

超大型コンテナ船対応港湾におけるヤードトレーラーのルーティングに関する研究*

Yard-trailer Routing at the Container Terminal for Mega-containership

西村悦子**、今井昭夫***、村井良行****

By Etsuko NISHIMURA, Akio IMAI and Yoshiyuki MURAI

1. はじめに

近年、外航船社の吸収合併や協調配船が進んでおり、これを背景に規模の経済性を目的としたコンテナ船の大型化が進んでいる。この大型化がどこまで進むかは明らかではないが造船技術上では不可能ではないと言われている。したがって、超大型コンテナ船の就航可能性に影響を与える要因としては、当該船を満載にするだけの貨物を集積できるかと、仮に貨物が集まっても、超大型船の寄港地が大幅に減少して、一度に取り扱われる貨物量が膨大になることが予想されることから、2次輸送への接続をうまく行うことが重要となる。

そこで本研究では、特にコンテナヤードのオペレーションに着目し、トランステナー方式で用いられるヤードトレーラー（従来型トレーラー（以降、TR と呼ぶ）、AGV、マルチトレーラー（以降、MTR と呼ぶ））を効率的にコントロールする方法を提案する。

寄港頻度が少ないと想定される超大型船の係留バースには、係留岸壁の有効利用の観点から、当該船が寄港していない期間に他船型船の利用も認めるべきである。したがって、本研究では船の係留位置が寄港毎に決定されるマルチユーザーミナル（MUT）での運用を考える。MUT では、船の係留バースの背後ヤードに当該船舶の荷役コンテナが蔵置されるとは限らないため、担当ガントリークレーン（GC）と蔵置位置の距離が離れて、荷役時間に影響を与える可能性がある。単純にこの問題を解決するには、トレーラーの台数を増せばよいが、トレーラーヘッド数が増えてドライバー数も増えるため、人件費増につながる。したがって、本研究ではなるべくトレーラー台数を増やさないよう、特定 GC に割当てず、複数の GC に複数のヤードトレーラーを割当てる動的な運用を考える。

（1）現状の運用形態

そこでまず、現在国内で使用されている TR と海外ではすでに使用されている MTR の現状の運用形態について以下に示す。

TR : 4 台が特定の GC1 基に割当てられ、岸壁 - 蔵置ヤード間を往復輸送する。

MTR : トレーラーヘッド 1 台が複数の連結シャーシを牽引して、ヤード内を巡回し、担当する GC に戻る。基本的に、従来型と同様の運用形態である。

（2）既往の研究

次に、コンテナターミナルの荷役機器の作業シーケンスに関する研究について述べる。

トランステナーの作業シーケンス²⁾

AGV¹⁾、ストラドルキャリア^{3), 6)}の作業シーケンス文献 1) と 6) は Dial-a-Ride 問題、つまりすべての地点を 1 つのループで訪問しなければならない、という制約の元で問題を扱っており、あまり現実的ではない。また文献 3) では、総処理時間の最小化で計画を行っているが、コンテナを受け渡しする場所での待ち時間を含めた所要時間は既知としており、現実的ではない。

TR の作業シーケンス^{4), 5)}

本船荷役は積み作業だけをモデル化しているもの⁴⁾、コンテナサイズを考慮せず、1 トレーラーに 1 コンテナのみ積載可能であるもの⁵⁾がある。

したがって、コンテナサイズや貨物の複数積載可能を考慮したものはない。

2. ルーティング計画の概要

図 1 は横軸に連続 3 バースが供用され、縦軸が時間軸を示し、船 1 と 4 がバース A に、船 3、5 と 7 がバース B に、船 2 と 6 がバース C に係留され、バースを占有する状態を示す。この図のように、時間軸に沿ってターミナル全体の作業状況は変化していくが、本ルーティング計画はある作業組み合わせが変化した直後に計画し、次の変化まで同じルーティングで運用を行う。例えば、ルーティング計画の時点では、バース A で船

* キーワード : 港湾計画, ターミナル計画

** 正会員 工博 神戸商船大学助手 附属船貨輸送研究施設
(〒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@cc.kshosen.ac.jp)

*** 正会員 工博 World Maritime University & 神戸商船大学,
Professor (Citadellsvagen 29, PO Box 500, S-201 24 Malmö,
Sweden, 〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1,
E-mail: akio.imai@wmu.se, imai@cc.kshosen.ac.jp)

****非会員 中部工業株式会社

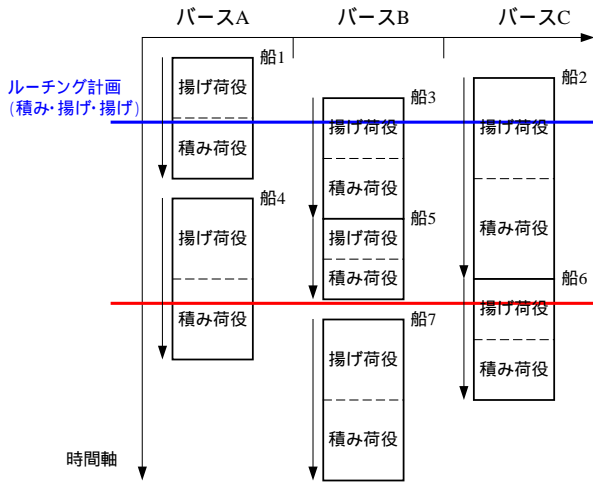


図1 ルーティング計画の概要

1 が揚げから積み作業に変化している。そこでこの時点で計画を行うが、このときバース A、B および C がそれぞれ積み作業、揚げ作業および揚げ作業という組み合わせで、ヤード内のコンテナ搬送の往路が決まり、これにより計画を行う。また計画の時点では、バース B で船 5 が積み作業を終了したため、作業なしとなり、バース A が積み作業、B が作業なし、C が揚げ作業という組み合わせで計画される。

3. 本問題の定式化

コンテナを受け渡しする場所 (GC 下、トランステナー下) を 1 つのノードとして捉えると、これらを巡回するルーティング問題として本問題を扱うことができる。以下に評価関数、前提条件および定式化を示す。

(a) 目的関数：総走行距離の最小化

(b) 前提条件：各クレーンの作業状態は既知、各コンテナの目的地は既知、巡回路は複数形成可能、積載量がトレーラー容量を越えない、当該船舶に対し、揚げコンテナなら GC を先に訪問し、それからヤードへ搬送する。積みコンテナならヤード内の蔵置位置を先に訪問し、最後に GC の所に戻る。

コンテナターミナルでヤードトレーラーをコントロールするには、最低限、上記のことを満足しなければならない。したがって本問題は、先行順序制約および容量制約のあるルーティング問題として定式化する。

(c) 定式化

本問題は式(1) - (8)のように定式化される。ここで、 $i, j \in P$: 地点番号 (P : トレーラーが訪問する地点集合)

$k \in H$: トレーラー番号 (H : トレーラーの集合)

$Q \subset P$: GC 下の荷役地点集合

$Q^D \subset Q$: 揚げ作業中の GC 下の荷役地点集合

C_{ij} : 地点 $i-j$ 間の距離

S^i : 当該 GC 下の荷役地点 i で揚げ積みするコンテナが蔵置される地点の集合

V^i : 地点 i で荷役されるコンテナ数 (地点 i でトレーラー上に積むなら正、降ろすなら負で表現する)

U^k : トレーラー k の積載容量

x_{ijk} : トレーラー k が地点 i から j へ走行するとき 1、そうでないとき 0 である整数変数

y_{ik} : 地点 i のコンテナがトレーラー k によって搬送されるとき 1、そうでないとき 0 である整数変数

w_{ik} : 地点 i を訪問する直前のトレーラー k 上のコンテナ数

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{k \in H} C_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{i \in P} \sum_{k \in H} x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in P \quad (2)$$

$$\sum_{j \in P} \sum_{k \in H} x_{ijk} = 1, \quad \forall i \in P \quad (3)$$

$$w_{jk} = \begin{cases} 0, & \forall j \in Q^D, k \in H \\ \sum_{i \in P} (w_{ik} + V^i) x_{ijk} \leq U^k, & \forall j \in P / Q^D, k \in H \end{cases} \quad (4)$$

$$y_{ik} = \sum_{i \in P} x_{ijk}, \quad \forall i \in P, k \in H \quad (5)$$

$$\sum_{k \in H} k y_{ik} = \sum_{k \in H} k y_{jk}, \quad \forall i \in Q, j \in S^i \quad (6)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in P, k \in H \quad (7)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in P, k \in H \quad (8)$$

式(1)は総走行距離の最小化を示し、制約式(2)と(3)は各地点には 1 回のみ訪問することを意味する。式(4)は当該トレーラー k が地点 j に訪問するときその直前のトレーラー上のコンテナ数がトレーラーの容量を越えないことを意味し、揚げ作業中のクレーンに訪問する直前は必ず 0 である。式(5)は地点 i を訪問するのは当該トレーラー k のみであることを示し、式(6)は当該 GC の荷役地点 i とそこで揚げ積みするコンテナの搬送先もしくは搬送元の地点 j を担当するトレーラー k は同一でなければならない。

4. 解法

本問題は容量制約と先行順序制約のあるルーティング問題である。この種の問題は多項式時間の計算量で解けることが明らかとなっておらず、適切な計算時間で最適解を求めることが困難な問題として知られている。そこで、近似解法を用いるが、本問題を考える上で、各荷役地点で待ち時間を含めて荷役に要する時間

を予測することは困難である。したがって、複数の解を最終的に得ることのできる遺伝的アルゴリズム (GA) を用いれば、複数の代替ルートが得られ、その中からそのとき最適と思われるルートを選択すればよいため、本研究では GA を用いた近似解法で検討する。

ここで GA での個体表現方法を示す。地点を遺伝子で表現し、その並びを訪問順、その他の制約 (積載制限等) を満足しない地点は飛ばして訪問すると解釈する。MTR に最大 3 個コンテナを積載でき、3 基の GC を対象とする事例を用いて個体表現とルーティングの解釈の仕方を図 2 に示す。

(a) 仮定: 地点 1、5 と 9 を GC 下、その他をヤード内のコンテナの蔵置位置とし、順に揚げ、積み、積みであったとする。このとき、地点 1 で揚げたコンテナは地点 2、3 と 4 へ搬送、地点 5 で積まれるコンテナは地点 6、7 と 8 から搬送、地点 9 で積まれるコンテナは地点 10、11 と 12 から搬送されるとする。

(b) 訪問順の制約: 地点 1 は地点 2、3 と 4 より先に、地点 6、7 と 8 は地点 5 より先に、地点 10、11 と 12 は地点 9 より先に訪問されなければならない。

以上のことを満足するように個体表現を行ったのが図 2 である。地点番号の下の貨物量はその地点でトレーラー上のコンテナがどれだけ増減するかを示す。左から貨物量の制約が満足しないものは飛ばして順路を決めると、巡回路 1 となり、残りをまた左から順に見ていき、残りを巡回路 2 としている。

5. 適用事例

提案する方法の有効性を示すために、問題の規模等、表 1 に示すようないくつかのパラメータ設定を行って、数値実験を行う。

(1) 生成データによる傾向分析

表 1 に示す各項目の組み合わせで、各ケース 10 個の問題を解き、それらの平均を示す。

容量 1 個の場合では当該 GC の担当するヤード内の地点は 1 つとなり、コンテナ積載での移動 (往路) を 1 ノードとして捉え、これを訪問する空荷での移動距離最小化問題として表現でき、割当問題と同様の定式化が可能となる。したがって、容易に最適解を得ることができることから、図 3 には最適解による総走行距離と提案する方法によるそれとの差を示す。ケース D や H のように、パース数やクレーン数が多く、問題の規模が大きくなると差が大きくなり、解の精度が



図2 個体表現方法

表1 数値実験の概要

パース数: 4 パース、6 パースの連続パース
 トレーラーの容量: 6 個、3 個、2 個、1 個の 4 ケース
 各パースのクレーン数: 1 基、2 基、3 基の 3 ケース
 コンテナの蔵置位置パターン: ターミナル全体でランダムに置く場合 (パターン 1)、いずれかのパース背後にまとめて置く場合 (パターン 2) の 2 ケース

計算ケース	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
供用パース数	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6
蔵置パターン	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
GC 数	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3

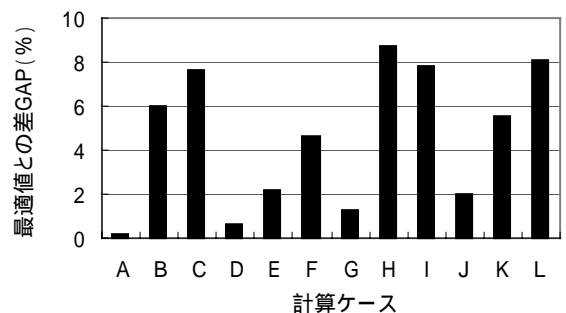


図3 容量 1 個の問題における最適値との差

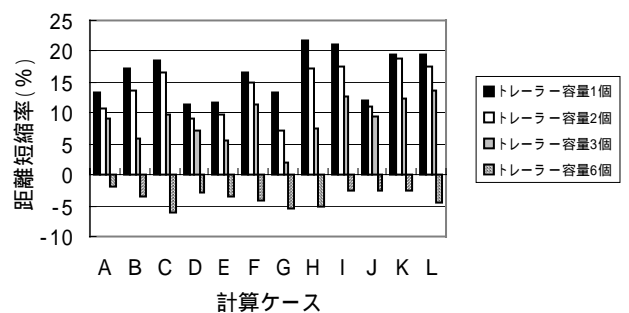


図4 生成データでの距離短縮率

悪くなる傾向がある。

図4は従来型運用を基準に、提案する方法でどれだけ総走行距離を短縮できるかを距離短縮率として示す。どのケースも容量1個のときに10~20%短縮され、容量が増えればその効果は小さいが、容量6個のときには反対に距離が長くなることもある。

図5は異なる荷役個数の超大型船が寄港するとき、他船型船も含めた計画対象船舶の荷役時間 (= 距離 / TR の平均走行速度 1.5 (km/h)) の変化を調べたものである。なお、船A、B、CおよびDのカッコ内の個数は荷役個数を示し、順にGC投入台数は3、4、6および6基とする。これは文献7)より「コンテナ船の大型化傾向は全長の増加率より、船幅の増加率が高いことから、6台程度にするのが限度。」とされているためである。また現実的には、超大型船が船AやBのような個数で荷役することは考えられないが、荷役個数の変化による他船型船(荷役個数1000個未満)への影響をみるために以上のケースも対象とした。

容量2のTRをGC1基あたり4台投入した時の結果であるが、超大型船はどのサイズでも提案する方法を使えば、時間短縮につながっている。%は現状の運用形態と比較した時間短縮率を示しているが、4500個荷役する場合が最も効果が高く、9000個になればその効果も薄れることがわかる。これは、GC投入台数に限界があるため、計画スパン数が単に増えただけであることが原因と言える。したがって、GC投入台数を増やす工夫ができれば、9000個以上の船に対する提案する方法の効果も期待できる。また、他船型船については超大型船のサイズ変化に関わらず、ほぼ一定の荷役時間となっており、ばらつきも同様である。

(2) 実績データによる効果分析

東京港で得られた供用2バースの実績データを用い、生成データによる結果と同様の結果が得られるかを検証する。2隻分の荷役コンテナのヤード内蔵置位置、船内格納位置から移動距離データを抽出し、これを入力データとして提案する方法で得られた距離をTRの平均走行速度1.5km/hより時間に変換して、現状もしくは提案する方法での荷役時間、GCを待たせないために必要なTR台数を算出したのが、図6である。

荷役時間、必要台数とも提案する方法を用いれば、短縮・減少傾向を示している。両船の時間短縮効果の違いに関して、船AMの荷役コンテナは全てが当該船の係留位置に近くに置かれているのに対し、船ARの

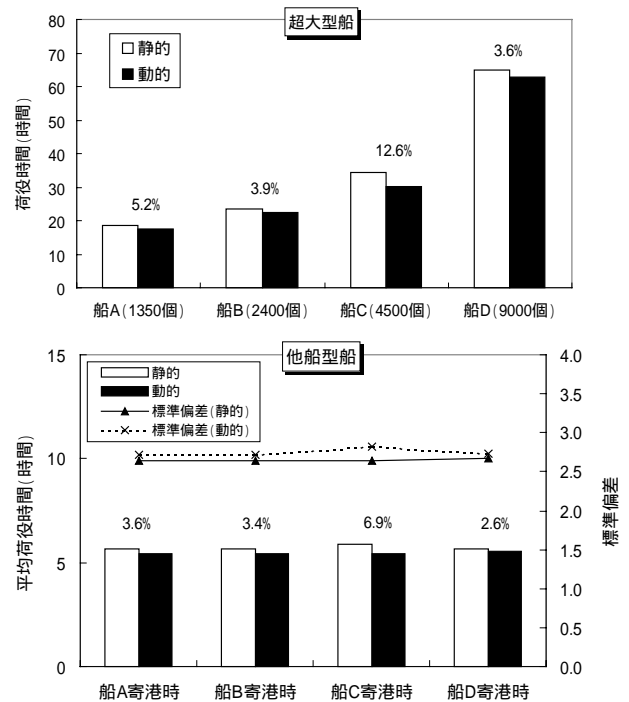


図5 異なるサイズの超大型船寄港時における各船の荷役時間

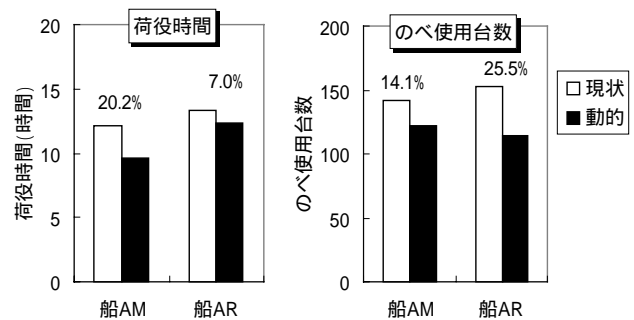


図6 実績データでの運用方法改善による影響

荷役コンテナはターミナル全体に広く蔵置されていたことから図6のような違いが出たと言える。

以上の結果は、実際に使用されている容量2個のTRによるものである。生成させたデータの計算ケースで最も近いのは4バースのケースBとEであり、それぞれ距離短縮率は約13%、9%であることから、生成データによる傾向は現実の蔵置パターンでも言える。

参考文献

- 1) Evers, J. J. M. and Koppers, S. A. J., Automated guided vehicle traffic control at a container terminal, Transportation Research Part A, Vol.30, No.1, 21-34, 1996.
- 2) Kim, K. H. and Kim, K. Y., An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals, Transportation Science, Vol.33, No.1, 17-33, 1999.
- 3) Kozan, E., Optimizing container transfers at multimodal terminals, Mathematical and Computer Modeling, No.31, 235-243, 2000.
- 4) Marius Sinclair et al., Combined routing and scheduling for the transportation of containerized cargo, Operational Research Society, Vol.38, No.6, 487-498, 1987.
- 5) 西村, 今井, マルチユーズコンテナターミナルにおける動的ヤードオペレーション, 土木計画学研究・論文集, No.17, 721-728, 2000.
- 6) Steeken, D., et al., Routing of straddle carriers at a container terminal with the special aspect of internal moves, OR Spectrum, No.15, 167-172, 1993.
- 7) 竹原, 市村, 超大型コンテナ船対応の高効率岸壁クレーン, 港湾荷役, 128-133, Vol.48, No.1, 2003.