

マルチユーザ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*

Dynamic Yard Operations in a Multi-user Container Terminal

西村悦子**、今井昭夫***
Etsuko NISHIMURA, Akio IMAI

1. はじめに

近年、近隣アジア諸国の港湾整備の進展に伴って、日本の港湾での貨物取扱量が低迷している。この大きな要因として、我が国での港湾関連コストが近隣アジア諸国のそれより高いことが挙げられる。このために近隣諸国での通過貨物の取扱が増え、日本の港湾のハブ機能が喪失している。したがって日本の港湾がハブとして発展するには、港湾関連コストを低減させ、荷役速度等のサービス水準を向上させることが重要である。現在、日本のほとんどのコンテナターミナルは船会社へ専用貸しされている。このため、寄港隻数がさほど多くない場合には、バースに空きが生じることがあり、この空き時間がコストを相対的に高くしている。そこで我々は、船会社への専用貸しをなくし、内航船と外航船が同一ターミナルで荷役が可能であり、各船はどのバースでもサービスを受けることができる複数バースの共同利用を提案する。

このような公共利用形式のコンテナ港（以下、マルチユーザターミナルと呼ぶ）では、船とバースの割当の仕方がバースのパフォーマンスに大きく影響する。そのため我々はすでに、船のバースへの割当方法を検討した^[5,6,12,13]。ここでは、内航フィーダー船の対象バースへの直付けを可能としており、通過貨物を扱う場合に外航船もしくはフィーダー船が常に隣接して係留されなければ、どちらか一方に対し荷役コンテナが近傍にない状態が発生すると考えられるため、係留バースにより荷役時間が異なることもないと仮定している。

現在、日本の主要港のコンテナターミナルの多くでは、ガントリークレーン(GC)、トランステナー(YC)およびトレーラーといった荷役機器の組み合わせによって荷役が行われており、貨物が近傍に蔵置されていない場合、荷役機器の投入台数および運用方法が荷役の能率や速度に大きく影響する。マルチユーザコンテナターミナルでは、船と蔵置場所が離れていると、距離が短い場合に比べてトレーラーの到着頻度が減少するためGCのサイクルタイムが長くなり荷役時間が長くなる。したがって、荷役

時間は船の係留位置とヤードでのコンテナの蔵置位置によって異なる。もし仮に、各船の係留位置に無関係に荷役時間を等しくするなら、船と蔵置場所が離れている場合には多くのトレーラーを投入すればよい。しかしマルチユーザターミナルでは、船のバースへの割当は動的に行なわれるため、ある割当状況ではトレーラーが大量に遊休状態になることもありうる。そこで現在のようにトレーラーをGCに固定的に割当てずに動的に割当てる、新たなトレーラーの運用方法を遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて検討する。これにより船の係留位置によって多少の荷役時間のばらつきはあるかもしれないが、船と蔵置位置が離れていてもさほどトレーラー（ドライバーを含む）を増加させることなく船の荷役時間を短縮することができると考えられる。

ターミナルシミュレーションを行なった既存の研究として、奥山ら^[14]はコンテナの揚げ積み量と陸側からの搬出入パターンから貯留個数と搬出入個数を求めている。長尾ら^[15]は循環型待ち行列に対して、待ち合わせ理論とシミュレーションとの比較により理論解析の適用限界を明らかにし、コンテナ船の荷役に最適な荷役機器の組み合わせ数を決定している。三木ら^[8,9]は隣接バースでGCを共同利用した場合の荷役能率の向上を検討している。文献[14]ではコンテナターミナル内の挙動はブラックボックスとしており、文献[11]では既存の運用形態を前提とし、運用形態の新たな提案はされていない。文献[8,9]ではGCの共同利用という点から新たな運用法を提案しているが、トレーラーの運用形態は既存のものである。

荷役スケジューリングに関する研究として、Ballisら^[16]はシミュレーション技法を使って外来トレーラーへのサービス向上を検討しており、Steenkenら^[17]はストラドルキャリアの作業シーケンスをヒューリスティクスにより決定している。これらはいずれもストラドルキャリア方式のターミナルを対象としている。Eversら^[2]はロッテルダムECTのAGV方式のターミナルでのAGV運行管理を行ない、Kimら^[7]はトランステナー方式のターミナルでテナーの作業シーケンスを決定している。しかし、トレーラーの運用方法改善を扱ったものはない。

我々が検討する方法はDial-a-Ride問題とは異なるが、それに似ている。Dial-a-Ride問題に関する研究として、Psaraftis^[15,16]は動的計画法、Mosheiov^[10]とHealyら^[4]はヒューリスティクスにより解を求めているが、小巡回（後に詳述する）が構成される場合には扱えない。

*キーワード：ターミナル計画、港湾計画

**正会員 工修 神戸商船大学助手 輸送システム工学講座
(〒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@bun.tikshosen.ac.jp)

***正会員 工博 神戸商船大学教授 輸送システム工学講座
(〒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@bun.tikshosen.ac.jp)

Gendreau ら^[3]は文献[4,15,16]と同じ条件でヒューリスティクスとタブサーチを用いている。鈴木ら^[18,19,20]は地点を訪問する順序に制約のある最短路に対し、グラフ理論を用いて解を求めている。文献[20]でこの問題が NP 完全であることを示し、文献[18,19]では 2 種類に定式化される緩和問題を用いて下界値を求めるアルゴリズムを提案している。これらは同一地点を 2 回以上通ることも可能としている。

以上の文献では本研究で前提とする、①すべての地点を必ずちょうど 1 回訪問し、②小巡回の構成を可能とする、という条件を満たしているものはない。

2. トレーラー運用の前提

本問題では、コンテナ船がマルチユーザターミナルのいずれかのバースに係留され、コンテナの陸揚げ船積み作業を行い、出港するというターミナルでの一連の荷役作業をモデル化する。実際にはターミナルの作業として、本船荷役作業と搬入搬出のための荷役作業が行われているが、本研究では第一段階として、本船荷役のみを考慮したシミュレーションモデルを構築する。

(1) 現状の荷役形態

図 1 は専用形式の 2 バースにおいて、各バースに船 1 隻に係留されている状況での、GC、YC とトレーラーのそれぞれの作業サイクルを示している。揚げ荷役は、GC が本船から岸壁にいるトレーラーまでの荷役作業を行い、トレーラーが GC 下からヤードの YC の所までコンテナを搬送する。そして、YC がトレーラーから蔵置場所までの荷役を行う。積み荷役は揚げ荷役の逆になる。日本では通常、当該船の作業で揚げ作業が終了するまで、積み作業は行われない。

現状の専用形式のターミナルでは、船の全長によって GC の投入台数が決定され、本船荷役で使用される YC は GC1 基に対し、およそ 2 台程度が投入される。またトレーラーは 4 台が特定の GC1 基に割当てられ、担当する GC と YC との間を往復する。

船とコンテナの蔵置場所が離れている場合、トレーラーが GC に対し固定、つまり特定の GC の担当で動く、

移動距離が長くなり GC の荷役速度が落ちると予想される。荷役速度を落とさないためには単純に考えると、トレーラーの投入台数を増やせば対処できる。しかし投入台数が増えると、それだけ人件費等も増えるためコストが高くなり、またヤード内の混雑の発生率も高くなって、反対に荷役速度を落とす原因にもなりかねない。

そこでこのようなトレーラーの固定的な動き方を動的にする。つまりトレーラーは特定の GC を担当してコンテナを搬送するのではなく、事前の荷役計画で決定されたトレーラーのスケジュールによって、動的にヤード内の荷役を行う方法を本研究では提案する。

(2) 新たな運用方法の概念

トレーラーの新たな運用方法の概念について述べる。例えば図 2 のような 2 バースを有するマルチユーザターミナルにおいて、今、船 A が隣接バース直背の蔵置エリアへの揚げ作業中で、船 B が積み作業中であると仮定する。このとき、仮に船 A のあるコンテナをヤードへ搬送したトレーラーが、もとの GC の所に戻らず、近くにある船 B のコンテナを船 B の GC まで運び、そこから船 A の GC の所まで行き、次の揚げ作業を行うとする。この場合、固定運用とは異なってトレーラーは半分ですみ、また全体として固定運用より空荷の距離が短くなるため、より少ないトレーラーの投入台数で同じ GC の荷役速度が維持できる。

3. シミュレーションモデルの概要

本研究では、汎用シミュレーション言語である SLAM II をシステム化した汎用シミュレーションモデル構築ツール VisualSLAM を用いて荷役シミュレーションモデルを構築する。VisualSLAM には、モデル内を動き回る要素を生成させる機能を持つノード、サービスを待つために並ぶ行列を表現するノード、その他のノードがあり、これらを組み合わせてシミュレーションモデルを構築することができる。

(1) モデルの構成

本モデルは大きく 3 つの部分から成る。まず 1 つめは、

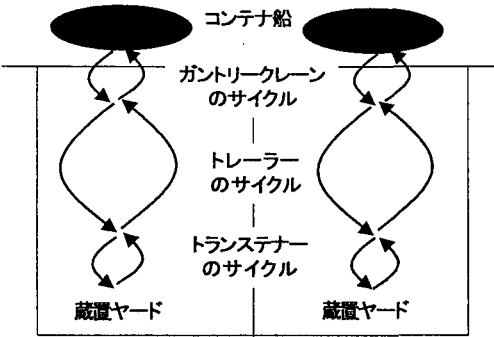


図1 既存の運用方法

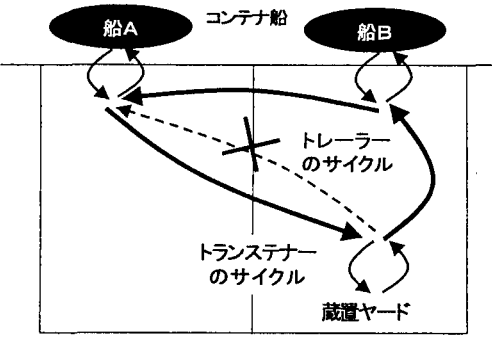


図2 運用方法概念図

船の到着および荷役開始を決定する部分である。2 つめとして揚げ荷役、3 つめに積み荷役を行う部分がある。まず全体の処理の流れを以下に述べるが、 $f(i)$ はバース i の現在の作業状況を表し、0~2 までの整数変数で判別する。0 はバース i に係留船がなく、荷役作業が行なわれていないことを示しており、1 は揚げ作業中、2 は積み作業中を意味している。これはグローバル変数であり、シミュレーション中にどこで変数値が変化しても、その値を使って各バースの作業状況を判別することができる。

ステップ1: シミュレーション時間を設定し、各バース $i=1, \dots, B$ (B : 対象バース数) の作業状況を $f(i)=0$ (作業なし) とする

ステップ2: 船が指数分布に従って到着する

ステップ3: 事前に計画された係留予定バース i で他船が荷役作業中であるか判断する。作業中 ($f(i)=1$ または 2) ならステップ4へ、作業なし ($f(i)=0$) であればステップ5へ

ステップ4: 作業終了まで待機し、他船の荷役作業が終了すれば ($f(i)=0$ になった時点で) ステップ5へ

ステップ5: 当該船係留バース i での各荷役機器での揚げ積み荷役コンテナ数の更新して、当該バースを揚げ作業 $f(i)=1$ とし、これと他バースの作業状況から、トレーラーのルーチング (復路) を決定する

ステップ6: 当該バース i の陸揚げ作業を行なう

ステップ7: 揚げ作業が終了 (処理コンテナ数 $\geq$ シミュレーション開始からの全体の揚げ荷役コンテナ数) すれば、当該バースを積み作業 $f(i)=2$ とし、トレーラーのルーチング (復路) を再決定する

ステップ8: 当該バース i の船積み作業を行なう

ステップ9: 積み作業が終了 (処理コンテナ数 $\geq$ シミュレーション開始からの全体の積み荷役コンテナ数) すれば、当該バース作業なし $f(i)=0$ とし、トレーラーのルーチング (復路) を再決定する

ステップ10: 以下ステップ2~9がシミュレーション終了時刻まで繰り返される

(2) 荷役作業処理

本モデルは VisualSLAM というシミュレーションモデル構築ツールによって構築しているが、各荷役作業 (揚げ作業、積み作業) を VisualSLAM で用いられるネットワーク図の形式を使って、実際のモデルを簡略化したものを図3に示し、上のステップ6 (揚げ作業) の詳細について述べる。ステップ8 (積み作業) については GC と YC の作業を入れ替えたものと考えればよい。

船がターミナルに到着し、バースに係留され荷役が始まると、図3の揚げ作業の GC、YC、トレーラーの「CREATE ノード」から要素が生成される。GC の要素は GC のスプレッダーの動きを表し、岸壁から船内へ、船内から岸壁のトレーラーの所までのサイクルを図3の

A の部分は示している。YC の要素は YC のスプレッダーの動きを表し、蔵置ヤードのトレーラーから蔵置場所へ、蔵置場所からトレーラーの所までのサイクルを B の部分で示している。トレーラーは GC 下~YC 下間の往路、復路を C の部分で表されている。

「QUEUE ノード」は要素を待機させるために使用する。GC とトレーラー両方の要素がそれぞれの「QUEUE ノード」に1つずつ到着すれば次の「MATCH ノード」によって先に進むことができる。もし一方のみ到着の場合は、到着した方の「QUEUE ノード」に待機し、もう一方が到着するまで待つ。この待ち時間はカウントされ、統計として記録される。要素が両方揃えば、先に進み、GC は統計をとって先の「CREATE ノード」に戻り、次の要素が生成される。これは次のコンテナ荷役のためのスプレッダーの動きを表す。トレーラーは GC のところからコンテナを受け取った後、YC の所まで進み「QUEUE ノード」で YC と両者が揃うまで待つ。つまり、往路は「MATCH ノード」~「QUEUE ノード」の間であり、復路は、YC とトレーラーの両者が揃ってコンテナを YC に渡した後、統計を取り、先に述べたステップ5で決定されるルーチングに従って、揚げ作業中の GC もしくは積み作業中の YC のいずれかのトレーラーの「CREATE ノード」へ向かう。

図3の A、B、C の部分は各船の処理コンテナ数が設定値に達するまで続けられ、達したら積み作業へ移り、GC と YC が入れ替わった作業順序で同様の作業が行なわれる。

復路の行き先を常に同じトレーラーの「CREATE ノード」に指定すれば、固定運用のモデルになる。

4. トレーラーのルーチング

トレーラーを動的に運用するには、ある GC または YC へのコンテナ搬送 (往路と呼ぶ) 後、どの GC もしくは YC のところへ行くべきかの決定を行なわなければならない。つまり往路は、事前に計画されるヤード内の蔵置スケジューリングによってヤード内または船内のコ

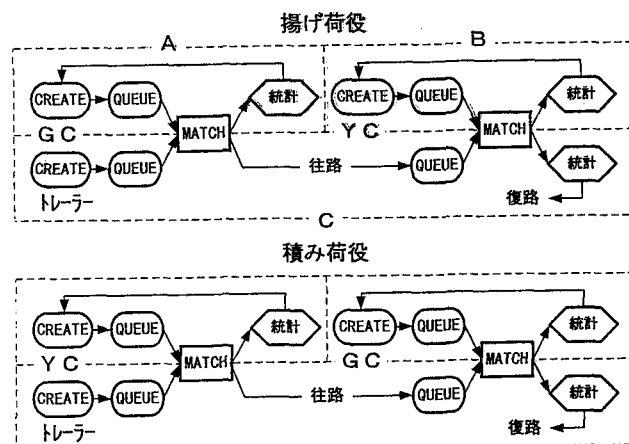


図3 荷役作業簡略図

ンテナ蔵置場所が決定される時点で自動的に決まる。なおコンテナの蔵置場所は、荷役機器の余分な移動や荷繰り回数をなるべく少なくするように決定されている。反対に復路については、空荷での移動であるため、できるだけその走行距離が短くなるようにルーチングを決定する必要がある。そこでトレーラーの復路決定モデルを構築する(実際には、往復を一体としたルートを決する)。

(1)ルーチングの概要

マルチユーザターミナルで荷役している船の集合を考え、その状態ごとにトレーラーのルーチングを考える。図4は供用4バースにおいて、各バースに船1隻が係留される場合を示している。各船の係留位置とその船に荷役されるコンテナの蔵置ヤードは○印で表している。岸壁側の○印とヤード側の○印の間の矢印は往路の向きを示しており、「ノード1→7」はノード1のバースに係留された船のコンテナがノード7の蔵置ヤードに揚げ荷役されていることを意味している。また「ノード6→3」はノード6のバースに蔵置されていたコンテナがノード3に係留される船に積み荷役されることを示している。トレーラーが他の荷役機器にコンテナを受け渡しする場所(図4の○印)を、船ごとに1つのノードとして考える。トレーラーによる GC→YC、YC→他の YC、YC→GC、GC→他の GC の移動経路をアークと考えると、本問題は往路が与えられていて、復路を決定するルーチング問題となる。

(2)問題の前提

本問題の前提条件は、以下のようになる。

- a. 往路は既知とする
- b. 小巡回(すなわち、すべてのノードを1つの大きな巡回路で訪問されない)が複数形成されても構わない
- c. 各船のコンテナはいずれかのバースの背後地にまとめて蔵置される
- d. 各トレーラーにはサイズに関わらず、コンテナは1個のみ積載可能とする

以上の前提条件を満たすために、本問題を先行順序制約のある割当問題 として考える。なお、Dial-a-Ride 問題とはすべてのノードを必ず1つの巡回路(ハミルトン

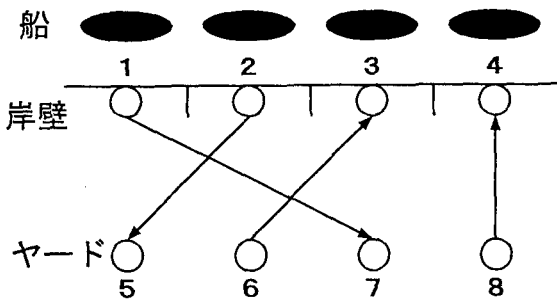


図4 起終点ノードと往路

サイクル) で訪問される問題であり、本問題とは異なる。

(3)定式化

本問題は式(1)–(7)のように定式化される。ここで、

- N : ノード全体の集合
- $i, j (=1, \dots, n) \in N$: ノード番号
- C_{ij} : ノード i と j の間の距離
- x_{ij} : もしノード i からノード j へトレーラーの移動があれば1、なければ0である 0-1 整数変数
- y_{ij} : アーク (i, j) で、もしノード i が往路の始点であれば1、そうでなければ0である 0-1 整数変数
- z_{ij} : アーク (i, j) で、もしノード j が往路の終点であれば1、そうでなければ0である 0-1 整数変数

$$\text{Minimize } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} C_{ij} x_{ij} \tag{1}$$

$$\text{Subject to } \sum_{i \in N} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in N \tag{2}$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in N \tag{3}$$

$$\sum_{j \in N} y_{ij} + \sum_{j \in N} z_{ij} = 1, \quad \forall i \in N \tag{4}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in N \tag{5}$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in N \tag{6}$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in N \tag{7}$$

目的関数は総走行距離の最小化であり、制約式(2)はトレーラーがそれぞれのノードに必ず1回到着することを意味し、式(3)は各ノードからトレーラーが必ず1回出発することを示している。式(4)はそれぞれのノードはある1つの往路における始点もしくは終点のどちらかであり、両方になることはないことを示している。もしノード i が往路の始点であれば、 $\sum_{j \in N} y_{ij} = 1$ 、 $\sum_{j \in N} z_{ij} = 0$ となること

から式(4)は1となり、ノード i が往路の終点であれば、 $\sum_{j \in N} y_{ij} = 0$ 、 $\sum_{j \in N} z_{ij} = 1$ となることから式(4)は1となる。

(4)解法

本問題は先行順序制約のある割当問題であり、多項式オーダーの計算量で解けるアルゴリズムが存在することは証明されていない。つまり供用バース数が増え、先で示したノード数が多くなると解くことが困難になる。また現実にあるような、同時期での1バースへの複数船の係留を考慮すると、同時荷役隻数が増えノード数が多くなる。例えば4バースでも、小型船なら最大10隻程度係留できると考えられ、この場合、解の組み合わせが多くなり総当り法では解くことができない。そこで、GAを用いた近似解法を提案する。

GAは生物の適応進化の手順を真似る手法であり、その全体の流れを図5に示す。

(5) 個体表現

トレーラーが岸壁側 GC およびヤード側 YC とコンテナ受渡し場所をノードとして表現し、トレーラーがノードを巡回する順序を 1 次元配列で示す。往路は既知としているため、往路の始点と終点のペアを 1 つの遺伝子として表現した「往路遺伝子」と、0 または -1 で表現した「小巡回決定遺伝子」の 2 種類の遺伝子をその 1 次元配列に交互に入れる。小巡回決定遺伝子の 0 は、前後に置かれた往路遺伝子を結合し、-1 は前後の往路遺伝子を分割して小巡回を形成し、左から順に巡回することになる。

先に示した図 4 の例を使って説明するが、このルーティングを求めるために図 6 のような遺伝子型を生成させる。起終点ペアを示す 1 つの文字列で表現した往路遺伝子 A=(1,5)、B=(2,6)、C=(7,3)、D=(8,4) と、0 または -1 で表現した小巡回決定遺伝子を交互に 1 次元配列にランダムに入れ、図 6 のような遺伝子型が生成される。

図 6 が仮に GA の処理の中で最終的に得られた解であったとすると、これをノード番号を用いた配列表現にすると、図 7 のようになる。小巡回決定遺伝子は 0 なら前後の往路遺伝子を結合し、-1 であれば分割するため、ルートは往路遺伝子 D と B の前後で分割され、最終的に図 8 の巡回路が形成され、復路を示す点線が決定される。

(6) 遺伝演算

遺伝演算は次のようにするが、個体群サイズは 10、世代数は 50 とする。

- a. 選択：ルーレット戦略（適応度に比例した選択確率でペアリングを決定する）+ エリート保存選択戦略（良い解を次世代へ継承する）
- b. 交叉：致死遺伝子が生成されないことで知られている、部分一致交叉（交叉確率 0.6）
- c. 突然変異：突然変異率 0.05 により突然変異が起きる

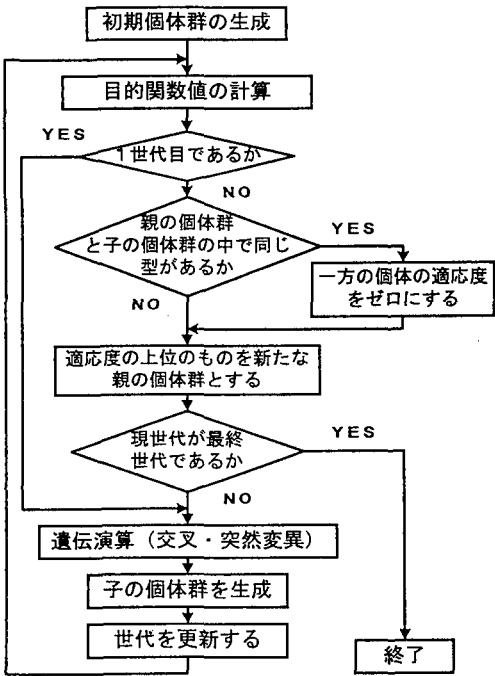


図5 GAのフロー

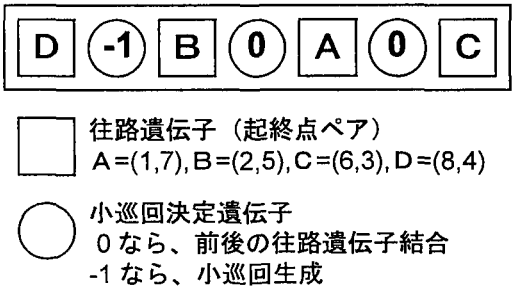


図6 遺伝子型

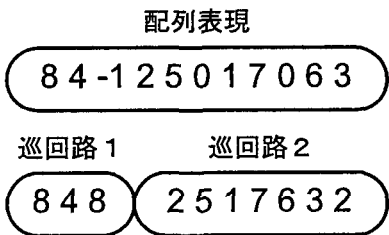


図7 ノード番号による配列表現

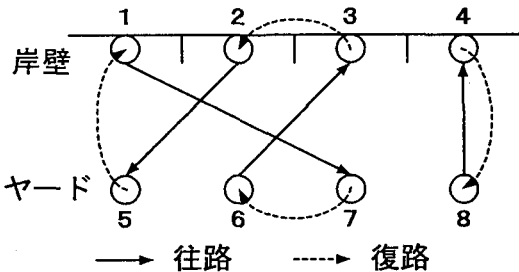


図8 巡回路の一例

可否かを決定するが、起きるとき遺伝子を 1 つランダムに選択し、往路遺伝子であれば他の往路遺伝子をもう 1 つ選択して入れ替える。ランダムに選択した遺伝子が小巡回決定遺伝子であり、それが 0 なら -1 に、-1 なら 0 に変換する。

5. シミュレーション実験

以下の 2 ケースにおいてトレーラーの投入台数を変化させて、従来行なわれている固定運用と我々が提案する動的運用のシミュレーションを行ない、両運用方法の差を検討する。

- ケース 1：供用 2 バースにおいて、各バースにコンテナ船 1 隻ずつが係留され、各バース GC2 基、YC4 台（全体で GC4 基、YC8 台）で荷役作業を行なう
- ケース 2：供用 4 バースにおいて、各バースにコンテナ船 1 隻ずつが係留され、各バース GC4 基、YC4 台（全体で GC8 基、YC16 台）で荷役作業を行なう

次に述べる分布形の作業時間を用いて時間データの乱数の種を変えて 5 回シミュレーションを行なった。

(1) 使用データの概要

シミュレーションで用いるデータは、各荷役機器の荷役作業時間と船の到着間隔である。

荷役作業時間は、1997 年 11 月 18～22 日に神戸港の六甲アイランドのコンテナターミナルで荷役作業を行ったコンテナ船に対する、各荷役機器の待ち時間を除いた作業時間である。また、船の到着間隔は 1997 年 2 月の 1 ヶ月間に神戸港に入出港したコンテナ船から得られたものである。

船の到着間隔は実績を分析した結果、一般に言われるように指数分布に従っていたので、その分布関数で発生させることにする。荷役作業時間は、各荷役機器に対しコンテナ積載での移動と空荷での移動とに分けて、それぞれの作業時間の分布形を検討した。表 1 に示すような、 k 次のアーラン分布および正規分布に従うことがわかったので、それぞれの分布関数で作業時間を発生させることにする。コンテナは船内およびヤード内で蔵置場所が異なるので、分布関数はその違いを表現している。

なお、各船の荷役コンテナ数は揚げ積み別にそれぞれ 200～300 の一様乱数により与え、各船に GC2 基使用するため、それぞれ半分の量の荷役を行なう。

表 1 各荷役機器の分布関数と平均所要時間

	往路		復路 (空荷)	
	次数 k	平均値 (分)	次数 k	平均値 (分)
GC 陸揚げ	16	0.8	15	0.7
GC 船積み	正規分布	0.8	35	0.6
YC	19	1.2	6	0.9
トレーラー	28	1.5	12	1.5

(2) 本事例におけるトレーラーのルーチング

1 週間に到着する船、ケース 1 では 20 隻、ケース 2 では 40 隻を対象とし、各船の荷役コンテナの蔵置ブロックの位置は船ごとに任意に決定されるべきであるが、VisualSLAM でこの蔵置パターンの変化を考慮するにはパターンごとにプログラムを作らなければならなくなるため、今回は以下に示す蔵置位置の 1 パターンのみとしている。ただし、ブロック内のコンテナの蔵置位置は乱数により上で示した分布形により生成している。

ケース 1 の場合：当該船の係留バースと隣り合うバースの背後ヤードに蔵置される

ケース 2 の場合：バース 1～4 がこの順で隣接しているとき、バース 1～3 に係留される船はそれぞれ隣り合うバース 2、3、4 に、バース 4 の係留船のコンテナはバース 1 の背後ヤードに蔵置される

本事例では各バースに 1 隻のみ係留可能であり、最大 2 隻～4 隻が同時に作業する。そのため、本事例のように問題の規模が小さい場合、総当り法を用いて最適解を求めることができる。そこで総当り法で求めた厳密解と

比較したところ、提案した解法によりすべて最適解が得られており、このルーチングを用いてシミュレーションを行なった結果を以下に示す。なお、各巡回路でのトレーラー数は本来なら各巡回路長比によって分配すべきであるが、VisualSLAM では柔軟にその数の増減コントロールができないため、投入トレーラー数／全往路ペア数×当該巡回路内の往路ペア数としている。

(3) シミュレーション結果

1 週間のシミュレーションを行なって、GC におけるコンテナ 1 個あたりの平均サイクルタイム (待ち時間＋作業時間) を求めたのが図 9 と図 10 である。動的運用のトレーラーは投入台数をケース 1 では 8～20 台、ケース 2 では 16～40 台まで 1 台ずつ変化させ (図中で太線の折れ線)、固定運用のトレーラーは各 GC1 基に対し 2～5 台、つまり全体でケース 1 なら 8、12、16、20 台、ケース 2 なら 16、24、32、40 台を投入した場合 (マーカー別の直線) の荷役時間を示している。

まず、運用方法別に投入台数による荷役時間の変化を見ると、固定運用では台数を増やせば GC の待ち時間が減るため作業時間が短縮できる。動的運用でも固定とほぼ同様の傾向がみられるが、ケース 1 では 10～12、14～17、19～20 のように台数を変化させても作業時間はほとんど変わらないときもある。またケース 2 では少しずつではあるが、台数が増えると作業時間は短縮される傾向がある。

また固定と動的を比較すると、ケース 1 の場合固定運用で 20 台投入での作業時間は、動的運用の 18 台とほぼ等しくなっており、動的運用にすると約 2 台減らせる。さらに固定運用で 16、12 台投入する場合には、動的運

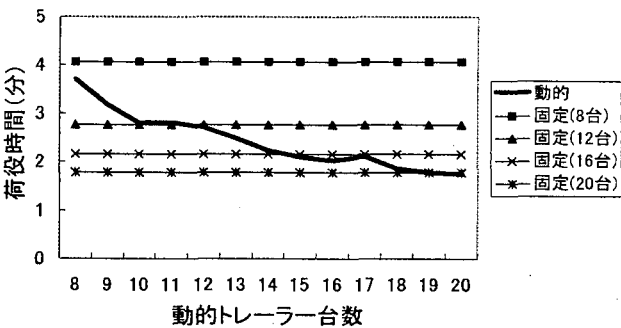


図9 供用2バースにおけるGCの平均サイクルタイム

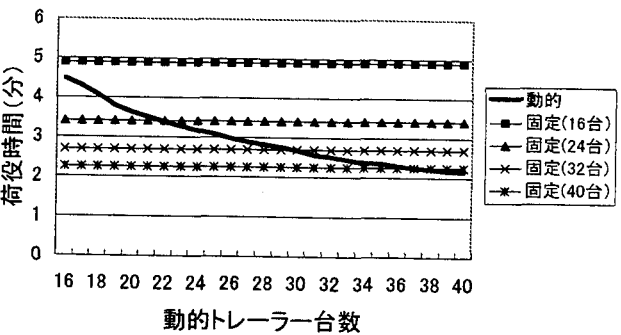


図10 供用4バースにおけるGCの平均サイクルタイム

用でそれぞれ 14、10 台の荷役時間とほぼ等しくなっている。したがって 2 バースの場合、動的運用なら固定運用より 2 台程度少なくても、同程度の荷役時間で済むことがわかる。ケース 2 の場合においては、固定運用で 40 台投入での作業時間は、動的運用では 36 台でほぼ等しくなっている。さらに固定運用で 32 と 24 台投入する場合には、動的運用でそれぞれ 29、22 台で同じ荷役時間が達成されている。したがって、動的運用を行なえば固定運用より 2～4 台程度少なくても、同程度の荷役時間で済むことがわかる。

各船にとって荷役コストを低く抑えるためには係留時間の短縮が重要となってくる。そのため、荷役が効率的に行なわれているかどうかを判断する基準として、各船の荷役開始から出港までにかかる在港時間の短縮が考えられる。そこで動的運用と固定運用の在港時間をケース 1 では投入台数 8、12、16、20 台の 4 種類、ケース 2 では 16、24、32、40 台の 4 種類で調べたのが図 11、図 12 である。ここでは、各船に 2 基の GC を稼働させたため、2 基のうち荷役終了の遅い方の荷役時間がその船の在港時間である。なお、データごとに各船の荷役コンテナ数は異なるため、比較の都合上、5 回のうちのある 1 回のシミュレーションにおける在港時間別の隻数を示す。なお他の 4 回の結果も同様の傾向である。図の横軸は 2 時間ごとの時間幅、縦軸は全隻数に対する割合として隻

数を示している。
当然のことであるが、投入台数が増えれば在港時間が短くなっているのがわかる。また固定運用より動的運用の方が、ケース 1 では各船ともおよそ 2 時間程度、ケース 2 ではそれ以上荷役が早く終了しているが、ケース 2 での 16 台の場合固定運用では 47 時間程度かかっている船が動的運用にすることで 26 時間前後に抑えられている。したがって、単純に台数を増やせば荷役速度を上げられるが、台数を増やさなくても運用方法を改善することで、現状の荷役速度を十分維持できるといえる。

さらに投入台数の変化による各船の在港時間のばらつきをみると、ケース 1 において投入台数が少ない 8 台の場合では、各船の在港時間は固定運用で 15～25 時間、動的運用で 13～21 時間である。一方、台数が多い 20 台の場合では、固定運用で 7～11 時間、動的運用で 5～9 時間となっており、両運用方法とも投入台数の少ないときに時間のばらつきが大きくなっているのがわかる。しかし動的運用の方が固定運用よりも比較的ばらつきが小さい傾向がみうけられる。ケース 2 では 16 台の場合、固定運用で 13～47 時間、動的運用で 13～27 時間となっており、動的運用を行なうことによって各船の在港時間のばらつきが小さくなり、均等化される傾向にある。台数が多い 40 台の場合でも、固定運用で 7～19 時間、動的運用で 5～13 時間となっており、在港時間のばらつき

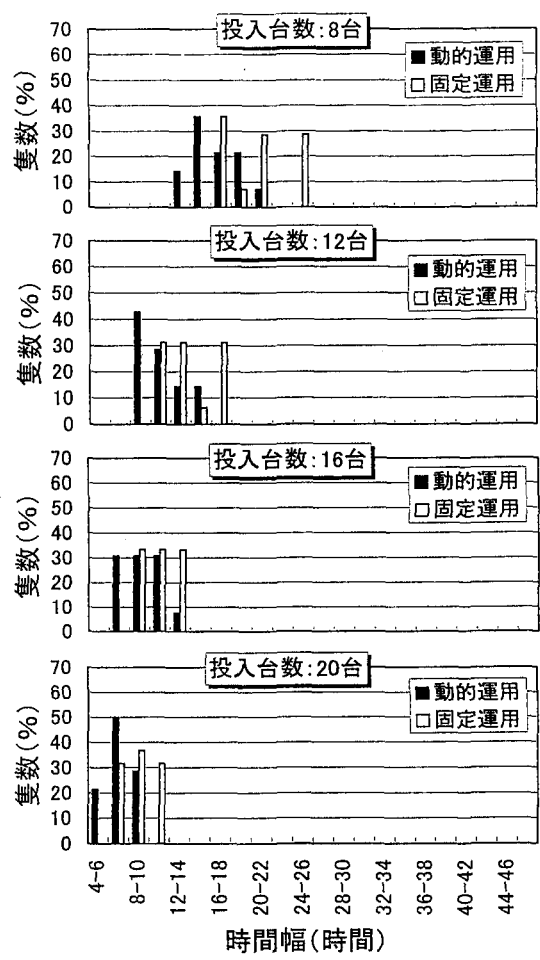


図11 供用2バースでの各船の在港時間

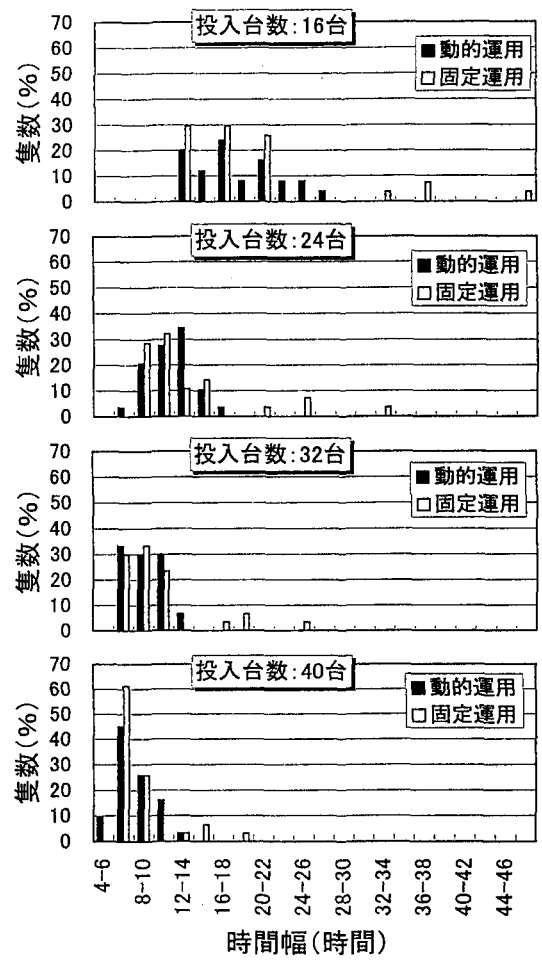


図12 供用4バースでの各船の在港時間

は、16 台の場合ほどではないが動的運用の方が小さい。
この傾向も 2 バースの場合と同じである。

6. おわりに

本研究では、港湾コスト低減のための一方策として、マルチユーザターミナルの導入を提案し、トランステナー方式のターミナルにおける荷役トレーラーの新たな運用方法を検討した。

供用 2 バースと 4 バースの 2 ケースでシミュレーション実験を行なったが、提案した運用方法を用いればトレーラーの投入台数を現状より最低 1 割は削減できることが明らかとなった。また荷役開始から出港までにかかる在港時間については、各船の係留位置と対象コンテナの蔵置ヤードとの位置関係によって異なるが、動的運用を行なえばトレーラーの投入台数を増やさなくても、固定運用に比べて 2 バースなら 2 時間程度、4 バースであればそれ以上、在港時間を短縮できる船も存在することが明らかとなった。また各船の在港時間のばらつきも動的運用の方が小さいことがわかった。

以上のことから、提案した方法を使ってトレーラーの運用方法の改善を行なえば、ヤード作業が複雑であるマルチユーザターミナルにおいて、固定運用方式よりもトレーラー数が減らせ、その分にかかる人件費等のコストも含めて、港湾コスト低減に寄与するといえる。

参考文献

- [1] Ballis, A. and Abacourkin, C., A container terminal simulation model with animation capabilities, *Journal of Advanced Transportation*, Vol.30, No.1, pp.37-57, 1996.
- [2] 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, pp.21-34, 1996.

- [3] Gendreau, M., Laporte, G. and Vigo, D., Heuristics for the travelling salesman problem with pickup and delivery, *Computers & Operations Research*, No.26, pp.699-714, 1999.
- [4] Healy, P. and Moll, R., A new extension of local search applied to the dial-a-ride problem, *European Journal of Operational Research*, No.83, pp.83-104, 1995.
- [5] 今井, 西村, 計画開始時刻を考慮した公共バースの割当法, *土木計画学研究・論文集*, No.15, pp.557-564, 1998.
- [6] Imai, A., Nishimura, E. and Papadimitriou, S., The dynamic berth allocation problem for container port, *Transportation Research Part B*, (印刷中).
- [7] 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, pp.17-33, 1999.
- [8] 三木, 港湾利用の効率化, *日本航海学会誌 NAVIGATION*, No.132, pp.10-17, 1997.
- [9] 三木, 久保, 貢, 隣接する複数のコンテナターミナルの性能評価, *日本航海学会論文集*, No.95, pp.331-341, 1996.
- [10] Mosheiov, G., The travelling salesman problem with pick-up and delivery, *European Journal of Operational Research*, No.79, pp.299-310, 1994.
- [11] 長尾, 則武, 多重リンク系の輸送動態に関する一考察, *土木学会論文報告集*, No.212, pp.77-88, 1973.
- [12] 西村, 今井, 複数解を考慮した遺伝的アルゴリズムによる公共バースの割当法, *土木計画学研究・論文集*, No.16, pp.827-834, 1999.
- [13] Nishimura, E., Imai, A. and Papadimitriou, S., Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms, *European Journal of Operational Research*, (印刷中).
- [14] 奥山, 中井, 久保, コンテナ埠頭の規および荷役方式に関する考察, *港湾計画研究所報告*, Vol.10, No.3, pp.159-236, 1971.
- [15] Psaraftis, H. N., A dynamic programming solution to the single vehicle many-to-many immediate request dial-a-ride problem, *Transportation Science*, No.14, pp.130-154, 1980.
- [16] Psaraftis, H. N., k-Interchange procedures for local search in a precedence-constrained routing problem, *European Journal of Operational Research*, No.13, pp.391-402, 1983.
- [17] Steenken, D., Henning, A., Freigang, S. and Voss, S., Routing of straddle carriers at a container terminal with the special aspect of internal moves, *OR Spektrum*, No.15, pp.167-172, 1993.
- [18] 鈴木, 野村, 訪問順序制約のある最短路問題, 第 7 回数理計画シンポジウム論文集, Vol.7, pp.127-142, 1986.
- [19] 鈴木, 野村, 訪問順序制約のある最短路問題—運搬経路計画問題に対する統一的視点—, *日本経営工学会誌*, Vol.38, No.5, pp.320-325, 1987.
- [20] 鈴木, 野村, 訪問順序制約のある最短路問題の解法, *日本経営工学会誌*, Vol.38, No.5, pp.326-333, 1987.

マルチユーザ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

西村悦子、今井昭夫

近年、日本の港湾のハブ機能が低迷しており、この大きな要因として日本での港湾関連コストが高いことが挙げられる。そこで本研究では、港湾関連コスト低減の一方策として、内航船と外航船が同一ターミナルで荷役可能であり、各船がどのバースでも利用できる複数バースの共同利用（マルチユーザターミナル）を提案する。このターミナルでは船の近傍に必ずしもコンテナが蔵置されるとは限らないことから、現状の荷役速度を維持できるようなトレーラーの新たな運用方法を提案した。シミュレーションを用いて現状の荷役形態と比較したところ、提案した運用方法を用いれば、投入台数を現状より 1 割程度減らしても現状の荷役速度が維持でき、現状での荷役形態と同じ投入台数でも 2 時間程度短縮できることが明らかとなった。

Dynamic Yard Operations in a Multi-user Container Terminal

Etsuko NISHIMURA, Akio IMAI

We introduce in this paper a multi-user terminal system for a container port to reduce the cargo handling cost. Due to the complexity in that system, an efficient yard operation must be desired. Then we propose a dynamic yard operation with trailers in the terminal. By the dynamic operation, the number of trailers can be reduced by 10 % while keeping the cycle time of a quay crane the same as one with a conventional operation. Further the average handling time per ship can be 2 hours less with the same number of trailers as in the conventional one.