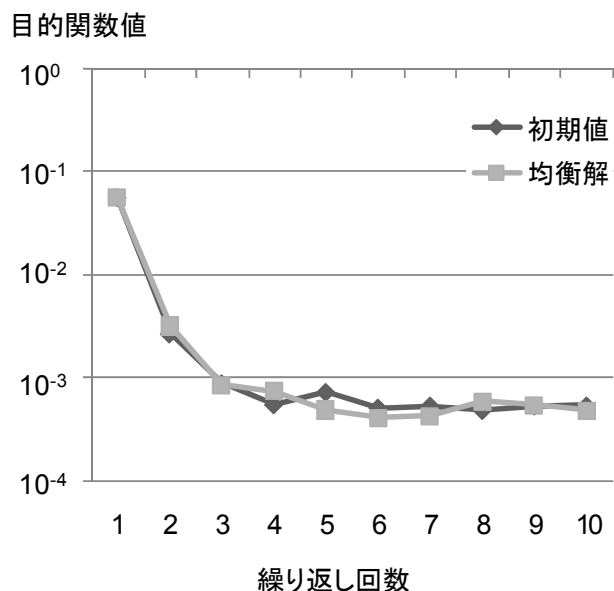
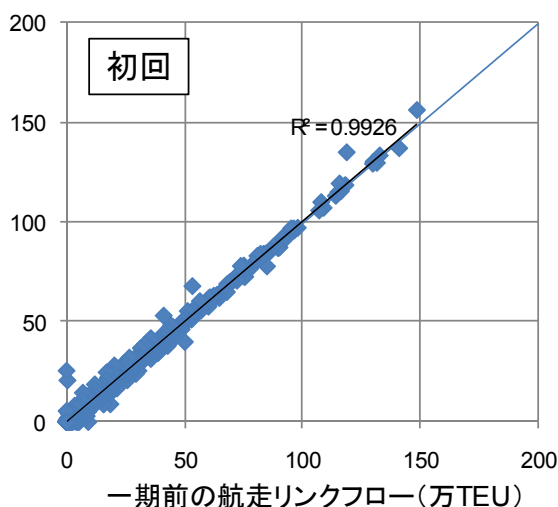


図-21 モデル全体計算における収束状況

今期の航走リンクフロー(万TEU)



今期の航走リンクフロー(万TEU)

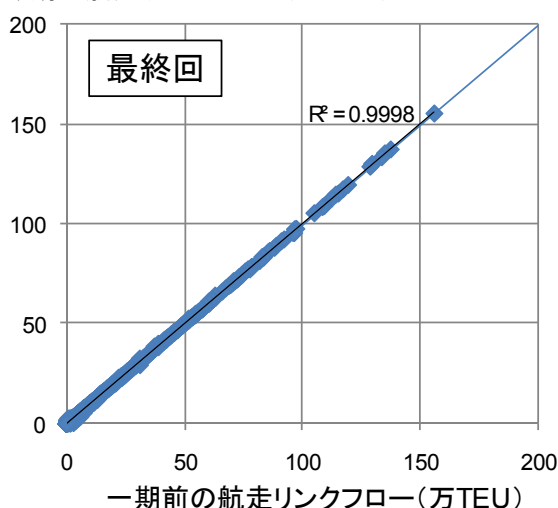


図-22 モデル全体の繰り返し計算における
一期前の船社別航走リンクフローとの比較

5.3 モデル現状再現性の確認

本節では、3. で構築したモデルに対して、4. および前節で作成・推計したパラメータを代入した計算の結果について、現状値と比較することで、モデルの再現性を確認する。

5.3.1 港湾取扱量

図-23 に、日本の各港における⁶⁰輸出入貨物取扱量の合計値における現状値とモデル推計値の比較を示す。図に示されるとおり、東京・横浜・神戸港をはじめとして、おおむね現状を再現する結果となっていることが確認で

きる。ただし、名古屋や仙台塩釜・新潟・那覇港等、いくつか港湾で現状に対して過小な推計値となっており、大阪や北九州港で現状に対して過大な推計値となっている。

また、図-24 に、アジア各港におけるトランシップ貨物取扱量の現状値とモデル推計値の比較を示す。これまで、この種のモデルでは、このトランシップ貨物の再現性（特にシンガポールやタンジュンペラパスなどトランシップ貨物率の高い港湾において）が低いことが多かったことに比べると、本モデルの推計結果は、なお多少の誤差は存在するものの、主要港湾のトランシップ貨物量において、高い再現性（重相関係数も高く、また近似直線もほぼ 45 度線に一致する）を得ることができた。また、図の左下部分を見ると、現状では統計上トランシップがゼロとなっている港湾においても、計算結果においては、いくらかのトランシップ貨物量が推計されている。特に深センや上海をはじめとする中国の港湾でこの傾向がみられ、この原因としては、実際には国内フィーダー輸送への積替等、トランシップ貨物取り扱いの実績が多少あっても統計上把握されていないという可能性も考えられる。あるいは、これら中国の港湾の今後のトランシップ貨物取り扱いのポテンシャルを表していると解釈することもできるだろう。

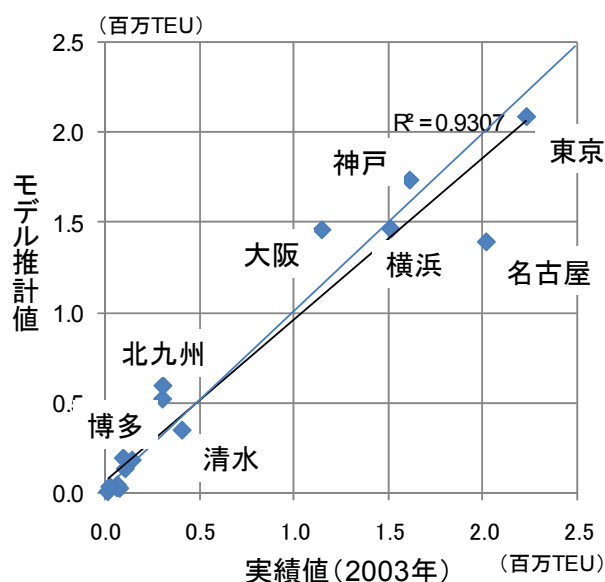


図-23 日本の港湾における輸出入貨物取扱量の現状値
(2003年) とモデル推計値の比較

⁶⁰ 図-16 において日本の港湾のみが図化の対象であるのは、4.1 で述べたように、荷主の輸出入港湾選択行動を考慮しているのが日本発着貨物のみであるためである。

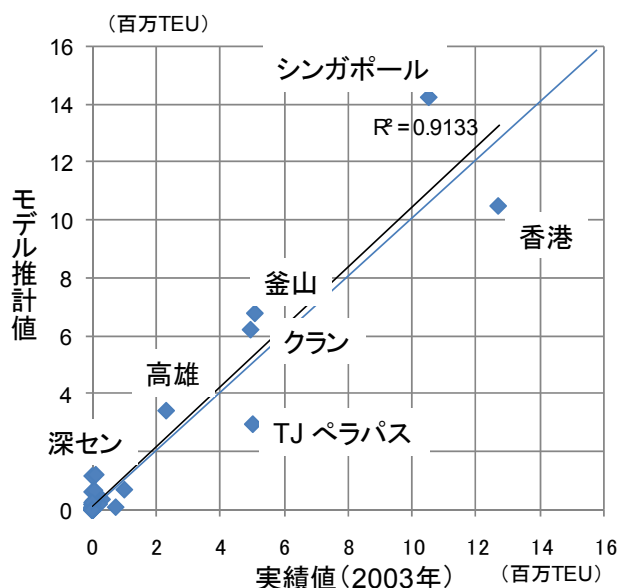


図-24 アジア各港におけるトランシップ貨物取扱量の現状値（2003年）とモデル推計値の比較

5.3.2 港湾間貨物輸送量（航走リンクフロー）

図-25 に、全船社グループ合計・全船舶サイズ合計・4種類の航走リンク合計の、アジア発着港湾間貨物輸送量（航走リンクフロー）の現状値とモデル推計値との比較を示す。また、同じくアジア発着航走リンクにおける就航船舶数および貨物輸送量のサイズ別内訳の現状値とモデル推計値との比較を図-26 および図-27 に、貨物輸送量の船社グループ別内訳および航走リンク種類別内訳の比較を図-28 および図-29 に示す。

図-25 に示される結果をみると、近似直線の傾きに示されるように、全体的な傾向としては、モデル推計値が現状値よりもやや過小に推計されている一方で、一部のリンクフローの多いリンクでは、逆にモデル推計値が過大推計となっていることがわかる。すなわち、モデル推計値においては、現状よりも、特定のリンクにフローが集中しており、モデル計算において、航走リンクにおける規模の経済性が、実際よりもより強く働いていることが推測される。

図-26 に示される航走リンクフローの就航船舶数に関するサイズ別内訳の比較をみれば、本モデルでは、サイズカテゴリ2以下の船舶数のシェアが過大に推計され、カテゴリ3以上の船舶数シェアが過小に推計されていることがわかる。また、図-27 に示される航走リンクフローの輸送貨物量に関するサイズ別内訳の比較をみれば、本モデルでは、サイズカテゴリ2の船舶（1000TEU-2500TEU）のシェアが過大に推計され、残りのカテゴリの船舶がそれぞれやや過小に推計されていることがわか

る。両者を比較すると、就航船舶数のサイズ別内訳において現状との差が大きい。また、図-28 に示される航走リンクフローの船社グループ別内訳の比較をみれば、本モデルの再現値においては、グループB, G, H等のシェアが増加し、グループA, E, Fのシェアが減少していることがわかる。さらに、図-29 に示される航走リンクフローのリンク種類別内訳の比較をみれば、現状においては、通過-航走-通過リンクが全体の3/4を占めているのに対し、モデル推計値においては、通過-航走-通過、通過-航走-船卸、船積-航走-通過の3リンクがそれぞれ約3割を占める結果となっている。

以上をまとめると、図-29 に示されるリンク種類別内訳において、現状と推計結果が最も大きく異なっており、この結果と図-25 に示された特定のリンクへの集中傾向を合わせて考察すれば、現状に比べ、モデルで再現されたコンテナ輸送ネットワークにおいては、1ループあたりの寄港数が比較的少なく、2,3の大港湾を結ぶサービスが多くを占めていることが考えられる。現実には、1つのループでより多くの寄港地を回るようなサービスも多いものと考えられ、このようなループの再現性を高めることが今後の課題といえるだろう。

また、図-26 に示される就航船舶数に関するサイズ別内訳において、図-27 に示される輸送貨物量に関するサイズ別内訳よりも現状と推計結果がより異なっているのは、特に大型船において消席率が過大に推計されているためと考えられる。消席率の過大推計傾向については、付録Aにも述べるように、本モデルにおいて入出港船舶数の一致制約が考慮されていないことに起因するものと思われる。このような条件をモデルに追加することも、今後の課題である。

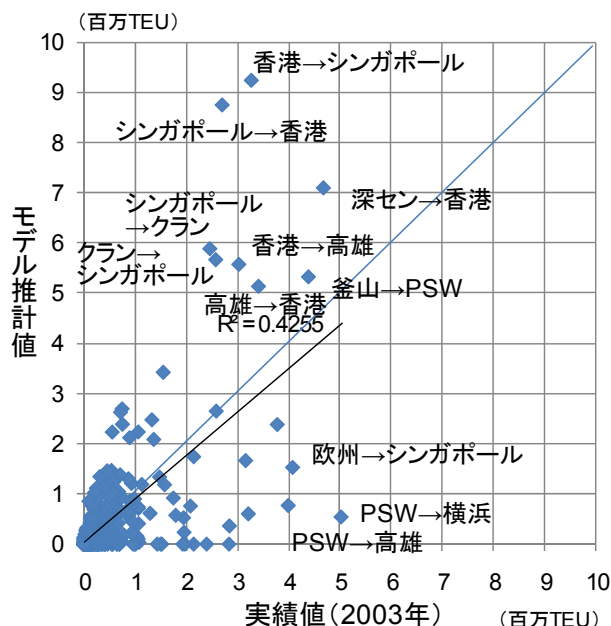


図-25 アジア発着航走リンクフロー（全船社グループ合計・全船舶サイズ合計・4種類のリンク合計）の比較

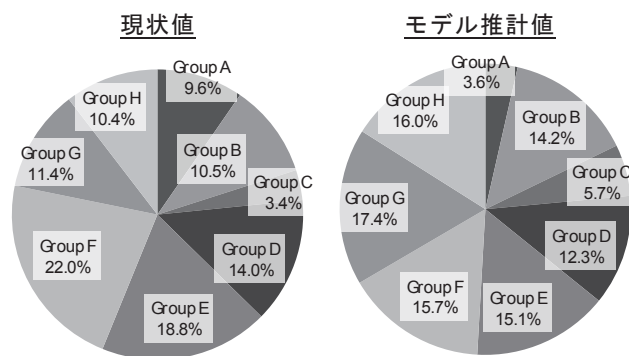


図-28 アジア発着航走リンクにおける輸送貨物量（リンクフロー）の船社グループ別内訳の比較

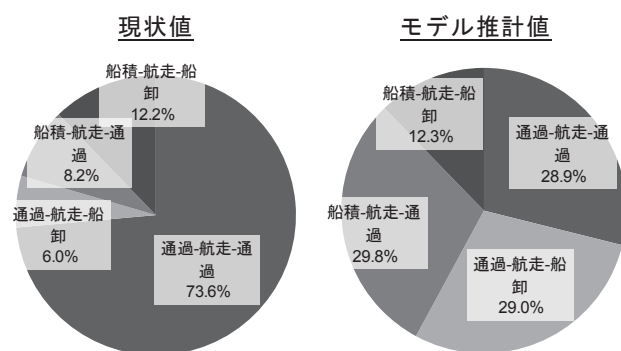


図-29 アジア発着航走リンクにおける輸送貨物量（リンクフロー）の航走リンク種類別内訳の比較

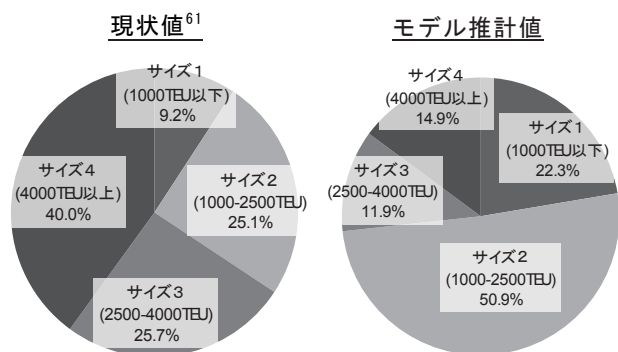


図-26 アジア発着航走リンクにおける就航船舶数のサイズ別内訳の比較

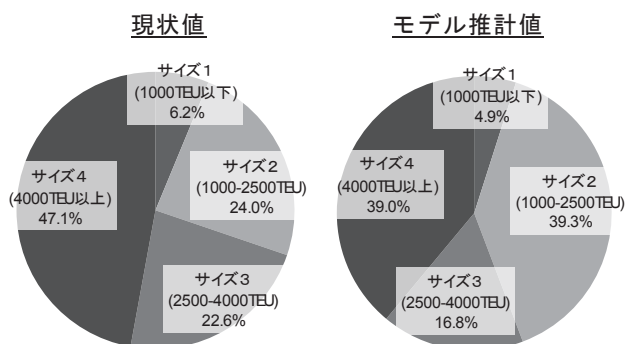


図-27 アジア発着航走リンクにおける輸送貨物量（リンクフロー）のサイズ別内訳の比較

5.3.3 日本発着貨物の利用港湾シェア

4. で述べたように、本モデルにおいて、日本については47都道府県を貨物の発着ゾーンとし、各ゾーンごとに輸出入港湾が選択される。各都道府県発着貨物における、東京湾諸港（東京・横浜）および大阪湾諸港（大阪・神戸）を利用する貨物のシェアの、現状値とモデル推計値の比較を、図-30および図-31に示す。本モデルにおける各港湾の利用確率は、分散パラメータ θ を含む3.2.2の(1)式で一元的に表わされ、また θ の値が比較的小さいことから、現状に比べやや利用港湾が分散傾向にあるものの、東京湾諸港の利用シェアは関東をはじめとして東北・甲信越地方等で大きく、また大阪湾諸港の利用シェアは近畿をはじめとして、北陸・中国・四国地方で大きいなど、現状とモデル推計結果でおおむね同様の傾向であった。

⁶¹ 本図は、アジア発着リンク（アジア域内相互および域内・域外間リンク）のみを対象としたものであり、全航走リンクフローを対象とした図-12の現状値とは異なる。以降も同様。

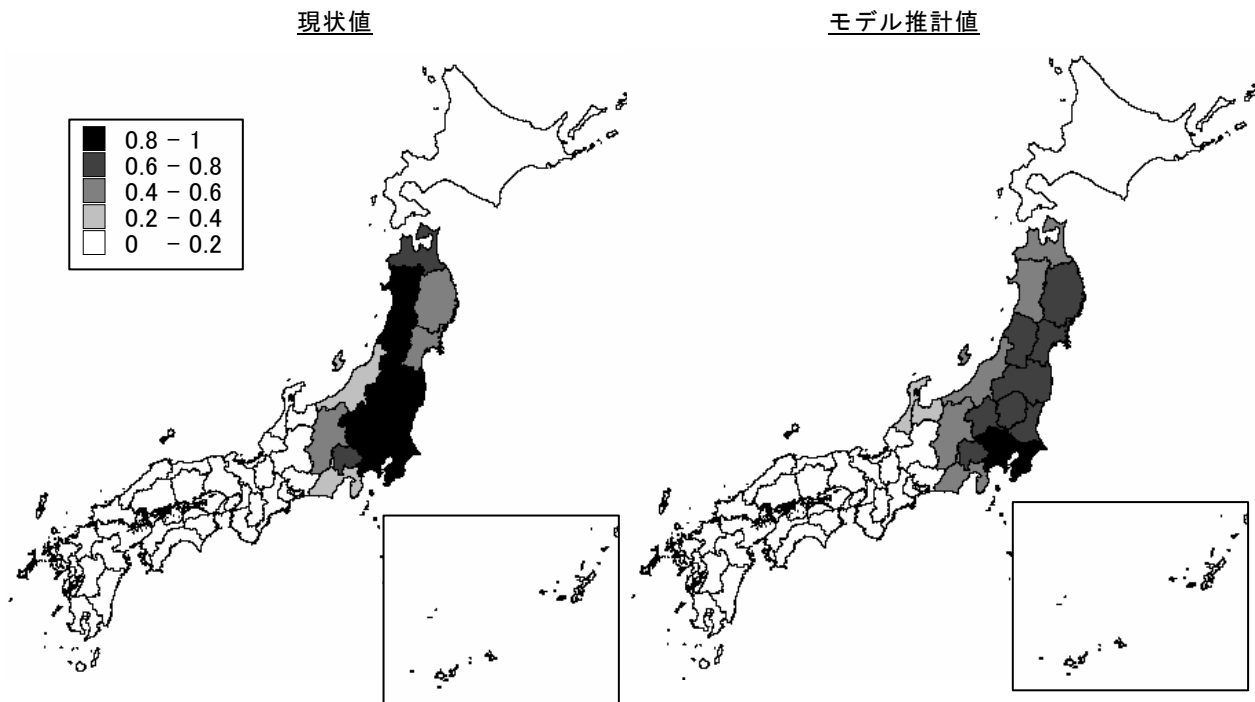


図-30 都道府県別東京湾諸港（東京・横浜）利用貨物シェア（輸出入合計）

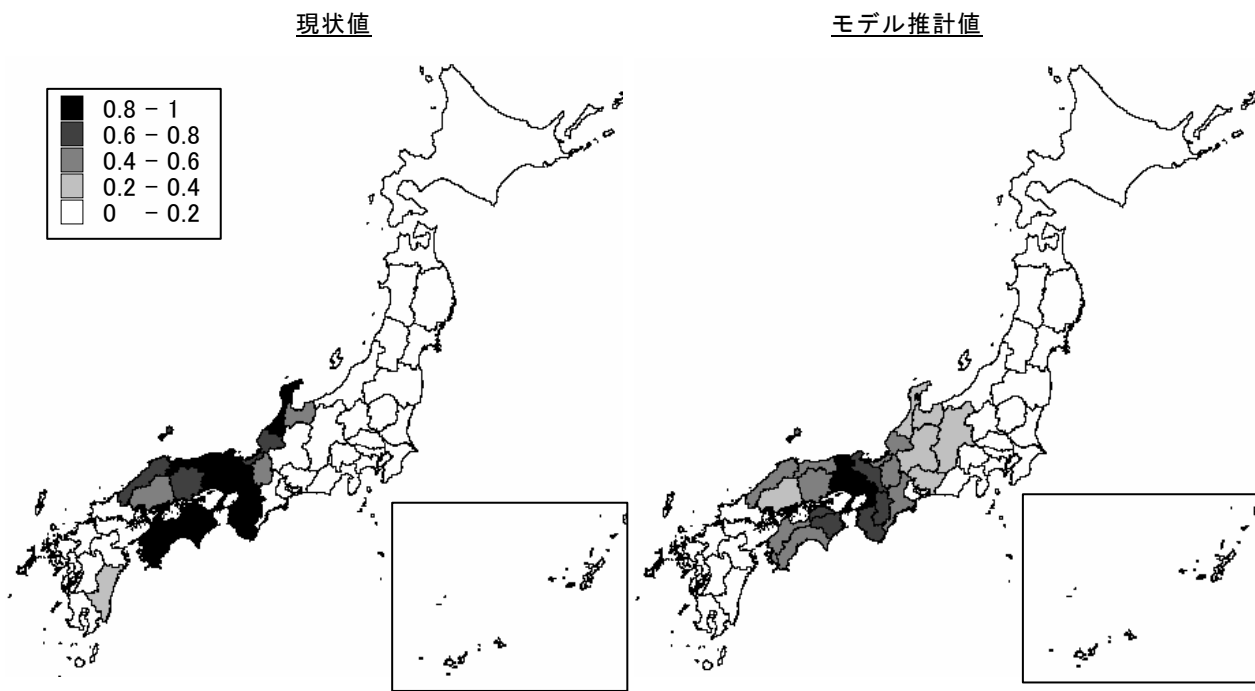


図-31 都道府県別大阪湾諸港（大阪・神戸）利用貨物シェア（輸出入合計）

6. モデルを用いた政策シミュレーション例

本章では、モデルの感度分析的な政策シミュレーションとして、4. および 5.1 で設定・推計されたパラメータに基づき、日本や海外の主要港湾（ここでは3大湾の6港：東京、横浜、名古屋、四日市、大阪、神戸を対象とする）を対象とした港湾搬出入時間（リードタイム）等の短縮や利用料金の低減に関するシミュレーションを行う。

6.1 日本の主要港湾における搬出入時間等の短縮

6.1.1 シナリオの設定

日本の主要港湾（東京、横浜、名古屋、四日市、大阪、神戸）を対象に、以下のシナリオについてシミュレーションを行った。

シナリオ0：現況再現値（5.3で示された推計結果）

シナリオ1：同一船社内積替時間 TT_i および船社間積替時間 $CTime_i$ を釜山・高雄港並みに（表-8 参照）に短縮

シナリオ2：シナリオ1に加え、港湾からの搬出時（輸入時）リードタイム LTU_i も釜山・高雄港並みに短縮

シナリオ3：シナリオ2に加え、港湾への搬入時（輸出時）リードタイム LTL_i を香港・シンガポール港並みに短縮

6.1.2 シミュレーション結果

上記各シナリオにおける、シミュレーション結果の比較を、我が国の港湾における輸出入貨物量について図-32に、我が国の港湾を含むアジア各国の主要港湾におけるトランシップ貨物量について図-33に示す。図-32より、上記施策を実施することにより、実施対象となった港湾においては、輸出入貨物量がおおむね増加することがわかる。特に、輸出入貨物の輸送時間に直接影響するシナリオ2、3において、現状よりも、東京湾合計で1%程度、伊勢湾合計・大阪湾合計でそれぞれ3～5%程度貨物量が増加する。一方で、施策実施対象でない日本の港湾においては、ほとんどの港湾で輸出入貨物量が減少する。

また、図-33より、日本の施策実施港湾においては、トランシップ貨物量が、各シナリオごとに段階的に2～4倍程度増加する。一方、周辺諸国のハブ港湾についてみると、釜山はほぼ横ばい、香港・高雄・シンガポール

等で2～5%程度の段階的な減少となった。

6.2 日本および海外の主要港湾における搬出入時間等の短縮

6.2.1 シナリオの設定

6.1で示した日本の主要港湾に加え、アジアの主要港湾（釜山、上海、深セン、高雄）を対象に、以下のシナリオについてシミュレーションを行った。

シナリオ3'：日本およびアジアの主要港湾について、同一船社内積替時間 TT_i 、船社間積替時間 $CTime_i$ 、港湾からの搬出時（輸入時）リードタイム LTU_i を釜山・高雄港並みに短縮、搬入時（輸出時）リードタイム LTL_i を香港・シンガポール港並みに短縮

6.2.2 シミュレーション結果

6.1のシナリオ0、3および上記シナリオ3'における、アジア主要港湾のトランシップ貨物量を、図-34に示す。日本の各港湾については、シナリオ3にくらべ、シナリオ3'において5～10%程度トランシップ貨物量が減少する。一方で、シナリオ3'で新たに施策実施対象となったアジアの港湾においては、特に中国の2港（上海・深セン）でトランシップ貨物量が急激に増加している。また、施策実施対象でないアジアの主要港湾についてみると、香港やシンガポールにおいてトランシップ貨物量がさらに減少していることがわかる。

6.3 日本の主要港湾における港湾利用諸料金の低減

6.3.1 シナリオの設定

6.1と同じ日本の主要6港湾を対象に、荷役料金 CH_i とサイズ別出入港費 CE_{iw} について、現状（表-6参照）から10～90%削減（20%おきに計算）したときのシミュレーションを行う。なお、ターミナル費用 CT_i については、モデル内において、取扱貨物量の増加により、1TEUあたりの費用が内生的に減少するというメカニズムを考慮していることから、ここで外生的に削減することは行わない。

シミュレーション結果

我が国の港湾における輸出入貨物量について図-35に、アジア各国のトランシップ貨物量について図-36に示す。図-35に示されるように、前節までで示した搬出入時間等削減のシミュレーションと比較し、各港湾の輸出入貨

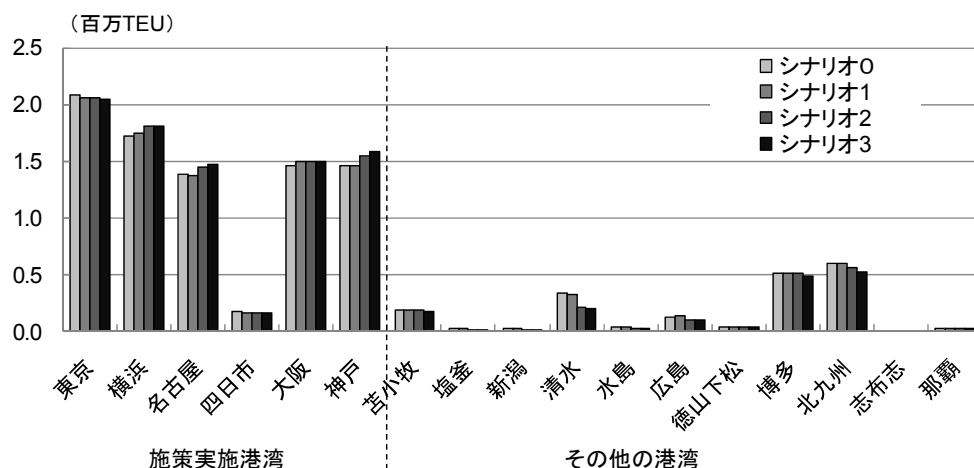


図-32 日本の主要港湾における搬出入時間等短縮シミュレーションの結果（日本各港の輸出入貨物量）

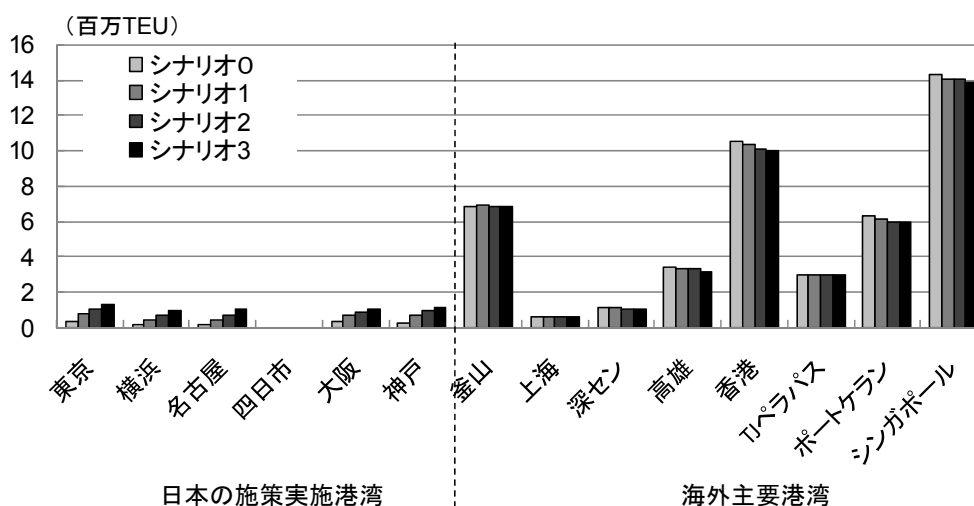


図-33 日本の主要港湾における搬出入時間等短縮シミュレーションの結果（アジア各港のトランシップ貨物量）

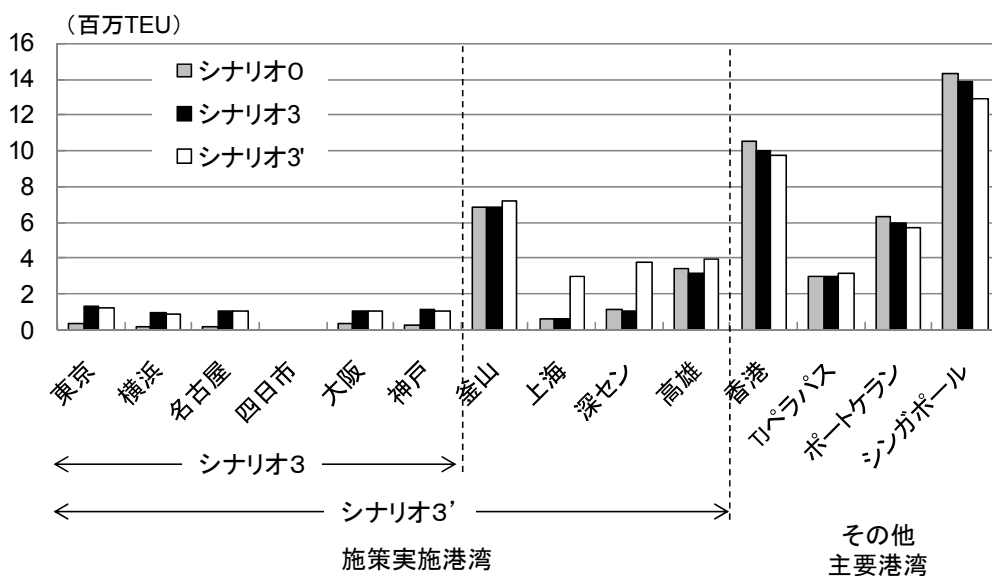


図-34 日本および海外の主要港湾における搬出入時間等短縮シミュレーションの結果（アジア各港のトランシップ貨物量）

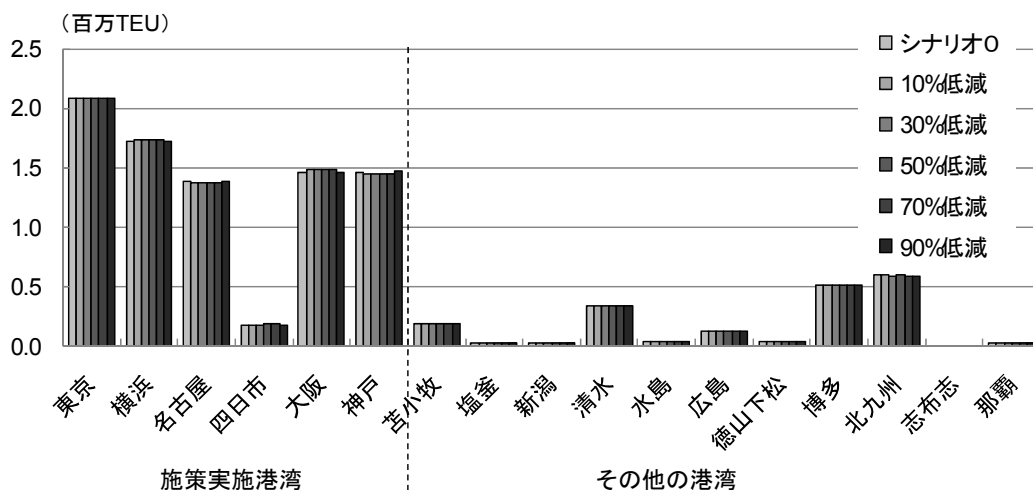


図-35 日本の主要港湾における利用料金低減シミュレーションの結果（日本各港の輸出入貨物量）

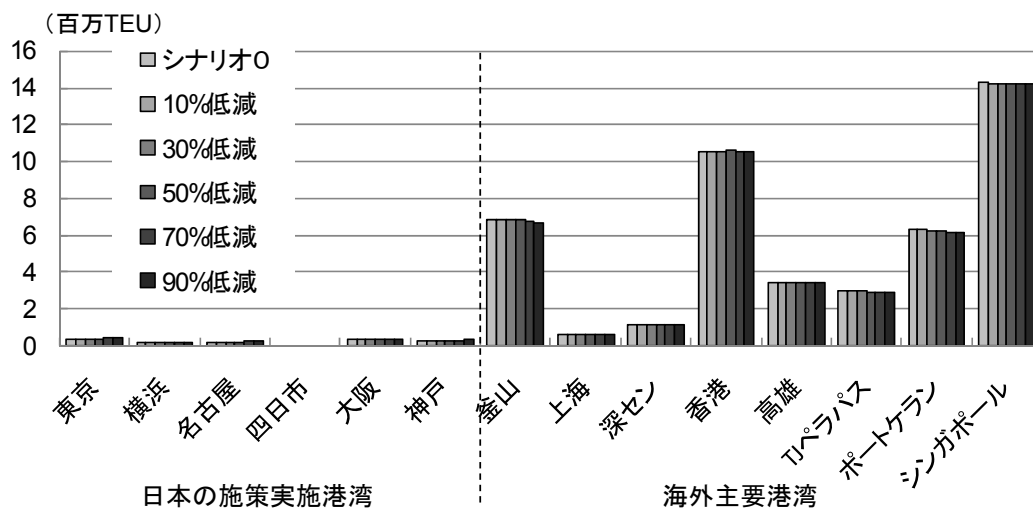


図-36 日本の主要港湾における利用料金低減シミュレーションの結果（アジア各港のトランシップ貨物量）

物量への影響がより小さく、0.1～0.5%程度の増加となっている。図-36 に示されるトランシップ貨物量についても、最大でも、90%削減時の東京港や名古屋港における 25～30%程度の増加にとどまる。また、アジア主要港湾におけるトランシップ貨物量の減少率もせいぜい 1～2%程度となっている。

6.4 荷主の時間価値変化のシミュレーション

6.4.1 シナリオの設定

本章の最後に、荷主の時間価値 vt_{shpr} の変化が、モデル推計結果に与える影響についてのシミュレーション結果を示す。ここまでのモデル計算においては、4.5.3 で述べたように、荷主の時間価値 vt_{shpr} は、港湾投資の評価に関する解説書 2004⁵⁶⁾を参考に、全貨物共通で 1,348 (円/TEU・時) に設定されていた。最近では、コ

ンテナ化の進展に伴い、コンテナ内の貨物単価が低下しているといわれている。そこで、荷主の時間価値が、上記設定値よりも 10%低下した場合 ($vt_{shpr} -10%$)、および比較対象として 10%上昇した場合 ($vt_{shpr} 10%$) のシミュレーションを行った。

6.4.2 シミュレーション結果

我が国の港湾における輸出入貨物量について図-37 に、アジア各国のトランシップ貨物量について図-38 に示す。図-37 より、荷主の時間価値低下に伴い、東京・大阪・神戸港等の輸出入貨物量が減少し、横浜・名古屋・新潟・北九州港等の貨物量が増加する。また、時間価値が増大した場合は、おおむね逆の傾向となっている。さらに、図-38 をみれば、荷主の時間価値が低下するに従って、多くの港湾でトランシップ貨物量が増加することが

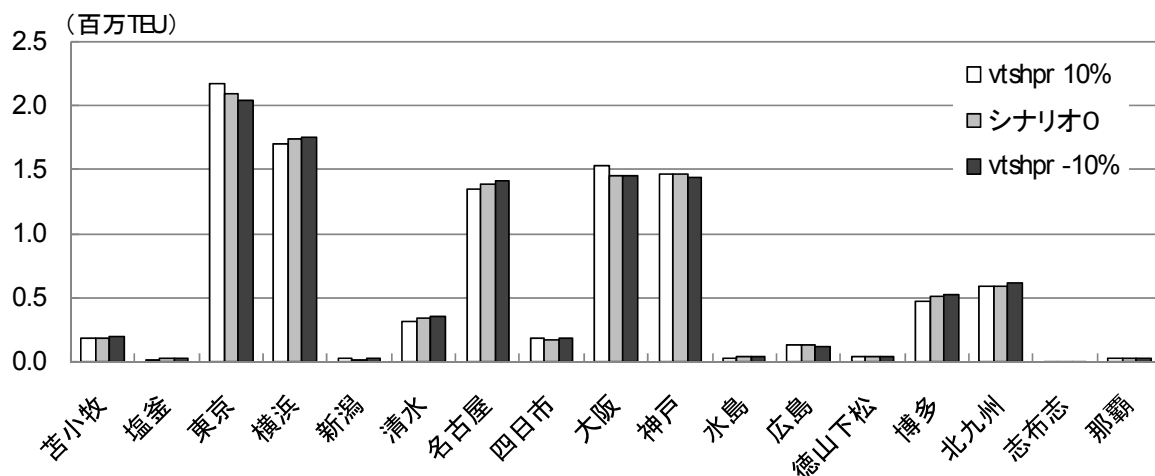


図-37 荷主の時間価値変化シミュレーションの結果（日本各港の輸出入貨物量）

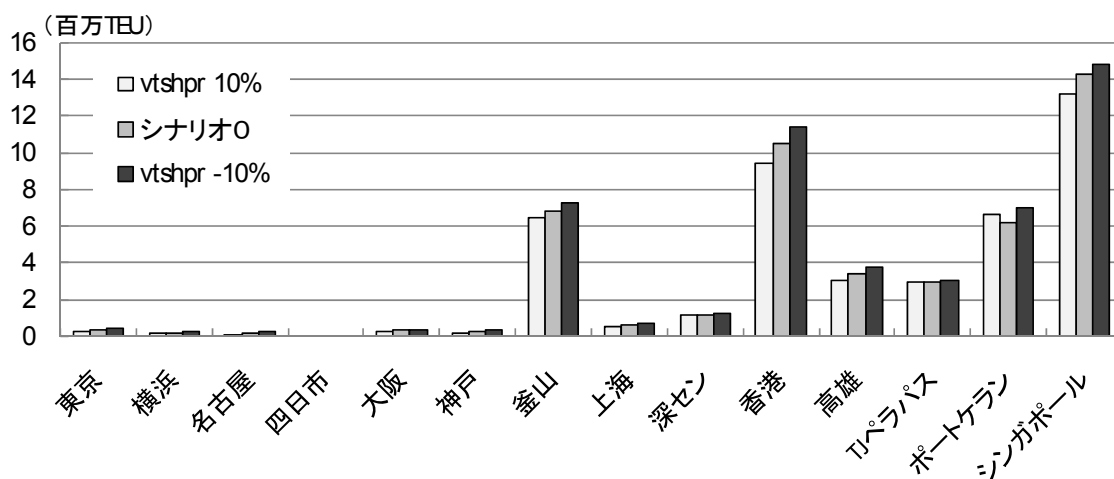


図-38 荷主の時間価値変化シミュレーションの結果（アジア各港のトランシップ貨物量）

わかる。すなわち、荷主の時間価値が低下すると、輸送時間が多少かかってもより金銭費用の安い航路やルートに貨物がシフトし、トランシップ貨物の増加などが観察されるものと考えられる。

6.5 シミュレーション結果のまとめ

6.1 で示した港湾の搬出入時間や積替時間の短縮シミュレーションにおいて、搬出入時間を短縮すると輸出入貨物量が増加し、また段階的な時間短縮により、施策実施港湾においてはトランシップ貨物量が段階的に増加し、その他の主要港湾においては段階的に減少するなどの結果が得られた。これは、モデルの振る舞いを確認するための感度分析としてみれば、おおむね妥当な結果といえる。また、6.2 で示したように、海外の主要港湾においても同様の施策を実施した場合は、日本の施策実施港湾においては効果がやや減少することや、特に中国の港湾

において効果が大きいこと等が確認できた。

一方、6.3 で示した港湾利用諸料金の低減による貨物量増加の効果は、6.1 および 6.2 の搬出入時間等の短縮による効果と比べると、限定的であることがわかった。これは、搬出入時間等の短縮が1日単位（金銭費用換算で1TEUあたり2万円以上）であるのに対し、利用料金の低減は、90%低減しても1TEUあたり1万円程度であるという、インパクトの大きさの違いにも起因するものと思われる。

また、6.4 に示した荷主の時間価値変化のシミュレーションのように、政策変数以外のモデル内の主要パラメータの変化によっても、貨物の集中・分散の傾向が変化することが明らかとなった。今後は、発着地域別や品目別に時間価値を設定するなどして、よりきめ細かいシミュレーションを行うことが課題である。

7. 本研究の成果と今後の課題

7.1 本研究の成果

本研究では、港湾投資や料金割引などハード・ソフト両面の様々な政策の実施により、東アジア圏を中心とした国際海上コンテナ貨物の流動がどのように変化するかのシミュレーションが可能なモデルの構築を行った。また、モデル計算に必要なさまざまな入力データおよび未知パラメータを作成・推計し、これをモデルに入力することで、本モデルの計算結果が、少なくとも港湾取扱量やトランシップ貨物量においては、現状をおおむね再現できることを確認した。さらに、港湾のリードタイムや利用料金などの政策変数を変化させることによって、各港の取扱貨物量の変化を分析した。得られた結果は、おおむね妥当と評価できるものであった。

このモデルの最大の特徴は、多くの政策変数（表-3に示されたすべての変数を変化させてシミュレーションすることが可能である）を含み、また、比較的ネットワークが大規模になっても計算可能な点にある。したがって、本研究の6.2で示したような、アジア各国で同時に政策を実施したり、あるいは陸上輸送ネットワーク改善等も含めたさまざまな政策オプションの効果について比較するような場合に最も強みを発揮するものと思われる。近年では、わが国においても、アジア地域との結びつきが強まり、他国の政策がわが国の経済活動や物流に与える影響について考慮する必要がある、今後ますます高まるものと考えられる。また、政策実施の効果を議論する際にも、今まで以上に、たとえば港湾分野にとどまらないようなより広い範囲を対象に、効率的な施策の実施を議論しなければならない状況となることが予想され、本モデルのような、広範な政策オプションを同じ条件でシミュレーションできるようなモデルの必要性はますます高まるものと考えられる。

7.2 今後の課題

今後の課題を以下に述べる。

(1)モデルの再現精度向上

本モデルは、アジア地域の主要港湾における港湾取扱量やトランシップ貨物量といったレベルでは、おおむね現状を再現することが可能となったが、中小の港湾やフローのレベルではさらなる再現精度の向上が必要である。特に、一回の運航で多数の寄港地を巡るようなループの再現性に乏しく、大きな課題となっている。改良の方向としては、本文中でも述べたように、入港船舶数と出港

船舶数が一致するという制約条件を追加したモデルの構築等を検討する必要がある。また、今回のモデル再現性の検証は海上フローを中心に行ったものの、同様に、陸上フロー（各地域ごとの輸出入港湾選択の結果）についても再現性の検討が必要である。

(2)モデル対象範囲の拡張

対象範囲拡張の具体的な方向としては、①港湾の追加等による全世界海上輸送ネットワークモデルへの拡張、②輸送機関の追加（特に日本以外のアジア地域の内陸ネットワークの追加）、の2つがある。いずれについても、すでに拡張追加作業に着手しており、たとえば、中国やその特定地域（広東省珠江デルタ地方）、あるいは東南アジアなどを対象に、これらの地域の道路・鉄道・内航水運のネットワークも含めた総合的な国際物流モデルの構築・政策シミュレーションを実施している。このようなモデルにより、たとえば内陸国境地域における越境輸送抵抗の削減政策（CBTA: Cross Border Transport Agreement）の効果のシミュレーションなどが可能となる。これらのモデルについても、今後、機会を改めて発表していきたい。

(3)貿易予測モデルとの統合による総合的貨物需要予測システムの構築

本研究で構築したモデルは、地域間貨物需要は変動しないものとして、所与としてモデルに入力するものとして取り扱われている。筆者らは、FTAやEPAなどの貿易政策や国際経済政策が国際貨物流動に及ぼす影響を計測するため、貿易予測モデル、および本モデルのような物流モデルとの統合システムについても構築を行っている。このようなシステムが構築されれば、本研究でシミュレートしたような貨物輸送環境の改善により、国際経済や貿易活動に与える影響についても計測可能となる。

(2008年11月14日受付)

謝辞

本研究の実施にあたっては、国内外の学会等において、東京大学家田教授をはじめとする研究者の方々、および高橋部長をはじめとする港湾研究部の皆様や空港研究部石倉主任研究官に貴重なご意見をいただきました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 森地・山形：交通計画（新体系土木工学 60），技報堂出版，1993年，296p.

- 2) Meersman, H., Van de Voorde, E., Van Hooydonk, E., Verbeke, A., Winkelmans, W., Huybrecht, M.: *Port Competitiveness*, De Boeck University, 2002, 155p.
- 3) (社) 土木学会 土木計画学研究委員会 「交通ネットワーク」出版小委員会：交通ネットワークの均衡分析－最新の理論と解法－, 土木学会, 1998年, 331p.
- 4) 久保：ロジスティクスの数理, 共立出版, 2007年, 197p.
- 5) (社) 交通工学研究会編：やさしい非集計分析, 交通工学研究会, 1993年, 141p.
- 6) (社) 土木学会 土木計画学研究委員会：非集計行動モデルの理論と実際, 土木学会, 1996年, 240p.
- 7) 国土交通省港湾局：港湾取扱貨物量の見通しの試算結果について, 交通政策審議会第10回港湾分科会資料, 2004年, <http://www.mlit.go.jp/singikai/koutusin/kouwanbun/10/images/shiryou1-2.pdf>.
- 8) 渡部・平井・田中・柴崎・小島：国際海上コンテナ貨物流動モデルと大水深ターミナル整備評価に関するシナリオ別分析, 国総研研究報告第13号, 2003年.
- 9) Christiansen, M., Fagerholt, K., Ronen, D.: Ship Routing and Scheduling: Status and Perspectives, *Transportation Science*, Vol.38, No.1, 2004, pp.1-18.
- 10) Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., Ronen, D.: Maritime Transportation, in *Transportation, Handbook in Operations Research and Management Science Vol. 14*, North Holland, Chapter 4, 2007, pp.189-284.
- 11) Haralambides, H. E.: Structure and Operations in the Liner Shipping Industry, in *Handbook of Transport Modelling (2nd ed.)*, Elsevier, Chapter 40, 2008, pp.761-775.
- 12) Ng, A. K. Y., Kee, J. K. Y.: The Optimal Ship Sizes of Container Liner feeder Services in Southeast Asia: A Ship Operator's Perspective, *Maritime Policy and Management*, Vol.35, No.4, 2008, pp.353-376.
- 13) Hsu, C. I., Hsieh, Y. P.: Shipping Economic Analysis for Ultra Large Containership, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.6, 2005, pp.936-951.
- 14) Agarwal, R., Ergun, O.: Ship Scheduling and Network Design for Cargo Routing in Liner Shipping, *Transportation Science*, Vol.42, No.2, 2008, pp.175-196.
- 15) Kim, H. J., Chang, Y. T., Lee, P. T. W., Shin, S. H., Kim, M. J.: Optimizing the Transportation of International Container Cargoes in Korea, *Maritime Policy and Management*, Vol.35, No.1, 2008, pp.103-122.
- 16) 竹林・黒田・金井・原：グローバル・アライアンス間の競争を考慮した国際コンテナ貨物輸送市場モデルの開発とその適用, 土木学会論文集, No.800/IV-69, 2005, pp.51-66.
- 17) 新谷・今井・西村：空コンテナの回送を考慮したコンテナ船のロケーション・ルーティング問題, 日本航海学会論文集, 第111号, 2004, pp.273-284.
- 18) Crainic, T. G., Florian, M., Leal, J. E.: A Model For The Strategic Planning of National Freight Transportation By Rail, *Transportation Science*, Vol.24, No.1, 1990, pp.1-24.
- 19) Crainic, T. G., Florian, M., Guelat, J. Spiess, H.: Strategic Planning of Freight Transportation: STAN, an Interactive-Graphical System, *Transportation Research Record*, No.1283, 1990, pp.97-124.
- 20) Crainic, T. G., Laporte, G.: Planning Models For Freight Transportation, *European Journal of Operational Research*, Vol.97, 1997, pp.409-438.
- 21) Crainic, T. G.: Long-Haul Freight Transportation, in *Handbook of Transportation Science*, Kluwer Academic Publishers, Chapter 13, 1999, pp.433-491.
- 22) Crainic, T. G., Kim, K. H.: Intermodal Transportation, in *Transportation, Handbook in Operations Research and Management Science Vol. 14*, North Holland, Chapter 8, 2007, pp.467-537.
- 23) Friesz, T. L.: Transport Network Equilibrium, Design and Aggregation, *Transportation Research A*, Vol.19, 1985, pp.413-427.
- 24) Friesz, T. L., Gottfried, J. A., Morlok, E. K.: A sequential shipper-carrier network model for predicting freight flows, *Transportation Science*, Vol.20, No.2, 1986, pp.80-91.
- 25) Friesz, T. L., Viton, P. A., Tobin, R. L.: Economic and computational aspects of freight network equilibrium models: a synthesis, *Journal of Regional Science*, Vol.25, No.1, 1985, pp.29-49.
- 26) Harker, P. T., Friesz, T. L.: Prediction of intercity freight flows, I: theory & II: mathematical formulations, *Transportation research Part B*, Vol.20, No.2, 1986, pp.139-174.
- 27) Harker, P. T.: Predicting intercity freight flows, *VNU Science Press*, 1987, 261p.
- 28) Friez, T. L., Kwon, C.: Strategic Freight Network Planning Models and Dynamic Oligopolistic Urban Freight Networks, in *Handbook of Transport Modelling*

- (2nd ed.), Elsevier, Chapter 32, 2008, pp.611-629.
- 29) 松本・渡辺：都市間貨物輸送予測に関する計量経済モデルとネットワークモデルの研究展望，土木学会論文集，No.494/IV-24，pp.117-125，1994
- 30) 溝上：産業間の連関性と空間的な価格均衡を考慮した物資流動モデル構築の試み，土木学会論文集，No.494/IV-24，pp.53-61，1994
- 31) Harker, P. T., Friesz, T. L.: The use of equilibrium network models in logistics management: with application to the U.S. coal industry, *Transportation Research Part B*, Vol.19, No.5, 1985, pp.457-470
- 32) Brotcorne, L., Labbe, M., Marcotte, P., Savard, G.: A Bilevel Model and Solution Algorithm for a Freight Tariff-Setting Problem, *Transportation Science*, Vol.34, No.3, 2000, pp.289-302
- 33) Harker, P. T.: Multiple Equilibrium Behaviors on Networks, *Transportation Science*, Vol.22, No.1, 1988, pp.39-46.
- 34) Hurley, W. J., Pettersen, E. R.: Nonlinear Tariffs And Freight Network Equilibrium, *Transportation Science*, Vol.28, No.3, 1994, pp.236-243.
- 35) Miller, T. C., Tobin, R. L., Freisz, T. L.: Stackelberg Games on a Network with Cournot-Nash Oligopolistic Competitors, *Journal of Regional Science*, Vol.31, No.4, 1991, pp.435-454.
- 36) Malchow, M., Kanafani, A.: A disaggregate analysis of factors influencing port selection, *Maritime Policy and Management*, Vol.28, No.3, 2001, pp.265-277.
- 37) Southworth, F., Peterson, B. E.: Intermodal and international freight network modeling, *Transportation Research Part C*, Vol.8, 2000, pp.147-166.
- 38) SCENES: SCENES European Transport Forecasting Model Specifications, ME&P, Deliverable D2 of SCENES project funded by the European Commission on 4th RTD Framework, Cambridge.
- 39) 久保：ロジスティクス・ネットワーク設計モデル，ロジスティクス工学，経営科学のニューフロンティア 8，朝倉書店，第 11 章，2001，pp.163-192.
- 40) 鄭：グローバルサプライチェーンネットワーク設計問題に対する近似解法，日本物流学会第 25 回全国大会予稿集，2008，pp.149-152.
- 41) D'este, G: Freight and Logistics Modeling, in *Handbook of Logistics and Supply-Chain Management*, Pergamon, Chapter 35, 2001, pp.521-534.
- 42) 稲村・中村・具：海上フィーダー輸送を考慮した外貨コンテナ貨物の需要予測モデル，土木学会論文集，No.562/IV-35，1997，pp.133-140.
- 43) 家田・柴崎・内藤：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，16，1999，pp.731-741.
- 44) Ieda, H., Shibasaki, R., Naito, S., Mishima, D.: Model Development for East Asian Container Shipping Considering Multifarious Use of Vessels and Ports, *World Conference on Transportation Research Proceedings*, Vol.8, No.3, 2000, pp.213-226.
- 45) 黒田・竹林・武藤・大久保・辻：外航定期コンテナ流動予測モデルの構築とアジア基幹航路への適用，土木学会論文集，No.653/IV-48，2000，pp.117-131.
- 46) Dial, R.: A probabilistic multipath traffic assignment algorithm which obviates path enumeration. *Transport Research*, vol. 5, 1971, pp. 83-111.
- 47) 飯田・高山・金井・水口：Dial 確率配分法を導入したリンク交通量による道路網交通需要推計法，日本都市計画学会学術研究論文集，Vol.19，1984，pp.13-18.
- 48) (社)土木学会 土木計画学研究委員会 交通需要予測技術検討小委員会：道路交通需要予測の理論と適用 第Ⅱ編利用者均衡配分モデルの展開，土木学会，2006，453p.
- 49) Cascetta, E.: *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods*, Applied Optimization 49, Kluwer Academic Publishers, 2001, 708p.
- 50) Ball, M. O., Magnanti, T. L., Monma, C. L., Nemhauser, G. L.: *Network Routing*, Handbook in Operations Research and Management Science, Vol. 8, North Holland, 1995, 785p.
- 51) Binger, B. R., Hoffman, E.: *Microeconomics with Calculus*, HarperCollins Publishers, 1988 (木村訳：微積分で学ぶミクロ経済学 第 16 章 寡占と不完全競争, CAP 出版, 1996, pp.531-580) .
- 52) 太田：寡占，地域・都市・交通分析のためのミクロ経済学，東洋経済新報社，第 3 章 4 節，2002，pp.144-168.
- 53) 土井・坂下：海運同盟と戦略的アライアンスの分析，交通経済学，東洋経済新報社，第 7 章 3 節，2002，pp.159-166.
- 54) 金本・蓮池・藤原：寡占市場の政策評価 一卸電力取引市場の評価，政策評価マイクロモデル，東洋経済新報社，第 5 章，2006，pp.173-223.
- 55) Sheffi, Y.: *Urban Transportation Networks*, Prentice-Hall,

New Jersey, 1985.

- 56) 港湾事業評価手法に関する研究委員会編：港湾投資の評価に関する解説書 2004, (財)港湾空間高度化環境研究センター, 2004.
- 57) 柴崎・渡部・角野・神波：アジア圏を中心とした国際海上コンテナの OD 貨物量推計に関する研究, 国土技術政策総合研究所研究報告, No.25, 2005, 47p.
- 58) 国土交通省港湾局：平成 15 年度全国輸出入コンテナ貨物流動調査, 2003.
- 59) Dimaranan, B. V., Ed.: Global Trade, Assistance, and Production: The GTAP 6 Data Base, Center for Global Trade Analysis, Purdue University, 2006.
- 60) 米本・柴崎・渡部：日中地域間アジア国際産業連関表を用いた貿易・開発政策等の地域別移輸出入額への影響分析, 国土技術政策総合研究所資料, No.451, 2008, 34p.
- 61) IHS Global Insight Inc.: Global Trade navigator.
- 62) Global Trade Information Services, Inc. : Global Trade Atlas Navigator.
- 63) Goodwill China Business Information Limited: China Trade Information Import & Export Database, 2003.
- 64) Commonwealth Business Media, Inc.: Port Import Export Reporting Service Data, 2003.
- 65) 日本航海士編：世界港間距離図表（二訂版），海文堂，1993.
- 66) Seafuture, Inc.: Netpas Distance, 2007.
- 67) 柴崎・渡部・角野：国際海上コンテナ貨物の国内自動車輸送における通行上の制約と経済損失に関する分析, 国土技術政策総合研究所研究報告, No.18, 2004, 57p.
- 68) (財) 日本道路交通情報センター：道路情報便覧 2004 年 CD-ROM 版.
- 69) 黒川・鶴田・嶋：海上コンテナ輸送ネットワークの設計に関する研究—東・東南アジアの中心として—, 日本航海学会論文集, Vol.101, 1999, pp.259-269.
- 70) 森・石川・川上：外貿コンテナ輸送コストモデルの開発, 土木計画学研究・講演集, Vol.17, pp.1075-1078, 1995.
- 71) Informa UK Ltd: Containerisation International Yearbook 2005 (および各年版), informa trade & energy.
- 72) MDS Transmodal Ltd.: MDS Containership Databank November 2003.
- 73) 長尾：最適化アルゴリズム, 昭晃堂, 2000, pp.56-60.

記号表

○荷主サブモデル (3.2)

i) 添字記号

a	海上リンク
b	陸上リンク
g	船社グループ
i	港湾
k	経路 (パス)
r	OD ペアの発地
s	OD ペアの着地

ii) 集合

A	航路の集合
K_{rs}	OD ペア rs 間の経路選択肢集合
G	船社グループの集合
Ω	OD ペアの集合

iii) 変数

c_{rsk}	OD ペア rs 間の経路 (パス) k の輸送コスト
CL_b	経路 k に含まれる陸上リンク b の輸送コスト (一般化費用)
$CLcost_b$	陸上リンク b の輸送運賃
$CLtime_b$	陸上リンク b の輸送時間
CM_{ag}	海上航路 a において船社グループ g を利用した際の費用
$CMtime_{ag}$	航路 a における船社グループ g の総輸送時間
CP_i	経路 k に含まれる港湾内リンクコスト
$CTcost_i$	船社間積替リンク i の輸送費用
$CTime_i$	船社間積替リンク i の輸送時間
d_a	航路 a の貨物需要
f_{rsk}	OD ペア rs 間の経路 (パス) k の経路貨物量
LTL_i	港湾 i の搬入時リードタイム
LTU_i	港湾 i の搬出時リードタイム
p_{ag}	航路 a において船社グループ g が提示する運賃
$prob_{ag}$	航路 a における船社グループ g の選択確率
Q_{rs}	OD ペア rs 間の貨物需要
q_{ag}	航路 a における船社グループ g の輸送量
v_{shpr}	荷主の時間価値
δ_{rsk}^a	クロネッカーのデルタ (OD ペア rs 間の経路 k にリンク a が含まれるとき 1, 含まれないとき 0)
θ	分散パラメータ
A_a	経路 k に含まれる海上リンク a の期待最小コスト
ζ	ログサム変数の調整項

○船社サブモデル (3.3)

i) 添字記号

a, a'	航路 (海上リンク)
g, g'	船社グループ
i, i', j	港湾
k	経路 (パス)
n	収束計算の繰り返し回数
u	パース水深カテゴリ
w	船舶サイズカテゴリ
v, v'	リンク

ii) 集合

A	航路の集合
K_{ag}	航路 a , グループ g の OD の選択肢集合
G	船社グループの集合
U	パース水深カテゴリの集合
W	船舶サイズカテゴリの集合
V	リンクの集合

iii) 変数

CA_{wg}	船舶サイズ w , グループ g の単位時間あたり停泊費用
-----------	-----------------------------------

CE_{iw}	港湾 i , 船舶サイズ w の入出港費用	TT_i	港湾 i における積替作業時間
CH_i	港湾 i における搬出・搬入貨物の 1TEU あたり荷役費用	TU_{iw}	港湾 i , 船舶サイズ w の一隻あたりの船卸荷役時間
CR_{wg}	船舶サイズ w , グループ g の単位時間あたり航行時費用	TWA_{iw}	港湾 i , 船舶サイズ w の船混みによる平均入港待ち時間
CT_i	港湾 i の単位時間あたりターミナル費用	TWD_{iw}	港湾 i 船舶サイズ w の船混みによる平均出港待ち時間
cap_w	船舶サイズ w の船腹量 (キャパシティ)	t_{vg}	グループ g , リンク v のコスト
d_a	航路 a の貨物需要	vl_w	船舶サイズ w の船速
GAP_{vg}	リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの入港停泊リンクコスト	vt_{carr}	金銭時間換算係数 (船社の時間価値)
GAU_{vg}	リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの入港船卸リンクコスト	XAP_{iwg}	港湾 i , サイズ w , グループ g の入港停泊リンクフロー
GD_{vg}	リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの搬出リンクコスト	XAU_{iwg}	港湾 i , サイズ w , グループ g の入港船卸リンクフロー
GDP_{vg}	リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの停泊出港リンクコスト	XC_{ijwg}	出発港 i , 到着港 j , 船舶サイズ w , グループ g における全航走リンクフローの合計値
GDU_{vg}	リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの船積出港リンクコスト	XDP_{iwg}	港湾 i , サイズ w , グループ g の停泊出港リンクフロー
GL_{vg}	リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの船積リンクコスト	XDU_{iwg}	港湾 i , サイズ w , グループ g の船積出港リンクフロー
$GLCP_{vg}$	リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの船積-航走-停泊リンクコスト	XH_i	下式で定義される港湾 i の総取扱量
$GLCU_{vg}$	リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの船積-航走-船卸リンクコスト	XL_{iw}	港湾 i におけるサイズ w の船積貨物量
GO_{vg}	リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの搬入リンクコスト	$XLCP_{ijwg}$	出発港 i , 到着港 j , 船舶サイズ w , グループ g における船積-航走-停泊リンクフロー
GP_{vg}	リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの停泊リンクコスト	$XLCU_{ijwg}$	出発港 i , 到着港 j , 船舶サイズ w , グループ g における船積-航走-船卸リンクフロー
$GPCP_{vg}$	リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの停泊-航走-停泊リンクコスト	XP_{iw}	港湾 i における船舶サイズ w の停泊貨物量
$GPCU_{vg}$	リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの停泊-航走-船卸リンクコスト	$XPCP_{ijwg}$	出発港 i , 到着港 j , 船舶サイズ w , グループ g における停泊-航走-停泊リンクフロー
GT_{vg}	リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの積替リンクコスト	$XPCU_{ijwg}$	出発港 i , 到着港 j , 船舶サイズ w , グループ g における停泊-航走-船卸リンクフロー
GU_{vg}	リンク v , グループ g のコンテナ 1TEU あたりの船卸リンクコスト	XU_{iw}	港湾 i における船舶サイズ w の船卸貨物量
h_{akg}	航路 a , グループ g の OD 貨物量における経路 (パス) k の経路貨物量	x_{vg}	グループ g , リンク v のフロー
l_{ij}	港湾 ij 間の距離	γ_1, γ_2	入港待ち時間関数に関するパラメータ
lf_{ijwg}	出発港 i , 到着港 j , 船舶サイズ w , グループ g の消費率 (ロードファクター)	ε	モデル全体の収束判定基準
\overline{lf}_{iwg}	港湾 i に入港する船舶サイズ w , グループ g の船舶の平均消費率	ε_C	船社の総費用最小化行動モデルの収束判定基準
\overline{lf}_{ag}	港湾 i に入港する船舶サイズ w の船舶の平均消費率	ε_G	船社サブモデルの収束判定基準
\overline{lf}_{dg}	港湾 i を出港する船舶サイズ w , グループ g の船舶の平均消費率	ε_R	船社の収入最大化行動モデルの収束判定基準
NB_{iu}	港湾 i , バース水深カテゴリ u のバース数	θ	分散パラメータ
NC_{iw}	港湾 i におけるサイズ w の船舶の荷役における使用クレーン数	λ_{akg}^v	クロネッカーのデルタ (航路 a , グループ g の OD の経路 k にリンク v が含まれるとき 1, 含まれないとき 0)
NVA_{iw}	港湾 i , 船舶サイズ w の単位時間あたりの入港隻数	π_g	各グループ g の利潤
NVD_{iw}	港湾 i , 船舶サイズ w の単位時間あたりの出港隻数	ψ	バース処理能力に関する関数
op_i	港湾 i のターミナル内荷役における一日あたり平均オペレーション時間		
p_{ag}	航路 a において船社グループ g が提示する運賃		
$prob_{ag}$	航路 a における船社グループ g の選択確率		
$prod_i$	港湾 i における 1 クレーンあたりの荷役効率 (プロダクティビティ)		
$q_{a,g}$	航路 a における船社グループ g の輸送量		
TAL_{iw}	港湾 i における船舶サイズ w の出港時に最低限必要な時間		
TAU_{iw}	港湾 i における船舶サイズ w の入港時に最低限必要な時間		
TL_{iw}	港湾 i , 船舶サイズ w の一隻あたりの船積荷役時間		

付録 A 航走リンクにおける消席率（ロードファクター） lf_{ijwg} の推計方法と結果

出発港 i , 到着港 j , 船舶サイズ w , グループ g の航走リンクにおける消席率 lf_{ijwg} （停泊・航走・停泊, 船積・航走・船卸, 停泊・航走・船卸, 船積・航走・停泊の4種類共通）は, この4種類の航走リンクコストの合計が最小となるように, リンクごとに決定されるものと仮定する. すなわち,

$$\min_{lf_{ijwg}} CC_{ijwg} \quad (A1)$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad CC_{ijwg} = & XPCP_{ijwg} \cdot GPCP_{ijwg} \\ & + XLCU_{ijwg} \cdot GLCU_{ijwg} \\ & + XPCU_{ijwg} \cdot GPCU_{ijwg} \\ & + XLCP_{ijwg} \cdot GLCP_{ijwg} \end{aligned} \quad (A2)$$

(19), (20), (22)式および

$$0.1 \leq lf_{ijwg} \leq 0.9 \quad (A3)$$

制約条件(A3)は, 消席率があまり現実的でない値とならないための条件である. 特に上限値については, 貨物需要の変動や空コンテナの積載が必要であることを考慮し, 1.0ではなく0.9としている.

ここで, (A1)式の lf_{ijwg} についての一階条件 $\frac{\partial CC_{ijwg}}{\partial lf_{ijwg}} = 0$ を解けば,

$$lf_{ijwg} = \frac{XC_{ijwg}}{cap_w} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{CR_{wg} \cdot l_{ij}}{vt_{carr} \cdot vl_w} \right)}{\left(\frac{XLCU_{ijwg}}{2} + \frac{XPCU_{ijwg} + XLCP_{ijwg}}{4} \right)}} \quad (A4)$$

を得る. (A4)式より得られる lf_{ijwg} が制約条件(A3)を満たさない場合は, $lf_{ijwg} = 0.1$ または $lf_{ijwg} = 0.9$ が解となる.

なお, 厳密に各航路の最適消席率を求めるためには, 航走リンク以外の, コスト関数に消席率が含まれるリンク（入出港リンク, 停泊・船卸・船積リンク）のコストも含めて, 費用が最小となる消席率を計算する必要がある. また, システム最適均衡配分の求解過程で必要となるコスト関数の微分計算においても, 厳密には, 消席率を含むコスト関数式に対し(A4)式を代入してから, 行う必要がある. しかしながら, これらの計算は非常に煩雑

になるため, 本研究のモデルでは行わない. したがって, 上記の計算は, 各コスト関数式において消席率を外生的に（たとえば, 一律に同じ数値を）与えるよりはましな手段として, 便宜的に推計を行っているものと位置づけられる.

以上より得られる最適消席率の確認のため, 船舶サイズカテゴリ $w = 1$ (1000TEU 以下) と $w = 4$ (4000TEU 以上) における, 港湾間距離 l_{ij} , 航走リンクフロー XC_{ijwg} と, 推計された消席率 lf_{ijwg} の関係を図 A-1 に示す. なお, 図 A-1 は, 船舶サイズカテゴリによって縦軸・横軸の目盛幅が異なることに注意されたい. また, ここに示されるのは, 停泊・航走・停泊・船積・航走・船卸・停泊・航走・船卸・船積・航走・停泊の4種類の航走リンクフローの比を 7:1:1:1 に固定⁶²した, 模式的な推計結果である⁶³. 図より, (A4)式からも推察されるように, 港湾間リンクフローおよび距離が小さいほど, 最適消席率が小さくなるという関係が読み取れる.

また, 図 A-2 に, モデル計算における最終的な均衡状態（シナリオ0）での航走リンクフローと消席率の関係を示す. ここで, 非負リンク 1141 本のうち, 消席率が 0.9 であるリンクが 932, 0.1 であるリンクが 104, その間を取るものが 105 であった. 消席率が 0.9 であるリンクが多いのは, 金銭時間換算係数（船社にとっての時間価値） vt_{carr} があまり大きくないこともあり, 多くの場合, 船社にとっては消席率の上昇がコスト節約に繋がることを意味している. ただし, 本モデルでは考慮されていない, 入出港船舶数の一致条件を追加した場合には, コンテナと船舶の両者のフロー保存則を成立させるための変数として, 消席率が大きく変化する可能性があることにも注意が必要である.

また, 図に示されるように, 港湾間リンクフローが同じでも, 船舶サイズやリンク距離, 4種類の航走リンクフローのシェアが異なるため, 最適消席率が異なることもある.

⁶²(A4)式からもわかるように, 他の条件が同じであれば, 停泊・航走・停泊リンクフローの比が大きくなると, 最適消席率はより大きくなる.

⁶³ 船社の時間価値 vt_{carr} は 5.1 で示した推計値を用いている.

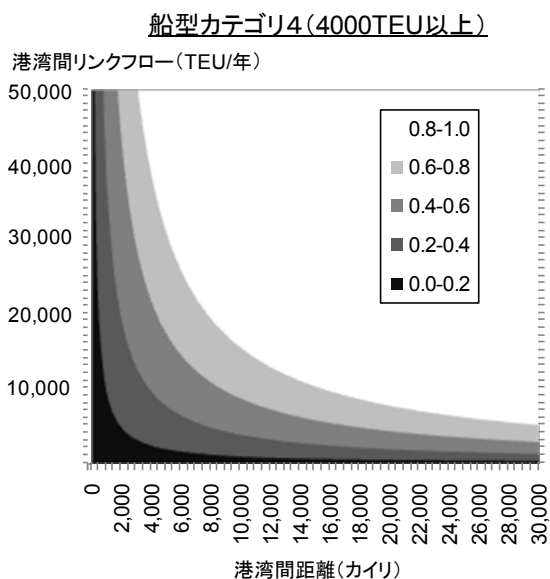
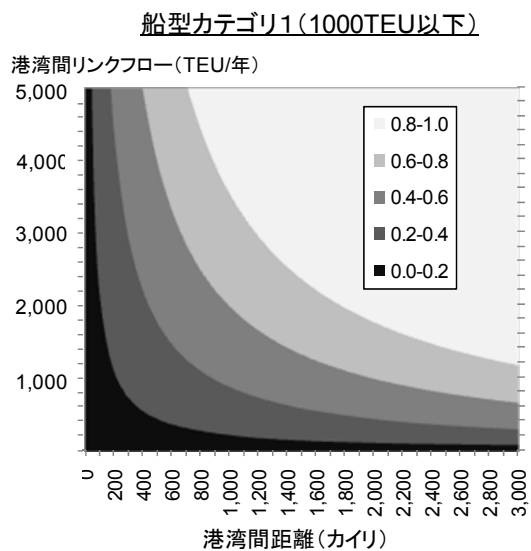


図 A-1 港湾間距離・リンクフローと最適消席率の関係
(船舶サイズによって目盛幅が異なることに注意)

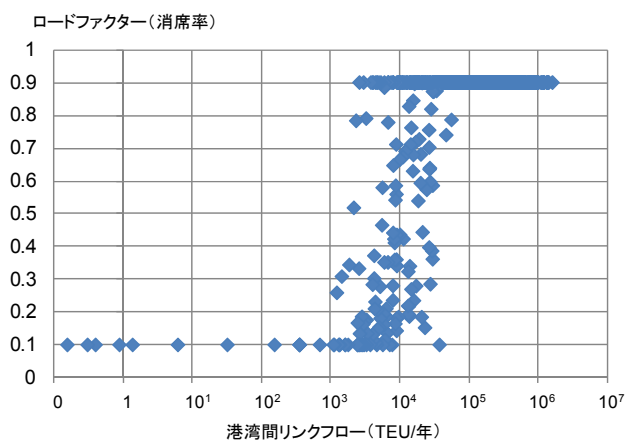


図 A-2 均衡状態における各航走リンクの
消席率 (非負リンクのみ)

付録 B 船社費用最小化モデルにおける入出港リンクの待ち時間計算方法詳細

以下では入港リンクを例に計算手順を示す。ここで、港 i の水深カテゴリ $u (\in U)$ におけるバース数を NB_{iu} とする。また、港 i の船舶サイズカテゴリ $w (\in W)$ における単位時間あたりの入港隻数を NVA_{iw} 、一隻あたりの船卸荷役時間を TU_{iw} としたとき、船舶サイズ w の総船卸荷役時間 TTU_{iw} は $NVA_{iw} \cdot TU_{iw}$ で表わされる。

基本的には、小型バースから大型バースに向かって計算を行い、当該サイズ以下のバース混雑度（合計バース数 NBS_{iu} 、総船卸荷役時間 $TTUS_{iu}$ ）と当該サイズより大きなバースの混雑度（合計バース数 NBL_{iu} 、総船卸荷役時間 $TTUL_{iu}$ ）を比較し、前者が後者を上回る場合は、小型船が大型バースを利用することによって混雑が均等化するのに対し、後者が前者を上回る場合は、大型船は小型バースを利用できないので、両者の混雑度に変化はなく、大型バースの方が混雑したままである、というものである。

Step 0（計算準備）

計算を開始する水深カテゴリを US とする。初期状態においては、 $US = 1$ である。

Step 1（小型バースのバース数および総船卸荷役時間の計算）

$u = US, w = US, NBS_{iu} = NB_{iu}, TTUS_{iu} = TTU_{iw}$ とおく。

Step 2（小型バースのバース数が 0 の場合の処理：計算対象水深カテゴリの引き上げ）

$NBS_{iu} = 0$ のとき、 $u' = u, u = u + 1, w = w + 1$ として、 $NBS_{iu} = NB_{iu}, TTUS_{iu} = TTU_{iw} + TTUS_{iu'}$ とおく。このステップを $NBS_{iu} > 0$ となるまで繰り返す。

Step 3（大型バースのバース数および総船卸荷役時間の計算）

Step 1 において $NBS_{iu} > 0$ のとき（または、Step 2 において $NBS_{iu} > 0$ となったとき）、 $NBL_{iu} = \sum_{u'=u+1}^U NB_{iu'}$ 、

$TTUL_{iu} = \sum_{w'=u+1}^W TTU_{iw'}$ とする。ただし、 $u + 1 > U$ の場合

（計算対象水深カテゴリが最大水深のとき）は $NBL_{iu} = 0$ とする。

Step 4（小型バースのほうが相対的に混雑している場合の処理：小型バースの混雑度を確定し、次の計算へ）

Step 3 において $NBL_{iu} > 0$ のとき、 $\frac{TTUS_{iu}}{NBS_{iu}}$ と $\frac{TTUL_{iu}}{NBL_{iu}}$

を比較し、 $\frac{TTUS_{iu}}{NBS_{iu}} \leq \frac{TTUL_{iu}}{NBL_{iu}}$ のとき、

$$\varphi_w(NVA_{iw}, TU_{iw}, NB_{iu}^{-1}) = \frac{TTUS_{iu}}{NBS_{iu}}, \quad w = US, \dots, u,$$

$US = u + 1$ として Step 1 へ戻る。

Step 5（大型バースのほうが相対的に混雑している場合の処理：計算対象水深カテゴリの一段階引き上げ）

Step 4 において $\frac{TTUS_{iu}}{NBS_{iu}} > \frac{TTUL_{iu}}{NBL_{iu}}$ のとき、 $u' = u$ 、

$$u = u + 1, NBS_{iu} = NB_{iu} + NBS_{iu'},$$

$TTUS_{iu} = TTU_{iw} + TTUS_{iu'}$ として Step 3 へ戻る。

Step 6（当該港における最大水深カテゴリにおける処理（終了処理））

Step 3 において $NBL_{iu} = 0$ のとき、

$$\varphi_w(NVA_{iw}, TU_{iw}, NB_{iu}^{-1}) = \frac{TTUS_{iu}}{NBS_{iu}}, \quad w = US, \dots, u$$

$$\varphi_w(NVA_{iw}, TU_{iw}, NB_{iu}^{-1}) = \infty, \quad w = u + 1, \dots, W$$

として終了。

付録E 本モデルで設定した日本の陸上輸送距離 $l_{g,b}$ 、輸送時間 tm_b および有料道路料金 tl_b 一覧

○輸送距離 (km)

Table with 47 columns (prefecture names) and 47 rows (prefecture names). Each cell contains a numerical value representing the transport distance in km between the two prefectures.

○輸送時間 (時)

Table with 47 columns (prefecture names) and 47 rows (prefecture names). Each cell contains a numerical value representing the transport time in hours between the two prefectures.

○有料道路料金 (千円)

Table with 47 columns (prefecture names) and 47 rows (prefecture names). Each cell contains a numerical value representing the toll fee in thousands of yen between the two prefectures.

国土技術政策総合研究所研究報告

RESEARCH REPORT of NILIM

No. 37 January 2009

編集・発行 = 国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5018