Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-01-13

国際海上コンテナ輸送における寄港ルートネットワークに関する研究

新谷，浩一

(Degree)
博士（工学）

(Date of Degree)
2005-09-25

(Date of Publication)
2009-11-27

(Resource Type)
doctoral thesis

(Report Number)
甲3466

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003466

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

博 士 論 文

国際海上コンテナ輸送における寄港ルートネットワークに関する研究

平成17年7月

神戸大学大学院自然科学研究科

新谷 浩一

国際海上コンテナ輸送における寄港ルートネットワークに関する研究

和文要旨

我が国の今後の港湾政策を評価するために,荷主と船社の選択行動を反映した定量的評価手法の構築が求められている．そこで本研究では，荷主と船社の選択行動の均衡状態を表現した,港湾政策を評価できる手法を構築するための基礎的研究として，2者の選択主体の行動に着目し，個々のモデルを構築して分析を行った．なお，それらのモデルの統合については，ここでは直接的には扱わない．

本研究では,我が国主要港湾へ円滑に国際コンテナ貨物を集荷できるようなフィーダ輸送ネットワークの確立が求められていることに鑑み,フィーダ輸送のサービス水準や運賃が改善されたときの港湾需要の増減によってその効果を分析した[荷主の選択行動モデル]．さらに，空コンテナの回送を考慮した船社行動の分析が必要であることに応えるため,空コンテナの回送を組み込み込んだ船社の寄港地と寄港順序の選択行動を表現できる手法を構築し,空コンテナの回送が航路形成へどのような影響を与えるのかを検討した[船社の選択行動モデル].

本研究の具体的な課題は，以下の通りであった．

1) 47都道府県発着の北米・欧州方面の輸出入を対象とした，利用者均衡モデルを構築し，フィーダ輸送の①海上運賃，②寄港頻度，③内外積み替えコストの変化に伴う,荷主における国内輸送機関および利用港湾の選択の結果として得られるコンテナ貨物流動を予測する．それをもとに，港毎の取扱貨物量やフィーダ船の輸送量を推計し,その増減でもって上記①,②,③の改善が港の貨物需要にどのような効果を促すのかを分析する．
2) 船社の利益を最大化する寄港地と寄港順序等を決定する手法を集合分割問題，あるいはナップサック問題とフロー問題からなる2段階最適化問題としてモデル化し,空コンテナの回送が航路形成に与える影響の要因を分析する．その際，本船によって寄港地の空コンテナの過不足を調整できな

い場合にペナルティコストが発生すると定義し，そのコストを目的関数に組み込んで航路パターンを評価する．

本論文は次の章から構成される．

第1章では，本研究に関わる問題の整理を行い，本研究の目的について述べた．

第2章では，我が国の主要港湾を取り巻く情勢について取り上げ，我が国主要港湾のハブ機能低下と空コンテナの回送問題の存在を実証的に示した．

第3章では，本研究に関する既往の研究の文献レビューを行った．関連する文献を4つに分類し，それぞれの文献について傾向と特徴を述べ，本研究の位置づけを示して，取り組もうとする問題を明確にした．

第4章では，荷主の選択行動モデルを利用者均衡モデルとして構築した．本モデルを用いて内航フィーダサービスの運賃とサービス水準が改善された場合に，国内発着の国際コンテナ輸送において荷主の選択行動にどのような影響を与えるのかを分析した．さらに，その選択結果が我が国主要港湾および内航フィーダサービスの利用を促す効果があるのかを検討した．その結果，内航フィーダ運賃，寄港頻度，内外積み替えコストの改善が我が国主要港湾や内航フィーダ輸送へのシフトへ，ある水準でもって寄与することがわかった．また，内航フィーダ航路距離の長短によって，寄港頻度や内外積み替えコストが荷主の選択行動に与える影響の度合いを変化させることがわかった．

第5章では，本船によって寄港地の空コンテナの過不足を調整できない場合にその補填にかかる費用をペナルティコストと定義し，船社の利益を最大化する寄港地と寄港順序および投入隻数，速力等を決定する配船問題を集合分割問題としてモデル化した．空コンテナの回送が航路形成に与える影響を分析するため，そのモデルを東南アジア航路へ適用して考察を加えた．それによって，空コンテナの需要を考慮した航路計画は，運航費，ペナルティコストを小さくでき，船社の利益を大きくすることがわかった．

第5章で扱った問題は，寄港候補地数が増えるにしたがって解の代替案の数が指数関数的に増大し，現実的な計算時間での求解が困難となる．そこで第6章では，この問題を解決するために，遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた

解法を提案した. この配船モデルをナップサック問題とフロー問題からなる2段階最適化問題として再定式化した．本問題に対応した解表現を設計し，GAによって解を求めたところ，現実的な計算時間で準最適解が得られることがわかった.

第7章では，空コンテナの回送にかかるコストおよび自社コンテナの保有コストとの間に存在するトレードオフの関係に着目し，第6章で行った定式化に船社の自社コンテナの保有規模に関わるコストを付加して航路計画を検討し，いくつかのケーススタディを行った．その結果，回送を考慮しない計画では，回送を考慮する計画に比べて，貨物の積み取り量が多く，運賃収入は大きい．しかしその反面，必要コンテナ数が増えることになり，効率的に空コンテナの回送が行えない場合は，さらに必要コンテナ数を増やすことにつながることがわかった．つまり，空コンテナの回送を考慮した航路計画は，初期投資の節約につながることがわかった.

第8章では，今後の研究に対するいくつかの課題について述べた.

第9章では，本論文の総括を述べた.

The container shipping network problem concerning traffics among ports

Abstract

Quantitative analysis of behaviors of shippers and carriers should be carried out for evaluation of Japan's port policy. In this thesis, shipper's and carrier's behaviors based on the economical efficiency are modeled in orders to assess the port policy, while the policy assessment is not explicitly done in this thesis.

This thesis produces the following consequences:

1) A user equilibrium (UE) model is developed for reflecting shippers' behaviors in ocean trade between Japan and the other regions such as United States and Europe. The model estimates cargo demand at each major port of Japan by taking into account factors such as: (a) feeder cost, (b) calling frequency of feeder ship and (c) handling cost for transshipment at a hub port. By using an estimated throughput of each port and incoming and outgoing traffic of the port by feeder ships. By using this model, the influence of these factors to the amount of container traffic at each port is analyzed.
2) Designing containership routing networks incorporated with empty container repositioning among calling ports is modeled by using Set Partitioning Problem and Knapsack Problem with an objective of profit maximization for a liner shipping company. The model finds a set of calling ports that associates port calling sequence, the number of ships by ship size and resulting cruising speed to be deployed in the service networks. An application of the problem to container transportation in Southeast Asia is presented.

This thesis is organized as follows:

Chapter 1 describes the research subject and objectives.

Chapter 2 presents issues O-D container transportation such as: (a) hub function of major ports in Japan has been lost in competitive circumstances with ports in neighboring countries, and (b) allocation of enormous quantity of empty

containers is caused by imbalanced trades.

Chapter 3 reviews related literature to shipper's and carrier's behaviors, respectively.

Chapter 4 analyzes container traffic from/to Japan with consideration of feeder transports connecting major ports and local port, and proposes a model of international container traffic, which is a competitive method among shippers with UE assignment. By case studies, we examined the influence of feeder service with lower costs, high calling frequency, and handling cost of transshipment to shippers' port choice.

Chapter 5 proposes a method for designing containership routing networks, which is modeled as a shuttle type of the location routing problem based on the Set Partitioning Problem. The proposed method with a Brute force procedure provides the solution as a set of calling ports that associates, shipping routes, cruising speed and the number ships by ship size. An application of the problem to container transportation in Southeast Asia is demonstrated. By numerical simulation studies, we evaluated routing alternatives with various ship sizes and examined the effect of consideration of container fleet unbalanced trades. As a result, the problem with empty distribution produces a container transportation service with a lower ship speed due to efficient empty container repositioning and therefore saves considerably the fuel costs.

Chapter 6 describes a solution procedure, with another solution approach, for the problem Chapter 5 discussed. The model is reformulated on a Knapsack Problem basis. Since the problem is a difficult combinational optimization problem, efficient exact algorithms unlikely exist. Therefore, this chapter proposes a heuristic method to nearly optimize the solution, by employing Genetic Algorithms (GA). The "genetic representation" (or *chromosome*) of the candidate solution were designed, namely, the coding of a combination of calling ports and associated calling sequence. As a result, we obtained a good approximate solution in a reasonable computational time.

Chapter 7 describes the model of Chapter 6 presented but with consideration of

consider a container fleet size on a shipping route. In relevant literature, a container fleet size is ignored mainly because shipping operators handle an enormous scale of own and/or long term leased containers for their business and they give up optimizing the container fleet. This reality makes the investment costs in the container fleet the sunk costs. As a result, the operators are free from thinking about the container fleet. On the other hand, this study attempts to optimize the container fleet under the overall optimization of shipping architecture by including the container fleet cost in the objective function. By numerical simulation studies, we found that the problem with considering the container fleet size reduces the primary investment cost.

Chapter 8 refers to several future research topics closely related to topics in this thesis themes to be considered in further studies.

Chapter 9 presents our conclusions.

目　　次

頁

第1章　序論 ····· 1

1.1　本研究の背景 ····· 1

1.2　本研究の目的 ····· 3

1.3　論文の構成 ····· 4

第1章に関する参考文献 ····· 7

第2章　東アジア諸国の主要港湾におけるコンテナ輸送の現状 ····· 8

2.1　概説 ····· 8

2.2　東アジア諸国の主要港湾におけるコンテナ取扱の推移 ····· 8

2.3　コンテナ取扱料金の国際比較 ····· 9

2.4　国内港湾における外貿コンテナ取扱量のシェアの推移 ····· 12

2.5　船社の東アジア諸国港湾に対するサービス水準の変化 ····· 13

2.6　東アジア諸国の対北米貿易量の推移 ····· 16

2.7　運賃水準の推移 ····· 17

2.8　本章のまとめ ····· 18

第2章に関する参考文献 ····· 19

第3章　既往の研究 ····· 20

3.1　概説 ····· 20

3.2　輸送機関分担および港湾の貨物需要予測に関する研究 ····· 20

3.2.1　輸送機関分担に関する研究 ····· 20

3.2.2　港湾の貨物需要予測に関する研究 ····· 21

3.3　航路計画および空コンテナの回送に関する研究 ····· 23

3.3.1　航路計画に関する研究 ····· 23

3.3.2　空コンテナの回送に関する研究 ····· 28

3.4　本章のまとめ ····· 30

第3章に関する参考文献 ····· 31

第4章　近隣諸国港湾の中継を考慮した国内発着のコンテナ貨物の流動分析に関する研究 ····· 35
4.1　概説 ····· 35
4.2　コスト関数の定式化 ····· 35
4.2.1　モデルの基本的な考え方 ····· 35
4.2.2　コンテナ輸送のネットワーク表現 ····· 36
4.2.3　コスト関数 ····· 37
4.2.4　リンクコストの特性 ····· 37
4.2.5　リンクコスト関数の定式化 ····· 38
4.2.6　分析対象範囲 ····· 41
4.3　解法 ····· 42
4.3.1　利用者均衡モデルの定式化 ····· 42
4.3.2　等価な最適化問題への変換 ····· 43
4.3.3　Frank-Wolfe法による最適化計算 ····· 44
4.4　使用データ ····· 46
4.4.1　海上リンクフローデータ ····· 47
4.4.2　国内リンクフローデータ ····· 47
4.4.3　リンクコストデータ ····· 48
4.5　計算結果 ····· 48
4.5.1　現状再現性 ····· 48
4.5.2　ケーススタディ ····· 53
4.6　本章のまとめ ····· 58
第4章に関する参考文献 ····· 59

第5章　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・ルーチング問題に関する研究 ····· 60
5.1　概説 ····· 60
5.2　モデルの定式化 ····· 61
5.2.1　モデルの基本的な考え方 ····· 61
5.2.2　前提条件 ····· 63
5.2.3　モデルの定式化 ····· 64

5.3 解法 ····· 72
5.3.1 解法の概要 ····· 72
5.3.2 速力の決定 ····· 73
5.4 モデルの適用事例 ····· 74
5.4.1 前提条件 ····· 75
5.4.2 適用結果 ····· 76
5.5 本章のまとめ ····· 81
第5章に関する参考文献 ····· 84

第6章 遺伝的アルゴリズムによる空コンテナの回送を考慮したコンテナ船の航路計画に関する研究 ····· 85
6.1 概説 ····· 85
6.2 モデルの定式化 ····· 85
6.2.1 第5章と本章での定式化の相違点 ····· 85
6.2.2 モデルの定式化 ····· 86
6.3 遺伝的アルゴリズムを用いた解法 ····· 96
6.3.1 解法の概要 ····· 96
6.3.2 個体表現 ····· 98
6.3.3 選択と適合度 ····· 99
6.3.4 交叉 ····· 99
6.3.5 突然変異 ····· 100
6.4 モデルの適用事例 ····· 100
6.4.1 パラメータの設定 ····· 100
6.4.2 ケーススタディ ····· 101
6.4.3 計算結果 ····· 104
6.5 本章のまとめ ····· 106
第6章に関する参考文献 ····· 108

第7章 自社コンテナの保有規模も組み込んだ空コンテナの回送を考慮したコンテナ船の航路計画に関する研究 ····· 109
7.1 概説 ····· 109

7.2　港における空コンテナの安全在庫の考え方 ····· 109
7.2.1　空コンテナの回送方法 ····· 109
7.2.2　安全在庫の考え方 ····· 111
7.3　自社コンテナの保有コストを組み込んだモデルの定式化 ···· 113
7.3.1　モデルの定式化 ····· 113
7.3.2　自社コンテナの保有規模の考え方 ····· 118
7.4　モデルの適用事例 ····· 120
7.4.1　ケーススタディ ····· 120
7.4.2　計算結果 ····· 121
7.5　本章のまとめ ····· 123
第7章に関する参考文献 ····· 125

第8章　本研究の今後の課題と展開 ····· 126
8.1　概説 ····· 126
8.2　今後の課題と展開 ····· 126
8.2.1　荷主と船社の選択行動に関するモデルの統合 ····· 126
8.2.2　荷主の選択行動に関するモデル ····· 128
8.2.3　戦略的な空コンテナの回送 ····· 128
8.2.4　アライアンス間および航路間の空コンテナの融通 ····· 129
8.2.5　自社コンテナの長期リースコンテナの保有比率 ····· 129
8.2.6　時間変動を伴う貨物需要 ····· 130
8.3　本章のまとめ ····· 130
第8章に関する参考文献 ····· 131

第9章　結論 ····· 132

関連論文 ····· 138

謝辞 ····· 139

第1章　序論

1.1 本研究の背景

我が国の主要港湾は，近年まで東アジア地域を代表する港として，東アジア諸国と欧米諸国を結ぶハブ港湾の役割を担ってきた．ここ数年来，東アジア諸国の急速な経済成長を反映して，それらの国の主要港湾におけるコンテナ取扱量は急増している．逆に，我が国の主要港湾では低調な伸びを示し，東アジア地域において相対的なハブ機能と国際競争力を低下させている[1)]．その間，コンテナ運賃はかなり低位な水準で推移しており[2)]，結節点である港湾と国内輸送のコスト高が議論されている．国内港湾においては，90年代以降，国策による地方荷主のための国内輸送コストの削減を目的とした地方港湾整備によって，地方港湾と近隣諸国の主要港湾とを結ぶ定期航路が相次いで開設された．当然のことながら，地方港湾から近隣諸国の主要港湾へ向けた直接貿易あるいは外航フィーダ輸送が増加し，次第に我が国主要港湾の国内集荷機能は低下していった[3)]．国内主要港湾が国際競争力を失った結果，我が国は欧米への基幹航路を減ずることになった．この傾向が今後も続くと，単に港湾経営の悪化にとどまらず，我が国荷主の物流コストの上昇やリードタイムの増加を招いて国際競争力を低下させ，さらにはそれが我が国の経済力の低下につながる恐れがある．したがって，今後如何にして，人件費等の内外価格差の大きい我が国で，ソフト・ハードの両面にわたる新たな物流システムを構築し，国際海上コンテナの戸口から戸口までの総輸送コストの低減ならびにサービス向上を図るのかが求められていると考える．

一方，東アジア諸国の急速な経済発展に伴うコンテナ貨物需要の増加によって，船社は基幹航路へ最新鋭のコンテナ船を投入して輸送容量を確保している．しかしながら現在，コンテナ海運業界は空コンテナの回送という大きな問題に直面している[2)]．それは，世界的規模で生産地と消費地とに二極化が進み，国際的な地域間でのコンテナ輸送量のインバランスが深刻化していることである．船社は，荷主が必要とする空コンテナを適切なタイミングで適切な数量を用意できなければ，ビジネスチャンスを逃すことにつながる．

したがって,船社は寄港地の空コンテナの過不足によって多数の空コンテナの回送を余儀なくされることから,効率的に集荷と空コンテナの回送を行うため,航路の再編成を迫られている状況にある.今後の港湾政策にとって空コンテナの回送を如何に効率的に行えるようにするかが重要な課題であるといえる.

以上のように,現在,地方港湾は近隣諸国港湾のフィーダポートとなりつつあるが,それを過度に推進することは,我が国の主要港湾のハブ機能と国内集荷機能の低下につながり,日本に寄港する基幹航路のコンテナ貨物に係るコストの上昇を招きかねない.むしろ主要港湾に円滑に国際コンテナ貨物を集荷できるような国内フィーダ輸送ネットワークの確立が望まれる.そもそも,資本集約性の高いコンテナ港湾にあっては,規模の経済性によるコスト低減や集中化による寄港航路数・頻度等のサービス水準の改善を図っていかなければならない.その中で,国内主要港湾へコンテナ貨物を集荷させるために国内フィーダ輸送のネットワークの拡大・充実が必要である.我が国の主要港湾のサービス水準や料金の改善により港湾需要の拡大が進めば,経済空洞化防止につながり,さらに新たな港湾発展への期待がもたれる.

上述の認識によって,国内の港湾整備とそれに伴う海上輸送ネットワークの再構築を検討する際には,その判断材料となる荷主や船社の行動規範を考慮したコンテナ輸送市場のメカニズムを表現できるモデルの構築が必要となる.港湾の貨物需要は,コンテナ輸送の経済主体である荷主と船社との競合が均衡した結果であることから,船社と荷主の選択行動について個々にモデル化を行った上で,それらを統合して荷主と船社との均衡を表現する必要がある.

荷主は,船社から提示されたコンテナ船の輸送運賃,輸送時間,運航スケジュール等に関する情報をもとに自己の仕出地から仕向地までのトータルコストを最小化する経路(輸送機関や港も含む)を選択する.一方,船社は,自社の利益を最大化するような寄港地,寄港順序および配船形態等を決定する.荷主にとっては仕出・仕向港間の輸送であっても,船社にとっては航路ループの一部の輸送であるので,船社が航路ループを変化させれば貨物の輸送時間は増えて,荷主の選択行動に何らかの影響を与える.このことから,

荷主の選択行動は船社のそれに付随してなされると考えることができる．さらに，その荷主の選択行動の結果，つまり港湾の貨物需要をもとにして船社は選択行動を行うことから，荷主と船社は互いに影響を与え合う立場になる．したがって，港湾の利用者である荷主と船社という2者の選択行動は，港湾政策に大きく影響を及ぼすと考えられる．

特に近年，船社を取り巻く空コンテナの問題は深刻になっていることから，船社にとっては如何に実入りコンテナと空コンテナを調和させて航路計画を立てるかが重要となっている．これは，船社が航路計画を検討する際に集荷とコストの両面からの最適化が求められることを意味する．船社間の競争が激化している状況下において，コスト削減は大きな問題であり，その中でも空コンテナの回送が円滑に行えるかどうかは重要課題の1つとなっている．したがって，船社の選択行動を詳細に分析するためには空コンテナの回送を航路計画に組み込む必要がある．

1.2 本研究の目的

前節で述べたように，我が国の今後の港湾政策にとって，荷主と船社の選択行動を反映した定量的手法を構築する必要がある．そこで本研究では，荷主と船社の選択行動の均衡状態を表現し，港湾政策を評価できる手法を構築するための基礎的研究として，それら2者の選択主体の行動に着目し，個々のモデルを構築して分析を行う．なお，それらのモデルの統合については，ここでは直接的には扱わず，今後の課題として第8章で述べることとする．

本研究では，円滑に我が国主要港湾へ国際コンテナ貨物を集荷できるような国内フィーダ輸送ネットワークの確立が求められていることに鑑み，フィーダ輸送の運賃やサービス水準が改善されたときの港湾需要の増減によってその効果を分析する[荷主の選択行動モデル]．さらに，空コンテナの回送を考慮した船社行動の分析が必要であることに応えるため，空コンテナの回送を組み込んだ船社の寄港地と寄港順序の選択行動を表現できる手法を構築し，空コンテナの回送が航路へどのような影響を及ぼすのかを検討する[船社の選択行動モデル]．

本研究の課題は，以下の通りである．

1) 47都道府県発着の北米・欧州方面の輸出入を対象とした，利用者均衡モデルを構築し，フィーダ輸送の①海上運賃，②寄港頻度，③内外積み替えコストの変化に伴う，荷主における国内輸送機関および利用港湾の選択の結果として得られるコンテナ貨物流動を予測する．それをもとに，我が国および近隣諸国の主要港湾の取扱貨物量やフィーダ船の輸送量を推計し，その増減でもって上記①，②，③の改善が港の貨物需要にどのような効果を促すのかを分析する．
2) 東南アジア航路を対象とした，船社の利益を最大化する寄港地と寄港順序等を決定する手法を構築し，空コンテナの回送が航路形成に与える影響の要因を分析する．その際，本船によって寄港地の空コンテナの過不足を調整できない場合にペナルティコストが発生すると定義し，そのコストを目的関数に組み込んで航路パターンを評価する．

1.3 論文の構成

本論文は9章からなる．

第2章では，我が国主要港湾がおかれている現状について述べる．具体的には，我が国主要港湾がアジア地域においてハブ機能と国際競争力の低下を招いていること，コンテナ貨物の地方への分散化，世界規模での生産地と消費地の二極化が進んだことによる空コンテナの問題について示す．

第3章では，本研究に関する既往の研究の文献レビューを行う．その対象となる既往の研究は，①陸上あるいは海上かという輸送機関選択に関するもの，②港湾における貨物需要予測に関するもの，③コンテナ船の航路・配船計画に関するもの，④空コンテナの回送に関するものを挙げ，既往の研究の傾向および特徴を述べ，本研究の位置づけを示す．

第4章では，フィーダ輸送の運賃とサービス水準の改善に伴う，我が国主要港湾とフィーダ輸送のコンテナ貨物取扱量を推計して，その増減でもって港の貨物需要への影響を分析する．そのために，我が国主要港湾と近隣諸国

主要港湾，および国内でのトラック輸送とフィーダ輸送という2つの競合を表現した，ネットワーク均衡モデルの構築を試みる．さらに，そのモデルを日本の各都道府県発着の北米・欧州方面への輸出入貨物を対象に適用し，考察を加える．

第5章では，本船によって寄港地の空コンテナの過不足を調整できない場合にその補填にかかる費用をペナルティ費用と定義し，船社の利益を最大化する寄港地と寄港順序および投入隻数，速力等を決定するための手法を構築する．さらに，空コンテナの回送が航路形成に与える影響を分析するため，本手法を東南アジア航路へ適用して考察を加える．ここで扱う問題は，本船は寄港地間の実入りコンテナの貨物需要を必ず満たすという前提を設けると，寄港地と寄港順序を決定する組合せ最適化問題に帰着する．したがって，寄港候補地が増えれば航路パターンの代替案の数は指数関数的に増大する性質を持つことから，効率的なアルゴリズムの検討が必要である．しかしここでは，①アルゴリズムの効率化よりも，厳密解を得ることに重点をおく，②船社は必ずしも最適解を採用するとは限らず，解集合の中から自社の方針に合致した解を採択する．そのため，解集合の得られる解法である必要がある，という理由から，すべての寄港地と寄港順序の組合せの代替案を列挙して，それらを評価しながら計算を進めることのできる総当たり法を採用する．対象となる寄港候補地は7港とする．一方，第1.1節において船社の航路再編成を含めた航路設定の選択行動は，荷主の経路選択行動に影響を及ぼすと考えられ，船社行動を詳細に分析することが，今後の港湾政策を企画・立案する上で重要であると述べた．現在，船社は空コンテナの回送問題に直面しており，船社行動は空コンテナの回送に影響を受けている．場合によっては，ある港が本船の寄港に足りるコンテナ貨物があるにもかかわらず，空コンテナの回送が効率的に行えない場合はその港は抜港されることも考えられる．また，第4章の研究では船社が提供する航路ループは仕出・仕向港間を直行すると仮定しているが，荷主は経路選択を考える場合に輸送時間も考慮することからこの仮定は現実問題から離れることになる．したがって，空コンテナの回送を組み込んだ船社の航路計画について取り扱う必要がある．

第6章では，第5章で構築した手法において，寄港候補地が増えるにしたが

って，指数関数的に増える性質を持っていることから，解法にメタ・ヒューリスティクスの1つである遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithms, GA)を採用することにする．現実問題として，航路計画を検討する際は多数の寄港地を対象とすることが多い．したがって，本問題は寄港候補地が多くなった場合，効率的に厳密解を求めることは困難となる．現実的な計算時間内に準最適解を探索することができ，複数の解の代替案が得られることからGAを採用し，本問題に適用する．

第7章では，第5，6章で扱う問題に船社の自社コンテナの保有規模に関する決定問題を内包した航路計画を考える．船社にとって空コンテナの回送は，保有コンテナの管理と位置づけられる．しかし，戦略的な観点から航路計画を立案するためには，将来の貨物需要に応じたコンテナの保有規模も考慮する必要がある．なぜなら，自社コンテナの保有規模が貨物需要に対して十分大きければ，リースコンテナの借り入れは少なくてすむ．その代わり，自社コンテナの保有コストは大きくなる．逆に自社コンテナの保有規模が貨物需要に対して小さければ，自社コンテナの保有コストは小さくなるが，リースコストは大きくなる．したがって，船社の戦略的な航路計画にとって自社コンテナの保有規模の決定は必要となる．しかし，第5，6章の研究では，船社における自社コンテナの保有規模は無視している．通常，船社が扱っている自社コンテナおよび長期リースコンテナは膨大となるので，船社はコンテナ保有規模の最適化を断念している．この事実は，コンテナ保有コストを埋没コストとして考えることを意味し，結果的に船社はコンテナの保有規模の最適化について考慮していない．したがって，航路計画に船社における自社コンテナの保有規模に関するコストも反映させる必要がある．

第8章では，今後の研究に残された課題を示し，その課題に対してどのような研究が必要なのかについて述べる．

最後の第9章では，本研究で得られた成果を示し，本研究の結論とする．

第1章に関する参考文献

1) 池田敏郎：国際海上コンテナをめぐる港湾物流等の効率化に関する一考察, 海事産業研究所報 No.384, pp.47-86, 1998.
2) オーシャンコマース：2005年版 国際輸送ハンドブック, 2004.
3) 池田敏郎:内航フィーダー輸送の現状と課題, 海事産業研究所報 No.396, pp.39-67, 1999.

第2章　東アジア諸国の主要港湾におけるコンテナ輸送の現状

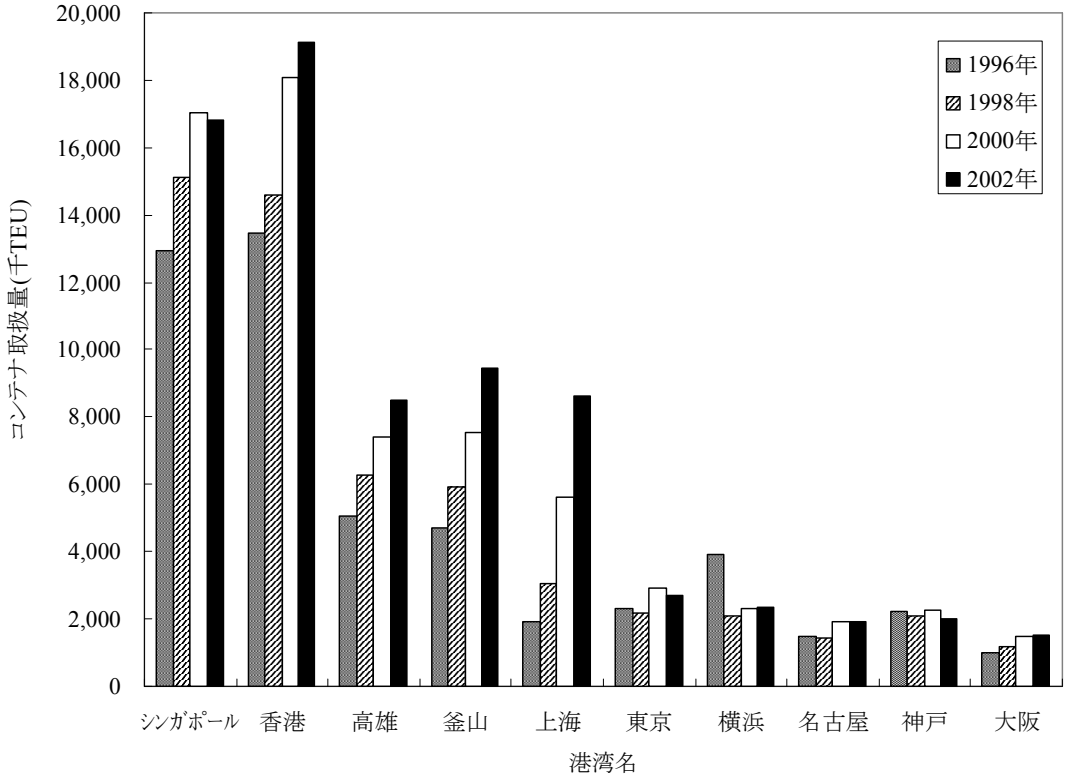
2.1　概説

本章では，第1章の背景で述べた，我が国の主要港湾を取り巻く情勢について取り上げ，我が国主要港湾のハブ機能低下と空コンテナの回送問題の存在を実証的に示す．

第2.2節では，近年の東アジア諸国の主要港湾における年間取扱実績の推移について述べる．続いて，第2.3節では港湾諸料金の国際比較を行って，我が国の主要港湾の港湾諸料金が近隣諸国の主要港湾と比較して割高となっていることを示す．第2.4節では，国内港湾における外貿コンテナの取扱量のシェアを示し，近年のコンテナ貨物の地方分散化傾向が進行していることを示す．第2.5節では，船社が東アジア諸国港湾に対して提供するサービス水準を表す2つの指標に着目して，我が国の主要港湾へのサービス供給量を縮小させていることを示す．第2.6節では，東アジア諸国の対北米貿易量の推移をみて，貿易不均衡が進行していることを示す．第2.7節では，北米と欧州航路における年間を通じた平均運賃の推移を示し，両航路とも往復航の運賃格差が著しく大きくなっていることを述べる．

2.2　東アジア諸国の主要港湾におけるコンテナ取扱の推移

東アジア諸国の主要港湾におけるTEUベースの年間取扱実績の推移[1)-5)]を図2.1に示す．取扱実績は1996～2002年までの2年毎のデータで，空コンテナの取扱量も含んでいる．シンガポールと香港は，他港と比べて極端に取扱量が多い．また，高雄，釜山，上海は増加傾向にあり，特に上海は急速に取扱量を伸ばしていることがわかる．我が国主要港湾は微増に留まっており，相対的に東アジア地域における地位は低下していることがわかる．



原出所：CONTAINERISATION INTERNATIONAL YEARBOOK (1998～2004年)
出典：数字でみる港湾 (文献1～5)のデータを使用して著者が作成
注1) 空コンテナも含む

図2.1 東アジア主要港のコンテナ取扱量の推移

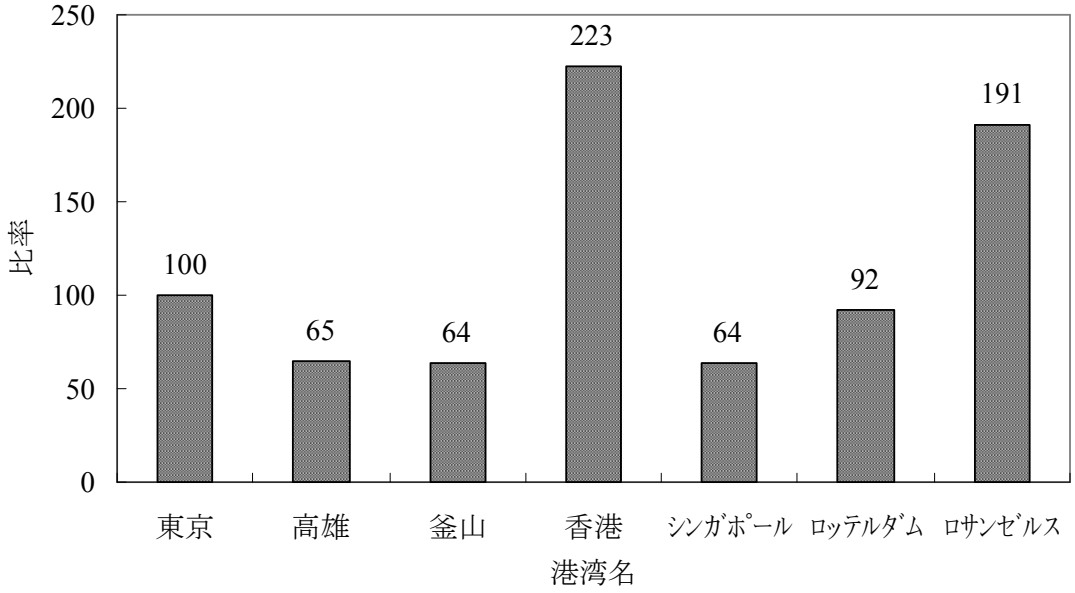
2.3 コンテナ取扱料金の国際比較

1999年と2000年に行われた国土交通省調査による1FEU(Forty foot Equivalent Unit, 40フィートコンテナ個数換算)あたりの港湾諸料金の国際比較を図2.2(1)に示す．東京の水準は香港，ロサンゼルス，ロッテルダムよりも低いが，シンガポール，釜山，高雄と比較すると高い水準となっていることがわかる．

次に東京と釜山の内訳を示した図2.2(2)と,その細目についての内訳を示した表2.1をみる．港湾諸費用の中でも最も比重を占めているのは荷役料である．ついで，ターミナル費用，船舶関係費用という順番になっている．東京は釜山に比べてすべての細目について高い水準となっている．ここでは1FEUあたりの港

湾諸費用を比較したが，取扱貨物量を増やし，規模の経済を働かせてこそこれらの費用を低減することができる.

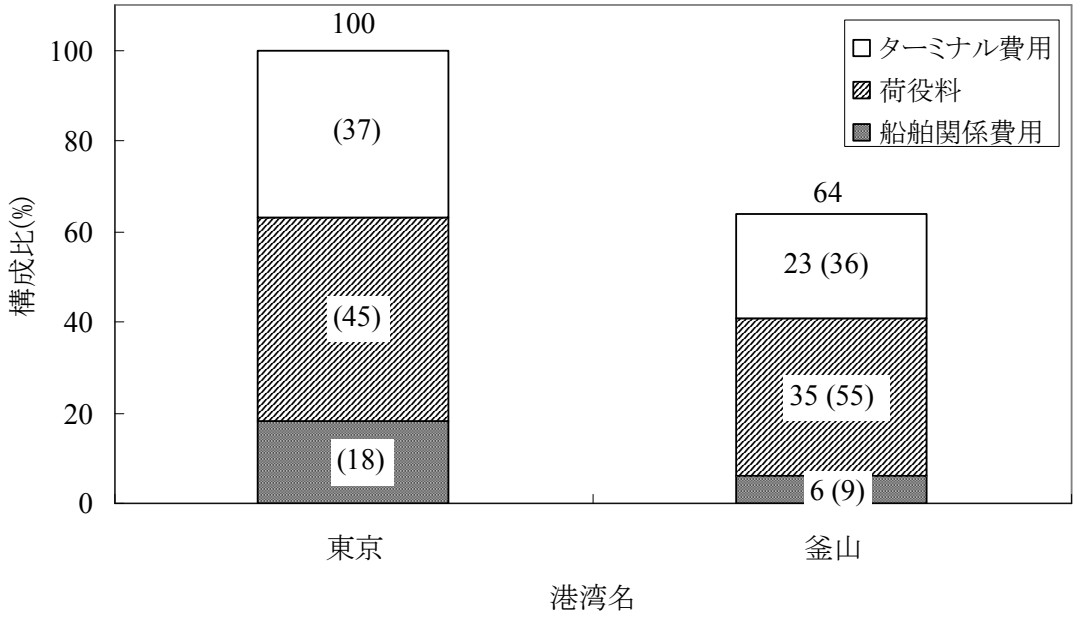
東京を100とする



原出所：国土交通省，港湾運送(港湾荷役)の現状と課題について (2002年)
出典：外航コンテナの国内フィーダー促進に係る研究 (文献6)
注1) コンテナ取扱料金は，C/Tオペレータ，利用船社に対するヒアリング(1999年, 2000年)結果による
注2) 入港船型は3,700TEU型=50,000G/T級(48,342G/T)とする．積卸量1,200個(1,800TEU)の場合
注3) 入港条件：平日デイタイム着岸(7:30)，夜間着岸(21:00)
注4) 各港の料金は，実際の年間取扱量を前提としたヒアリング結果にもとづいており，それぞれ年間30万TEUを取り扱う場合の料金となっている
注5) 為替レート：台湾1NT$=3.78円，韓国1ウォン=0.0935円，香港1HK$=16.39円，シンガポール1SP$=69.47 円，オランダ1ギルダー=51.68円，米国1$=125.5円
注6) コンテナ取扱料金とは，以下の諸経費の合計である：リース料，係留施設使用料，オフィス労働者人件費，港湾労働人件費，荷役機械償却費，荷役機械メンテナンス費，電力費，オフドックコンテナ料，トン税，入港料，各使用料(パイロット，進路警戒船，タグボート)，綱取放作業料，その他

図2.2(1) 1FEUあたりのコンテナ取扱料金の国際比較

東京を100とする



原出所：国土交通省，港湾運送(港湾荷役)の現状と課題について (2002年)
出典：平成14年度大阪湾における広域港湾検討調査報告書 (文献7)
注1)図2.2(1)における東京と釜山についての内訳である
注2)カッコ内数値は構成比を表す

図2.2(2) 東京と釜山のコンテナ取扱料金の比較(1FEUあたり)

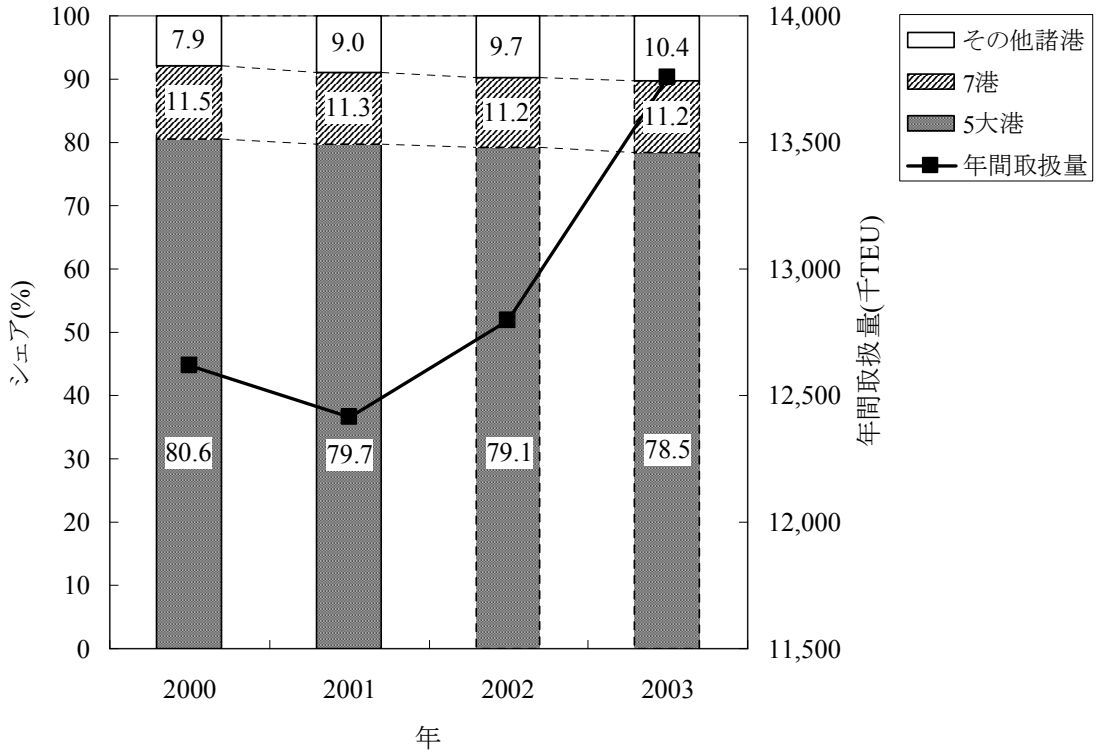
表2.1 港湾諸費用の内訳(東京)

港湾諸料金の細目		料金構成比
船舶関連費用	入港料	18%
	トン税	
	特殊トン税	
	水先料	
	曳船使用料金	
	綱取放作業料	
荷役料	港湾労働者等人件費	45%
	荷役機械関連費	
ターミナル費用	リース料	37% (内10%)
	その他	

原出所：国土交通省，港湾運送(港湾荷役)の現状と課題について (2002年)
出典：平成14年度大阪湾における広域港湾検討調査報告書 (文献7).
注1) 図2.2(1)における東京についての内訳である

2.4 国内港湾における外貿コンテナ取扱量のシェアの推移

2000～2003年における国内港湾の外貿コンテナの取扱量と，グループ分けした港湾のシェアを示した図2.3をみる．国内港湾の外貿コンテナの取扱量は，2000年に一旦減少したものの，2001年から毎年増加した．一方，グループ分けした港のシェアをみると，5大港は毎年縮小傾向で，7港は横這いであるが，その他諸港は拡大傾向にある．このことから，地方港湾におけるコンテナ埠頭の整備の進展に伴い，近海航路の開設，定着を通じたコンテナ貨物の地方港湾への分散が進行していることがわかる．

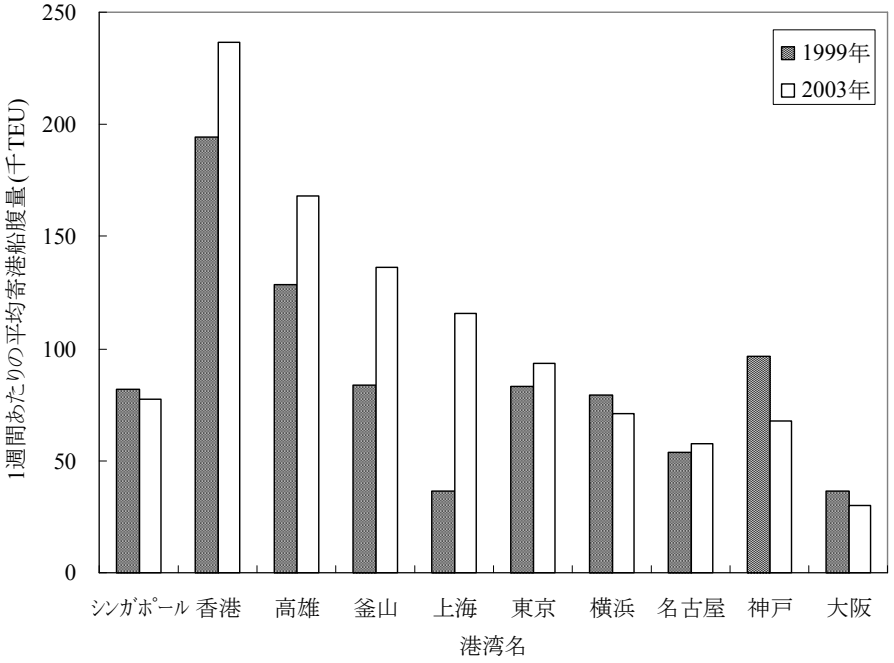


出典：港湾統計 平成12～15年 (文献8～11)のデータを使用して著者が作成
注1)空コンテナも含む
注2)港の分類：文献12を参考に，5大港(東京，横浜，名古屋，大阪，神戸)，7港(千葉，川崎，清水，四日市，下関，北九州，博多)，その他諸港(上記12港以外の港湾)にグループ分けした

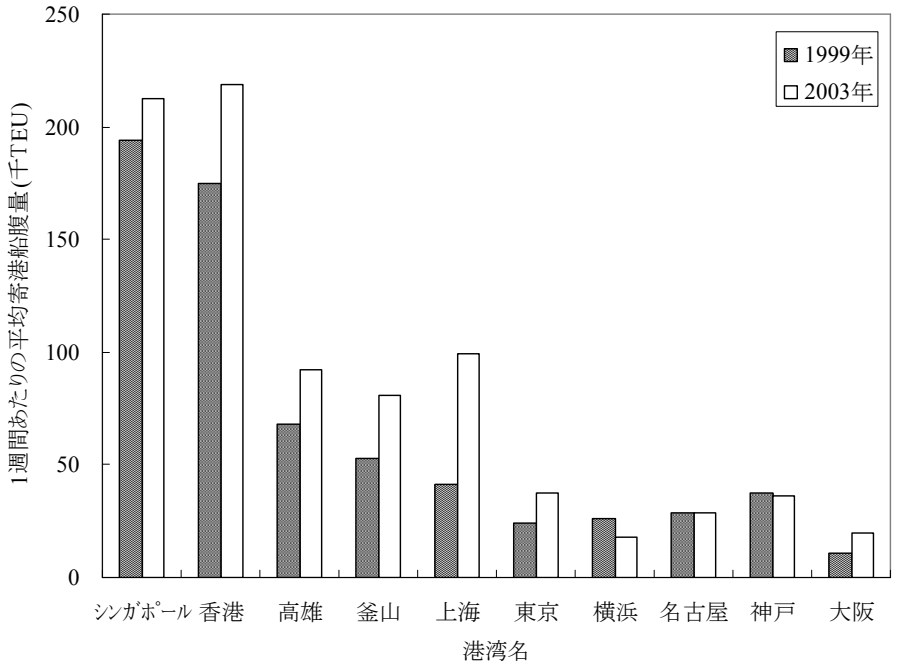
図2.3 国内港湾における外貿コンテナ取扱量の推移とシェア(2000～2003年)

2.5 船社の東アジア諸国港湾に対するサービス水準の変化

船社が東アジア諸国港湾に対して提供するサービス水準の変化について，2つの指標に着目して述べる．図2.4(1)，(2)に1999年と2003年について比較したものを示す．それらの指標は，北米および欧州航路における1週間あたりの平均寄港船腹量と平均航路便数[13),14)]を表している．前者は1週間に寄港するコンテナ船の船型サイズ(TEUベース)を合計したもので，後者は1週間に寄港するコンテナ船の平均便数である．それらの指標は船社によるサービス水準の経年変化を意味し，それらを比較することによって，船社が行った航路の再編成の傾向を大まかに知ることができる．図2.4(1)をみると，シンガポール，香港，高雄，釜山，上海ともに顕著な増加傾向にある．逆に日本の主要港湾は東京を除いてはほぼ横這いか減少傾向にあることがわかる．さらに図2.4(2)をみると，シンガポールを除く，香港，高雄，釜山，上海は増加傾向にあり，特に上海の増加が著しい．逆に日本の主要港湾は減少傾向にあることがわかる．ここでの比較によって，船社は我が国の主要港湾に対して，サービス供給量を縮小させていることがわかる．



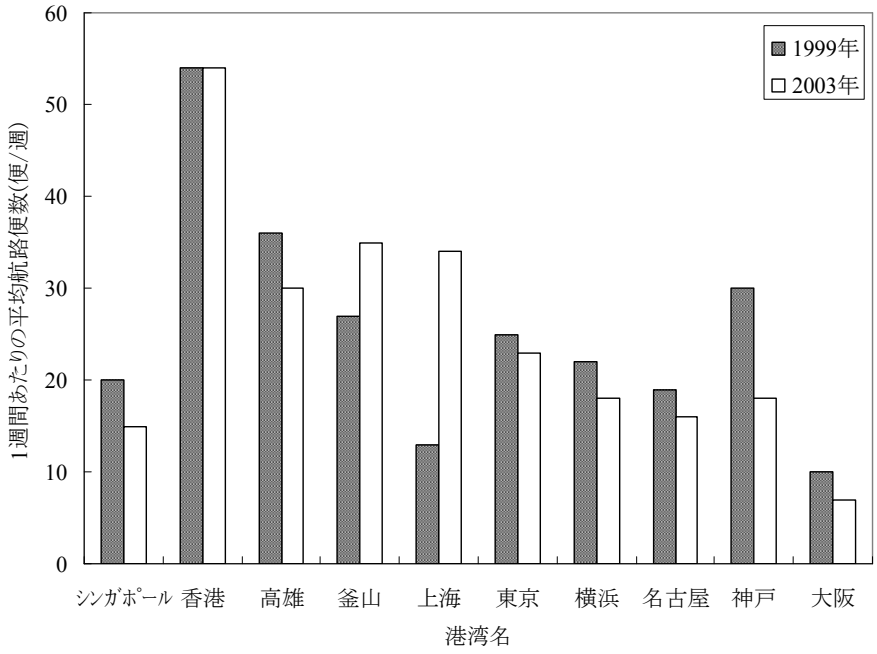
(a) 北米航路



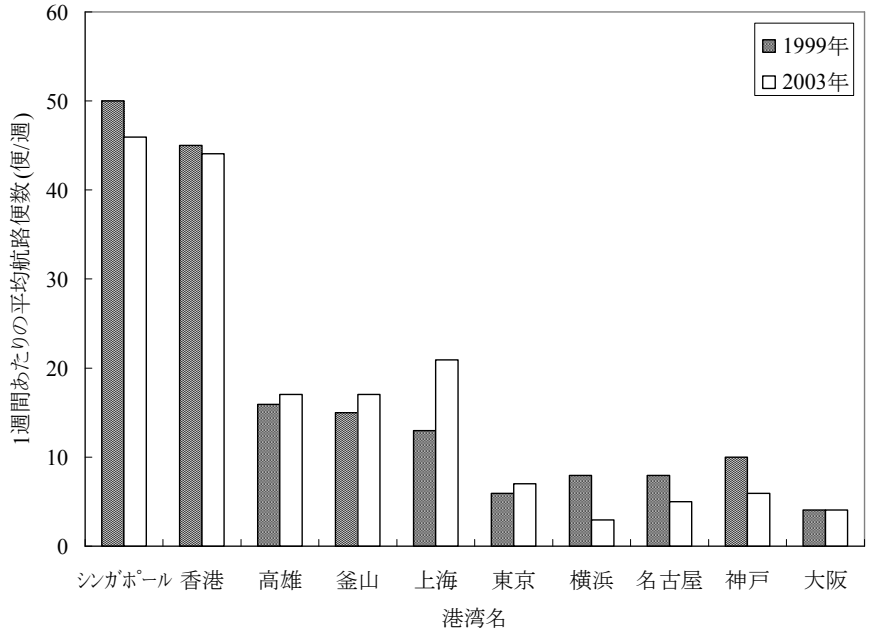
(b) 欧州航路

注1) 国際輸送ハンドブック 2000, 2004年版 (文献13, 14)を使用して著者が作成

図2.4(1) 平均寄港船腹量(1週間あたり)



(a) 北米航路



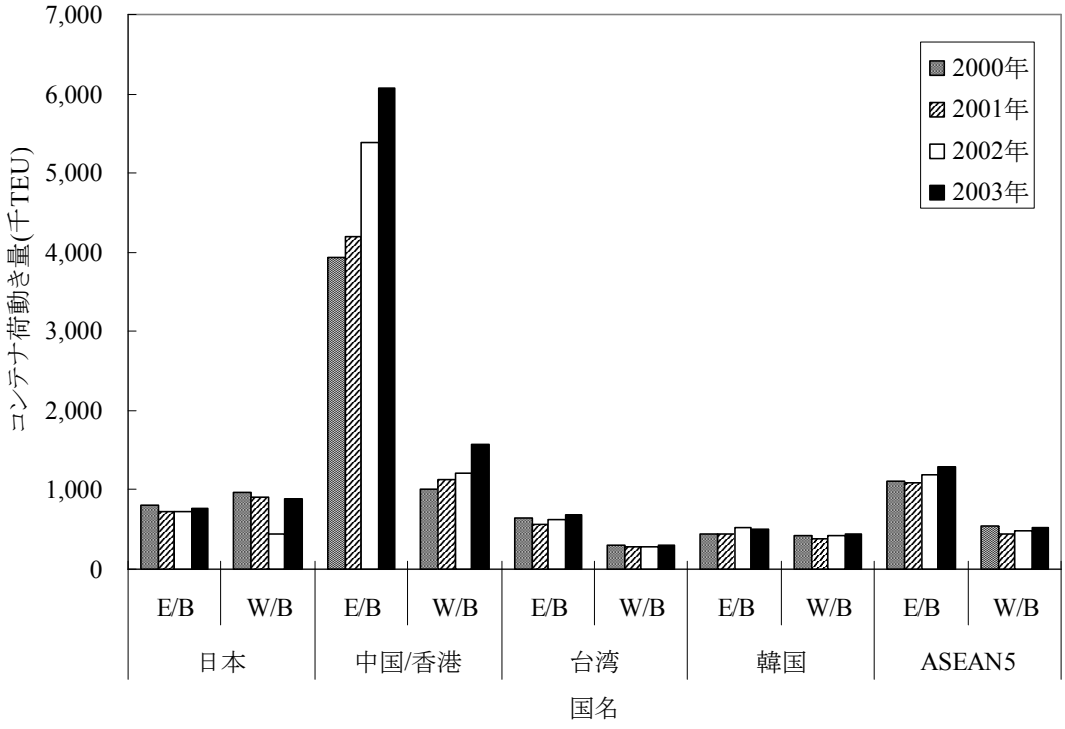
(b) 欧州航路

注2) 国際輸送ハンドブック 2000, 2004年版 (文献13, 14)を使用して著者が作成

図2.4(2) 平均航路便数(便/週)

2.6 東アジア諸国の対北米貿易量の推移

ここでは，東アジア諸国の対北米貿易量の推移を概観して，貿易不均衡が進行していることを示す．2000～2003年までの4年間のTEUベースでの推移を図2.5に示す．中国/香港においては，東航，西航ともに貨物量を増やしているが，それとともに東西航間に貿易格差が次第に大きくなっていることがわかる．つまり，中国/香港において慢性的な空コンテナ不足が深刻化しており，大量の空コンテナの調達が必要となっていることがわかる．我が国では，逆に東航に比べて西航の方が多く，空コンテナが余っていることがわかる．また例えば，韓国をみると東航と西航が均衡しているようにみえるが，ある期間の時間断面では均衡とはならないので空コンテナの回送は必要である．

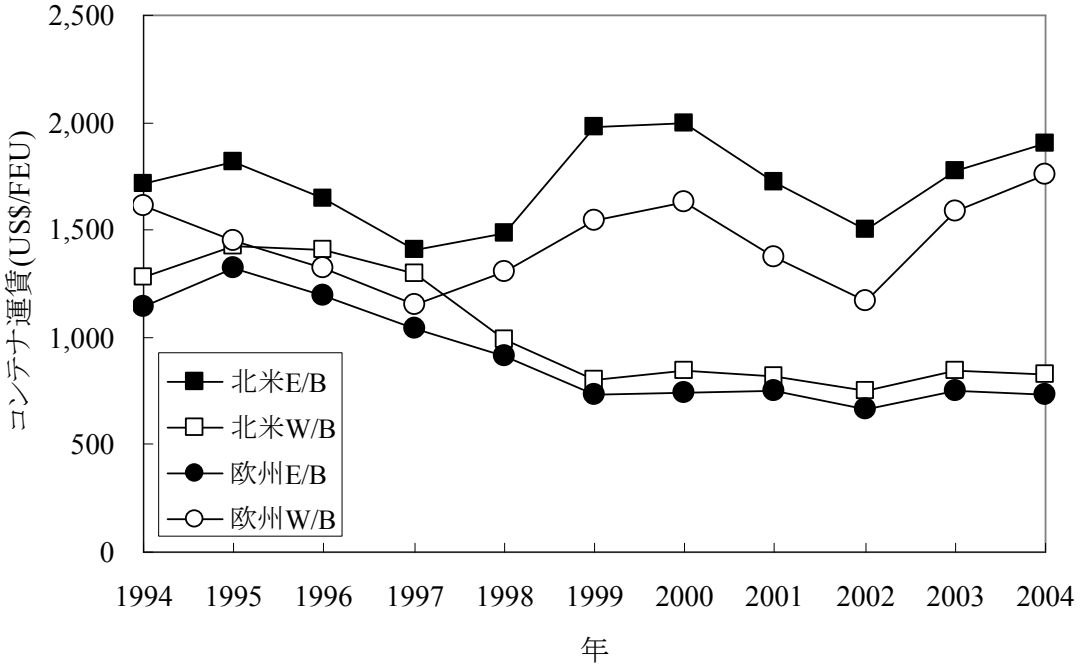


出典：国際輸送ハンドブック 2005年版 (文献15)を使用して著者が作成
注1) 空コンテナも含む
注2) E/Bは東航，W/Bは西航を意味する
注3) ASEAN5: シンガポール，タイ，フィリピン，インドネシア，マレーシア

図2.5 東アジア諸国の対北米貿易量の不均衡

2.7 運賃水準の推移

北米と欧州航路における年間を通じた平均運賃(1FEUあたり)の推移を図2.6に示す．両航路とも往復航の運賃格差が著しく大きい．UNCTADのレポート[16)]では往航運賃は復航の倍と報告されている．前節で述べたとおり，アジア地域から大量の貨物が北米と欧州向けに輸出されているのに対して，アジア向けの輸入量は輸出に比べて大幅に少ない．したがって，需給の関係から必然的にアジア向けの運賃は低くなる．現実問題として，往航と復航の輸送需要の格差を解消することは困難である．このインバランスの問題は，船社にとって空コンテナの回送費用を大きくし経営を圧迫している．船社にとっては，往復航間のインバランスの格差は直接的にコスト高を招くことになって深刻な課題である．また，このインバランスの問題は1国だけでは解決できない難しい問題である．その点で現在，効率的に空コンテナの回送の行える航路を如何に設計するかが問われている．



出典：国際輸送ハンドブック 2005年版 (文献15)を使用して著者が作成
注1) E/Bは東航，W/Bは西航を意味する
北米航路：東航=アジア→北米，西航=北米→アジア
欧州航路：東航=欧州→アジア，西航=アジア→欧州

図2.6 北米・欧州航路のコンテナ運賃推移(1FEUあたり)

2.8 本章のまとめ

本章では,我が国を含む東アジア諸国の主要港湾について,年間取扱実績,港湾諸料金および船社が提供するサービス水準を比較して,国際的に我が国主要港湾のハブ機能や国際競争力が低下していることを示した.さらに,コンテナ貨物の地方港湾への分散化傾向が進行していることを示し,国内においてもハブ機能が低下していることを述べた.

また,東アジア諸国の対北米貿易量の推移をみて,世界的な貿易不均衡が進行していることを示した.それによって船社は多数の空コンテナの回送を強いられており,往復航の運賃格差が大きくなっていることについて述べた.

第2章に関する参考文献

1) (社)日本港湾協会：数字でみる港湾 '98, 1998.
2) (社)日本港湾協会：数字でみる港湾 2001, 2001.
3) (社)日本港湾協会：数字でみる港湾 2002, 2002.
4) (社)日本港湾協会：数字でみる港湾 2003, 2003.
5) (社)日本港湾協会：数字でみる港湾 2004, 2004.
6) 日本内航海運組合連合会：外航コンテナの国内フィーダー促進に係る研究, 2003.
7) 国土交通省：平成14年度 大阪湾における広域港湾検討調査報告書, 2003.
8) 国土交通省：港湾統計 平成12年(年報), 2000.
9) 国土交通省：港湾統計 平成13年(年報), 2001.
10) 国土交通省：港湾統計 平成14年(年報), 2002.
11) 国土交通省：港湾統計 平成15年(年報), 2003.
12) 第1章, 文献3.
13) オーシャンコマース：2000年版 国際輸送ハンドブック, 1999.
14) オーシャンコマース：2004年版 国際輸送ハンドブック, 2003.
15) 第1章, 文献2.
16) UNCTAD: Review of Maritime Transport 2001, United Nations, 2001.

第3章　本研究に関連する既往の研究

3.1　概説

ここでは，本研究に関する既往の研究の文献レビューを行う．既往の研究の傾向および特徴を述べ，本研究の位置づけを示して，取り組もうとする問題を明確にする．

第3.2節では，荷主の選択行動を反映させた研究として，輸送機関分担および港湾の貨物需要予測に関するもの，第3.3節では船社の選択行動を反映させた研究として，航路計画および空コンテナの回送に関するものを挙げる．

3.2　輸送機関分担および港湾の貨物需要予測に関する研究

3.2.1　輸送機関分担に関する研究

これまで貨物輸送の機関分担や経路選択に関する研究は多数みられる．

松尾[1)]は，トラック輸送からフェリー輸送へのモーダルシフトについて，貨物の輸送距離と貨物の発地点からフェリーターミナルまでの距離，あるいはインターチェンジまでの距離に着目し，フェリーへの転換における距離の影響について判別分析を用いて考察している．

岡山ら[2)]は，阪神・四国間の貨物輸送を対象に，トラック事業者による連絡橋を利用したトラック輸送とフェリー輸送との経路選択行動について非集計ロジットモデルを適用して，フェリーの利用要因について分析している．

同様に，高田ら[3)]は，国内の貨物輸送におけるトラック輸送からフェリーへの転換について，運航ルート特性，輸送サービス特性，輸送機関の能力特性が関係すると仮定し，集計ロジットモデルを適用して荷主の経路選択要因について分析している．さらに，そのモデルを用いて高速貨物船の利用可能性について検討している．

家田ら[4)]は，地域間貨物輸送における鉄道，トラック，海上輸送の機関分担について，輸送の対象となる商品価格と流動ロットサイズに着目して，非集計モデルを適用している．

下條ら[5]は，地域間貨物輸送における陸上輸送と海上輸送の機関分担について，輸送コストに貨物の時間価値も付加し，犠牲量モデルを適用して分析を行っている．

以上の研究をまとめると，これらの研究は，①判別分析，②ロジットモデル，あるいは③犠牲量モデルを用いて，陸上輸送から海上輸送への転換可能性について検討している．これらは「輸送コスト」と「所要時間」を基本にして，「輸送頻度」，「商品価格」，「ロットサイズ」，「品目特有の要因」，「海上輸送特有の要因」等を組み込んだモデルを構築し，荷主の輸送機関選択行動や輸送機関の特性について一定の見識を得ている．

貨物輸送を交通ネットワークとしてみた場合，コンテナ流動は，利用者である荷主の条件と船社や輸送業者等の提供する交通ネットワークサービス条件との相互干渉の結果であると考えることができる．その干渉の中には，1つの経路に大量の貨物が集中して輸送容量が逼迫し，それにより混雑が発生して輸送コストが増加すること，逆に規模の経済性が働いて単位重量あたりの貨物輸送コストが減少することも含まれる．しかしながら，先に挙げた①～③の分析方法は，それらをモデル中に取り込むことが困難であることに加え，①と②は要因の抽出に大量のデータを必要とし，選択肢が多数となる場合は精度が落ちる．また，③は時間価値を推定するために大量のデータを必要とし，一定の時間価値に該当する貨物は必ず同じ経路を選択する結果となる．これらのことを踏まえると，本研究で取り扱う外貿コンテナ輸送のような広範囲にわたる貨物流動へ適用しようとすると制約は多い．

3.2.2 港湾の貨物需要予測に関する研究

本研究では，外貿コンテナ輸送をネットワーク均衡モデルとして捉え，荷主と，船社および輸送会社という2つの立場の当事者を均衡概念によって連結したモデルとして扱う．輸送コストと外貿コンテナの流動データから，各経路の貨物流動量の推定を行う．ここでいう輸送コストとは，荷主の手元から貿易相手国までの1TEU(Twenty foot Equivalent Unit, 20フィート換算個数)あたりの輸送コストを意味する．荷主は，経路の代替案の中でコスト最小となる経路を選択するので，貨物流動量はどの経路もコストが等しく，最小に

なるという均衡状態となっていく．そのときの流動量の配分を求める．この手法は，比較的少ない情報量と労力で大規模ネットワークを評価することが可能である [6]．

この種の研究で代表的なものとして，Frieszら [7]はアメリカ国内の鉄道と水路の混合ネットワークからなる貨物輸送において，荷主サブモデルと輸送会社サブモデルによりネットワークを区別して，それぞれの異なるネットワーク上の意思決定を連鎖的に扱っている．この研究はこの種の分野の先駆けとなっている．

さらに，木村 [8]は，荷主サブモデルとフィーダサービスを考慮した船社サブモデルを構築し，それらを均衡させて港湾のコンテナ貨物需要を推定している．

稲村ら [9] は，外貿コンテナ貨物の国内流動におけるフィーダ輸送のモデル化を貨物のロットサイズと価格に着目して行っている．そのモデルを東北6県-北米・欧州間の輸出入に適用し，本船積み港湾である東京・横浜までの輸送機関分担について分析している．その際，コンテナ船の大口ロット貨物の運賃割引と寄港頻度の増加が輸送機関分担と港湾の貨物需要に与える影響を分析している．

黒田ら [10] は，荷主と船社のコンテナ輸送市場におけるゲーム的，そして同時に需要と供給サイドである関係を分析し，その関係をゲーム上の先手後手の関係に見立てシュタッケルベルグ均衡モデルとして定式化を行っている．そのモデルを用いて，フィーダ港湾を整備した場合のいくつかのケースについて，外貿コンテナ貨物の国内流動パターンをシミュレーションし，その流動状況を分析して海上フィーダの可能性を検討している．

家田ら [11] は，日本国内の陸上および海上フィーダ輸送も含めた，国際コンテナ貨物流動モデルを構築している．そのモデルでは，船社の行動に対し，いくつかのネットワーク配分仮説を想定し，最も再現性のよいものを採用し，いくつかのケーススタディを行っている．

渡部ら [12] は，東アジアー北米西岸航路を対象に，日本を中心とした東アジア地域でのコンテナ貨物の流動状況を国・地域間といったマクロな視点で捉え，特にコンテナターミナル整備と船社の行動に着目し，その寄港地選択

を説明するモデルの構築を行い，国際コンテナ航路体系の分析を行っている．

Imaiら[13]は，東アジア地域発着の北米・欧州航路におけるハブ港湾立地問題を荷主のフィーダコスト最小化，船社の運航コスト最小化という2目的問題として定式化している．さらに，そのモデルを用いて超大型船が投入された場合のハブ港湾立地と航路ルートへの影響を考察している．

Osmanら[14]は，シンガポール経由で輸出されることの多い，マレーシアの輸出貨物が自国の港湾から直接輸出されるにはどのような港湾政策が必要であるのかを検討している．その分析には，荷主行動をロジットモデルで，船社行動をImaiらのモデルで表現し，それらを均衡させて港湾のコンテナ貨物需要を推定している．

本研究では，近年，外貿コンテナ輸送において，我が国主要港湾と近隣諸国主要港湾，および国内でのトラック輸送とフィーダ輸送という2つの競合を想定する．そのような状況のもとで，フィーダ輸送における運賃やサービス水準の変化が荷主の選択行動に与える影響を分析する．そのとき，多数存在する荷主は自己の輸送コストを非協力的に最小化する目的で経路選択行動を行うと仮定する．OD貨物量は与件であるという前提のもと，その行動を表現するためWardropの第1原則[15]を適用する．

3.3 航路計画および空コンテナの回送に関する研究

3.3.1 航路計画に関する研究

これまで船舶の配船ルートやスケジューリングに関する研究は多くなされてきており，それらの研究をほぼ網羅するレビュー論文はいくつか存在する[16)-18)]．この分野の研究は現時点において，タンカーやばら積み船を対象としたものが多いが，コンテナ船を対象としたもの[19)-31)]も決して少なくない．ここでは，コンテナ輸送に的を絞り，コンテナ船の配船ルート，航路パターンの決定や船型サイズ割当に焦点を当てた海外の研究を挙げることにする．

Laneら[19]は，計画期間中の既知の需要から，3段階によるアプローチで配船ルート，投入隻数，船種の組合せを決定する費用最小化モデルを提案して

いる．第1段階では，船が航行可能な寄港地と寄港順序を列挙し，第2段階では，ヒューリスティック解法による寄港地と寄港順序，および船種割当てを決定する．船種割当ての段階において，船の輸送容量と積み残しのトレード・オフの関係を機会損失コストとして考慮している．そして，港で積み残しが生じた場合は，チャータ船によりその貨物需要は満たされるとしている．最後の第3段階では，第2段階で決定した，いくつかの寄港地，寄港順序および船種の組合せでもって，すべての港の貨物需要を満足し，コスト最小となるものを見つけるために集合分割問題として定式化している．そのモデルをカナダーアメリカーオーストラリアの3国間のコンテナ輸送へ適用している．この種の問題を最適化問題として取り扱った研究ではごく初期のものの1つである．

Claessens[20]は，コンテナ船の輸送容量が不足して積み残しがあった場合，その積み残し分について機会損失コストを定義してコスト最小化モデルを開発している．そのモデルは，船社がすでに保有している3種類の船型サイズで構成される船隊を，特定された複数のルートへ割当てる問題を線形計画問題として定式化している．それによって，特定のルートにどの船型サイズの船を投入するのかということと，1ヶ月間の航海数が求まる．しかし，本来であれば整数計画問題であるところを線形計画問題として解を求めることの正当性について合理的根拠が示されていない．

Ranaら[21),22)]は，船社にとって利益とならない港には寄港しなくてもよいとする条件の下に，1隻もしくは複数隻のチャータ船を対象として船社の利益を最大化する航路パターン，航海数，寄港地間の輸送量を求めるモデルを構築している．寄港順序は往復航を分解して取り扱うことにより，往復航で非対称な航路パターンを表現することが可能となっている．このモデルは混合整数計画問題として定式化されている．その解法としてラグランジュ緩和法を採用した求解テクニックについても言及している．著者の知る限り，彼らのモデルは既往の研究の中では最も多様な航路パターンを評価できるものである．本論文の第5～7章の研究では彼らと同様な寄港順序の表現方法を採用しているが，彼らのモデルよりもさらに多くの航路パターンを評価することが可能となっている．

Perakisら[23]とJaramilloら[24]は，既存の船隊の年間運航コストを最小化する問題について線形計画法を用いて定式化している．具体的には，それによって所有船の特定ルートへの配置，傭船する船の隻数，種類および傭船期間，係船対象となる自社船の種類とその係船期間が求まる．また船種別の最適速力の決定は，主問題から分離して部分問題として扱われ，その具体的な計算方法について言及されている．彼らの研究は既往の研究の中で，最適速力について検討している極めて研究例の少ないものの1つである．モデルの適用事例として，自社船14隻，傭船5隻をもって7航路への割当てを検討している．

さらにPowellら[25]は，上記のPerakisらとJaramilloらの研究(線形計画問題)と同一の問題を整数計画問題として解を求め，それらを比較し考察している．整数計画問題として求解することにより，最適解が得られ，寄港頻度に関する制約もすべて満たしていることを明らかにしている．

Choら[26]は，船社の利益を最大化する，船のルートへの配置，寄港頻度，投入船は新造船かそれとも傭船かという選択等を決定できるモデルを構築している．そのモデルは，集合被覆問題を基本としたもので，目的関数や制約条件に新たな変数を付加することで，係船コストや投入船は新造船か傭船かという選択をも決定できるモデルに拡張できることを示している．しかし，具体的な数値シミュレーションがなされていないので，求解がどの程度困難であるのかは不明である．

Fagerholt[27]は，ノルウェー沿岸におけるコンテナ貨物のハブ・アンド・スポーク輸送を対象とし，ウィークリーサービスを提供できる，異なる船型サイズで構成されるフィーダ船の船隊規模とそれに対応する配船ルートを求めている．その問題は，複数トリップ・ビークル・ルーチング問題と同様の形態をとっている．その問題は船型サイズ毎に異なる固定費と燃料油費，港費からなる変動費を合算した総コストの最小化を目的として，集合分割問題として定式化されている．しかし，速力についてみると，どの船型サイズについても同一値をとると想定しているので，このモデルの汎用性を狭める結果となっている．また，ネットワーク問題としてハブ・アンド・スポーク輸送を想定しているものの，コンテナ貨物の輸送を明示的に扱っていないことから，コンテナ輸送固有の問題をさらに組み込む必要がある．

Bendallら[28]は，上述のFagerholtの研究と同様にハブ・アンド・スポーク輸送を対象とし，船社利益を最大化する投入隻数と配船計画を決定するモデルを提案している．さらにモデルの適用事例として，シンガポールをハブ港湾，フィーダ港を6港と想定して，フィーダサービスに高速船を投入したときに及ぼす影響について分析している．その際，コンテナの流動は明示的に扱われている．

一方，国内の研究では，アジア地域のハブ・アンド・スポーク輸送を対象としたものが多い．

大和ら[29]は，アジア地域を中心とした航路設計の初期段階での手法を検討している．さらに，航路形態を直行型，多港巡回型，ハブ・アンド・スポーク型の3つに分類し，形成された航路がどのように組み合わされているのかを考察している．具体的には，貨物の発生・集中および港の地理的な関係に注目し，船社コストを最小化する配船ルート，船型サイズ割当を非線形のフロー問題として定式化している．定式化された問題は求解が困難となることから，問題をいくつかの段階に分割し，それらの段階毎に制約条件を緩和して求解を行っている．そのとき，船がウィークリーサービスを提供すると想定しているが，運航スケジュールに関する制約は組み込まれていない．

黒川ら[30]は，東アジア地域におけるハブ港湾の立地，配船ルートや船型の割当を決定するモデルを混合整数計画問題として構築し，コンテナ船の大型化がハブ港湾の立地に与える影響も考察している．彼らは，これまで航路計画に空コンテナの回送が考慮されていないことに着目し，実入りコンテナと空コンテナの流動を分離して明示的に取り扱い，それらの流動経路や保有規模を求めるとともに，投入隻数や配船ルートも求めている．彼らの研究は，空コンテナの回送を明示的に取り扱っている研究の中で先駆的なものといえる．

Mursyid[31]らは，海上コンテナ輸送ネットワークにおけるハブ港湾の立地を検討している．その際，ハブ港湾に貨物を集積することによって規模の経済が働くとし，ハブ港湾での入出港費，港湾荷役費に対して，コンテナ流動量に応じた割引率を導入している．モデルの定式化は船社の仕出港から仕向港までの輸送コストを最小化する港間のコンテナ輸送量を求めるものとな

っている．そのときの輸送コストは，ハブ港湾を介した輸送コストとハブ港湾を介さない(直行)場合のコストを合算したものである．この問題について最適解を求めることは困難であることから，求解アルゴリズムにGAを採用して，ハブ港湾とそこに連結されるフィーダ港の最適な組合わせを探索している．しかし，定式化では港間の輸送量が決定変数となっていることから，定式化と求解アルゴリズムとの間に整合性がとれていない．

Imaiら[32]は，東アジア地域発着の北米・欧州航路におけるハブ港湾立地問題を荷主のフィーダコスト最小化，船社の運航コスト最小化という2目的の整数計画問題として定式化している．さらに，そのモデルを用いて超大型船が投入された場合のハブ港湾立地と航路ルートへの影響を考察している．荷主が港を使用する際の利便性の指標として，フィーダコストを考慮していることから，荷主と船社との競合を反映させたモデルとなっている．

黒田ら[33]は，アジア地域を対象として，今後パナマックス級のコンテナ船が投入された際に国際コンテナ輸送市場にもたらす影響について考察している．ここでは，船社の海上リンク運航コストの最小化と，荷主の利用者均衡状態を仮定した荷主自身が負担する輸送コストの最小化を数理計画問題として定式化を行っている．さらに，船社と荷主の選択行動を均衡させてリンク輸送量を求めている．複数の船型サイズの投入も表現することが可能となっていることから，コンテナ貨物の輸送形態を直行貨物(ハブ港湾を経由しない)，トランシップ貨物(ハブ港湾を経由)，通過貨物(ハブ港湾を通過)の3種に分類することができ，各ハブ港湾の機能も評価することができる．

以上をまとめると，海外の研究では既存船隊の再配置，投入隻数や船型サイズの割当に代表される配船計画に重点がおかれているものが多く，コンテナ貨物流動に注目したものは少ない．一方，国内の研究では，主にアジア諸国における我が国主要港湾のハブ機能の回復を検討するために，ハブ・アンド・スポーク輸送を対象にしたハブ港湾の立地を検討しているものが多い．したがって，分析対象地域は海外の研究に比べて広範となっている．

海外，国内の研究に共通していえることは，寄港地や寄港順序の決定に関するものは少ないことである．さらに，貨物需要として実入りコンテナだけでなく空コンテナを与えているものは極めて少ないことである．現実問題で

は輸出入量に大きくインバランスの生じている港は多数存在する.船社は空コンテナの回送費用の面から考えて,空コンテナの回送が効率的に行えない港を寄港地から除外せざるえを得なくなることから,空コンテナの流動も考慮した船社の選択行動を表現できるモデルの構築が必要である．また現在,本船による空コンテナの効率的な回送が求められていることを考えると,船社が多様な航路パターンの代替案を評価することができれば,新たな航路戦略を立案することが可能となる.既存のコンテナ船の運航頻度をみると,そのほとんどがウィークリーサービスを提供している.定期船であるコンテナ船にあっては,スケジュールは厳しい制約であるにも関わらず,既往の研究ではそのスケジュールを満足する航路パターンを形成できるものは極めて少ない.

したがって,①本船の余席スペースを使った空コンテナの回送,②多様な航路パターンの評価,③ウィークリーサービスの提供,この3つを考慮した航路計画を検討できるモデルを構築する必要があると考える.

次に空コンテナの回送を目的とした既往の研究を挙げる.

3.3.2　空コンテナの回送に関する研究

空コンテナの回送に関する研究では,Gavish [34]は容易に空コンテナの回送に応用することができる,トラックのフリート管理のための決定支援システムを開発している.この研究では,自社所有トラックもしくはリーストラックは限界費用の大小による優先度にもとづいて需要地点に配置される.

Crainicら [35]は，リースコンテナの配置と空コンテナの回送を検討している.彼らは,長期リースコンテナのコストはリース期間に依存しないものと定義し,自社コンテナと同等なものと考えている.それは一旦,リースされたら,使用の有無に関わらずリースコストは必要であるという考えによるものである.

さらに，上に挙げた2つの研究では長期リースのみを考慮していたが,Cheungら [36]は，短期リースも考慮している．彼らは，すべての輸送需要を満足させるという条件の下,自社所有コンテナおよびリースコンテナの配置問題に対して,確率的モデルを開発している.そのモデルは,リースコスト

をリース期間に依存しないものと定義しているが,長期リースと短期リースを区別している.

三木ら[37]は，日本と北米との輸出入における本船による空コンテナの回送も組み込んだネットワークを想定し,予測された将来の輸送需要に合致する必要コンテナ数を決定するコンテナ･フリートサイズ計画問題を扱っている．しかし，海上輸送部分では既存の航路を与件としていることから，航路計画は組み込まれていない．Imaiら[38]は，三木らの問題を冷凍コンテナのフリートサイズ計画問題に拡張している.

Choongら[39]は，長期および短期リースされたコンテナの回送について，整数計画問題の定式化を行っている．しかしながら，短期リースコンテナを対象としているものの,そのリースコストはリース期間に依存しないことを仮定していることから適切でない.

ここまでに挙げた研究は，広範囲にわたるコンテナの流通を扱っている．これらとは対照的に，下に挙げるごく最近の2つの研究では，特定の港の背後圏における空コンテナの回送に焦点をあてている.

Liら[40]は，港における余剰コンテナを削減させるための空コンテナの回送を扱っている．彼らは，一般的な保有コスト関数を用いて正負の需要による標準的でないインベントリ問題を考慮している.

Julaら[41]は,ロサンゼルスーロングビーチ間の交通渋滞を解消させるために空コンテナの再利用を検討している.荷受人から荷送人への空コンテナの受け渡しに,インランドデポを介すか否かという判断を含めた空コンテナの移動を最適化するための定式化を行っている.

第3.2節で挙げた既往の研究を概観すると，航路計画と空コンテナの回送は統合した問題として扱ったものは極めて少ないことがわかる.このことに鑑み,本研究では実入りコンテナと空コンテナの輸送を明示的に取り扱った航路計画を検討する．具体的には，単一航路を対象に本船の余席スペースを使って寄港地の空コンテナの過不足を調整できない場合にその補填にかかる費用をペナルティコストと定義し,船社の利益を最大とする航路パターンを決定するための手法を構築する．さらに，空コンテナの回送が航路を形成する上でどのような影響を及ぼすのかを分析するため,本手法を東南アジア

航路へ適用して考察を加える.

3.4 本章のまとめ

本章では，荷主と船社の選択行動に関する既往の研究について4つに分類し，文献レビューを行った．それによって，第4章の研究で扱う大規模ネットワークにおける荷主の選択行動をネットワーク均衡モデルとして表現する正当性および必要性を示した．さらに，これまで航路計画と空コンテナの回送は統合した問題として扱った研究は極めて少ないことを示した.それによって第5～7章の研究では,本船の余席スペースを使った空コンテナの回送,多様な航路パターンの評価，ウィークリーサービスの提供，この3つを考慮した航路計画を検討できるモデルを構築する必要があることについても述べた.

第3章の参考文献

1) 松尾俊彦：フェリーを活用したトラック輸送のモーダルシフトに関する研究, 東京商船大学学位論文, 2002.
2) 岡山正人, 小谷通泰：経営環境変化を考慮したトラックによる経路選択モデルの構築とフェリーへのモーダルシフトに関する研究, 日本航海学会論文集, 第107号, pp.1-12. 2002.
3) 高田裕己, 渡辺豊, 山田猛敏:海上貨物輸送機関の利用特性に関する研究, 土木計画学研究･講演集, No.15(1), pp.623-628, 1992.
4) 家田仁, 佐野可寸志, 小林伸司:商品価格と流動ロットに着目した都市間貨物輸送機関分担モデル, 土木学会論文集, No.548, IV-33, pp.1-10, 1996.
5) 下條哲司, 西下容史, 高橋稔治：貨物流の海上移転に関する基礎研究,海事産業研究所報, No.367, pp.7-23, 1997.
6) 土木学会土木計画学研究委員会：交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-, 1998.
7) Friesz, T. L., Gottfried, J. A., Morlok, E. K., A Sequential Shipper-Carrier Network Model for Predicting Fright Flows, Transportation Science, Vol.20, No.2, pp.80-91, 1986.
8) 木村東一：外貿港湾選択評価手法とその応用に関する研究, 京都大学学位論文, 1985.
9) 稲村肇, 中村匡宏, 具滋永:海上フィーダー輸送を考慮した外貿コンテナ貨物の需要予測モデル, 土木学会論文集, No.562, IV-35, pp.133-140, 1997.
10) 黒田勝彦, 楊賛, 竹林幹雄:フィーダーサービスによるコンテナ貨物流動分析,土木計画学･研究論文集, No.14, pp.551-558, 1997.
11) 家田仁, 柴崎隆一, 内藤智樹:日本の国内輸送も取り込んだアジア圏国際コンテナ貨物流動モデル, 土木計画学研究･論文集, No.16, pp.731-741, 1999.
12) 渡部富博, 善見政和, 石橋宏典:船社の寄港挙動モデルによる国際コンテナ航路体系の分析, 土木計画学研究･論文集, No.16, 743-752, 1999.

13) Imai, A., Papadimitriou, S., A Containerized Liner Routing in Eastern Asia, Infrastructure Planning Review, JSCE, No.14, pp.843- 850, 1997.

14) Osman, M. A., Ishiguro, K., Inamura, H., Container Port Location Strategy Based on Domestic Port Choice Modeling and Optimal Liner Routing Approach, Infrastructure Planning Review, JSCE, No.16, pp.627-636, 1999.

15) Wardrop, J. G., Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, Proceedings of the Institute of Civil Engineers Part II, pp.325-378, 1952.

16) Ronen, D., Cargo Ships Routing and Scheduling: Survey of Models and Problems, European Journal of Operations Research 12, pp.119-126, 1983.

17) Ronen, D., Ship Scheduling: The Last Decade, European Journal of Operations Research 71, pp.325-333, 1993.

18) Christiansen, M., Fagerholt, K., Ronen, D., Ship Routing and Scheduling: Status and Perspective, Transportation Science 38 (1), pp.1-18, 2004.

19) Lane, T., Heaver, T. D., Uyeno, D., Planning and Scheduling for Efficiency in Liner Shipping, Maritime Policy and Management 14 (2), pp.109-125, 1987.

20) Claessens, E. M., Optimization Procedure in Maritime Fleet Management, Maritime Policy and Management 14 (1), pp.27-48, 1987.

21) Rana, K., Vickson, R. G., A model and Solution Algorithm for Optimal Routing of a Time-Chartered Containership, Transportation Science 22 (2), pp.83-95, 1988.

22) Rana, K., Vickson, R. G., Routing Container Ships Using Lagrangean Relaxation and Decomposition, Transportation Science 25 (3), pp.201-214, 1991.

23) Perakis, A. N., Jaramillo, D. I., Fleet Deployment Optimization for Liner Shipping Part 1. Background, Problem Formulation and Solution Approaches, Maritime Policy and Management 18 (3), pp.183-200, 1991.

24) Jaramillo, D. I., Perakis, A. N., Fleet Deployment Optimization for Liner Shipping Part 2. Implementation and results, Maritime Policy and Management 18 (4), pp.235-262, 1991.

25) Powell, B. J., Perakis, A. N., Fleet deployment optimization for liner shippin:

an integer programming model, Maritime Policy and Management 24 (2), pp.183-192, 1997.

26) Cho, S-C., Perakis, A. N., Optimal Liner Fleet Routing Strategies, Maritime Policy and Management 23 (3), pp.249-259, 1996.

27) Fagerholt, K., Optimal Fleet Design in A Ship Routing Problem, International Transactions in Operational Research 6 (5), pp.453-464, 1999.

28) Bendall, H. B., Stent, A. F., A Scheduling Model for A High Speed Containership Service: A Hub and Spoke Short-Sea Application, International Journal of Maritime Economics 3, pp.262-277, 2001.

29) 大和裕幸, 角田智宏, 小山健夫, 伏見彬：数理計画手法によるコンテナ船航路の計画手法について, 日本造船学会論文集, 第184号, pp.607-615, 1998.

30) 黒川久幸, 鶴田三郎, 嶋邦彦: 海上コンテナ輸送ネットワークの設計に関する研究, 日本航海学会論文集, 第101号, pp.259-269, 1999.

31) Mursyid, H., 小瀬邦治, 安川宏紀, 佐野将昭：遺伝アルゴリズムを用いた海上輸送ネットワーク解析, 日本造船学会論文集, 第195号, pp.71-78, 2004.

32) 前掲, 文献13.

33) 黒田勝彦, 竹林幹雄, 武藤雅浩, 大久保岳史：ポストパナマックス級コンテナ船導入が外航コンテナ貨物輸送市場に与える影響分析, 土木学会論文集, No.667 IV-50, pp.123-136, 2001.

34) Gavish, B., A decision support system for managing the transportation needs of a large corporation, AIIE Transactions 13, pp.61-85, 1981.

35) Crainic, T. G., Gendreau, M., Dejax, P., Dynamic and stochastic models for the allocation of empty containers, Operations Research 41, pp.102-126, 1993.

36) Cheung, R. K., Chen, C., A two-stage stochastic network model and solution methods for the dynamic empty container allocation problem, Transportation Science 32, pp.142-162, 1998.

37) 三木楯彦, 今井昭夫: 国際海上コンテナの運用に関する考察, 日本航海学会論文集, 第78号, pp.103-111, 1988.

38) Imai, A., Rivera, F., Strategic Fleet Size Planning for Maritime Refrigerated Containers, Maritime Policy and Management 28 (4), pp.361-374, 2001.

39) Choong, S. T., Cole, M. H., Kutanoglu, E., Empty container management for intermodal transportation networks, Transportation Research E 38, pp.423-438, 2002.

40) Li, J.-A., Liu, K., Leung, S. C. H., Lai, K. K., Empty container management in a port with long-run average criterion, Mathematical and Computer Modelling 40, pp.85-100, 2004.

41) Jula, H., Chassikos, A., Ioannou, P., Port dynamic empty container reuse, Transportation Research Part E. (in press)

第4章 近隣諸国港湾の中継を考慮した国内発着のコンテナ貨物の流動分析に関する研究 [1)]

4.1 概説

本章では，国内発着の国際コンテナ輸送において，フィーダサービスの運賃とサービス水準が改善された場合に，荷主の選択行動にどのような影響を与えるのかを分析し，その選択結果が我が国主要港湾およびフィーダサービスの利用を促す効果があるのかを検討する．具体的には，フィーダサービスの運賃とサービス水準を変化させて，いくつかのケーススタディを行う．そのとき，我が国を含めたアジア地域の主要港湾の取扱貨物量と国内のフィーダ輸送量を推計し，その増減でもってシフト効果を評価する．

第4.2節では，利用者均衡配分原則にもとづくコスト関数について述べる．続いて，第4.3節では第4.2節で定義したコスト関数を用いて利用者均衡モデルの定式化と解法について述べる．第4.4節では，取り扱う問題においてコンテナ流動や運賃等の必要データの入手には限界があることから，入手可能なデータをもとにしたデータ加工について述べる．第4.5節では，構築したモデルの再現性について述べた後，いくつかのケーススタディを行う．

4.2 コスト関数の定式化

4.2.1 モデルの基本的な考え方

仕出地で生産されたコンテナ貨物が仕向地へ向けて輸出される際，荷主は本船積み港湾とそこまでの輸送経路(輸送手段)を決定する．ここでは本船積み港湾として，国内主要港湾と地方港湾，そして近隣諸国のハブ港湾を対象とする．輸送経路は，国内輸送部分ではトラック輸送とフィーダ輸送を，国際輸送部分では国内主要港湾や地方港湾を経由した本船輸送や近隣諸国主要港湾を経由した外航フィーダ輸送を対象とする．

船社や輸送業者の行動を考えるならば，第3.2.2節に挙げた研究のように利潤最大化(OD需要量は一定であるから費用最小化に等しい)を目的としたサ

ブネットワークを想定するべきである.本研究ではフィーダ輸送における運賃やサービス水準の変化が荷主の選択行動に与える影響に注目することから,大規模で複雑なモデル構築は避ける必要がある.一般的に船社は運航スケジュールを一旦公表した後は,運航コストが最小とならなくても,通常,一定期間中は運航を続けるという実態を考慮し,船社や輸送業者が提供する輸送コストやサービス水準である寄港頻度等は与件とする.

ここで,

① 1TEUにつき1人の荷主であること.
② すべての荷主は総輸送コストを非協力的に最小化する.
③ 荷主は常に利用する経路に関する完全な情報を持っている.

という3つの仮定を設けると,本問題は荷主の選択行動の結果としてのコンテナ貨物流動を利用者均衡(User Equilibrium, UE)モデルとして表現することができる.

①については,1TEU単位に荷主があるとし,それが経済主体として経路選択を行うこととする.②は①の荷主が互いに市場に対して影響力を行使できないとした場合に相当する.つまり,例えば,多数の荷主がフィーダ輸送を選択することによって,規模の経済が働いて運賃が安くなるとはわかっていても,荷主同士の協力関係もしくは他からの外力がなければ,それを実現しようとするインセンティブが働かないことを意味する.文献2では,この現象はn人非協力ゲームとして表現できることが紹介されている.③については,荷主は常に使用しようとする経路のコストやサービス水準等の完全情報を持っており,経済合理性のもとで選択行動を行うことを意味する.つまり,荷主は必ず自己の負担するコストを最小化する経路を選択するものとする.

4.2.2 コンテナ輸送のネットワーク表現

本研究で想定するコンテナ流動パターンを図4.1に示す.このネットワークは,ノードとそれらを結ぶ有向リンクにより構成される.例えば輸出の場

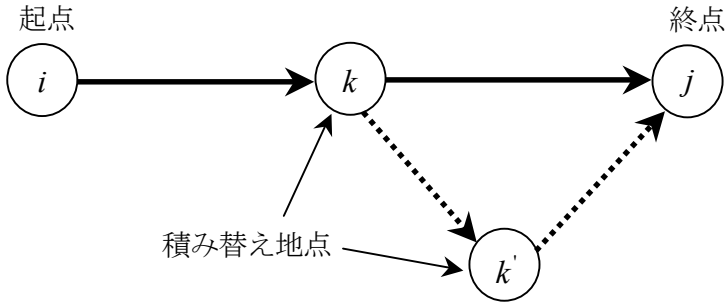


図4.1 OD間のコンテナ輸送ネットワーク

合，ゾーンiの仕出地から自国内の本船積み港湾kへ直接トラックで持ち込み，仕向地(仕向港)jまで輸送するパターン(以下，直行と呼ぶ)と，ゾーンiから最寄り港湾kを経て自国主要港湾もしくは近隣諸国ハブ港湾k'で本船に積み替え，仕向地(仕向港)jまで輸送するパターン(以下，中継と呼ぶ)に2分できる．仕出地から仕向地までの輸送において，その途中に通過するノードを順に並べた集合を経路と呼ぶ．中継の場合の経路は$(i-k-k'-j)$となる．一方，直行の場合は$(i-k-j)$となって中継港k'は通らない．

4.2.3 コスト関数

総輸送コストは，荷主が支払う「金銭的輸送コスト」と，輸送時間と待機時間を合算した所要時間と，貨物の時間価値を乗じた「時間的コスト」の和で表現される．ここでは，ネットワークの状態を表す変数の値が時間によらず一定であるとした状態を想定する．すなわち，OD貨物量は外生的に与件であるとして，経路貨物量を求めるモデルを扱う．

本研究では利用者均衡配分の原則をもとにOD貨物量を与件とし，各経路の均衡貨物量を求める．ここでは，コスト関数の定式化を行い，第4.3節で利用者均衡モデルの定式化と解法について述べる．

4.2.4 リンクコストの特性

リンクは，付与されたリンクコストの特性によって，a) Flow Independent, b) Flow Dependent の2つに大別される．a)はリンクコストがフローに関係なく一定としたものであり，b)は混雑現象を考慮してコスト関数にフローを組

み込んだものである.図4.1中の$k-j$間,$k-k'$間および$k'-j$間のリンクをFlow Dependentとし,それ以外のリンクはFlow Independentとする.Flow Dependentのリンクコスト関数は,フローがそのリンク容量に接近する,あるいは超過すると,輸送コストが急激に上昇することを表現している.

4.2.5 リンクコスト関数の定式化

本研究でいうところの総輸送コストは,(1)輸送コスト,(2)金利損失コスト,(3)荷役コストの和でもって表現される.したがって,荷主は利用可能な各経路における輸送コスト,時間損失コスト,荷役コストの3つを合算した1TEU当たりの総輸送コストを比較して選択行動を行うことになる.

(1) 輸送コスト

発地ゾーンi,自国港湾k,中継港湾k',着地ゾーンjとしたときの1TEUあたりの輸送コストを以下のように定義する.

$$C_{ij}^{1} = T_{ik} + C_{kj}\cdot\exp\left(-a_{kj}\cdot q_{kj}\right)\cdot\delta_{ikk'j}^{D} + \left\{C_{kk'}\cdot\exp\left(-a_{kk'}\cdot q_{kk'}\right) + C_{k'j}\cdot\exp\left(-a_{k'j}\cdot q_{k'j}\right)\right\}\cdot\left(1-\delta_{ikk'j}^{D}\right) \tag{4-1}$$

ただし,

$$T_{ik} = T_{ik}^{L} d_{ik}^{L} + T_{ik}^{H} d_{ik}^{H} + toll_{ik} \tag{4-2}$$

ここで,

C_{ij}^{1} : 輸送コスト (円/TEU)
T_{ik} : $i-k$間のトラック運賃 (円/TEU)
T_{ik}^{L} : $i-k$間の一般道路のトラック運賃係数 (円/TEU･km)
T_{ik}^{H} : $i-k$間の高速道路のトラック運賃係数 (円/TEU･km)
$toll_{ik}$: $i-k$間の高速道路料金 (円/TEU)
C_{kj} : $k-j$間のフィーダ船運賃係数 (円/TEU)
$C_{kk'}$: $k-k'$間のフィーダ運賃係数 (円/TEU)
$C_{k'j}$: $k'-j$間のコンテナ船運賃係数 (円/TEU)
a_{kj} : $k-j$間の割引率に関する係数
$a_{kk'}$: $k-k'$間の割引率に関する係数
$a_{k'j}$: $k'-j$間の割引率に関する係数
q_{kj} : $k-j$間の輸送量 (TEU)

$q_{kk'}$ ：$k-k'$間の輸送量 (TEU)

$q_{k'j}$ ：$k'-j$間の輸送量 (TEU)

$\delta^D_{ikk'j}$ ：直行のとき1，中継のとき0の値をとる

輸送コストを表す式(4-1)の右辺は，仕出地から港までのトラック運賃，直行の場合の海上輸送コスト，中継の場合の海上輸送コストを合算したものとなる．式(4-2)ではトラック輸送は一般道路および高速道路が使用され，燃料費や高速料金を合算したものをトラック運賃と定義している．

(2) 金利損失コスト

$$C^2_{ij} = pc_i \cdot r \cdot t_{ij} \cdot \left[1+\alpha \cdot \left\{ \frac{q_{kj}}{CC_{kj}} \cdot \delta^D_{ikk'j} + \frac{q_{kk'}}{CC_{kk'}} \cdot \left(1-\delta^D_{ikk'j}\right) \right\}^{\beta} \right] \tag{4-3}$$

ただし，

$$t_{ij} = t^1_{ij} + t^2_{ij} + t^3_{ij} \tag{4-4}$$

直行の場合：$t^1_{ij} = \dfrac{1}{2Y_{kj}}$ (4-5)

$$t^2_{ij} = \frac{d_{kj}}{v_{kj}} \tag{4-6}$$

$$t^3_{ij} = \frac{d^L_{ik}}{v^L_{ik}} + \frac{d^H_{ik}}{v^H_{ik}} \tag{4-7}$$

中継の場合：$t^1_{ij} = \dfrac{1}{2Y_{kk'}} + \dfrac{1}{2Y_{k'j}}$ (4-8)

$$t^2_{ij} = \frac{d_{kk'}}{v_{kk'}} + \frac{d_{k'j}}{v_{k'j}} \tag{4-9}$$

$$t^3_{ij} = \frac{d^L_{ik}}{v^L_{ik}} + \frac{d^H_{ik}}{v^H_{ik}} \tag{4-10}$$

ここで，

C^2_{ij} ：金利損失コスト (円/TEU)

pc_i ：発地ゾーンiの平均貨物単価 (円/TEU)

r ：金利率

CC_{kj} ：$k-j$間の輸送容量 (TEU)

$CC_{kk'}$: $k-k'$間の輸送容量 (TEU)
t_{ij} : コンテナ1TEUあたりの総輸送時間 (時間)
t_{ij}^1 : 平均船待ち時間 (時間)
t_{ij}^2 : 海上輸送時間 (時間)
t_{ij}^3 : 陸上輸送時間 (時間)
α, β : リンクの混雑状況を表すパラメータ(α, β>0)
Y_{kj} : $k-j$間のコンテナ船寄港頻度 (隻/時間)
$Y_{kk'}$: $k-k'$間のコンテナ船寄港頻度 (隻/時間)
$Y_{k'j}$: $k'-j$間のコンテナ船寄港頻度 (隻/時間)
d_{kj} : $k-j$間の航海距離 (km)
$d_{kk'}$: $k-k'$間の航海距離 (km)
$d_{k'j}$: $k'-j$間の航海距離 (km)
v_{kj} : $k-j$間の航海速度 (km/時間)
$v_{kk'}$: $k-k'$間の航海速度 (km/時間)
$v_{k'j}$: $k'-j$間の航海速度 (km/時間)
d_{ik}^L : $i-k$間の一般道路距離 (km)
d_{ik}^H : $i-k$間の高速道路距離 (km)
v_{ik}^L : $i-k$間の一般道路速度 (km/時間)
v_{ik}^H : $i-k$間の高速道路速度 (km/時間)

式(4-3)は輸送時間と待機時間を合算した所要時間と貨物の時間価値を乗じた時間損失コストを定義している．貨物の時間価値は仕出地iにおける1TEUあたりの貨物単価の平均値とした．大カッコ内は規模の経済を反映したコストの割引率を導入している．それと同時に，リンク輸送量が増えることによって混雑が発生することも表現している．ここでは，港での混雑を海上リンクの混雑に置き換えて表現している．海上輸送における混雑は，海上リンクというよりはむしろ港で発生すると考えられる．港はノードとリンクで構成されるネットワークでいうとノードにあたる．しかし，サービス・パフォーマンスをノード上で表現することはできないので，港での混雑をリンク上で表現する必要がある．これに対しては，港の混雑を直接的に表すことのできるリンクを設ければよい．しかしながら，新たにリンクを付加することによって急速に問題の規模が大きくなり，計算の困難さが急速に増加することから，それを避けるために港の混雑を海上リンクでもって表現することとした．なお，式(4-3)中にリンク$k'-j$に関する混雑は考慮していない．そ

の理由は，リンク$k'-j$はメインラインで輸送容量が十分確保できると仮定しているためである．α,βは混雑パラメータを表す．これらのパラメータは海上リンクのフローの実測値と計算値との差の平方和が一番小さくなる数値をとる．金利率rについては，データの入手が困難であったので，文献2で設定されている値を用いて年利15%とする．なお，海上輸送コストの割引率は最大で2割とする．$a_{kj}, a_{kk'}, a_{k'j}$は，当該リンクの輸送容量に対応した数値である．式(4-4)はコンテナ1TEUあたりの総輸送時間が平均船待ち時間，海上輸送時間，陸上輸送時間によって定義されることを示している．

(3) 荷役コスト

$$C_{ij}^{3}=\left(H_{k}+H_{k}^{T}\right)+2\left(H_{k'}+H_{k'}^{T}\right)\cdot\left(1-\delta_{ikk'j}^{D}\right) \tag{4-11}$$

ここで，

C_{ij}^{3} ：荷役コスト (円/TEU)

H_{k} ：k港の荷役コスト係数 (円/TEU)

$H_{k'}$ ：k'港の荷役コスト係数 (円/TEU)

H_{k}^{T} ：k港の荷役時間コスト (円/ TEU)

$H_{k'}^{T}$ ：k'港の荷役時間コスト (円/ TEU)

式(4-11)は荷役コストの実費と荷役に関する待ち時間コストを合算して荷役コストと定義している．右辺の第2項は中継に関するもので，中継での場合は積み替えを伴うので，荷役コストは2倍と計算される．荷役時間は港によって差はないと仮定するので$H_{k}^{T}, H_{k'}^{T}$は一律に与件とする．

4.2.6 分析対象範囲

構築したモデルは，基本的には我が国発着のみならず，広範囲にわたる国際間の貨物流動をも表現することが可能である．例えば，我が国主要港湾において港湾料金政策が行われると想定した場合，地方港湾から近隣諸国主要港湾へトランシップされる貨物や他国から近隣諸国主要港湾へトランシップされる貨物が，我が国主要港湾へどのくらいの量がシフトするのかといった予測を行うことも可能である．しかしながら，アジア地域においてはコンテナ貨物流動に関するデータの整備は遅れている．またデータが存在してい

たとしても公開されていないケースも少なくない．したがって，分析に耐え得るデータの入手は困難であり，そのため，本研究では我が国発着で欧州，北米方面の輸出入を対象とする．

ノードは以下のように定義する．

(a) 発地ゾーン：各都道府県 (47)

(b) 着地ゾーン：欧州，北米航路を代表する各1港 (2)

(c) 国内港湾：地方港湾+国内主要港湾 (49)

(d) 中継港：国内主要港湾+近隣諸国主要港湾 (12)

注)：輸入の場合は発ゾーンと着ゾーンは逆になる．カッコ内はノード数を表す．

4.3 解法

4.3.1 利用者均衡モデルの定式化 [3)]

例えば，いま，想定しているコンテナ輸送ネットワークが利用者均衡状態にあるとすると，それぞれの荷主は自分にとって最も輸送コストの小さい経路を選択する．その結果として，起終点間に存在する経路のうち，利用される経路の輸送コストは皆同じく，利用されない経路の輸送コストよりも小さいかせいぜい等しいという均衡状態となる．この現象は，Wordropの利用者均衡モデルとして次のように定式化される．

$$f_{ij}^{k} > 0 \quad \text{のとき} \quad C_{ij}^{k} = C_{ij} \qquad \forall k \in K_{ij},\ \forall ij \in \Omega \tag{4-12}$$

$$f_{ij}^{k} = 0 \quad \text{のとき} \quad C_{ij}^{k} > C_{ij} \qquad \forall k \in K_{ij},\ \forall ij \in \Omega \tag{4-13}$$

subject to

$$\sum_{k \in K_{ij}} f_{ij}^{k} - Q_{ij} = 0 \qquad \forall ij \in \Omega \tag{4-14}$$

$$f_{ij}^{k} \geq 0 \qquad \forall k \in K_{ij},\ ij \in \Omega \tag{4-15}$$

ここで，

f_{ij}^{k}　：ODペア$i-j$間の第k経路の経路輸送量

C_{ij}^{k}　：ODペア$i-j$間の第k経路の輸送コスト

C_{ij}　：ODペア$i-j$間の最小輸送コスト

Q_{ij}　：ODペア$i-j$間の輸送量

Ω　：ODノード$i-j$の集合

K_{ij}　：ODペア$i-j$間の経路の集合

ここで，ODペア$i-j$間の最小輸送コストC_{ij}は，OD輸送量，ネットワークおよびリンクの輸送コスト関数が与えられると，各OD間に一意に与えられる定数となる．式(4-1)，式(4-2)は利用される経路($f_{ij}^{k}>0$となる経路)の輸送コストC_{ij}^{k}は，C_{ij}に皆等しく，利用されない経路($f_{ij}^{k}=0$となる経路)の輸送コストよりも小さいかせいぜい等しいという利用者均衡配分の条件を表している．式(4-14)は経路に関するフローの保存則を表している．したがって，利用者均衡配分とは上式の条件を満たしたときに配分輸送量(経路輸送量)を得ることになる．

4.3.2　等価な最適化問題への変換 [3)]

上式は現実規模のネットワークにおいてその解を得ることは非常に困難である．その状況において利用者均衡配分の定義を非線形最適化問題(凸計画問題)として次式のように置き換えることができる．

$$Minimize\ Z_p=\sum_{a\in A}\int_0^{x_a}c_a(\omega)d\omega \tag{4-16}$$

subject to

$$\sum_{k\in K_{ij}}f_{ij}^{k}-Q_{ij}=0 \qquad \forall ij\in\Omega \tag{4-17}$$

$$x_a=\sum_{k\in K_{ij}}\sum_{ij\in\Omega}\delta_{ij}^{a,k}f_{ij}^{k} \qquad \forall a\in A \tag{4-18}$$

$$f_{ij}^{k}\geq 0,\ x_a\geq 0 \tag{4-19}$$

ただし，

$$C_{ij}^{k} = \sum_{a \in A} \delta_{ij}^{a,k} c_a(x_a) \qquad \forall k \in K_{ij},\ \forall ij \in \Omega \tag{4-20}$$

ここで,

c_a　：リンク a のリンクコスト関数

x_a　：リンク a のリンク輸送量

$\delta_{ij}^{a,k}$　：ODペア $i-j$ 間の第 k 経路がリンク a を含むとき1，そうでないとき0の値をとる

A　：リンク a の集合

上記の最適化問題は，式(4-12)～(4-15)を式(4-16)のように目的関数を持つ最小化問題に置き換えたものとなる．式(4-18)はリンクフローの保存則を表している．

4.3.3　Frank-Wolfe法による最適化計算 [3)]

第4.3.2項の最適化問題の求解にはFrank-Wolfe法を用いる．Frank-Wolfe法はリンク輸送量ベクトルをベースとして繰り返し計算によって最適解を探索するため，列挙した経路を記憶しておく必要がない．また，計算プログラムの作成は簡単であるという特徴を有しているため，利用者均衡モデルの求解アルゴリズムとして多用されている．第4.2.5項で定式化した，荷主が負担する1TEUあたりの総輸送コストの関数は，式(4-16)中の $c_a(\cdot)$ に該当する．したがって，その関数をリンクフロー変数について定積分し，すべてのリンクについて合計したものを目的関数とすることになる．

アルゴリズムの考え方および手順は次のようになる．

目的関数が図4.2のような凸形状をした非線形最適化問題であった場合，利用可能な情報は，①ある点における目的関数の勾配状況，②目的関数から必ず最適解が見つかるという数学的証明，③実行解である2点を結んだ線上の点はすべて実行可能解となる，という3つである．

これらの情報によって最適解を求めるために，ほとんどの凸計画問題のアルゴリズムではまず，現在与えられている点における目的関数の勾配から

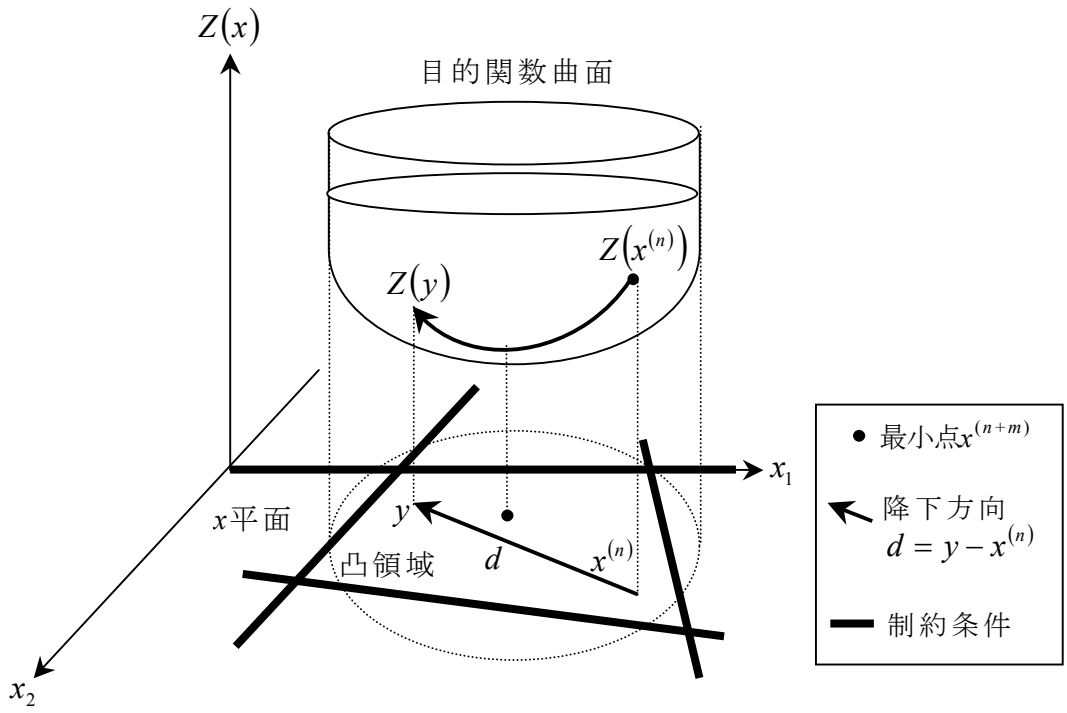


図4.2 制約条件と方向ベクトル(x-y)と目的関数上の動き

どの方向に向かえば目的関数を降下させることができるか(ステップA), どれだけ進めるかを決める(ステップB), という2段階の作業を繰り返すことによって最小値を見つけることができる.

STEP1：初期実行解の設定

収束回数$n=1$として初期実行可能解となるリンク輸送量$\{x_a^{(n)}\}$を与える.

STEP 2：リンクコストの更新

$\{x_a^{(n)}\}$に対するリンクコスト$\{c_a(x_a^{(n)})\}$を計算する.

STEP 3：降下方向の探索

最小輸送コストの探索によって各OD間の最小輸送コストを求める. その最小輸送コストに各OD間の全貨物量を負荷するall-or-nothing法により$\{y_a\}$を求める.

STEP 4：一次元探索

$x_a^{(n+1)} = \alpha y_a + (1-\alpha) x_a^{(n)}$ とおく．$\{y_a\}$ と $\{x_a^{(n)}\}$ は定数なので，目的関数式(4-16)に $\{x_a^{(n+1)}\}$ を代入し，$Z_p(x_a^{(n+1)}) = Z_p(\alpha)$ を得る．α $(0 \le \alpha \le 1)$ の一次元探索によって $Z_p(\alpha)$ を最小にするステップサイズ α とそのリンク輸送量 $\{x_a^{(n+1)}\}$ を求める．

STEP 5：収束判定

あらかじめ設定した $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ に対して，

(a) $\sum_{a \in A} Z_p(x_a^{(n+1)} - x_a^{(n)}) c_a(x_a^{(n)}) \le \varepsilon_1$

(b) $\max_a \left| (x_a^{(n+1)} - x_a^{(n)}) / x_a^{(n)} \right| \le \varepsilon_2$

(c) $n > K$ （K は任意に与える）

のいずれかを満足するならば，計算を終了する．そうでなければ $n = n+1$ としてSTEP2へ戻る．

ここで，パラメータ α は $x^{(n)}$ から降下できる距離(ステップサイズ)を表す一次のパラメータである．STEP4にある目的関数 $Z_p(\alpha)$ はパラメータ α の1つの変数を持つだけの一次元最適化問題である．このような問題には，黄金分割法等を用いるとよい [3)]．

4.4 使用データ

ここで行うモデル分析には，①海上リンクフローデータ，②国内リンクフローデータ，③リンクコストデータが必要である．しかしながら，コンテナ輸送市場においては，国際的かつ系統的な統計データの整備が未だ不十分であり，これらのデータの入手は困難である．特にリンクコストデータについては，荷主と船社(内航，外航)，その他輸送業者等との間において企業秘密扱いである．しかも，荷主が取り扱う貨物のロット数によってもコンテナ運賃が変動することから明確なデータの入手は極めて困難である．したがって，入手可能なデータをもとに加工あるいは推定する必要がある．

4.4.1 海上リンクフローデータ

従来から我が国で行われてきたコンテナ貨物流動調査等[4)-6)]は，国内港湾を本船積み港湾とし，輸出入される貨物のみを対象としている．したがって，近隣諸国主要港湾を経由するトランシップ量までは調査されておらず，その国への輸出入としてカウントされている．例えば，地方港湾発釜山港トランシップでロッテルダム行きのコンテナ貨物は，韓国への輸出貨物となる．この場合，韓国へ輸出貨物は韓国へのローカル貨物とトランシップ貨物の両方を含んでいるので，本研究ではローカル貨物とトランシップ貨物を分離する必要がある．このデータの加工は文献7を参考に行った．具体的には，例えば，釜山港のトランシップ率は文献8，9等から入手できるので，輸出であれば輸出量にトランシップ率を乗じることによって求まる．

本研究では対欧州・北米の貿易を分析対象とする．方面別輸出量は，トランシップ量に釜山港に寄港する欧州および北米向け船舶の船腹量の比率を乗じることで求まる．ここでは，文献10を参考にして，当該航路に投入されている平均船型の船舶が航行することを想定した．

4.4.2 国内リンクフローデータ

国内リンクは，輸出の場合では，主に荷主から国内主要港湾もしくは最寄り港までの輸送機関別貨物量を指す．このデータは文献5によって入手可能である．ここで，輸送機関としてトラックと内航コンテナ船を想定した．貿易相手国ゾーンとして欧州，北米航路を代表する港をそれぞれ1港ずつと想定する．これは欧州および北米地域において複雑に張り巡られたフィーダネットワークを考慮すると，モデルが複雑になるからである．

このデータに関しても加工が必要となる．具体的には，文献11に示されている内航フィーダ輸送を担っている各内航コンテナ航路の船腹量に，一定の消席率を乗じることによって内航フィーダ輸送量を求める．そして，荷主から各国内港湾までの輸送量からこの輸送量を差し引くことでトラック輸送量が求まる．厳密にいえばトラック輸送量の中にフェリーや鉄道による輸送量も含まれる．しかしフェリーと鉄道による輸送量は極わずかである．またフェリーは道路の延長とも考えられる．以上から，本研究ではトラックと内

航フィーダ船との競合を想定しているので,この計算による値を用いることにした.

4.4.3 リンクコストデータ

リンクコストに関するデータについては,文献調査および船社へのヒアリング調査を行って入手した.しかし,コンテナ運賃は荷主の取り扱う貨物のロット数や品目,そして積卸港の輸出入量のバランス等によっても左右される.したがって,より現実に則した設定を行う必要があるが,これは今後の課題とする.

4.5 計算結果

4.5.1 現状再現性

ここでは,モデルの現状再現性について検討する.使用データは,平成10年度全国輸出入コンテナ貨物流動調査[3)]の1ヶ月間のデータを1年間の流動量に換算し,前項の手順にしたがって加工した.(以下,このデータを現状推定値と呼ぶ)

現状再現性の指標としては,

①国内49港湾の取扱貨物量
(直行貨物量+中継貨物量)
②国内主要港湾と近隣諸国主要港湾を合わせた7港の中継貨物量

について,現状推定値と計算結果を比較した.

図4.3～図4.5に計算結果を示す.図4.3は①のデータをもとに作成した散布図である.輸出入ともに良好な現状再現性が確認された.

図4.4は①の港から東京,横浜,清水,名古屋,大阪,神戸,北九州,博多といった主要8港湾を除いた41港のデータである.輸入では比較的良好な現状再現性が確認されたが,輸出では一部に大幅な乖離がみられた.これは,我が国港湾の取扱貨物量のうち主要8港湾が全体の9割以上を占めているこ

とから，モデルの精度的な要因によって取扱量の少ない地方港湾の取扱量の表現が一部困難となっているといえる．また，本研究で想定している経路数は59,878本である．その中で実際に使われている経路数は，輸出1,334本，輸入937本となっていることから，配分計算の段階で分散して配分された可能性が高いことも理由として推察される．

図4.5は②のデータである．輸出入ともに一部に大幅な乖離がみられる．特に釜山においてはその傾向が顕著である．これは，全貨物量に占める中継

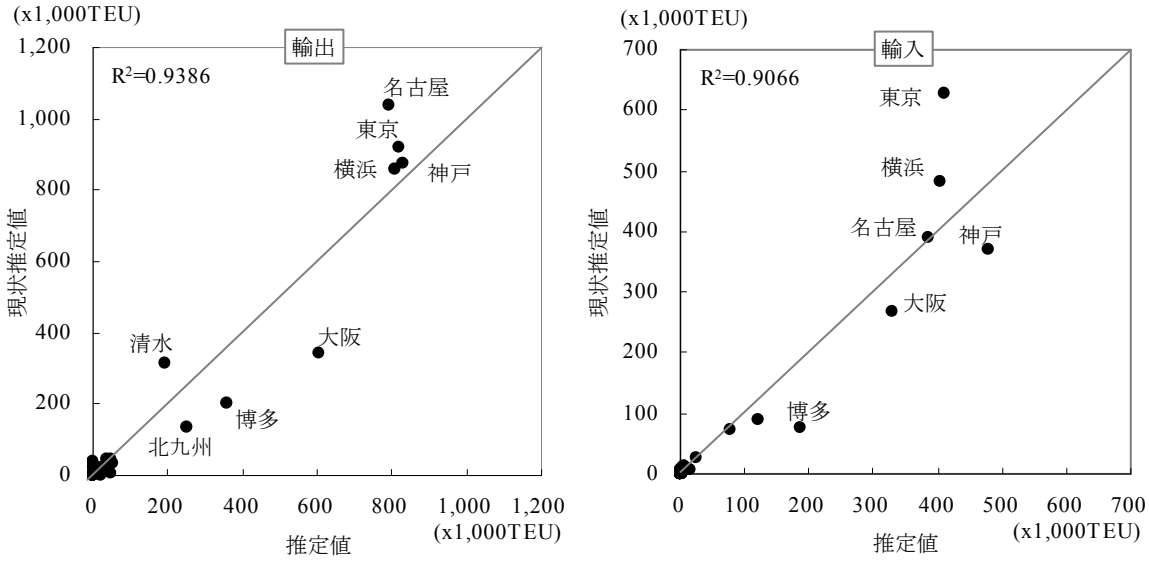


図 4.3 日本の全港湾(49 港)の散布図

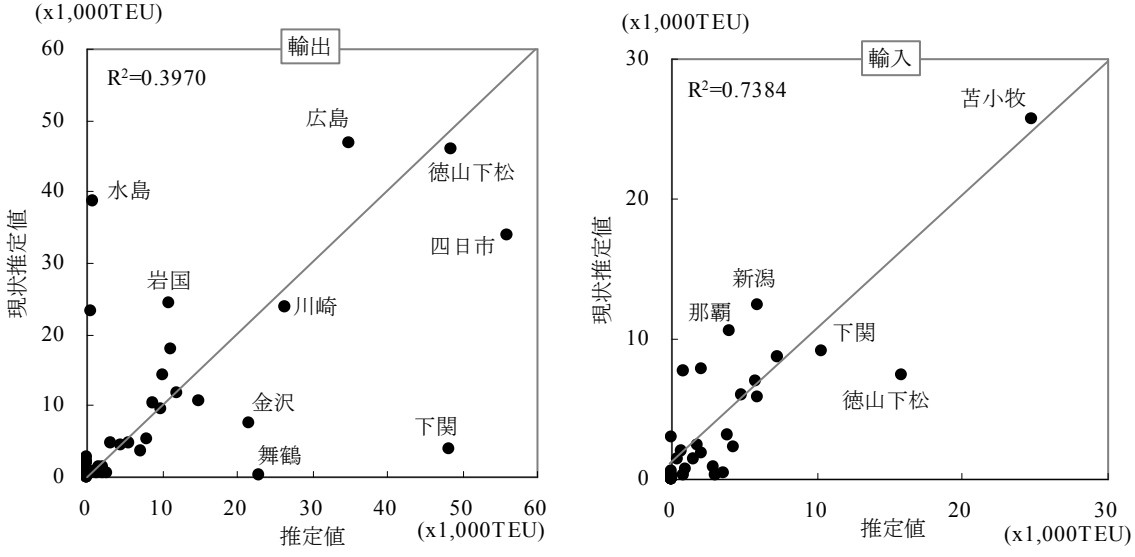


図 4.4 日本の地方港(41 港)の散布図

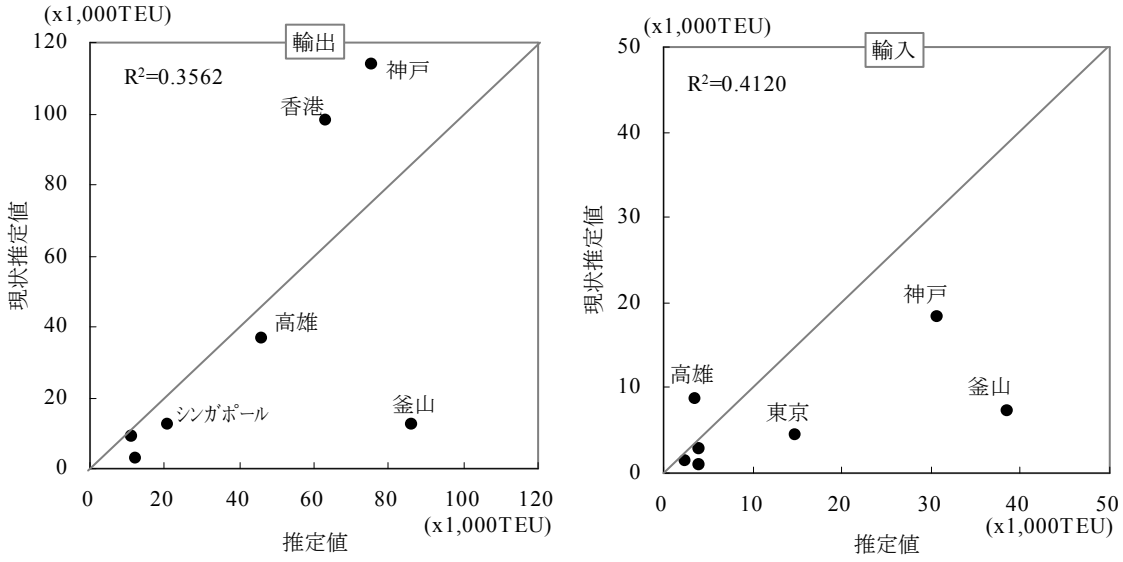
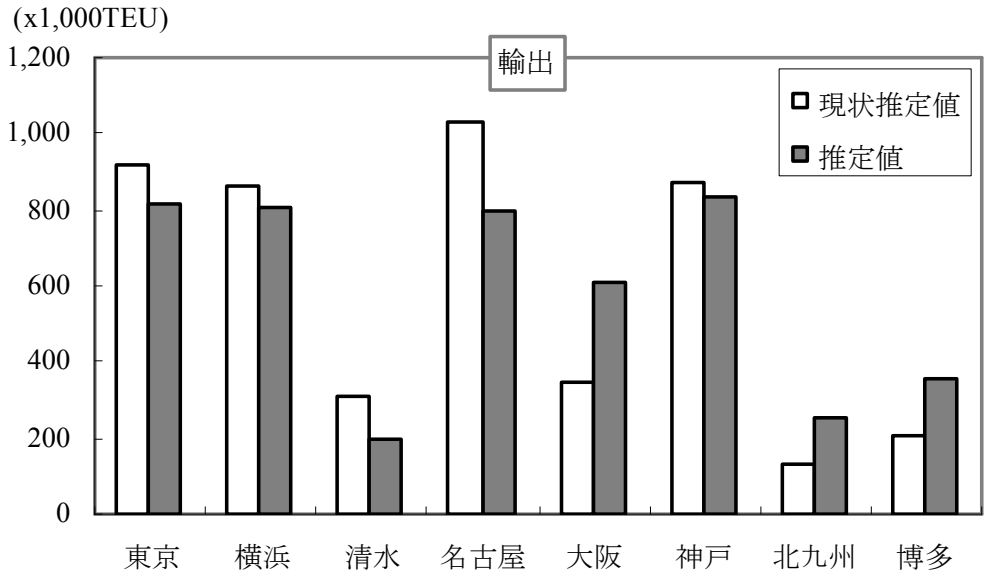


図 4.5 日本(3 港)および近隣諸国(4 港)の主要港湾の散布図

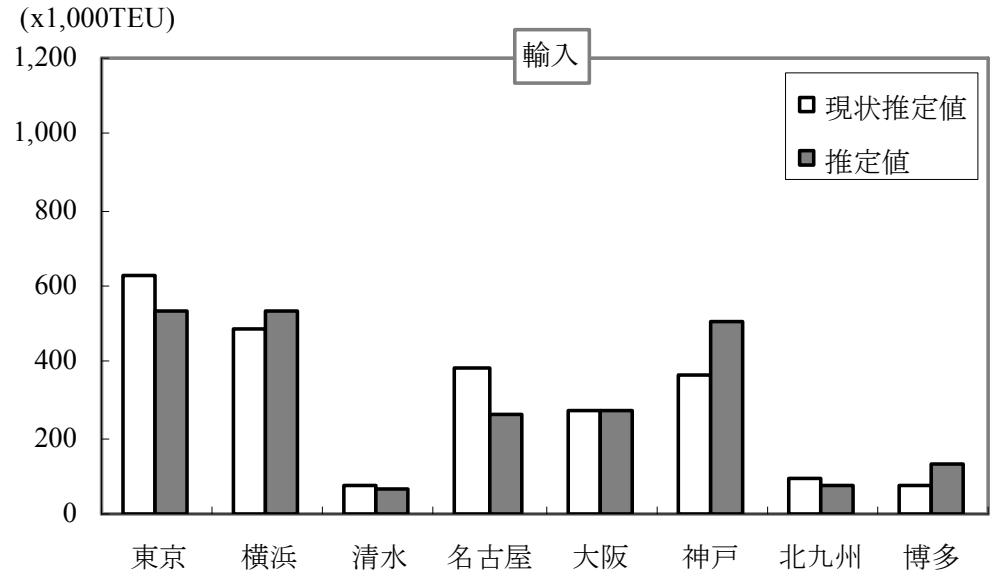
貨物量が少量であるということ，中継に関わる現状推定値を求める際にトランシップ率，船腹数等の一定の比率を乗じていることが原因と考えられる．次に，輸出入双方において最も乖離の大きい釜山をみる．近年，我が国地方港湾との間に多数の航路が開設されたが，韓国経済危機の波を受けて貨物量の伸び悩みが進展し，船腹量過剰の状態となっている．このことから，輸送容量に十分な余裕があるために釜山が過大推計されていると推察される．先ほど示した図4.3中の主要8港湾の取扱貨物量，図4.5の主要8港湾と近隣諸国ハブ港湾における中継貨物量の現状推定値と計算値を比較するため図4.6と図4.7をみる．

図4.6は良好な相関が確認できる．図4.7はモデル全体の取扱貨物量に占める中継貨物量が少ないことから本モデルの精度的な問題点により乖離している港があるが，全体の傾向は表現できていると考える．

以上より，一部に大幅な乖離はあったものの，それは全体の取扱量に対してわずかである．主要8港湾においては良好な相関が確認できた．さらに，地方港湾の取扱貨物量，そして中継貨物量については，一定の水準で再現することができたと考えられ，以降ではこのモデルを用いてケーススタディを行うことにする．

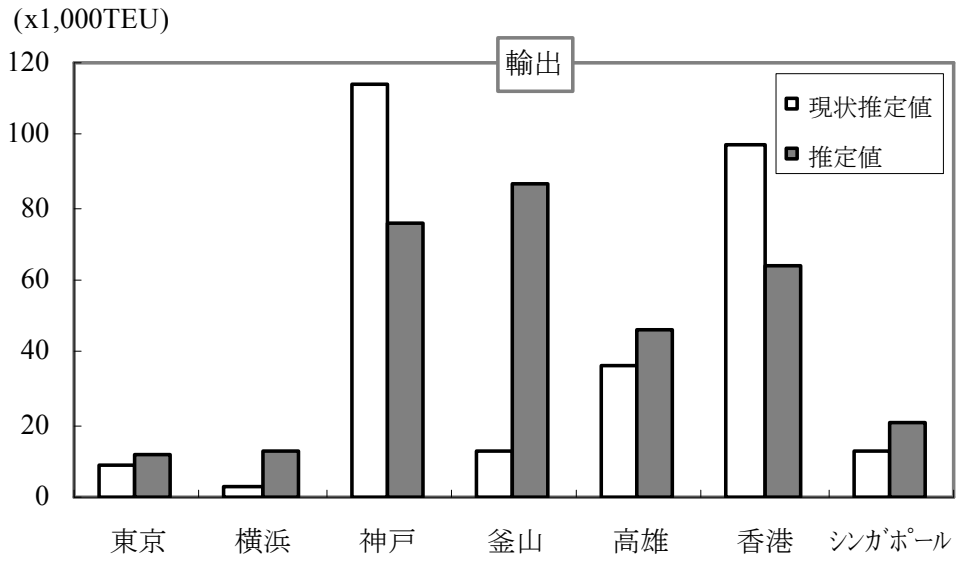


(1) 輸出

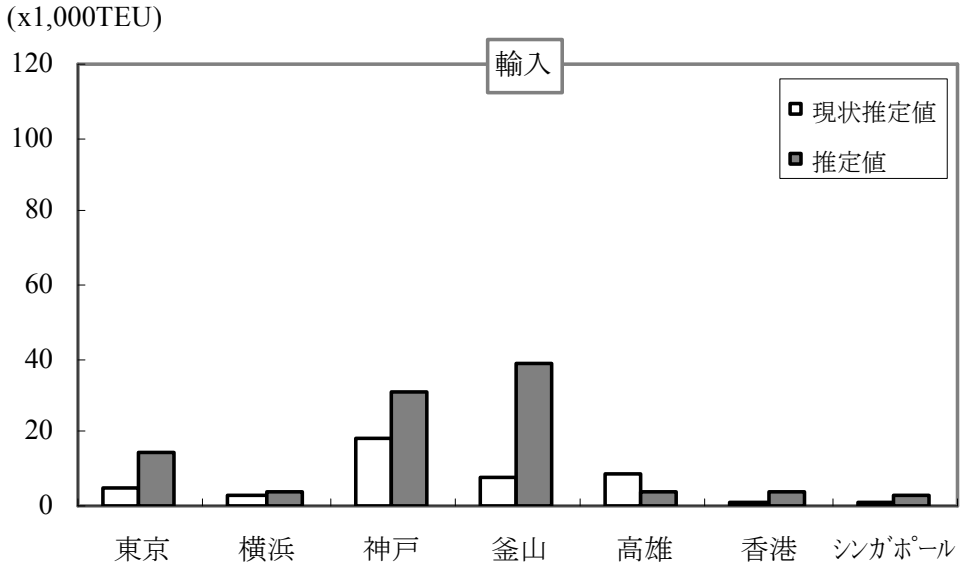


(2) 輸入

図 4.6 日本の主要港湾における貨物取扱量



(1)輸出



(2)輸入

図 4.7 日本および近隣諸国の主要港湾における
トランシップ貨物量

4.5.2 ケーススタディ

荷主による輸送手段の選択は，基本的には「輸送コスト」と「時間コスト」により決定される．文献7の調査報告によると，荷主のフィーダサービスに対する要望として，輸送コストの低廉化，定期航路の増便，荷役コストの低廉化を挙げている．定期航路の増便は，外航本船との時間を短縮し，時間コストを削減すると同時に輸送容量の増加につながる．荷役コストは，フィーダ輸送にかかるコストのうち，地方港湾のコンテナヤードー国内主要港湾のコンテナヤード間における港湾関係コストである，内外積み替えコストと海上輸送コストの合計に占める港湾関係コストの割合は，おおむね瀬戸内海航路等で50～65%，京浜－北海道航路等で30～50%となっている [11)]．港湾関係コストは輸送距離に関係なく一定である．輸送距離が短い場合は，この港湾関係コストのウエイトが大きくなる．

これらより，

①内航フィーダ運賃
②寄港頻度
③内外積み替えコスト

の3つが，フィーダサービスを選択する主要要因であるとしてケーススタディを行うことにする．それらの効果に関する評価は，国際輸送部分では我が国の主要港湾の取扱貨物量，国内輸送部分では内航フィーダ輸送の取扱貨物量の増減で評価を行う．つまり，我が国主要港湾や近隣諸国主要港湾の中継貨物量，および内航フィーダ輸送のネットワーク全体でのシェアの増減によって行うこととする．フィーダ輸送の運賃とサービス水準が変動した場合に，コンテナ流動への影響をみるため，計算にあたっては，

Case0：現状
Case1：寄港頻度を現状の2倍
Case2：寄港頻度を2倍にし内外積み替えコストを無料
Case3：寄港頻度を2倍にし内航フィーダ運賃を3割引

Case4：寄港頻度を2倍にし内航フィーダ運賃を3割引，内外積み替えコストを無料

の5ケースを想定してケーススタディを行った．

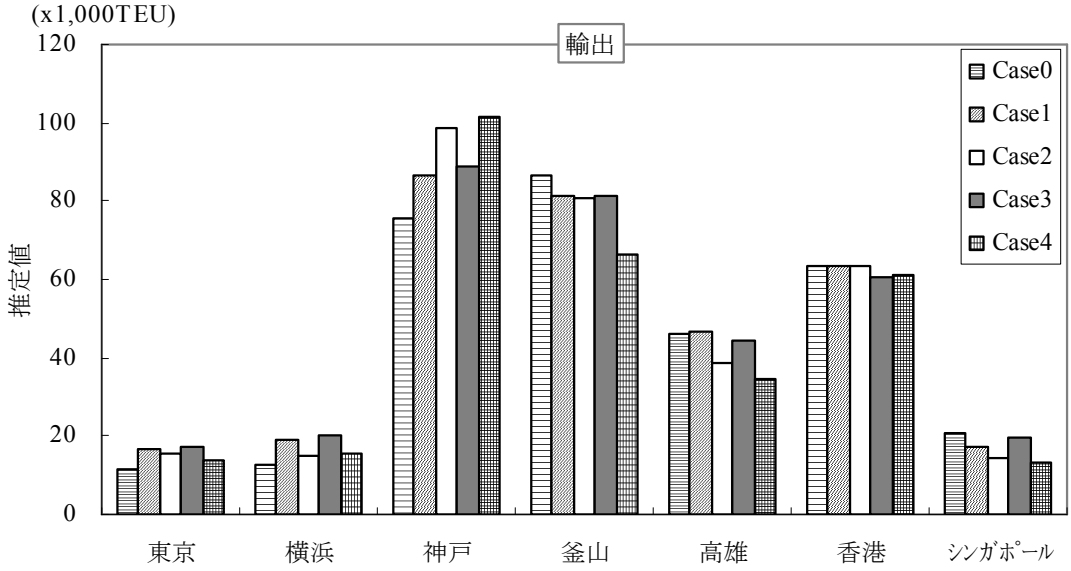
前者に関する結果を表4.1，図4.8，図4.9，後者に関するものを図4.10に示す．

各ケースにおける港のトランシップ貨物量を表4.1および図4.8に示す．東京，横浜ではCase1と4，神戸ではCase3と5が取扱量を増やしており，特に輸出では顕著である．つまり．東京，横浜では寄港頻度の増加，神戸では内外積み替えコストの低減による効果が大きいことがわかる．逆に，近隣諸国主要港湾における輸出をみると，高雄，シンガポールではCase3と4が，釜山ではCase4が取扱量を減らしていることがわかる．香港については大きな減少はみられない．また，輸入では大きな変動はみられない．

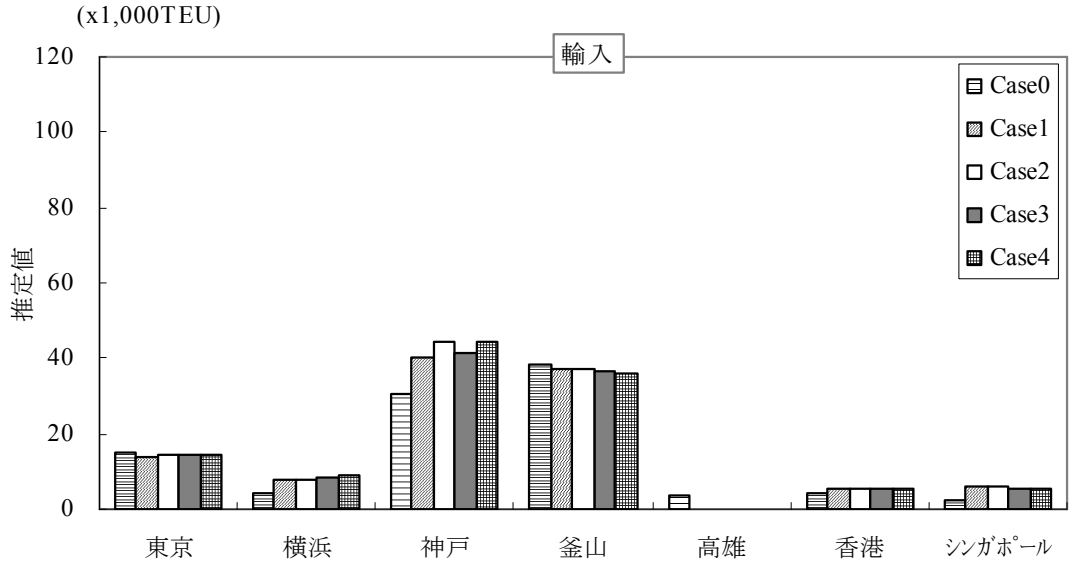
表4.1 各ケースにおけるトランシップ貨物量

	パラメータ	Case0	Case1	Case2	Case3	Case4
	寄港頻度	-	2倍	2倍	2倍	2倍
	フィーダ運賃	-	-	-	3割引	3割引
	積み替えコスト	-	-	無料	-	無料
輸出	東京	11,504	16,978	15,350	17,288	13,592
	横浜	12,526	19,023	14,744	20,021	15,822
	神戸	75,514	86,627	98,623	88,929	101,618
	釜山	86,351	81,269	80,597	81,062	66,603
	高雄	45,975	46,538	38,569	44,656	34,898
	香港	63,474	63,742	63,430	60,347	61,199
	ｼﾝｶﾞﾎﾟｰﾙ	20,789	17,260	14,222	19,751	13,245
輸入	東京	14,773	13,741	14,361	14,381	14,399
	横浜	3,949	7,769	8,084	8,145	9,010
	神戸	30,763	40,418	44,457	41,674	44,694
	釜山	38,516	37,016	36,964	36,456	36,252
	高雄	3,482	0	0	0	0
	香港	4,112	5,352	5,422	5,393	5,628
	ｼﾝｶﾞﾎﾟｰﾙ	2,456	5,877	5,848	5,667	5,535

(TEU)



(1) 輸出



(2) 輸入

図 4.8 各ケースにおけるトランシップ貨物量

次に，国内3大港湾(東京，横浜，神戸)と，それらを含む近隣諸国の主要7港湾(東京，横浜，神戸，釜山，高雄，香港，シンガポール)における，トランシップ率を示した図4.9をみる．国内3大港湾のシェアは，輸出入あわせてCase1～4まで大きくなっているのがわかる．

さらに，国内輸送におけるトラック輸送と内航フィーダ輸送のシェアを比較するため図4.10をみる．この図は外貿コンテナ貨物の国内2次輸送における輸送機関として使用されるトラックと内航フィーダのシェアを示しており，国内発着のすべての輸出入貨物について集計したものである．トラック輸送はすべてのケースにおいて9割以上を占めている．その中で，内航フィーダ輸送はケースが進むにつれて微量ながら輸出入ともシェアを増やしている．

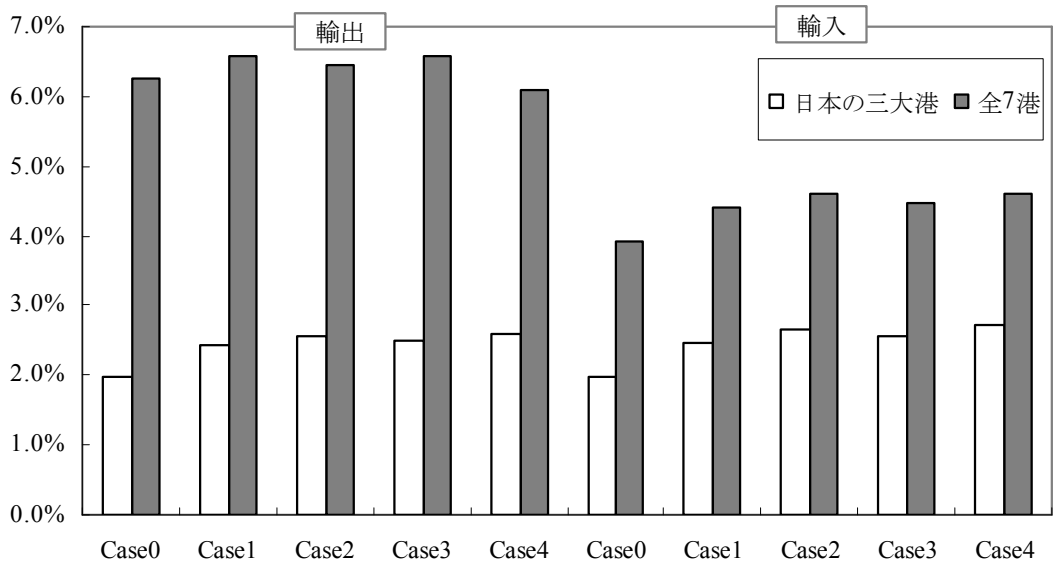


図4.9 我が国3大港湾および近隣諸国の主要港湾のトランシップ率

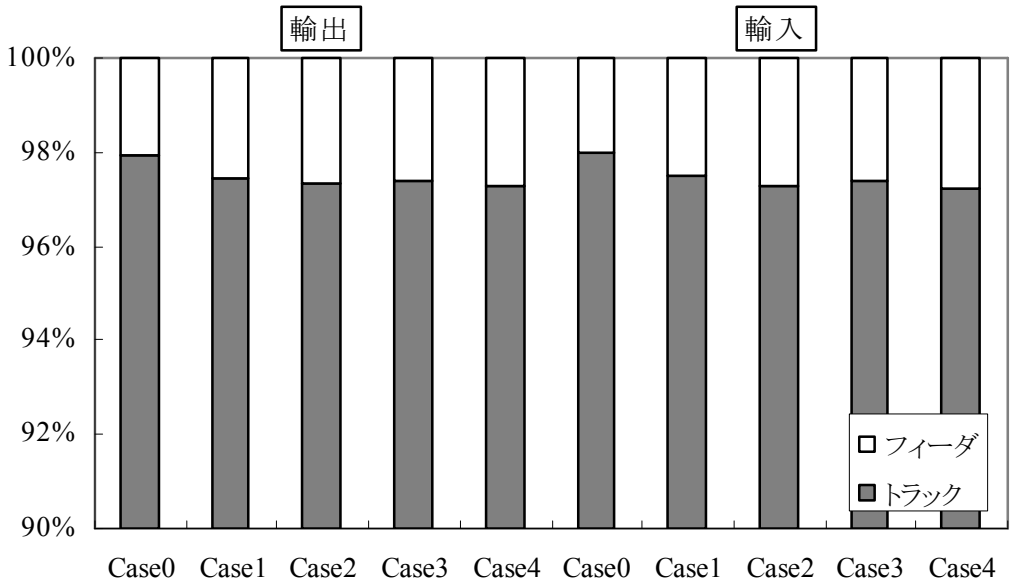


**図4.10 国内輸送におけるトラックと
フィーダ輸送のシェアの推移**

以上の結果を次にまとめる.

① 中継貨物量(トランシップ貨物量)は，輸出の方が大幅に多い．集計した計算値をみると，輸出および輸入の中継割合は全体の取扱量に対してそれぞれ，6%, 4%程度となっている．全中継港における国内主要港湾のシェアは大きくなっている.

② Case1～4に進むにつれて，輸出入ともに日本主要港湾の取扱貨物量はおおむね増加しており，中継港グループの中でのシェアも大きくなっている．逆に近隣諸国の主要港湾では減少している.

③ 特に．東京，横浜ではCase1と3が，神戸においてCase2と4が急激に増加している．これは，フィーダ輸送にかかるコストの中で，航路距離によって内外積み替えコストや時間損失コストの占める割合が変化することに関係している．つまり，東京，横浜は，遠距離である北海道や東北との間にフィーダ航路が開設されていることから寄港頻度の影響を受けやすくなる．神戸は西日本を中心とした近距離航路が多数開設されているので，内外積み替えコストの影響を受けやすくなっている.

④ トラック輸送と内航フィーダ輸送との機関分担シェアをみると，その9割以上を陸上輸送が占めている．その中で，ケースが進むにつれて輸出入とも微量であるがフィーダ輸送は増加している．

4.6 本章のまとめ

今回の検討では，荷主は金銭的費用と時間的費用を基本とした国内部分と国際部分からなる総輸送コストの最小化という経済合理性のもとに，輸送経路を選択すると考えた．その荷主の選択行動を利用者均衡モデルとして定式化を行った．そして，内航フィーダ輸送に関わるフィーダ運賃，寄港頻度，荷役コストを変化させてケーススタディを行い，荷主の選択行動にどのような影響を与えるのかを分析し，その選択結果が我が国主要港湾および内航フィーダ輸送の利用を促す効果があるのか検討した．それによって，内航フィーダ運賃，寄港頻度，内外積み替えコストの改善が我が国主要港湾や内航フィーダ輸送へのシフトへある水準でもって寄与することがわかった．また，内航フィーダ航路の距離の長短によって，寄港頻度あるいは内外積み替えコストが荷主の選択行動に与える影響の度合いを変化させることがわかった．

問題点としては，地方港湾の取扱貨物量においては，モデルの精度的な要因によって表現することが困難であった．今回，貨物の時間価値は都道府県別取扱貨物の平均単価を用いた．しかし実際には荷主や貨物の属性によって「時間重視品目」と「輸送コスト重視品目」があると考えられる．これらの要素が表現できるモデルの構築が今後，必要である．

第4章に関する参考文献

1) 新谷浩一, 今井昭夫, 西村悦子, 津田正和：近隣諸国港湾の中継を考慮した国内発着のコンテナ貨物の流動分析, 日本航海学会論文集, 第109号, pp.217-227, 2003.
2) 第3章, 文献9.
3) 第3章, 文献6.
4) 運輸省港湾局：平成10年度全国輸出入コンテナ貨物流動調査,1999.
5) 運輸省･建設省：全国貨物純流動動調査, 各年度.
6) 運輸省運輸政策局情報管理部：港湾統計, 各年度.
7) 第3章, 文献11.
8) 神戸港における内航フィーダー貨物の誘致に関する調査研究委員会：神戸港における内航フィーダー貨物の誘致に関する調査研究報告書,関西交通経済研究センター, 2000.
9) 国際ハブ港湾のあり方に関する研究調査委員会：国際ハブ港湾機能が経済に与える影響調査, 運輸経済研究センター, 1997.
10) オーシャンコマース：2003年版 国際輸送ハンドブック, 2002.
11) 第1章, 文献3.

第5章　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・ルーチング問題に関する研究 [1)]

5.1　概説

近年，特に東・東南アジア圏では急速な経済成長によって，コンテナ船の寄港地間の輸出入量格差は拡大している．そのような状況の中，船社は各寄港地における空コンテナの過不足を是正するために，多数の空コンテナの回送を余儀なくされている．空コンテナが不足している港では，国内外の他港や国内インランドデポ等からの調達，あるいは一時的なコンテナの借り入れが必要であるし，逆に余剰となる港では，バンプールでの蔵置や他港への回送が必要となる．これらの物流活動は，船社にとって直接に利益と結びつかないことから空コンテナの効率的な運用計画が求められる．

船社は，新規航路の開設や既存航路の変更を行う際，寄港候補地の貨物需要を予測した上で，自社利益の最大化を目的として，寄港地と寄港順序の他，船型サイズ，投入隻数，速力を決定する．このように，コンテナ船の運航計画の立案には，集荷量の最大化と費用の最小化を行いつつ，システム全体の最適化が求められる．しかし，現状ではその意思決定は経験豊富な担当者のノウハウに依存していることが多く，その計画が合理的なものになっているのかが明確でない．したがって計画の数理的な評価が必要となっている．また，船社にとって空コンテナの回送は重要な問題であるが，既存の研究では本船による回送を考慮したものは極めて少なく，複雑な寄港順序を考慮していない．空コンテナの回送も本船の運航によって行うと考えると，船社における空コンテナに関する問題は次の2つに集約される．

①寄港地の選定

輸出入量に大きくインバランスが生じていれば，多数の空コンテナの回送を必要とするため，そのような港に寄港することは得策でない．

②寄港順序の決定

本船の余席を使って空コンテナをタイムリーに回送し，寄港地の空コン

テナの過不足を是正したい.

そこで本章では,本船によって寄港地の空コンテナの過不足を調整できない場合にその補填にかかる費用をペナルティコストと定義し,船社の利益を最大化する寄港地,寄港順序,投入隻数および速力等を決定するための手法を提案する.さらに,空コンテナの回送が航路形成に与える影響を分析するため,本手法を東南アジア航路へ適用して考察を加える.

第5.2節では,モデルの基本的な考え方を示す.ここで扱う問題が寄港候補地数が増えることによって解の代替案の数が指数関数的に増加する性質を持つことを述べる.さらに,定式化の前提条件やコスト関数について述べる.第5.3節では,総当たり法を用いた解法について述べる.第5.4節では,適用事例として東南アジア圏の定期航路計画を考える.ここでは,ケーススタディを行って空コンテナの回送コストや荷役時間が航路形成に及ぼす影響について分析する.

5.2 モデルの定式化

5.2.1 モデルの基本的な考え方

本章で扱う,コンテナ船の航路計画問題は,船社利益を最大とする寄港地と寄港順序を見つけ出す問題である.コンテナ船の運航スケジュールは通常,ウィークリーサービスを前提として組まれており,そのスケジュールは公表される.スケジュールの変更は公表後,頻繁に変更されることはないが,変更する場合,数ヶ月あるいは年単位でなされることが多い.船社は将来の貨物需要を満たす平均的な寄港地と寄港順序の組合せを決定する.その決定には,コンテナ貨物の季節変動,市場の要求,船社の方針等に依存している.したがって船社は,寄港地候補地における1週間単位のコンテナ貨物を予測し,計画期間中の運賃収入とコストを考慮して航路を決定することになる.航路計画において,最適な速力と投入隻数は強い制約となる.特に,速力は航路パターンの形成と寄港スケジュールに対し,重要な制約条件である.

多くの船社は,起点港と終点港を先に決定した後,中間港を決定した上で,

その航路に何隻かの船を投入する．そのとき，本船は往航では起点港を出発し，中間港を経由して終点港に到着，復航ではその逆となって，起点港と終点港間を往復航行する形態となる．

ここで，起点港と終点港を上位ターミナル，中間港を下位ターミナルに見立てると，本船はそのリンク上を往復航行することから，この問題はロケーション・ルーチング問題(Location Routing Problem, LRP)の一類型である往復型ロケーション・ルーチング問題の形態をとる [2)]．コンテナ船の基本的な航行パターンは，図5.1に示すように3つに分類される．中間港が複数存在する場合は，様々な航行パターンが組合わさって往復航で非対象となり複雑な航路となる．具体的な寄港地と寄港順序の表現方法は，往復航別とし図5.2のように表現することとした．①と⑥はそれぞれ起点港と終点港を意味し，②～⑤は中間港を意味する．図5.2によると，②には往航，復航とも寄港しな

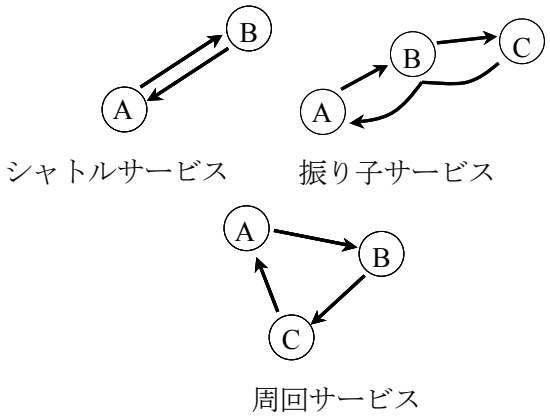


図5.1コンテナ船の典型的な航行パターン

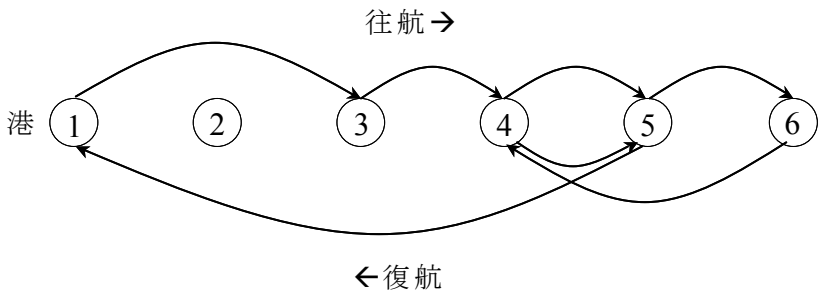


図5.2 想定するコンテナ船の航路パターン

いことがわかる．また，往航時に(④→⑤)という寄港順序があり，さらに復航時にも同じものが存在する．これは実際の航路にはほとんど見られないが，効率的な空コンテナの回送という観点からすると，船社にとって有利となるかも知れない．しかし著者の知る限り，既往の研究においてこのような寄港順序に柔軟性を持たせた定式化を行っているものは存在しない．

寄港地間の実入りコンテナの貨物需要は，考慮する計画期間中の他船社との競合，荷主との戦略均衡の結果として得られた変動する需要と仮定する．さらに，寄港地の空コンテナ需要は，前期の当該港における貨物の発生集中量の差分(集中貨物量－発生貨物量)とする．ここで，本船は寄港地間の実入りコンテナの貨物需要を必ず満たすという前提を設けると，寄港地と寄港順序を決定する組合せ最適化問題に帰着する．その航路の代替案の数は例えば，寄港候補地が5港では256通り，10港となれば1.2×10^{10}通りとなって，寄港候補地数に対して指数関数的に増加する性質を持つ．

5.2.2 前提条件

ここでは，単一航路を対象にした船社の利益最大化モデルを考える．そのとき，必ずしも全ての寄港候補地のコンテナ貨物需要を満たさなくてもよいと仮定する．その貨物需要は1週間単位で与件とし，モデルは計画期間を1週間単位に区分して考える．その他の前提条件は以下のようになる．

(a) 空コンテナ需要は前期における当該港の発生集中貨物量の差分とする．
(b) 投入されるすべての船は当該期に寄港地間の貨物需要を必ず満たすものとする．
(c) もし，港で空コンテナが不足した場合は，その不足分についてリースコンテナを借り入れるとする．
(d) 実入りコンテナと空コンテナの積載量は，コンテナ船の最大積載量を越えてはならない．

通常，コンテナ輸送市場には複数の船社が存在しており，船社間の競合が存在する．例えば，ある船社が船積みをやめたとすると，他の船社がその船

積みを引き受けることになる．これは，そのような貨物は他の船社の貨物需要に影響を与えることを暗示している．しかし，その船社間の相互関係をモデルに組み込むことは，さらにモデルを複雑にすることになる．以上の理由から，ここでは独立した船社1社が単一航路を計画することとして問題の定式化を行う．

5.2.3 モデルの定式化

目的関数は，運賃収入から総費用を差し引いた利益となる．決定変数は，寄港地と寄港順序を表現する0-1整数変数となる．本問題は，無数にある寄港地と寄港順序の組合せの中から船社の利益を最大とする組合せを決定する問題で，集合分割問題(Set Partitioning Problem, SPP)の変形問題として定式化される．

ここでは，寄港地をノード，寄港地間を結ぶ航路をリンクとし，寄港地グループの組合せパターンをルートとよぶことにする．さらに，各ルートで妥当と考えられるリンクをすべて列挙してリンク集合$\left(S^k\right)$とする．

以下に本研究におけるモデルの定式化について述べる．

$$Maximize \sum_{i\in N^k}\sum_{j\in N^k}\left\{R_{ij}^k\left(y_{ij}^k\right)-C_{ij}^k\left(y_{ij}^k\right)-P_{ij}^k\left(y_{ij}^k\right)\right\} \tag{5-1}$$

subject to

$$\sum_{j\in N^k} a_{ij}^k y_{ij}^k = 1, \qquad \forall i \in N^k \tag{5-2}$$

$$\sum_{i\in N^k} a_{ij}^k y_{ij}^k = 1, \qquad \forall j \in N^k \tag{5-3}$$

$$y_{ij}^k = \{0,1\}, \qquad \forall i,j \in N^k \tag{5-4}$$

ここで，

$i, j(=1,...,n) \in N^k$：寄港地番号（n：寄港地数）

k　　：寄港地集合の番号

N　　：各ルートの寄港地番号の集合

a_{ij}^k　：リンク$i-j$がリンク集合S^kに含まれるとき1，そうでないとき0の値をとる

y_{ij}^k　：リンク$i-j$にコンテナ船が就航するとき1，そうでないとき0の値をとる決定変数

$R_{ij}^k(\cdot)$：リンク$i-j$の運賃収入関数

$C_{ij}^k(\cdot)$：リンク$i-j$の船舶コスト関数

$P_{ij}^k(\cdot)$：リンク$i-j$のペナルティコスト関数

式(5-1)は目的関数であり，運賃収入から運航費と船費からなる船舶コストとペナルティコストを差し引いた利益の最大化を表す．式(5-2)，(5-3)はリンク制約であり，1つのノードから複数のノード間にリンクで結ばれないことを保証する．また，復航時にも同様の制約が必要となるため，復航に関するすべてのノードをダミーノードとする．式(5-4)はy_{ij}^kが0-1整数変数であることを意味する．

なお，寄港地番号の集合$\left(N^k\right)$には起点港および終点港のノードも含まれるが，それらはa_{ij}^kを作成する際に式(5-2)，(5-3)の制約を考慮して使用されない場合もある．例えば，往航時に発生ノードとして終点港ノード，集中ノードとして起点港ノードを使用することはない．また，起点港ノードから直接，終点港ノードへリンクが延びないようにするための加工も伴う．

(1) 運賃収入関数

運賃収入は，計画期間中に輸送された寄港地間の実入りコンテナ需要に，寄港地毎に定められた運賃率を乗じて合計したものとなる．

解の代替案$\left(y_{ij}^k\right)$から各寄港地間の貨物需要を算出する手順は次のようになる．

STEP1：t期における全寄港地間の貨物需要$\left(DM_{ij}^{t,k}\right)$の中から代替案$\left(y_{ij}^k\right)$に含まれるリンク$i-j$に関するものを列挙し，寄港地間の貨物輸送量$\left(x_{ij}^{t,k}\right)$を求める．

STEP2：往復航の2方向中に同じの集中ノードが複数存在する場合は，発

生ノードと同一方向の集中ノードへのみ輸送するものとし，貨物輸送量$\left(x_{ij}^{t,k}\right)$を更新する．

STEP3：すべてのリンクについて処理したら終了．

したがって，運賃収入関数$R_{ij}^{k}(\cdot)$は，

$$R_{ij}^{k}(\cdot)=\sum_{t\in T}F_{ij}^{k}x_{ij}^{t,k} \tag{5-5}$$

となる．

ここで，

F_{ij}^{k}　：寄港地代替案kでのリンク$i-j$の運賃率 (円/TEU)

$x_{ij}^{t,k}$　：寄港地代替案kでのt期におけるリンク$i-j$の輸送量 (TEU)

$t(=1,...,T)$：計画期間番号　(T：計画期間長)

ここでは，計画期間を52期(52週間)とする

(2) 船舶コスト関数 [3)]

船舶コストは，運航費と船費を合算したものとなる．

以下にそれらの数式を示す．

(a) 運航費

・燃料油費$\left(C^{F}\right)$は次式によって表現される．

$$C^{F}=\frac{\left(C^{Fuel}R^{Fuel}+C^{Lub}R^{Lub}\right)\cdot DS^{\frac{2}{3}}\cdot v^{2}\cdot FRQ\cdot DIST}{A} \tag{5-6}$$

・港費$\left(C^{E}\right)$は次式によって表現される．

$$C^{E}=FRQ\cdot\sum_{i\in N^{k}}\sum_{j\in N^{k}}Q_{j}y_{ij}^{k} \tag{5-7}$$

・荷役費$\left(C^{H}\right)$は次式によって表現される．実入りコンテナの荷役費は，通常

は荷主が負担することからここでは空コンテナの荷役費のみを考えることにする.

$$C^H = \sum_{t \in T} \sum_{i \in N^k} H_i L_i^{t,k} \tag{5-8}$$

(b) **船費**

・船員費$\left(C^M\right)$は次式によって表現される.

$$C^M = M \cdot F \tag{5-9}$$

・減価償却費$\left(C^D\right)$は次式によって表現される.

$$C^D = 0.045 \cdot CV \cdot F \tag{5-10}$$

・金利$\left(C^R\right)$は次式によって表現される.

$$C^R = 0.003 \cdot CV \cdot F \tag{5-11}$$

・保険料$\left(C^I\right)$は次式によって表現される.

$$C^I = 0.003 \cdot CV \cdot F \tag{5-12}$$

・修繕修理費$\left(C^{RP}\right)$は次式によって表現される.

$$C^{RP} = 0.001 \cdot CV \cdot F \tag{5-13}$$

したがって，船舶コスト関数$C_{ij}^k(\cdot)$は，

$$\sum_{i\in N^k}\sum_{j\in N^k} C_{ij}^k(\cdot) = C^F + C^E + C^H + C^M + C^D + C^R + C^I + C^{RP} \tag{5-14}$$

と表現できる.

船舶コストは, 寄港地間の地理的条件や貨物需要の条件等が絡み合った中で相対的に決まることから, 代替案ならびにそのリンク毎に異なると考えられる. したがって, 式(5-14)のようにコンテナ船が就航するすべてのリンクに関して合計したものと表現する.

ここで,

C^{Fuel} : 燃料油単価 45,000 (円/トン)

R^{Fuel} : 燃料油消費率 140 (g/馬力/時間)

C^{Lub} : 潤滑油単価 240,000 (円/トン)

R^{Lub} : 潤滑油消費率 4 (g/馬力/時間)

DS : 排水トン数 (トン)*

v : 速力 (ノット)*

FRQ : 寄港頻度 (回/年)

ここでは, 52 (回/年)と仮定する

$DIST$: 航海距離 (マイル)

$$\left(DIST = \sum_{i\in N^k}\sum_{j\in N^k} Dist_{ij}^k y_{ij}^k \right) \quad (Dist_{ij}^k : \text{リンク } i-j \text{ 間の航海距離})$$

A : アドミラルティ係数*

Q_j : 港 j での入港に関わる費用 (円)*

H_i : 港 i における1TEU当たりの荷役費 (円/TEU)

$L_i^{t,k}$: 寄港地代替案 k での t 期における港 i の空コンテナ荷役量 (TEU)

M : 1年間の人件費 (円/隻)*

F : 投入隻数 (隻)

CV : 船価 (円/隻)*

なお, 本研究では最適な船型サイズを複数の候補の中から決定することから, 各式中の*印のついたパラメータは各船型サイズに対応した値をとる.

(c) ペナルティコスト関数

本船の運航によって寄港地の空コンテナの過不足分を調整できない場合に，その補填にかかる費用をペナルティコストと定義する．

現在まで空コンテナに関する流動調査は行われていないことから，その実態は明らかとなっていない．ここでは，船社は寄港地における空コンテナの過不足を必ず是正なければならないという大義的な意味から，空コンテナ需要は前期における当該港の発生集中貨物量の差分(集中貨物量－発生貨物量)と仮定する．その値が正であれば空コンテナは余剰，負であれば不足という2種類の需要となることを意味する．そして船社は，これらの空コンテナ需要を本船の余席によって回送される空コンテナで満たすことを原則とする．しかし，これによってもなお，空コンテナ需要をすべて満たすことができない場合が考えられる．そのときは，余剰分については当該港に隣接す

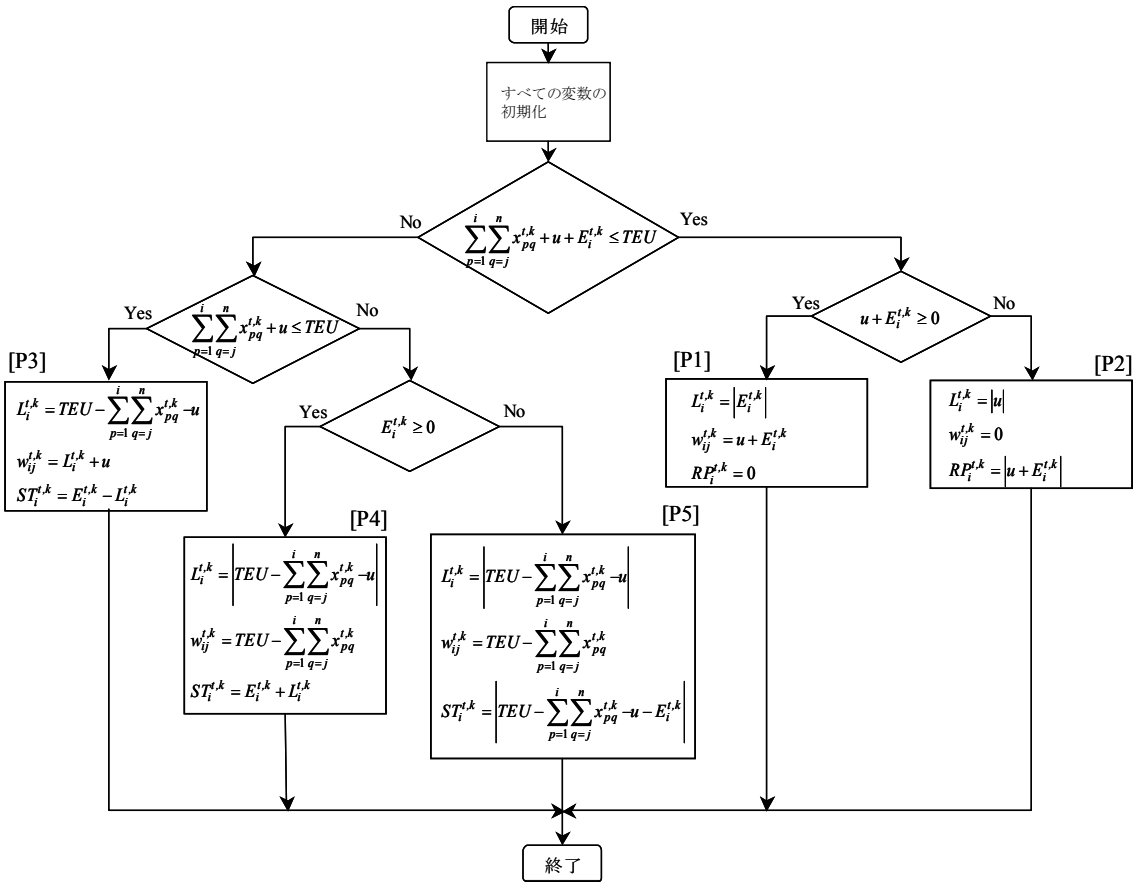


図5.3 ペナルティコストの対象となるコンテナの算出フロー

るバンプールでの蔵置，不足分についてはインランドデポから空コンテナを回送してくるものとする．ここでは，これらの活動に要する費用をペナルティコストと考える．なお一旦，蔵置および回送を経たコンテナは，当該計画期を過ぎるとシステム外へ流出すると仮定する．したがって，ペナルティコストは，ペナルティの対象となる空コンテナ数$\left(ST_i^{t,k}, RP_i^{t,k}\right)$を求めた後に計算されることになる．また，本研究では空コンテナの荷役費を運航費に，荷役時間を所要日数に含めることから，各寄港地の空コンテナ荷役量$\left(L_i^{t,k}\right)$と各リンクの空コンテナ輸送量$\left(w_{ij}^{t,k}\right)$の算出も必要である．それらの計算の流れを図5.3に示す．

図中の[P1]～[P5]は，ペナルティの対象となる空コンテナ数等の算出処理を発生条件の違いによって分類したものであり，具体的に以下の内容となる．

[P1]：港iの空コンテナ需要を本船の余席もしくは余席に積載している空コンテナで満たすことができるとき．

[P2]：港iの空コンテナ需要を本船に積載している空コンテナで一部満たすことができないとき．

[P3]：港iの空コンテナ需要が本船の余席を上回り，その需要を一部満たすことができないとき．

[P4]：港iの空コンテナ需要を引き受ける段階で本船の実入りと空コンテナを合計した積載量が本船の輸送容量を超過し，かつ港iの空コンテナ需要が正のとき．

[P5]：港iの空コンテナ需要を引き受ける段階で本船の実入りと空コンテナを合計した積載量が本船の輸送容量を超過し，かつ港iの空コンテナ需要が負のとき．

なお，図5.3に示した計算の流れは各計画期と各リンクについて繰り返し計算がなされる．

したがって，ペナルティコスト関数$P_{ij}^k(\cdot)$は，

$$P_{ij}^{k}(\cdot)=\sum_{t\in T}\left(a_i ST_i^{t,k}+b_i RP_i^{t,k}\right) \tag{5-15}$$

となる.

ここで,

$x_{ij}^{t,k}$ ：寄港地代替案kでのt期におけるリンク$i-j$間の貨物需要 (TEU)

$w_{ij}^{t,k}$ ：寄港地代替案kでのt期におけるリンク$i-j$間の空コンテナ輸送量(TEU)

$E_i^{t,k}$ ：寄港地代替案kでのt期の港iにおける空コンテナ需要 (TEU)

$E_i^{t,k}>0$：空コンテナが過剰のとき，$E_i^{t,k}<0$：空コンテナが不足しているとき

なお，E_i^tは前期の寄港地における貨物の発生集中量の差分$\left(E_i^{t,k}=D_i^{t-1,k}-O_i^{t-1,k}\right)$となる．また，$t=1$のときは便宜的に同期の寄港地における貨物の発生集中量の差分$\left(E_i^{t,k}=D_i^{t,k}-O_i^{t,k}\right)$とする.

$O_i^{t,k}$ ：寄港地代替案kでのt期の港iにおける発生貨物量 (TEU)

$D_i^{t,k}$ ：寄港地代替案kでのt期の港iにおける集中貨物量 (TEU)

u ：直前リンク$i'-j'$の空コンテナ輸送量 (TEU)$\left(=w_{i'j'}^{t,k}\right)$

なお，$t=1$かつ$i=1$のときは便宜的に

$$u=TEU-\sum_{p=1}^{i}\sum_{q=j}^{n}x_{pq}^{t,k}$$

とする.

TEU ：本船の輸送容量 (TEU)

$ST_i^{t,k}$ ：寄港地代替案kでのt期における港iの蔵置ペナルティ対象となる空コンテナ数 (TEU)

$RP_i^{t,k}$ ：寄港地代替案kでのt期における港iの回送ペナルティ対象となる空コンテナ数 (TEU)

a_i ：港iでの1TEU当たりの蔵置コスト (円/TEU)

b_i ：港iでの1TEU当たりの回送コスト (円/TEU)

往復航を通して同じ港に2度寄港する場合の空コンテナ需要は，その港が持つ需要を2等分して往復航それぞれ同じ値を与件とする．ペナルティコス

トは1TEU当たりの料金を課すこととする.

5.3 解法

5.3.1 解法の概要

既存の研究では,配船ルート上の寄港地間の船舶コストは,配船ルートのパターンに依存せず独立した値をとるケースが多い.しかし,本来,寄港地間の船舶コストは配船ルートの代替案毎に異なり,寄港地の地理的条件や貨物需要の条件等が絡み合った中で相対的に決まるものである.本研究では,通常のコンテナ船のルーチング問題とは異なり,本船による空コンテナの回送も考慮することから,目的関数の定式化は複雑となる.したがって,一般的なパッケージソフトを用いた求解は困難となる.

本問題は,第5.2.1項で述べたように,寄港地数が増えれば寄港地と寄港順序の組合せは,組合せ爆発を起こす性質を持つことから,効率的なアルゴリズムの検討が必要である.

しかし今回は,

①アルゴリズムの効率化よりも,厳密解を得ることに重点をおく.
②船社は通常,いくつかの解集合の中から自社の方針に合致した解を採択する.そのため,そのような複数の解集合が得られる解法である必要がある.

という2つの理由から,すべての寄港地と寄港順序の組合せの代替案を列挙して,それらを評価しながら計算を進めていく総当たり法[4)]を採用する.数値計算には,FORTRAN77を用いた専用プログラムを開発し,DELL社のDimension 8250 (2.40GHz Pentium IV)を用いる.

以下に求解手順を示す.

STEP1:解の代替案$\left(y_{ij}^{t,k}\right)$を列挙する.
STEP2:航海距離,投入隻数,速力を計算する.算出された速力が非現

実的なものであれば計算を打ち切り，STEP1へ戻って次の代替案へ移る．

STEP3：設定された1航海の所要日数を守ることができなければ計算を打ち切り，STEP1へ戻って次の代替案へ移る．

STEP4：運賃収入，船舶コスト(運航費，船費)，ペナルティコストを計算する．計算途中でリンク輸送量が本船の輸送容量を超過した場合は計算を打ち切り，STEP1へ戻って次の代替案へ移る．

STEP5：目的関数値(利益)を計算して，代替案と目的関数値のリストを作成する．

STEP6：すべての代替案について処理したら，STEP5で得たリストを目的関数値の大きいものから順番に並べ替えて計算を終了する．目的関数値を最大とする代替案が最適解となる．

5.3.2 速力の決定

ここでは，速力と船型サイズの決定方法について述べる．まず，前項で行った求解手順での速力の決定方法について説明する．船舶の航行可能な速力の範囲は，船型サイズ毎に制約がある．船型サイズの代替案が与えられると，文献6で求めた当該船型サイズの平均速力を初期値とし，式(5-16)を用いて投入隻数を計算する．次に，求まった投入隻数の少数点部分を切り上げおよび切り捨てし，2つの投入隻数を得る．そして，それら2つの値を式(5-17)にそれぞれ代入して速力を求める．求まった2つの速力のうち，文献5に記載されている同型船の最低速力から最高速力の範囲に入っている方を航行速力とする．もし，2つとも範囲内であれば，利益の大きい方を航海速力とする．

$$F = FRQ \cdot \left(\frac{DIST}{24 * v} + IDLE \right) / YER \tag{5-16}$$

$$v = DIST / \left\{ 24 * \left(F \cdot \frac{YER}{FRQ} - IDLE \right) \right\} \tag{5-17}$$

$$IDLE = \left\{ \sum_{i \in N^k} \left(e_i HL_i^{t,k} + f_i \right) + \sum_{j \in N^k} \left(e_j HU_j^{t,k} + f_j^{'} \right) \right\} / 24 \qquad (5\text{-}18)$$

ここで,

$IDLE$ ：1航海中での寄港地における出入港時間と荷役時間の総計 (日)

YER ：年間稼動日数 (日)

ここでは364日とした

$HL_i^{t,k}$ ：寄港地代替案 k の t 期における港 i の積み荷役量 (TEU)

$HU_j^{t,k}$ ：寄港地代替案 k の t 期における港 j の揚げ荷役量 (TEU)

なお，荷役量には空コンテナ分も含める

e_i ：港 i での1TEU当たりの荷役時間 (時間/TEU)

e_j ：港 j での1TEU当たりの荷役時間 (時間/TEU)

f_i ：港 i での出港に要する時間 (時間)

$f_j^{'}$ ：港 j での入港に要する時間 (時間)

なお, 入出港および荷役に要する時間に関するパラメータは港毎に区別せず一律とし，入出港の各所要時間は1回につき2.0 (時間)，1TEUあたりの荷役時間は実入り，空を問わず0.042 (時間/TEU)とする.

本モデルを拡張して, モデル中で取扱貨物量の規模から内生的に船型サイズを決定することも可能である. しかし, 輸送量が最大となるリンクに合わせて船型サイズを決定するのか, どの程度の積み残しを許容するのか等, といった一定の基準を設ける必要があるが, 現段階ではまだ検討するまでには至っていない. 今後の課題である.

5.4 モデルの適用事例

本問題の適用事例として東南アジア圏の定期航路計画を考える. 我が国と東南アジア諸国間の貿易量は, 北米や欧州航路と比較して多くない. したがって, 船社にとっていかに貨物量を確保するかが重要となるが, その反面, 航海距離が増えて費用を上昇させることから航路計画の立案は容易でない.

第5.4.2項では空コンテナの回送コストや荷役時間が航路形成に及ぼす影

響をみる．また，航路パターンの形成時に空コンテナの回送を考慮しない場合と，考慮する場合の2ケースについて航路計画を検討し，それらの利益を比較する．さらに，ペナルティコストが航路形成に及ぼす影響も分析する．

5.4.1 前提条件

本事例には以下の前提を設ける．

①対象とする港は7港とする．具体的には，東京，横浜，名古屋，神戸，香港，ポートケラン，シンガポールとする．起点港を東京，終点港をシンガポールとし，中間港は他の5港とする．本船はそれらの港間を往復航行することになる．

②計画する航路は，1船社が運航することとし，船者間の競合は明示的には取り扱わない．また，空コンテナの回送は本船を運航する船社が行うこととし，他社への委託はないものとする．

③各港湾間の貨物需要は，1年間(52週分)の流動量を与件とする．具体的なデータは，文献5～8および各港のホームページに記載されている月間流動データをもとに加工して作成する．

④投入船舶は，文献5に掲載されている平均船型サイズを考慮し，500, 1000, 1500, 2000TEUの計4つの船型サイズを想定する．

⑤通常，荷主はリードタイムを重視し，船社はできるだけこの要望に応えるようにスケジュールを組むことから，本船の1航海の所要日数には一定の制約を設ける．ここでは，文献6における類似航路の航海距離を考慮して21日とした．

⑥港間運賃率は，船社へのヒアリング調査および文献調査を行って入手した値を用いる．

⑦運航費および船費を求めるパラメータに関しては，投入船舶別，寄港地別に設定する．なお，入港費，荷役費に関しては港毎に区別せず一律とする．

⑧空コンテナの蔵置場所および回送元であるバンプールエリア，インランドデポの容量は，扱う空コンテナ数に対して十分大きいものとする．

ただし，前提条件⑧に関して，港の隣接地や背後圏に立地するバンプールエリアやインランドデポの容量は必ずしも十分ではなく，そのため，十分な空コンテナを需要地点に回送できず，空コンテナが不足する港が現実にはあろう．しかし，本研究では，本船の余席スペースが寄港地の空コンテナ需要に対して働く調節機能に注目することから，モデルが複雑となることを避けるため，このような強い前提条件を設けることとした．

ペナルティコストは，空コンテナを蔵置する場合，当該港に隣接するバンプールエリアへの搬入および蔵置コストとして20,000 (円/TEU), 回送してくる場合はインランドデポからの陸送による回送コストとして30,000 (円/TEU)と設定した．空コンテナの回送にかかる費用は一般に社外秘であるため，これらの値は船社へのヒアリング調査によって得られた大まかな値を港毎に区別せず一律に設定することとした．しかし，値の与え方によって，解への影響が大きいと考えられ，これらの値の妥当性については問題が残されている．今後の課題である．

5.4.2 適用結果

(1) 空コンテナの回送が航路形成に及ぼす影響

ここではまず，空コンテナの回送が航路形成に及ぼす影響をみるため，航路パターンの形成時に空コンテナの回送を考慮する場合と，考慮しない場合の2ケースについて比較する(以下，前者をCase1，後者をCase2とよぶ)．さらに，Case2で求めた航路パターンについて，次に空コンテナの回送を行うとして，Case1と同様に空コンテナの回送に関わるコストを目的関数に付加して利益の再計算を行う．これをCase3とよぶことにする．ここでは直接的には，Case1と3の利益を比較することになる．これら2つのケースの比較によって，空コンテナの回送を考慮せず求めた航路パターンを実際の航路に適用して空コンテナの回送を行うとした場合に，どのような影響を及ぼすのかを分析することができる．

次に，Case3の具体的な計算法について説明する．Case3の計算は，Case2で空コンテナの流動を考慮しないとして求めた，最適な航路パターンを与件

とし,空コンテナの流動によって発生するコストを目的関数に付加して利益を再計算する．つまり，このとき利益(目的関数値)は空コンテナを扱うことによって生じる船舶コストの増加分やペナルティコストが差し引かれたものとなる．

Case1と2について，船型サイズ別に最も利益の大きいものから上位5つの代替案に対して順に解1～5まで固有の解番号を付す．

先に，Case1の計算結果を示した表5.1をみる．船社の利益を最大とする解は1000TEUの解1となった．全体の傾向としては，船舶コストは船型サイズが大きくなるにつれて増大しているが，ペナルティコストは，船型サイズが大きくなるにつれて小さくなっている．

次に，Case2の計算結果を表5.2に示す．1000TEUが最適船型サイズとなった．Case1と比較すると多くの貨物を積み取っているので，運賃収入は大き

表5.1 Case1における解集合(実入りコンテナ+空コンテナ)

船型ｻｲｽﾞ (TEU)	解	寄港順序	利益 ($x10^6$円)	運賃収入 ($x10^6$円)	船舶ｺｽﾄ ($x10^6$円)	ﾍﾟﾅﾙﾃｨｺｽﾄ ($x10^6$円)	速力 (ノット)	投入隻数	航海距離 (マイル)
500	1	1-2-3-4-6-7-4-3-2-1	3373.1	6129.2	2734.2	21.9	17.5	3	6802
	2	1-2-3-4-6-7-3-4-2-1	3117.4	6129.2	2989.9	21.9	18.2	3	7072
	3	1-2-4-3-6-7-4-3-2-1	3117.4	6129.2	2989.9	21.9	18.2	3	7072
	4	1-2-3-4-6-7-4-2-3-1	3062.8	6129.2	3044.4	21.9	18.3	3	7127
	5	1-3-2-4-6-7-4-3-2-1	3062.8	6129.2	3044.4	21.9	18.3	3	7127
1000	1	1-2-3-4-5-7-4-3-2-1	3864.0	7408.1	3438.4	105.8	17.4	3	6272
	2	1-2-3-4-5-6-7-4-3-2-1	3852.5	8561.9	4569.8	139.6	20.1	3	6834
	3	1-2-3-4-5-7-6-4-3-2-1	3803.7	8561.9	4618.6	139.6	20.2	3	6834
	4	1-2-3-4-5-7-5-4-3-2-1	3700.3	7628.7	3897.3	31.0	18.2	3	6304
	5	1-2-3-4-5-6-7-5-4-3-2-1	3603.5	8848.8	5220.9	24.3	21.2	3	6866
1500	1	1-2-3-4-5-7-4-3-2-1	3350.3	7408.1	3967.1	90.8	17.4	3	6272
	2	1-2-3-4-5-6-7-4-3-2-1	3234.6	8561.9	5202.7	124.6	20.1	3	6834
	3	1-2-3-4-5-7-6-4-3-2-1	3183.9	8561.9	5253.4	124.6	20.2	3	6834
	4	1-2-3-4-5-7-5-4-3-2-1	3167.0	7628.7	4430.6	31.0	18.2	3	6304
	5	1-2-3-4-7-5-4-3-2-1	3054.2	7368.5	4221.6	92.6	17.7	3	6272
2000	1	1-2-3-4-5-7-4-3-2-1	2938.9	7408.1	4393.5	75.8	17.4	3	6272
	2	1-2-3-4-5-6-7-4-3-2-1	2765.9	8561.9	5686.4	109.6	20.2	3	6834
	3	1-2-3-4-5-7-5-4-3-2-1	2747.2	7628.7	4850.5	31.0	18.2	3	6304
	4	1-2-3-4-5-7-6-4-3-2-1	2714.2	8561.9	5738.1	109.6	20.2	3	6834
	5	1-2-3-4-7-5-4-3-2-1	2639.2	7368.5	4651.7	77.6	17.7	3	6272

1: 東京, 2: 横浜, 3:名古屋, 4: 神戸, 5: 香港, 6: ポートケラン, 7: シンガポール

表5.2 Case2における解集合(実入りコンテナのみ)

船型 ｻｲｽﾞ (TEU)	解	寄港順序	利益 (x10^{6}円)	運賃収入 (x10^{6}円)	船舶ｺｽﾄ (x10^{6}円)	ﾍﾟﾅﾙﾃｨｺｽﾄ (x10^{6}円)	速力 (ノット)	投入隻数	航海距離 (マイル)
500	1	1-2-3-4-6-7-4-3-2-1	3564.3	6129.2	2564.9	-	17.0	3	6802
	2	1-2-3-4-6-7-3-4-2-1	3322.3	6129.2	2806.9	-	17.7	3	7072
	3	1-2-4-3-6-7-4-3-2-1	3322.3	6129.2	2806.9	-	17.7	3	7072
	4	1-2-3-4-6-7-4-2-3-1	3270.7	6129.2	2858.6	-	17.8	3	7127
	5	1-3-2-4-6-7-4-3-2-1	3270.7	6129.2	2858.6	-	17.8	3	7127
1000	1	1-2-3-4-5-7-6-5-4-3-2-1	4723.5	8848.8	4125.3	-	19.6	3	6866
	2	1-2-3-4-5-6-7-5-4-3-2-1	4723.5	8848.8	4125.3	-	19.6	3	6866
	3	1-2-3-4-5-7-6-4-3-2-1	4615.8	8561.9	3946.1	-	19.1	3	6834
	4	1-2-3-4-5-6-7-4-3-2-1	4615.8	8561.9	3946.1	-	19.1	3	6834
	5	1-2-3-4-6-7-5-4-3-2-1	4600.7	8540.6	3939.9	-	19.0	3	6834
1500	1	1-2-3-4-5-7-6-5-4-3-2-1	4127.7	8848.8	4721.0	-	19.6	3	6866
	2	1-2-3-4-5-6-7-5-4-3-2-1	4127.7	8848.8	4721.0	-	19.6	3	6866
	3	1-2-3-4-5-7-6-4-3-2-1	4037.0	8561.9	4524.9	-	19.1	3	6834
	4	1-2-3-4-5-6-7-4-3-2-1	4037.0	8561.9	4524.9	-	19.1	3	6834
	5	1-2-3-4-7-6-5-4-3-2-1	4022.5	8540.6	4518.1	-	19.0	3	6834
2000	1	1-2-3-4-5-7-6-5-4-3-2-1	3674.5	8848.8	5174.2	-	19.6	3	6866
	2	1-2-3-4-5-6-7-5-4-3-2-1	3674.5	8848.8	5174.2	-	19.6	3	6866
	3	1-2-3-4-5-7-6-4-3-2-1	3592.9	8561.9	4968.9	-	19.1	3	6834
	4	1-2-3-4-5-6-7-4-3-2-1	3592.9	8561.9	4968.9	-	19.1	3	6834
	5	1-2-3-4-7-6-5-4-3-2-1	3578.7	8540.6	4961.9	-	19.0	3	6834

1: 東京, 2: 横浜, 3:名古屋, 4: 神戸, 5: 香港, 6: ポートケラン, 7: シンガポール

くなっている.ここでは目的関数に含まれる空コンテナに関する変数を除外して利益を計算しているので,Case1よりも船舶コストは小さくなっている.また，ペナルティコストは発生しない.

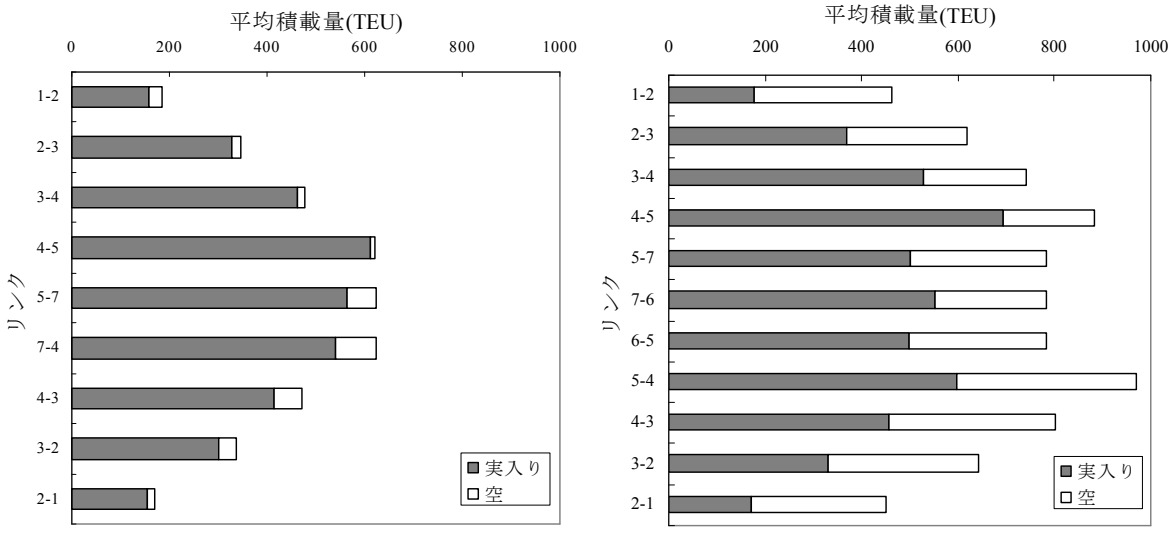
続いて，Case3の計算結果を表5.3に示す．解番号はCase2で付した番号をそのまま用いた．こちらのケースも1000TEUが最適船型サイズとなった．Case3では1航海の所要日数に空コンテナの荷役時間も含めて計算されることから，1航海の所要日数を守るために，本船は速力を上昇させてスケジュールを維持することになる．つまり，Case2では空コンテナの回送は考慮していないので，空コンテナの荷役時間，荷役費やペナルティコストは発生しない．Case2で求めた航路パターンは，Case3での計算において空コンテナの流動を組み込まれることになるので，速力上昇によって運航費は増大し，ペナルティコストも付加されることになって利益を減ずることになる.

海上コンテナ輸送を1つのシステムとして捉えるならば，空コンテナの回

表5.3 Case3における解集合(実入りコンテナ+空コンテナ)

船型 ｻｲｽﾞ (TEU)	解	寄港順序	利益 (x10^{6}円)	運賃収入 (x10^{6}円)	船舶ｺｽﾄ (x10^{6}円)	ﾍﾟﾅﾙﾃｨｺｽﾄ (x10^{6}円)	速力 (ノット)	投入隻数	航海距離 (マイル)
500	1	1-2-3-4-6-7-4-3-2-1	3373.1	6129.2	2734.2	21.9	17.5	3	6802
	2	1-2-3-4-6-7-3-4-2-1	3117.4	6129.2	2989.9	21.9	18.2	3	7072
	3	1-2-4-3-6-7-4-3-2-1	3117.4	6129.2	2989.9	21.9	18.2	3	7072
	4	1-2-3-4-6-7-4-2-3-1	3062.8	6129.2	3044.4	21.9	18.3	3	7127
	5	1-3-2-4-6-7-4-3-2-1	3062.8	6129.2	3044.4	21.9	18.3	3	7127
1000	4	1-2-3-4-5-6-7-4-3-2-1	3852.5	8561.9	4569.8	139.6	20.1	3	6834
	3	1-2-3-4-5-7-6-4-3-2-1	3803.7	8561.9	4618.6	139.6	20.2	3	6834
	2	1-2-3-4-5-6-7-5-4-3-2-1	3603.5	8848.8	5220.9	24.3	21.2	3	6866
	5	1-2-3-4-6-7-5-4-3-2-1	3594.7	8540.6	4804.8	141.1	20.4	3	6834
	1	1-2-3-4-5-7-6-5-4-3-2-1	3421.4	8848.8	5403.0	24.3	21.5	3	6866
1500	4	1-2-3-4-5-6-7-4-3-2-1	3234.6	8561.9	5202.7	124.6	20.1	3	6834
	3	1-2-3-4-5-7-6-4-3-2-1	3183.9	8561.9	5253.4	124.6	20.2	3	6834
	2	1-2-3-4-5-6-7-5-4-3-2-1	2947.3	8848.8	5884.8	16.6	21.3	3	6866
	5	1-2-3-4-7-6-5-4-3-2-1	2762.2	8540.6	5650.9	127.5	20.6	3	6834
	1	1-2-3-4-5-7-6-5-4-3-2-1	2757.5	8848.8	6074.6	16.6	21.5	3	6866
2000	4	1-2-3-4-5-6-7-4-3-2-1	2765.9	8561.9	5686.4	109.6	20.2	3	6834
	3	1-2-3-4-5-7-6-4-3-2-1	2714.2	8561.9	5738.1	109.6	20.2	3	6834
	2	1-2-3-4-5-6-7-5-4-3-2-1	2464.8	8848.8	6367.3	16.6	21.3	3	6866
	5	1-2-3-4-7-6-5-4-3-2-1	2284.3	8540.6	6143.8	112.5	20.7	3	6834
	1	1-2-3-4-5-7-6-5-4-3-2-1	2271.1	8848.8	6561.1	16.6	21.5	3	6866

1: 東京, 2: 横浜, 3:名古屋, 4: 神戸, 5: 香港, 6: ポートケラン, 7: シンガポール



(1) 解1　　(2) 解5

図5.4 解1と5における各リンクの平均積載量(1000TEU船)

送を考慮した航路計画は，考慮しない航路計画よりも，全体最適に一歩近づくことになる．多くの既存研究では，これまで空コンテナの回送という負の経済を無視してきた．しかしながら，現実問題では多かれ少なかれ空コンテナの回送は必要であり，その費用は誰かが負担しなければならないことを考えると，Case1とCase3の比較は意義あるものと考える．

(2) ペナルティコスト係数が航路形成に及ぼす影響

ここで，Case1において最適船型サイズとなった1000TEUの解1と5のリンク毎の平均積載量を求め，図5.4に示す．解1は，空コンテナの荷役費や荷役時間を避けるためにペナルティコストを選択した航路パターンとなっている．逆に，解5はペナルティコストを避けるために本船の余席で空コンテナを回送する航路パターンとなっていることがわかる．このように航路パターンは，空コンテナの荷役費や荷役時間を回避しようとする航路とペナルティコストを回避しようとする航路に大別できる．全計画期間における解1のペナルティの対象となるコンテナ数の内訳は，蔵置コンテナ数は441TEU，回送コンテナ数は3,232TEUとなり，解5ではそれぞれ962TEU，169TEUとなった．

次に，これらの相違点を踏まえ，ペナルティコスト係数を上昇させた際の航路形成への影響をみる．本研究で定義しているペナルティコスト係数は，船社毎にその捉え方が異なると考える．例えば，空コンテナの調達が困難な港があれば，船社は遠方からの調達のために回送コストが高くつくし，逆にバンプールエリアが手狭で空コンテナを蔵置するスペースに制約がある場合も考えられるからである．

具体的な計算は，船社が特に問題視していると思われる空コンテナの回送に関わるペナルティコスト係数 b_i を1倍(現状値)～4倍まで段階的に変化させて感度分析を行った．その結果を表5.4に示す．ペナルティコスト係数が上昇するにつれてペナルティコストの大きい代替案の順位は下降していき，逆にそれが小さい代替案の順位は上昇していくことがわかる．このことから，ペナルティコスト係数の上昇にしたがって，本船によって円滑に空コンテナの回送を行うことのできる航路が優位となっていくことがわかる．

表5.4 ペナルティコスト係数の上昇に伴う解の優位性(1000TEU船)

ﾍﾟﾅﾙﾃｨｺｽﾄ倍率	解	寄港順序	利益 (x10^{6}円)	運賃収入 (x10^{6}円)	船舶ｺｽﾄ (x10^{6}円)	ﾍﾟﾅﾙﾃｨｺｽﾄ (x10^{6}円)	速力 (ノット)	投入隻数	航海距離 (マイル)
x1	1	1-2-3-4-5-7-4-3-2-1	3864.0	7408.1	3438.4	105.8	17.4	3	6272
	2	1-2-3-4-5-6-7-4-3-2-1	3852.5	8561.9	4569.8	139.6	20.1	3	6834
	3	1-2-3-4-5-7-6-4-3-2-1	3803.7	8561.9	4618.6	139.6	20.2	3	6834
	4	1-2-3-4-5-7-5-4-3-2-1	3700.3	7628.7	3897.3	31.0	18.2	3	6304
	5	1-2-3-4-5-6-7-5-4-3-2-1	3603.5	8848.8	5220.9	24.3	21.2	3	6866
x2	1	1-2-3-4-5-7-4-3-2-1	3767.0	7408.1	3438.4	202.7	17.4	3	6272
	2	1-2-3-4-5-6-7-4-3-2-1	3722.6	8561.9	4569.8	269.5	20.1	3	6834
	4	1-2-3-4-5-7-5-4-3-2-1	3700.3	7628.7	3897.3	31.0	18.2	3	6304
	3	1-2-3-4-5-7-6-4-3-2-1	3673.8	8561.9	4618.6	269.5	20.2	3	6834
	5	1-2-3-4-5-6-7-5-4-3-2-1	3598.4	8848.8	5220.9	29.4	21.2	3	6866
x3	4	1-2-3-4-5-7-5-4-3-2-1	3700.3	7628.7	3897.3	31.0	18.2	3	6304
	1	1-2-3-4-5-7-4-3-2-1	3670.0	7408.1	3438.4	299.7	17.4	3	6272
	5	1-2-3-4-5-6-7-5-4-3-2-1	3593.4	8848.8	5220.9	34.5	21.2	3	6866
	2	1-2-3-4-5-6-7-4-3-2-1	3592.6	8561.9	4569.8	399.4	20.1	3	6834
	3	1-2-3-4-5-7-6-4-3-2-1	3543.8	8561.9	4618.6	399.4	20.2	3	6834
x4	4	1-2-3-4-5-7-5-4-3-2-1	3700.3	7628.7	3897.3	31.0	18.2	3	6304
	5	1-2-3-4-5-6-7-5-4-3-2-1	3588.3	8848.8	5220.9	39.5	21.2	3	6866
	1	1-2-3-4-5-7-4-3-2-1	3573.1	7408.1	3438.4	396.7	17.4	3	6272
	2	1-2-3-4-5-6-7-4-3-2-1	3462.7	8561.9	4569.8	529.4	20.1	3	6834
	3	1-2-3-4-5-7-6-4-3-2-1	3413.9	8561.9	4618.6	529.4	20.2	3	6834

1: 東京, 2: 横浜, 3:名古屋, 4: 神戸, 5: 香港, 6: ポートケラン, 7: シンガポール

5.5 本章のまとめ

本研究では,空コンテナの回送を考慮したコンテナ船の航路計画に関するモデルの構築を行った．さらに，本船による空コンテナの回送にかかる費用や荷役時間が航路形成に与える影響を分析するため,モデルを東南アジア航路へ適用した．主な成果は以下の通りである．ただし，第5.2.2項と第5.4.1項で述べたように強い前提条件を設けた下での分析であるため,得られた結論は限定的なものであることに注意が必要である.

①本船による空コンテナの回送を明示的に取り扱い,複雑な寄港順序も考慮した航路計画に関するモデルを構築した.

②本研究で提案するモデルを東南アジア航路へ適用した結果,貨物需要に実入りコンテナのみを与件として求めた最適航路は,空コンテナの回送

を考慮するとして再計算した場合，必ずしも船社の利益を最大とする航路とはならないことがわかった．つまり，Case2において実行可能解として求まった航路パターンは，Case3で空コンテナの回送を考慮することとして再計算されると，スケジュール維持のための速力上昇によって運航費が増加すること，そして，ペナルティコストがかかることから解順位は下降する．また，現実的な速力で航行できなくなって実行可能解とならないものもあると考える．

③ペナルティコストの上昇が本船による空コンテナの回送を促す要因となることがわかった．具体的には，ペナルティコストを大きく見積もる船社は，本船の余席を使った空コンテナの回送が円滑に行える航路パターンを選択すると考えられる．

ここで，海上コンテナ輸送を1つのシステムとして捉えると，空コンテナの回送を考慮した航路計画は，考慮しない航路計画よりも，全体最適に一歩近づくとことになる．現実問題では多かれ少なかれ空コンテナの回送は必要であり，その費用は誰かが負担しなければならないことを考えると，空コンテナの回送を明示的に取り扱った航路計画は必要である．

今後の課題として，次のようなことが挙げられる．

①ペナルティコストの与え方によって，解は大きく影響を受けることが考えられる．

②バンプールエリア，インランドデポの容量を無限大，そして，無限にコンテナが存在し利用可能であると仮定しているが，現実問題ではそれらの容量は有限である．

③空コンテナが不足した場合に，船社にとって，リースで調達するのがよいか，それとも自社船による回送によって調達するのがよいか，といった明確な判断材料を示す必要がある．

④現実規模で航路計画を考える場合，多数の寄港地を想定することになるので，効率的な求解アルゴリズムを採用する必要がある．

⑤貨物需要は他社との競合，荷主との戦略的均衡の結果として得られた需

要としている．しかし，実際は船社の戦略やサービス水準および船社間の競合によっても需要は変動すると考えられる．

第5章に関する参考文献

1) 新谷浩一, 今井昭夫, 西村悦子: 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・ルーチング問題, 日本航海学会論文集, 第111号, pp.273-284, 2004.
2) 今井昭夫：輸送経路を考慮した2目的ターミナル立地問題, 土木計画学研究・論文集, No.10, pp.239-246, 1992.
3) 今井昭夫：コンテナ輸送システムにおける設備計画の最適化に関する研究, 京都大学学位論文, 1989.
4) 仙波一郎：組み合わせアルゴリズム, サイエンス社, 1989.
5) 第2章, 文献13.
6) 第4章, 文献4.
7) United Nations: International Trade Statistics Yearbook, 1998.
8) Lambert, M. (Editor): Containerisation International Yearbook, Emap Business Communications, 1999.

第6章　遺伝的アルゴリズムによる空コンテナの回送を考慮したコンテナ船の航路計画に関する研究 [1)]

6.1　概説

第5章の研究では，解法として総当たり法を用いて航路計画を検討した．適用事例では，寄港候補地として7港を想定したが，現実問題ではさらに多くの港を計画の対象とすることも考えられる．しかし，ここで扱う航路計画問題は，寄港候補地数が増えるにつれて指数関数的に解の代替案の数が増大するという性質を持っている．そのため，総当たり法では現実的な計算時間での求解は困難であることに加え，コンピュータメモリの制約も大きい．そこで，本章では効率的に準最適解を求めることのできる遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて，航路計画を検討する．

第6.2節では，本章で扱う問題と第5章のそれとの相違点を述べた上で，定式化を行う．第6.3節では，本問題へのGAの適用方法や解法について述べる．第6.4節では，東南アジア航路を対象に，航路形成に影響を及ぼすと考えられる要因に着目し，いくつかのケーススタディを行う．

6.2　モデルの定式化

6.2.1　第5章と本章での定式化の相違点

本章で扱う問題は，基本的には第5章と同一の問題である．しかし，第5章の研究の定式化に対して以下のような改良の必要性が存在する．

①運賃収入や各コストの発生単位を明確にする．
②寄港候補地の中から最適な寄港地を決定する部分の記述を明確にする．
③船舶コストの中の船費を形成する各費用係数を妥当なものにする．
④ペナルティの対象となるコンテナの算出に関する部分の記述を明確にする．

そこで，以上の改良点を考慮して再度定式化を行う．具体的には，①については，運賃収入や各コストの発生単位を1航海あたりとして定式化を行う．②については，問題を上位問題と下位問題に分割して定式化する．下位問題[LP]はフロー問題の形態をとり，特定の寄港地グループに対して最適な寄港順序を決定するものである．上位問題[UP]はナップサック問題を簡略化した形態をとり，[LP]で求めた寄港順序を与件として，最適な寄港地グループを決定するものである．③は，多くの就航船舶は定期傭船によって運航されていることを考慮し，船型サイズ別の1日あたりの傭船費に関するデータを入手して，船舶コストの記述を変更する．この度入手できたデータはUSドル建てであり，他のデータに関してもUSドル建てのものが入手しやすいことを考慮し，運賃収入や各コストはUSドル単位を採用することとした．④については，ペナルティの対象となるコンテナの算出に関する定式化の表記を簡単化する．

6.2.2 モデルの定式化

本問題は，船社の利益を最大とする寄港地と寄港順序の組合せを決定する．この問題は，上位問題と下位問題に分割して定式化される．下位問題[LP]はフロー問題の形態をとり，特定の寄港地グループに対して最適な寄港順序を決定するものである．上位問題[UP]はナップサック問題を簡略化した形態をとり，[LP]で求めた寄港順序を与件として，最適な寄港地グループを決定するものである．

[UP]

$$Maximize \sum_{k \in V} Z^k \rho_k \tag{6-1}$$

subject to

$$\sum_{k \in V} \rho_k = 1 \tag{6-2}$$

$$\rho_k \in \{0,1\}, \qquad \forall k \in V \tag{6-3}$$

ここで,

V　：寄港地グループの集合であり

Z^k　：k番目の寄港地グループによる利益

ρ_k　：k番目の寄港地グループと，[LP]で決定された寄港順序が選ばれたとき1，そうでないとき0の値をとる決定変数

後述するように，寄港地グループが与えられると，[LP]では目的関数値Z^kで表される利益を最大とする寄港順序を決定する．[LP]での定式化を簡単にするため，目的関数をZとして表現する．したがって，[LP]は次のように定式化される．

[LP]

$$Maximize\ Z = R - C(\mathbf{y}) - P(\mathbf{y}) \tag{6-4}$$

subject to

$$\sum_{j\in N} y_{ij} - \sum_{j\in N} y_{ji} = 0, \qquad \forall i \in N \tag{6-5}$$

$$\sum_{i\in S}\sum_{j\notin S} y_{ij} \geq 1, \qquad \forall S \subset N \tag{6-6}$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \qquad \forall i,j \in N \tag{6-7}$$

$$\mathbf{y} = \left\{ y_{ij} \,\middle|\, i \in 1,...,N; j \in 1,...,N \right\} \tag{6-8}$$

ここで,

N　：$k \in V$に対応する寄港地ノードの集合

S　：Nの空でない部分集合

$C(\cdot)$　：船舶コスト関数

$P(\cdot)$　：ペナルティコスト関数

R　：運賃収入

y_{ij}　：リンク$i-j$にコンテナ船が就航するとき1，そうでないとき0の値をとる決定変数

式(6-4)は目的関数であり，運賃収入から船舶コストとペナルティコストを差し引いた利益の最大化を表す．式(6-5)はある港に入港したコンテナ船は必

ず他の港へ向かうことを保証する制約である．図4.2に示してあるとおり，港②を除く，港①～⑥までのNに含まれるすべての港がリンクによって結ばれている．式(6-6)は航路が部分巡回路に分割されないことを保証するものである．式(6-8)はコンテナ船の就航を意味するy_{ij}からなるベクトル$\mathbf{y}$を定義している．

ODペア間の運賃率が与えられると，発生する運賃収入は公表された運賃率と航路パターンの形態によって変化する輸送需要との積として定義される．

運賃収入Rは，

$$R = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} F_{ij} x_{ij} \tag{6-9}$$

と定義される．

ここで，

F_{ij}　：港$i-j$間の運賃率

x_{ij}　：港$i-j$間を輸送されるコンテナ貨物量

船舶コストは，投入船舶の船型サイズ，寄港地間の地理的条件や貨物需要の条件等が絡み合った中で相対的に決まるものである．したがって，それは航路の代替案ならびにリンク毎に異なると考え，コンテナ船が就航するすべてのリンクに関して合計したものと表現する．

(1) 船舶コスト関数

船舶コストは，運航費と船費の2つによって構成される．一般的に，船費は船舶自身に関するコストである．一方，運航費は燃料油費や港費からなる．それらのコストは次のように定義される．

$$C = CS + CP \tag{6-10}$$

$$CS = C^C + C^F \tag{6-11}$$

$$CP = C^E + C^H \tag{6-12}$$

ここで,

CS　：船舶関係コスト

CP　：港関係コスト

C^C　：その他の船舶コスト(航海距離に関係なく発生するコスト)

($C^C = C^M + C^D + C^R + C^I + C^P$)

C^D　：減価償却費

C^E　：入港費

C^F　：燃料油費

C^H　：荷役費

C^I　：保険料

C^M　：人件費

C^R　：金利

C^P　：修理修繕費

これらのコストの詳細を次に示す.

(a) 船舶関係コスト

ここでは,多数のコンテナ船は定期傭船されていることを考慮し,その他の船舶関係コストは定期傭船費で表現することとした.Drewryのレポート[2)]より,1日あたりの船型サイズ毎の定期傭船費(USドル/日)が得られる.そのデータに対して回帰分析を行うと,式(6-13)に示す回帰式が得られた.寄与率(R^2)は0.9982となって良好な結果となった.

$$C^{CD} = 6.54 * \mathrm{TEU} + 1422.52 \tag{6-13}$$

ここで,TEUはコンテナ船の輸送容量を示す.年間航海数は年間稼働日数と年間寄港頻度をもとにして求まる.また,次式に示すように1日あたりのその他の船舶関係コストC^{CD}と1航海の所要日数の積より,船舶関係コストC^Cが算出される.

1航海の所要日数は，航海日数と在港日数の和で表され，

$$\left(\frac{DIST}{24*v}+IDLE\right)$$

となる．したがって，船舶関係コストC^Cは，

$$C^C = C^{CD}\left(\frac{DIST}{24*v}+IDLE\right) \tag{6-14}$$

$$IDLE = \sum_{i\in N}\left\{\sum_{j\in N}\left(e_j+e_i\right)\left(w_{ji}+x_{ji}\right)+f_i+f_i^{'}\right\}/24 \tag{6-15}$$

となる．

ここで，

$DIST$ ：1航海の航海距離（マイル）

$$\left(DIST=\sum_{i\in N}\sum_{j\in N}Dist_{ij}y_{ij}\right)$$

$Dist_{ij}$ ：港$i-j$間の航海距離（マイル）

$IDLE$：在港時間（日）

e_i ：港iで1TEUあたりの荷役時間（時間）(実入り・空に関係なく)

$f_i, f_i^{'}$ ：入出港時のスタンバイ時間（時間）

w_{ji} ：港$j-i$間を運ばれる空コンテナ数（TEU）

v ：航海速力（ノット）

1航海の潤滑油費を含んだ燃料油費C^Fは，次式により定義される．

$$C^F = \frac{\left(C^{Fuel}R^{Fuel}+C^{Lub}R^{Lub}\right)\cdot DS^{\frac{2}{3}}\cdot v^2\cdot DIST}{A} \tag{6-16}$$

ここで，

C^{Fuel} ：燃料油単価（USドル/トン）

R^{Fuel} ：燃料油消費率（g/馬力/時間）

C^{Lub} ：潤滑油単価（USドル/トン）

R^{Lub}　：潤滑油消費率 (g/馬力/時間)

DS　：排水トン数 (トン)

A　：アドミラルティ係数

以上より，船舶コストは次式のようになる．

$$CS = C^{CD}\left(\frac{DIST}{24*v} + IDLE\right) + \frac{\left(C^{Fuel}R^{Fuel} + C^{Lub}R^{Lub}\right)\cdot DS^{\frac{2}{3}}\cdot v^2\cdot DIST}{A} \tag{6-17}$$

ここで，式(6-17)を速力vについて偏微分し，さらに右辺を0とおいて，その式をvについて展開すると，式(6-18)に示すように最適速力v*が求まる．

$$\frac{\partial CS}{\partial v} = -\frac{C^{CD}\cdot DIST}{24*v^2} + \frac{2*\left(C^{Fuel}R^{Fuel} + C^{Lub}R^{Lub}\right)\cdot DS^{\frac{2}{3}}\cdot v\cdot DIST}{A} = 0$$

$$-C^{CD}\cdot A + 48*\left(C^{Fuel}R^{Fuel} + C^{Lub}R^{Lub}\right)\cdot DS^{\frac{2}{3}}\cdot v^3 = 0$$

$$v^* = \left\{\frac{C^{CD}\cdot A}{48*\left(C^{Fuel}R^{Fuel} + C^{Lub}R^{Lub}\right)\cdot DS^{\frac{2}{3}}}\right\}^{\frac{1}{3}} \tag{6-18}$$

式(6-18)から速力vを変化させたときの船舶関係コストは図6.1のようになる．

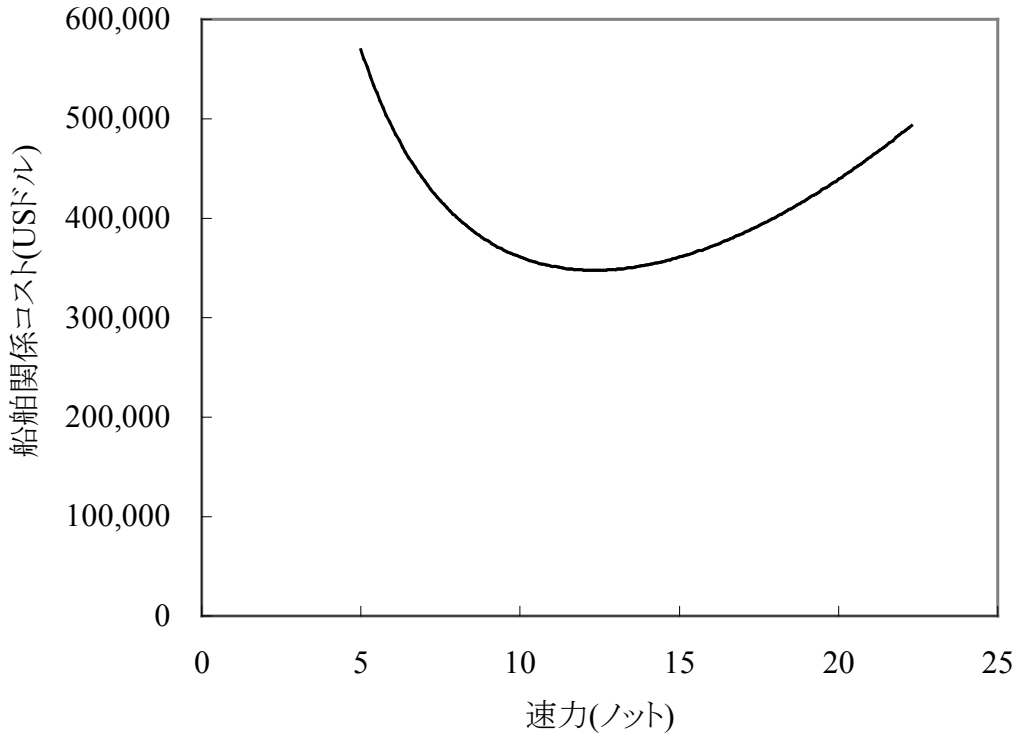


図6.1 速力の変化に伴う船舶関係コスト

図6.1をみると，最適速力を境に速力が遅い場合も速い場合も船舶関係コストは上昇することがわかる．

(b) 港関係コスト

入港コストは式(6-19)のように定義される．

$$C^E = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} Q_i y_{ij} \tag{6-19}$$

ここで，Q_iは港iにおける入港費である．選択されたリンク$i-j$は2つの港に関連するものであるが，ここでは入港時のみコストが発生すると考える．

荷役費C^Hは，各寄港地における実入りコンテナと空コンテナの両方の荷役によって発生する．本研究では，寄港地の貨物需要は必ず満たすとしていることから，荷役費はすべての寄港地の荷役費を合算したものとなるので次式のようになる．

$$C^H = \sum_{i \in N} H_i \sum_{j \in N} \left(x_{ij} + x_{ji} + w_{ij} + w_{ji} \right) \tag{6-20}$$

ここで，H_i は港 i における1TEUあたりの荷役費である．

(2) ペナルティコスト関数

本研究では，寄港地間の空コンテナの回送を考慮した最適な航路形態を考える．船社は，輸出入のインバランスによって多数の空コンテナの回送を余儀なくされている．このインバランスは，①空コンテナが余っている地点での蔵置，あるいは②そこから不足している地点への回送，ならびに③急な要求に対するリースコンテナの借り入れに関わる活動に対していくらかのコストを発生させる．本研究では，①と③をペナルティコストと定義する．これらの活動は直接的に船社の利益に結びつかない．したがって，自社船の余席で空コンテナの回送を行える場合には，ペナルティコストは発生しないと仮定する．

ペナルティコスト関数 P は，図6.2に示すように仮想的な寄港順序を用いて以下のように定式化される．

$$P = \sum_{i \in NV} \left(a_i ST_i + b_i LS_i \right) \tag{6-21}$$

$$E_i = \max\{P_i - D_i, 0\}, \qquad \forall i \in NV \tag{6-22}$$

$$S_i = \max\{D_i - P_i, 0\}, \qquad \forall i \in NV \tag{6-23}$$

$$LS_i = S_i - \sum_{j \in B^i} w_{ji}, \qquad \forall i \in NV \tag{6-24}$$

$$ST_i = E_i - \sum_{j \in L^i} w_{ij}, \qquad \forall i \in NV \tag{6-25}$$

$$\sum_{p \in M^i} \sum_{q < p} \left(x_{pq} + w_{pq} \right) \le CAP, \qquad \forall i \in N \tag{6-26}$$

ここで,

a_i ：港iにおける蔵置コスト (USドル/TEU)

b_i ：港iにおけるリースコスト (USドル/TEU)

LS_i ：港iにおけるリースコンテナ数 (TEU)

ST_i ：港iにおける蔵置コンテナ数 (TEU)

NV ：仮想的な寄港順序におけるノード集合

D_i ：港iにおける発生貨物量 (TEU)

P_i ：港iにおける集中貨物量 (TEU)

E_i ：港iにおける空コンテナの余剰数 (TEU)

S_i ：港iにおける空コンテナの不足数 (TEU)

B^i ：港iの前に寄港する港の集合 (NVの部分集合)

L^i ：港iの後に寄港する港の集合 (NVの部分集合)

M^i ：オリジナルな寄港順序において港1として表現される港iの仮想的な寄港順序を構成する港の集合

CAP ：コンテナ船の輸送容量 (TEU)

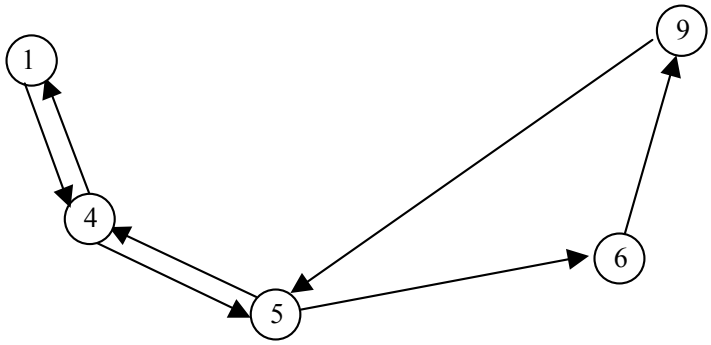
式(6-22)は余剰コンテナを定義している．もし，$P_i - D_i$が負であるなら，港iにおいて余剰コンテナは存在しないので，E_iは0の値をとる．そうでなければ，E_iは$P_i - D_i$の値をとることになる．式(6-23)では不足コンテナを定義している.式(6-24)は港iにおいて借り入れられるリースコンテナ数を定義している．逆に，式(6-25)は港iにおいて蔵置されるコンテナ数を定義している．不等式(6-26)は空コンテナが本船の余席スペースを用いて運ばれることを保証するものである.

図6.2(2)は，図6.2(1)に示しているオリジナルな寄港順序を仮想的な寄港順序に変換したものを表している．仮想的な寄港順序は，オリジナルな寄港順序において1回以上寄港するノードを，往航と復航でそれぞれ異なるノードとして表現するものである．仮想的な寄港順序におけるノード集合はNVと表現される．不等式(6-26)のM^iは，オリジナルな寄港順序において港iから出発するノードの集合である．図6.2では，5つの港を例にとった場合のM^iを示している．M^4は図6.2(2)における港1に対応する，図6.2(1)の港4のための仮想的なノードも含んでいる．仮想的な寄港順序では，実入り，空に関係な

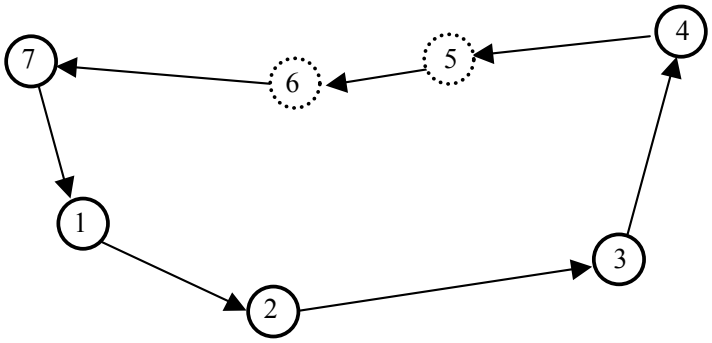
N = {1, 4, 5, 6, 9}

オリジナルな寄港順序	4	5	6	9	5	4	1
仮想的な寄港順序	1	2	3	4	5	6	7

M^4 = {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7}



(1) オリジナルな寄港順序



(2) 仮想的な寄港順序

図 6.2 寄港順序の変換

く，起点港からそれよりも小さい港番号を持つ他港へのコンテナ輸送は仮想的な寄港順序における港1を通ることになる．図6.2(1)において，i=4のとき，2つの往復航のパターンが存在する．すなわち，1つ目は(4→5→6→9→5→4→1)であり，2つ目は(4→1→4→5→6→9→5)である．それらは，仮想的な寄港順序で表現すると，(1→2→3→4→5→6→7)となる．なお，このようなケースがある場合は，それぞれの往復航パターンについて不等式(6-26)を満たしているかどうか調べる必要がある．

6.3 遺伝的アルゴリズムを用いた解法

6.3.1 解法の概要

ここでは，組合せ最適化問題である本問題の解法について述べる．第6.2.2項で定義した上位問題[UP]はナップサック問題であり，NP-完全問題の部類に属する[3]．また，下位問題[LP]は本章ではフロー問題として定式化しているが，第5章における研究の定式化で示したように集合分割問題としても定式化が可能である．集合分割問題はNP-困難問題の部類に属することから，本問題は現実的な計算時間で最適解を求めることが困難であることがわかる．したがって，本研究では組合せ最適化問題のヒューリスティック解法としての一定の評価が得られているGAを採用して，準最適解を求める手法を検討する．

GAを用いれば，[UP]と[LP]の求解を同時に行うことができる．また，GAは全体の繰り返し計算の中での各世代(Generation)において，交叉(Crossover)と突然変異(Mutation)の処理を行い，後世代によい解を残すように計算が進められる．一般的な遺伝的操作には，これら交叉と突然変異という2つの方法がとられる．交叉は次世代のために子(Offspring)を生成し，突然変異はいくつかの染色体(Chromosome)の一部をランダムに入れ替えて個体に多様性を持たせる[4]．複数世代にわたって特定の個体(解)が生き残ることは，[UP]と[LP]で求めた特定の寄港地と寄港順序の組合せが他の個体と比較して優れている(利益が大きい)傾向を示していることになる．

ここで，GAの基本的な仕組みを図6.3に示す．

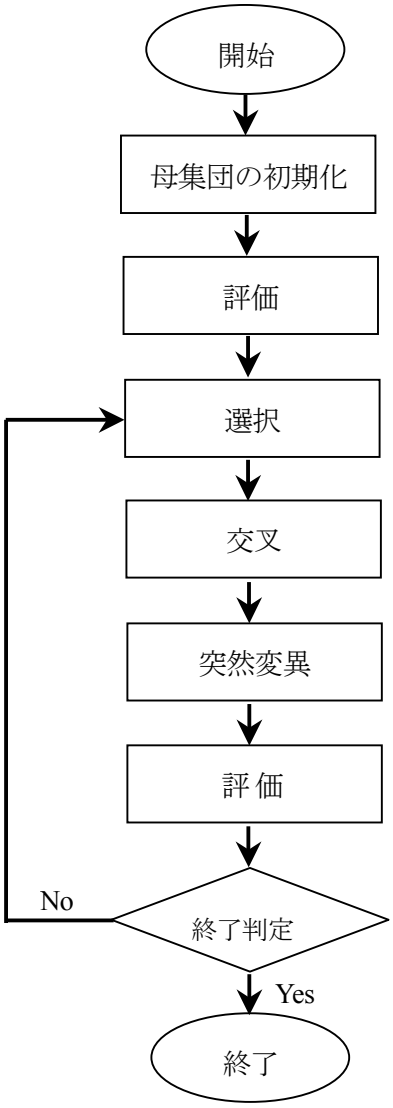


図6.3 GAの基本的な仕組み

GAのアルゴリズムの計算手順を図6.3に対応させて次に示す.

STEP1：最初にランダムに個体を生成する･･･[母集団の初期化]

STEP2：各個体の適合度を計算する･･･[評価]

STEP3：STEP2の適合度をもとにしてで次世代に残す個体を選ぶ･･･[選択]

STEP4：選ばれた個体の中から任意の2つの個体を親とし，親の一部分を受け継いだ子を生成する･･･[交叉]

STEP5：ある一定の確率でもって個体の多様性を保持するために，任意の個体に対して遺伝子の一部をランダムに入れ替える･･･[突然変異]

STEP6：各個体の適合度を計算する･･･[評価]

STEP7：終了の条件を満たしていれば計算は終了．満たしてなければSTEP3の[選択]に戻って再度一連の作業を繰り返す･･･[終了判定]

寄港地と寄港順序の組合せからなる解を表現するため，個体を表す染色体を設計する必要がある．ここでは，稲垣ら[5)]の表現方法を本問題に適応させるために改造を施す．具体的な染色体の表現方法は次項で述べる．

6.3.2 個体表現

本問題では，染色体は古典的なバイナリではなく，キャラクタによって表現される．この問題は典型的なルーチング問題であるが，巡回セールマン問題(Traveling Salesman Problem, TSP)とは異なる．つまり，全ての港に寄港しなくてもよいという前提があることから，TSPと同じ表現型を用いると致死遺伝子が発生することになって，よりよい解を探索できなくなる恐れがある．染色体の長さは，中間港を経由した起終点港間を往復航する航路を表記できる長さ，すなわち，(2×寄港候補地数－2)個のセルを持つ1次元配列を用意することになる．また，各セル番号とセルには港に対応するノード番号が入る．図6.4には，第5章の図5.2に対応させた例を示す．ここで，復航に関するノードを往航と区別するためにダミーノード(7, 8, 9, 10, 11)を設ける．したがって，例えば港5は，港5と港7とに表現されることになる．染色体の中身は，ノードmからnへ行くリンクがある場合は，m番目の遺伝子座(Locus)にnという数字が入る．それは，起点ノードから終点ノードに至るまで繰り返し表示される．使用されない遺伝子座が存在する場合は，そのノードから延びる使用可能なリンクを形成しているいずれかのノードがランダムに選ばれて格納される．親となる個体，ならびに親から生成される子の個体は，ともに完結する経路となる必要がある．

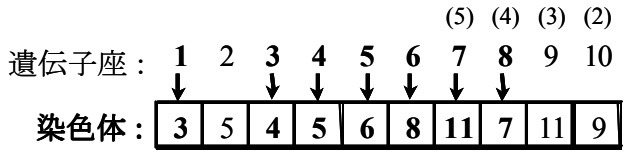


図6.4 個体の表現例

6.3.3 選択と適合度

選択とは，次世代にどの個体を残すのかを検討する部分である．優れた個体は次世代に残りやすくなり，劣った個体は淘汰されることになる．適合度は，交叉のために個体群の中から任意の2つの親を選ぶ際の基準となる．適合度の値は，個体群におけるある個体の優劣を示すもので，ここでは目的関数値，つまり船社の利益とする．選択の方法として，エリート保存とルーレット戦略の2つを採用する．前者は，適合度の上位2つの個体を無条件で次世代に引き継ぐもので，後者は残りの個体の中で個体を確率的に選択するものである．

6.3.4 交叉

交叉によって得られた個体は，完結する経路を表現していなければならない．そこで図6.5に示すような交叉を行う．ここで，親を親1，親2とし，1つ目の子を子1とする．経路はそれぞれのセルの右側に示す．まず，初期集団からルーレット選択によって選ばれた2つの親個体より1つ目の子を生成する．選ばれた2つの親個体から起点港の港番号に対応したセルにある港番号からランダムにどちらか一方を選択して，子の同じセルに格納する．格納された港番号と同じ番号について2つの親のセルにある港番号のうちからランダムにどちらか一方を選択し，子の同じセルに格納する．これを最終的に港11(港1のダミーノード)に達するまで繰り返す．経由しなかった港番号については，2つの親の遺伝子のうち，どちらか一方をランダムに選択して格納する．2つ目の子に関しても同様の操作を行う．なお，致死遺伝子を持つ個体が生成された場合は再度，交叉をやり直す．

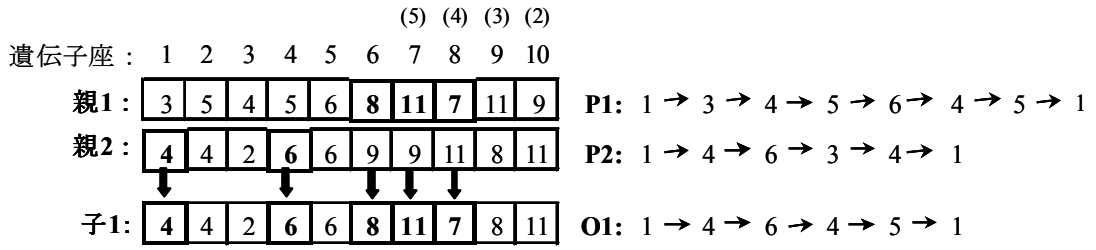


図6.5 交叉

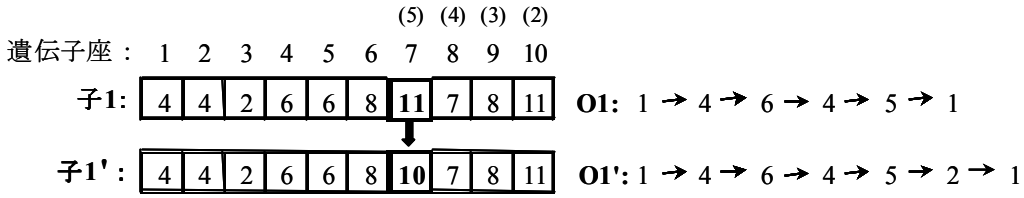


図6.6 突然変異

6.3.5 突然変異

突然変異は，図6.6に示すようにセルからランダムに1つの遺伝子を選択するものである．次に，選択された遺伝子の経由するノードから，ランダムに選択された遺伝子を下段の同じセルへ格納する．致死遺伝子を持つ個体が生成された場合は再度，突然変異をやり直す．

6.4 モデルの適用事例

6.4.1 パラメータの設定

本問題で扱うGAに対し，Fortran77を用いて専用のプログラムを開発し，DELL社のDimension 8250 (2.40GHz Pentium IV)を用いて数値計算を行う．GAの解精度を確認するために寄港候補地数を5～8港とした小規模問題を作成し，総当たり法で求めた解と比較した．その結果，それら全ての問題について最適解が得られた．しかし，今回は9港以上の問題についてはコンピュータのメモリ領域の制約により数値計算が行えなかったので，比較は不可能であった．

例えば，寄港候補地数を8港としたときの総当たり法とGAによる計算時間

は，それぞれ29,610.4秒と120.0秒(初期個体群の生成に要する時間は含まない)であった．本問題は，寄港候補地数が増えるにつれて，解の代替案の数が指数関数的に増大する性質を持つことから，寄港候補地数が増えると，それらの計算時間の差はさらに大きくなることが容易に想像できる．

次章では，本章で開発したモデルをさらに改良して，自社コンテナの保有規模を考慮した問題を検討する．そこでは，寄港候補地を20港と想定して計算を行うが，その準備として，本適用事例ではGAパラメータの推定を行った．多くの予備実験を行ったところ，その中で最もよい解が得られたパラメータの組合せを採用し，次のように各種パラメータを設定することとした．

①選択：ルーレット選択＋エリート保存戦略
②個体群サイズ：300
③最大世代数：200
④交叉確率：0.9
⑤突然変異率：0.08

6.4.2 ケーススタディ

ここでは，空コンテナの回送が航路形成に与える影響について，2つの要因に着目して数値実験を行う．

まず1つ目の要因は，ペナルティコスト係数(a_i, b_i：蔵置およびリースコスト)の影響である．船社は今日，空コンテナの取り扱いに関するコストを重要視している．また，船社毎に空コンテナの回送にかかるコストの捉え方は異なる．したがって，ここではペナルティコスト係数を現状値，現状値の2倍，現状値の4倍というように3段階に変化させて感度分析を行う．なお，本研究で用いるペナルティコスト係数は，船社へのヒアリング調査をもとに大まかな値を設定したが，値の妥当性については今後の課題としたい．

2つ目の要因は，航路パターンの形成時に本船による空コンテナの回送をモデル中に組み込む場合と，そうでない場合における影響である．つまり，最適な航路パターンを形成する際に実入りコンテナと空コンテナの両方の流動を考慮する場合と，空コンテナの流動を無視して実入りコンテナのみを

考慮する場合の2つのケースから得られる利益を比較する．前者をCase1，後者をCase2とよぶことにする．(第5章でいうところのCase1と3は，ここではそれぞれCase1と2にあたる)

ここで，Case2の具体的な計算法について説明する．Case2は定式化における変数w_{ij}と目的関数中のペナルティコストの部分を含まない，つまり空コンテナの流動を無視した状態でGAによって最適な航路パターンを求める(これを第1段階の計算とよぶ)．当然，このとき目的関数値には空コンテナを扱うことによって生じる空コンテナの荷役コストやペナルティコスト等は含まない．次に，その計算によって求まった航路パターンを与件として，空コンテナの回送を行うとする．それによって発生するコストを目的関数に付加して利益を再計算する(これを第2段階の計算とよぶ)．これら2つのケースの比較によって，空コンテナの回送を考慮せず求めた航路パターンを実際の航路に適用して空コンテナの回送を行うとした場合に，どのような影響を及ぼすのかを分析することができる．

定期運航されるコンテナ船はスケジュールを厳守しなければならないことから，Case2の第2段階の計算では，空コンテナの回送を扱うことによって荷役時間が増え，それが速力の上昇をもたらすことになると考えられる．さらに，同様の理由で空コンテナの荷役費用も増大すると考えられる．

以下に，数値実験に用いるデータ設定を示す．

(a)寄港候補地(20港)：東京，横浜，清水，名古屋，大阪，神戸，門司，博多，釜山，上海，基隆，高雄，香港，ホーチミン，マニラ，レムチャバン，バンコク，ポートケラン，ジャカルタ，シンガポール

(b)計画期間：52 (週)

(c)年間寄港頻度：52 (回)

(d)1航海の所要日数の上限：21 (日)

(e)投入船の船型サイズ：500, 1000, 1500, 2000 (TEU)

(f)港iにおける1TEUあたりの荷役時間(e_i)：0.042 (時間/TEU)

(g)港iにおける出入港に関わるスタンバイ時間(f_i, f_i')：各2 (時間)

(h)港iにおける荷役費(H_i)：200 (USドル/TEU)

(i)港 i における蔵置コスト(a_i) : 300 (USドル/TEU)

(j)港 i における短期リースコスト(b_i) : 300 (USドル/TEU)

(k)燃料油費および潤滑油費の単価(C^{Fuel}, C^{Lub}) : 170 (USドル/トン)および1000 (USドル/トン)

(l)燃料油および潤滑油の消費率(R^{Fuel}, R^{Lub}) : 140 (g/馬力/時間)および4 (g/馬力/時間)

(m)港 i における入港費(Q_i) : $=1.95*CAP+5200.0$ (USドル/入港)

(n)排水トン数(DS) : $=26.96*CAP+3453.36$ (トン)

(o)アドミナルティ係数(A): 250, 300, 350, 400 (それぞれ, 500, 1000, 1500, 2000 TEU船に対応する値をとる)

(f)～(m)までのパラメータは，船社や荷役業者へのヒアリング調査により得られた大まかな値を設定した．特に，荷役費，蔵置コスト，入港費等は港毎に異なるが，ここでは各港に対して一律の値を設定した．もし，港毎に異

表6.1 各港の輸出入貨物量(TEU)

港	輸出	輸入
東京	1076	879
横浜	1181	906
清水	271	196
名古屋	790	382
大阪	506	282
神戸	1533	1008
門司	260	196
博多	382	288
釜山	1467	1925
上海	914	779
基隆	417	325
高雄	539	595
香港	392	1634
ﾎｰﾁﾐﾝ	97	112
ﾏﾆﾗ	624	382
ﾚﾑﾁｬﾊﾞﾝ	69	83
ﾊﾞﾝｺｸ	901	913
ﾎﾟｰﾄｹﾗﾝ	548	573
ｼﾞｬｶﾙﾀ	92	175
ｼﾝｶﾞﾎﾟｰﾙ	912	1338

なる値を設定することができれば,本問題に対してさらに見識が深められると考える．1週間あたりの港間貨物需要は，文献6や各港のホームページ等の資料を参考に推定した．表6.1に各港における固定された1週間あたりの輸出入貨物量を示す.

6.4.3 計算結果

GAの計算にあたって，その初期段階に乱数を用いて初期個体群を自動生成する．したがって，GAの計算終了時によい解が得られるか否かは，乱数の種にも依存していることになる．ここでは，この問題に対処するために乱数の種を変化させて生成した，50種の初期個体群を用いて，上述のCase1についてGAで求解した．まず，図6.7に船型サイズ毎に50種の異なる初期個体群を用いて計算した目的関数の平均値を示す.この図によって各船型サイズについて，計算の収束状況と大まかな優位度がわかる．これは各船型サイズについてペナルティコスト係数を3段階(現状値から1倍，2倍，4倍)に変化さ

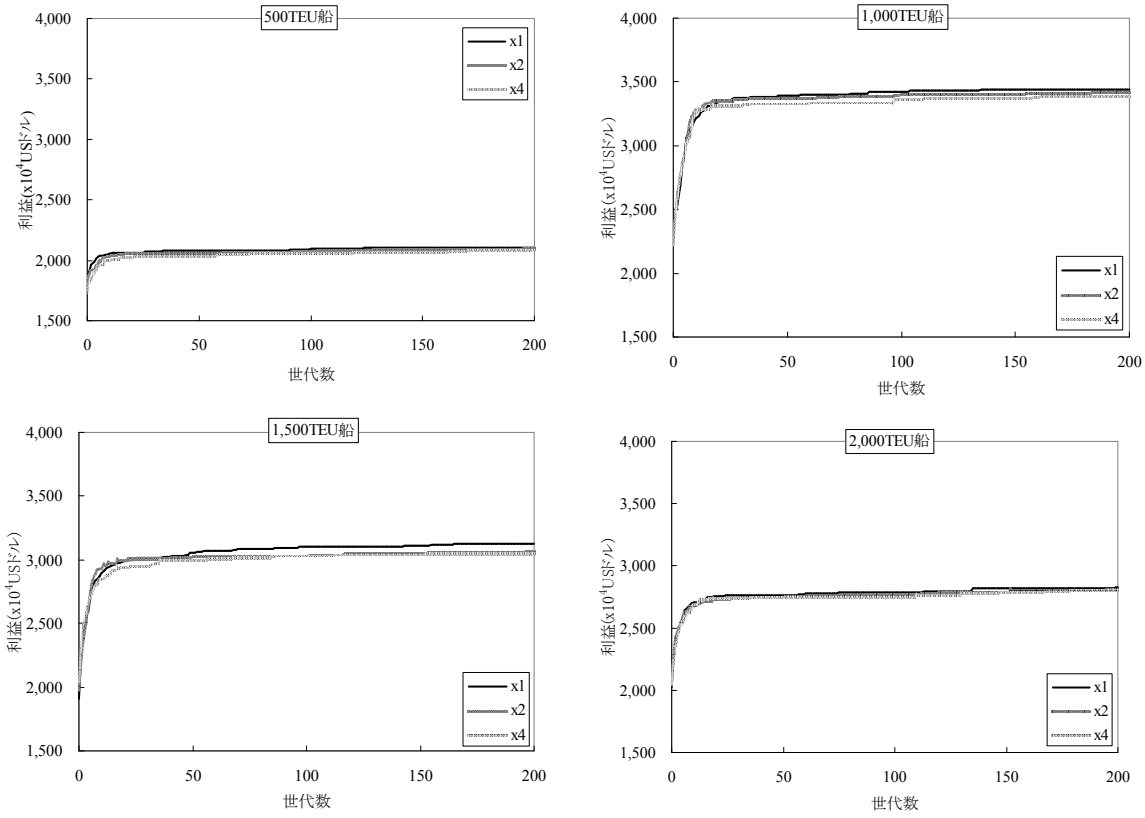


図6.7 GAにおける船型サイズ毎の収束状況

表6.2 Case1と2の比較(1000TEU船)

Case	解	寄港順序	利益	運賃収入	船舶コスト	ペナルティコスト	速力	投入隻数	航海距離
			(x10^{4}USﾄﾞﾙ)	(x10^{4}USﾄﾞﾙ)	(x10^{4}USﾄﾞﾙ)	(x10^{4}USﾄﾞﾙ)	(ノット)		(マイル)
1	1	1-2-17-20-15-11-2-1	4120.3	10394.0	6271.8	1.9	20.7	3	6672
	2	1-2-5-16-17-20-11-5-2-1	3913.8	10417.7	6463.3	40.6	20.7	3	6385
	3	1-2-5-17-20-11-5-2-1	3904.5	10229.9	6287.3	38.1	20.3	3	6365
	4	1-2-5-11-20-17-5-2-1	3854.7	10222.3	6325.4	42.3	20.3	3	6365
	5	1-2-3-11-14-16-17-20-11-3-2-1	3596.7	9898.4	6264.6	37.1	20.4	3	6271
2	3	1-2-5-17-20-11-6-2-1	3784.2	11483.8	7651.4	48.3	23.2	3	6365
	4	1-2-5-17-16-20-11-6-2-1	3763.3	11665.7	7853.2	49.1	23.8	3	6385
	5	1-6-17-16-20-11-6-2-1	3559.7	11212.1	7444.9	207.6	22.7	3	6385
	2	1-4-6-16-17-20-6-2-1	3511.1	10912.3	7331.3	70.0	22.9	3	6635
	1	1-2-13-20-17-6-2-1	3322.3	11488.2	7994.9	170.9	24.3	3	6640

1: 東京, 2: 横浜, 3: 清水, 4: 名古屋, 5: 大阪, 6: 神戸, 7: 門司, 8: 博多, 9: 釜山, 10: 上海,
11: 基隆, 12: 高雄, 13: 香港, 14: ﾎｰﾁﾐﾝ, 15: ﾏﾆﾗ, 16: ﾚﾑﾁｬﾊﾞﾝ, 17: ﾊﾞﾝｺｸ,
18: ﾎﾟｰﾄｹﾗﾝ, 19: ｼﾞｬｶﾙﾀ, 20: ｼﾝｶﾞﾎﾟｰﾙ

表6.3 Case1と2における1航海当たりの平均荷役時間(1000TEU船)

Case	解	平均荷役時間(時間)	
		実入りコンテナ	空コンテナ
1	1	143.1	10.3
	2	141.2	18.9
	3	138.4	18.4
	4	138.3	19.7
	5	133.6	18.3
2	3	156.8	39.8
	4	159.4	40.3
	5	155.3	35.6
	2	141.9	40.7
	1	155.7	47.1

せて計算を行ったものである.ペナルティコスト係数の数値的変化が目的関数値に対して大きく影響を与えていることは確認できなかった.

表6.2に4つの船型サイズで最も利益の大きい解の得られた1000TEU船についてCase1と2の比較を示す．この表は，Case1と2について50種の初期個体群を与えて計算を行い，その中で最も利益の大きい解から上位5つを列挙したものである．なお，Case2の解番号には第1段階の計算で得られた上位5つの解番号をそのまま付してある．Case2の第1段階の計算では，空コンテナの回送は考慮されないことから,本船の輸送容量をすべて実入りコンテナの輸送に使える．したがって，Case2ではCase1よりも多くの実入りコンテナを積

み取れることから，運賃収入は大きくなる．しかし，Case1はCase2よりも利益が大きくなっている．これは，Case2の第2段階の計算で空コンテナの流動にもとづいて，船舶コストが上昇し，ペナルティコストが大きくなって利益が減少するためである．これは，第1段階の計算の結果，第2段階の計算において，空コンテナを扱うための十分な余席スペースが確保できない，あるいは空コンテナの回送ができなくなって，多数の空コンテナの蔵置やリースコンテナの借り入れが発生するためである．また，後述するように速力の上昇が船舶コストを押し上げているためである．

表6.3に2つのケースの荷役時間を示す．Case2では第2段階の計算において空コンテナを取り扱うことになり，そのため荷役時間が増加する．さらに，その荷役時間の増加が運航スケジュールを逼迫させるために，速力を上昇させて対処することになる．その結果，速力の上昇が直接的に船舶費用を押し上げることとなった．

6.5 本章のまとめ

本研究では，本船による空コンテナの回送を考慮したコンテナ船の航路計画を扱った．これまで，船舶のルーチングおよびスケジューリングに関する研究は多くなされてきたが，コンテナ船に関する研究は少なく，本船による空コンテナの回送に関する研究は極めて少ない．本研究では，この問題に鑑み，本船の余席スペースを使った空コンテナの回送と，その余席スペースによってもなお当該港の空コンテナ需要を満たすことができない場合にリースコンテナの借り入れるという仮定を組み込んだコンテナ船の航路計画を検討した．そして，その問題の解法にGAを採用した．

いくつかの数値実験を通して，次のような結論に至った．

コンテナ船の航路計画に空コンテナの流動を考慮することによって，考慮しない場合よりも荷役費を低く押さえられることがわかった．また，効率的に空コンテナの回送が行われることによって，速力の上昇が避けられて燃料油費の上昇を抑えることができることがわかった．これらのことから，空コンテナの回送を考慮した航路計画は，船社の利益を高くすることになり，空

コンテナの回送を考慮しない航路計画は，航路全体が非効率的なものとなって船社の利益を減少させることになるといえる．したがって提案する手法は，戦略的かつ戦術的な視点から航路を評価するために有用であると考える．

第6章に関する参考文献

1) Shintani, K., Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S.: The container shipping network design problem with empty container repositioning, Transportation Research Part E. (印刷中)
2) Drewry: Ship Operating Costs Annual Review and Forecast, Drewry Shipping Consultants, 2001.
3) Papadimitriou, C. H., Steiglitz, K.: Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1982.
4) 伊庭斉志：遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社, 1995.
5) 稲垣潤, 長谷山美紀, 北島秀夫:遺伝的アルゴリズムを用いた経路探索における複数経路候補の決定法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J82-D-I, No.8, pp.1102-1111, 1999.
6) United Nations: International Trade Statistics Yearbook, 1998.

第7章　自社コンテナの保有規模も組み込んだ空コンテナの回送を考慮したコンテナ船の航路計画に関する研究 [1)]

7.1　概説

第5，6章の研究では，船社の自社コンテナの保有規模については考慮していなかった．通常，船社が保持している自社コンテナや長期リースコンテナの数は膨大となるので，彼らはコンテナ保有規模の最適化を断念している．この現実は，コンテナの保有コストを埋没コスト(Sunk cost)として扱うことを意味する．しかし，船社が新規航路を開設しようとしたとき，自社コンテナを用意するための初期投資が必要である．さらに，その航路において多くの貨物を積み取ることができたとしても，運賃収入は大きくなるが，その反面，必要コンテナ数は多くなるし，空コンテナの回送が効率的に行えなければ，かえって利益を減ずることになる．したがって，ここでは運賃収入と，空コンテナの回送にかかるコストおよび自社コンテナの保有コストとの間に存在するトレードオフの関係に着目し，第6章の研究に船社の自社コンテナの保有規模に関わるコストも反映させた航路計画を検討する．

第7.2節では，港における実務面での空コンテナの調達方法と安全在庫の考え方について述べる．第7.3節では，本研究で想定する自社コンテナの保有規模に関するコストの基本的な考え方を示して定式化を行う．第7.4節では，前章第6.4節と同一のデータを用いて，いくつかのケーススタディを行う．

7.2　港における空コンテナの安全在庫の考え方

7.2.1　空コンテナの回送方法

第1章で述べたように，現在，船社は寄港地の輸出入のインバランスによって，多数の空コンテナの回送を余儀なくされている．また，海外の港だけでなく，国内の地方港湾においても輸出入のインバランスは深刻な問題である．海で隔てられた国際間での空コンテナの回送は，海上輸送によって行わ

れる.国内での回送は,海上輸送の他に陸上輸送によっても行われているが,その多くは海上輸送に依存している．したがって，本項では実務面からみた海上輸送によるメリットを示し，次項で行う，港における安全在庫の定義のための準備をする．なお，本研究では東アジア地域を対象とした航路計画を検討するが，それらの寄港候補地においても広義の意味で，我が国地方港湾と同様の問題を抱えていると考えることができる．また，港によっては多少事情が異なるにしろ，同様の調達方法を行っていると考えられることから，

表7.1 空コンテナの調達方法による長所と短所

	長所	短所
①陸上ドレイ	手配が容易．急なオーダーに対応可.	輸送コストが最も高い．大量輸送には不向き.
②内航フィーダ船	①よりもコストが安い．最大100TEU程度の中規模輸送が可能.	回送地が限定される(目的地への航路設定が無い場合がある)．便数が少ない.
③JR貨物輸送	①，②よりもコストが安い．回送時間が確実.	40'Fは回送できない(対応台車の設定がない)．発着利用可能駅が限定される．輸送可能量が20TEU程度で大量輸送には不向き.
④自社船による外地回送	大量輸送が可能．自社船のため回送コストが最も安い.	外地からなので，回送に時間がかかる．回送目的地に到着するまで本船の船積スペースを長期間占有する.
⑤自社船による内地回送	④に同じ．④に比べ船積スペースの占有期間が短い.	沿岸輸送特許[注1)]が必要なため，回送積込みの2,3日前に申請要．申請後の予定変更が一切効かない．(キャンセル・揚げ地変更不可)

出典：代理店へのヒアリング調査をもとに著者が作成

注1) 陸・海運送業界の国内産業保護の観点から外国船舶による国内輸送は禁止されているが，自社コンテナに限り，運輸局への都度申請により，国内間における空コンテナの回送が可能

ここでは地方港湾での調達方法について,著者が行った代理店へのヒアリング調査をもとに表7.1のように整理してみる.

表7.1のとおり，基本的に空コンテナの回送には5つの方法があり，それぞれに長所と短所がある．船社は，輸出量に対応する必要コンテナ数に応じて輸送手段を使い分けている．船社の立場からすれば，多数の空コンテナをターミナル内へ蔵置すると，蔵置コストが大きくなったり，ターミナル内が手狭になったりすることから空コンテナの余剰在庫は避けたいと考えている．

空コンテナの回送コストは,④と⑤の自社船による回送が安いことがわかる．しかし，⑤に関しては船舶法第3条に定められている，外国籍船による国内海上輸送の規制，いわゆるカボタージュ(Cabotage)の問題がある．我が国では阪神淡路大震災の際，当時の運輸省は，すでに神戸港に陸揚げされていたコンテナ貨物や揚げ積みを予定していた貨物を,緊急措置として神戸港以外の東京，横浜，博多等へ輸送するため，外航船社による国内フィーダ輸送(沿岸輸送特許)を認めた．その後，空コンテナの回送の長期的な必要性から現在は日本国内では規制緩和され,邦船社でなくても沿岸輸送特許が認められるようになった [2)]．ただし，沿岸輸送特許が認められるようになって,コスト面での利点はあるが,申請後の予定変更は不可能であることから制約を伴う.また,④は外地からの回送なので,回送に時間がかかるということ,その間船積スペースを占有することから,実入りコンテナとのバランスをどのようにとるのかが問題となる.

本章の研究においても,本船の余席が持つ空コンテナの回送機能に着目することからモデルの複雑化を避けなければならない．したがって，本船以外の空コンテナの回送は分析の対象外とし,④の海を隔てた国際間の回送のみを対象とする.

7.2.2　安全在庫の考え方

ここでは，ある船社(以下，A船社とよぶ)の地方港湾(以下，地方港Bとよぶ)における空コンテナの安全在庫の概念とその必要性について述べる.

例) A船社の場合

関西－台湾航路

地方港Bへの寄港頻度：週1便

投入船型サイズ：1000TEU船

A船社における空コンテナの必要量を決定する場合を考える．いま，地方港Bにおける空コンテナの在庫数量をヤードスペースの制約上，最大で350TEUと設定する．この許容数値の中で，

空コンテナ供給量 + 在庫量 = 翌々週寄港分コンテナ需要量(船積予約済み数量)

という式に可能な限り近づけられるよう，空コンテナの調達数量を決定している．

ここで，過去の実績平均で1週間あたりの輸出使用本数を150TEUと仮定すると，空コンテナが補給された段階でヤード内に2週間分のコンテナ，つまり空コンテナ300TEUが蔵地されていればよいと考えることにする．そのとき必要コンテナ数は，

必要コンテナ数 ＝2週間分のコンテナ使用量

になる．ただし，この計算式は1週間に一度のみ港外から空コンテナを回送してくるという前提としている．その他の数量調整要因としては，

①次回の空コンテナ補給までに予想される輸入コンテナの返却数量(ただし，コンテナダメージ・汚れ等のため，全てのコンテナが輸出に即再使用できるとは限らない)

②その後の本船の輸出貨物状況(通常以上に数量が多くないかどうか)，大口貨物がないかどうか(早期に空コンテナが必要になる可能性があるため)

③次航船の空コンテナ用スペースの割合(荷主からのリクエスト通りの補給数が絶えず手配可能とは限らない)

が挙げられる．結局のところ，最も重要なことは確実な船積数量の把握(スペースBooking・仮Bookingの存在をなくすこと)である．なお，輸出コンテナの2週間分のコンテナ数を必要コンテナ数とする根拠としては，通常，荷主に対する空コンテナの搬出は本船入港の1週間前からとなっているが，荷主の都合により，実際には早期搬出する場合が多いということ，悪天候による本船の動静遅れにより通常の空コンの搬出予定に合わせた空コンテナの補給が行えない場合もあり得るためである．しかし，最悪の場合として何らかのトラブルにより当該港が本船抜港になった場合のことを考えると，これだけの大量の空コンテナを再度手配しなおすということは困難であるため，最低でも1週間分程度の空コンテナの在庫を常時保有しておくことが必要である．したがって，各港には輸入コンテナの返却分以外に，常時，1週間分の空コンテナが蔵置される必要があるとし，ここではそれを安全在庫と考えることにする．

以上の認識によって，次節では安全在庫を考慮した自社保有コンテナの保有に関するコストを組み込んだモデルの定式化を行う．

7.3 自社コンテナの保有コストを組み込んだモデルの定式化

7.3.1 モデルの定式化

ここでの定式化は，基本的には第6章の定式化とほぼ同様の形式をとる．大きな相違点は，目的関数に自社コンテナの保有コスト関数を組み込んだところである．本項では新たに定式化に加えた部分について詳細な説明を加えることとし，運賃収入や船舶コスト関数に関しては前章と同一の定式化であるので，ここでは省略する．詳細は第6.2節を参照のこと．

本問題は次のように上位問題[UP]と下位問題[LP]に分割された形式として定式化される．

[UP]

$$Maximize \sum_{k \in V} Z^k \rho_k \tag{7-1}$$

subject to

$$\sum_{k \in V} \rho_k = 1 \tag{7-2}$$

$$\rho_k \in \{0,1\}, \qquad \forall k \in V \tag{7-3}$$

ここで,

V ：寄港地グループの集合であり，各々の寄港地グループは[LP]で最適航路となった寄港地によって構成されている

Z^k ：k 番目の寄港地グループによる利益

ρ_k ：k 番目の寄港地グループと，[LP]で決定された寄港順序が選ばれたとき1，そうでないとき0の値をとる決定変数

[LP]

$$Maximize\ Z = R - C(\mathbf{y}) - H(\mathbf{y}) - P(\mathbf{y}) \tag{7-4}$$

subject to

$$\sum_{j \in N} y_{ij} - \sum_{j \in N} y_{ji} = 0, \qquad \forall i \in N \tag{7-5}$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} y_{ij} \geq 1, \qquad \forall S \subset N \tag{7-6}$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \qquad \forall i, j \in N \tag{7-7}$$

$$\mathbf{y} = \left\{ y_{ij} \,\middle|\, i \in 1,...,N; j \in 1,...,N \right\} \tag{7-8}$$

ここで,

N ：$k \in V$ に対応する寄港地ノードの集合

S ：N の空でない部分集合

$C(\cdot)$ ：船舶コスト関数

$H(\cdot)$ ：自社コンテナの保有コスト関数

$P(\cdot)$　：ペナルティコスト関数

R　　：運賃収入

y_{ij}　：リンク$i-j$にコンテナ船が就航するとき1，そうでないとき0の値をとる決定変数

式(7-4)は目的関数であり，運賃収入から船舶コスト,自社コンテナ保有コストおよびペナルティコストを差し引いた利益の最大化を表す.式(7-5)はある港に入港したコンテナ船は必ず他の港へ向かうことを保証する制約である．第5章の図5.2に示してあるとおり，港②を除く，港①～⑥までのNに含まれるすべての港がリンクによって結ばれている.式(7-6)は航路が部分巡回路に分割されないことを保証するものである.式(7-8)はコンテナ船の就航を意味するy_{ij}からなるベクトル$\mathbf{y}$を定義している.

(1) ペナルティコスト関数

本研究では,寄港地間の空コンテナの回送を考慮した最適な航路形態を考える．船社は，輸出入のインバランスによって多数の空コンテナの回送を余儀なくされている．このインバランスは，①空コンテナが余っている地点での蔵置，あるいは②そこから不足している地点への回送，ならびに③急な要求に対するリースコンテナの借り入れ,という活動に対していくらかのコストを発生させる.本研究では,③をペナルティコストと定義することにする．この活動は直接的に船社の利益に結びつかない．ここでは，自社船の余席で空コンテナの回送を行える場合には,ペナルティコストは発生しないと仮定する．なお，第6章では①の活動はペナルティコストとして考えているが，ここでは考えない．したがって，式(7-9)では蔵置に関する変数は除外した形式をとっている．その理由は第7.3.2項で述べることにする．

ペナルティコスト関数Pは，第6章の図6.3に示すような仮想的な寄港順序を用いて以下のように定式化を行う．

$$P = \sum_{i \in NV} b_i LS_i \tag{7-9}$$

$$S_i = \max\{D_i - P_i, 0\}, \qquad \forall i \in NV \tag{7-10}$$

$$LS_i = S_i - \sum_{j \in B^i} w_{ji}, \qquad \forall i \in NV \tag{7-11}$$

$$\sum_{p \in M^i} \sum_{q<p} \left(x_{pq} + w_{pq} \right) \leq CAP, \qquad \forall i \in N \tag{7-12}$$

ここで,

b_i ：港 i におけるリースコスト (USドル/TEU)

LS_i ：港 i におけるリースコンテナ数 (TEU)

NV ：仮想的な寄港順序におけるノード集合

D_i ：港 i における発生貨物量 (TEU)

P_i ：港 i における集中貨物量 (TEU)

S_i ：港 i における空コンテナの不足数 (TEU)

B^i ：港 i の前に寄港する港の集合 (NV の部分集合)

M^i ：オリジナルな寄港順序において港1として表現される港 i の仮想的な寄港順序を構成する港の集合

CAP ：コンテナ船の輸送容量 (TEU)

式(7-10)では不足コンテナを定義している．式(7-11)は港 i において借り入れられるリースコンテナ数を定義している．不等式(7-12)は空コンテナが本船の余席スペースを用いて運ばれることを保証するものである．

(2) 自社コンテナの保有コスト関数

自社コンテナの保有コスト関数 H は，式(7-13)に示すように自社コンテナの所有コストと寄港地における安全在庫の蔵置コストの2つを合算したものとなる．これらのコストは以下のように定義される．

$$H = C^P TF + \sum_{i \in NV} d_i BS_i \tag{7-13}$$

$$C^P = \frac{C^{Unit}(1+0.05)^7}{7} \tag{7-14}$$

$$TF = \sum_{i \in NV} \left(OF_i + BS_i \right) \tag{7-15}$$

$$OF_i = F_i + O_i - LS_i + D_i, \qquad \forall i \in NV \tag{7-16}$$

$$BS_i = br_i F_i + ST_i, \qquad \forall i \in NV \tag{7-17}$$

ここで,

C^P ：年間の平均所有コスト (USドル/TEU/年)

d_i ：港iにおける年間蔵置コスト (USドル/TEU/年)

C^{Unit} ：コンテナの単価 (USドル/TEU)

TF ：コンテナの総保有数 (TEU)

D_i ：港iにおける発生貨物量 (TEU)

F_i ：港iにおける輸出用の空コンテナ数 (TEU)

LS_i ：港iにおけるリースコンテナ数 (TEU)

O_i ：港iから他港へ回送される空コンテナ数 (TEU)

OF_i ：港iにおける自社コンテナ数 (TEU)

ST_i ：港iに蔵置する空コンテナ数 (TEU)

BS_i ：港iにおける安全在庫数 (TEU)

br_i ：港iにおける安全在庫率

式(7-14)は年間平均所有コストである．使用されるコンテナは，年利5%とし7年で返済されると仮定する．式(7-15)は安全在庫量を付加した，航路全体の自社コンテナ保有量である．式(7-16)は港iにおける実入りコンテナと空コンテナの流動量を合算した自社コンテナ数である．ここでは，港から荷主へ実入りコンテナを配送してデバンニングし，さらにその荷主から港までの空コンテナの返送にかかる一連の所要時間は7日間であると想定する．そのとき，荷主が要求するコンテナ数は，港iへの輸出貨物量$P_i (= F_i)$と同じ値となる．そして，式(7-17)において，当該港について安全在庫率br_iが与えられると安全在庫量は，安全在庫率と輸出コンテナ数F_iとの積ならびに蔵置コンテナ数ST_iの和で表される．ここでは，各港の安全在庫率をbr_i=1.0と想定する．つまり，港では2週間分の輸出コンテナ数に対応する空コンテナ数を用意することを意味する．その理由は第7.2.2項で述べたとおり，一般的に船社は，

彼らの事情によって予定された配達タイミングよりも早期に空コンテナを要求すること，悪天候による本船の入港遅れ等に対する予備として安全在庫を持つと考えるからである．また，蔵置コンテナ数 ST_i もここでは安全在庫と考える．その理由は次項で述べる．

次項では，自社コンテナの保有規模の算出方法について述べる．

7.3.2 自社コンテナの保有規模の考え方

船社は，一旦，自社コンテナを保有すると，それらを10年以上使い続けることになる．しかし，将来の貨物需要を長期にわたって予測し，自社コンテナの保有規模を決定することは極めて困難である．ここでは，第6章で述べたように1週間あたりの貨物需要は計画期間を通じて一定の値として与えられると仮定しているので，荷主から港 i へ戻ってくる空コンテナ数 R_i は前期の輸入コンテナ数 P_i に等しい．自社コンテナの保有規模を考える場合は，当該期における実入りコンテナの輸入個数も考慮する必要がある．ここでは，最適な保有規模を一意に決定することは困難であるため，航路パターンの代替案が与えられると，そのときに流通するコンテナ数を算出し，それを自社コンテナの所有数と考えることにする．つまり，各港において流通するコンテナ数は式(7-16)で表される．ただし，前項で述べたように，ここでは安全在庫数も考えることから，コンテナの総保有数 TF は，自社コンテナの所有数 OF_i と安全在庫数 BS_i を足し合わせ，それをさらにすべての港について合計したものとして定義される．

いま，本船が港に停泊しているとして，コンテナの流動は港－荷主間および荷主－港間において行われると想定すると，図7.1は本船が港に停泊しているときのコンテナの流れを示している．各港はこの流動パターンを持つことになる．

港におけるコンテナ流動の保存則を図7.1中の変数で表現すると，式(7-18)と式(7-19)のように定義される．もし，港 i で保有コンテナが不足した場合，その不足分を補完するために短期リースコンテナを借り入れることとする．

$$A_i = R_i + G_i + ST_i^{'}, \qquad \forall i \in NV \tag{7-18}$$

$$F_i = A_i - O_i - ST_i^{'} + LS_i, \qquad \forall i \in NV \tag{7-19}$$

$$E_i = \max\{P_i - D_i, 0\}, \qquad \forall i \in NV \tag{7-20}$$

$$ST_i = E_i - \sum_{j \in L^i} w_{ij}, \qquad \forall i \in NV \tag{7-21}$$

ここで,

A_i ：港iで使用可能な空コンテナ数 (TEU)

E_i ：港iにおける空コンテナの余剰数 (TEU)

G_i ：他港から港i回送されてきた空コンテナ数 (TEU)

R_i ：荷主から港iへ戻ってきた空コンテナ数 (TEU)

$ST_i^{'}$ ：港iに前期から蔵置してあった空コンテナ数 (TEU)

L^i ：港iの後に寄港する港の集合 (NVの部分集合)

式(7-18)と式(7-19)には，それぞれ蔵置コンテナST_iと$ST_i^{'}$が含まれている．第6章と本章で提案するモデルは，1航海におけるコンテナ流動にもとづいて定式化される．しかし，それらの式の保存則は実際問題において，計画期間中の各航海においても維持されなければならない．このことに対して，ここでは，$ST_i = ST_i^{'}$とし，$\sum_{i \in NV} ST_i$によって自社コンテナの保有規模を減ずることができる．しかし，そのST_iは安全在庫として加えられる必要があることから，ST_iは式(7-17)に取り込まれることになる．式(7-20)は余剰コンテナを定義している．もし，$P_i - D_i$が負であるなら，港iにおいて余剰コンテナは存在しないので，E_iは0の値をとる．そうでなければ，E_iは$P_i - D_i$の値をとることになる．式(7-21)は港iにおいて蔵置されるコンテナ数を定義している．

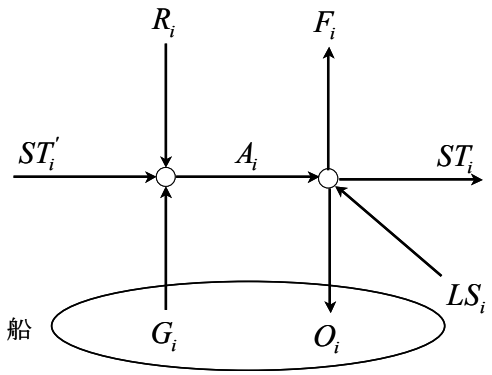


図7.1 港におけるコンテナ流動

7.4　モデルの適用事例

7.4.1　ケーススタディ

ここでは，第6章と同一のデータを与件として，2つの要因に着目したケーススタディを行う．

1つ目の要因は，ペナルティコスト係数(b_i：リースコスト)の影響である．船社は今日，空コンテナの取扱に関するコストを重要視している．また，船社毎に空コンテナの回送にかかるコストの捉え方は異なる．したがって，ここではペナルティコスト係数を現状値，現状値の2倍，現状値の4倍というように3段階に変化させて感度分析を行う．これは，船社毎にリースコンテナの借り入れのしやすさは異なると考え，借り入れが困難な船社はこのペナルティコストを高く設定すると考えられるからである．

2つ目の要因は，本船による空コンテナの回送をモデル中に組み込む場合と，そうでない場合の違いである．つまり，航路パターンの形成時に貨物需要に実入りコンテナと空コンテナを考慮した場合と，実入りコンテナのみを考慮した場合の2つのケースを比較する．前章と同様に，前者をCase1，後者をCase2とよぶことにする．

Case2の具体的な計算法については，前章と同一の計算方法であるので，ここでは省略する．詳細は第6.4.2項を参照のこと．

上述のケーススタディを行うことによって，次に挙げる結果が予想される．①定期運航されるコンテナ船はスケジュールを厳守しなければならないことから，Case2の第2段階の計算で空コンテナの回送を扱うことによって荷役時間が増え，それが速力の上昇をもたらすことになると考えられる，②①と同様の理由で空コンテナの荷役費用も増大すると考えられる，③Case2はCase1よりも多くの貨物を積み取ることができる反面，必要コンテナ数が増えることによってCase1よりも自社コンテナの保有コストが大きくなることが予想される．

①と②は第6章と同様の予想であるが，③についてはあらたに，運賃収入と自社コンテナの保有コストとの間に存在するトレードオフの関係が考察できると考える．

7.4.2 計算結果

GAによる計算は，第6章と同様に乱数の種を変化させて生成した，50種の初期個体群を用いてそれぞれのケースについて実行した．図7.2に船型サイズ毎に50種の初期個体群を用いて計算した目的関数の平均値を示す．この図によって各船型サイズについて，計算の収束状況と大まかな優位度がわかる．これは各船型サイズについてペナルティコスト係数を3段階(現状値から1倍，2倍，4倍)に変化させて計算を行ったものである．ペナルティコスト係数の変化が目的関数値に対して大きく影響を与えていることは確認できなかった．また，当然のことながら，ここでは目的関数に自社コンテナの保有コストを組み込んでいることから，目的関数値からそのコストが差し引かれるので，第6章の図6.7よりも平均利益は小さくなっている．

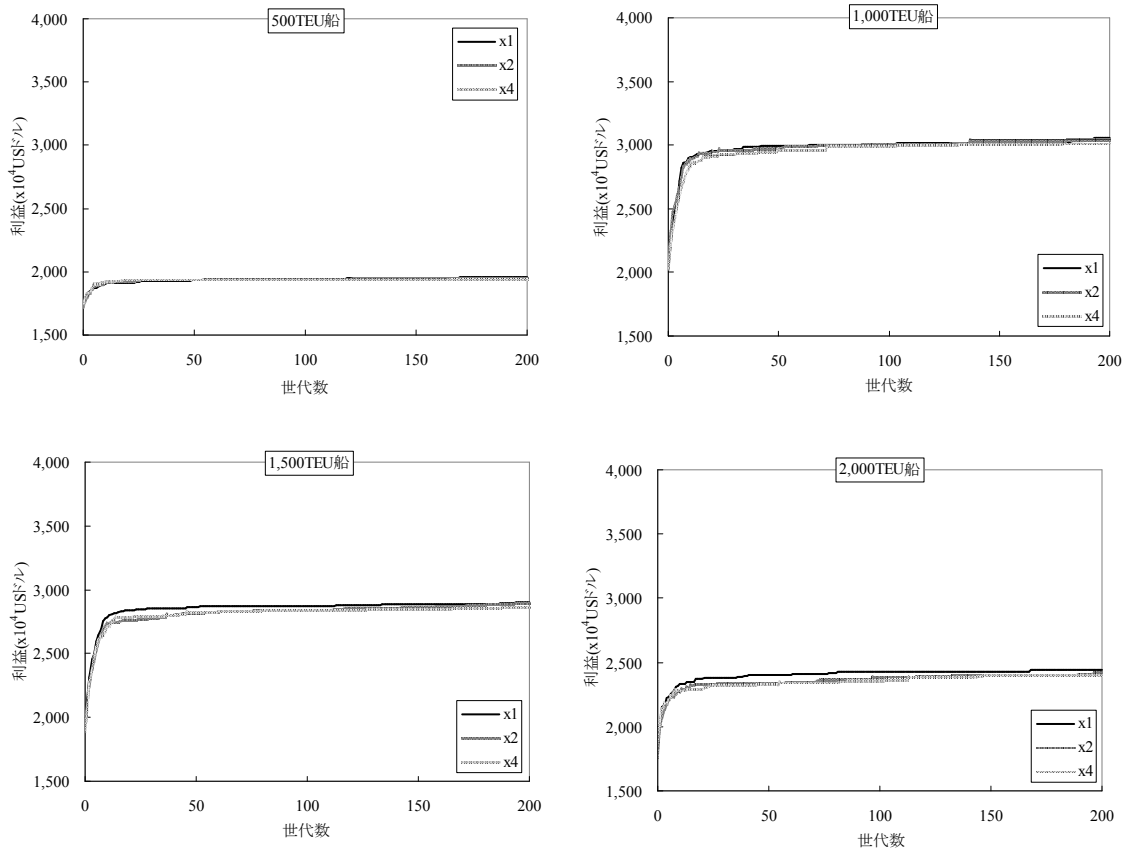


図7.2 GAにおける船型サイズ毎の収束状況

表7.2 Case1と2の比較(1000TEU船)

Case	解	寄港順序	利益	運賃収入	船舶コスト	ペナルティコスト	自社コンテナ保有コスト	速力	投入隻数	航海距離
			(x10^{4}USドル)	(x10^{4}USドル)	(x10^{4}USドル)	(x10^{4}USドル)	(x10^{4}USドル)	(ノット)		(マイル)
1	1	1-2-17-20-15-11-2-1	3759.0	10394.0	6298.8	1.9	334.3	20.7	3	6672
	2	1-2-5-16-17-20-11-5-2-1	3568.4	10417.7	6489.3	2.9	357.1	20.7	3	6385
	3	1-2-5-17-20-11-5-2-1	3566.5	10229.9	6312.1	2.6	348.7	20.3	3	6365
	4	1-2-5-11-14-17-20-11-5-2-1	3550.7	10461.0	6542.7	3.7	363.9	20.8	3	6283
	5	1-2-5-11-20-17-5-2-1	3509.3	10222.3	6350.4	4.7	357.9	20.3	3	6365
2	3	1-2-3-11-20-17-6-2-1	3307.6	11034.2	7336.8	8.7	381.1	22.4	3	6379
	4	1-2-3-4-17-20-6-2-1	3216.0	10729.5	7129.6	11.7	372.2	22.3	3	6590
	5	1-4-6-20-17-6-2-1	3202.5	10761.1	7175.6	10.6	372.4	22.4	3	6635
	2	1-2-4-17-20-6-5-2-3-1	3024.9	11151.0	7686.4	12.9	426.8	24.0	3	6767
	1	1-2-13-20-17-6-2-1	3019.7	11488.2	8032.0	7.1	429.4	24.3	3	6640

1: 東京, 2: 横浜, 3: 清水, 4: 名古屋, 5: 大阪, 6: 神戸, 7: 門司, 8: 博多, 9: 釜山, 10: 上海,
11: 基隆, 12: 高雄, 13: 香港, 14: ホーチミン, 15: マニラ, 16: レムチャバン, 17: バンコク,
18: ポートケラン, 19: ジャカルタ, 20: シンガポール

表7.3 Case1と2における1航海当たりの平均荷役時間

Case	解	平均荷役時間(時間)	
		実入りコンテナ	空コンテナ
1	1	143.1	10.3
	2	141.2	18.9
	3	138.4	18.4
	4	142.0	19.4
	5	138.3	19.7
2	3	150.2	36.9
	4	137.3	39.8
	5	139.8	39.9
	2	143.0	43.3
	1	155.7	47.1

表7.2に4つの船型サイズのうち最も利益の大きくなった1000TEU船におけるCase1と2の比較を示す．この表は，各々のケースについて50種の初期個体群を与えて計算を行い，その中で最も利益の大きい解から上位5つを列挙したものである．なお，Case2の解番号には第1段階の計算で得られた上位5つの解番号をそのまま付してある．Case2の第1段階の計算では，空コンテナの回送は考えないことから，本船の輸送容量をすべて実入りコンテナの輸送に使える．したがって，Case2はCase1よりも多くの実入りコンテナを積み取れるので運賃収入は大きくなるが，Case1よりも利益は小さくなっている．その理由としては，Case2の第2段階の計算で空コンテナの回送に関わるコストが加算されることによるものである．つまり，燃料油費と荷役費の増加に

よる船舶コストの上昇，さらにコンテナの保有コストとペナルティコストの加算によって利益が減少するためである．これは，第2段階の計算において，空コンテナを扱うための十分な余席スペーススペースがなくなり，多数のリースコンテナの借り入れが発生するためである．また，Case2はCase1よりも多くの貨物を積み取ることができるので，運賃収入は大きい反面，必要コンテナ数が増えるために自社コンテナの保有コストは増大している．

表7.3に2つのケースの荷役時間を示す．Case2では第2段階の計算において空コンテナを取り扱うことになるので，荷役時間は増加する．さらに，その荷役時間の増加が運航スケジュールを圧迫させるために，ウィークリーサービスを維持するために船速を上昇させて対処することになる．その結果，速力の上昇が，直接的に船舶費用を押し上げる結果となった．

7.5 本章のまとめ

本研究では，運賃収入と，空コンテナの回送にかかるコストおよび自社コンテナの保有コストとの間に存在するトレードオフの関係に着目し，第6章で扱った問題に船社の自社コンテナの保有コストを反映させた航路計画を検討した．

実務的な視野から，港における空コンテナの安全在庫の考え方をもとに，自社コンテナの保有規模の算出方法を示した．さらに，港における空コンテナの流動パターンを整理し，自社コンテナの保有コストの定式化を行って，それを目的関数に組み込んだ．

いくつかの数値実験を通して，次のような結論に至った．

第6章と同様にコンテナ船の航路計画に空コンテナの流動を考慮することによって，考慮しない場合よりも荷役費を低く押さえられることがわかった．また，効率的に空コンテナの回送が行われることによって，速力の上昇が避けられて燃料油費の上昇を抑えることができる．さらに，自社コンテナの保有コストも抑えることができることがわかった．自社コンテナの保有コストに注目すると，空コンテナの回送を考慮した航路計画の方が考慮しない計画よりも小さくなることがわかった．回送を考慮しない計画では，回送を考慮

する計画に比べて，貨物の積み取り量が多くなって運賃収入は大きくなる．しかしその反面，必要コンテナ数が増えることになる．この場合，効率的に空コンテナの回送が行えないと，さらに必要コンテナ数を増やすことにつながる．

これらのことから，空コンテナの回送を考慮した航路計画は，船社の利益を高くすることになり，空コンテナの回送を考慮しない航路計画は，航路全体が非効率的なものとなって船社の利益を減少させることになるといえる．加えて，空コンテナの回送を航路計画に組み込むことによって，自社コンテナの保有規模を小さくすることができ，初期投資の節約につながるといえる．

第7章に関する参考文献

1) Shintani, K., Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S.: A Genetic Algorithm Based Approach to Constructing Container Shipping Network with Empty Container Repositioning among Calling Ports, Infrastructure Planning Review No.22, JSCE, 2005. (印刷中)
2) 日本海事新聞：2月10日付け記事, 2003.
3) 第6章，文献3.

第8章　本研究の今後の課題と展開

8.1　概説

本研究では，東アジア地域において相対的なハブ機能と国際競争力を低下させている我が国主要港湾へコンテナ貨物を集荷させるために，国内フィーダネットワークの拡大・充実が必要であるという観点で行われた．

具体的には，荷主と船社の選択行動の均衡を表現し，港湾政策を定量的に評価できる手法を構築するための基礎的研究として，荷主と船社の行動に着目し，第4～7章において個々のモデルを構築した．これらのモデルを統合することによって，我が国の今後の港湾政策に対する，荷主と船社の選択行動を反映した定量的評価手法の構築に資すると考える．しかしながら，本研究では，荷主と船社のそれぞれの選択行動モデルを構築したものの，それらを統合して，均衡解を求めて政策の評価を行うところまでには至らなかった．

そこで本章では，本研究の残された課題を明確にし，今後，どのように研究を発展させていくのかを述べる．

8.2　今後の課題と展開

8.2.1　荷主と船社の選択行動に関するモデルの統合

本研究では，荷主と船社のそれぞれの行動モデルをネットワークモデルとして構築した．しかし，それらを統合し均衡解を求めて政策の評価を行うところまでには至らなかった．ここでは，その統合を行うにあたっての考え方を示し，今後，どのように研究を発展させていくのかを述べる．

第4～7章の研究で構築された荷主および船社の行動モデルは，それぞれ単独でモデル化されているため，荷主モデルであれば，船社に関する運賃，寄港頻度，輸送時間等のパラメータを外生的に与件としている．同様に，船社モデルについても貨物需要は船社の提供するサービス水準に対して無関係に一律に与件としている．したがって，モデルを統合する際にそれらの外生的に与件とした部分について，それぞれの情報を選択主体間で受け渡しが行

われることになる.荷主は貨物の出発地から目的地までの総輸送コストを最小化するように経路を選択し,船社は利益を最大化するように航路計画を行う．このように双方の行動規範は異なる．さらに，それらの2者の選択行動が均衡した結果が港における貨物需要となる.

図8.1に荷主および船社の選択行動を表すネットワークを示す．この図は荷主と船社の関係が輸送ネットワークを介してどのように結びつけられているのかを示すものである.船社のネットワークはコンテナ船の航路ネットワークから構成されている．それに対して，荷主のネットワークは船社のネットワークの一部を使用する形で成り立っている.

ここで船社ネットワークをみると，港Bには寄港しないことがわかる．したがって，荷主Gは最寄りの港Bを使用することかできないので，港Cを選択することになる．このことは，荷主の輸送コストをさらに大きくするかも知れない．つまり，船社の寄港地選択は，荷主の経路選択に対して直接的に影響を与えることを意味する.

さて第5～7章の研究では，船社は1社のみを想定している，しかし，現実問題では同一の航路に複数の船社が参入しており,船社間の競合が存在する.また，投入されるコンテナ船はウィークリーサービスを提供するとして，速力や投入隻数を決定している．しかし，船社が戦略的に寄港頻度を増減させ

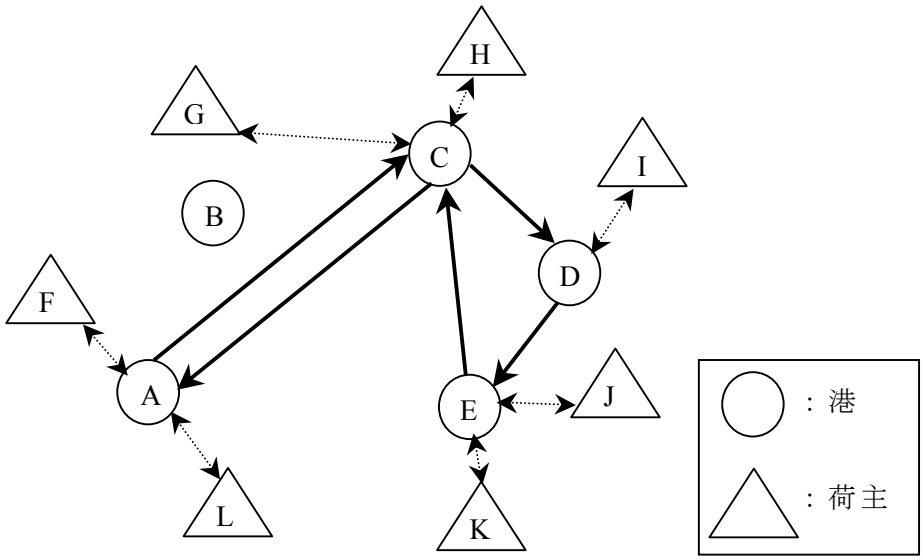


図8.1 荷主および船社の選択行動を表すネットワーク

ることも考えられる．そのとき，コンテナ輸送ネットワーク全体ではどのような振る舞いをするのかを観察することも必要である．したがって，前者に対しては船社間の競合を考慮する必要がある．これについては，航路における特定の2港間の輸送時間の時間比でもって，その2港間の貨物需要は配分されると考えることができる．後者については，寄港頻度を変化させたときの船社の選択行動が荷主の選択行動にどのような影響を及ぼすのか分析することができる．それによって新たな知見が得られると考えられる．

8.2.2 荷主の選択行動に関するモデル

第4章の研究では，荷主の選択行動を表現するモデルとして，利用者均衡モデルを採用した．例えば，Osmanら [1)]，原ら [2)]の研究では，荷主による港や経路の選択によって得られる効用をランダム効用関数として表現し，それらの選択に対してロジットモデルを適用している．本研究では，ロジットモデルに必要ないくつかのパラメータは統計的に推定する必要があり，コンテナ輸送においてはその推定に耐え得るデータの入手が困難であると判断し，限られた情報量でもって分析を行うことのできる利用者均衡モデルを採用した．しかしながら，荷主は必ずしも輸送コストを最小とする経路を確定的に利用するとは限らず，荷主の持つ経路情報は完全に正しいとはいえない．したがって，将来的にはロジットモデルにみられるランダム効用理論に基づいた利用者均衡配分問題に拡張された，確率的利用者均衡モデルの採用が必要であると考える．つまり，ロジットモデル単体では，コンテナ輸送における荷主の経路選択のばらつきのみを考慮することになるが，確率的利用者均衡モデルを採用することによって，それに加えて混雑現象も考慮することが可能となる．この分析についてはデータの整備を待って行う必要がある．確率的利用者均衡モデルの詳細については文献3を参照のこと．

8.2.3 戦略的な空コンテナの回送

第5～7章の船社モデルに関する研究では，コンテナ船は寄港する港の貨物需要をすべて満足するとし，その余席でもって空コンテナの回送を行うと想定している．しかしながら例えば，いま実入りコンテナの船積みを断って，

後の高い運賃の得られる実入りコンテナを運ぶために積載スペースを確保しておくとか,特定の港に対して優先的に空コンテナを運んだ方が利益は大きくなるとか,そういった戦略的な実入りおよび空コンテナの輸送を表現することができるモデルの構築が望まれる.しかし,現モデルでは寄港地と寄港順序を決定する質的な変数を決定変数として定式化を行っている.それに,港間の輸送量を表す量的な変数を加えることによってさらに戦略的な手法が提案できると考える.求解ステージにおいては,質的ならびに量的な変数を同時に組み込んだモデルでは急激に求解が困難となることが懸念される.これについては,問題を段階的にとらえた上でヒューリスティクスを採用して解を求めていくことになると考える.

8.2.4 アライアンス間および航路間の空コンテナの融通

第5～7章の研究では,分析対象を東南アジアにおける単一航路としていた.しかしながら,近年,欧州・北米・世界一周航路においては,サービス率の維持,コスト削減を目的とした船社間の協調配船が増えてきた.また,アジア発着貨物のインバランスが拡大しており,それにともなって空コンテナの回送に関わるコストも増大している.したがって,船社はアライアンス間および航路間での空コンテナの融通も検討していると考えられ,新しい形のコンテナフリートの運営方法が求められている.それらアライアンス間および航路間における空コンテナの融通をモデルに取り込む必要がある.

8.2.5 自社コンテナの長期リースコンテナの保有比率

第7章の研究では,船社の自社コンテナの保有量を概算的に求めた.それによって,航路計画において実入りコンテナのみならず空コンテナの流動も考慮することによって初期投資の節約につながると結論した.

さらなる戦略的な航路計画を検討するためには,将来の貨物需要に対して,短期リースコンテナのみならず,長期リースコンテナと自社コンテナの保有比率を決定する必要がある.既往の研究では長期リースコンテナは自社コンテナに含めて考えられてきたが,一般的に,長期リースコンテナは利用の必要がなくなれば返却が可能である代わりに,単位時間におけるコストは自社

コンテナと比べて割高である．したがって，予想される将来の貨物変動リスクに対して，長期リースコンテナを自社コンテナに対してどのくらいの割合で保有すればよいのかがわかれば，無駄な自社コンテナの保有や長期リースコンテナの借り入れを減らすことができると考えられる．

8.2.6　時間変動を伴う貨物需要

第5～7章の船社モデルに関する研究では，計画期間を通して一律に貨物需要を与件としている．しかしながら，現実問題では海運市況や季節等によって港における発生貨物量は変動することから，そのような需要を考慮できるモデルの構築が必要である．現段階では一旦，運んだコンテナのその後の流動については明確には扱っていない．特に本研究では空コンテナの流動を扱うことから，時間変動する貨物需要を考慮したモデルの構築は急務である．

8.3　本章のまとめ

本章では，本研究の残された課題を明確にし，それらの課題を達成するため方法について述べた．具体的には，次の研究が必要であることがわかった．

① 荷主と船社の選択行動モデルを統合させた港湾政策の評価
② 荷主の経路選択のばらつきと混雑現象を同時に表現できる手法の採用
③ コンテナ貨物や空コンテナの優先度を考慮したより戦略的なモデルの構築
④ アライアンス間および航路間の空コンテナの融通を考慮したモデルの構築
⑤ 自社コンテナの長期リースコンテナの保有比率を決定できるモデルの構築
⑥ 海運市況や季節等によって変動する港における発生貨物量を考慮できるモデルの構築

第8章に関する参考文献

1) 第3章，文献14.
2) 原進悟，竹林幹雄，金井仁志，黒田勝彦：国際海上コンテナ輸送市場モデの開発：定期航路におけるループの戦略的再編，第30回土木計画学研究発表会・講演集(CD-ROM), 2004.
3) 第3章，文献11.

第9章　結論

本研究は，東アジア地域において相対的なハブ機能と国際競争力を低下させている我が国主要港湾へコンテナ貨物を集荷させるために，国内フィーダ輸送のネットワークの拡大・充実が必要であるという観点で行われた．それは，荷主と船社の選択行動の均衡を表現し，港湾政策を定量的に評価できる手法を構築するための基礎的研究として，荷主と船社の選択行動のモデル化を検討した．

まず2章では，我が国の主要港湾を取り巻く情勢について取り上げ，我が国主要港湾のハブ機能低下と空コンテナの回送問題の存在を実証的に示した．具体的には，東アジア諸国の主要港湾における1996～2002年までの2年毎の貨物の取扱実績をみた．シンガポールと香港は，他港と比べて極端に取扱量が多く，高雄，釜山，上海は増加傾向にあった．特に上海は急速に取扱量を伸ばしているが，我が国主要港湾はその逆で微増に留まっており，相対的に東アジア地域における地位が低下していることを示した．

次に，1999年と2000年に行われた国土交通省調査をもとに港湾諸料金の国際比較を行った．東京の水準は香港，ロサンゼルス，ロッテルダムよりも低いが，シンガポール，釜山，高雄と比較すると高い水準となっている．さらに，東京と釜山の内訳を比較したところ，東京は釜山に比べてすべての細目について高い水準となっていることがわかった．

2000～2003年における国内港湾の外貿貨物取扱シェアをみると，5大港は毎年縮小傾向で，7港は横這いであるが，その他諸港は拡大傾向にあった．これらのことから，地方港湾におけるコンテナ埠頭の整備の進展に伴い，近海航路の開設，定着を通じたコンテナ貨物の地方港湾への分散が進行していることがわかった．

また，船社が東アジア諸国港湾に対して提供するサービス水準の変化について2つの指標に着目した．1つは，北米および欧州航路における1週間あたりの平均寄港船腹量，もう1つは平均航路便数である．まず，前者ではシンガポール，香港，高雄，釜山，上海ともに顕著な増加傾向にあった．逆に日本の主要港湾は東京を除いてはほぼ横這いか減少傾向にあることがわかっ

た．後者については，シンガポールを除く，香港，高雄，釜山，上海は増加傾向にあり，特に上海の増加が著しい．逆に日本の主要港湾は減少傾向にあることがわかった．この比較によって，船社は我が国の主要港湾に対して，サービス供給量を縮小させていることがわかった．

さらに，2000～2003年までの東アジア諸国の対北米貿易量の推移を概観して，貿易不均衡が進行していることを示した．中国/香港においては，東航，西航ともに貨物量を増やしているが，それとともに東西航間に貿易格差が次第に大きくなっていることがわかった．つまり，中国/香港において慢性的な空コンテナ不足が深刻化しており，大量の空コンテナの調達が必要となっていることがわかった．我が国では，逆に東航に比べて西航の方が多く，空コンテナが余っている．また例えば，韓国をみると東航と西航が均衡しているようにみえるが，ある期間の時間断面では均衡とはならないので空コンテナの回送は必要である．

北米と欧州航路における年間を通じた平均運賃の推移をみると，両航路とも往復航の運賃格差が著しく大きい．具体的には，北米および欧州航路とも往航運賃は復航の倍となっていることがわかった．現実問題として，往航と復航の輸送需要の格差を解消することは困難である．このインバランスの問題は，船社にとって空コンテナの回送費用を大きくし経営を圧迫している．船社にとっては，往復航間のインバランスの格差は直接的にコスト高を招くことになって深刻な課題であることを示した．

以上より，我が国主要港湾のハブ機能低下と世界的規模で空コンテナの回送問題が存在していることがわかった．

第3章では，本研究に関する既往の研究の文献レビューを行った．それらの研究を「輸送機関分担に関するもの」，「港湾の貨物需要予測に関するもの」，「航路計画に関するもの」，「空コンテナの回送に関するもの」の4つに分類した．さらに，それぞれの文献について研究の傾向および特徴を述べ，本研究の位置づけを示し，取り組もうとする問題を明確にした．そのレビューによって，多数存在する荷主は自己の輸送コストを非協力的に最小化する目的で経路選択行動を行うと仮定すると，荷主の行動モデルは利用者均衡モデルとして表現することができることを示した．さらに，船社の選択行

動モデルに関しては，①本船の余席スペースを使った空コンテナの回送，②多様な航路パターンの評価，③ウィークリーサービスの提供，この3つを考慮した航路計画を検討できるモデルを構築する必要性について述べた．また，航路計画と空コンテナの回送という2つの問題を統合した問題として扱ったものは極めて少ないことがわかった．これらのことに鑑み，本研究では実入りコンテナと空コンテナの輸送を明示的に取り扱った航路計画を検討できるモデルの構築が必要であることも示した．

第4章では，荷主の選択行動モデルを利用者均衡モデルとして構築し，国内発着の国際コンテナ輸送において，内航フィーダサービスの運賃とサービス水準が改善された場合に，荷主の選択行動にどのような影響を与えるのか分析し，その選択結果が我が国主要港湾および内航フィーダサービスの利用を促す効果があるのかを検討した．具体的には，内航フィーダサービスの運賃，寄港頻度および内外積み替えコストを変化させて，いくつかのケーススタディを行った．そのとき，我が国主要港湾の取扱貨物量と内航フィーダ輸送量を推計し，その増減でもってシフト効果を評価した．その成果をまとめると次のようになる．

① 内航フィーダ運賃，寄港頻度，内外積み替えコストの改善が我が国主要港湾や内航フィーダ輸送へのシフトに対して，ある水準でもって寄与することがわかった．

② 内航フィーダ航路の距離の長短によって，寄港頻度あるいは内外積み替えコストが荷主の選択行動に与える影響の度合いを変化させることがわかった．

第5章では，本船によって寄港地の空コンテナの過不足を調整できない場合にその補填にかかる費用をペナルティコストと定義し，船社の利益を最大化する寄港地と寄港順序および投入隻数，速力等を決定するためのモデルを提案した．さらに，空コンテナの回送が航路形成に与える影響を分析するため，そのモデルを東南アジア航路へ適用して考察を加えた．その成果として，次のことがわかった．

① 航路計画において，貨物需要に実入りコンテナのみを考慮した場合，空コンテナの荷役コスト，コンテナ船の運航スケジュール維持のための速

力上昇によって燃料油費の上昇，そして，ペナルティコストがかかることによって船社利益が減少することがわかった．したがって，空コンテナの需要を考慮した航路計画を行うことによって，船社の利益は大きくなることがわかった．

② ペナルティコストが大きくなるにつれて，本船による空コンテナの回送を促す傾向になることがわかった．具体的には，ペナルティコストを大きく見積もる船社は，本船の余席を使った空コンテナの回送が円滑に行える航路パターンを選択すると考えられる．

第5章の研究では，解法として総当たり法を採用していた．しかし，ここで扱う問題は寄港候補地数が増えるにしたがって，航路パターンの代替案は指数関数的に増大する性質を持つ．つまり，総当たり法では問題規模が大きくなるにしたがって，急激に計算時間が増大して現実的な計算時間で解を求めることが困難となる．そこで第6章では，この問題に鑑み，解法として遺伝的アルゴリズム(GA)を採用した．さらに，第5章の研究では，(a)運賃収入や各コストの発生単位が不明確であった，(b)寄港候補地の中から最適な寄港地を決定する部分の記述が不明瞭であった，(c)船舶コストの中の船費を形成する各費用係数の妥当性に疑問があった，(d)ペナルティの対象となるコンテナの算出に関する部分の記述が不明瞭であった，という改善点が存在したことから，それらの項目に関する部分についての定式化に若干の改良を加えた．その成果は，次のようになる．

① 解法にGAを採用することによって，現実的な計算時間で準最適解が得られた．

② コンテナ船の航路計画に空コンテナの流動を考慮することによって，考慮しない場合よりも荷役費を低く押さえられることがわかった．また，効率的に空コンテナの回送が行われることによって，速力の上昇が避けられて燃料油費の上昇を抑えることができることがわかった．これらのことから，空コンテナの回送を考慮した航路計画は，船社の利益を高くすることがわかった．

第5，6章では，船社の自社コンテナの保有規模については考慮していなかった．しかし，船社が新規航路を開設しようとしたとき，自社コンテナを用

意するための初期投資が必要である．また例えば，市況が悪化してその航路から撤退する際に，船社としてはその「傷口」を広げないという意味では，航路計画においては自社コンテナの保有規模の最適化は必要である．さらに，その航路において多くの貨物を積み取ることができたとしても，運賃収入は大きくなるが，その反面，必要コンテナ数は多くなるし，空コンテナの回送が効率的に行えなければ，かえって利益を下げることになる．

そこで，第7章では運賃収入と，空コンテナの回送にかかるコストおよび自社コンテナの保有コストとの間に存在するトレードオフの関係に着目し，第6章で行った定式化に船社の自社コンテナの保有規模に関わるコストも組み込んで航路計画を検討した．本章では，港における実務面での空コンテナの調達方法と安全在庫の考え方について述べ，本研究で想定する自社コンテナの保有規模の算出とそれに関するコストの基本的な考え方を示して定式化を行い，いくつかのケーススタディを行った．その成果は，次のようになる．

① 第6章と同様にコンテナ船の航路計画に空コンテナの流動を考慮することによって，考慮しない場合よりも荷役費を低く押さえられることがわかった．また，効率的に空コンテナの回送が行われることによって，速力の上昇が避けられて燃料油費の上昇を抑えることができる．さらに，自社コンテナの保有コストも抑えることができることがわかった．

② 自社コンテナの保有コストをみると，空コンテナの回送を考慮した航路計画の方が考慮しない計画よりも小さくなることがわかった．回送を考慮しない計画では，回送を考慮する計画に比べて，貨物の積み取り量が多く運賃収入は大きい．しかしその反面，必要コンテナ数が増えることになるし，効率的に空コンテナの回送が行えない場合は，さらに必要コンテナ数を増やすことにつながる．

③ 空コンテナの回送を考慮した航路計画は，船社の利益を高くすることになるが，空コンテナの回送を考慮しない航路計画は，航路全体が非効率的なものとなって船社の利益を減少させることになるといえる．加えて，空コンテナの回送を航路計画に組み込んで考えることによって，自社コンテナの保有規模を小さくすることができ，初期投資の節約につながる．

第8章では，本研究の残された課題を明確にし，それらの課題を達成するため方法について述べた．具体的には次に挙げる研究が必要である，

① 荷主と船社の選択行動モデルを統合させた港湾政策の評価
② 荷主の経路選択のばらつきと混雑現象を同時に表現できる手法の採用
③ コンテナ貨物や空コンテナの優先度を考慮したより戦略的なモデルの構築
④ アライアンス間および航路間の空コンテナの融通を考慮したモデルの構築
⑤ 自社コンテナの長期リースコンテナの保有比率を決定できるモデルの構築
⑥ 海運市況や季節等によって変動する港における発生貨物量を考慮できるモデルの構築

以上，本研究ではコンテナ輸送市場を構成する荷主と船社の選択行動を考慮して，港湾政策を定量的に評価するための基礎的な手法を提案した．しかしながら，荷主と船社のそれぞれの選択行動に関するモデルを構築したものの，それらを統合して，均衡解を求めて政策の評価を行うところまでには至らなかった．

これまで，日本の港湾政策は，港湾を整備すれば取扱貨物量は増えると考えられてきたことから，ハード的な整備に重点が置かれてきた．しかし現在，日本の経済はすでに安定成長期に入っており，取扱貨物量の大幅な増加は見込まれないことから，戦略的な港湾政策を検討する必要がある．今後は，そのような観点から，新しい港湾政策の検討に必要とされる評価手法に関する研究を行う必要があると考える．

関連論文

審査付き学術雑誌等

(1) 新谷浩一, 今井昭夫, 西村悦子, 津田正和:近隣諸国港湾の中継を考慮した国内発着のコンテナ貨物の流動分析, 日本航海学会論文集, 第109号, pp.217-227, 2003. (第4章に関連)

(2) 新谷浩一, 今井昭夫, 西村悦子：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・ルーチング問題, 日本航海学会論文集, 第111号, pp.273-284, 2004. (第5章に関連)

(3) Shintani, K., Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S.: The container shipping network design problem with empty container repositioning, Transportation Research Part E. (印刷中) (第6章に関連)

(4) Shintani, K., Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S.: A Genetic Algorithm Based Approach to Constructing Container Shipping Network with Empty Container Repositioning among Calling Ports, Infrastructure Planning Review No.22, JSCE, 2005. (印刷中) (第7章に関連)

謝　辞

本論文を作成するにあたり，本研究の遂行に際して御指導，御協力をいただいた方々に感謝いたします．

神戸大学海事科学部教授　今井昭夫先生には本研究の遂行ならびに本論文をまとめるにあたって，始終熱意あるご指導，ご鞭撻を賜りました．ここに謹んで感謝の意を表します．

また，本論文を作成するにあたり貴重な時間を割いてご校閲の労をいただき，有益なご助言・ご指導を賜りました神戸大学大学院自然科学研究科教授小谷通泰先生ならびに同大学海事科学部教授　吉田茂先生に衷心よりお礼申し上げます．

大阪産業大学経営学部教授　三木楯彦先生(元神戸商船大学商船学部教授)には，著者が学部ならびに修士在学中の指導教官として，広い見地から研究内容に対してご指導，ご助言をいただきました．厚くお礼申し上げます．

神戸大学海事科学部助手　西村悦子先生には，本研究の遂行に際し，始終暖かな励ましとご助言をいただきました．心より感謝いたします．

広島商船高等専門学校流通情報工学科助教授　永岩健一郎先生には，著者が広島商船高等専門学校に入学してから今日に至るまで長年に渡って親身になって有益なご助言とご指導を賜りました．ここに深く謝意を表します．

東海大学海洋学部教授　松尾俊彦先生(元広島商船高等専門学校流通情報工学科助教授)ならびに広島商船高等専門学校流通情報工学科助教授岡山正人先生には，著者が広島商船高等専門学校に入学して以来，この分野での研究に係わる諸端を与えていただき，折にふれ有益なご助言，励ましをいただきました．ここに厚くお礼申し上げます．

さらに，大島商船高等専門学校前校長　山崎直樹先生ならびに現校長　和気博嗣先生には，神戸商船大学大学院商船学研究科博士後期課程(現神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程)への社会人入学に際して特設のご配慮をいただきました．また，著者が所属する商船学科の諸先生方には，本研究の遂行にあたって多大なご迷惑をおかけしたにもかかわらず，始終暖かい励ましをいただきました．紙面を借りて感謝の意を表します．

本研究の遂行にあたり，ヒアリング調査に協力していただいた船社の方々ならびにデータを提供してくださいました国土交通省，港湾管理者の方々に対し，末筆ながら紙面を借りてお礼申し上げます．

最後に，私事ではありますが，本研究を遂行するにあたり，常に影ながら支えてくれた妻陽子に心より感謝する次第です．