



コンテナ配置の最適化による荷役方式の比較

西村, 悦子
今井, 昭夫

(Citation)

土木学会論文集D3 (土木計画学), 69(5):I_659-I_667

(Issue Date)

2013

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2013 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002797>



コンテナ配置の最適化による荷役方式の比較

西村 悦子¹・今井 昭夫²

¹正会員 神戸大学准教授 大学院海事科学研究科 (〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町5-1-1)
E-mail: e-nisi@maritime.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学教授 大学院海事科学研究科 (〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町5-1-1)
E-mail: imai@maritime.kobe-u.ac.jp

本研究では、国内外の大規模コンテナターミナルで使用される荷役方式に着目し、そこで主として使用される荷役機器とターミナルレイアウトの特徴がコンテナの配置計画にどのような違いをもたらすかを検証する。具体的には荷役機器の違いは、コンテナヤードの保管エリアにあるコンテナブロック間に設けられた通路のどこを搬送車両が走行するかで移動に要する時間が異なること、さらに荷役機器の大きさや機動性に伴ってターミナル全体の保管容量が異なることがある。そこで評価指標には、総サービス時間とスペース占有率を用いた。計算結果より、港の混み具合や係留パターンに関わらず、タイヤ型門型クレーンで評価が高かったが、そのうち半数のケースでレール式門型クレーンと同等の評価を得ることが分かった。

Key Words : container terminal, storage arrangement, handling equipment

1. はじめに

近年、シンガポールや中国等の主要港湾はその規模の拡大、サービス水準の向上ならびにコスト低減の実現から、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。またコンテナ船の大型化は著しく、積載容量10000TEUを超える超大型船が登場してから6年が経ち、100隻を超える超大型船がアジアと欧州・北米間を航行している。こうした中、日本への超大型船の寄港実績はあるものの、貨物取扱量がさほど多くないという現状があり、同様に他船型船の寄港も他の主要港湾に比べると格段に少ない。この打開策として、国際コンテナ戦略港湾指定により、当該港湾に寄港隻数増と貨物取扱増を期待し、条件を満たす船にインセンティブを与えると工夫も始まっている。

またコンテナターミナルでは、多数のコンテナが一時保管されるため、どのコンテナをヤード内のどこに保管するかで作業時間長は異なる。荷役コンテナ数の増加に伴う作業時間の延長が抑えられれば、着岸時間の短縮とそれに伴う岸壁使用料の低減につながる。またハブ・アンド・スポーク輸送のボトルネックとして指摘されるハブ港湾でスムーズに二次輸送網へ接続されることも期待できる。そこで本研究では、本船荷役に関わる作業時間延長を抑えるようにターミナル内のコンテナ配置問題を考える。

ところで、世界の主要港湾に目を向けてみると、導入されている荷役機器は、その特徴、設置時期と地域的背景等によって違いがある。各荷役機器に適するターミナルの規模やレイアウトも異なる。文献 1)では、2007年のコンテナ取扱量上位30港に属する135ターミナルで主として利用される荷役機器を調べている。これによると、タイヤ式門型クレーン (Rubber Tyred Gantry Crane, RTG) のみが採用されるターミナルは全体の3割、RTGも含むケースが全体の3分の2である。レール式門型クレーン (Rail Mounted Gantry Crane, RMG)、ストラドルキャリア (Straddle Carrier, SC)、シャーシ (Chassis, C) のみの採用はそれぞれ、3.0%、11.1%、6%であるが、その他との併用はそれぞれ2割、全体の2.6割、4割強と多い。ここで、RTGは世界中で採用件数が非常に多く、SCはRTGに次いで単独採用が多い。またRMGは比較的新しく、大規模ターミナルに多く採用されている。

このことから、本研究ではRTG、RMGとSCのターミナルを対象に、コンテナ配置問題を考える。

2. 既往の研究

本節では、コンテナ配置問題に関する既往の研究と荷役方式の比較に関する既往の研究について整理する。

(1) コンテナ配置問題に関する既往の研究

まずコンテナの配置問題を考える際、コンテナ個々による個別扱い、同一船や同一仕向地別でまとめた複数個によるグループ取扱い、によって必要となる条件が異なる。後者の1グループ規模は、1ヤードベイ（コンテナの幅方向と高さ方向から成るコンテナ群）以上、1ブロック（搬送車両の通路で囲まれたコンテナ群）未満での運用とし、コンテナの荷繰りを考えなくてよいことからこの条件下で問題を扱う。なお荷繰りとは、目的コンテナを取り出すときにその上に蔵置されるコンテナを別の場所におく（リハンドルと呼ぶ）作業のことを指し、これが発生しない、もしくはなるべく少ない回数で済むことが望まれる。そこでコンテナグループ扱いでの配置問題の評価指標には以下があり、文献2)ではRTGの移動時間の最小化、文献3)ではトレーラーとRTGの移動コストを最小化している。また文献4)ではある時刻の特定ブロックで荷役されるコンテナ数と待機中コンテナ数の差を最小化してブロックに保管されるコンテナ数を決定し、次にコンテナの移動コストを最小化するために、保管場所と係留位置間の移動距離を最小化している。

また著者らの先行研究^{5)・7)}には、コンテナを仕向地別船別にグループ化し、超大型船が寄港するコンテナターミナルを対象としたものがある。文献5)は超大型船1隻と複数フィーダー船間での貨物の移動を想定し、トランシップコンテナの一時保管場所を決定する問題を扱っている。文献6)ではフィーダー船担当の岸壁クレーン（QC）数を複数基対応できる問題に拡張し、文献7)ではコンテナのフローを超大型船からフィーダー船への一方向から、両方向へ拡張している。

(2) 荷役方式の比較に関する既往の研究

また上で紹介した文献2)から7)では、荷役方式を世界で最も多く採用されているRTGを前提としている。しかしながら、国内の公共ふ頭、欧州のアントワープ港等ではSCが好まれ、また最新のターミナルではRMGが導入され、自動化・無人化が進んでいる。

そこで次に、荷役方式の比較を行った研究について紹介する。文献8)では、2タイプの自動化ターミナル、Automated Lifting Vehicle（ALV）とAutomated Guided Vehicle（AGV）の性能比較を行っている。両者ともドライバーなしで稼働し、前者は岸壁クレーン下からの搬送とヤード内での荷役を行うことができ、後者は搬送のみを行う。そこで後者のヤード内荷役にはAutomated Stacking Crane（ASC）を用いて、それぞれシミュレーションモデルを構築している。一定期間における必要台数を比較し、ALVが少なく済むことを示している。文献9)では、Straddle Carrier（SC）とASCのそれぞれ荷役シミュレーションモデルを構築して有人と無人のシステムを比

較している。SCは荷役と搬送の両方を行うことが出来るが、ドライバーを必要とする。ASCはAGVと組み合わせることでターミナル内の搬送と荷役を無人化している。コンテナ幅方向での1ブロックサイズが現状規模であれば、ASCの方の作業時間が短くて済むが、それ以上の規模を想定するとSCの方が良くなるという結果が出ている。文献10)では、包絡分析法（Data envelopment analysis, DEA）を用いて荷役方式のタイプを比較しており、入力データとしてはターミナルの面積、最大水深、岸壁延長、岸壁クレーン、ヤード保管、搬送車両、取扱量等を用いている。門型クレーン（RTGとRMG）、SC、シャーシ方式、AGV、他で比較しているが、門型クレーンが最も良く、次にSCとなっている。いずれの論文においても、コンテナターミナル内のコンテナ配置については考慮していない。

したがって、本研究ではコンテナ配置の最適化を行い、荷役方式を比較することで、どのような港湾（混み具合などで表現）においてどの荷役方式が向いているのかを明らかにし、その議論ができる材料を提供できるモデルを構築するのが本研究の目的である。

3. 本問題の概要

(1) 本計画問題の考え方

本研究の評価指標に、文献5)から7)で使用したサービス時間の最小化に加え、保管スペース占有率の最小化を設けることにした。この理由について述べる。サービス時間最小化は、対象船舶の滞在時間が延長されると岸壁使用料も増加し、それ以降のスケジュールに影響することから時間は短い方が好まれる。またスペース占有率とは、同一面積、同一個数のコンテナを保管する場合、まとめて置くか、広範囲に置くかの保管状態を示す。一般に各ブロックに割り当てられた荷役機器の作業がスムーズに行われるよう、船1隻に積載予定のコンテナは複数ブロックに分けて保管される。ただし、利用ブロック数が多過ぎて広範囲になると、マシンのブロック間移動の増加や割当マシン数の増加が必要となる。そこで本研究では、複数コンテナグループで特定のブロックをシェアし、対象コンテナが使用しないスペースは輸出入等の対象としていないコンテナが利用できるスペースを確保するために、スペース占有率の最小化を設ける。

コンテナの取扱いは、文献2)から7)と同様に、仕向地別・船別に複数コンテナから成るコンテナグループとし、トランシップコンテナのみを対象とする。さらに、各コンテナグループを当該ターミナルまで運んできた船（移入に利用する船）と、一旦保管後、積む予定の船（移出に利用する船）は所与とする。全計画対象期間、例えば7日間を1日ごとに区切り、区切った後の期間にどの船が

到着するかで当該期間の対象船を決定する．船の到着時刻は出港時刻の計測のためには使用するが，保管場所決定のために，到着時刻そのものは採用しない．図-1には，時系列でのターミナル内のコンテナフローを示す．横軸に時間軸を取り，計画3期間目の途中までが示されている．船1から7までの到着を示し，紙面の都合上船1，5と7について説明すると，それぞれ期間1，2と2に到着し，期間1，2と3に出港している．船1と5のように到着する期間に出港するケースや，船7のように次の期間に出港するケースがある．船1から陸揚げされた船5と7に積載予定のコンテナを一旦ヤード内の空スペースに保管し，すでにヤード内で待機していたコンテナを積載して出港する．船5は陸揚げ作業後，船1が運んできたコンテナと既にヤードに待機済みのコンテナの両方を積載して出港する．船7は船5と同様である．

このように，当該船に積載予定のコンテナは既にヤードブロックに配置済みであることを前提として，問題を考える．保管スペースの空き状態は，時々刻々と変化するものであるが，ここでは当該期間内ではその変化を考慮せず，期間の初めで空き具合を把握し，その空きスペースに収まるようにコンテナを配置していく．したがって，期間の最後には空き状況の更新が必要であり，その処理の流れは次のようである．

ステップ 1: 初期状態として，ヤードの保管スペースには到着予定の船に積載するコンテナの一部が配置されている．対象期間 $t=1$ とする．

ステップ 2: 当該期間 t の寄港船のコンテナをヤードの空きスペースに割当てて．

ステップ 3: 各船の陸揚げ・船積み作業を実施し，出港時刻を求める．

ステップ 4: 期間 1 から t までに到着した船の中から，まだ滞在中で当該期間 t に出港する船を探す．

ステップ 5: ヤードの空きスペースを更新する．

ステップ 6: 当該期間 t が最終期間であれば，終了．そうでなければ， $t=t+1$ として，ステップ 2へ．

なお，船の出港時期は，当該船が到着した期間 t を含み，それ以降のいずれかの期間に出港する．出港時期が確定すると，空きスペースが発生するため，ステップ 5でその更新を行い，以降に到着する船が運んできたコンテナの配置スペースとして利用できる．

したがって，計画対象期間 t では空きスペースの中から，まず到着する船のコンテナを配置するが，配置後，次の期間の空きスペース確保のために，当該期間に出港する船を探す必要がある．これらは期間 1 から t までの間に到着した船のいずれかであるため，どの船が滞在中で，出港する船であるのかを調べる．

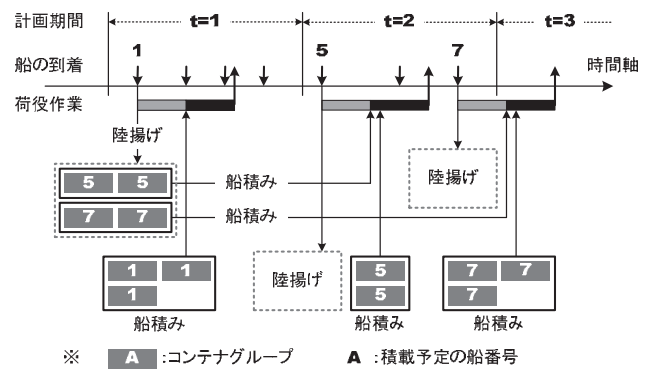


図-1 時系列でのターミナル内のコンテナフロー

(2) 本問題の定式化

本問題を数学モデルとして定式化するが，使用するパラメータと変数は以下のようである．

a) パラメータ

$t(=1, \dots, NT) \in T$ 計画期間
 $k(=1, \dots, NG_t) \in G_t$ 期間 t に到着し，陸揚げされるコンテナグループ番号
 $i(=1, \dots, NG) \in G$ 全期間でのコンテナグループ番号 ($NG = \sum_{t \in T} NG_t$, $G = \bigcup_{t \in T} G_t$ を意味する)

$j(=1, \dots, NV) \in V$ 全期間での船番号
 $e(= RTG, RMG, SC)$ 荷役方式のタイプ
 $l(=1, \dots, NL) \in Y_e$ 荷役方式 e でのコンテナブロック番号

U_{ij} コンテナグループ i を船 j が運んできたなら 1, そうでなければ 0 である 0-1 整数値
 L_{ij} コンテナグループ i を船 j に積むなら 1, そうでなければ 0 である 0-1 整数値

B_j 船 j の係留位置
 S_j 船 j の荷役開始時刻
 A_{jt} 計画期間 t に船 j が到着するとき 1, そうでないとき 0 である 0-1 の整数値

$C_{B,j}^e$ 船 j の係留位置から荷役方式 e のヤードブロック 1 までの移動に要する時間
 CP_l^e 荷役方式 e におけるヤードブロック l の保管容量
 F_t 期間 t の完了時刻
 NL_e 荷役方式 e での総ブロック数
 M 非常に大きな値

b) 変数

x_{il} コンテナグループ i 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_{it} 期間 t の開始直前の時点で，ヤードブロック l を占有するコンテナグループ数
 d_j 船 j の出港時刻

α_{ij} 船 j が期間 t に出港するとき 1, そうでないとき 0
である 0-1 の整数変数

c) 定式化

Minimize (f_1, f_2) (1)

$$f_1 = \sum_{i \in G} \sum_{l \in Y_e} \left\{ \sum_{j \in V} C_{B,j,l}^e U_{ij} + \sum_{j' (\neq j) \in V} C_{B,j',l}^e L_{ij'} \right\} x_{il} \quad (2)$$

$$f_2 = \max_{t \in T} \sum_{l \in Y_e} (y_{tl} + \sum_{i \in G} \sum_{j \in V} A_{ij} U_{ij} x_{il}) / NL_e \quad (3)$$

Subject to

$$\sum_{l \in Y_e} x_{il} = 1 \quad \forall i \in G \quad (4)$$

$$y_{tl} + \sum_{i \in G} A_{ij} U_{ij} x_{il} \leq CP_l^e \quad \forall t \in T, l \in Y_e \quad (5)$$

$$d_j = S_j + \sum_{i \in G} \sum_{l \in Y_e} C_{B,j,l}^e U_{ij} x_{il} + \sum_{i' (\neq i) \in G} \sum_{l' (\neq l) \in Y_e} C_{B,j',l'}^e L_{i'j} x_{i'l'} \quad \forall j \in V \quad (6)$$

$$d_j \leq F_{t-1} + M\alpha_{ij} \quad \forall t \in T, j \in V \quad (7)$$

$$F_{t-1} < d_j + M(1 - \alpha_{ij}) \quad \forall t \in T, j \in V \quad (8)$$

$$d_j \leq F_t + M(1 - \alpha_{ij}) \quad \forall t \in T, j \in V \quad (9)$$

$$F_t < d_j + M\alpha_{ij} \quad \forall t \in T, j \in V \quad (10)$$

$$y_{t+1,l} = y_{tl} + \sum_{k \in G_i} A_{kj} U_{kj} x_{kl} - \sum_{i \in G} \sum_{j \in V} \alpha_{ij} L_{ij} x_{il} \quad \forall t \in T, l \in Y_e \quad (11)$$

$$x_{il} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in G, l \in Y_e \quad (12)$$

$$y_{tl} \geq 0 \quad \forall t \in T, l \in Y_e \quad (13)$$

$$d_j \geq 0 \quad \forall j \in V \quad (14)$$

$$\alpha_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T, j \in V \quad (15)$$

d) 式の説明

式(1)は、式(2)と(3)の 2 目的最小化を示しており、式(2)は計画対象期間に到着するコンテナのサービス時間の総和の最小化、式(3)はヤードスペース占有率の最小化を示す。制約式(4)では、各コンテナグループはいずれかのブロックに必ず 1 回保管しなければならないことを意味する。式(5)は各ブロックには容量があり、コンテナグループの合計が容量を超えなければ、当該ブロックに同時に保管できることを保証する。式(6)では各船の出港時刻を定義している。

式(7)から(10)は出港時刻を表す変数 d_j と、期間 t で出港するか否かを表現する変数 α_{ij} との関係を示す。つまり、当該期間 t の完了時刻を F_t で表現すると、前期間 $t-1$ の完了時刻 F_{t-1} から F_t の間に当該船 j が出港するなら $\alpha_{ij} = 1$, それ以外なら $\alpha_{ij} = 0$ となる。つまり $\alpha_{ij} = 1$ のとき、式(8)より $F_{t-1} < d_j$, 式(9)より $d_j \leq F_t$ となり、前期間 $t-1$ の完了時刻 F_{t-1} から F_t の間に当該船 j が出港することを保証する。反対に、 $\alpha_{ij} = 0$ のとき、式(7)より $d_j \leq F_{t-1}$, 式(10)より $F_t < d_j$ となり、前期間 $t-1$ の完了時刻 F_{t-1} より前、または F_t より後に当該船 j が出港することを意味する。

また式(11)は、当該期間 t における初期状態でのスペースの空き状況更新後を示し、次期間 $t+1$ の初期状態を定義する。

4. 解法

本研究では、遺伝的アルゴリズム (GA) を利用して近似解を求めることにした。本節では、解の表現方法、多目的GAの処理、ならびに遺伝演算について述べる。

(1) 解の表現方法

図-2 に解の表現事例を示す。複数期間の計画を行うが、当該事例では 2 期間分を示す。コンテナグループ 1 ~ 10 が期間 1 に、11 ~ 20 が期間 2 に到着することを意味しており、それらの移入に利用する船番号をそれぞれ 1 ~ 4, と 5 ~ 8 で示している。また各コンテナグループは一旦ターミナル内のいずれかのヤードブロックに保管された後、所与の移出に利用する船に積載され、次の港に向けて出発する。なお、ある期間に到着するコンテナが同一期間に到着する別の船に積載されるケースはほとんどないため、次の期間以降にやって来る船に積載することとし、本事例においても、期間 1 では船番号 5 以降、期間 2 では船番号 9 以降が移出に利用する船として与えられている。このように、各コンテナグループには移入と移出に利用する船が事前に分かっており、各コンテナグループを保管スペースの容量制約を満足するよう、ヤードブロックにランダムに割当てて。本事例では、コンテナグループ 1 と 9, 5 と 7 がそれぞれブロック 6 および 1 に保管されることを意味する。同様に期間 2 では、コンテナグループ 11 と 17, 15 と 16 がそれぞれブロック 1 および 5 に保管される。

(2) 多目的GAの処理

本問題は 2 目的問題であり、時間とスペースの両者を同時に最小化することは容易でないため、多目的GAを用いる。使用するアルゴリズムは、文献 11) で提案したものであり、文献 12) で提案された並列選択と文献 13) で提案されたパレート層という概念を組合せたものである。

まず並列選択とは、次世代の個体群を目的関数の種類と同数の部分個体群に分割し、目的関数ごとに部分個体群を形成することを指す。次にパレート層とは図-3 に

	1										2									
コンテナグループ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
移入に利用する船	1	1	1	2	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	6	7	7	8	8	8
移出に利用する船	5	7	7	5	5	6	7	7	5	10	11	9	12	10	12	13	9	11	9	11
ヤードブロック	6	8	2	7	1	12	1	3	6	11	1	8	2	7	5	5	1	3	6	10

図-2 個体表現事例

示すように、親と子を合わせた解集合から非劣解を見つけ、それらを第1層とする。第1層の解を除いた残りの解集合から、さらに非劣解を見つけ、これを第2層とする。このように、各層に含まれる解集合の合計が各世代の個体群サイズを満たすまで繰り返し、層番号によってランク付けするものである。そこで本研究では、まず親と子から成る解集合から非劣解を見つけ、残りの中からさらに非劣解を見つけて行くことで、パレート層を形成する。次に各パレート層内で並列選択を行って、個体レベルでランク付けを行い、ランクに基づいて適応度への変換する。具体的な方法は以下のようなものである。

ステップ1: ランク $r=1$, パレート層 $l=1$, 初期の解集合を $S_l = POP_t$ (世代 t での親と子の個体群) とする。

ステップ2: 集合 S_l より, l 番目のパレート層にある非劣解集合 PS_l を見つける。

ステップ3: l 番目のパレート層にある個体群を目的関数の種類 $|L|$ 分に均等割りになるよう, 部分個体群 $SS_l (j=1, \dots, |L|)$ を作る。

ステップ4: 各部分集合内で目的関数値の昇順に個体を並べ替え, $k=1$ とする。

ステップ5: もし $r > \text{個体群サイズ}$ なら, 個体へのランク付けを終了。もし $k > |SS_l|$ なら, ステップ7へ。そうでなければ, k 番目の個体にランク番号 r を割当てる。

ステップ6: $k=k+1$, $r=r+1$, ステップ5へ。

ステップ7: 集合 $S_l = S_l - PS_l$, $l=l+1$ とする。もし集合 $P_l = \phi$ なら, 個体へのランク付けを終了。そうでなければ, ステップ3へ。

なおランク r の個体の適応度 $fitness$ は, 文献(13)で提案されたものを用いる。

$$fitness(\text{個体}(r)) = q(1-q)^{r-1} \quad \forall r \in Rank \quad (16)$$

ここでパラメータ q は, $0 < q < 1$ で設定するが, 本研究では0.5とする。

(3) 遺伝演算

選択 : トーナメント戦略+エリート保存戦略

交叉 : 部分一致交叉 (詳細は文献 14)を参照)

突然変異: 変異率により変異を起こすと判断されたときの処理は以下に示す。

任意にコンテナグループ番号を1つ選択し, その保管場所を他のブロックにランダムに指定する。当該ブロックの容量制約を満足していれば採用し, そうでなければ制約を満足する保管場所が見つかるまで探す。次に当該コンテナグループの計画期間より後の計画期間に処理を行うコンテナに対して, 今回の保管場所変更に伴って,

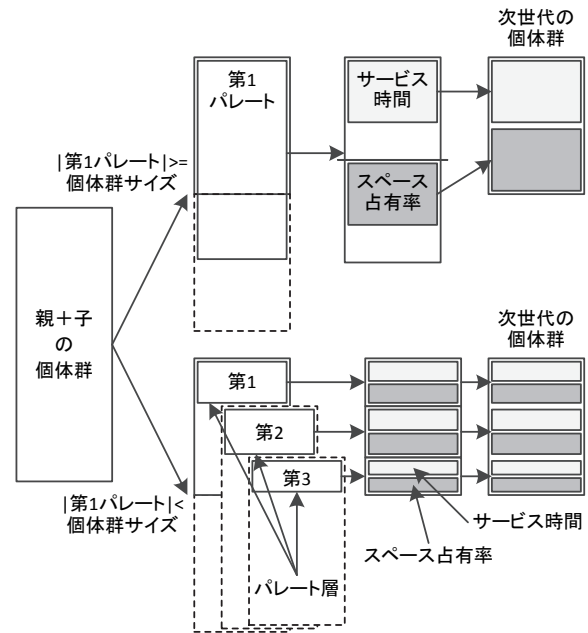


図3 並列選択とパレート層による次世代の個体群

保管容量制約を満足しないケースが出る可能性がある。そこで, 突然変異で保管場所を変更したコンテナグループより後の計画期間に処理されるコンテナグループに対して, 制約を満足するための調整を行う。

なお予備実験の結果, GA パラメータである個体群サイズは100, 突然変異率は0.09, 世代数1000とする。

5. 数値実験

(1) 使用データの概要

全対象期間を1週間(7日間)とし, その間にやってくる船を対象とする。ターミナルの規模は, 400m×4バース=1,600mの直線バース, 奥行き400mとする。また各船の到着分布は, 平均到着間隔3, 4と5時間の指数分布とし, それぞれ乱数の種により10パターン設定する。また各船の荷役コンテナグループ数も10パターン設定し, 荷役時間計測に利用する。係留位置は, 各バースの中央に1隻のみ係留可能とするケース(離散型), およびバースの境界関係なく細かい位置を指定するケース(連続型)の2種類とする。つまり, 船の到着3×10パターン, 荷役個数10パターン, 係留パターン2種類を組み合わせた合計600ケースの計算結果について, 荷役方式の違いで比較を行う。

(2) 荷役方式別のレイアウトと荷役時間データ

各荷役方式におけるターミナルレイアウトは図4を仮定し, 保管に要する面積は荷役方式間で同一とするが, 高さ方向はSCでは異なることから, 4バース分の総ブロック数と各ブロック内での容量(コンテナグループ単位)

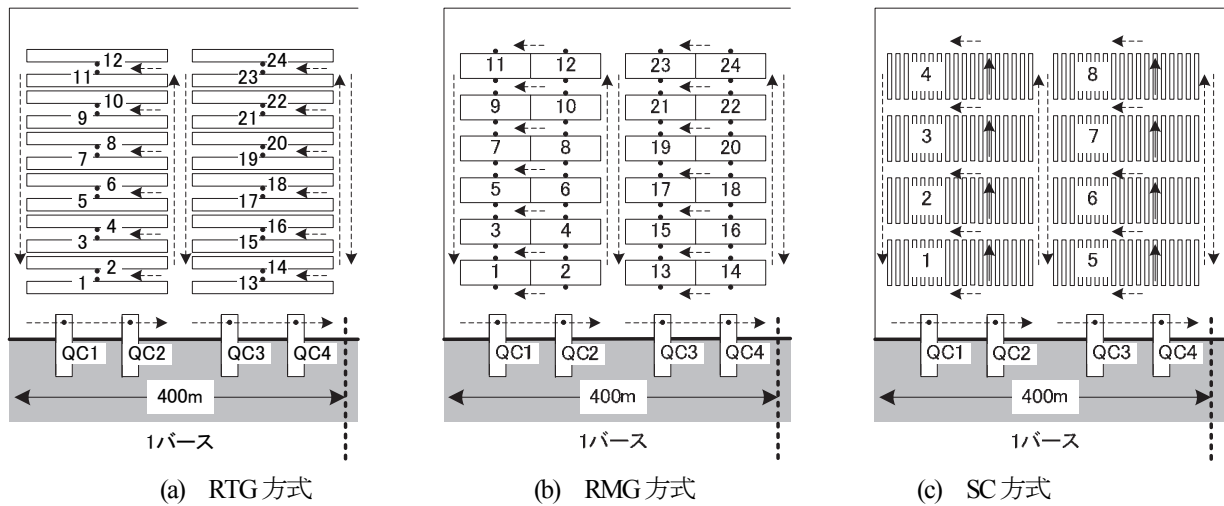


図4 1バースにおける荷役方式別のコンテナブロック配置

はRTG, RMG, SCそれぞれ順に4×24と5, 4×24と5, 4×8と10とする。したがってSCの総容量は他より小さい。

保管容量以外に、岸壁とヤードエリア間の作業時間に荷役方式の違いを反映させるため、既存研究¹⁾で提案した荷役時間推定モデルを利用する。モデル構築の詳細手順は文献1)を参照してもらいたい。以下ではモデル構築に使用したデータがコンテナターミナルの本船荷役シミュレーションの計算結果であるため、本船荷役シミュレーションのモデル化範囲と荷役方式の区別、提案した時間推定式を以下に示す。

a) 荷役シミュレーションのモデル化範囲

本モデルでは本船荷役のみを対象とし、陸側の荷役は対象としない。つまり船の到着、係留中の荷役作業(QCによる荷役、ヤードトレーラーによる搬送、ヤードクレーンによる荷役)、当該船の出港までを表現し、与えた計画期間にやって来る複数船を対象とする。文献1)で示したように、シミュレーションモデルの現状再現性は確認済みである。

また図4の矢印は、ヤードトレーラーやSCがコンテナの搬送を行う経路を示す。長方形がコンテナブロックを示し、各ブロックに1つずつ付した黒丸をコンテナの受け渡し地点とする。なおRTGはコンテナブロックの片側、RMGは両側で荷役を行えるため、後者の方が早く荷役が行えそうであるが、スプレッダーが各マシンに1つしかないため、運用上はRTGとほとんど変わらないが、岸壁に近いブロックではRTGより遠回りしなければならないことが分かる。

b) 荷役時間推定モデル

1 コンテナグループの荷役に要する時間長に影響すると思われるのは、当該コンテナグループ内の荷役コンテナ数、係留バースと荷役コンテナの蔵置位置間の移動距離である。本来、ヤードブロック内に複数のコンテナ

が保管され、それらの位置は異なることから、厳密には移動距離はコンテナ毎に存在する。しかし、一般にその場所がターミナル内の同一バース背後の区画でまとめて保管されることから、船別・QC別でまとめて扱われるコンテナの移動距離はそれらの平均値を用いる。

$$C_{B,j}^e = e^{0.617} a_1^{0.996} e^{0.332 a_2} a_3^{-0.901} e^{-0.149 a_4} e^{-0.157 a_5} \quad (17)$$

ここで、各変数の意味は以下の通りである。

- $C_{B,j}^e$ 船jの係留位置から荷役方式eのヤードブロックlまでの移動に要する時間(時間)
- a_1 荷役コンテナ数(×100個)
- a_2 船jの係留位置と荷役方式eのヤードブロックl間の移動距離(km)
- a_3 QCの投入基数(ここでは1とする。)
- (a_4, a_5) 0-1ダミー変数(RTGモデルなら(1, 0), RMGモデルなら(0, 1), SCモデルなら(0, 0)とする)

式(17)は本船が入港してから荷役を終了し、出港するまでの時間を計測できるものとして開発したが、QC投入台数を1基にすることで、QC1基で荷役する複数コンテナの作業時間が求められることを既往の研究で明らかとしている。つまり、式(17)の寄与率は0.98以上であり、有意水準0.05におけるF値ならびに各変数のt値はいずれの荷役方式に対しても、統計的に有意であることが示された。そこで上記の式を用いて、コンテナ配置計画に荷役方式の区別を反映させることにする。

(3) 計算結果

本問題は2目的問題であり、時間とスペースの両者を同時に最小化することは容易でない。また平均到着間隔と荷役個数を組み合わせて100個の問題を用意したが、単純に平均値をとって傾向分析をすることも難しい。そこでまず、ある1ケースに対する計算結果をみる。

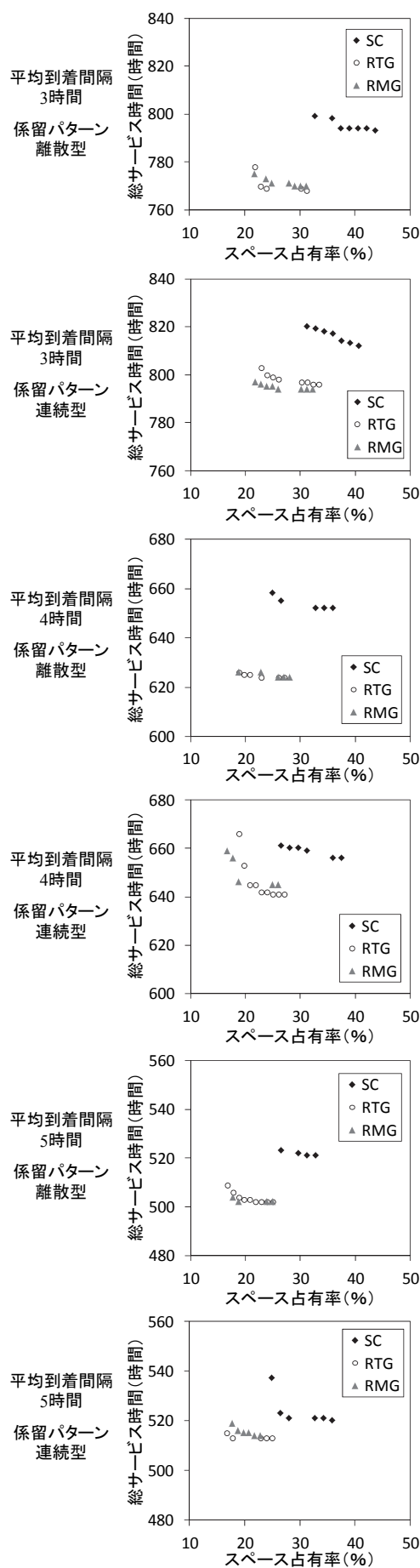


図-5 ある1ケースでのパレート解集合

図-5に上から順に平均到着間隔×係留パターンの組合せで、3時間×離散型、3時間×連続型、4時間×離散型、4時間×連続型、5時間×離散型、5時間×連続型を示す。各グラフの横軸はスペース占有率、縦軸は総サービス時間を示し、荷役機器別に得られたパレート解を示す。

いずれのケースも、SCによる解が他の荷役機器に比べてサービス時間・スペース占有率共に長く・高くなっている。RTGとRMGは近い値を示しており、解の個数は異なるが、パレート解集合の取りうる範囲はほぼ同等である。しかしながら、係留パターンが連続型の場合にはRTGとRMGに差があり、3時間ではRMGが良く、4時間では解集合内の一方でRTG、他方でRMGが良くなっている。

次に、荷役機器別に得られたパレート解集合を合わせて、その中から、さらに非劣解を（真のパレート解と呼ぶ）を求めた。この真のパレート集合に含まれる解がどの荷役機器によるものかを調べ、そのケース数をカウントしたものが図-6である。到着間隔で表現する混み具合に関わらず、RTGのみが約半数を占め、3分の1がRTGとRMGを含むもの、続いてRMGのみが1割弱となっている。SCのみはほとんどなく、他の荷役機器にSCを含むケースが若干1ヶ台である程度である。したがって、RTGがいずれの係留パターン、混み具合において良いケースが多い。RMGがRTGより良いケースが多いのは比較的混み合うときであり、連続型係留でそれが顕著である。またSCが他より良くなるケースは1ケースのみであったが空いているときの離散型係留の場合である。ただしSCはそれが他より良くなるというよりはむしろ、他と

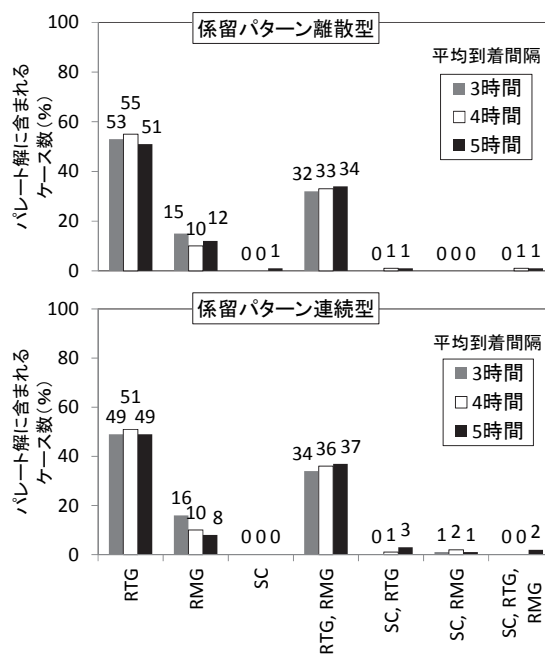


図-6 真のパレートに含まれるケース数

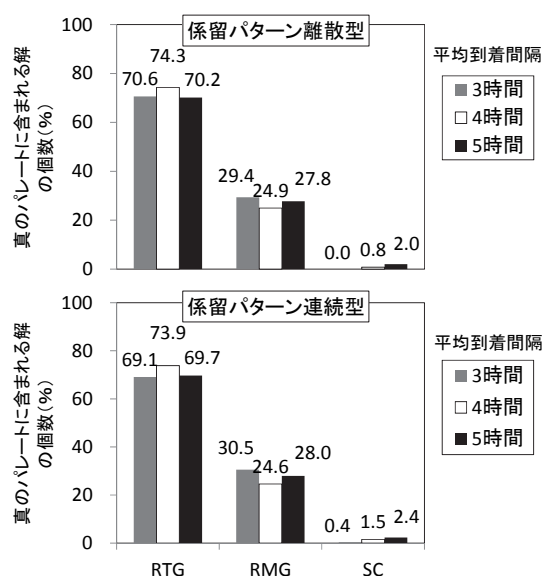


図-7 真のパレートに含まれる解の個数

同等レベルの評価になるケースが多く、連続型係留でそのケースが多いと言える。

先の図-6は真のパレートに各荷役機器の解を含むかどうかでカウントしたが、例えば、RTGによる解を含む場合、解集合に含まれる解の個数のうち、何個がRTGであるのかという、解集合を占める割合(%)は示していない。そこで解の個数から見た、各荷役機器による解が解集合に占める割合を示したのが図-7である。いずれも100個の問題を解いているため、その平均値を示す。RTGは解集合のうち7割程度を占め、続いてRMGが4分の1〜3割を占めている。SCは混み具合で若干変動があるものの、ゼロ〜2%程度に過ぎず、ほとんど解として含まれるケースがないのがわかる。解の個数が多いということは、ユーザに提供できるより良い代替案が多いことを指し、RTGによるものが最も多いことがわかった。

6. おわりに

本研究では、荷役方式の違いを通路設定の仕方と保管容量で表現し、どのような状況下のときに、どの方式が効果が高いかをみた。評価指標には総サービス時間とスペース利用率を用いた。荷役方式別に得られたパレート解を合成し、これから、さらにパレート解を見つける処理を行うことで、荷役方式間の比較を行った。

個々の問題で得られたパレート解では、RTGとRMG間に大差は見られなかった。しかし、真のパレートに含まれる解から、以下のことが明らかとなった。混み具合や係留パターンの違いで比較すると、いずれのケースもRTGが最も良い結果が得られた。またRMGの場合は、RMG単独より、RTGとRMGが含まれるケースが多くあったことから、ある状況下ではRTGとRMGが同レベル

のサービスが提供できることがわかった。またSCについては、当該研究の条件下では良いと評価できるケースが非常に少なかった。

この結果は、国内外でRTGが多く採用されている理由を裏付けていると言える。しかしながら、SCが導入される効果が見い出せなかった点については、今後、海外のターミナル事情を再度検討し、条件整理を行って実験を行う必要がある。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金(21710153)および科学研究費助成事業(学術研究助成基金助成金)(23710169)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 西村悦子, 陳麗榮: 荷役方式を考慮した本船と岸壁クレーンの荷役時間推定モデル構築に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5 (土木計画学研究・論文集第 28 巻), pp. I_869-I_878, 2011.
- 2) Kim, K. H. and Bae, J. W.: Re-marshaling export containers in port container terminals, *Computers & Industrial Engineering*, Vol.35, pp.655-658, 1998.
- 3) Kim, K. H. and Park, K. T.: A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers, *European Journal of Operational Research*, Vol.148, pp.92-101, 2003.
- 4) Zhang, C., Liu, J., Wan, Y. W., Murty, K. G. and Linn, R. J.: Storage space allocation in container terminals, *Transportation Research Part-B*, Vol.37, pp.883-903, 2003.
- 5) Nishimura, E., Imai, A. and Janssens, G. K.: Container storage and transshipment marine terminals, *Transportation Research Part E*, Vol.45, pp.771-786, 2009.
- 6) Nishimura, E. and Sunagawa, J.: Container storage problem at terminals where the mega-containership calls with multiple QCs assigned to a feeder ship, *Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation and Logistics (T-log2010)*, available in CD-ROM, 2010.
- 7) 西村悦子, 今井昭夫: 超大型船寄港ターミナルでのヤード配置計画に及ぼすコンテナ取扱量の影響, 土木計画学研究・論文集, Vol.27, No.4, pp.795-802, 2010.
- 8) Vis, I. F. A. and Harika, I.: Comparison of vehicles at an automated container terminal, *OR Spectrum*, Vol.26, pp.117-143, 2004.
- 9) Vis, I. F. A.: A comparative analysis of storage and retrieval equipment at a container terminal, *International Journal of Production Economics*, Vol.103, pp.680-693, 2006.
- 10) Bichou, K.: An empirical study of the impacts of operating and market conditions on container-port efficiency and benchmarking, *Research in Transportation Economics*, Vol.42, pp.28-37, 2013.
- 11) Nishimura, E., Imai, A. and Papadimitriou, S.: Multi-objective berth allocation in a multi-use container terminal, *Proceedings of the 9th World Conference of Transportation Research*, CD-ROM, 2001.

- 12) 玉置久, 森正勝, 荒木光彦: 遺伝的アルゴリズムを用いたパレート最適解集合の生成法, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.8, pp.1185-1192, 1995.
- 13) Hyun, J. C., Kim, Y. and Kim, Y. K.: A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines, *Computers & Operations Research*, Vol.25, No.7/8, pp.675-690, 1998.
- 14) Nishimura, E., Imai, A. and Papadimitriou, S.: Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithm, *European Journal of Operational Research*, Vol.131, pp.282-292, 2001.

(2013. 2. 25 受付)

COMPARISON OF HANDLING EQUIPMENT TYPE BY OPTIMIZING CONTAINER ARRANGEMENT

Etsuko NISHIMURA and Akio IMAI

The marine container terminal is operated by various types of handling equipment. The relevant terminal layout is suitable to the equipment type. We focus on the type of handling equipment assigned to the terminals in the world. We consider the effect of equipment type and layout on the container arrangement. The differences among equipment types are following: (1) the service time depends on the path location for yard trailer or straddle carrier movement, (2) the total capacity of container storage is determined by the size and mobility for equipment. Therefore, we set two objective functions as minimizing the total service time and minimizing the space utilization to this problem. We obtain the solution set consisted by multiple non-dominated solutions. In order to compare among types of handling equipment, we find the true Pareto set from the combined set by the solutions obtained in the terminal which each equipment type is assigned. We find which equipment type does the non-dominated solution included in the true Pareto set obtains from. From the computational results, the non-dominated solutions included in the true Pareto set are independent on the ship arrival pattern and the pattern of ship berthing locations, those are more solutions obtained by RTG. And among them, the service levels with around half of solutions obtained by RTG are equal to those with solutions obtained by RMG. However, there is a little solution obtained by SC in the true Pareto set.