キークレーン間干渉を考慮したコンテナ事前配列問題

宮 崎 晃 年（東京工業大学大学院社会理工学研究科経営工学専攻）
鮏 川 矩 義（中央大学理工学部情報工学科）
高 野 祐 一（専修大学ネットワーク情報学部）
水 野 眞 治（東京工業大学工学院経営工学系）

Container Pre-marshalling Problem for Avoiding Conflicts between Quay Cranes

Akitoshi MIYAZAKI（Department of Industrial Engineering and Management, Graduate School of Decision Science and Technology, Tokyo Institute of Technology）
Noriyoshi SUKEGAWA（Department of Information and System Engineering, Faculty of Science and Engineering, Chuo University）
Yuichi TAKANO（School of Network and Information, Senshu University）
Shinji MIZUNO（Department of Industrial Engineering and Economics, School of Engineering, Tokyo Institute of Technology）

Nowadays, container transport is of great importance in international marine freight transportation. It is crucial for container terminals to reduce the ship loading（unloading）time from the perspective of ship waiting times and terminal utilization. The container pre-marshalling problem is to arrange containers on the yard so that they will be loaded by quay cranes into ships efficiently. This paper deals with a special container pre-marshalling problem; i.e., we develop a marshalling plan to avoid conflicts caused by quay cranes requiring containers in the same lane at the same time. The problem is formulated as an integer optimization model, and a two-step heuristic optimization algorithm is presented. Computational experiments are conducted on actual data of a container terminal in Japan. Computational results demonstrate that our method finds better marshalling plans than those of the current system of the container terminal within a reasonable length of time.

キーワード：コンテナターミナル，事前配列，キークレーン，整数最適化
Key words：Container Terminal, Pre-marshalling, Quay Crane, Integer Optimization

1. はじめに

コンテナ輸送とは，コンテナと呼ばれる一定の大きさの箱に貨物を入れて輸送することである。コンテナ輸送には「積み替え作業が容易になる」，「梱包費用を削減できる」，「積み重ねて保管場所を節約できる」，「安全性が高い」などの多くの利点がある。特に海上コンテナ輸送は，国際物流における主要な輸送手段の一つである。実際に世界のコンテナ貿易量は 1995 年から 2014 年の間に 3 倍以上に

受付：2016 年 11 月 28 日
受理：2016 年 11 月 28 日

増加し，現在もなお増加傾向にある（UNCTAD［2014］）。このようなコンテナ輸送量の増加に伴い，コンテナの海上輸送と陸上輸送とを連結するコンテナターミナルでは，作業効率化の重要性が高まっている。また，近年はコンテナターミナルにおける数々の問題に対して，オペレーションズ・リサーチの手法を用いた研究が盛んに行なわれている（Günther and Kim［2006］, Stahlbock and Vos［2008］, Steenken et al.［2004］, Vacca et al.［2007, 2010］, Vis and de Koster［2003］）。

コンテナ船へのコンテナの積み卸し時間を短縮することは，ターミナルの最も基本的な課題であり，海運会社の利便性とターミナルの生産性の両面から重要とされる。ただし，コンテナ蔵置の自由度が大きい船卸し作業とは異なり，船積み作業ではコンテナの種類や輸送先に応じてコンテナ船における積み付け位置が限定される。このため船積み作業では，作業工程表に従って，コンテナ船の指定された位置に指定された種類のコンテナを積み込むことが必要となる。また，船積み作業の円滑化を目的として，事前にターミナルのコンテナの配置換えを行なうことはコンテナ事前配列（container pre-marshalling）と呼ばれる。

本研究では，実際のターミナルを対象として，コンテナを船に積み込むキークレーンの作業効率化を目的としたコンテナ事前配列問題を扱う。この問題に対して，本研究では整数最適化モデルによる定式化と，問題を 2 段階に分割する発見的解法を提案する。本研究では，提案手法の有効性を検証するために，ターミナルの実際のデータを利用した数値実験を実施した。提案手法はターミナルの現行システムよりも優れた解を，現場から要求される計算時間内に求めることができた。

本論文の構成は以下のようになる。2 節では，対象とするターミナルの概要とコンテナ事前配列問題について説明する。3 節では，コンテナ事前配列問題を整数線形最適化問題として定式化する。4 節では上記の問題に対する発見的解法を提案し，5 節では数値実験を通して提案解法の性能を検証する。最後に 6 節で，本論文のまとめと今後の課題を述べる。

2. 問 題 設 定

本節では，まず本研究で対象とするターミナルの概要を説明する。その後，本研究で扱うコンテナ事前配列問題について説明し，先行研究との関連を述べる。

2.1 ターミナルの構成

本研究では，国内でも最大規模の設備を有する国際コンテナターミナルを対象とする。その概略図を図 1 に示す。

コンテナを保管する場所はヤードエリアと呼ばれ，ヤードエリアには岸壁と平行にレーンと呼ばれるコンテナの蔵置スペースが複数存在する。各レーンはベイと呼ばれる区画に細分されており，一つのベイには最大 24 本（6 列 4 段）のコンテナを蔵置することができる。各レーンには 1 基ずつ門型クレーンが設置されており，搬送車及び外来トレーラーに対するコンテナの積み卸し作業を担う。

コンテナ船へのコンテナの積み卸しを行なう場所はエプロンサイドと呼ばれる。エプロンサイドに設置されたキークレーンは，コンテナ船に対するコンテナの積み卸し作業を担い，作業場所に応じて岸壁と平行に移動することができる。

コンテナ船に積み込むコンテナは輸出コンテナと呼ばれ，本研究では輸出コンテナの船積み作業の円滑化を目的とする。ヤードに蔵置されている輸出コンテナは，まず門型クレーンによってレーンから搬送車へと引き渡される。コンテナは搬送車に乗ってエプロンサイドまで移動し，キークレーンに

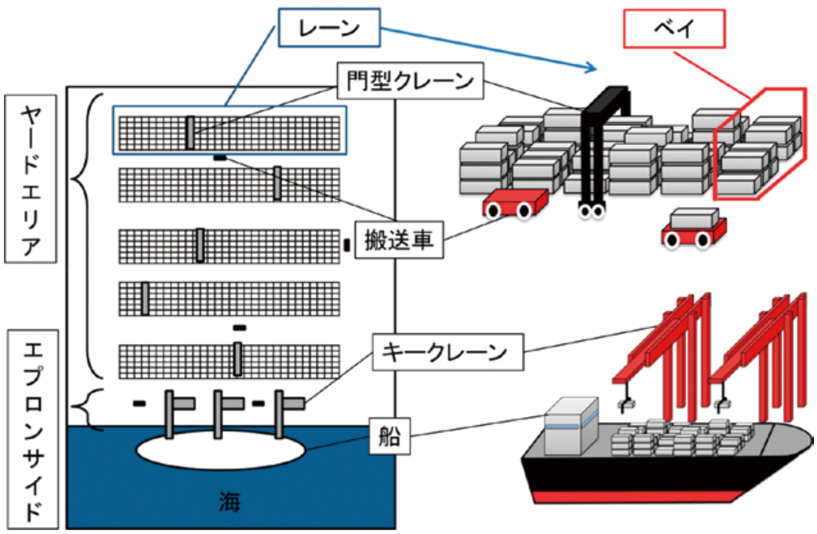

図 1　ターミナルの概略図

よってコンテナ船に積み込まれる。

2.2　作業工程表

コンテナ船におけるコンテナの積み付け位置は，コンテナの種類や輸送先に応じて決まる。このため船積み作業では，作業工程表に従って輸出コンテナをコンテナ船に積み込む。作業工程表は，以下の項目からなる作業工程の集まりとして定義される :

- 作業時間帯
- 積み込むコンテナの種類
- 積み込むコンテナの本数
- 作業を担うキークレーン
- コンテナ船における積み付け場所

対象とするターミナルでは，熟練した実務者によって作業工程表が作成されている。

ここで注意すべき点は，作業工程表では「20ft・中国揚げ」といったコンテナの種類ごとに作業工程が定められており，個別のコンテナに対して作業工程が一意に対応するとは限らないということである。例えば，「20ft・中国揚げ」の輸出コンテナが複数存在し，「20ft・中国揚げ」のコンテナを積み込む作業工程も複数存在する場合には，「20ft・中国揚げ」の各コンテナをどの作業工程に割り当てるかの自由度が存在する。

2.3　キークレーン間干渉

門型クレーンは各レーンに 1 基しか設置されていないために，同じレーンから複数のコンテナを同時に取り出そうとすると，いずれかのコンテナを搬送車に引き渡すタイミングが遅れてしまう。このことによりコンテナの搬送が遅れると，キークレーンに待ち時間が生じ，船積み作業の遅延につながる。このように，同じレーンの複数のコンテナの搬送を，異なるキークレーンが同時に要求することをキークレーン間干渉と呼ぶ。

対象とするターミナルではキークレーン間干渉を防ぐために，作業時間帯が近いコンテナは異なる

レーンに蔵置する。例えば，10 : 10–10 : 25 にキークレーン 1 が担当する作業工程 A と，10 : 50–11 : 00 にキークレーン 2 が担当する作業工程 B を考える。作業工程の時間帯は作業の進捗により前後する可能性があり，作業工程間に必要な時間間隔（規定時間）を 30 分とする。この場合，作業工程 A の終了時刻と作業工程 B の開始時刻の間隔が規定時間より短い。したがって，作業工程 A と作業工程 B で積み込むコンテナの組が同じレーンに蔵置されている場合は，どちらかのコンテナを別のレーンに事前に移動する。このように，キークレーン間干渉を防ぐためにコンテナの蔵置レーンを変更することをレーン間移動と呼び，対象となったコンテナをレーン間移動対象コンテナと呼ぶ。

2.4 コンテナ事前配列問題

コンテナのレーン間移動には，門型クレーンと搬送車の両方を稼動する必要があり，燃料費などの金銭的コストと時間的コストを要する。したがって，レーン間移動の対象となるコンテナの本数を削減するために，各コンテナを適切な作業工程に割り当て，適切なコンテナを適切なレーンへ移動させることが重要となる。また，ターミナルには積み込む船の異なるコンテナが混在しており，コンテナ船ごとに輸出コンテナの蔵置に使用できるベイ数に上限が設けられている。このため，同じ船に積み込むコンテナはなるべく同じベイにまとめて蔵置することが求められる。

そこで本研究では，レーン間移動対象コンテナ数の最小化を目的とし，「各コンテナの作業工程への割当」「各コンテナの蔵置レーン」「コンテナの蔵置に使用するベイ」を決定するコンテナ事前配列問題を考える。

2.5 関連研究

コンテナを取り出すために，その上に積まれたコンテナを他の位置へ移動することは荷繰りと呼ばれる。各コンテナの船積みの順序が与えられ，船積み作業で荷繰りが生じないようにコンテナの配置換えを行なうコンテナ事前配列問題が，近年数多く研究されている（Bortfeldt and Forster［2012］, Caserta and Vos［2009］, Caserta et al.［2011］, Expósito-Izquierdo et al.［2012］, Gheith et al.［2016］, Huang and Lin［2012］, Jin et al.［2015］, Lee and Chao［2009］, Lee and Hsu［2007］, Wang et al.［2015］）。これらの先行研究に対し，本研究で扱うコンテナ事前配列問題は以下の 2 点で大きく異なる。

まず本研究で扱う作業工程表では，コンテナの種類ごとに作業工程が定められている。このため，同じ種類のコンテナを扱う作業工程が複数ある場合には，各コンテナをどの作業工程に割り当てるかを選択することができる。したがって，各コンテナの作業順が与えられている先行研究とは異なり，本研究では各コンテナの作業順や作業時間帯をある程度変更することができる。

次に，本研究では荷繰りではなくキークレーン間干渉に着目している。荷繰りの場合はコンテナの移動をベイ内に留めることができ，門型クレーン 1 基で別ベイへ横移動させることなく作業することできる。一方で，レーン間移動では門型クレーン 2 基と搬送車を稼動するために，荷繰りよりも多くの時間と燃料費を要する。また，キークレーン間干渉は船積み作業の遅延に直結するため，事前にキークレーン間干渉を除去しておくことは，円滑な船積み作業のために非常に重要である。

3. 整数最適化モデル

本節では，キークレーン間干渉を考慮したコンテナ事前配列問題を，整数最適化モデルとして定式化する。

3.1　添え字集合と決定変数

まず，以下のように添え字集合と決定変数を定義する：

［添え字集合］

- C：コンテナの添え字集合
- L：レーンの添え字集合
- B：ベイの添え字集合
- O：作業工程の添え字集合

［決定変数］

- x_{co}：コンテナ $c \in C$ を作業工程 $o \in O$ に割り当てるとき 1，それ以外は 0
- y_{cl}：事前配列後にコンテナ $c \in C$ をレーン $l \in L$ に蔵置するとき 1，それ以外は 0
- z_{lb}：レーン $l \in L$ のベイ $b \in B$ を使用するとき 1，それ以外は 0

各コンテナの作業工程への割当を変数 x_{co} により決定し，事前配列終了時に各コンテナを蔵置するレーンを変数 y_{cl} により決定する。事前配列の前後で蔵置レーンの異なるコンテナが，レーン間移動対象コンテナとなる。また輸出コンテナの蔵置に使用するベイを，変数 z_{lb} により決定する。

3.2　制約条件

各コンテナは必ず一つの作業工程に割り当てられる。よって，コンテナ $c \in C$ を割り当てることが可能な作業工程の集合を $O(c) \subseteq O$ と表記すれば，この制約は

$$\sum_{o \in O(c)} x_{co} = 1 \quad (\forall c \in C)$$

となる。

また，積み込むコンテナの本数は作業工程ごとに定められている。よって，作業工程 $o \in O$ で積み込むコンテナの本数を K_o と表記すれば，この制約は

$$\sum_{c \in C} x_{co} = K_o \quad (\forall o \in O)$$

と表せる。

各コンテナに対して蔵置レーンを一意に定めるための制約は，

$$\sum_{l \in L} y_{cl} = 1 \quad (\forall c \in C)$$

と表せる。

一つのベイに蔵置可能なコンテナ数には上限がある。よって各レーンに蔵置するコンテナ数は，そのレーンで使用するベイが蔵置できるコンテナ数の総和を上回ってはならない。レーン $l \in L$ のベイ $b \in B$ に蔵置可能なコンテナ数を K_{lb} と表記すれば，対応する制約は，

$$\sum_{c \in C} y_{cl} \leq \sum_{b \in B} K_{lb} z_{lb} \quad (\forall l \in L)$$

となる。

レーン間移動対象コンテナは，レーンを移動する際に蔵置するベイを選択できる。一方でレーン間移動をしないコンテナは，無駄なレーン内移動（ベイの変更）を避けるために，現時点のベイにそのまま蔵置することが望ましい。現時点でレーン $l \in L$ のベイ $b \in B$ に蔵置されているコンテナの添え字集合を $C(l, b) \subseteq C$ と表記するとき，その中で事前配列後もレーン l に蔵置されるコンテナの本数

は$\sum_{c\in C(l,b)} y_{cl}$となる。この値が 1 以上の場合には, コンテナの蔵置にベイ b を使用する（$z_{lb}=1$ とする）ことになる。この制約は,

$$\sum_{c\in C(l,b)} y_{cl} \leq K_{lb} z_{lb} \quad (\forall l \in L, \forall b \in B)$$

と表せる。

コンテナ船ごとに，輸出コンテナの蔵置に使用できるベイ数には上限がある。使用可能なベイ数を N と表記すれば，この制約は

$$\sum_{l\in L}\sum_{b\in B} z_{lb} \leq N$$

と表せる。

最後に，キークレーン間干渉を防ぐための制約について説明する。まず,

条件 1　コンテナ c は作業工程 o に割り当てることが可能。
条件 2　コンテナ c' は作業工程 o' に割り当てることが可能。
条件 3　作業工程 o と作業工程 o' は担当するキークレーンが異なる。
条件 4　作業工程 o と作業工程 o' は作業時間帯の間隔が規定時間以下。

の 4 条件が成り立つ組$(c, c', o, o') \in C\times C\times O\times O$の集合を Q と定義する。ここで, $(c, c', o, o')\in Q$ に対して，コンテナ c とコンテナ c' がそれぞれ作業工程 o と作業工程 o' に割り当てられた（$x_{co}=x_{c'o'}=1$）とする。このとき，条件 3，4 によりキークレーン間干渉が生じるため，コンテナ c とコンテナ c' は異なるレーンに蔵置する必要がある。対象とするターミナルでは各レーンに十分な容量があり，キークレーン間干渉が生じないようにコンテナを蔵置することは可能とする。よって，すべてのレーン $l\in L$ に対して，$y_{cl}+y_{c'l}\leq 1$ が成立しなければならない。したがって，キークレーン間干渉を防ぐための制約は,

$$y_{cl}+y_{c'l} \leq 3 - x_{co} - x_{c'o'} \quad (\forall l\in L, \forall (c, c', o, o')\in Q)$$

と表せる。

3.3　定式化

最小化すべき目的関数は，レーン間移動の対象となるコンテナの本数である。コンテナ c が現時点で蔵置されているレーンの添え字を $l(c)\in L$ とすれば，$y_{cl(c)}=0$ となるコンテナ $c\in C$ がレーン間移動対象コンテナであり，その総数は

$$\sum_{c\in C}(1-y_{cl(c)})$$

と表せる。

以上をまとめると，本研究で扱うコンテナ事前配列問題は以下のように定式化できる：

$$\text{最小化} \quad \sum_{c\in C}(1-y_{cl(c)}) \tag{1}$$

$$\text{制約条件} \quad \sum_{o\in O(c)} x_{co} = 1 \quad (\forall c\in C) \tag{2}$$

$$\sum_{c\in C} x_{co} = K_o \quad (\forall o\in O) \tag{3}$$

$$\sum_{l \in L} y_{cl} = 1 \quad (\forall c \in C) \tag{4}$$

$$\sum_{c \in C} y_{cl} \leq \sum_{b \in B} K_{lb} z_{lb} \quad (\forall l \in L) \tag{5}$$

$$\sum_{c \in C(l,b)} y_{cl} \leq K_{lb} z_{lb} \quad (\forall l \in L, \forall b \in B) \tag{6}$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{b \in B} z_{lb} \leq N \tag{7}$$

$$y_{cl} + y_{c'l} \leq 3 - x_{co} - x_{c'o'} \quad (\forall l \in L, \forall (c, c', o, o') \in Q) \tag{8}$$

$$x_{co} \in \{0, 1\} \quad (\forall c \in C, \forall o \in O) \tag{9}$$

$$y_{cl} \in \{0, 1\} \quad (\forall c \in C, \forall l \in L) \tag{10}$$

$$z_{lb} \in \{0, 1\} \quad (\forall l \in L, \forall b \in B) \tag{11}$$

問題 (1)-(11) は整数線形最適化問題であり，汎用の整数最適化ソルバーで扱うことができる。一方で制約式 (8) の数が非常に多いために，実用的なサイズの問題を解くことは難しい。

4. 発見的解法

本節では，実用的な計算時間で問題 (1)-(11) の良質な解を求めるために，問題を「コンテナの作業工程への割当」と「コンテナの蔵置レーンと使用ベイの決定」の 2 段階に分割して解く発見的解法を提案する。

4.1 Step 1 : 作業工程への割当

ここでは，現時点の蔵置状況においてキークレーン間干渉が減少するように，各コンテナを作業工程に割り当てる。

この目的のために，条件 1〜4 に加えて，

条件 5 現時点でコンテナ c とコンテナ c' は同じレーンに蔵置されている。

が成り立つ組 $(c, c', o, o') \in C \times C \times O \times O$ の集合を Q' と定義する。このとき，$(c, c', o, o') \in Q'$ に対して $x_{co} = x_{c'o'} = 1$ の場合に，条件 3，4 よりキークレーン間干渉が生じる。したがって，

$$\sum_{(c, c', o, o') \in Q'} x_{co} x_{c'o'} \tag{12}$$

の値が小さくなるようにコンテナを作業工程に割り当てれば，現時点の蔵置状況におけるキークレーン間干渉が減少する。また，式 (12) の最小化は，制約式 (8) の右辺の値が 1 となる場合をなるべく少なくすることで，レーン間移動が必要となるコンテナの組合せを減らしているとみなすこともできる。

問題 (1)-(11) の中で，決定変数 x_{co} が現れるのは制約式 (2)，(3)，(8) のみである。また，双線形項 $x_{co} x_{c'o'}$ を表す決定変数 $w_{cc'oo'}$ を導入すると，式 (12) の最小化は，以下の混合整数線形最適化問題に帰着することができる :

$$\text{最小化} \quad \sum_{(c, c', o, o') \in Q'} w_{cc'oo'} \tag{13}$$

制約条件 $\sum_{o \in O(c)} x_{co} = 1 \quad (\forall c \in C)$ (14)

$$\sum_{c \in C} x_{co} = K_o \quad (\forall o \in O) \tag{15}$$

$$w_{cc'oo'} \geq x_{co} + x_{c'o'} - 1 \quad (\forall (c, c', o, o') \in Q') \tag{16}$$

$$w_{cc'oo'} \geq 0 \quad (\forall (c, c', o, o') \in Q') \tag{17}$$

$$x_{co} \in \{0, 1\} \quad (\forall c \in C, \forall o \in O). \tag{18}$$

4.2 Step 2 : 蔵置レーンと使用ベイの決定

ここでは，問題 (13)-(18) の最適解 $\bar{x}_{co}$ を問題 (1)-(11) に代入して，コンテナの蔵置レーンと使用ベイを決定する。この場合，キークレーン間干渉の制約式 (8) は，解 $\bar{x}_{co}$ で割り当てられた作業工程においてキークレーン間干渉が生じているコンテナの組（c, c'）に限定することができ，制約式の数が大きく減少する。具体的には，$\bar{x}_{co} = \bar{x}_{c'o'} = 1$ となる作業工程の組（o, o'）に対して，条件 3，4 が成り立つコンテナの組（c, c'）の集合を P とする。このとき，キークレーン間干渉の制約式 (8) は

$$y_{cl} + y_{c'l} \leq 1 \quad (\forall l \in L, \forall (c, c') \in P)$$

と書き換えることができる。

問題 (13)-(18) の最適解 $\bar{x}_{co}$ を問題 (1)-(11) に代入すると，制約式 (2)，(3) は削除できる。したがって，問題 (1)-(11) は以下の整数線形最適化問題となる：

最小化 $\sum_{c \in C} (1 - y_{cl(c)})$ (19)

制約条件 $\sum_{l \in L} y_{cl} = 1 \quad (\forall c \in C)$ (20)

$$\sum_{c \in C} y_{cl} \leq \sum_{b \in B} K_{lb} z_{lb} \quad (\forall l \in L) \tag{21}$$

$$\sum_{c \in C(l, b)} y_{cl} \leq K_{lb} z_{lb} \quad (\forall l \in L, \forall b \in B) \tag{22}$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{b \in B} z_{lb} \leq N \tag{23}$$

$$y_{cl} + y_{c'l} \leq 1 \quad (\forall l \in L, \forall (c, c') \in P) \tag{24}$$

$$y_{cl} \in \{0, 1\} \quad (\forall c \in C, \forall l \in L) \tag{25}$$

$$z_{lb} \in \{0, 1\} \quad (\forall l \in L, \forall b \in B) \tag{26}$$

問題 (19)-(26) の最適解 $\bar{y}_{cl}$，$\bar{z}_{lb}$ を利用して，さらに変数 x_{co} を改善することも考えられる。しかしながら，数値実験では十分な改善が見られなかったために，本研究の提案解法は問題 (13)-(18) と問題 (19)-(26) を順に 1 回ずつ解くこととする。

5. 数値実験

本節では，対象とするターミナルの実際のデータを用いて，提案解法の性能を検証する。

表 1　ターミナルの規模

	ヤード 1	ヤード 2
レーン数	11	11
各レーンのベイ数	30	37
各ベイの列数	6	6
各ベイの最大段数	4	4

表 2　コンテナ船のデータ

	船 A	船 B	船 C
積みコンテナ数	221	346	391
コンテナの種類数	15	65	72
作業工程数	31	92	117
作業キークレーン数	3	3	3
使用ヤード	1	1	2
使用可能ベイ数	13	21	23

5.1　実験設定

本研究で対象とするターミナルには二つのヤードエリアがあり，その規模を表 1 に示す。通常，輸出コンテナはコンテナ船ごとにヤード 1 またはヤード 2 のどちらかにまとめて蔵置されている。

数値実験には，表 2 の 3 隻分のデータを用いた。これらのコンテナ船の実際の作業工程表と事前配列前のコンテナの蔵置状況に対して，提案解法を適用した。現場の基準に合わせて，キークレーン間干渉の規定時間は 30 分とした。

計算環境は，OS : Windows 7（64-bit），CPU : Intel Core i5-4570（3.20 GHz），RAM : 4 GB の PC とし，最適化問題の求解には Python 言語と最適化ソルバー Gurobi Optimizer 5.6.0（http://www.gurobi.com）を使用した。また，現場からの要求に合わせて，問題 (13)-(18) と問題 (19)-(26) の求解時間の上限をそれぞれ 30 分とした。30 分で求解が終了しない場合は，30 分経過時点の暫定解の結果を示す。

また対象とするターミナルでは，レーン間移動対象コンテナ数が少なくなるように候補解を徐々に削減し，コンテナを自動的に移動させるシステム（以下，現行システム）が稼動している。そこで，提案解法により計算されたレーン間移動対象コンテナ数を現行システムと比較することで，提案解法の性能を検証する。

5.2　計算結果

コンテナ船 A～C に対して提案解法を適用した際の, 問題サイズと計算時間を表 3 に示す。ここでは, Step 1 の問題 (13)-(18) と Step 2 の問題 (19)-(26) に関して, 決定変数と制約式の数, Gurobi によるデータの読込時間と問題の求解時間を示している。表 3 から，船 C の Step 1 の問題 (13)-(18) 以外は全て，1 分以内に計算が終了したことが分かる。

次に，現行システムと提案解法によるレーン間移動対象コンテナ数を表 4 に示す。現行システムと比較して，提案解法がレーン間移動対象コンテナ数を大きく削減しており，特にコンテナ船 A・B の削減割合が大きい。また Step 1 において, 30 分経過時点の暫定解を使用したコンテナ船 C に対しても，レーン間移動対象コンテナ数を半数以下に削減できた。

表 3　問題サイズと計算時間（秒）

		Step 1	Step 2
船 A	決定変数の数	11,619	2,558
	制約式の数	10,975	70,035
	読込時間	1.2	5.6
	求解時間	51.8	5.4
船 B	決定変数の数	2,072	3,914
	制約式の数	1,840	135,707
	読込時間	0.2	10.3
	求解時間	1.8	8.8
船 C	決定変数の数	13,005	4,407
	制約式の数	12,498	209,706
	読込時間	1.4	16.0
	求解時間	1,800.0	25.3

表 4　レーン間移動対象コンテナ数

	船 A	船 B	船 C
現行システム	74	77	165
提案解法	21	28	80

6. おわりに

本研究では，キークレーン間干渉を考慮したコンテナ事前配列問題に対して，整数線形最適化問題による定式化を示した。この問題は，規模の小さいコンテナ船を対象としても制約式の数が非常に多く，実用的な時間で解くことが困難である。そこで本研究では,「コンテナの作業工程への割当」と「コンテナの蔵置レーンと使用ベイの決定」の 2 段階に問題を分割する発見的解法を提案した。

実際のデータを用いた数値実験の結果，ターミナルの現行システムと比較して，提案手法はレーン間移動対象コンテナ数を大きく削減できることを確認した。

対象としたターミナルでは，最も規模の大きいコンテナ船は，本研究の数値実験で扱った船 C の 2 倍程度となる。本研究では，汎用の最適化ソルバーを用いて問題 (13)-(18) と問題 (19)-(26) を求解したが，そのような大規模なコンテナ船に対しては実用的な計算時間で良質な解を得ることができない可能性がある。したがって，問題構造を利用した提案解法のさらなる高速化が今後の課題となる。

参考文献

Bortfeldt, A. and Forster, F., “A Tree Search Procedure for the Container Pre-marshalling Problem”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 217, No. 3, 2012, pp. 531-540.

Caserta, M. and Vos, S., “A Corridor Method-based Algorithm for the Pre-marshalling Problem”, *Workshops on Applications of Evolutionary Computation*, 2009, pp. 788-797.

Caserta, M., Schwarze, S. and Vos, S., “Container Rehandling at Maritime Container Terminals”, Böse, J.W.（ed.）, *Handbook of Terminal Planning*, Springer, 2011, pp. 247-269.

Expósito-Izquierdo, C., Melián-Batista, B. and Moreno-Vega, M., “Pre-marshalling Problem: Heuristic Solution Method and Instances Generator”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 3, 2012, pp. 8337-8349.

Gheith, M., Eltawil, A.B. and Harraz, N.A., “Solving the Container Pre-marshalling Problem Using Variable Length Genetic Algorithms”, *Engineering Optimization*, Vol. 48, No. 4, 2016, pp. 687-705.

Günther, H.O. and Kim, K.H., “Container Terminals and Terminal Operations”, *OR Spectrum*, Vol. 28, No. 4, 2006, pp. 437-445.

Huang, S.H. and Lin, T.H., “Heuristic Algorithms for Container Pre-marshalling Problems”, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 62, No. 1, 2012, pp. 13-20.

Jin, B., Zhu, W. and Lim, A., “Solving the Container Relocation Problem by an Improved Greedy Look-ahead Heuristic”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 240, No. 3, 2015, pp. 837-847.

Lee, Y. and Chao, S.L., “A Neighborhood Search Heuristic for Pre-marshalling Export Containers”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 196, No. 2, 2009, pp. 468-475.

Lee, Y. and Hsu, N.Y., “An Optimization Model for the Container Pre-marshalling Problem”, *Computers and Operations Research*, Vol. 34, No. 11, 2007, pp. 3295-3313.

Stahlbock, R. and Vos, S., “Operations Research at Container Terminals: A Literature Update”, *OR Spectrum*, Vol. 30, No. 1, 2008, pp. 1-52.

Steenken, D., Vos, S. and Stahlbock, R., “Container Terminal Operation and Operations Research—A Classification and Literature Review”, *OR Spectrum*, Vol. 26, No. 1, 2004, pp. 3-49.

United Nations Conference on Trade and Development（UNCTAD）, *Review of Maritime Transport 2014*, United Nations Publication, 2014.［http://unctad.org］

Vacca, I., Bierlaire, M. and Salani, M., “Optimization at Container Terminals: Status, Trends and Perspectives”, *The 7th Swiss Transport Research Conference*, 2007.

Vacca, I., Salani, M. and Bierlaire, M., “Optimization of Operations in Container Terminals: Hierarchical vs Integrated Approaches”, *The 10th Swiss Transport Research Conference*, 2010.

Vis, I.F. and de Koster, R., “Transshipment of Containers at a Container Terminal: An Overview”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 147, No. 1, 2003, pp. 1-16.

Wang, N., Jin, B. and Lim, A., “Target-guided Algorithms for the Container Pre-marshalling Problem”, *Omega*, Vol. 53, No. 1, 2015, pp. 67-77.