

マルチユーザコンテナターミナルにおける多目的バース割当法* Multi-objective Berth Allocation Problem in a Multi-user Container Terminal

西村悦子**, 今井昭夫***, 佐村智子****

Etsuko NISHIMURA, Akio IMAI, Tomoko SAMURA

1. はじめに

近年、近隣アジア諸国における港湾整備が進展しているが、これらの国での港湾関連コストが低いために日本の港湾のハブとしての機能が低迷しつつある。したがって、日本の港湾が国際港間競争の中でハブとして発展するには、港湾関連コストを低減させ、港湾利用者へのサービス水準を向上させることが重要である。現在日本のほとんどのコンテナターミナルは船会社へ専用貸しされているが、このため寄港隻数がさほど多くない場合には、バースに空きが生じることがあり、このバースの空きがコストを相対的に高くしている。そこで我々は、船会社への専用貸しをなくし、内航船と外航船が同一ターミナルでの荷役が可能であり、各船がどのバースでもサービスを受けることができるような複数バースの共同利用を提案する。これによりバース数を現状より削減でき、コストを低減させることが可能になる。

このような公共利用形式のコンテナ港(以下、マルチユーザターミナルと呼ぶ)では、船とバースの割当の仕方がバースのパフォーマンスに大きく影響する。そのため我々はすでに、船のバースへの効率的な割当法を検討した^[4,5,6,7,8]。これらの研究におけるバース割当の評価は、バースの公共性の点から、総在港時間(船のバース待ち時間と荷役時間の合計の総和)の最小化とし、係留順にはFirst-Come-First-Served(FCFS)ルールは考慮していない。これは、例えば同時期に到着する船2隻をあるバースに係留させる場合、両者の荷役時間の差が大きければ、係留順を決める際に荷役時間が短い船を先に係留させた方が、

他船への待ち時間が短くて済むという考え方からFCFSをあえて考慮していない。しかし、現実には荷役コンテナ数の多い(≒荷役時間の長い)船を優先的に荷役することがある。また港湾管理者側の利益を最大にするには、各船の荷役をなるべく早く済ませ、多くの船へのサービスを実現することが重要である。

そこで本研究では上記のことを考慮するために、既存の評価関数である総在港時間に、重み付き総待ち時間(入港船の優先度を考慮)、総サービス時間を加えた3つの評価指標を最小化する多目的バース割当法を遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて検討する。

2. 問題の定式化

対象船の荷役時間は公共形式の場合、おそらく各バースとも同一性能の荷役機器を用意すると考えられ、バースごとに荷役時間は異ならないと考えられる。しかし内航フィーダー船の対象バースへの直着けを考慮しているため、本船とフィーダー船が常に隣接して係留されなければ、一方に対し荷役コンテナがその係留バース近傍に蔵置されないことがある。このような場合、船の係留バースが異なれば荷役時間に差が出てくる可能性がある。また係留順序を決定する場合、現実には入港順に係留させたり、ターミナル側にとって優先とすべき顧客(船)、例えば荷役貨物量の多い船を優先にすることが考えられる。そこで基本的にはFCFSは考慮しないが、荷役コンテナ数の多い船にはなるべく待ち時間を短くするという優先度を設けるため、待ち時間×荷役コンテナ数を最小化する評価関数を目的関数に加える。

(1) 目的関数

本問題におけるバース割当の評価を以下に示す。

- ①総在港時間(各船のバース待ち時間+荷役時間の総和)の最小化: 船会社に対する評価
- ②総サービス時間(各船の荷役時間の総和)の最小

* キーワード: ターミナル計画、港湾計画

** 正会員 工修 神戸商船大学助手 輸送システム工学講座
(〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1, TEL: 078-431-6258,
FAX: 078-431-6365, E-mail: e-nisi@bun.ti.kshosen.ac.jp)

*** 正会員 工博 神戸商船大学教授 輸送システム工学講座
(〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1, TEL: 078-431-6261,
FAX: 078-431-6365, E-mail: pdmb@bun.ti.kshosen.ac.jp)

**** 非会員 工学 新開株式会社

化：港湾管理者に対する評価

③重み付き総待ち時間(各船のバース待ち時間×荷役コンテナ数の総和)の最小化：船会社に対する評価

(2) 定式化

本問題は式(1)―式(13)のような一種の割当問題になる。ここで、

$i (= 1, \dots, I) \in B$: バース番号 (I : 対象バース数)

$j (= 1, \dots, T) \in V$: 船番号 (T : 対象船舶の隻数)

C_{ij} : 船 j がバース i で行う荷役時間

A_j : 船 j の到着時間

WD_i : バース i の水深

DR_j : 船 j の喫水に安全距離を加えた必要水深

QL_i : バース i の岸壁長

L_j : 船 j の全長に係留の際に必要な延長を考慮した必要延長

HC_j : 船 j の荷役コンテナ数

x_{ij} : もし船 j がバース i に係留されるとき 1, そうでないとき 0 である 0-1 整数変数

y_{ij} : あるバースにおいて船 j と船 j' との係留時刻が重なっているとき 1, そうでないとき 0 である 0-1 整数変数

m_j : 船 j の係留開始時刻

本問題は、次のように定式化される。

$$\text{Minimize } Z = (Z_1, Z_2, Z_3) \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{i \in B} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in V \quad (2)$$

$$m_j - A_j \geq 0, \quad \forall j \in V \quad (3)$$

$$\sum_{i \in B} (WD_i - DR_j) x_{ij} \geq 0, \quad \forall j \in V \quad (4)$$

$$(m_j + \sum_{i \in B} C_{ij} x_{ij} - m_j)(m_j + \sum_{i \in B} C_{ij} x_{ij} - m_{j'}) y_{ij} x_{ij'} \geq 0, \quad \forall i \in B, j \in V, j' \in V - \{j\} \quad (5)$$

$$(m_j + \sum_{i \in B} C_{ij} x_{ij} - m_j)(m_j + \sum_{i \in B} C_{ij} x_{ij} - m_{j'})(1 - y_{ij} x_{ij'}) \leq 0, \quad \forall i \in B, j \in V, j' \in V - \{j\} \quad (6)$$

$$\sum_{i \in B} (QL_i - \sum_{j' \in V - \{j\}} L_{j'} y_{ij'} x_{ij} - L_j) x_{ij} \geq 0, \quad \forall j \in V \quad (7)$$

$$Z_1 = \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} (m_j - A_j + C_{ij}) x_{ij} \quad (8)$$

$$Z_2 = \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} C_{ij} x_{ij} \quad (9)$$

$$Z_3 = HC_j \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} (m_j - A_j) x_{ij} \quad (10)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in B, j \in V \quad (11)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall j, j' \in V \quad (12)$$

$$m_j \text{ is integer}, \quad \forall j \in V \quad (13)$$

上記のモデルで決定変数は、 x_{ij} 、 y_{ij} と m_j である。

制約式(2)は対象船が必ずいずれかのバースに係留

されることを保証し、式(3)は各船は入港後に係留されることを意味している。式(4)は船 j の必要水深が係留されるバース i の水深を超えないことを保証している。式(5)、(6)は船 j と船 j' が当該バースで同時に係留されているかどうかという係留状況を示し、両船の係留開始時刻から出港時刻までに重なる時間があれば $y_{ij} = 1$ 、なければ $y_{ij} = 0$ となる。式(7)はバース i において、船 j の必要延長と、同時に係留される船 j' の必要延長との和が、バース i の岸壁長を超えないことを保証している。式(8)~(10)は目的関数を示しており、それぞれ総在港時間、総サービス時間、重み付き総待ち時間を表している。

3. 解法

本問題は多目的の最小化問題であり、すべての目的関数を同時に最小にすることは容易ではない。そこで、GAを用い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1つの目的関数値を劣化せざるを得ない解のことである。GAは個体群を用いて探索が進められるため、各目的関数に対してある程度良い値をとる個体を同時に持ちながら探索をすすめることができ、パレート最適集合を直接求めることができる。GAによるパレート最適集合の生成方法を検討した既存の研究には、各目的関数について独立に選択するもの^[9]、解の優越関係に基づいて選択を行なうもの^[1,2,3]、さらに両者を組み合わせたもの^[10]等がある。これらの手法の解の精度は、扱う問題によって異なると考えられるが、上記の中で比較的解の精度の良い玉置らの方法^[10]とHyunらの方法^[9]を本問題に対し用いることにする。ただし、個体表現方法等は既存の単目的問題[7, 8]と同様の方法を用い、パレート最適集合の選定部分に対してのみ、先の2解法を用いることにする。

(1) パレート最適集合

GAの処理の中で、パレート最適集合を求め、新たな世代の個体群を決定し、各個体にランクを付ける手順について以下の2種類の方法を検討する。なお、 $rank$ ($\in R$) はランク番号、 l ($\in L$) は目的関数の種類、 $popsiz$ e は個体群サイズとする。

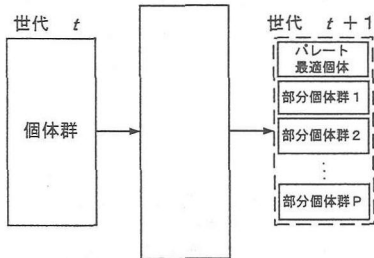
(a) 解法1 (玉置らの方法^[10])

これは、並列選択とパレート保存戦略の2種類の方法を組み合わせたものである。並列選択は、次世代の個体群を目的関数の種類と同数の部分個体群に分割し、目的関数ごとに部分個体群を形成する。パレート保存戦略は、個体群中でのパレート個体をすべて次世代の個体群に継承する方法である。以下に手順を示し、概念図を図1に示す。

ステップ1：個体群からパレート最適解を求め、パレート個体数 = $popsiz$ なら全パレート個体にランク番号 $rank = 1$ を与える。パレート個体数 > $popsiz$ ならステップ2へ。パレート個体数 < $popsiz$ ならステップ3へ。

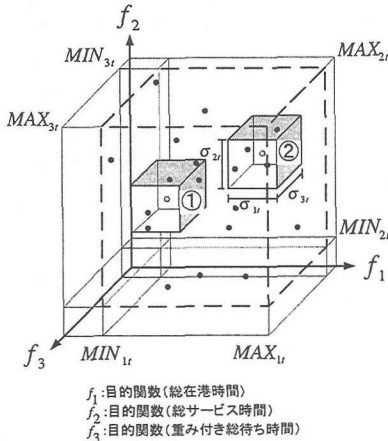
ステップ2：パレート個体を目的関数と同数の部分個体群に分割し、各目的関数に対し値が最小なものから順にランクを $rank = 1$ から昇順に付け、ランク付済み個体数 = $popsiz$ になれば、ランク付け終了。

ステップ3：まずパレート個体すべてに $rank = 1$ とする。残りの個体群を目的関数と同数の部分個体群に分割し、各目的関数に対し値が最小なものから順にランクを $rank = 2$ から昇順に付け、ランク付済み個体数 = $popsiz$ になれば、ランク付け終了。



交叉・突然変異 選択 (複製)

図1 並列選択とパレート保存戦略による方法の概念



f_1 : 目的関数 (総在港時間)
 f_2 : 目的関数 (総サービス時間)
 f_3 : 目的関数 (積み付き総待ち時間)

図2 解密度算出図

(b) 解法2 (Hyunの方法^[3])

この手法はパレート最適集合を求め、1個体ごとに順序付けするものである。図2は各個体に対する目的関数値を3次元空間で示したもので、丸印は各個体を示している。手順は以下になるが、 t は世代、 Pop は親と子の全個体の集合とする。

ステップ1：各目的関数について最大値、最小値 (図2の MAX_{l_t} 、 MIN_{l_t}) を求め、これを次式に代入し、図中の①、②のような直方体の1辺の長さ σ_{l_t} を求め、 $n = 1$ 、集合 $S = Pop$ とする。

$$\sigma_{l_t} = (MAX_{l_t} - MIN_{l_t}) / \sqrt[3]{popsiz}, \quad \forall l \in L \quad (14)$$

ステップ2：各個体を中心に直方体を置き、その中に含まれる個体数を中心個体の解密度とする。

ステップ3：集合 S の中でパレート解集合 P (解の数: p) を求め、その中で解密度の高いものから順にランク番号 $rank = n \sim n + p - 1$ を付す。

ステップ4：個体群からステップ3でランク付けされたものを除き、残りの個体集合を S 、 $n = p + 1$ とする。 $popsiz$ 個の個体に対しランク付けが終わっていれば終了、そうでなければステップ3へ。

(c) 適応度

両手法で決定した各個体のランク番号を以下の式 (文献[3]では生存確率算出式として使用) に代入して各個体の適応度 $Fitness$ を求める。

$$Fitness[p(rank)] = q(1-q)^{rank-1}, \quad \forall rank \in R \quad (15)$$

パラメータ q は $0 < q < 1$ の間で設定するが、本問題の解法1では0.5、解法2では0.38とする。なお、 $p(*)$ はランク*の個体とする。

(2) 遺伝演算子とパラメータ

遺伝演算子と各種パラメータは以下のようにする。

- ① 選択：エリート保存戦略 + トーナメント選択戦略
- ② 交叉：部分一致交叉 (交叉確率0.9)
- ③ 突然変異率：0.09 (解法1)、0.08 (解法2)
- ④ 世代数、個体群サイズ：1000、30

4. 実績との比較

次に、考案したパース割当法を用いてマルチユーザターミナルとして利用する場合のパースの利用効率と実績のそれとの比較を行う。

(1) 計算の前提

神戸港の5日間の入港船を対象とし、専用コンテナバース（ポートアイランドと六甲アイランドに位置するが、以下それぞれPC、RCと呼ぶ）13バースでの各評価関数値を求め、以下の3ケースでマルチユーザーミナルとして利用した場合の全13バース合計の各評価関数値との比較を行なう。

ケース1: 全13バースが隣接する1つのマルチユーザーミナルとして利用

ケース2: PC7バース、RC6バースをそれぞれ独立の2マルチユーザーミナルとして利用

ケース3: PC第1期3バース、PC第2期4バース、RC6バースをそれぞれ独立の3マルチユーザーミナルとして利用

(2) マルチユーザーミナル導入による効果

図3に解法・ケース別に全供用バース数を3~13まで変化させた場合および、実績の専用13バースでの1隻あたり平均の総在港時間、総サービス時間、重み付き総待ち時間（以下総在、総サ、総待ちと呼ぶ）を示す。解はパレートとして複数解求まるが、これらの平均値を用いている。現在13バース供用されているが、どのケースにおいても総在と総待ちに

に関しては供用7バース、総サでは5バースでも実績の評価関数値と同程度かそれ以下になっていることがわかる。また解法1と2を比較すると、両者に大差はないが総在と総待ちのバース数の少ない5バース以下において解法1による時間が長くなるケースが多少存在する。またバース数が増えれば待ち時間が減るため、総在、総待ちの値は小さくなると考えられるが、近似解法による解であるため5、8バースでは必ずしもそうはなっていない。さらに3つのケースの中で、ケース1のようにマルチユーザーミナルの規模の大きい方が各評価値は小さくなっているが、より現実的にマルチユーザーミナルとして運用可能と考えられるケース3の場合でも全体として現状の約半分の7バースで現在とほぼ同じかそれ以下の評価値が得られることがわかった。

5. おわりに

本研究では、日本の港湾のハブ機能を取り戻すために、バースの共同利用による港湾コストの削減を考え、その運用に必要な船とバースを割当てる方法を多目的問題として捉えGAを用いて検討した。計算結果から提案した解法を用いれば現状の約半分のバース数でも現状とほぼ同じサービスが提供できることが明らかとなった。

参考文献

- [1] Goldberg, D. E., Genetic algorithms in search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
- [2] Horn, J., et al., A niched pareto genetic algorithm for multi-objective optimization, Proc. of the 1st IEEE Conference on Evolutionary Computation, pp.82-87, 1994.
- [3] Hyun, J. C., et al., A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines, Computers Ops. Res. Vol.25, No.7/8, pp.675-690, 1998.
- [4] 今井・西村, 計画開始時刻を考慮した公共バースの割当法, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp.557-564, 1998.
- [5] Imai, A., et al., The dynamic berth allocation problem for a container port, Transportation Research Part B, (印刷中).
- [6] 西村・今井, 遺伝的アルゴリズムを用いた公共バースの割当法, 日本航海学会論文集, No.100, pp.181-189, 1999.
- [7] 西村・今井, 複数解を考慮した遺伝的アルゴリズムによる公共バースの割当法, 土木計画学研究・論文集, No.16, pp.827-834, 1999.
- [8] Nishimura, E., et al., Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms, European Journal of Operational Research, (印刷中).
- [9] Schaffer, J. D., Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms, Proc. of the 1st international conference on genetic algorithms and their applications, pp. 93-100, 1985.
- [10] 玉置・森・荒木, 遺伝的アルゴリズムを用いたパレート最適解集合の生成法, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.8, pp.1185-1192, 1995.

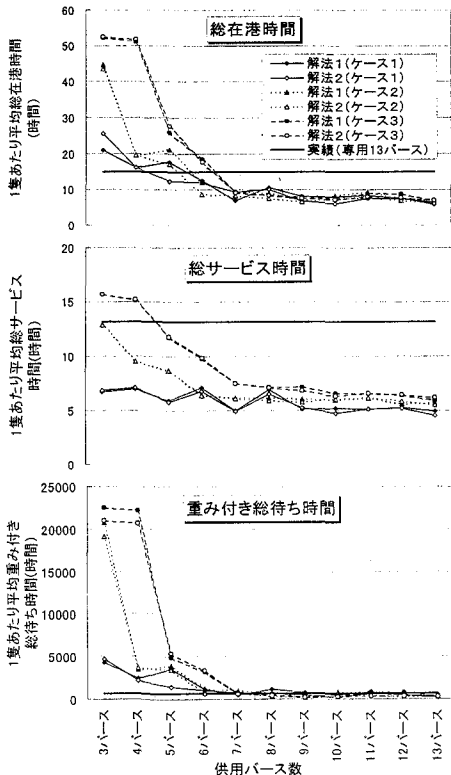


図3 各評価指標における実績との比較