

# フィーダー船を考慮したバーステンプレート問題

学生会員 船川 由香利(神戸大学) 正会員 今井 昭夫(神戸大学)

## 要旨

本研究では、長期的なバーススケジューリングであるバーステンプレート問題を提案する。ほとんどのコンテナ航路はウイークリーサービスが基本であるので、コンテナターミナルが寄港船社と長期契約を結ぶときの参考資料であるバーステンプレートを作成する場合、1週間の長さ(シリンダーと呼ぶ)のテンプレート内に寄港船のバース・ウインドウをはめ込むことになる。本研究では、このバーステンプレート問題に、2つの目的関数、つまり(1)総待ち時間の最小化と、(2)母船とフィーダー船の係留バース距離の最小化、を用いるバーステンプレート問題の効率的な近似解法を提案する。

キーワード：物流・海運、バーステンプレート、フィーダー船、多目的GA

## 1. はじめに

現在、国際海上コンテナ輸送は様々な物資の国際間輸送に大きく貢献している。国際定期船航路のほぼ全てがコンテナ化されており、コンテナ輸送は成熟期に入ったと言える。そのため、ターミナルオペレータや船社には、それぞれのユーザーへの一層のサービス向上が求められている。

近隣アジア諸国港湾においては、規模の拡大とコスト削減によりハブ港としての地位を確立している。そして日本は地方港からこのような近隣諸国のハブ港を経由した輸出入が増え、日本国内主要港のハブ港機能低下に拍車をかけている状態である。現状を打破するため、政府は国際コンテナ戦略港湾政策を打ち出し、大型化の進むコンテナ船への対応とアジア主要国に引けをとらないサービスを発案としている<sup>(1)</sup>。この目標は、(1)アジア向けも含む日本全体の日本発着貨物の釜山港など東アジア主要港でのトランシップ率を現行の半分に縮減する、(2)アジア発着貨物の日本の国際コンテナ戦略港でのトランシップを推進し、東アジアの主要港として日本の港湾が選択されることを目指す、としている。目標達成のためには効率的なターミナル運営への改革とトランシップ貨物のアジア諸国からの奪回が不可欠である。事実、実現への方策として、「公設民営化の推進やターミナルの一体運営の推進などによるターミナルコストの削減」が挙げられている。

このような、大規模コンテナターミナルの成功には、フィーダー船が母船ターミナルに直着けできることが当然のこととなる。これによって横持ちトラ

ック費用が発生しないため、直着け出来ない場合と比べターミナル料金が低廉にでき、これが国際コンテナ戦略港湾の成功につながる。

このような背景から、大規模ターミナルでのバーススケジューリングの効率化がきわめて重要である。バーススケジューリングには長期的な計画である、バーステンプレート問題(Berth Template Problem, BTP)と短期的な運用レベルのバース割当問題(Berth Allocation Problem, BAP)に大別される。本研究では、バーステンプレート問題の近似解法を提案する。先に述べたようにハブターミナルでは母船とフィーダー船の関連性が重要であるため、我々の問題では、母船とフィーダー船の接続関係考慮した問題を検討する。

## 2. 問題の概要と定式化

### 2.1 問題の考え方

先に述べたように、バースのスケジューリングは、BTPとBAPの大きく二つに分類できる。BTPは、ターミナル会社と寄港船の船社がサービス契約を結ぶ際に決定される、中長期のスケジュールである。現在、コンテナ船は週に1便もしくはそれ以上の頻度で寄港するため、スケジュールを考える期間は通常1週間単位にしておき、毎週同じパターン(テンプレートと呼ぶ)で荷役サービスをすることになる。したがって、BTPは、計画期間(シリンダーと呼ぶ)内に契約を結んだ全ての船のサービスを実現しなくてはならない。しかし、船は頻りに延着するため、当初のスケジュール(テンプレート)を組み直す必

要がある。その際は、オープンエンドの計画期間に切り替えて、延着した船を再度計画する。このような日々のスケジューリングを **BAP** という。

本研究で考える **BTP** は大規模コンテナターミナルを想定している。このようなターミナルでは多くのトランシップ貨物を取り扱う。通常、母船とそれを引き継ぐフィーダー船は同時刻に係留されることはあまり無い。しかし、両船間で貨物の移動時に両船の係留バースが離れていると、いわゆる横持ちが発生して、時間とコストで大きなロスが発生する。

そこで本研究の **BTP** は次の二つの目的関数を持つ。

- (1) 船の荷役開始時刻までの待ち時間最小化
- (2) 母船とそれと関係するフィーダー船の係留バース間距離の最小化

このような2目的最適化問題の解法には、一般に様々なものが提案されているが、本研究では遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた近似解法を提案する。

## 2.2 定式化

本問題の定式化に使用するパラメータと変数は次の通りである。

・パラメータ

- $B$  バースの集合
- $V$  船の集合
- $VM(\subseteq V)$  母船の集合
- $VF(\subseteq V \setminus VM)$  フィーダー船の集合
- $i(=1, \dots, I) \in B$  バース番号
- $j(=1, \dots, T) \in VM$  母船番号
- $l(=1, \dots, T) \in VF$  フィーダー船番号
- $k(=1, \dots, T) \in U$  係留順序(後ろから昇順)
- $R_{jj'}$  母船  $j$  とフィーダー船  $j'$  が接続関係にあるとき = 1、無いとき = 0
- $W_{jj'}$  母船  $j$  とフィーダー船  $j'$  間の重み(荷役貨物量)
- $CT$  計画期間(シリンダー)の長さ
- $C_j$  船  $j$  の荷役時間
- $B_{jj'}^+$  母船  $j$  とフィーダー船  $j'$  間の距離で、正の時の値
- $B_{jj'}^-$  母船  $j$  とフィーダー船  $j'$  間の距離で、負の時の値
- ・変数
- $Y_i$  バース  $i$  の計画開始時刻
- $x_{ijk}$  船  $j$  がバース  $i$  の  $k$  番目に係留されるとき = 1、

そうでないとき = 0

$y_{ijk}$  船  $j$  がバース  $i$  の  $k$  番目の船として係留されるときの、その船の直前のバース  $i$  の空き時間

Minimize

$$Z_1 = \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} \sum_{k \in U} \{(k-1)C_j - A_j\} x_{ijk} + \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} \sum_{k \in U} k y_{ijk} \quad (1)$$

$$Z_2 = \sum_{j \in V} (B_{jj'}^+ + B_{jj'}^-) R_{jj'} W_{jj'} \quad (2)$$

Subject to

$$R_{jj'} (\sum_{i \in B} \sum_{k \in U} i \cdot x_{ijk} - \sum_{i \in B} \sum_{k \in U} i \cdot x_{ij'k}) = B_{jj'}^+ - B_{jj'}^- \quad \forall j \in VM, j' \in VF, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{k \in U} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in V, \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in B, k \in U, \quad (5)$$

$$\sum_{l \in V} \sum_{m \in P_k} (C_l x_{ilm} + y_{ilm}) + y_{ijk} - A_j x_{ijk} \geq 0 \quad \forall i \in B, j \in V, k \in U, \quad (6)$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{k \in U} (C_j x_{ijk} + y_{ijk}) - Y_i \leq CT \quad \forall i \in B, \quad (7)$$

$$Y_i \leq \left(1 - \sum_{j \in V} x_{ijk}\right) CT + \sum_{l \in V} \sum_{m > k \in U} (C_l x_{ilm} + y_{ilm}) + \sum_{j \in V} y_{ijk} \quad \forall i \in B, k \in U, \quad (8)$$

$$Y_i \leq CT \quad \forall i \in B, \quad (9)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in B, j \in V, k \in U, \quad (10)$$

$$0 \leq y_{ijk} \leq A_j \quad \forall i \in B, j \in V, k \in U, \quad (11)$$

目的関数(1)は、船の荷役開始時刻までの待ち時間の最小化を示し、目的関数式(2)はトランシップ関係にある船同士の係留場所の最小化を示している。式(3)は  $B_{jj'}^+$  と  $B_{jj'}^-$  の定義をしている。式

(4)はすべての船が、いずれかのバースに必ず1度係留されることを保証している。式(5)は各バースで同時に係留できるのは1隻であることを示す。式(6)は船の係留は入港後に行われることを保証する。式(7)はすべての船のサービスはシリンダー内に行われることを示す。式(8)は各バースの計画開始時刻を定義している。式(9)はバースの計画開始時刻の上限を定義している。式(10)は係留されるなら1、そうでなければ0の整数変数である。式(11)はバースの空き時間を定義している。

## 3. 解法

### 3.1 解法の概要

前述のように本問題は2目的問題であり、すべての目的関数を同時に最小にすることが難しい。そこ

で、遺伝的アルゴリズム(GA)を使って多目的最適化問題の解となるパレート最適解を求める。パレート最適解とは、ある目的関数値を改善するためには少なくとも他の一つの目的関数値を劣化せざるを得ない解のことである。

パレート最適解集合の生成方法は多く提案されているが、本問題では(moGA)パレートのランキング法を用いることにする<sup>(3)</sup>。パレートのランキング法では個体 $X_i$ が $n_i$ 個の個体に優越されているとき、 $X_i$ のランク $r(X_i)$ を、

$$r(X_i) = 1 + n_i$$

としてランク付けを行い、結果として図1のような異なるランクのパレート解の集合を見つける。ランク付けは、当該解が他の解に優越されている場合、「その優越されている解の数+1」で計算する。図1の各解の数字はランクを示しているが、例えば、ランク3の解はその左下(当該解を優越している)に二つの解が存在しており、したがって当該解はランク3となる。

以上のように、各世代内でそれぞれの解を優越関係に基づいてランク付けして適応度関数を作り、選択を行う。この結果、各目的関数のバランスを考慮するようなパレート最適解が得られやすくなる。

### 3.2 遺伝子演算子とパラメータ

GAの処理の概要は以下のとおりである。

- ・選択  
ルーレット選択、エリート保存
- ・交叉  
2点交叉、交叉率 1.0
- ・突然変異  
突然変異率 0.09

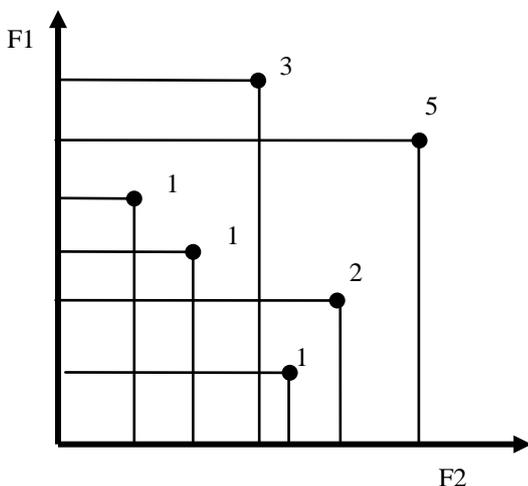


図1 パレートのランキング法

- ・目的関数2に対する重み  
0.1
- ・個体群サイズ 100
- ・世代数 100

### 3.3 遺伝子アルゴリズムの手順

多目的GAの手順を示す。

**ステップ1:** 初期解の生成を行う。ここで同じ並びの染色体がないか、同じ船番号がないかを確認し、あればステップ1を繰り返す。

**ステップ2:** デコーディング作業を行う。遺伝子を船番号、染色体の並びを船のサービス順と解釈して荷役開始時間と出港時刻を割り出し、待ち時間を計算する(目的関数1)。それぞれの船の荷役バースから距離を出して、関係のある母船とフィーダー船である場合は母船とフィーダー船の距離×トランシップ貨物量×任意の重みパラメータで計算する。(目的関数2)。

**ステップ3:** 解が全て設定したシリンダー内に収まっているかどうかを確認する。もしオーバーしている場合、荷役開始時刻を変更してシリンダーに収まる場合は変更をして、再デコーディングを行い、待ち時間も再計算する。

**ステップ4:** ステップ3の染色体を再度シリンダー内に収まっているかを調べ、もし収まっていなかったらステップ1へ。

**ステップ5:** パレートのランキング法により、全ての解にランクをつけ、パレート最適解を出す。全ての解にランクがつけ終わったらステップ6へ。

**ステップ6:** ランクに基づいてそれぞれの解の適合度を計算する。

**ステップ7:** 最終世代であればステップ11へ。そうでなければ、ステップ8へ。

**ステップ8:** 遺伝子演算を行う。ルーレット選択により、解集合の中からペアリングを行い、交叉処理をする。突然変異が起こるとき、任意に選択した二つの遺伝子を交換する。ここでできた子供の解に対し、初期解と同様、ステップ2~5によりデコーディングとシリンダーのチェックを行う。

**ステップ9:** 親、子すべて合わせた解集合の中から同じ並びの染色体があれば、どちらか一方の染色体の適合度を0に設定しておく。

**ステップ10:** ステップ5~6により親、子すべて合わせた解にランクをつけ、適合度を計算する。ここで、ステップ9により既に適合度が0の解は、何も

行わない。

**ステップ 11**: エリート保存+ルーレット選択により、次世代に残す個体群サイズ分の染色体を選択する。ランク 1 のものは無条件に次世代へ残るものとし、ランク 1 の数が個体群サイズを満たしていればステップ 5 へ、満たなければルーレット選択によりランク 1 以外の解より選択し、個体群サイズ分用意する。Gen=gen+1 としてステップ 5 へ。

**ステップ 12**: パレート最適解を出して終了する。

## 4. 数値実験

### 4.1 使用するデータの概要

使用するデータは 4 バース、50 隻、荷役時間はすべて 4 時間とした。バーステンプレート問題では、1 週間のサービス枠内に契約を結ぶ全ての船を納める必要があるため、シリンダーの長さは 168 時間 (1 週間) とした。母船とフィーダー船として積み替えの荷物があるものを 10 組設定し、それぞれにトランシップ貨物量もパラメータとして設定した。目的関数 (2) は、母船とフィーダー船の距離 × トランシップ貨物量 × 任意の重みパラメータにより計算した。

### 4.2 計算結果

実験の結果は表 1 のようになった。この結果は、いわゆるランク 1 のパレート解の集合である。この結果として、待ち時間と距離のどちらかに大きく偏った解だけでなく、解のばらつきが見られた。しかし、バースごとにシリンダーに収めなければならない制約があるので、船のバース・ウィンドウがつかめられる結果となった。つまり、先に到着している船は待たされる結果となっている。GA の処理の説明で述べたように、染色体の遺伝子 (船) はその並びの順でサービスをするので、到着時間に必ずしもサービスを受けられるとは限らない。

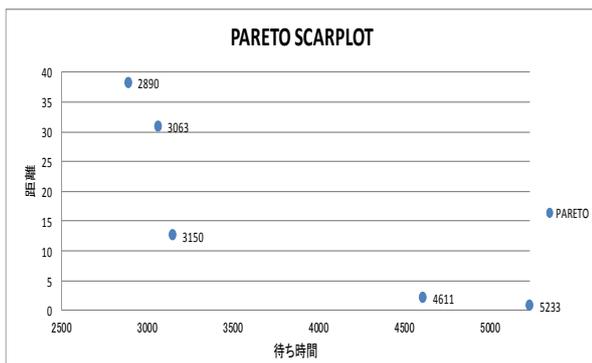


表 1 実験結果

## 5. おわりに

この研究では、バーステンプレート問題を待ち時間と母船-フィーダー船の係留バース距離という 2 目的最適化問題として表し、遺伝的アルゴリズムでその問題のパレート集合を求めた。今回の実験では、4 バース 50 隻の問題を解いた。本発表時では様々な規模の問題の結果を示す予定である。

## 6. 参考文献

- (1) 国土交通省: 国際コンテナ戦略港湾の取り組み, <http://www.naiko-kaiun.or.jp/>, 2013. 7. 29.
- (2) Carlos.M. Fonseca and Peter.J. Fleming, Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization, Proc of 1<sup>st</sup> Int.Conf.on Genetic Algorithms and Their Applications, pp.93-100,1985.