

超大型船とフィーダー船間のフローを考慮したコンテナ配置問題に関する研究*

Container storage problem with the flow between the mega-containership and feeder ships*

西村悦子**・今井昭夫***

By Etsuko NISHIMURA**・Akio IMAI***

1. はじめに

コンテナ取扱貨物量の急激な増加とその傾向が期待される中、アジア-欧州間で積載容量10,000TEUを越える超大型船が就航している。日本への寄港は現在ないが、もしマシンの高度化等によるハード面の受け入れ態勢が進んだとしても、運用面で従来と同様の方法でうまく行くとは限らないため、寄港頻度やそこでの取扱貨物量に合わせた工夫が必要なるであろう。

また、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、寄港地数を従来船型より減らし、そこから最終目的地にはフィーダー輸送に依存する、ハブ・アンド・スポーク型の形態がより強調され、ハブ港湾で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。そこでの取り扱いの中心はフィーダー船との間でのトランシップ貨物になるだろう。そこで本研究では、トランシップ貨物を超大型船とフィーダー船の間で、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

図1は4バースから成るターミナルを示し、上が海側、下が陸側を示す。ここで超大型船1隻、フィーダー船3隻が係留され、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。コンテナヤードを通過するトランシップ貨物には、図1に示すように、超大型船とフィーダー船間で両方向のフローがあり、これを対象とする。また対象コンテナはフィーダーへの積み付け順序の調整があり、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。

一般に各船の荷役作業は、陸揚げ作業終了後、船積み作業開始のため、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。

超大型船からヤードに保管されるコンテナは、積み予定の船の揚げ作業が完了していなければ、積み作業開始は延期される。またフィーダー船の揚げ作業が終了しても、超大型船からのコンテナがヤードに来ていなければ、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、各ブロックは複数コンテナから成り立つ。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・フィーダー船間の荷役作業時間、および超大型船・フィーダー船両方に対し、なるべく早く積み作業が行われるような、コンテナの配置を決定する問題を扱う。

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 Preston⁷⁾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、遺伝的アルゴリズムによるアルゴリズムを考案している。Kim and Kim³⁾は輸出コンテナのヤードへの割当方法を提案し、1隻分だけを計画対象としたヤードクレーンの荷役コストを最小化するモデルを構築している。Kim and Bae²⁾は船の滞在時間短縮のため、保管位置の割当てとヤードクレーンの作業割当てと作業順序を決定している。他に、Kim and Kim⁴⁾、Kim et al.⁵⁾およびKim and Park⁶⁾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

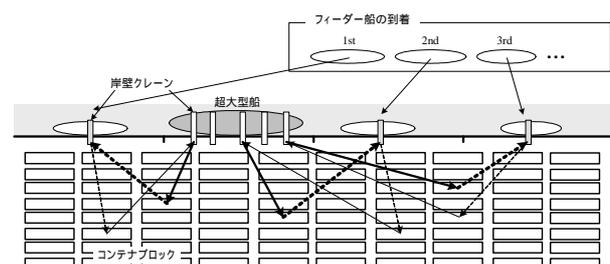


図1 問題範囲の概念

* 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)

位置を決定している。Zhang *et al.*¹²⁾では、係留位置と保管場所の距離が短くなるように、計画期間の各ブロックに保管されるコンテナ数を決定している。またPetering *et al.*¹¹⁾ではシミュレーションモデルで、ヤード内の保管ブロックサイズとブロック間でヤードクレーンの制御システムによって、岸壁クレーンの1時間あたりの作業回数がどう変化するかを調べている。Lee *et al.*⁸⁾では、輸出・トランシップコンテナを対象に、船からヤードまでの揚げ作業のみを考慮したヤードクレーンの移動最小化問題を扱っている。Han *et al.*¹⁾では文献8)の問題にヤードから船への積み作業時間を考慮し、タブサーチにより解を得ている。Nishimura *et al.*¹⁰⁾では、メガシップからフィーダー船への一方向を前提に、メガシップからヤードまでの作業時間とフィーダー船の滞在時間の和を最小化した問題として扱っている。

既存研究では、船から船への移動を扱ったものはなく、本研究の前身の研究ではその一歩として、一方向のみを対象としたが、本研究では両方向の移動を扱えることが特徴である。

4. 本問題の目的関数と制約

本問題を定式化で表現すると制約が多いため、紙面節約を目的に、ここでは使用するパラメータと決定要素を示し、次に目的関数と制約を述べる。

(1) パラメータと決定要素

本問題であらかじめ用意するパラメータと結果として得られる決定要素は、次のようである。なお一部記号で示されたものは、次章の解法手順で使用する。

・パラメータ

- (a) フィーダー船のコンテナが割当てられた岸壁クレーンでの、メガシップからヤードへ(またはヤードからメガシップへ)の揚げ作業順
- (b) メガシップ担当岸壁クレーン*i*がフィーダー船*j*のコンテナを荷役するか否か Q_{ij}^{MY} (メガシップ ヤード)、 Q_{ij}^{YM} (ヤード メガシップ)
- (c) フィーダー船*j*がバース*p*に係留されるか否か R_{pj}
- (d) メガシップとフィーダー船の到着時刻 A_j
- (e) メガシップ担当岸壁クレーン*i*の場所*B(i)* - ヤードブロック間の船*j*のコンテナの荷役作業時間 $C_{B(i)j}^{MY}$ (メガシップ ヤード)、 $C_{B(i)j}^{YM}$ (メガシップ ヤード)
- (f) フィーダー船*j*の係留バース*p*からヤード間の荷役作業時間 C_{pj}^{FY} (フィーダー船 ヤード)、 C_{pj}^{YF} (ヤード フィーダー船)

・決定要素

- (a) メガシップからやってくる、フィーダー船*j*のコンテナがヤードブロック*l*に保管されるか否か x_{jl}^{MY}

- (b) フィーダー船*j*からやってくるコンテナが、ヤードブロック*l*に保管されるか否か x_{jl}^{FY}
- (c) メガシップからやってくる、フィーダー船*j*のコンテナがヤードブロック*l*に保管完了する時刻 f_{jl}^{MY}
- (d) フィーダー船*j*のコンテナがヤードブロック*l*に保管完了する時刻 f_{jl}^{FY}
- (e) ヤードブロック*l*に保管されるフィーダー船*j*のコンテナをメガシップ(または、フィーダー船)に船積み作業を開始する時刻 b_{jl}^{MY} 、 b_{jl}^{FY}
- (f) メガシップからのコンテナとフィーダー船からのコンテナが互いに、同一時間帯に特定のヤードブロックに保管されるか否か

(2) 目的関数と制約

目的関数は、メガシップからヤード、ヤードからフィーダー船への作業時間、およびその反対方向の作業時間、さらにメガシップとフィーダー船の積み作業開始までの待ち時間の合計とする。

配置計画の制約は、以下のようになる。

メガシップからヤードにやってくる各コンテナグループは、必ず1回ヤードに保管され、同一ブロックには1グループまで保管できることとする。またフィーダー船からヤードにやってくるコンテナグループも同様の制約を持つ。

メガシップからの各コンテナグループは、フィーダーからのコンテナと滞在時期が重ならなければ、同一ブロックを利用できる。

ヤードからメガシップへ(またはヤードからフィーダー船へ)のコンテナ積み作業開始時刻は、当該フィーダー船のコンテナのヤード保管完了時刻後であることを保証する。

5. 解法

本問題は、定式化からも分かるように、制約式が多く、既存研究のように解の精度を表現できるような解法で解くことは非常に困難である。そこで、こうした問題にも適用が容易である遺伝的アルゴリズムを用いることにする。

(1) 遺伝的アルゴリズムの処理手順

大まかな流れは、以下のようになる。

- ステップ1: 初期個体群生成し、親個体群とする。
- ステップ2: 各個体の目的関数値計算、適応度変換
- ステップ3: 遺伝演算(選択、交叉、突然)実施
- ステップ4: 新しい解集合を子の個体群とする。
- ステップ5: 子の各個体の目的関数値、適応度変換

ステップ6: 親と子の個体群の中から、同一のものを削除し、残りの中から適応度の上位個体群サイズ分を新しい親集合とする。

ステップ7: もし現在の世代数が最終世代数であれば、終了。そうでなければ、ステップ3へ戻る。

(2) 目的関数の計算アルゴリズム

初期解より各船のヤード内での位置情報が決定されるため、以下では位置情報とその他の情報を元に作業開始・完了時刻を決定するアルゴリズムを示す。なおこれは大きく4つに分けられ、でメガシップからヤードへの各コンテナグループの揚げ作業完了時刻、でフィーダー船からヤードへの揚げ完了時刻、ヤードからフィーダー船への積み完了時刻、でヤードからメガシップへの積み完了時刻が得られ、では、で得られた時刻より目的関数値を求める。

メガシップ ヤードブロックの揚げ完了時刻

ステップ1: 岸壁クレーン番号*i*=1とする。

ステップ2: $i >$ メガシップ割当クレーン数なら、揚げが完了し積み開始できる時刻を $Lst_i=CT1$ としてへ。コンテナ番号*j*=1、作業番号*k*=1、 $f_{st}=0$ とする。

ステップ3: $j >$ 対象コンテナグループ数なら、岸壁クレーンの積み作業開始時刻を記憶し、ステップ7へ。

ステップ4: コンテナ*j*を岸壁クレーン*i*が担当、その作業順が*k*ならステップ5へ、そうでなければステップ6へ。

ステップ5: コンテナ*j*のヤードへの揚げ完了時刻(f_{ji}^{MY})を次のように得る。 $f_{st}=0$ なら、 $CT1=A_j+C_{B(i)j}^{MY}$ とし、そうでなければ、 $CT1=CT1+C_{B(i)j}^{MY}$ とする。 $f_{ji}^{MY}=CT1$ 、 $f_{st}=1$ 、 $k=k+1$ とする。

ステップ6: $j=j+1$ とし、ステップ3へ。

ステップ7: $i=i+1$ とし、ステップ2へ。

フィーダー船 ヤード ヤード フィーダー船

ステップ1: フィーダー船対象バース番号*i*=1とする。

ステップ2: $i >$ フィーダー用バース数なら、へ。コンテナグループ番号*j*=1、 $f_{st}=0$ とする。

ステップ3: $j >$ 対象フィーダー数ならステップ7へ。

ステップ4: 船*j*がバース*p*に係留なら、ステップ5へ。そうでなければ、ステップ6へ。

ステップ5: 船*j*からのコンテナがヤードに揚げ作業完了時刻(f_{ji}^{FY})をと船*j*の積み作業開始時刻(b_{ji}^{FY})を次のように得る。

ステップ5-1: $f_{st}=0$ なら、 $CT2=A_j+C_{pj}^{FY}$ 、 $f_{ji}^{FY}=CT2$ 、 $f_{st}=1$ とし、ステップ5-3へ。

ステップ5-2: $A_j < CT2$ なら、 $CT2=CT2+C_{pj}^{FY}$ 、そうでなければ、 $CT2=A_j+C_{pj}^{FY}$ とする。 $f_{ji}^{FY}=CT2$ 、 $f_{st}=1$ とする。

ステップ5-3: $f_{ji}^{MY} < f_{ji}^{FY}$ なら、 $b_{ji}^{FY}=f_{ji}^{FY}$ とし、そうでなければ、 $b_{ji}^{FY}=f_{ji}^{MY}$ とする。 $k=k+1$ とす、ステップ7へ。

ステップ6: $j=j+1$ とし、ステップ3へ。

ステップ7: $i=i+1$ とし、ステップ2へ。

ヤードブロック メガシップ

ステップ1: 岸壁クレーン番号*i*=1、作業番号*k*=1とする。

ステップ2: $i >$ メガシップ割当クレーン数なら、へ。コンテナ番号*j*=1とする。

ステップ3: $j >$ 対象コンテナ数なら、ステップ7へ。

ステップ4: コンテナ*j*を岸壁クレーン*i*が担当し、作業順が*k*ならステップ5へ。そうでなければステップ6へ。

ステップ5: コンテナ*j*のメガシップへの積み作業開始時刻(b_{ji}^{YM})を次のように得る。

$k=1$ および $f_{ji}^{FY} < Lst_i$ なら、 $b_{ji}^{YM}=Lst_i$ とし、 $k=1$ および $f_{ji}^{FY} < Lst_i$ なら、 $b_{ji}^{YM}=f_{ji}^{FY}$ とする。 $k > 1$ および $f_{ji}^{FY} < CT3$ なら、 $b_{ji}^{YM}=CT3$ とし、 $k > 1$ および $f_{ji}^{FY} < CT3$ なら、 $b_{ji}^{YM}=f_{ji}^{FY}$ とする。 $CT3 = b_{ji}^{YM} + C_{B(i)j}^{YM}$ 、 $k=k+1$ とする。

ステップ6: $j=j+1$ とし、ステップ3へ。

ステップ7: $i=i+1$ とし、ステップ2へ。

目的関数の計算

ステップ1: 岸壁クレーン番号*i*=1、作業番号*k*=1、目的関数 $OBJ=0$ とする。

ステップ2: $i >$ メガシップ割当クレーン数なら、終了。コンテナ番号*j*=1とする。

ステップ3: $j >$ 対象コンテナ数なら、ステップ6へ。

ステップ4: 割り当てられた作業時間(メガシップからヤード、ヤードからフィーダー船、およびその反対)、および各船の積み作業開始までの待ち時間を以下の式で求める。

$$OBJ=OBJ+(C_{B(i)j}^{MY}Q_{ij}^{MY}+C_{B(i)j}^{YF}R_{pj})x_{ji}^{MY}+(C_{B(i)j}^{FY}R_{pj}+C_{B(i)j}^{YM}Q_{ij}^{YM})x_{ji}^{FY}+b_{ji}^{YF}f_{ji}^{MY}+b_{ji}^{YM}f_{ji}^{FY} \quad (1)$$

ステップ5: $j=j+1$ とし、ステップ3へ。

ステップ6: $i=i+1$ とし、ステップ2へ。

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

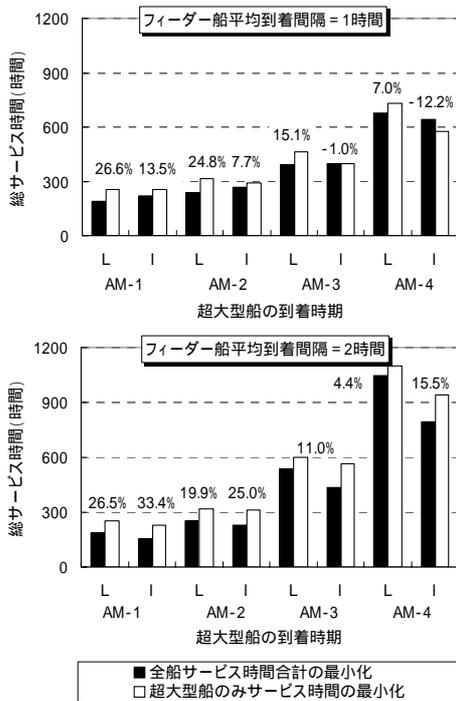


図2 各戦略での目的関数値(平均)

表1 目的関数値の標準偏差

	ターミナル形状	超大型船の到着時期			
		AM-1	AM-2	AM-3	AM-4
全船サービス時間合計の最小化	L	7.1	5.8	64.6	50.6
	I	13.5	14.6	41.5	50.1
超大型船のみサービス時間の最小化	L	19.7	26.7	60.9	48.8
	I	20.7	15.6	36.7	34.0

荷役時間は、文献2)の以下の式を用いて求めた。

$$y = e^{1.71x_1 - 0.75x_2 - 0.77x_3 + 0.29} \quad (2)$$

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。なおフェーダー船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

本問題では、超大型船とフェーダー船の滞在時間の合計をなるべく短くする問題を扱っている。ここでは超大型船を最優先し、超大型船からの陸揚げ船積み作業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。各ケースにおける目的関数値の平均を図2に、表1にはその標準偏差を示す。

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、当然のことであるが、それまで待たされる時間が長くなっている。ターミナルの形状で比較すると、全船のサービス時間合計を最小化する場合には到着間隔1時間、超大型船到着時期が早いケースで、タイプLの時間が短い、超大型船のみサービス時間最小化の場合では全ケースで、同等かタイプIの時間が短い。この理由

として、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到着するため、待ち時間を含む目的関数値が短くなっている。フェーダー船の到着間隔の長さでみると、超大型船の到着時期で異なり、時刻1ではフェーダーの到着が集中する平均間隔1時間が長く、それ以外では超大型船の到着までの時間が長い平均間隔2時間での時間が長くなっている。また2つの戦略で比較すると、図中の%は両者の差を示すが、超大型船の到着時期が遅いほど差が小さく、形状で見ると、タイプLは間隔が長いほど、タイプIは間隔が短いほど差が小さい。またほとんどのケースで全船のサービス時間最小化の方が短い、到着間隔1時間で超大型船の到着時期が遅い時刻3と4のタイプIで反対の傾向となった。

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。ターミナルの形状、超大型船の到着時期、フェーダー船の到着間隔、異なる評価指標で対象船のサービス時間を比較し、混みあった状況下で、形状によっては超大型船のみを優先に割当てたケースの方の時間が短くなるという結果になり、その理由を今後検証する予定である。

参考文献

- Han, Y. et al.: A yard storage strategy for minimizing traffic congestion in a marine container transshipment hub, *OR Spectrum* 30, 697-720, 2008.
- Kim, K.H. and Bae, J.W.: Re-marshaling export containers in port container terminals. *Computers & Industrial Engineering* 35, 655-658, 1998.
- 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.
- 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.
- Kim, K.H. et al.: Deriving decision rules to locate export containers in container yards. *European Journal of Operational Research* 148, 92-101, 2003.
- 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.
- Kozan, E. and Preston, P.: Genetic algorithms to scheduling container transfers at multimodal terminals. *International Transactions in Operational Research* 6, 311-329, 1999.
- Lee, L.H. et al.: An optimization model for storage yard management in transshipment hubs, *OR Spectrum* 28, 536-561, 2006.
- Nishimura, E. et al.: Estimating containership handling times in a container terminal. *Infrastructure Planning Review* 20, 703-710, 2003.
- Nishimura, E. et al.: Container storage and transshipment marine terminals. *Transportation Research Part E* 45, 771-786, 2009.
- Petering, M.E. and Murty, K.G.: Effect of block length and yard crane deployment systems on overall performance at a seaport container transshipment terminal, *Computers & Operations Research* 36, 1711-1725, 2009.
- Zhang, C. et al.: Storage space allocation in container terminals. *Transportation Research Part B* 37, 883-903, 2003.