

遺伝的アルゴリズムを用いた空コンテナの回送を考慮したコンテナ船の航路計画 *

A Genetic Algorithm Based Approach to Container Shipping Networks with Empty Container Repositioning among Calling Ports*

新谷浩一**・今井昭夫***・西村悦子****

By Koichi SHINTANI**・Akio IMAI***・Etsuko NISHIMURA****

1. はじめに

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貨物の流動量は急増している。同時に、コンテナ船の寄港地間の輸出入量格差も拡大している。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平準化するために、多数の空コンテナの回送を余儀なくされている。空コンテナの回送に関する物流活動は、船社にとって直接に利益と結びつかないため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、現状ではその意志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¹⁾⁻³⁾、複雑な航路パターンを考慮していない。港湾の外貿コンテナ貨物流動の分析にあたっては、船社の戦略行動を明示化する必要がある。現実問題として、船社は本船の余席を使って空コンテナの回送を行っていることを考えると、空コンテナの回送と複雑な航路パターンを取り扱うことのできる船社行動モデルの構築が必要となる。

そこで本研究では、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、単一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および船型サイズ、投入隻数、速力を決定するための手法を検討する。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。

2. 問題の定式化

(1) コンテナ船の寄港地と寄港順序

寄港地の選定に関しては、既存研究の多くは貨物需要として実入りコンテナのみを与えていることから、需要の多い港は本船の寄港地として選定されやすい。現実問題では輸出入量に大きくインバランスが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を得なくなることから、航路計画にあたっては空コンテナの流動も考慮する必要がある。

寄港順序の決定に関しては、船社は空コンテナの回送をできるだけ本船で補完できるように決定している。その結果、多くの航路では寄港地や寄港順序は往復航で異なり、航路パターンは複雑なものとなっている。しかし既存研究では複雑な航路パターンは考慮されていない。

本研究では、船社は必ず寄港する起点港と終点港を先に決定した後に中間港を決定すると仮定する。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、復航ではその逆というように往復運航されると考える。したがって、この問題はロケーション・ルーティング問題(location routing problem, LRP)の一類型である往復型ロケーション・ルーティング問題の形態をとる⁴⁾。ここでは、図1に示すように寄

*キーワード：物流計画、港湾計画、航路計画

**正員、修(工)、大島商船高等専門学校商船学科
(〒742-2193 山口県大島郡大島町小松1091-1,
TEL/FAX0820-74-5502, E-mail:shintani@oshima-k.ac.jp)

***正員、工博、神戸大学海事科学部
(〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1, TEL078-431-6261,
FAX078-431-6365, E-mail:imai@maritime.kobe-u.ac.jp)

****正員、博(工)、神戸大学海事科学部
(〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1, TEL078-431-6258,
FAX078-431-6365, E-mail:e-nisi@maritime.kobe-u.ac.jp)

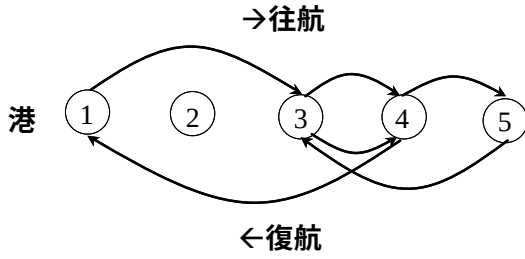


図1 コンテナ船の寄港順序

港地と寄港順序は往航と復航で独立して扱うこととした。この考えによると、寄港地パターンに対するすべての寄港順序の組合せを表現することが可能となる。

(2) 貨物需要

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。そして、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。

(3) 前提条件

ここでは、以下の前提を設ける。

- ①投入船はすべて計画期間中、同一ルートを航行し、さらに船型、投入隻数、速力は一定とする。
- ②船は起・終点港間を、中間港経由で往復航行する。
- ③利益につながらない中間港は寄港する必要はない。
- ④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。
- ⑤船は寄港地として選ばれた港の実入りコンテナの貨物需要を必ず満たし、空コンテナの需要は必ずしも満たさなくてもよい。
- ⑥当該港での実入りコンテナの積み卸しの結果、船倉内の実入りコンテナと直前リンクから運んできた空コンテナの合計が船型を上回った場合は、その超過分を無くするため、船倉内の空コンテナを当該港で卸す。

(4) 寄港順序の組合せ

前項の前提条件⑤を設けることから、本問題は与えられた寄港候補地の中から寄港地とそれに対する寄港順序の組合せを同時に決定する組合せ最適化問題に帰着する。その航路パターンの代替案の数は、

寄港候補地が5港(中間港は3港)であれば256となるが、10港(中間港は8港)となると約 1.2×10^{10} となって、寄港地数に対して指数関数的に増大する性質を持つ。

(5) 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とから、集合分割問題(set partitioning problem, SPP)の変形問題として定式化される。寄港地をノード、寄港地間を結ぶ航路をリンクとし、使用する寄港地のパターンをルートとよぶ。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 (S^k) とする。

本問題は、次のように定式化される。

$$\text{Max. } \sum_{i \in N^k} \sum_{j \in N^k} \{R_{ij}^k(y_{ij}^k) - C_{ij}^k(y_{ij}^k) - P_{ij}^k(y_{ij}^k)\} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{j \in N^k} a_{ij}^k y_{ij}^k = 1, \forall i \in N^k \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N^k} a_{ij}^k y_{ij}^k = 1, \forall j \in N^k \quad (3)$$

$$y_{ij}^k = \{0, 1\}, \forall i, j \in N^k \quad (4)$$

ここで、

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

k : 寄港地集合の番号

N^k : 各ルートの寄港地番号の集合

$a_{ij}^k = \begin{cases} 1: \text{リンク } ij \text{ がリンク集合 } S^k \text{ に含まれるとき} \\ 0: \text{そうでないとき} \end{cases}$

$y_{ij}^k = \begin{cases} 1: \text{リンク } ij \text{ にコンテナ船が就航するとき} \\ 0: \text{そうでないとき} \end{cases}$

$R_{ij}^k(\cdot)$: リンク ij の運賃収入関数

$C_{ij}^k(\cdot)$: リンク ij の船舶費用関数

$P_{ij}^k(\cdot)$: リンク ij のペナルティ費用関数

式(1)は目的関数であり、運賃収入から運航費、船費およびペナルティ費用を差し引いた利益の最大化を表す。式(2), (3)はリンク制約であり、1つのノードから複数のノードとの間にリンクで結ばれないことを保証する。ここでは、往航で寄港した中間港へ、復航においても寄港を可能とするため、復航に関するすべてのノードをダミーノードとする。ダミーノードを設けることにより、往航と復航それぞれ

に対して独立したリンク制約が有効となる．式(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 N^k には起点港と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(2), (3)の制約を考慮して使用されない場合もある．例えば，往航時には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は使用されない．また，中間港が存在する代替案では起点港ノードから直接，終点港ノードへリンクが伸びないとするための加工も伴う．

(a) 運賃収入

運賃収入は，計画期間中に輸送された各寄港地間の実入りコンテナ需要に，各寄港地間に定められた運賃率を乗じて合計したものとなる．各寄港地間の貨物需要は，解の代替案 y_{ij}^k をもとに算出される．

(b) 船舶費用

船舶費用は，運航費と船費を合算したものとなる．運航費は，燃料費と港費を合算したものとする．荷役費用は通常は荷主が負担することからここでは考えない．船費は，船員費，減価償却費，金利，保険料，修繕修理費を合算したものとする．

(c) ペナルティ費用

ペナルティ費用は，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費用と定義する．

船社は，空コンテナ需要を本船の余席，あるいは余席に積載されている空コンテナによって満たすよう運航することになる．しかし，本船の運航によってもなお，空コンテナ需要を満たすことができない場合は，余剰分については当該港に隣接するパンプールでの蔵置，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ことによって調節することとする．ここでは，それらの活動に要する 1TEU 当たりの費用をペナルティ費用と考える．

3. GAによる解法

本研究では，①寄港候補地が増えると寄港順序の組合せは指数関数的に増大する性質をもつ，②各リンクの運賃収入，運航費，船費およびペナルティ費用は航路の代替案毎に変動すると考えることから目的関数は複雑となる，③船社は必ずしも最適解を

					(4)	(3)	(2)			
セル番号：	1	2	3	4	5	6	7	8		
	↓		↓	↓	↓	↓				
セル：	[	3	3	4	5	7	9	6	9	]

図2 個体の表現例

採用するとは限らず，複数解の中から自社の方針に合致するものを選ぶ，という理由から解法に遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, GA)を採用することにした．

(1) 個体表現

本船が寄港候補地の中からどの港へどのような順序で往復航行するのかを配列によって表現する必要がある．ここでは，稲垣ら⁵⁾による個体表現を往復経路の探索も可能となるように改造したものを用いる．以下に個体表現について述べる．

(2×寄港候補地数−2)個のセルを持つ1次元配列を用意し，各セル番号とセルには港に対応する番号を入れる．図2に，図1の航路パターンを用いた表現例を示す．上段はセル番号(カッコ内は本来の港番号を示す)，下段はセルである．1番目のセルに3が，3番目のセルに4が，4番目のセルに5が，5番目のセルに7が，7番目のセルに6が，6番目のセルに9が入っていることが確認できる．なお，6から9の港番号は，それぞれ 4, 3, 2, 1 という港番号のダミーノードを表す．初期個体を生成する場合，細字で示したセルに入っている遺伝子は，セル番号の港から次へ行くことのできる港の中からランダムに選ばれた港番号が入る．親となる個体，ならびに親から生成される子の個体は，ともに起点港と終点港の間を往復航行できる表現型である必要がある．

(2) 遺伝演算

(a) 選択

評価関数値(Fitness)によって示される適応度を船社の利益(運賃収入−船舶費用−ペナルティ費用)とする．選択は，各個体の適応度を評価して行われる．ここでは，ルーレット戦略とエリート保存戦略を採用する．

(b) 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．そこで次のような交叉

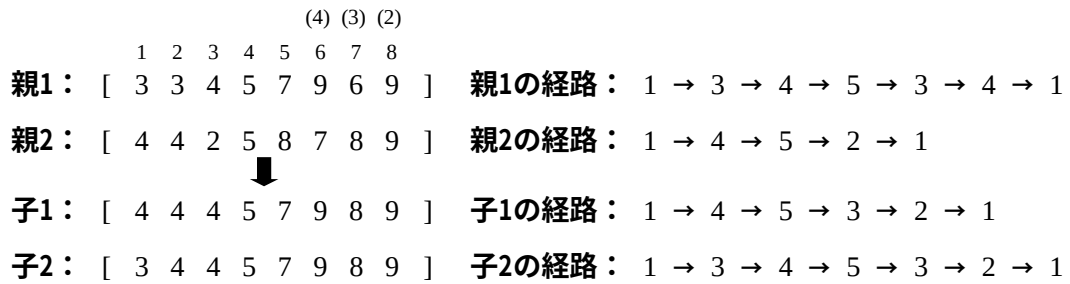


図3 交叉方法

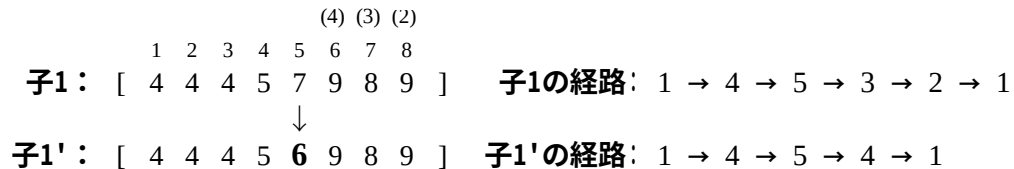


図4 突然変異

を行う。まず、初期集団からルーレット戦略によって選ばれた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の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、1つ目の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9に達するまで繰り返す。経由しなかった港番号に関しては、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。交叉の例を図3に示す。ここで、親を親1、親2とし、子の子1、子2とする。経路はそれぞれのセルの右に示す。なお、致死遺伝子を持つ個体が生成された場合は再度、交叉をやり直すことになる。

(c) 突然変異

突然変異は、図4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。そして、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。

4. 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。対象とする港は、東京、名古屋、神戸、高雄、香港、ホーチミン、マニラ、ポートケ

ラン、ジャカルタ、シンガポールの10港とする。起点港を東京、終点港をシンガポールとする。投入船舶は、500TEU、1,000TEU、1,500TEU、2,000TEUの4船型を想定する。

ここでは、空コンテナの回送費用や荷役時間が航路形成に及ぼす影響をみるため、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、それらを比較する。さらに、ペナルティ費用が上昇することによって、航路形成に及ぼす影響についても分析する。

5. おわりに

本稿では、本船による空コンテナの回送および複雑な航路パターンを考慮した航路計画に関する手法とそのGAによる解法について概要を説明した。講演発表会では、適用事例を通して本船による空コンテナの回送にかかる費用や荷役時間ならびにペナルティ費用が航路形成に与える影響について分析結果を示す予定である。

参考文献

- 1) 三木, 今井: 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, 1988.3.
- 2) 黒川, 鶴田, 嶋: 海上コンテナ輸送ネットワークの設計に関する研究, 日本航海学会論文集, 第101号, pp.259-269, 1999.9.
- 3) Imai, Rivera: "Strategic Fleet Size Planning for Maritime Refrigerated Container", Maritime Policy and Management, Vol.28 (4), pp.361-374, 2001.
- 4) 今井: 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, 1992.11.
- 5) 稲垣, 長谷川, 北島: 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 (D-1), Vol.J82-D-I, No.8, pp.1102-1111, 1999.3.