【土木計画学研究・論文集 Vol.18 no.4 2001年9月】

船の優先度を考慮した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 with Consideration of Ship Service Priority*

西村悦子**、今井昭夫***、佐村智子****

Etsuko NISHIMURA, Akio IMAI and Tomoko SAMURA

1. はじめに

近年、日本の主要港はアジアの競合港の出現に伴い、ハブ港の地位が脅かされている。また国内の地方港において、従来の港勢に変化が起こっており、貨物の分散化に拍車がかかっている。そのため、神戸港をはじめとする日本の主要港ではハブ機能が低下傾向にある。

ハブ港の条件としては、大型コンテナ船が接岸できる水深を確保した港湾施設を有することが重要となるが、現在日本に課せられた課題は、大型コンテナ船が接岸できるふ頭の問題だけでなく、ふ頭自体のサービス機能が問題となっている。これは日本の港湾のサービス時間が世界の主要港に比べて時間帯制限や休日が多いこと、および日本の港湾の諸料金がアジアのそれより高いことである。欧米に比べるとさほど差はないが、アジアの主要港と比べると約2倍になっている。したがって、休日・夜間の荷役体制の不便さ、高いふ頭使用料と荷役料金といった要因が重なって日本の港湾は使い勝手の悪い港として、国際的に定着しつつある。このため、こうしたハブ港への弊害要因を取り除く努力をすべきである。

現在、コンテナふ頭の運営方法には、主に公共ふ頭と公社ふ頭の2つに分けられる。公共ふ頭は誰でも利用できる公共施設であるため、ふ頭建設には国や地方自治体の資金が投じられているが、現在はほとんどが在来船等と同様に利用する多目的バースとしての利用がほとんどである。公社ふ頭は特定の船会社が利用する権利を持ち、その船会社の専用ふ頭である。このような利用方法の違いから、公社ふ頭の経費は一般にかなり高くならざるを得ないが、取扱貨物量が多ければ、コンテナ1個あたりに対するコストが抑えられるため、十分カバーできる。しかしながら現在、日本のコンテナターミナルは公社ふ頭での利用がほとんどであり、供用バース数に対し取扱貨物量が少ないため、相対的なコスト高になっている。

そこで、我々は主要港において公共方式を導入し、複数の隣接バースを共同利用することが考えている。また神戸港のようにメインバースとフィーダーバースが隣接していないところでは、トランシップ貨物を扱う場合貨物が一旦ターミナルの外に出る必要があるため、別途横持ち費用がかかっている。このことから、この費用を抑えるために、本船とフィーダー船が同一ターミナルでの荷役が可能であるものを対象とする。

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[5,6,7,8,9]。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。現実に、公共の多目的バースではそうした計画が行われている。またこれとは反対に、1回の寄港で多くの荷役を行う船（≒荷役時間の長い）船はターミナル側にとって利益が大きいことから、なるべく待たせないよう配慮されることもあり、現実には両者の相反した考え方が適宜係留バースと係留順の決定に反映されている。このような相反する考え方を考慮して係留順を決定するには、今までのように1目的問題として扱うことは困難である。

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）を加えた2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。しかしフィーダー船の対象メイン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

* キーワード：ターミナル計画、港湾計画、多目的最適化

** 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

せることや、ターミナル側からみた重要度の高い船（例えば荷役貨物量の多い船）への配慮が行われている。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をなるべく待たせないという船の優先度を設け、具体的には、待ち時間×荷役コンテナ数を最小化する評価指標を目的関数に加えることにする。これは例えば、船AとBがそれぞれ100、500個の荷役を必要とする場合、両者の重み付き待ち時間が等しければ、船Aより船Bの方が待ち時間は短くなる。したがって、待ち時間×荷役コンテナ数を重み付き待ち時間と呼び、これの総和を最小化すれば、荷役コンテナ数が多い船はなるべく待ち時間が短くて済むという考え方から、待ち時間とコンテナ数の積を評価関数としている。

（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

②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

（2）定式化

本問題は式(1)—式(12)のような一種の割当問題になる。ここで、

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

$j\,(=1,\cdots,T)\in V$　：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 の到着時刻

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になる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

$y_{jj'}$　：あるバースにおいて船 j と船 j' との係留時刻が重なるとき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。

Minimize　$Z=(Z_1, Z_2)$　(1)

Subject to

$$\sum_{i\in B}x_{ij}=1, \qquad \forall j\in V \tag{2}$$

$$m_j - A_j \ge 0, \qquad \forall j\in V \tag{3}$$

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

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

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

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

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

$$Z_2=\sum_{i\in B}\sum_{j\in V}HC_j(m_j - A_j)\,x_{ij} \tag{9}$$

$$x_{ij}\in\{0,1\}, \qquad \forall i\in B,\ j\in V \tag{10}$$

$$y_{jj'}\in\{0,1\}, \qquad \forall j,\ j'\in V \tag{11}$$

$$m_j \text{ is integer}, \qquad \forall j\in V \tag{12}$$

上記のモデルで決定変数は、x_{ij}、$y_{jj'}$ 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)は各船が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を示すものである。$m_{ij}+\sum_{i\in B}C_{ij}x_{ij}$ は当該船 j の出港時刻を表し、$m_{ij'}+\sum_{i\in B}C_{ij'}x_{ij'}$ は他船 j' の出港時刻を示す。つまり、

$$m_{ij}+\sum_{i\in B}C_{ij}x_{ij}-m_{ij'} \tag{13}$$

は船 j の出港時刻と船 j' の係留開始時刻との差を示し、

$$m_{ij'}+\sum_{i\in B}C_{ij'}x_{ij'}-m_{ij} \tag{14}$$

は船 j の係留開始時刻と船 j' の出港時刻との差を示す。これより、船 j と j' の係留時間に重なる時間帯があれば式(13)と(14)は両者とも必ず正の値をとり、そうでなければどちらか一方が負となる。つまり、船 j が船 j' より前に係留されるなら、式(13)は負、式(14)は正となり、船 j が船 j' より後に係留されるなら、式(13)は正、式(14)は負となる。したがって、$y_{jj'}$= 1であれば式(5)の左辺＞0、式(6)の左辺= 0となり、$y_{jj'}$= 0であれば式(5)の左辺= 0、式(6)の左辺＜0となり、重なる時間帯があれば$y_{jj'}$= 1、なければ$y_{jj'}$= 0となる。

また式(7)は、複数船を同時係留させる際に必要となる、岸壁長と各船の必要延長との関係に対する制約である。式(7)を変形すると下のような式になる。

$$\sum_{i\in B}QL_i x_{ij}\ge\sum_{i\in B}(\sum_{j'\in V-\{j\}}L_{j'}\,y_{jj'}x_{ij'} - L_j)\,x_{ij} \tag{15}$$

$\sum_{j'\in V-\{j\}}L_{j'}\,y_{jj'}x_{ij'}$ は当該船と係留時間に重なる時間帯のある船の全長の和を示している。したがって、式(15)の右辺は当該船を含めた同時係留船の必要延長の和であり、これが係留バースの岸壁長を超えなければ、それらの船

は同時係留可能であることを示している。

式(8)と(9)は目的関数を示しており、それぞれ総在港時間、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。

（1）解法の概要

海外のコンテナ港においてマルチユーザターミナルとして公共形式でバース運用を行っているところでは、おおむね１週間程度の寄港予定船を与件として動的なバース割当を行っている。

本研究では、このような与えられた入港予定船を図１に示すようにいくつかの期間に分割して計算を行うことを考える。つまり、第１期の船のバース割当をまず求め、次にそれを前提として第２期を計算し、第３期と以降の計画を行う。図１は横軸に時間軸をとり、3バースに船8隻が到着し、係留される様子を示している。各期の計算は以降で示すGAによるアルゴリズムで行うが、多目的GAでは最終的に複数の解から成るパレート解集合を得ることができる。ここで１目的問題であれば、得られた解の中から最善の単一解を用いて次の計画を行えるが、多目的問題の場合どの解を使って次の計画を行うべきかは港湾管理者等の考え方によるものである。したがってここでは複数期間の計画は試みず、単期間での計画のみを行うことにする。

（2）パレート最適集合

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[11]、解の優越関係に基づいて選択を行なうもの[2,3,4]、さらに両者を組み合わせたもの[12]等がある。これらの手法による解の精度は、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[12]とHyunらの方法[4]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１目的問題[8,9]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。

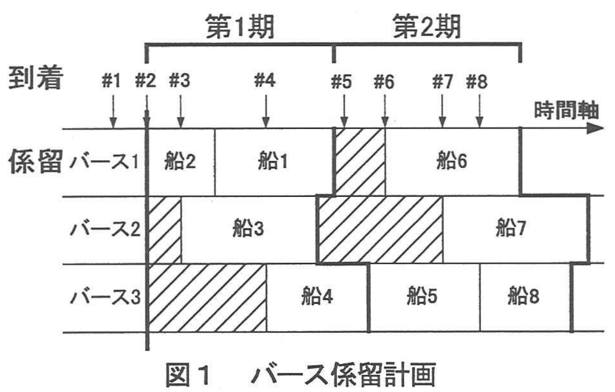

図１　バース係留計画

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、*popsize*は個体群サイズとする。

（3）解法１（玉置らの方法[12]）

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２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=*popsize*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＞*popsize*ならステップ２へ。パレート個体数＜*popsize*ならステップ３へ。

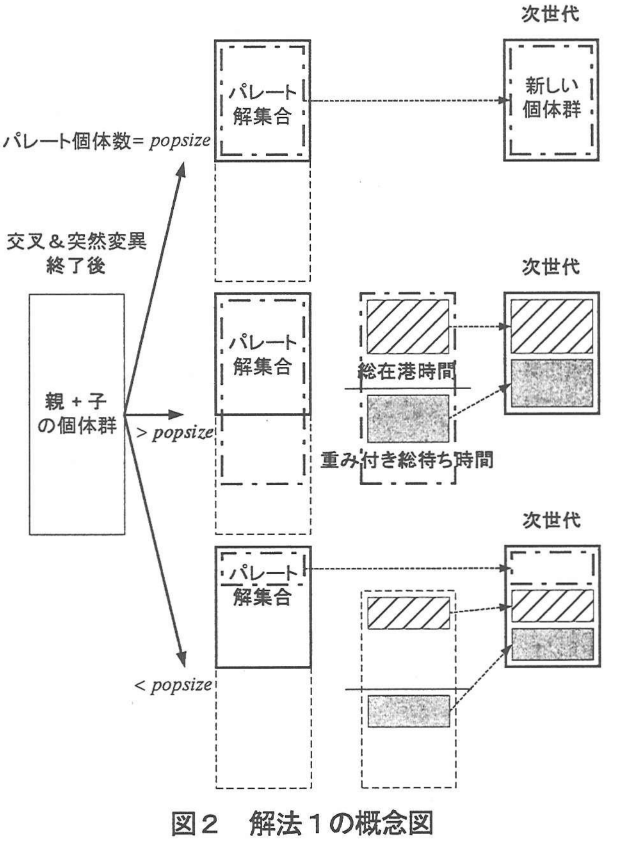

図２　解法１の概念図

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=*popsize* 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= *popsize* になれば、ランク付け終了。

（４）解法２（Hyunらの方法[4]）

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３はそれぞれの目的関数値を持つ解の２次元空間を示しており、丸印は各個体を示している。なお概念図を図４に示し、手順は以下のようになるが、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３の MAX_{lt}、MIN_{lt}）を求め、これを次式に代入し、図中の①、②のような長方形の１辺の長さ σ_{lt} を求め、$n=1$、集合 $S=Pop$ とする。

$$\sigma_{lt} = (MAX_{lt} - MIN_{lt}) / \sqrt[|L|]{popsize}, \quad \forall\, l \in L \qquad (16)$$

ステップ２：各個体を中心に長方形を置き、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、$n=n+p$とする。*popsize* 個の個体に対しランク付けが終われば終了、そうでなければステップ３へ。

（５）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[4]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。

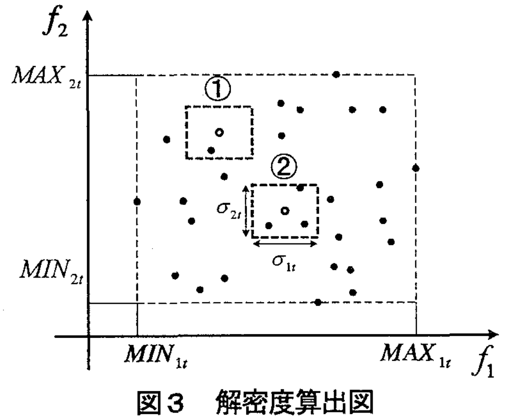

図３　解密度算出図

$$Fitness[ind(rank)] = q(1-q)^{rank-1}, \quad \forall\, rank \in R \qquad (17)$$

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、$ind(*)$はランク*の個体とする。

（６）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。

（ａ）選択交配

子を生成させる個体ペアを選択するために、トーナメント選択戦略を用いた。トーナメント選択とは、個体群の中から設定した数の個体を無作為に選択し、その中で最も適応度の高い個体を次世代に残すという手続きを次の世代に残したい数の個体が選択されるまで繰り返すというものである。ここでは２つの個体をランダムに選択し、適応度の高い方の個体を個体ペアの一方とし、同様のことをもう一度行って、他方の個体を選択した。

（ｂ）交叉

個体ペアが決定した後、部分一致交叉という交叉方法を使って子の個体群を生成させた。本問題における詳細な交叉処理ついては文献[8]に示すとおりである。また、交叉確率は0.9に設定した。

（ｃ）突然変異

突然変異率は解法１で0.09、解法２で0.06とする。これは交叉確率と組み合わせ、これらのパラメータを変化させて数ケースの計算を行ったところ、ここで示した値での解が最も良い値を示したため、この値にしている。

これは生成された各個体に対し突然変異が起こるか否かを乱数値で判断するが、突然変異を起こすと判断された場合、ランダムに２つの遺伝子を選択し、それらを入れ替えることにする。

（ｄ）世代数と個体群サイズ

本問題ではなるべく多くのパレート解が選ばれるよう

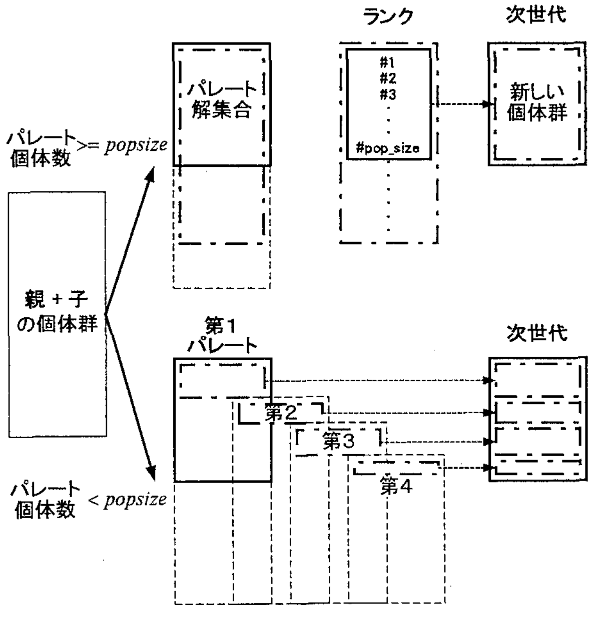

図４　解法２の概念図

に個体群サイズは100とし、世代数は収束状況から500世代までとした。

4．適用事例

本問題におけるGAパラメータの推定にあたり、数ケースの計算結果から最善のものとして先に示した値を採用したが、問題の規模（例えば、対象船舶の隻数の増減）により最善解が得られる各パラメータ値は異なる。そこで本研究では、供用5バースに入港船25隻を係留させるという問題規模で検討する。なおこれは、以前調査した神戸港の入港分布により、計画対象期間として3日間に相当する。この問題規模で異なる乱数の種20個により人工的に生成させた問題、合計20個で計算を行う。

（1） 各解法の性能評価

まず両解法で得られる解の精度の比較を行う。文献[10]では多目的GAのアルゴリズムを定量的に性能評価している。そこでは得られたパレート解集合の評価は、パレート解の個数、それらの解の多様性、真のパレート解との近接度合等で行っている。パレート解の個数は多いほど選択肢が増えることから優れていると評価される。また解の多様性は、これが大きいほど一方の目的関数のみに対し非常に優れた解や両者とも妥協した解など、異なるパターンの解が多く見つかることからばらつきの大きい方が優れているとされる。さらに、真のパレート最適集合が容易に得られる問題であれば、それになるべく近いものが当然のことながら優れている。そこで以上で述べた3つの評価指標を元に、2解法の性能評価を行う。

（a）各解法による目的関数値と解の多様性

まず、解法ごとの目的関数値とその多様性（ばらつき具合）をみる。多目的問題では問題ごとに各解法によるパレート解集合が見つかり、さらに解集合内の各解に対し目的関数値が求まる。そこで、各問題の両解法による解の目的関数値の平均値と標準偏差を表１に示す。最下行にはそれらの平均値を示す。

まず全体の平均から、総在港時間は解法１の平均が他方より短く、標準偏差は解法２の方が大きくなっている。また重み付き総待ち時間は解法２の平均が他方より短く、標準偏差は大きくなっている。したがって、解法２の方が広い解空間で解を得ており、解集合の多様性の点では解法２の方が優れている。

次に問題ごとにみると、総在港時間の平均については問題20個のうち解法１の時間が短いケースは9、反対に解法２では11ケースであり、両解法にほとんど差がないことがわかる。それに対し、ばらつきが大きいのは解法１と２でそれぞれ5、15ケースであり、後者の方が多様性に富んだ解を得ている。さらに重み付き総待ち時間については解法１の平均が他方より短いのは9ケース、解法２では11ケースであり、ばらつきについても両者に差がない。したがって、解のばらつきは多少解法２の方が大きいため優れているといえるが、解集合の優劣については明らかではない。そこで次に、各解法で得られた解集合間の相対精度を求め、それにより優劣の判断を行う。

（b）各解法の相対精度とパレート解の個数

本問題のように真のパレート最適解が不明である場合、真のパレート解集合との近接度合を測ることはできない。そこで複数のパレート解集合の相対的な優劣を比較する方法[1]が提案されており、この方法を用いて解の精度比較を行い、さらにパレート解の個数も調べる。まず、すべてのパレート解集合を合成し、その中でパレート最適集合 NDR を再計算する。このとき、元々のパレート解集合 ND_k で NDR に含まれる個体の割合を集合 ND_k の相対精度とするというものである。以下に手順を示すが、ここで ND_k は解法 k（$\in AP : AP$ は解法の集合）で得られるパレート解集合を示す。

ステップ１：各解法による解集合 ND_k をすべて合成し、集合 NDA を作る。

ステップ２：NDA からパレート最適集合 NDR を再計算する。

ステップ３：解法 k において $NDR \cap ND_k$ である解を見つけ、それらを集合 PO_k とする。

ステップ４：ND_k に含まれる PO_k の割合を以下の式で計算し、これを解法 k の相対精度 RQ_k とする。

$$RQ_k(\%) = \frac{|PO_k|}{|ND_k|} \times 100, \qquad k \in AP \qquad (18)$$

表１　各問題における両解法による解の目的関数値

問題番号	総在港時間（時間）				重み付き総待ち時間（時間）			
	解法１		解法２		解法１		解法２	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
1	465	17	**451**[a]	**35**[b]	73880	3801	**56495**[a]	**7081**[b]
2	482	**46**[b]	**469**[a]	10	**58101**[a]	2211	68497	**11701**[b]
3	374	18	**371**[a]	**41**[b]	15791	**7239**[b]	**9737**[a]	3933
4	346	6	**299**[a]	**17**[b]	18596	**5267**[b]	**13030**[a]	977
5	**565**[a]	41	592	**46**[b]	139815	**10911**[b]	**125465**[a]	8968
6	614	7	**605**[a]	**29**[b]	153425	2031	**149122**[a]	**4981**[b]
7	607	30	**533**[a]	**34**[b]	102594	**10744**[b]	**82131**[a]	3699
8	**525**[a]	18	578	**20**[b]	**98341**[a]	4341	100044	**5569**[b]
9	**384**[a]	**54**[b]	406	25	**37967**[a]	5701	71172	**28135**[b]
10	**372**[a]	30	381	**47**[b]	44901	12871	**37033**[a]	**15131**[b]
11	**419**[a]	2	470	**3**[b]	**75576**[a]	**4829**[b]	92342	4418
12	**461**[a]	**35**[b]	476	16	**59933**[a]	**4759**[b]	65349	2874
13	**388**[a]	13	558	**44**[b]	**56557**[a]	**4203**[b]	57731	2233
14	391	**21**[b]	**386**[a]	16	**55911**[a]	2536	58735	**5704**[b]
15	**343**[a]	4	394	**27**[b]	44299	4889	**38017**[a]	**6040**[b]
16	374	7	**325**[a]	**15**[b]	44259	**7639**[b]	**27786**[a]	842
17	**291**[a]	**29**[b]	292	20	**11103**[a]	2434	12163	**4591**[b]
18	287	20	**273**[a]	**21**[b]	**4072**[a]	**877**[b]	7433	869
19	303	17	**294**[a]	**27**[b]	15588	**2701**[b]	**11943**[a]	955
20	325	8	**316**[a]	**31**[b]	26982	4775	**13048**[a]	**7584**[b]
平均	416	21	423	26	56885	5238	54864	6314

注）a：平均が他解法より小さいもの、b：標準偏差が他解法より大きいもの

表２は20個の問題それぞれにおいて、両解法で得られた解の個数$|ND_k|$、それらのうち再計算でパレートとして選ばれた解の数$|PO_k|$、および相対精度RQ_k(%)を示している。また最下行には解法ごとにそれらの平均を示す。

まず20個の問題の平均値から各解法によるパレート解の数をみると、解法１では13.5、解法２では13.2となっており、ほとんど差がないが若干解法１の方が多いことがわかる。しかしながら、相対精度は解法２の方が若干高くなっている。さらに問題ごとにどちらの相対精度が高いかを調べると、解法１の方が高いケースが10、解法２の方が高いケースが10であり、両者に大きな差がない。これは必ず最適解が得られる問題であれば、解法によって得られるパレート最適解は異なることはない。しかしながら、本問題で得られるのは近似解であるため、得られる解が解法により異なることもあることからこのような結果になっている。

表２　各解法の相対精度

問題番号	解法１ $\|ND_k\|$	解法１ $\|PO_k\|$	解法１ RQ_k(%)	解法２ $\|ND_k\|$	解法２ $\|PO_k\|$	解法２ RQ_k(%)
1	14	0	0	12	12	**100**[c]
2	11	11	**100**[c]	12	2	16.7
3	21	7	33.3	12	12	**100**[c]
4	5	0	0	9	9	**100**[c]
5	25	5	20	32	32	**100**[c]
6	3	0	0	19	19	**100**[c]
7	37	0	0	20	20	**100**[c]
8	15	15	**100**[c]	15	0	0
9	16	16	**100**[c]	14	2	14.3
10	17	3	17	23	23	**100**[c]
11	2	2	**100**[c]	4	0	0
12	7	7	**100**[c]	10	0	0
13	10	10	**100**[c]	20	0	0
14	8	7	**87.5**[c]	6	2	33.3
15	6	6	**100**[c]	12	5	41.7
16	14	0	0	6	6	**100**[c]
17	24	19	**79.2**[c]	12	6	50
18	5	5	**100**[c]	6	2	33.3
19	14	0	0	4	4	**100**[c]
20	15	0	0	15	15	**100**[c]
平均	**13.5**	5.7	**51.9**	**13.2**	8.6	**59.5**

注）c：相対精度が他解法より高いもの

（２）多目的化の効果

既存の研究である総在港時間のみを目的関数としたときの計算結果と比較し、バース割当計画を２目的問題として扱うことにした効果を調べる。まず荷役コンテナ数の増減によるの待ち時間長に影響があるかを調べる。

（ａ）各船に対する待ち時間長のばらつき

本問題では目的関数の1つとして重み付き総待ち時間を採用しており、これが優れる解は荷役コンテナ数が多いほど、その船の待ち時間は短くなる。反対に総在港時間が優れているとされる解では、荷役コンテナ数の多い船が高い優先度でサービスされる必要はない。したがって、これら2つを目的とした本問題では、荷役コンテナ数の多い船は各解法で得られるパレート解集合内の解間で、待ち時間に大きなばらつきが出ると予想される。そこでここでは、各船の待ち時間の長さやそのばらつきが荷役コンテナ数によってどのように影響するかを調べる。

表３は問題1において両解法で得られた解での各船の待ち時間を示している。なお、船は荷役コンテナ数の昇順に示し、その船番号は船の到着順を意味するものである。問題1では解法１と２でそれぞれ14、12個のパレート解を見つけており、このことは25隻の船が各解法の解集合内にそれぞれ14、12個の異なる待ち時間を有することを意味する。そこで表３に船ごとに各解による待ち時間の平均値と標準偏差を示す。さらに１目的問題で得られる最善解は1つであるため、その解での待ち時間も最右列に示す。

まず標準偏差をみると、解の間で待ち時間にばらつきが多い船（標準偏差300以上）は解法１では船19、12と4、解法２では船14、3、11、10および6であることがわかる。またこれらの船の荷役コンテナ数は順に170、419、626、240、431、602、770および934であり、荷役コンテナ数に関係なく解間で待ち時間長にばらつきがある。

また各船の平均待ち時間長をみると、まったく待ちのない船も存在するが、船3や7のように１目的では待つ必要のなかった船が２目的により待つことや、待ち時間が長くなることもある。反対に、船23、11、21のように待ち時間が短縮されたケースもある。これらは荷役コンテナ数に関係なく存在し、以上の結果は問題2～20にもいえる。以上のことは、待ちが発生するかどうかは当該船が到着したときに前の船が荷役中であるか否かで決まる。また待ち時間長は前の船がいつから荷役を開始し、どれ

表３　各船の待ち時間

荷役コンテナ数	船番号	解法１ 平均	解法１ 標準偏差	解法２ 平均	解法２ 標準偏差	１目的問題
170	19	264	**380**[d]	0	0	0
240	14	253	277	374	**340**[d]	0
251	20	0	0	0	0	90
387	13	315	227	36	0	167
419	12	794	**341**[d]	613	0	529
431	3	0	0	1226	**610**[d]	0
438	23	510	212	669	45	1725
445	16	428	0	117	0	855
490	17	0	0	0	0	0
543	2	0	0	0	0	0
602	11	578	253	358	**431**[d]	1054
626	4	132	**322**[d]	678	0	0
690	9	0	0	890	0	264
750	22	0	0	31	49	256
769	25	543	173	0	0	715
770	10	49	0	263	**338**[d]	49
791	24	58	141	0	0	0
796	5	640	261	0	0	747
835	15	1	3	0	0	0
873	8	126	0	0	0	131
876	7	1419	0	12	10	0
921	1	0	0	0	0	0
934	6	231	210	627	**765**[d]	987
960	21	104	104	0	0	1223
980	18	356	0	82	70	0

注）d：標準偏差が300以上のもの

だけ荷役に時間がかかるかにもよる。したがって船の到着のタイミングが大きく影響するため、単純に荷役コンテナ数の増減と待ち時間長のばらつきとの関係が予想した通りの結果には至っていない。

（b）各船の待ち時間と荷役時間

ここでは荷役コンテナ数500以上をL、未満をSの２つに区分し、それぞれに該当する船の1隻あたり平均待ち時間と平均荷役時間を表４に示し、全問題における荷役コンテナ数の変化とそれによる各時間長の関係を調べる。

まず２目的の解による時間長と１目的によるそれを比較すると、結果は次に示す4つのパターンに分けられ、当該問題・船サイズで１目的より、①待ち時間と荷役時間ともに短くなった、②待ち時間は長くなったが荷役時間が短くて済むバースに係留された、③待ち時間は短縮できたが荷役に時間がかかるバースに係留された、④待ち時間と荷役時間ともに長くなった、である。少なくとも一方の解法による結果が①に該当するのは問題1、4、8、10、13、14、15および18のS、2、11および16のL、9、20のSとLとなっており、Lに該当するケースは少ない。②に該当するのは問題5、8、11、12、13のSのみ、④に該当するのは問題5、7、11のSのみで、Lにそのようなケースはない。したがって、Lは③のケースにほとんどが該当することから、荷役コンテナ数の多い船をなるべく待たせないようにするため、荷役時間のかかるバース、つまり荷役コンテナの蔵置位置と離れているバースに係留される傾向にある。以上の結果から１目的よりも船Lの待ち時間短縮するという目的は果たせているといえる。

次に当該問題内で船SとLの待ち時間長を調べると、LがSより待たされるケースは解法１と２でそれぞれ9、7ケースあったが、１目的の方は11ケースと若干多く、１目的よりも２目的化によるL船の待ち時間短縮効果が現れている。

表４　各船の平均待ち時間と平均荷役時間

問題番号	船サイズ	平均待ち時間（分） 解法１	解法２	1目的問題	平均荷役時間（分） 解法１	解法２	1目的問題
1	S	285	337	374	505	577	624
	L	265	184	339	**1035**^{e}	**994**^{e}	969
2	S	272	240	657	**612**^{e}	**590**^{e}	459
	L	185	240	**771**^{f}	**1125**^{e}	1052	1097
3	S	205	154	315	**577**^{e}	**495**^{e}	404
	L	34	8	**686**^{f}	**941**^{e}	**1045**^{e}	797
4	S	189	138	211	**503**^{e}	363	468
	L	41	30	69	**883**^{e}	**831**^{e}	807
5	S	**374**^{e}	**447**^{e}	279	257	**274**^{e}	268
	L	**540**^{f}	**484**^{f}	**884**^{f}	**1046**^{e}	**1159**^{e}	1035
6	S	783	986	1038	**352**^{e}	**267**^{e}	240
	L	580	526	769	**1002**^{e}	**988**^{e}	925
7	S	**699**^{e}	**436**^{e}	400	**692**^{e}	**644**^{e}	488
	L	345	302	**926**^{f}	**1154**^{e}	**1112**^{e}	1090
8	S	358	**379**^{e}	361	527	667	787
	L	**388**^{f}	**381**^{f}	**762**^{f}	**1122**^{e}	**1235**^{e}	1104
9	S	144	235	252	336	413	428
	L	**179**^{f}	**338**^{f}	**628**^{f}	**1088**^{e}	894	951
10	S	191	126	615	356	391	444
	L	**193**^{f}	**179**^{f}	368	**971**^{e}	**1047**^{e}	791
11	S	**129**^{e}	**269**^{e}	76	381	**498**^{e}	409
	L	**341**^{f}	**362**^{f}	**634**^{f}	996	**1007**^{e}	1000
12	S	286	**423**^{e}	301	422	455	503
	L	216	195	**324**^{f}	**1155**^{e}	**1124**^{e}	1089
13	S	292	**739**^{e}	546	365	502	618
	L	263	210	316	**920**^{e}	**1220**^{e}	875
14	S	263	218	560	**389**^{e}	341	373
	L	**266**^{f}	**294**^{f}	522	**935**^{e}	**971**^{e}	910
15	S	179	284	576	433	525	571
	L	**232**^{f}	223	478	**820**^{e}	**873**^{e}	768
16	S	157	169	325	**553**^{e}	386	442
	L	**251**^{f}	121	**547**^{f}	851	901	1110
17	S	89	70	280	**385**^{e}	**445**^{e}	382
	L	56	68	231	**1041**^{e}	**961**^{e}	778
18	S	25	64	147	**452**^{e}	395	442
	L	**33**^{f}	49	**215**^{f}	**1029**^{e}	**954**^{e}	946
19	S	141	55	184	**375**^{e}	**348**^{e}	341
	L	56	**63**^{f}	178	**942**^{e}	**1025**^{e}	938
20	S	153	81	343	368	379	542
	L	97	58	**344**^{f}	1015	1082	1245

注）船のサイズSは荷役コンテナ数500未満、Lは500以上の船
e ：当該サイズで１目的問題の解より時間が長くなったもの
f ：当該問題で、Lの待ち時間がSのそれよりも長いもの

（３）マルチユーザ化の効果

神戸港の実績データを用いて、現在の利用形態である専用利用の場合と比較することにより、マルチユーザ化の効果を述べる。ここで使用したデータは平成12年2月1

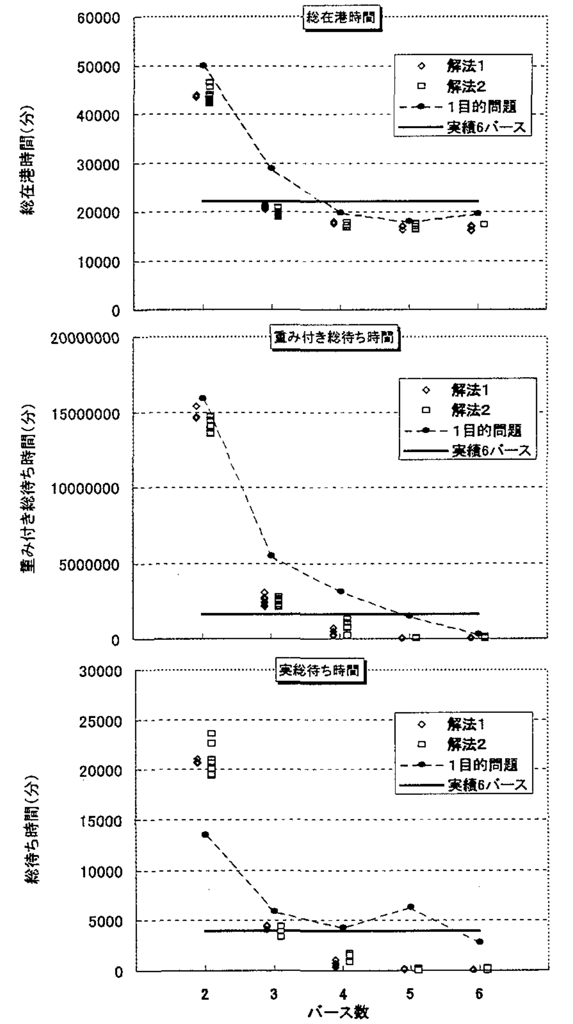

図５　実績６バースでの専用利用との比較

5日～17日の3日間に神戸六甲アイランド専用6バースで荷役を行った19隻の船を対象とする。

図５に供用バース数を6～2まで変化させたときの目的関数である総在港時間、重み付き総待ち時間、および重みを省いた実総待ち時間を示す。２目的の両解法では、総在港時間で3バース、重み付き総待ち時間で4バース、実総待ち時間で3バースでも実績6バースとほぼ同じかそれ以下の値が得られており、2／3から半分程度にバース数を減らしても現在と同程度のサービスが提供できることがわかる。また本来なら総在港時間は１目的の解法が２目的の解法より時間が短くなるものであるが、１目的の解法で得られる解も近似解であるため必ずしもそうはなっていないことが図５からわかる。

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を行うことを考え、その運用に必要な船とバースを割当てる方法を港湾管理者側からみた船の優先度を考慮した多目的問題として捉えGAを用いて検討した。GAの処理中で次世代の個体群に対するランキング方法が異なる2種類の解法で検討を行った。両者の解の精度に大差はなかったが、若干解法２で得られた解集合の方が相対精度とばらつきにおいて優れているという結果になった。また多目的化により、荷役コンテナ数の多い船の待ち時間が解間においてばらつくと予想したが、荷役コンテナ数に関係なくそれらにばらつきがあることがわかった。さらに船の優先度を考慮しない１目的問題の解と比較することにより、荷役コンテナ数の多い船に対する待ち時間が多目的化によって短縮できることが確認できた。最後に提案した解法を神戸港に適用すると、供用バース数を2／3～約半分程度にしても現状と同程度のサービスが提供できることがわかった。このことから、マルチユーザターミナルとして利用し、余分なバースを減らすことができれば、それにかかるコストの削減を期待することができる。

謝辞　最後に、本研究を遂行するにあたって、京都大学飯田恭敬教授、および同大学谷口栄一助教授より貴重なご助言を頂いたことに感謝の意を表する。また大阪市港湾局各位に対し、多大なる御協力頂いたことに謝意を表する次第である。

参考文献

[1] ABCL project, 並列オブジェクト指向言語の汎用高並列計算機向け処理系の開発とその応用実証プログラムによる評価, 1997.
[2] Goldberg, D. E., Genetic algorithms in search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
[3] Horn, J., et al., A niched pareto genetic algorithm for multi-objective optimization, Proc. of the 1st IEEE Conference on Evolutionary Computation, 82-87, 1994.
[4] 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, 675-690, 1998.
[5] 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, 557-564, 1998.
[6] Imai, A., et al., The dynamic berth allocation problem for a container port, Transportation Research Part B, Vol.35, No.4, 87-103, 2001.
[7] 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, 181-189, 1999.
[8] 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, 827-834, 1999.
[9] Nishimura, E., et al., Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms, European Journal of Operational Research, Vol.131, No.2, 54-64, 2001.
[10] 比尾根一雄, 並列遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化問題のパレート最適解集合の生成法と定量的評価法, 第９回自律分散システムシンポジウム, 計測自動制御学会, 295-300, 1997.
[11] Schaffer, J. D., Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms, Proc. of the 1st international conference on genetic algorithms and their applications, 93-100, 1985.
[12] 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, 1185-1192, 1995.

船の優先度を考慮したマルチユーザターミナルにおける多目的バース割当法

西村悦子、今井昭夫、佐村智子

近年、日本の主要港は休日・夜間の荷役体制の不便さや高い港湾諸料金等によりハブ港の地位が脅かされている。そこで本研究では複数の隣接バースを共同利用するマルチユーザターミナルシステムを主要港に導入することを考え、その際に必要となる船のバースへの効率的な割当方法を検討する。荷役コンテナ数の多い船をなるべく待たせないという、船の優先度を考慮した２目的最適化問題として扱った。荷役コンテナ数の多い船に対する待ち時間は船の優先度を考慮しないときより短くでき、提案した方法を使えば、2／3程度でも現状のサービス水準を維持でき、供用バースを減らすことができればその分のコスト削減は期待できる。

Multi-objective Berth Allocation Problem in a Multi-user Container Terminal with Consideration of Ship Service Priority

Etsuko NISHIMURA, Akio IMAI and Tomoko SAMURA

In this paper, we proposed a two-objective berth allocation problem for the multi-user container terminal system that is expected to make Japan's ports more competitive. One objective is the minimization of the total service time(TST), while the other is the minimization of the total weighted waiting time(WWT). The former is desirable to evaluate the terminal operation by the efficiency. However, the large ships with high container volume are likely to be assigned higher service priority in reality. The latter objective works for this. Comparing with the solution by one-objective problem with only TST, the waiting time for ships with a large volume of containers is reduced in this two-objective problem. Due to the efficient usage of berths by multi-objective GA computations, the amount of service time can be achieved with 4 berths which is 2 berths less than the actual case.
