

連続座標系を用いたマルチユーザターミナルでのバース割当*

Berth Allocation at a Multi-User Container Terminal with Continuous Location Spaces

服部真洋**、孫しん***、西村悦子****、今井昭夫#

By Masahiro HATTORI, Xin SUN, Etsuko NISHIMURA and Akio IMAI

1. はじめに

日本では、コンテナ港湾の国際競争力を高めるため、国土交通省がスーパー中枢港湾と銘打って、バース集約を前提にした港湾コストの低廉化を図りつつある。このようなバース集約は、いわゆる2バース程度を特定船社に長期貸し付けする専用ターミナルを複数設置する形態から、1社のターミナルオペレータ（メガオペレータ）が5バース程度を一括管理運用する、いわゆるマルチユーザターミナル（以下、MUTと呼称する）へ転換し、ターミナル規模のダウンサイジングを行うことを意味する。

このようなMUTはアジアのメガコンテナ港湾や欧州の多くの主要港湾に例があるが、MUTは日本には過去に存在しなかった。単純な推定によるとMUTにより規模の経済性が実現でき、船1隻あたり、またはコンテナ1個あたりの港湾関連コストは低廉化できる。さらにメインラインとフィーダーとのトランシップを考えると、MUTの方がトランシップの効率は上がる。しかし専用ターミナルとMUTの両方には、ターミナルでのコンテナのマテリアルハンドリングからみた類似性はあるものの、後者でははるかにオペレーションが複雑になると予想される。

一般に、専用ターミナルでは寄港船は、寄港の度に同一のバースに係留される。しかし、MUTでは一般に、ある特定の船（または特定船社の船）は寄港ごとに同一のバースに係留されることは保証されない。MUTを採用しているシンガポール港では、大量の荷役を行う大型船には優先度を与えて、事実上固定バースに係留されることはある。しかし、もし各寄港船が毎回の寄港で同一バースに係留されるので

あれば、総バース数は削減するにしても、必ずしもMUTを採用する必要はなく、専用ターミナルの集合体でも構わない。

以上のことを考慮すると、MUTの大きな特徴の一つは、ある船が毎回同一バースに係留されるとは限らない、いわゆる動的なバース割当を効率的にすることである。コンテナ定期船は寄港スケジュールの維持が絶対条件であるが、航海中の海象・気象条件の関係や前寄港地での荷役状況により、当該寄港地への到着が（日単位ではないにしても、少なくとも時単位では）遅れることも決して少なくはない。したがって、ある計画スパンでバース割当を繰り返し行う必要があり、その意味でも効率的な動的バース割当の立案方法の確立は重要である。

専用ターミナルでは寄港船の利用バースが固定で、しかも荷役対象コンテナはターミナルのそのバース直背後のヤードに蔵置されている。しかし、MUTでは寄港船のバース決定時期の問題ならびに荷役対象コンテナの荷主からの搬出入開始時期の関係から、必ずしも係留予定バースの直背後のヤード上に荷役コンテナを蔵置させるとは限らない。したがって、ある船の荷役時間はその係留バース位置と荷役コンテナのヤード上の蔵置位置によって異なると考えられる。これに関する分析はすでに参考文献6)で報告されている。

船の係留位置とコンテナ蔵置位置が離れても、トランステナー方式のターミナルであれば、荷役中のガントリークレーンとコンテナ蔵置位置を結ぶヤードトレーラを大量に投入すれば、船の在港時間短縮上のボトルネックであるガントリークレーンの荷役サイクルが中断されない。したがって、バース-蔵置位置間が近いときに比べて、さほど荷役時間が長くなるとは考えられない⁵⁾。しかし、このようにヤードトレーラを大量に配置すると、バーススケジュールが良好に維持でき、船の係留バースと当該コンテナ蔵置場所がほとんど近い状態が長く続くと、

* キーワード：ターミナル計画、港湾計画

** 学生会員 神戸大学 自然科学研究科博士前期課程

*** 学生会員 神戸大学 自然科学研究科博士後期課程

**** 正会員 工博 神戸大学助手 海事科学部貨物輸送科学講座
(〒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@maritime.kobe-u.ac.jp)

正会員 工博 神戸大学教授 海事科学部貨物輸送科学講座
(〒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: imai@maritime.kobe-u.ac.jp)

かなりの余剰トレーラが発生する。このことは、港湾荷役費の低廉化に逆行する結果となる。したがって、配置されるトレーラーの台数には一定の上限があり、船の係留位置とコンテナ蔵置位置の関係で荷役時間に差が出ると考えられる¹⁻⁴⁾。このため船とバースの割当て方次第で、ターミナル効率性の大きな評価指標である、一定期間での総在港時間は異なる。

以上のことから、MUT では船のバース割当ての仕方はそのターミナルの性能向上、さらには荷役費の低廉にはきわめて重要な問題となる。しかしながら、日本に登場するであろうメガオペレータにはそのノウハウがあるとは思われない。事実、MUT を抱える香港やシンガポールでは、MUT 使用の豊富な経験があるにもかかわらず、バース割当て効率化のための研究が盛んである。したがって、バース割当てのノウハウなしでは、スーパー中樞港湾の実現性は必ずしも高いとは言えない。

本研究は、以上のことを背景に、MUT におけるバース割当て問題 (BAP) を検討し、さらにターミナルでのコンテナハンドリングのシミュレーションを実施して、MUT での船の総在港時間を精緻に求め、BAP の効果を分析する。

2. 研究の概要

(1)シミュレーション全体の流れ

本研究では、既存の研究⁴⁾で開発された連続座標系での BAP を基礎におく。大きく BAP には離散座標系と連続座標系の問題がある。図 1 に両者の考え方をもとにした BAP の概念図を示す。横軸が岸壁延長方向、縦軸は時間軸方向を示している。長方形 A から J は計画対象船を表し、水平方向は船の全長、垂直方向が岸壁を占有する時間を表している。図 1 (a)に示すような離散座標系問題は、(例えば、日本の公社埠頭規格の 350m を単位とする)バースを基本として船の係留位置を決める問題である。これは、バース単位で船を割当てるため、ターミナルの岸壁全体の利用効率は犠牲になるが、問題を解く計算時間は少なくすむ。一方、図 1 (b)に示すような連続座標系問題は、この逆の性質を有する。今までの研究では、本研究が仮定するような船の係留位置により荷役時間が異なることを条件として、離散座標

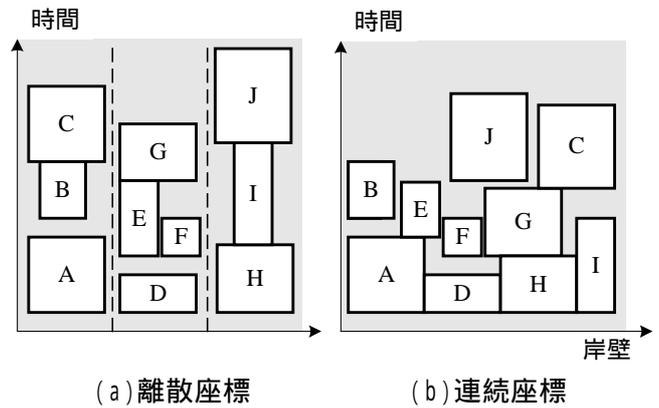


図 1 BAP の概念図

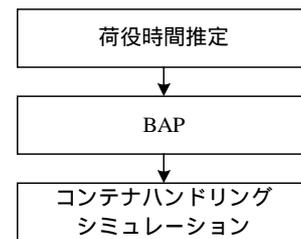


図 2 シミュレーションの概要

系問題には文献 1)-3)があり、連続座標系問題には文献 4)がある。本研究ではバースの利用効率を優先的に考えることとし、BAP としては文献 4)を用いる。本研究で行う MUT のシミュレーションは図 2 に示す、以下の 3 つの内容からなる。

荷役時間推定：船の係留予定位置と対象コンテナのヤード上蔵置位置から当該船の荷役時間の推定をおこなう。

BAP： の荷役時間を用いて対象船の係留場所を岸壁の任意位置に決定する。

荷役シミュレーション：バース割当てで決定された船の係留位置を前提に、コンテナのヤード上での搬送シミュレーションを実施する。

(2)荷役時間推定モデル

既往の研究⁶⁾において重回帰分析により荷役時間推定を行ったものがある。そこでは、荷役時間に影響を与えるものとして、各船の荷役コンテナ数、トレーラー投入台数および係留位置と荷役コンテナの蔵置位置との間の距離をとりあげて、これら 3 つを説明変数、各船の荷役作業時間を従属変数として重回帰モデルを表 1 のように構築した。

全変数を対数変換したときに寄与率が 88% となり最善な値であったため、これを採用する。有意水準 0.05、自由度 894 における F 値は 2.605 より、F 値の

表1 重回帰分析による荷役時間推定モデル

従属変数 y : 船の荷役時間			自由度 894
説明変数	偏回帰係数	t 値	
(定数)	1.71	2.31	寄与率 0.88
x_1	0.75	6.20	
x_2	-0.77	-40.84	F 値 458.16
x_3	0.29	16.78	

x_1 : 荷役コンテナ数、 x_2 : トレーラーの投入台数、
 x_3 : 係留位置荷役コンテナ位置間の距離

絶対値はそれより大きく統計的に有意である。偏回帰係数の符号は、荷役コンテナ数と距離のそれが正となり、コンテナ数および距離が大きくなると荷役時間が長くなる。さらにトレーラー台数の符号は負で、台数を増やせば荷役時間が短くなるという妥当な結果になる。偏回帰係数の検定については、有意水準 0.05、自由度 894 における t 値は 1.645 より、 t 値の絶対値はそれより大きく統計的に有意となる。説明変数と従属変数とも対数変換したものであるため、モデル式は式(1)のように表すことができる。

$$y = e^{1.71} x_1^{0.75} x_2^{-0.77} x_3^{0.29} \quad (1)$$

本研究では、BAP での係留位置に本モデル式を使用して、荷役時間の推定を行う。

(3) BAP の定式化

ここでは BAP の定式化を示すが、用いる記号は以下の通りである。

$i (= 1, \dots, T) \in V$: 船の集合

A_i : 船 i の到着予想時刻

L_i : 船 i の長さ

Q : 岸壁長

M_i : 岸壁での船 i の荷役時間が最小となる位置

C_i : 船 i の荷役時間

p_i : 船 i の係留位置

t_i^B : 船 i の荷役開始時刻

$t_i^F (= t_i^B + C_i)$: 船 i の荷役終了 (出港) 時刻

ここで p_i と t_i^B は決定変数である。

荷役時間は以下のように定義される。各船は荷役時間が最小となる係留位置 (最適位置) があり、ここから離れると荷役時間は増加する。各船を表現する長方形の底辺の中心を荷役時間の座標の中点 p_i とすると、荷役時間 C_i は以下のように定義される。

$$C_i = y(|p_i - M_i|) \quad (2)$$

ここで、 $y(\cdot)$ は、先に述べた第(2)項で求めた、荷役時間の重回帰モデルで、 $|p_i - M_i|$ は x_3 に相当する。

各船の係留条件として、それらが重複しないための条件を以下に示す。各船は、他船に対して時間軸もしくは岸壁延長方向のどちらか一方が重複することを許す。ある 2 隻が時間軸および岸壁延長方向の両方においてかなり離れている場合、両重複条件は満足するが、その 2 隻が時間軸上または岸壁延長方向で隣接する場合は、重複条件は時間または岸壁延長方向どちらか一方を満足すれば良い。したがって、ある船 i と j に対し以下の重複条件が満足しなければならない。

$$|p_i - p_j| \geq \frac{L_i + L_j}{2} \quad \text{or} \quad \left| \frac{t_i^B + t_i^F}{2} - \frac{t_j^B + t_j^F}{2} \right| \geq \frac{C_i + C_j}{2} \quad (3)$$

BAP は、岸壁と時間からなる半無限長の長方形の空間の中で、船を表す長方形がまったく重複することなく、総在港時間が最小となるように各船の位置座標 (p, t) を決定することである。

以上の仮定のもと、BAP の定式化は以下のように定義される。

$$[P] \quad \text{Minimize} \quad Z = \sum_{i \in V} (t_i^F - A_i) \quad (4)$$

$$\text{subject to} \quad |p_i - p_j| \delta_{ij}^p \geq \frac{L_i + L_j}{2} \delta_{ij}^p \quad \forall i, j (\neq i) \in V, \quad (5)$$

$$\left| \frac{t_i^B + t_i^F}{2} - \frac{t_j^B + t_j^F}{2} \right| \delta_{ij}^t \geq \frac{C_i + C_j}{2} \delta_{ij}^t \quad \forall i, j (\neq i) \in V, \quad (6)$$

$$\delta_{ij}^p + \delta_{ij}^t = 1 \quad \forall i, j (\neq i) \in V, \quad (7)$$

$$p_i - \frac{L_i}{2} \geq 0 \quad \forall i \in V, \quad (8)$$

$$p_i + \frac{L_i}{2} \leq Q \quad \forall i \in V, \quad (9)$$

$$t_i^B \geq \max(A_i, 0) \quad \forall i \in V, \quad (10)$$

$$p_i, t_i^B \geq 0 \text{ and are integer } \forall i \in V, \quad (11)$$

$$\delta_{ij}^p, \delta_{ij}^t \in \{0, 1\} \quad \forall i, j (\neq i) \in V, \quad (12)$$

ここで

δ_{ij}^p : もし岸壁方向の船 i と j の重なりが適用されたとき 1, そうでないとき 0, である 0-1 の整数変数

δ_{ij}^t : もし時間方向の船 i と j の重なりが適用されたとき 1, そうでないとき 0, である 0-1 の整数変数

目的関数(4)は各船のバース待ち時間と荷役時間の合計である総在港時間の最小化である。制約式

(5)-(7)は各船が重複しないための制約式である。制約式(7)は、ある2隻の船が(岸壁-時間)空間で岸壁延長方向もしくは時間軸のいずれかで重複しないことを保証する。制約式(8)と(9)は船が指定した岸壁延長内に係留されることを保証する。制約式(10)は船が到着後係留されることを保証する。

(4) コンテナハンドリングシミュレーション

一般にコンテナターミナルで行われる作業は、海側の本船荷役と陸側の搬出入の荷役に分けることができる。より現実的なモデルを構築するにはこれらすべてをモデル化すべきである。しかし、一般に荷役効率のためヤード内で輸入ブロックと輸出ブロックが区別され、本船荷役と搬出入の荷役が相互に干渉し合わないよう配慮されている。そこで本研究では本船荷役のみをモデル化する。コンテナターミナル内の荷役シミュレーションモデルを構築するために、シミュレーションソフトウェアパッケージ“AutoMod”を使用する。

荷役作業関係図を図3に、AutoMod仕様のターミナル簡略図を図4に示す。図3はQCとYCの作業をAとBという2つのプロセスで表し、その間をトレーラーが搬送する図である。Aは船内格納位置-QC下、Bはヤード内蔵置位置-YC下間のスプレッダーの移動を表す。現状の運用形態は、特定のQC

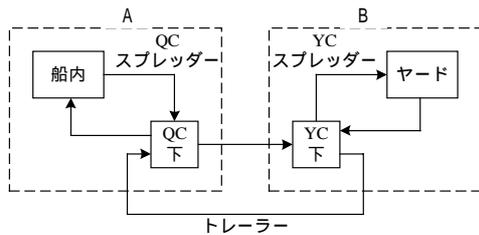


図3 荷役作業関係図

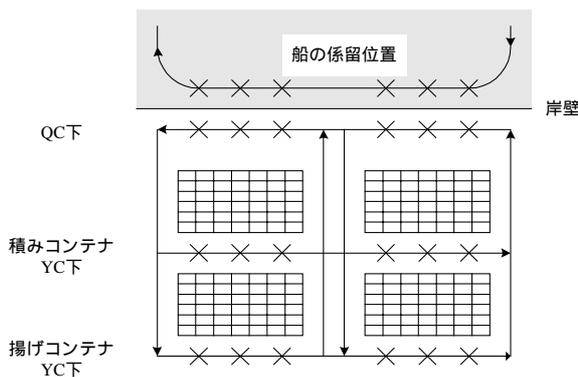


図4 ターミナルの簡略図

に割当てられ、YC訪問後同じQCに戻る。図4のは海上、はヤードを表し、船の係留位置、QC下およびYC下にある×印は、それぞれ船の係留位置およびトレーラーとコンテナを受渡しする位置を示す。矢印は船およびトレーラーの移動する導線、のヤード上にはコンテナの蔵置位置を示す。図3のAとBは図4のQCとYC下で行われる作業を示している。

まず船は図4の海上の矢印に沿って入港し、連続座標で区切られた×印に係留され作業終了まで当該×印を占有する。揚げ、積みの順で荷役が行われ、積み作業が終了すれば出港する。

次に揚げ作業は、図3のAに示すようにQCのスプレッダーにより船内格納位置からQC下のトレーラーまで運ばれる。トレーラーがコンテナを受け取ると、図4のQC下の×印から積みコンテナ蔵置位置であるYC下の×印まで運ばれる。そこで図3のBに示すようにYCのスプレッダーによりトレーラーからヤード内蔵置位置まで運ばれる。ここで、QC、YCのスプレッダーとトレーラー両方が到着すれば先に進むことができ、一方のみの到着の場合、待ち時間としもう一方の到着を待つ。なお積み作業は図3のAとBを反対に考えればよい。

3. 今後の課題

MUTにおいて、船の係留位置とヤード内蔵置位置の関係は、荷役時間に大きな影響を与えるため連続座標系問題でのBAPを行う。さらに既往の研究で行われた荷役時間推定モデルと本シミュレーションモデルを用いて、BAPの効果进行分析する。

参考文献

- 1) Imai, A., Nishimura E. and Papadimitriou, S., The dynamic berth allocation problem for a container port. Transportation Research Part B 35, 401-417, 2001.
- 2) Imai, A., Nishimura E. and Papadimitriou, S., Berth allocation with service priority. Transportation Research Part B 37, 437-457, 2003.
- 3) Imai, A., Nishimura E. and Papadimitriou, S., The dynamic berth allocation problem for a container port. Transportation Research Part B 35, 401-417, 2001.
- 4) Imai, A., Xin, S., Nishimura, E. and Papadimitriou, S., Berth allocation in a container port : using a continuous location space approach. Transportation Research Part B, in press
- 5) 篠田, 福地, 竹内, コンテナターミナルにおける荷役効率と機能評価に関する研究(その1) コンテナ荷役シミュレーション, 日本造船学会論文集, 第184号, 627-637, 1998.
- 6) Nishimura E., Imai, A., Zhao, B. and Kaneko, H., Estimating containership handling times in a container terminal. Infrastructure Planning Review, Vol.20, No.3, 703-710, 2003.