超大型船対応コンテナターミナルにおけるコンテナ配置計画に関する研究*

Container Storage Planning at a Container Terminal for Mega-containerships*

西村悦子**・今井昭夫***

By Etsuko NISHIMURA** • Akio IMAI***

1. はじめに

アジア-欧州間で積載容量10,000TEUを越える超大型船が登場し、就航を開始した。この後もまだ、あと数隻の登場が予定されている。これだけ大規模なコンテナ船を投入し、その効果を発揮するためには、コンテナ港湾においては一度にやって来る膨大な貨物を迅速に処理することが求められる。しかしながら現時点では、超大型船の一寄港地での取扱量は、従来の比較的大型の船と比べて特段増えている訳ではない。しかし近い将来、本格的に、従来型とは異なる、超大型船ならではの運航スケジュールがスタートすれば、先にも述べたように一度にやってくる膨大な貨物を効率的に処理しなければならない。超大型船はハブ・アンド・スポークのハブに寄港し、そこでの取り扱いの中心はフィーダー船へのトランシップ貨物になるだろう。そこで本研究では、超大型船からやってきたトランシップ貨物をフィーダー船に効果的に接続できるよう、コンテナヤードへの配置計画を検討する。

2. 問題の概要

まず本問題の概要について述べる。図１は連続4バースのターミナルを示し、上が海側、下が陸側を示す。超大型船1隻、フィーダー船3隻が係留されている状態を示し、長方形は複数コンテナから成るコンテナブロックを意味する。例えば、到着順1から3番目の船が、バース1、3および4に係留され、超大型船がバース2に係留されているとする。このとき、コンテナヤードを通過するトランシップ貨物は、図１に示すように、超大型船からフィーダー船へ、フィーダー船から超大型船への両方向のコンテナフローがあるが、問題の単純化のため、ここでは前者のみを対象とする。またこれらのコンテナはフィーダーへの積み付け順序の調整があるため、コンテナは一旦ヤードに必ず保管されることとし、直接船から船への移動は行われることはないとする。

一般に各船の陸揚げ作業が終了してから船積み作業が開始されるため、フィーダー船への積み付け作業は、当該船の陸揚げ作業が完了してから行えると仮定する。また問題の単純化のため、フィーダー船の担当クレーン数は1基のみとする。

超大型船からやってきたコンテナがヤードに保管されているとき、もし当該コンテナを積む予定の船の揚げ作業が完了していなければ、積み作業開始を延期する。またフィーダー船の揚げ作業が終了しているとき、超大型船からのコンテナがヤードに来ていないとき、ヤードに保管されるまで待つことになる。

次にコンテナの取扱いについて述べる。ヤードには複数のブロックが存在し、各ブロックは複数のコンテナから成り立っている。そこで各フィーダー船のコンテナを1コンテナグループとして扱い、各グループに属するコンテナは1コンテナブロック内に収まるものとする。

以上のことを前提に、超大型船の到着時期と比べて、早い時期に到着するフィーダー船にはなるべく早く積み作業が行われるような、コンテナの配置が決まるようにする。

3. 既往の研究

本研究に関連する既往の研究は、以下のものがある。Kozan and Preston[9]はコンテナ保管とヤードクレーンの荷役スケジュールを決定しており、遺伝的アルゴリズムを用いたヒューリスティクスアルゴリズムを考案している。

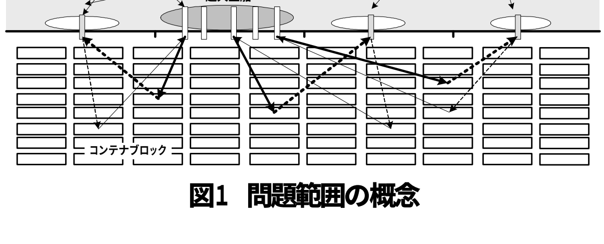

図1　問題範囲の概念

＊ 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）

Kim and Kim[5]は輸出コンテナをヤードに割り当てる方法を提案し、ヤードクレーンの荷役コストを最小化するようなモデルを構築している。船1隻分だけを計画対象としている。Kim and Bae[4]は船の滞在時間を削減するように、保管位置の割り当てとヤードクレーンの作業割り当てと作業順序を決定している。他に、Kim and Kim[6]、Kim et al.[7]およびKim and Park[8]では、輸出コンテナを対象に、荷繰り回数や再割当数を最小にするように保管位置を決定している。

これらに共通して言えることは、内陸からやってくる輸出用コンテナが対象となり、その到着は確率分布により与えているが、前もって分からないというのが前提である。しかしながら本問題は、トランシップコンテナであり、超大型船の到着と同時にやってくるため、前もって分かるものとして扱えることが特徴である。

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, …, NQ $\in QC$)　超大型船担当岸壁クレーン

j (=1, …, NV $\in V$)　フィーダー船

l (=1, …, NP $\in YP$)　岸壁ヤードブロック

T_i　超大型船担当の岸壁クレーンiが扱うコンテナが積み込まれるフィーダー船の隻数

K_j　超大型船担当の岸壁クレーンによる揚げ荷役における、フィーダー船jのコンテナの作業順序

Q_{ij}　超大型船担当の岸壁クレーンi がフィーダー船のコンテナを扱うとき 1、そうでないとき 0

A_M　超大型船の到着時刻

F_j　フィーダー船j の到着後に揚げ作業が完了する時刻

$C_{B(i)jl}^{MY}$　超大型船担当の岸壁クレーンiの位置$B(i)$からヤードブロックlの間で、フィーダー船jのコンテナ荷役にかかる時間

$C_{B(j)jl}^{YF}$　ヤードブロックlからフィーダー船jの係留位置$B(j)$の間で、当該船舶jのコンテナ荷役にかかる時間

○　変数

x_{jl}　フィーダー船jのコンテナがヤードブロックlに保管されるとき 1、そうでないとき 0 である 0-1 の整数変数

y_{jl}　超大型船からヤードやって来たフィーダー船jのコンテナが、その積み荷役を開始できるまでの滞在時間

（2）定式化

本問題は以下のように定式化される。

[CSP]　Minimize
$$\sum_{i\in QC}\sum_{j\in V}\sum_{l\in YP}\{(T_i-K_j+2)C_{B(i)jl}^{MY} + C_{B(j)jl}^{YF}+A_M-F_j\}Q_{ij}x_{jl}+\sum_{i\in Q}\sum_{j\in V}\sum_{l\in YP}(T_i-K_j+1)Q_{ij}y_{jl} \quad (1)$$

Subject to
$$\sum_{j\in V}x_{jl}=1,\quad \forall l\in YP \quad (2)$$
$$\sum_{l\in YP}x_{jl}=1,\quad \forall j\in V \quad (3)$$
$$\sum_{j'\in V}\sum_{l'\in YP}\frac{1}{K_j-K_{j'}}\max\{K_j-K_{j'},0\}(C_{B(i)j'l'}^{MY}x_{j'l'}+y_{j'l'})Q_{ij'} + Q_{ij}\{y_{jl}+(F_j-A_M)x_{jl}\}\geq 0,$$
$$\forall j\in V, l\in YP, i\in QC \quad (4)$$
$$x_{jl}\in\{0,1\},\quad \forall j\in V, l\in YP \quad (5)$$
$$y_{jl}\geq 0,\quad \forall j\in V, l\in YP \quad (6)$$

目的関数である式(1)は、超大型船からヤードブロック、ヤードブロックからフィーダー船にかかる作業時間、さらにフィーダー船の積み作業待ち時間の合計の最小化である。制約式(2)は、各フィーダー船のコンテナはいずれかのヤードブロックに必ず保管されることを意味しており、式(3)では、各ヤードブロックはフィーダー船 1 隻分のコンテナのみ保管できること保証する。式(4)は、フィーダー船への積み作業は、当該船が到着し、揚げ作業が完了した後に開始できることを意味している。

（3）ラグランジュ緩和問題

問題 [P-CSP] は、ラグランジュ乗数を付して、制約式(4)を目的関数に組み込むことで、ラグランジュ緩和問題として定式化できる。

[P-LR]　Minimize
$$\sum_{i\in QC}\sum_{j\in V}\sum_{l\in YP}\{(T_i-K_j+2)C_{B(i)jl}^{MY} + C_{B(j)jl}^{YF}+A_M-F_j\}Q_{ij}x_{jl}+\sum_{i\in Q}\sum_{j\in V}\sum_{l\in YP}(T_i-K_j+1)Q_{ij}y_{jl}$$
$$-\sum_{i\in Q}\sum_{j\in V}\sum_{l\in YP}\lambda_{ijl}\sum_{j'\in V}\sum_{l'\in YP}\frac{1}{K_j-K_{j'}}\max\{K_j-K_{j'},0\}(C_{B(i)j'l'}^{MY}x_{j'l'} + y_{j'l'})Q_{ij'}-\sum_{i\in Q}\sum_{j\in V}\sum_{l\in YP}\lambda_{ijl}Q_{ij}\{y_{jl}+(F_j-A_M)x_{jl}\} \quad (7)$$

Subject to
$$\sum_{j\in V}x_{jl}=1,\quad \forall l\in YP \quad (2)$$
$$\sum_{l\in YP}x_{jl}=1,\quad \forall j\in V \quad (3)$$
$$x_{jl}\in\{0,1\},\quad \forall j\in V, l\in YP \quad (5)$$
$$y_{jl}\geq 0,\quad \forall j\in V, l\in YP \quad (6)$$

ここで、λ_{ijl}はラグランジュ乗数を示し、非負の実数を取る。制約に変数y_{jl}がないため、問題 [P-LR] は次のよう

に変形できる。

$$
\begin{aligned}
\text{[P-1]}\quad \text{Minimize}\ & \sum_{i\in QC}\sum_{j\in V}\sum_{l\in YP}\{(T_i - K_j + 2)C_{B(i)jl}{}^{MY} \\
& + C_{B(j)jl}{}^{YF} + A_M - F_j\}Q_{ij}x_{jl} \\
& - \sum_{i\in Q}\sum_{j\in V}\sum_{l\in YP}\lambda_{ijl}\sum_{j'\in V}\sum_{l'\in YP}\frac{1}{K_j - K_{j'}}\max\{K_j - K_{j'},0\}C_{B(i)j'l'}{}^{MY}Q_{ij'}x_{j'l'} \\
& - \sum_{i\in Q}\sum_{j\in V}\sum_{l\in YP}\lambda_{ijl}Q_{ij}(F_j - A_M)x_{jl} \qquad (8)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\text{Subject to}\quad & \sum_{j\in V}x_{jl} = 1, \quad \forall\, l\in YP \qquad (2) \\
& \sum_{l\in YP}x_{jl} = 1, \quad \forall\, j\in V \qquad (3) \\
& x_{jl}\in\{0,1\}, \quad \forall\, j\in V, l\in YP \qquad (5)
\end{aligned}
$$

なお問題 [P-1] は、次のように２次元の割当て問題として表現でき、解くことが容易となる。

$$
\text{[P-2]}\quad \text{Minimize}\ \sum_{i\in QC}\sum_{j\in V}E_{jl}x_{jl} \qquad (9)
$$

$$
\begin{aligned}
\text{Subject to}\quad & \sum_{j\in V}x_{jl} = 1, \quad \forall\, l\in YP \qquad (2) \\
& \sum_{l\in YP}x_{jl} = 1, \quad \forall\, j\in V \qquad (3) \\
& x_{jl}\in\{0,1\}, \quad \forall\, j\in V, l\in YP \qquad (5)
\end{aligned}
$$

５．解法

本問題は、式の一部を緩和することによって、４章で示したような、ラグランジュ緩和問題に変形できる。これは割当問題の解法によって厳密解が得られ、この緩和問題を使った劣勾配法[1]によって、最悪の解の精度を得られることが知られている。例えば文献2)や3)では、それぞれ船の係留バース割当て問題、配送計画問題に適用し、良好な解を得られることが示している。そこでこの方法を用いることにする。

（１）劣勾配法

ラグランジュ乗数の初期集合から次の乗数を生成していく繰り返しの手続きである。これによって、緩和問題から得られる下界値を最大化することができる。

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。

（２）実行可能解を求める方法

緩和問題の解では、緩和した制約式つまり、揚げ作業完了後に積み作業が始まるという制約を必ずしも満足しない。そこで各船に対し、次の処理を行う。

コンテナのヤードへの保管完了時刻の前までに、フィーダー船の揚げ荷役が完了していれば、その時刻まで積み作業開始を延期し、当該船がその間待つ。反対に、フィーダー船の揚げ荷役が終了していなければ、完了するまでコンテナはヤードに一時保管されることになる。

６．数値実験

（１）計算実験の概要

ターミナルの形状は2種類想定し、一直線上に並んだ4バースから成るもの（タイプL）、大規模なくぼみ作って、そこに超大型船が係留させ、両舷荷役を可能にしたもの（タイプI）を考える。超大型船担当の岸壁クレーン数はタイプLとIでそれぞれ、7基および10基であり、両者の面積・岸壁延長は同一とする。

フィーダー船が到着して揚げ荷役が完了する時刻の分布の平均を1時間および2時間に設定し、これを指数分布で生成させることにする。なお超大型船の到着は、フィーダー船の揚げ作業完了分布に対し、最初と最後の時刻、および最初から1／3と2／3の4ヶ所に設定した。

超大型船からヤード、ヤードからフィーダー船までの荷役時間は、文献11)の以下の式を用いて求めた。

$$
y = e^{1.71}x_1^{0.75}x_2^{-0.77}x_3^{0.29} \qquad (10)
$$

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。なおフィーダー船1隻あたりの荷役コンテナ数は50個～250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

a）解の精度

まず提案する解法に解の精度を調べる。表２は各ケースにおける下界値と実行可能解との差GAPを示す。この値が0に近いほど、最適解に近い解が求まったと理解できる。収束条件の最大繰返し回数を200回に設定したが、その前までで最適解が得られた場合にはその時点の繰返し回数を示している。

この結果より、超大型船の到着時期が早く、緩和した制約を満足しない船が多い場合にGAPの値が大きい。また到着時期3と4のほとんどのケースで収束回数が1となっており、緩和問題を解いた時点で実行可能解が得られているのがわかる。次にターミナル形状の違いでは、

タイプIのGAPが大きく、岸壁クレーンの投入台数はIの方が多いことから、その分問題規模が大きくなり、GAPが多くなっている。

b）本問題で提案する戦略の効果

本問題では、フィーダー船の滞在時間、ならびにコンテナの滞在時間をなるべく短くする問題を扱っている。ここでは単純に荷役時間のみを最小化したとき、それから超大型船を最優先し、超大型船からの陸揚げ時間が最小になるようにコンテナ配置を行ったときと比較する。目的関数値を図２に、待ち時間を図３に示す。

表1 解の精度比較

平均完了時刻間隔	超大型船の到着時刻	タイプL		タイプI	
		GAP (%)	収束回数	GAP (%)	収束回数
1時間	1	33.6	200	77.1	200
	2	0.1	200	0.2	200
	3	0	1	0	1
	4	0	1	0	1
2時間	1	203.4	200	250.6	200
	2	23.6	200	63.6	200
	3	0	1	0.6	200
	4	0	1	0	1

GAP(%)＝(実行可能解での目的関数値－下界値)×100／下界値

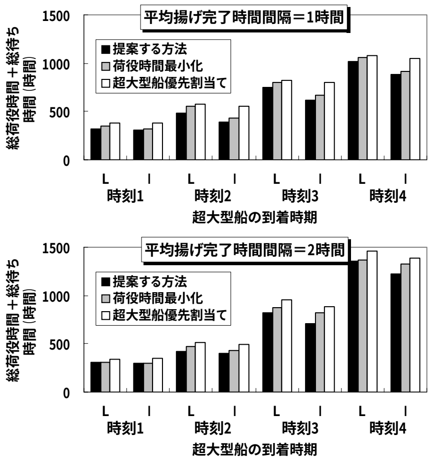

図2 各戦略での目的関数値

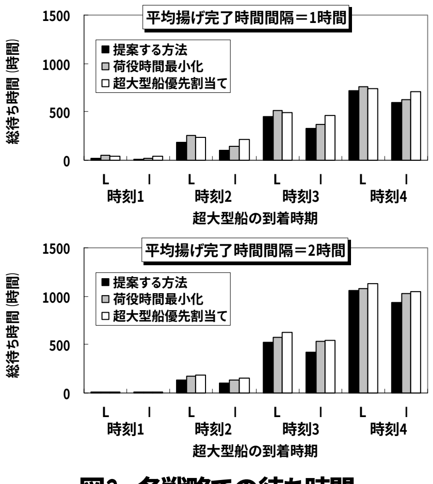

図3 各戦略での待ち時間

まず超大型船の到着時期で比較すると、超大型船の到着が遅いと、待ち時間が長い。ターミナルの形状で比較すると、タイプIは岸壁クレーン数が多く、早くコンテナがヤードにやってくるため、待ち時間が短くて済み、目的関数値も短くなっている。フィーダーの揚げ完了時間分布では、超大型船の到着時期で異なり、時刻1と2では到着時期が集中する平均間隔1時間が長くなり、時刻3と4では超大型船の到着までの時間が長い平均間隔2時間が待ち時間、目的関数ともに長くなっている。

3つの戦略で比較すると、待ち時間を考慮している提案した方法による結果が全てのケースで短くなっている。また荷役時間最小化と超大型船優先割当を比較すると、ほとんどのケースで荷役時間最小化による時間が短いが、平均間隔1時間の待ち時間では、タイプLのみで超大型船優先の方の時間が短くなった。これは、到着・揚げ完了時刻が集中するとき、タイプLでは3バースをフィーダーが利用できるため、このような結果になった。

7. おわりに

超大型船が寄港するコンテナターミナルにおいてトランシップ貨物だけを対象に、コンテナのヤードへの配置問題を検討した。超大型船が最優先に捉えられがちだが、それを制約として扱うことで、フィーダー船へのサービスに対する影響をみることができた。

参考文献

1) Fisher, M.L.: Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems. *Management Science* 27, 1-18, 1981.
2) Imai, A. *et al.*: The dynamic berth allocation for a container port. *Transportation Research Part B* 35, 401-417, 2001.
3) Imai, A. *et al.*: A Lagrangian relaxation-based heuristic for the vehicle routing with full container load. *European Journal of Operational Research* 176, 87-105, 2007.
4) Kim, K.H. and Bae, J.W.: Re-marshaling export containers in port container terminals. *Computers & Industrial Engineering* 35, 655-658, 1998.
5) Kim, K.H. and Kim, D.Y.: Group storage methods at container port terminals. *The American Society of Mechanical Engineers, 75th Anniversary Commemorative Volume*, MH-Vol.2, The Material Handling Engineering Division, 15-20, 1994.
6) Kim, K.H. and Kim, H.B.: Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals. *International Journal of Production Economics* 59, 415-423, 1999.
7) Kim, K.H. *et al.*: Deriving decision rules to locate export containers in container yards. *European Journal of Operational Research* 148, 92-101, 2003.
8) Kim, K.H. and Park, K.T.: A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers. *European Journal of Operational Research* 148, 92-101, 2003.
9) Kozan, E. and Preston, P.: Genetic algorithms to scheduling container transfers at multimodal terminals. *International Transactions in Operational Research* 6, 311-329, 1999.
10) Zhang, C. *et al.*: Storage space allocation in container terminals. *Transportation Research Part B* 37, 883-903, 2003.
11) Nishimura, E. *et al.*: Estimating containership handling times in a container terminal. *Infrastructure Planning Review* 20, 703-710, 2003.