

機関番号：82627

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21710164

研究課題名 (和文) 多品種フロー問題によるコンテナ船航路ネットワーク設計手法の開発

研究課題名 (英文) Container ship network design method by multi-commodity flow model

研究代表者

小林 和博 (KOBAYASHI KAZUHIRO)

海上技術安全研究所・運航・物流系・研究員

研究者番号：00450677

研究成果の概要 (和文)：コンテナを輸送する船舶は、時刻表にしたがって、定められた航路を定期的に運航する。この航路の決め方により輸送の効率性が定まる。本研究は、この効率性が高くなるように航路を設計する数理モデルを開発することを目的としている。コンテナ輸送では、複数の異なる荷主のコンテナを一隻の船舶に混載する。この際、船舶の稼働率をできるだけ高く保つようにネットワークを設計することが重要である。そのために多品種フロー問題を拡張したモデルを開発した。

研究成果の概要 (英文)：Mathematical model to design the container ship network for linear shipping. In container shipping, cargoes from different owners of cargoes are loaded on a container ship. The container ship visits multiple ports, at which some of the cargoes are landed and some new cargoes are loaded. The objective is to design the network with which the working rate of each ship becomes as high as possible. For this purpose, we extend the multi-commodity flow model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：ロジスティクス工学、サプライチェーンマネジメント

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学、社会システム工学・安全システム

キーワード：数理工学、アルゴリズム、ロジスティクス、ネットワーク設計、海上物流

## 1. 研究開始当初の背景

コンテナの輸送を担うコンテナ船は、あらかじめ定められた時刻表による定期的なスケジュールに従い、一定の航路上を運航することが通常である。コンテナ船は海運会社によって運航されるが、この海運会社は、荷主からの依頼を受けてコンテナ輸送を実施し、運賃を受け取ることで収益を上げている。ここでは、複数の船舶を運航することで、複数の荷主からのコンテナ輸送依頼を受け、処理す

る海運会社を対象としている。また、国内の輸送のみ、すなわち内航輸送のみを行うことを想定している。

通常、これらのコンテナ船は、国内の複数の港を順に訪問し、訪問した港で一部のコンテナを荷揚げし、また新たなコンテナを荷積みする。2つの港の間の航海時間は3時間～2日程度である。このように、複数の船舶によって複数の港間のコンテナ輸送を実施する海運会社にとって、各船舶が運航する航路

ネットワークを効率的なものとして設計することは、円滑な企業活動にとって重要である。船舶がある航路ネットワークで運航するときに必要なコストは、その運航するために必要な費用を積算することによって得られる。これをそのネットワークの定量的な評価値とする。異なる運航ネットワークについては一般的には異なるコスト（評価値）が関連づけられる。そこで、この評価値をもとにして、できるだけ評価の高いネットワークが作成できるような数理モデルを開発することが有用である。例えば、できるだけ運航コストが安い航路ネットワークを得たい場合は、この評価値ができるだけ小さくなるようなネットワークを求めればよい。このように、船舶が運航するネットワークを、定量的な評価値に基づいて実施する方法は、海運会社の収益性にとって有用な方法となることが期待される。

研究開始当初は、この観点からの研究が、海外で開始され始めた時期であった。ところが、それらのほとんどは国をまたぐ輸送、すなわち外航輸送を扱っていた。そのため、日本国内の輸送、すなわち内航輸送の条件を適切に扱うことができないモデルであった。そこで、本研究では、内航輸送の事情にあったモデルの開発を実施することとした。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、コンテナ船が効率的に運航できる定期航路を、混合整数計画問題、とくに多品種フロー問題の拡張を用いて設計する技術を開発することである。この研究により、海運会社が船舶を、常時高効率で稼働できる定期航路ネットワークの設計が可能になる。

海運企業の意味決定は、長期（数年～数十年）、中期（数ヶ月～数年）、短期（数日～数ヶ月）に分けられる。本研究の対象は、中期（数ヶ月～数年）の意味決定である。短期の意味決定の代表的なものは船舶スケジューリングと呼ばれ、研究代表者が既に実施した研究開発により、現行の計画作成手順より5～8%程度費用が削減できることが分かっている。短期の意味決定の効率化手法は、現場に導入しやすい反面、効率化効果が限定的である。本研究では、中期の意味決定までを効率化の対象に取り入れることにより、より大きな効率化を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究が対象とする問題では、航路ネットワーク上を運航する船舶によって、貨物が、ある港からある港に運搬される状況を考えている。このような、輸送要求を満たすように航路ネットワークを設計する問題には、既存研究が存在するが、これまでは国をまたぐ外

航輸送を対象としてきた。外航輸送では、港間の移動時間が数日から数週間と比較的長い、また、港の開いている時間が国によって長い、など、日本国内の内航輸送とは異なる特徴がある。航路ネットワークの設計の対象を日本国内の内航輸送とした場合には、開港時間帯の制限（夜間休日は閉まる）、使用する船舶が小型に限られていることを考慮する必要がある。これらの条件を取り入れるために、多品種フロー問題を拡張した。より具体的には、船舶数を表す整数変数を導入することによって、輸送需要を満たすことのできる混合整数計画モデルを開発した。ここで新たに開発しているネットワーク設計モデルは、短期の意味決定モデルである船舶スケジューリングモデルと連動させることを目指している。現在の船舶スケジューリングモデルは数日の計画期間を対象としているが、これを中期の需要動向の統計情報を取り入れるものに拡張する。

## 4. 研究成果

(1) 本研究の対象としている航路ネットワーク設計は、中期の意味決定問題であるが、これに短期の意味決定である船舶スケジューリングを連携させることで、より効率的な船舶の運航を実現することが期待できる。そのための方法として、近似動的計画法の技術を取り入れることによって、船舶スケジューリングに貨物動向の統計的な傾向を反映する技術を開発した。

(2) 航路ネットワークの設計問題では、様々な実務上の運行条件を満たす必要があるが、本研究で扱う貨物は、コンテナの起点港、終点港、輸送するコンテナの容量と重量の合計によって指定されるものとしている。また、ネットワーク上を運航して貨物を運搬する船舶は、それぞれ異なる性能を持つと仮定しているが、船舶の性能は、船速、積載容量上限（単位：TEU(twenty-foot equivalent unit, 20フィートコンテナ1個)）、および積載重量上限によって定められるとしている。

表1：貨物の指定形式

貨物ID	起点港	終点港	容量	重量
1	東京	名古屋	245	636
2	名古屋	東京	129	929
3	神戸	横浜	58	800

多品種フロー問題においては、通常、貨物の量は、容量または重量のどちらかのみを扱うが、これに対して、本研究では重量と容量の両方を同時に扱う点が特徴的である。このネットワーク設計問題では、各輸送要求を、ど

の船舶で輸送するかを決めること、および、各船舶の輸送経路を定めることを目標とする。

航路ネットワークは、グラフ上のパスとして表現するが、グラフの各点は各港に対応する。港  $i$  に到着したすぐ後に港  $j$  に移動することを、枝  $(i, j)$  で表現する。

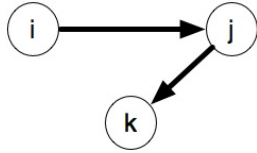


図 1 : 3 港からなるグラフの例

任意の港から任意の港への移動を認めるので、グラフは完全グラフになるが、船の集合を  $S$  と表し、 $S$  の要素である船  $s$  が港  $i$  の直後に港  $j$  に移動する航路を設置するか否かを表す 0-1 変数を  $y_{ij}^s$  とする。この変数を導入することにより、従来の多品種フロー問題では行われなかった、船舶別の移動パス設定の有無を区別することが可能となった。

(3) 通常多品種フロー問題では、ノード  $i$  からノード  $j$  へ輸送される品種 (貨物に対応) の量を表す変数として、 $x_{ij}^k$  という変数一つを表すが、海上輸送の場合、道が存在する訳ではなく、ノード  $i$  からノード  $j$  へ船舶が移動しない限り、品種が移動することはできない。そこで、港  $i$  から港  $j$  に移動する船舶の有無を表すために、変数  $y_{ij}^s$  を導入したが、ここでは、 $x_{ij}^k$  の中で、どれだけの量が船舶  $s$  で運ばれるかを陽に表す必要がある。そこで、ノード  $i$  からノード  $j$  に船舶  $s$  に運ばれる貨物  $k$  の量 (TEU 数) を表す変数として、 $z_{ij}^{ks}$  を導入した。これにより、実際のコンテナ船輸送の状況を精密に数理モデル化することが可能になった。

(4) 貨物  $k$  の 1TEU あたりの重量を  $w_k$  とすることにより、船  $s$  の積載容量上限  $W_s$  と積載重量上限  $Cap_s$  を両方取り入れ、容量、重量の双方共が上限を超えないように輸送貨物の量を制限することが可能となった。この制約は、以下のように表される：

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq \sum_{s \in S} Cap_s y_{ij}^s$$

$$\sum_{k \in K} w^k z_{ij}^{ks} \leq W_s y_{ij}^s$$

ここで、 $x_{ij}^k$  は、ノード  $i$  からノード  $j$  へ輸送される貨物  $k$  の量、 $w^k$  は貨物  $k$  に含まれる 1TEU あたりの重量、 $z_{ij}^{ks}$  は、船舶  $s$  によって

港  $i$  から港  $j$  に運搬される貨物  $k$  の TEU 数を表す。

(5) 船舶スケジューリングでは、船舶運航の短期のスケジュールをできるだけコストを小さくするように作成することが目的であった。短期とは、例えば 1 週間の貨物を運搬する状況を対象としているが、一方で、実際にはこの短期 (= 1 週間) 単位のスケジュール作成を繰り返し実行することが必要である。短期のスケジュールのコストを最小化するスケジュール作成を繰り返しても、より長い期間 (例えば 1 ヶ月) で見れば、そのコストの合計は必ずしも最小化されているとは限らない。たとえば、今週の運航コストを最小にするスケジュールを作成したとしても、そのスケジュールを採用することによって、来週のスケジュール作成が大変困難になる可能性もある。そこで、今週のスケジュールを作成するときに、来週発生するであろう輸送要求の統計的な情報を今週のスケジュール作成に取り入れることにより、より長い期間 (たとえば 1 ヶ月) での合計コストを小さくする方法を開発した。このために、近似動的計画法による手法を導入した。

いま、短期での意思決定期間に、順序を付ける。すなわち、最初に短期の意思決定をする期を 1 期、その次に短期の意思決定をする期を 2 期、と順に番号を付ける。つまり、1 期のあとに 2 期のスケジュールを、2 期のあとに 3 期のスケジュールを作成する。これを繰り返していく。ここで  $t$  期における状況を  $S_t$  とし、その状況で作成した船舶のスケジュールを  $x_t$  と表す。スケジュール  $x_t$  で運航したときのコストを  $C_t(S_t, x_t)$  とする。このとき、期  $t$  から始めて、それ以降のコストの合計を表す関数 (価値関数とよぶ)  $V_t(S_t)$  は、次の再帰方程式で表される。：

$$V_t(S_t) = \min_{x_t \in X_t} (C_t(S_t, x_t) + E(V_{t+1}(S_{t+1}) | S_t, x_t))$$

この再帰方程式において、 $C_t(S_t, x_t)$  が、短期 1 期間の船舶スケジューリングに相当する。

この再帰式の右辺の最適化問題を、集合分割問題として定式化する方法を開発した。また、それをプログラムとして実装し、性能を評価した。本研究では、価値関数  $V_t(S_t)$  を、短期 1 期間の船舶スケジューリングに相当する  $C_t(S_t, x_t)$  に含まれる変数の線形関数として表現した。これにより、短期 1 期間の船舶スケジューリング、すなわち集合分割問題を解くのと同程度の計算コストで、上記の再帰方程式を (1 つの  $t$  に対して) 解くことが可能になる。価値関数  $V_t(S_t)$  を、線形関数として表すためには、各変数の係数を定める必要があ

る。これは理論的には知ることができないが、様々なデータを用いて学習することによって定めることとする。このモデルについて、石油タンカー輸送に関するデータを用いて、短期のスケジュール3期間分のスケジュール作成に関する性能を評価した。具体的には、短期の船舶スケジュールを、近似動的計画法を用いずに3回解いた場合の3期分の運航コストの合計と、近似動的計画法を用いて解いた場合の3期分の運航コストの合計を比較した。10個のテスト問題のうち、6個については近似動的計画法による方法がより小さいコストを与え、残りの4個については近似動的計画法を用いない方法がより小さいコストを与えた。近似動的計画法は、どのようなデータに対しても常によい結果を与えるわけではないが、状況によってはよりよい結果を与えることがわかった。どのような場合によりよい結果を与えるかを明らかにすること、また、より多くの場合に対してよい結果を与えるモデルを開発することは、今後の課題である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計4件)

- ① T. Seta, K. Kobayashi and M. Kubo、Ship Scheduling in the Steel Industry - a Rolling Horizon and Approximate Dynamic Programming Approach、Proceedings of the International Symposium on Scheduling 2009、2009年7月4日、名古屋
- ② 小林和博、近似動的計画法入門、スケジュールリング・シンポジウム2010、2010年9月11日、東京
- ③ 小林和博、松枝優、航路ネットワーク設計問題の整数計画モデル、2010年日本オペレーションズ・リサーチ学会秋期研究発表会、2010年9月17日、福島
- ④ K. Kobayashi and M. Kubo、A Linear Approximation of the Value Function of an Approximate Dynamic Programming Approach for the Ship Scheduling Problem、2010年1月20日、イタリア

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

小林 和博 (KOBAYASHI KAZUHIRO)

海上技術安全研究所 運航・物流系 研究員

研究者番号：00450677