【土木計画学研究・論文集　No. 15　1998年9月】

計画開始時刻を考慮した公共バースの割当法*

A Berth Allocation Problem in the Public Berth System with Consideration of the Starting Time of Planning Horizon

今井昭夫**、西村悦子***

Akio IMAI, Etsuko NISHIMURA

1．はじめに

近年、日本の港湾コストが近隣のアジア諸国のそれに比べて割高であることが指摘されている。このような国際間のコストの比較は、為替の関係もあり慎重な分析が必要であるが、複数の国の物流施設の選択を行う場合、そのような為替の問題など関係なく、まさにボーダレスの（機能的な差がなければ）純粋なコスト比較で行われる。したがって、日本の港湾がハブとして生き残るには、またそれとは関係なく物流コスト低減のためにも、港湾コストの低減が重要になる。

ところで港湾コストの低減には、主要港湾でみられる公社ふ頭の船社への専用貸しをなくし、バースを在来船のように公共利用して供用バースを減らす必要があろう。昨年われわれが行った調査では、神戸港のバース利用率は決して高くない。したがって、公共形式にして船とバースの割当を動的にすれば、バース利用率が上がり港湾コストも下がる。しかしながら、このバースと船の割当は決して容易な計画ではない。そこで本研究では船の入港時刻と計画開始時刻の関係を考慮したバース割当法を検討する。

バースの割当に関する既存の研究はいくつかある。その中でも公共的なバースを想定した研究としては、Brown ら[1, 2]の研究がある。これは軍港における戦闘艦艇の係留割当計画に関するものである。基本的には複数のバースと複数の船の割当であり、公共の商港と同じ計画である。しかしこれらの研究では、商港であまりみかけない係留後の係留先の移動や、船が利用するバース設備の優劣が評価尺度になっており、商港には不向きな計画手法である。

永岩ら[4]は公共コンテナバースに対する割当法を検討した。ここでは、時間軸に対していくつかの期間に分けて割当計画を立案している。そして前計画期の各バースの最後の船が出港し、当該計画期に対してバースが空きになった後に、当該計画期の対象船を係留させる。そのとき、全対象船がバース空きになる以前に入港済みである条件を用いている。また今井ら[3]はこの割当法を用いて、船の荷役能率と、係留待ちをしている後着の船が先着の船より先にバースに係留されるときの不満を考慮した２目的バース割当法を検討している。

これらの研究で用いている割当法では、対象船舶が計画開始時刻にすでに入港していることが前提である。しかしこのような状況はバース数に比べて入港船が極めて多い状態であり現実にはまれである。そこで本研究ではより現実的なバース割当が行えるように、船の到着が必ずしも計画開始時刻以前ではない場合のバース割当法を検討する。

2．神戸港の現状分析

コンテナバースの現状を把握するために、神戸港で得られた実績データを用いてターミナルの利用状況を分析する。

使用したデータは、1996年2月1日～29日における神戸港の７つのコンテナバースに入出港したコンテナ船279隻分の入出港届けと荷役実績からのものである。これらから各コンテナ船の船名、当該船の入出港日時、係留日時、係留バース名、船積み／陸揚げコンテナ個数、荷役時間が得られる。

---

*キーワード：ターミナル計画、港湾計画

**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）
***学生員　工修　神戸商船大学大学院海上輸送システム科学専攻

（1）バース待ちの状況

現在コンテナターミナルのほとんどが船会社に専用貸しされており、各ターミナルとも待ち時間が発生しないように船の運航を計画している。しかしながら、神戸港ではバース待ちが発生している。

そこでまず、この当時7バース使用可能であったが、これらのバースがどれだけの時間同時に使用されていたかを調べた。図1がその結果であるが、この図で示す占有時間というのは、例えば2のときであれば1ヶ月のうち2バース同時に使用していたのが138時間で、全体の20%を占めているという意味である。この図から2～4バースの同時使用が多く、7バースすべてを同時に使用している時間は9時間で、全体の1%程度であったことがわかる。

次に、分析対象とした29日間を荷役割増料金が適用されない平日昼間、適用される平日夜間および土日の3つに分けて、それぞれの入港隻数に対する係留待ち隻数を求めた。これを図2に示すが、割増料金が課せられる平日夜間、土日にバース待ちが多いことがわかる。

さらに、2時間ごとの待ち時間分布を図3に示す。これをみると、5時間前後バース待ちをしている船が多く、4時間から10時間待っている船が全体の4割以上を占めている。また、24時間以上の待ち時間の船が存在したり、最大で48時間、つまり入港してから2日間バース待ちをしている船も存在する。

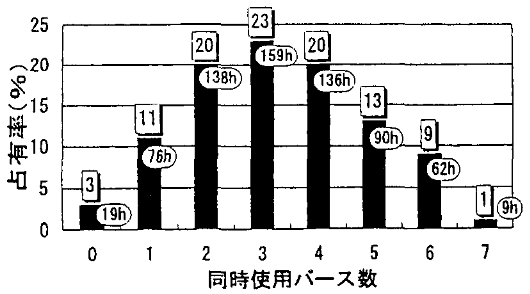

図1　バース占有時間

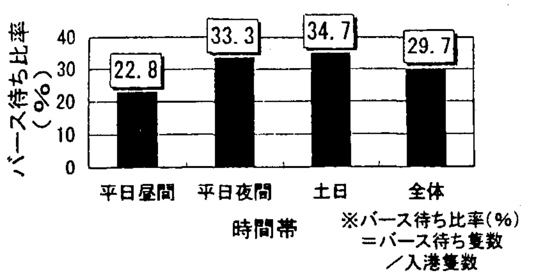

図2　時間帯別待ち隻数

（2）荷役時間に関する分析

各船の荷役時間と船積み／陸揚げコンテナ個数より、コンテナ1個あたりの荷役時間を求め、さらにバースごとにこれの平均を求めたのが図4である。ここで、ＰＩＤは公共バース、それ以外は専用バースである。これをみるとＲＣ－４は荷役が早く、ＰＩＤは荷役時間が長い。公共バースであるＰＩＤは専用バースよりも荷役機器が劣ると考えられるため、荷役時間が長くなっていると想像できる。ところが、専用貸しのＲＣ－２も荷役に時間がかかっている。これらバース間の荷役時間の差は最大で約30秒であり、仮に500個のコンテナを荷役すると、0.5×500＝250分で約4時間の荷役時間の差が出てくる。

3．問題の定式化

先に示したように神戸港では、バースが空きになっている状態が目立ち、供用バースすべてを同時に使用している時間はわずかであった。また、バース間で荷役時間が異なることもわかった。したがって、コンテナバースを公共形式にし、割増料金をなくして船とバースの割当を動的にすることによって、バースの利用率を上げることが期待できる。

そこで次に、公共利用形式のコンテナバースにおける、船のバースへの割当法について検討する。

バース割当の評価は文献4でさまざまなものが検討されているが、バースの公共性の点から総在港時

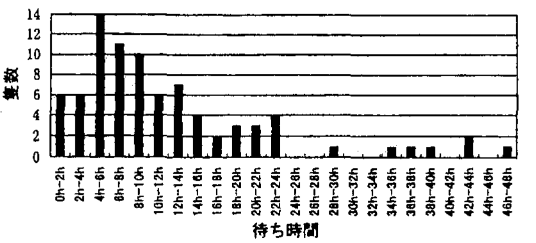

図3　待ち時間分布

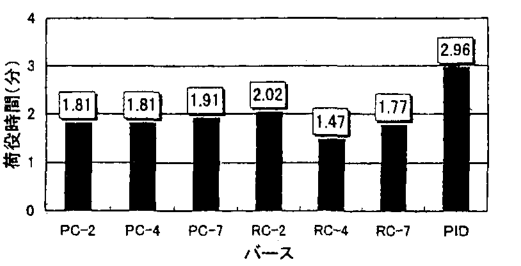

図4　コンテナ1個あたりの荷役時間

間（つまり各船のバース待ち時間と荷役時間の合計の総和）の最小化が適切であると考えられる。

荷役時間に関しては図４で示したように、専用貸しの場合はバース間で差があることがわかった。公共形式の場合、おそらく各バースとも同一性能の機器を用意すると考えられ、バースごとの荷役能率は異ならないと考えられる。しかし動的にバースと船の割当を決定するため、必ずしもある船の荷役するコンテナが当該船舶の係留バース近傍に蔵置されるとは限らないであろう。このような場合、荷役方式にもよるが、船の係留バースが異なれば荷役時間に差がでてくると考えられる。

港全体で考えると、係留バースが決まれば荷役時間も決まってくるが、待ち時間は係留順に荷役時間が長くなれば全体としての待ち時間は短くなり、また反対に荷役時間が短くなれば待ち時間は長くなると考えられる。例えば、１つのバースで考えると、すべての船が同時入港のとき、荷役時間の短い船を先に係留させた方が後の船に対する待ち時間が少なくてすむ。このように、どの船をどのバースにどのような順序で係留させるかによって、総在港時間は変化する。したがって、我々の考えているバース割当の最適化が重要となってくる。

（１）前提条件

バース割当において、以下の条件を仮定する。

（ａ）係留条件

１つのバースには同時に１隻しか係留できない。

（ｂ）荷役時間

荷役時間は係留バースによって、必ずしも同じではない。

（ｃ）計画期間と計画開始時刻

全体を時間軸に対してある時間幅を持つ計画期間に分け、各期間ごとに入港予定の船を対象船として問題を解く。また計画開始時刻とは直前の計画期間の最後の船の出港時刻、つまり当該期間に対してバースが空きになる時刻であり、分割した計画期間の開始時刻ではない。

（ｄ）対象船舶

船には計画開始前に入港するものと後に入港するものがあるが、それらをすべて計画対象とする。

（２）定式化

本問題は一種の割当問題になる。定式化で用いる変数とパラメータは以下の通りである。

$i\ (=1,\cdots,I) \in B$：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）

$k\ (=1,\cdots,T) \in O$：係留順序（当該対象時間内での）

C_{ij}：船 j がバース i で行う荷役時間

P_k：k までの順番の集合

A_j：船 j の到着時刻

S_i：前計画期間からバース i にいる船が出港し、本計画期間内でバース i が空きになる時刻（当該計画期間の計画開始時刻）

W_i：バース i の計画開始時刻以降の到着船の集合

x_{ijk}：もし船 j がバース i で k 番目に係留されるとき１、そうでないとき０である０－１整数変数

y_{ijk}：船 j がバース i の k 番目の船として係留される直前での、バース i の空き時間。これは一種のスラック変数である。

本問題は、次のように定式化される。

$$\text{Minimize}\quad \sum_{i\in B}\sum_{j\in V}\sum_{k\in O}\{(T-k+1)C_{ij}+S_i-A_j\}x_{ijk}+\sum_{i\in B}\sum_{j\in W_i}\sum_{k\in O}(T-k+1)y_{ijk} \qquad (1)$$

$$\text{Subject to}\quad \sum_{i\in B}\sum_{k\in O}x_{ijk}=1, \qquad \text{for all } j\in V \qquad (2)$$

$$\sum_{j\in V}x_{ijk}\leqq 1, \qquad \text{for all } i\in B, k\in O \qquad (3)$$

$$\sum_{l\in V}\sum_{m\in P_k}(C_{il}x_{ilm}+y_{ilm})+y_{ijk}-(A_j-S_i)x_{ijk}\geqq 0, \qquad \text{for all } i\in B, j\in W_i, k\in O \qquad (4)$$

$$x_{ijk}\in\{0,1\}, \qquad \text{for all } i\in B, j\in V, k\in O \qquad (5)$$

$$y_{ijk}\geqq 0\ \&\ \text{integer}, \qquad \text{for all } i\in B, j\in V, k\in O \qquad (6)$$

制約式（2）は各船が必ずいずれかのバースに１回係留されることを保証し、式（3）は各バースで、ある時点ではただ１隻しか係留できないことを意味する。式（4）は船の入港後にバース i に係留されることを保証する。ここでもしバース i に係留中の $(k-1)$ 番目の船が出港した後に、当該バースに k 番目の係留予定船 j が入港する場合、スラック変数 y_{ijk} は正になり、逆に $(k-1)$ 番目の船が出港する前に k 番目の船 j が入港したならば、$y_{ijk}=0$ になる。

解では、すべての船がいずれかのバースにただ１度だけ係留されなければならない。したがって、１つのバースに対象船すべてが係留されるという解も考えられるので、集合 O の位数（cardinality）は船

の隻数 T と等しくなければならない。

また解は最適性を失うことなく、次のように解釈されて変換されるものと考える。つまり、もし各バースへの割当が不連続なとき、たとえば、$x_{1\cdot1}=0$、$x_{1\cdot2}=0$、$x_{133}=1$、$x_{114}=1$（ここで $x_{1\cdot1}$ とはバース１に１番目に割当られるすべての船の決定変数のこと）であれば、割当順序を前へシフトして、$x_{112}=1$、$x_{131}=1$ と解釈すればよい。

（３）緩和問題

本問題をラグランジュ緩和問題を使った劣勾配法で近似的に解くが、この緩和問題は元問題から式（4）を緩和した以下の問題となる。

$$
\begin{array}{llll}
\text{Minimize} & \sum_{i\in B}\sum_{j\in V}\sum_{k\in O}\{(T-k+1)C_{ij}+S_i-A_j\}x_{ijk}- & & \\
& \sum_{i\in B}\sum_{j\in W_j}\sum_{k\in O}\lambda_{ijk}(S_i-A_j)x_{ijk}+ & & \\
& \sum_{i\in B}\sum_{j\in W_j}\sum_{k\in O}(T-k+1-\lambda_{ijk})y_{ijk}- & & \\
& \sum_{i\in B}\sum_{j\in W_j}\sum_{k\in O}\lambda_{ijk}\sum_{l\in V}\sum_{m\in P_k}(C_{il}x_{ilm}+y_{ilm}) & & (7)\\
\text{Subject to} & \sum_{i\in B}\sum_{k\in O}x_{ijk}=1, & \text{for all } j\in V & (8)\\
& \sum_{j\in V}x_{ijk}\leqq 1, & \text{for all } i\in B, k\in O & (9)\\
& x_{ijk}\in\{0,1\}, & \text{for all } i\in B, j\in V, k\in O & (10)\\
& y_{ijk}\geqq 0 \ \&\ \text{integer}, & \text{for all } i\in B, j\in V, k\in O & (11)
\end{array}
$$

ここで λ_{ijk} はラグランジュ乗数である。

y_{ijk} は制約式に現れていないので冗長である。したがって目的関数を整理すると問題は次のようになる。

$$
\begin{array}{llll}
\text{Minimize} & \sum_{i\in B}\sum_{j\in V}\sum_{k\in O}\{(T-k+1)C_{ij}+S_i-A_j\}x_{ijk}- & & \\
& \sum_{i\in B}\sum_{j\in W_j}\sum_{k\in O}\lambda_{ijk}(S_i-A_j)x_{ijk}- & & \\
& \sum_{i\in B}\sum_{j\in W_j}\sum_{k\in O}\lambda_{ijk}\sum_{l\in V}\sum_{m\in P_k}C_{il}x_{ilm} & & (12)\\
\text{Subject to} & \sum_{i\in B}\sum_{k\in O}x_{ijk}=1, & \text{for all } j\in V & (13)\\
& \sum_{j\in V}x_{ijk}\leqq 1, & \text{for all } i\in B, k\in O & (14)\\
& x_{ijk}\in\{0,1\}, & \text{for all } i\in B, j\in V, k\in O & (15)
\end{array}
$$

この問題の目的関数のパラメータを整理すると以下の式のようになる。

$$
\begin{array}{llll}
\text{Minimize} & \sum_{i\in B}\sum_{j\in V}\sum_{k\in O}E_{ijk}x_{ijk} & & (16)\\
\text{Subject to} & \sum_{i\in B}\sum_{k\in O}x_{ijk}=1, & \text{for all } j\in V & (17)\\
& \sum_{j\in V}x_{ijk}\leqq 1, & \text{for all } i\in B, k\in O & (18)\\
& x_{ijk}\in\{0,1\}, & \text{for all } i\in B, j\in V, k\in O & (19)
\end{array}
$$

ここで E_{ijk} は目的関数（12）のパラメータを整理したものである。

この問題は３つの添字 i, j, k からなるいわゆる３次元割当問題である。そこでこの問題の $i\in B$、$k\in O$ を、それらを組み合わせた新たな添字 $n\in N$（ただし、$|N|=|B|\times|O|$）に置き換えると、以下の式のようになる。

$$
\begin{array}{llll}
\text{Minimize} & \sum_{n\in N}\sum_{j\in V}D_{nj}x_{nj} & & (20)\\
\text{Subject to} & \sum_{n\in N}x_{nj}=1, & \text{for all } j\in V & (21)\\
& \sum_{j\in V}x_{nj}\leqq 1, & \text{for all } n\in N & (22)\\
& x_{nj}\in\{0,1\}, & \text{for all } n\in N, j\in V & (23)
\end{array}
$$

ここで目的関数（20）の D_{nj} は、式（16）の E_{ijk} の添字 $i\in B$，$j\in V$，$k\in O$ を添字 $n\in N$，$j\in V$ に変換したものである。この問題は割当問題であり容易に解ける。

４．解法

本問題は最適解を求めるのが困難であるので、ラグランジュ緩和問題を使った劣勾配法で近似的に解く。劣勾配法の処理の流れは、以下のようになる。

ステップ０：ラグランジュ乗数の初期値を設定する
ステップ１：元問題のラグランジュ緩和問題を作り、それを解いて下界値を求める
ステップ２：緩和問題の解から、元問題の実行可能解を求める
ステップ３：実行可能解が最適解となっているか、または繰り返し回数が設定値を超えるという条件を満足すれば終了
ステップ４：その目的関数値からラグランジュ乗数を計算する。ステップ１へ戻る

緩和問題の解では必ずしも緩和した制約式（4）、つまり対象船は入港後に係留されるという条件を満足しない。そこで劣勾配法では、緩和問題の解を修正して実行可能解を求める。そのために、緩和問題の解において入港時刻以前に係留されている船があれば、同バースでそれ以降の全船の係留開始時刻をその入港時刻以降にずらす処理をする。

劣勾配法によって、ラグランジュ乗数を更新する

が、その乗数の値は以下のようにして求める。

いま、緩和された制約を改めて示すと、

$$\sum_{l \in V}\sum_{m \in P_k}(C_{il}x_{ilm}+y_{ilm})+y_{ijk}-(A_j-S_i)x_{ijk} \geqq 0,$$
$$\text{for all } i \in B, j \in W_i, k \in O \qquad (24)$$

となる。そこで、上で示した手順をより詳細に書くと、計算手順は次のようになる。

ステップ1：d に $0<d \leqq 2$ を満足するような適当な値を与える。本研究では初期値として$d=2$とする

ステップ2：現在の乗数の集合について緩和問題を解き、解 X_{ijk} を得る

ステップ3：現在の解 X_{ijk} について、

$$G_{ijk}=(A_j-S_i)X_{ijk}-\sum_{l \in V}\sum_{m \in P_k}(C_{il}X_{ilm}+y_{ilm})+y_{ijk},$$
$$\text{for all } i \in B, j \in W_i, k \in O \qquad (25)$$

のような劣勾配G_{ijk} を定義する

ステップ4：スカラーのステップ長 T を

$$T=d(Z_{UB}-Z_{LB})\bigg/\sum_{i=1}^{m}G_{ijk}^2 \qquad (26)$$

として求める。このステップ長は、現在の下界値Z_{LB}（今まで求まった最良の緩和問題の解の目的関数値）と上界値Z_{UB}（今まで求まった最良の実行可能解の目的関数値）間の距離とパラメータ dによって決められる

ステップ5：ラグランジュ乗数 λ_{ijk} を次式によって更新し、ステップ2へ戻って、新しい乗数の集合で緩和問題を再び解く

$$\lambda_{ijk}=\max(0, \lambda_{ijk}+TG_{ijk}),$$
$$\text{for all } i \in B, j \in W_i, k \in O \qquad (27)$$

以上の繰り返しの手続きでは計算は終わることがないので、繰り返し回数を制限するか、上界値と下界値との差をみることで最適解が求まっているかどうかを判断し、最適解が求まっていれば終了する。

5．適用事例

本研究で提案したラグランジュ緩和法を用いた解法の有効性を示すために、人工的に発生させた入港時刻と荷役時間データを与え、問題の規模を変化させた場合の解の精度への影響を調べた。

（1）解の精度の検討

この問題でパラメータとして用いる船の入港分布と荷役時間分布を神戸港の調査データから分析した。その結果、一般にいわれるように入港分布は指数分布に従い、荷役時間は2次のアーラン分布に従っていた。そこで、計算で用いる入港間隔と荷役時間をそれぞれ指数分布と2次のアーラン分布から発生させた。計算に用いたバース数は5、7、10である。

公共形式における船のバース割当は港湾管理者が行う。その場合、計画期間幅の長さは管理者が決定すべき問題である。そして、期間幅の長さが解に影響すると考えられる。期間幅の影響は対象船の数を変えることで調べることができる。そのため、対象船を25と50隻にし、これとバース数の組み合わせで合計6ケースの問題を考えた。入港間隔と荷役時間を乱数で発生させるがそれぞれ同じ種を用い、それを上記の各ケースで10種類用意した。

解の精度の検討においては、1つの計画期における問題について考える。本研究で考える問題での計画開始時刻は管理者がコントロールできないものであるが、計画期間幅のどのあたりにくるかということも近似解の精度に影響を及ぼすと考えられる。つまり、もし開始時刻が最後の入港船よりも後であれば、緩和した制約である入港後に係留されるという状況が、各船がどの順番に係留されても満足され、緩和問題の解が元問題の最適解になる。反対に、開始時刻が最初の入港船よりも前であれば、緩和した制約を満足しない船が多くなる可能性があるので、元の問題の最適解が求まりにくくなる。したがって、計画開始時刻が大きくなるほど実行可能解の目的関数値がよくなると考えられる。

そこで、各ケースのある種に対して、計画開始時刻が対象船の最初に入港するものと最後に入港するものの入港時刻幅の中間（計画開始時刻1）と、そこから幅の1/4後ろへずらした時点（時刻2）の2つの問題を設定した。

図5は計算結果である。GAPは（得られた解の値－下界値）／下界値×100であり、各ケースの10回の平均値である。この結果から、2つの計画開始時刻では開始時刻の遅い時刻2がGAPが小さく、解の精度の良いことがわかる。したがって、開始時刻の大小が解の精度に影響を及ぼすことがわかる。

同一隻数の場合、バース数が増えると解の精度が悪くなっており、問題の規模が大きくなるにつれて解の精度が悪くなるといえる。また、同一バース数の場合、隻数が増えると精度が悪くなっている。これは、計画期間幅が長くなるほど、解の精度が悪くなることを意味している。

(2) 到着時間の分布による解の影響

先述のように到着間隔と荷役時間は、指数と2次のアーラン分布に従う。しかし公共形式を導入した場合に入港調整等を行う可能性もあり、入港船の到着が専用形式と同様の分布形に従うとは限らない。そこで、分布を変化させた場合に目的関数の総在港時間やバース待ち時間がどう変化するかを検討する。具体的には到着間隔を指数分布、2次と3次のアーラン分布の3つの分布関数で発生させた。

図6は計画開始時刻1の計算結果を示すが、バース数が増えると当然ながら係留が早くなり、総在港時間が短くなっている。また分布形で比較すると、2次と3次のアーラン分布ではほとんど差がないが、指数分布では25隻の場合には総在港時間がアーラン分布よりも長くなっているが、50隻の場合では逆に最も短くなっている。以上の傾向は開始時刻2においても同様である。ただ開始時刻2の場合は時刻1よりも開始時刻が遅いために船がより待たされることになるので、総在港時間が長くなっている。

次に開始時刻1での各船の待ち時間の平均と標準偏差を表1に示す。この結果より同一隻数でバース数が増えると、当然1隻あたりの平均待ち時間は短くなっている。2次と3次のアーラン分布ではほとんど同じ値である。しかし指数分布では傾向は異なり、25隻の場合、平均待ち時間は3つの中で最も長く、また標準偏差が大きくなっており、50隻の場合は、逆に平均待ち時間が最も短く、標準偏差が小さい。開始時刻2では、平均待ち時間が長くなっている他は時刻1と同じ傾向がみられる。

さらに、各船の待ち時間分布を図7に示す。待ち時間のピークは25隻、50隻とも0～12時間の半日程度のところにある。さらにもう一つピークがあるが、

表1 待ち時間の平均と標準偏差（時間）

バース数	隻数		指数	2次	3次
5	25	平均	12.9	10.4	10.5
		標準偏差	15.0	11.8	12.1
	50	平均	24.5	29.6	29.1
		標準偏差	24.5	27.5	27.3
7	25	平均	10.2	7.5	7.1
		標準偏差	11.3	10.6	9.9
	50	平均	19.9	24.3	23.2
		標準偏差	23.0	25.0	23.7
10	25	平均	11.0	7.3	7.0
		標準偏差	11.1	10.1	9.6
	50	平均	15.7	19.6	19.1
		標準偏差	20.4	20.9	21.5

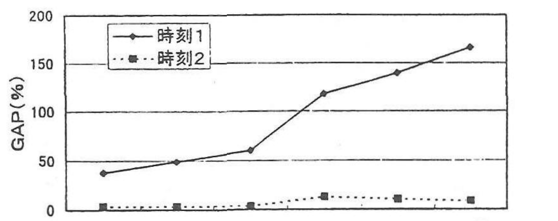

図5 解の精度の影響

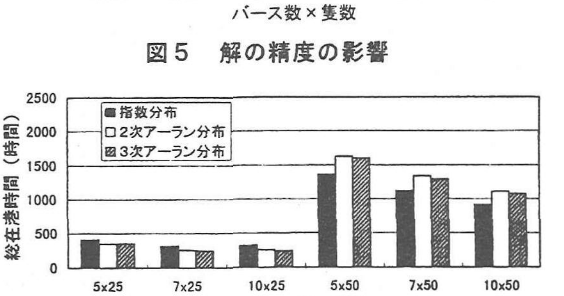

図6 総在港時間

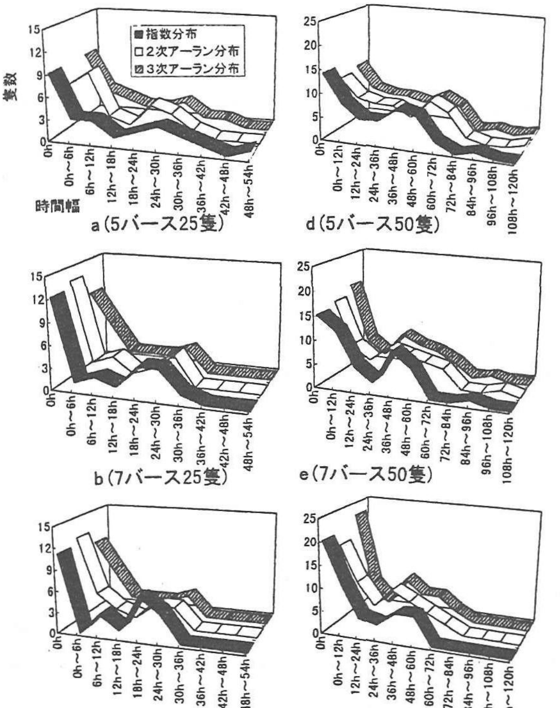

図7 各船の待ち時間分布

25隻のときは24時間、50隻のときは48時間のところにある。到着間隔の分布形の変化による影響としては、指数分布では上で述べたことが特に顕著に表れており、他の２つの分布形は比較的なだらかで、各船の待ち時間の長さにはばらつきが目立つ結果となっている。

指数分布では25隻の場合、総在港時間が最も長くなっている。一方、待ち時間分布をみると、指数分布では他より比較的待ち時間の長い船が存在する。このために総在港時間が長くなっていると考えられる。逆に50隻の場合、指数分布では他より待ち時間が長い船が少ないため総在港時間が短くなっていると考えられる。以上より、到着分布が高次のアーラン分布になると、つまり到着間隔が長い船が増すと、隻数が少ないときは待ち時間が短く、在港時間も少なくなるが、隻数が多いと逆の傾向になることが明らかになった。

6．実績との比較

次に、考案した割当法を用いて公共形式でのバ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１ヶ月間の入港船を対象として、１計画期間を１日、３日、６日とし、それぞれ29、10、５の期間に分けてバース割当の計算を行う。

実績データではある船が実際に係留されたバースでの荷役時間はわかっているが、その船が他のバースで荷役にどのくらい時間がかかるかはわからない。そこで、各バースのコンテナ１個あたりの荷役時間と各船の荷役コンテナ数の積の値をその船が各バースでかかる荷役時間とする。

各期間の計画開始時刻は、直前の計画期において各バースで最後に出港した船の出港時刻とする。なお、第１期の各バースの計画開始時刻は同一とする。

（２）計算結果

図８は供用バース数を３～７まで変化させた場合の総在港時間の値を示している。実績では、明らかに土日荷役の利用を避けるためにわざとバース待ちをしているケースがあった。しかし、本研究で提案した割当法ではこれは考慮していない。そこで、このような待ち時間を実績から取り除いている。

図８より、１計画期間が長くなるほど、総在港時間も大きくなっている。これは、第５節の事例計算で明らかになったように、期間が長くなると対象船が増えて解の精度が悪くなり、総在港時間が大きくなるためであると考えられる。この結果より、１計画期間が１日であれば、実績よりも２バース少ない５バースでも実績とほぼ同じ総在港時間ですむという結果になった。

次に、それぞれの期間おける計画開始時刻を調べた。その結果、各期間によって差はあったが、同一バース数で期間幅が大きくなる、つまり対象船が増えるほど、開始時刻は早くなり、同一期間幅ではバース数が増えると、開始時刻は早くなることがわかった。したがって、問題の規模が大きくなると計画開始時刻は早くなる傾向にあり、これにより解の精度が悪くなっている。

また、各船がどの程度バース待ちをしているかを調べた。表２に供用バース数ごとの各船の待ち時間の平均と標準偏差を示す。この結果より、バース数が増えると当然待ち時間が短くなり、またばらつき

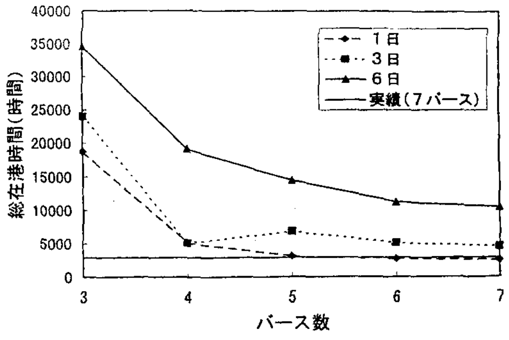

図８　総在港時間

表２　各船の待ち時間の平均と標準偏差

バース数		1日	3日	6日
3	平均	63.1	83.1	124.8
	標準偏差	40.5	51.0	71.3
4	平均	10.1	10.2	64.3
	標準偏差	10.1	15.7	52.0
5	平均	2.7	16.8	45.9
	標準偏差	4.7	20.5	54.8
6	平均	1.4	10.4	34.0
	標準偏差	3.3	16.0	43.3
7	平均	0.7	8.4	31.0
	標準偏差	2.1	13.7	38.6
実績 7バース	平均	3.4(同時係留船除く)		
	標準偏差	7.8		

も小さくなっている。１計画期間の長さによる変化の影響をみると、どのバース数でも期間幅が短いほど、待ち時間が短くなっており、ばらつきも小さくなっていることがわかる。

実績の待ち時間と比較すると、１計画期間が１日の場合であれば５バースでも平均待ち時間は短くなるという結果になった。

以上のことをまとめると、どの供用バース数においても計画時間の長さが短くなる方が平均の待ち時間が短くなり、総在港時間も短くなっている。また、待ち時間の標準偏差も期間幅の短い方が小さくなっている。したがって、計画期間幅を短くする方が在港時間、待ち時間とも短くなり、かつ待ち時間の長さのばらつきが少なく、入港船の満足度の高いサービスが提供できると考えられる。なお、１計画期間の長さを極端に短くすることは微視的な割当になるため好ましくないと思われる。

７．おわりに

本研究では最近問題になっている、日本の港湾コストの低減のために有効な方法であるコンテナふ頭の公共利用を考え、その運用に必要なバースと船の割当を行う方法について検討した。

本研究で得られた成果は、次のようになる。

①提案した近似解法を用いたバース割当法では、計画開始時刻が計画期間のどのあたりにくるか、または与えられた問題の規模によって解の精度が異なる。

②入港分布を変化させた場合の総在港時間や各船の待ち時間への影響を検討した。その結果、船の到着間隔が広がると、隻数が少ないときは各船の待ち時間は短くなり、在港時間も少なくなるが、隻数が増すと逆の傾向になることがわかった。

③神戸港での実績データを用いて割当計算を行ったが、１回の計算の規模を小さく、つまり対象期間幅を短くする方が在港時間、待ち時間とも短くなり、各船間の待ち時間のばらつきも少なくなることがわかった。さらに、１計画期間が１日のときは実績の供用数の７割のバース数で実績と同程度のサービスが行えることが明らかになった。

以上の結果から、提案した解法は十分実用的であり、公共バースの運用をより効果的なものにすると考えられる。

参考文献

1. G.G.Brown, *et al.*, Optimizing Ship Berthing, *Nav.Res. Log.*,**41**, 1-15(1994).
2. G.G.Brown, *et al.*, Optimizing Submarine Berthing with a Persistence Incentive, *Nav.Res.Log.*, **44**, 301-318(1997).
3. A.Imai, *et al.*, Efficient Planning of Berth Allocation for Container Terminals in Asia, *J. Advanced Trans.*, **31**, 75-94(1997).
4. 永岩, 今井, 公共コンテナ埠頭におけるバース割当計画, 日本航海学会論文集, **90**号, 119-129(1994).

計画開始時刻を考慮した公共バースの割当法

今井昭夫、西村悦子

日本の港湾がハブ港として生き残るには、港湾コストの低減が重要となる。そこで本研究では、そのためにコンテナ港においても在来船と同様の公共バース形式をとって、利用バース数を減らすことを提案する。その運用の際に、バースのパフォーマンスに影響を及ぼすであろう、船のバースへの割当方法を検討した。考案した割当法では、１計画期間が１日のときであれば、実績の供用数の７割のバース数で実績と同様のサービスが行えることが明らかになった。したがって、提案した解法は十分実用的であり、公共バースの運用をより効率的にするものである。

A Berth Allocation Problem in the Public Berth System with Consideration of the Starting Time of Planning Horizon

Akio IMAI, Etsuko NISHIMURA

We introduce in this paper the public berth system for container ports to reduce the cargo handling cost. Ship-to-berth assignment is essential to achieve high performance of that system since handling time of a particular ship depends on the berth where she is moored. Then we develop an efficient ship-to-berth assignment algorithm by using the subgradient method with Lagrangian relaxation. We conduct some numerical experiments with ship arrival and handling data in port of Kobe, resulting in the same handling performance with fewer berths available than those in Kobe.