

コンテナターミナルにおける船社専用形式とマルチユーザ形式の共用効果に関する研究*

Effects on the Combination use of Dedicated and Multi-user berths in the Container Terminal*

西村悦子**・今井昭夫***・Pierre CARIOU#

By Etsuko NISHIMURA**・Akio IMAI***・Pierre CARIOU#

1. はじめに

近年、アジア域内で国際コンテナ船の基幹航路の拠点競争が激化しており、シンガポールや中国等の主要港湾はその規模拡大、サービス水準向上、コスト低減を実現することによって取扱貨物量を急増させ、アジアのハブとして位置付けられている。このため、日本への大型船の寄港頻度が減り、相対的な地位の低下になっている現状を打破するため、官民が一体となり、国際競争力強化に向けた方策として、スーパー中樞港湾プロジェクトが進められている。このプロジェクトでは、文献12)にあるように、各船会社ごとに行っていたターミナル運用を、複数の船社で一括管理し、人件費や荷役機械などの設備投資等を抑えることで、港湾関連コストの低減を狙ったものである。

ここで岸壁利用効率の観点から複数バースの一括管理方法を考えると、船社専用とは異なる工夫が必要となる。つまり、船社専用バースでは当該バースを利用する船の直背後にコンテナが保管される。しかしながら、複数隣接バース一括管理では、係留位置が寄港のたびに決定されるため待ち時間が短くて済むが荷役時間は延長されるといったケースも発生するかもしれない。従って、船の係留位置とその時期の決定は、ターミナル全体の利用効率を左右し、これがうまく実現されなければ、待ち時間や作業時間の超過によってコスト増に繋がりがかねない。

そこで本研究では、船社専用バースの利点である貨物がいつも利用バースの近傍にある点、ならびに一括運用での利点である無駄な待ち時間を短縮できると言う点に着目し、両者を組み合わせて運用した場合にどのような効果がもたらされるかを検証する。

* キーワード：ターミナル計画、港湾計画

** 正会員 工博 神戸大学大学院准教授 海事科学研究科
(〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1,
TEL / FAX : 078-431-6258, E-mail : e-nisi@maritime.kobe-u.ac.jp)

*** 正会員 工博 神戸大学大学院教授 海事科学研究科
(〒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 : imai@maritime.kobe-u.ac.jp)

Non-member, Prof., Port and Shipping Management Specialisation,
French Chair in Maritime Management, World Maritime University

2. 既往の研究

本研究に関連する既存の研究として、コンテナ船の係留バース割当計画を扱ったものには今井ら¹⁾⁻⁴⁾、Kimら⁵⁾、Laiら⁶⁾、Monacoら⁷⁾、西村ら^{8),9)}、Parkら¹¹⁾の研究などがある。

文献1)では対象船舶は各バース同時期に1隻のみ係留できることを仮定し、近似解法を3種類提案とそれらの比較を行っている。この問題に対し、より良い解が得られるよう新しい定式化を提案したものが文献7)である。文献9)では各バースの同時期にやってくる複数船の全長の合計が岸壁延長を超えないときに同時係留を可能としたものを検討している。文献9)では荷役取扱いコンテナ数に優先度を設けて、これを考慮した問題を扱っている。文献5)では、香港HITにおいて到着順にサービスされることを前提に効率的なバース割当て計画立案方法を提案している。

また文献3)はターミナル形状に着目し、アムステルダム港にあるようなインデント型バースを有するターミナルにおいて、先行順序制約を考慮した問題を検討している。文献4)ではスリランカのコロンボ港で実際に行われている方式を参考に、船の待ち時間が許容値以上になる場合、近隣の他のターミナルを利用させることを考慮した問題を検討している。

以上の問題は岸壁延長を300m相当のバースごとに運用しているが、文献2)、6)と11)では1000m相当を細かく指定する、連続座標系での問題を扱っている。文献2)は岸壁延長を300m相当のバースごとではなく、連続座標として扱い、板取問題の応用としてバース割当て計画を扱い、荷役時間は係留バースによって変化するように仮定を設けている。これに対し文献6)と11)ではどこに係留されても荷役時間は変わらないとしている。文献6)は、船の希望時刻からの出港遅れと船の係留位置が貨物の配置から離れたときにかかるコストを最小化している。文献11)は船の係留位置、作業開始時刻と同時に岸壁クレーンの割当て問題も扱っている。

既存の研究で、一括運用(マルチユーザ形式)でのバース割当てを検討したものはあるが、船社専用と組み合わせて、両者を同時に供用する研究はない。

3. 本問題の概要

まず本問題の概要について述べる。決定要素は各船の係留バースと係留順とし、目的関数は船のバース待ち時間と荷役時間の合計の総在港時間の最小化とする。

船社専用バースに係留される船は当該バースの背後に荷役コンテナを保管する船であり、その係留順は各船の待ち時間が最小化の観点から到着順とする。

マルチユーザバースでは供用される全バースを一括運用する場合だけでなく、2分割した複数のマルチユーザバースとしての運用も検討する。そこで6バース供用を想定する場合、その組み合わせを次のように仮定する。

- パターン1: 6つの船社専用バース
- パターン2: 2バースのマルチユーザバース、4つの船社専用バース
- パターン3: 3バースのマルチユーザバース、3つの船社専用バース
- パターン4: 4バースのマルチユーザバース、2つの船社専用バース
- パターン5: 5バースのマルチユーザバース、1つの船社専用バース
- パターン6: 6バースのマルチユーザバース一括運用
- パターン7: 4バースと2バースから成る2つのマルチユーザバース
- パターン8: 3バースから成る2つのマルチユーザバース
- パターン9: 3バースと2バースから成る2つマルチユーザバース、および1つの船社専用バース
- パターン10: 2バースから成る2つのマルチユーザバース、および2つの船社専用バース

4. 問題の定式化

(1) パラメータと変数

本問題の定式化に使用するパラメータと変数は、次のようである。

パラメータ

- $i (=1, \dots, I \in B)$ バース番号 (I : 供用バース数)
- $j (=1, \dots, T \in V)$ 船番号 (T : 対象船の隻数)
- $k (=1, \dots, T \in O)$ 対象計画期間での係留順序

- A_j 船の到着時刻
- C_{ij} 船がバース*i*で荷役にかかる時間
- P_k k までの順番の集合
- S_i バース*i*の当該計画期間における計画開始時刻
- W_i バース*i*の計画開始時刻以降に到着する船の集合

変数

- x_{ijk} もし船の*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 である 0-1 の整数変数
- y_{ijk} 船がバース*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

(2) 定式化

本問題は以下のように定式化される。

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

$$+ \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} \sum_{l \in O} (T-k+1)y_{ijk} \quad (1)$$

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

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall i \in B, k \in O \quad (3)$$

$$\sum_{l \in V} \sum_{m \in P_k} (C_{il}x_{ilm} + y_{ilm}) + y_{ijk} - (A_j - S_i)x_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in B, j \in W_i, k \in O \quad (4)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in B, j \in V, k \in O \quad (5)$$

$$y_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in B, j \in V, k \in O \quad (6)$$

目的関数である式(1)は、総在港時間の最小化を示す。制約式(2)は各船がいずれかのバースに必ず1回係留されることを保証し、式(3)は各バースのある時点では船は1隻のみ係留できることを意味する。式(4)は船は到着後に係留されることを保証する。各式での各項の詳細な説明は文献1)に示す。

本問題は、式(4)を緩和することによって、次のような、ラグランジュ緩和問題に変形できる。

$$[P1] \quad \text{Minimize} \quad \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} \sum_{k \in O} \{(T-k+1)C_{ij} + S_i - A_j\} x_{ijk} + \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} \sum_{l \in O} (T-k+1)y_{ijk} - \sum_{i \in B} \sum_{j \in W_i, k \in O} \lambda_{ijk} \{ \sum_{l \in V} \sum_{m \in P_k} (C_{il}x_{ilm} + y_{ilm}) + y_{ijk} - (A_j - S_i)x_{ijk} \} \quad (7)$$

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

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall i \in B, k \in O \quad (3)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in B, j \in V, k \in O \quad (5)$$

$$y_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in B, j \in V, k \in O \quad (6)$$

ここで λ_{ijk} はラグランジュ乗数である。 y_{ijk} は制約式に表れていないので冗長であり、式を整理すると以下のようになる。

$$[P2] \quad \text{Minimize} \quad \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} \sum_{k \in O} \{(T-k+1)C_{ij} + S_i - A_j\} x_{ijk} - \sum_{i \in B} \sum_{j \in W_i, k \in O} \lambda_{ijk} \{ \sum_{l \in V} \sum_{m \in P_k} C_{il}x_{ilm} - (A_j - S_i)x_{ijk} \} \quad (8)$$

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

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall i \in B, k \in O \quad (3)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in B, j \in V, k \in O \quad (5)$$

なお問題 [P2] の3つの添字 i, j, k の i と k を組み合わせた新しい添字 $n (N)$ に置き換えると、次式のようなになる。

$$[P3] \quad \text{Minimize} \quad \sum_{n \in N} \sum_{j \in V} E_{nj} x_{nj} \quad (9)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{n \in N} x_{nj} = 1, \quad \forall j \in V \quad (10)$$

$$\sum_{j \in V} x_{nj} \leq 1, \quad \forall n \in N \quad (11)$$

$$x_{nj} \in \{0, 1\}, \quad \forall n \in N, j \in V \quad (12)$$

ここで E_{nj} は目的関数(9)のパラメータを整理したものであり、2次元の割当問題として表現でき、解くことが容易となる。

5. 解法

まず各船に対しマルチユーザバースか、船社専用バースか利用バースの種類を決定し、さらにマルチユーザなら一括運用、2分割運用のいずれに属するのかを決定する。その後船社専用なら(2)の処理を、各マルチユーザバースごとに(3)の処理を行う。

(1) 利用バース種類の決定

供用バースのうち、どのバースが船社専用であるのか、マルチユーザ形式であるのかは所与とする。当該バースが船社専用の場合、荷役コンテナの保管場所が当該バースに最も近い船を当該バースに割り当てる。マルチユーザバースの場合2バース以上から成るが、当該マルチユーザバースの背後に荷役コンテナが保管されている船が当該バースを利用する。

(2) 船社専用バースでのバース割当法

船社専用バースでは、荷役コンテナの保管位置に最も近いバースに係留させ、係留順はそれぞれの待ち時間が最小になるよう、到着順に係留させることとする。

(3) マルチユーザバースでのバース割当法

ここでは利用バースと係留順の決定を行うために、以下に示す劣勾配法を利用する。

(a) 劣勾配法

ステップ1: ラグランジュ乗数の初期値を設定する。
 ステップ2: 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3: 緩和問題の解を修正して、元問題の実行可能解を求める。
 ステップ4: 収束条件である、最適解が求まっているか、または繰り返し回数が設定値を超えていれば、終了。
 ステップ5: 現在の解の目的関数値から新たなラグランジュ乗数を計算する。ステップ2へ戻る。

(b) 実行可能解を求める方法

緩和問題の解では、緩和した制約式(4)、つまり対象船舶が到着後に係留されるという条件を満足しない場合もある。そこで劣勾配法のステップ2では、各船に対し、文献(1)で提案された解法の最良のものを用いる。

バースごとに、緩和した制約を満足しない船を見つけ、その船の係留開始時刻を到着時刻まで到着順にずらす。次に、当該船よりも後に係留予定の船全てに対し、船をずらして出来た空き時間に係留させることを考える。この場合、当該船の出港時刻と他船の到着時刻の差が最小なものを優先的に空き時間に係留させる。空き時間がなくなれば、次の制約を満足しない船を探し、同様のことを繰り返す。

6. 数値実験

(1) 計算実験の概要

ターミナル規模は6バース供用のものを想定し、各船の到着時刻は平均到着間隔3時間と4時間で、指数分布より生成させることにする。各船の荷役時間は、文献(10)の以下の式を用いる。

$$y = e^{1.71x_1^{0.75}x_2^{-0.77}x_3^{0.29}} \quad (13)$$

ここで x_1 は荷役コンテナ数、 x_2 はトレーラー台数、 x_3 は当該船舶の係留位置からそのコンテナが保管されるヤード位置までの距離を示す。なお各船の荷役コンテナ数は50個~1500個とし、各岸壁クレーンに対しトレーラー台数は4台とする。

(2) 計算結果

図1に各組み合わせでの目的関数値、図2に総待ち時間を示し、実線が6バースを一括運用したときの時間、点線が全バースを船社専用バースとして利用したときの時間を示す。また左端のM0-M0-D6とは船社専用6バースを意味し、中ほどのM6-M0-D0とは6バース一括運用を、右端のM2-M2-D2とは2バースから成るマルチユーザバースが2つと船社専用2バースを意味する。

全バース船社専用の場合が目的関数、総待ち時間ともに最も時間が長く、2分割した小規模マルチユーザバースでの運用が最も時間が短い。必ず最適解が得られる場合、係留バース決定と係留順決定に最も自由度の高い6バース一括運用が時間最小になるだろう。しかしながら、貨物の移動範囲を極端に大きくせず、ある程度限定する小規模に分割した方が値が小さい。

また船社専用バース数が増えると時間が長くなり、特に待ち時間によってこれが顕著であるが、船社専用バースが1バースのみの場合においては、時間が特に長く、他と傾向が異なる。そこで2つのマルチユーザバースに分け、残り1バースを船社専用と比較すると、小規模の

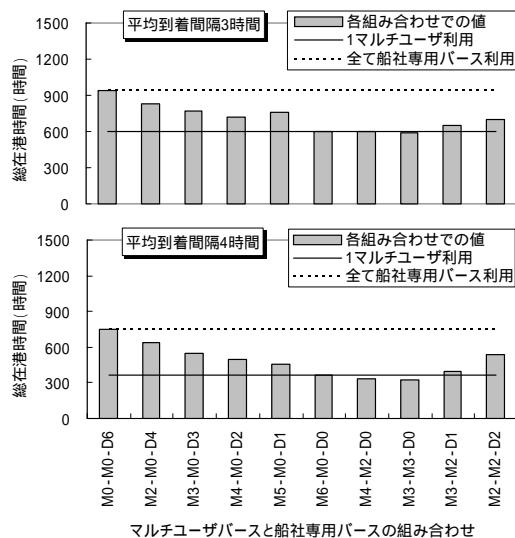


図1 各戦略での目的関数値

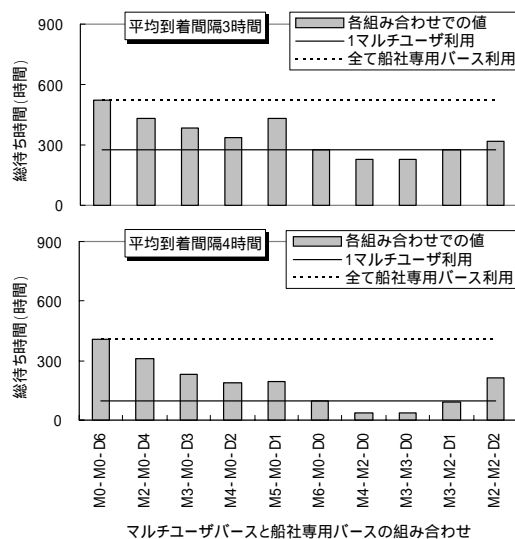


図2 各戦略での待ち時間

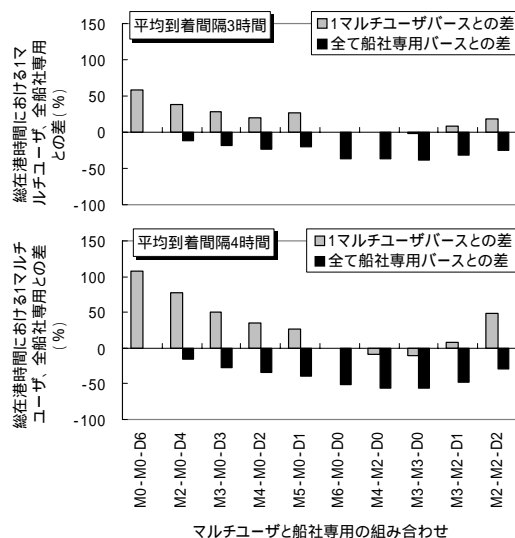


図3 総在港時間における1マルチユーザ利用および全船社専用利用との差

マルチユーザバスでの運用では時間が短く、これを5バスで行ったときの解の収束がうまく行っていないケースと考えられる。

到着間隔の違いで比較すると、3時間の比較的混雑していると想定されるケースで時間が長くなっている。また図3に6バス一括運用と全バス船社専用との差を見ると、差の大きさは平均到着間隔が長く、比較的空いているときにその差が大きいのが分かる。

7. おわりに

コンテナバスの運用方式に着目し、最大6バスまで一括運用するケースから、一部を船社専用、残りマルチユーザにするケース、さらに全バスを船社専用方式とするケースで、船の寄港間隔の違いでサービス時間にどのような影響をもたらされるかを検討した。

一括運用によってターミナル全体のサービス時間短縮は実現されるが、個々の船で見ると、必ずしもそうはならないという不利益に抵抗感があるユーザがいる場合であっても、ユーザの意向に応じる船社専用バスとの組み合わせ利用が可能となれば、全バス船社専用よりはサービス時間短縮に寄与することがわかった。

参考文献

- 1) Imai, A., Nishimura, E. and Papadimitriou, S., The dynamic berth allocation for a container port, *Transportation Research Part-B* 35, 401-417, 2001.
- 2) Imai, A., Sun, X., Nishimura, E. and Papadimitriou, S., Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach, *Transportation Research Part-B*, 39, 199-221, 2005.
- 3) Imai, A., Nishimura, E., Hattori, M. and Papadimitriou, S., Berth allocation at indented berths for mega-containership, *European Journal of Operational Research* 179(2), pp.579-593, 2007.
- 4) Imai, A., Nishimura, E. and Papadimitriou, S., Berthing ships at a multi-user container terminal with a limited quay capacity, *Transportation Research Part-E*, 44, 136-151, 2008.
- 5) Kim, K.H. and Moon, K.C., Berth scheduling by simulated annealing, *Transportation Research Part-B* 37, 541-560, 2003.
- 6) Lai, K.K. and Shih, K., A study of container berth allocation, *Journal of Advanced Transportation* 26(1), 45-60, 1992.
- 7) Monaco, M.F. and Sammarra, M., The berth allocation problem: A strong formulation solved by a lagrangean approach, *Transportation Science* 41(2), 265-280, 2007.
- 8) 西村悦子, 今井昭夫, 複数解を考慮した遺伝的アルゴリズムによる公共バスの割当法, *土木計画学研究・論文集*, No.16, 872-834, 1999.
- 9) 西村悦子, 今井昭夫, 佐村智子, 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ス割当法, *土木計画学研究・論文集*, No.18, 721-728, 2001.
- 10) Nishimura, E. et al., Estimating containership handling times in a container terminal. *Infrastructure Planning Review* 20, 703-710, 2003.
- 11) Park, Y.M. and Kim, K.H., Berth scheduling for container terminals by a sub-gradient optimization technique, *Journal of the Operational Research Society* 53, 1054-1062, 2002.
- 12) 国土交通省ウェブサイト (特定重要港湾指定のページ) (http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/11/110701_.html) (2008年7月23日ダウンロード)