

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01187

研究課題名(和文)ブロック積み替え問題に対する効率的解法の研究

研究課題名(英文)Efficient algorithms for the block relocation problem

研究代表者

田中 俊二 (Shunji, Tanaka)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90324657

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：積み上げられた荷物の積み替えにかかわる問題である、ブロック積み替え問題・ブロック整列問題を対象とした。ブロック積み替え問題は、ブロックをある順序にしたがって取り出すものとして、その際に必要となる積み替え回数を最小化する問題、ブロック整列問題は、積み替えなしに取り出すことのできる配置に積み直すものとして、その際に必要となる積み替え回数を最小化する問題である。本研究では、これらの問題に対して効率的な厳密解法を提案した。さらに、積み替え回数ではなく総作業時間を最小化するブロック積み替え問題に対しても厳密解法を提案した。そして、数値実験を行って、提案解法が既存の解法よりも高速であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The block (container) relocation problem and the block (container) pre-marshalling problem were studied. The former problem is to minimize the total number of relocations necessary for retrieving blocks piled up in tiers one by one according to a specified order. The latter is to minimize the total number of relocations necessary for re-ordering blocks in preparation for future retrieval. In this study efficient exact algorithms were proposed for the two problems. An exact algorithm for the block relocation problem to minimize not the total number of relocations but the total crane operation time was also proposed. Extensive numerical experiments showed that the proposed algorithms are much faster than existing algorithms.

研究分野：システム最適化

キーワード：ブロック積み替え問題 ブロック整列問題 組合せ最適化 ロジスティクス コンテナヤード

### 1. 研究開始当初の背景

港湾や貨物駅におけるコンテナターミナルは、コンテナ物流において異なる輸送システムを接続する重要な役割を担っている。コンテナ船、貨物列車、トラックなどによりコンテナターミナルに運び込まれたコンテナは、コンテナヤードに積み上げて一時的に保管され、その後目的地に応じて再び運び出されていく(図1)。コンテナを積み上げる順序と運び出す順序は必ずしも一致しないため、下層に積み込まれたコンテナを運び出す際には、あらかじめ上に積み込まれたコンテナを別の場所(別のコンテナの上)に積み替える必要がある。その際、次に運び出したいコンテナの上に積み替えてしまうと、そのコンテナを再び積み替えなければならない。したがって、コンテナの積み替え先をうまく選択すれば、コンテナ取り出しに必要となる積み替え作業を低減し、コンテナターミナルのスループットを向上させることができると考えられる。そこで、コンテナの積み替えに関する研究が従来行われてきており、なかでも近年注目を集めているのが、ブロック(コンテナ)積み替え問題(block (container) relocation problem)およびブロック(コンテナ)整列問題(block (container) pre-marshalling problem)である。前者は、コンテナを順番に取り出すものとして、その際に必要となる積み替えの手間を最小化する問題、後者は、取り出しに備えてコンテナをあらかじめ取り出しやすい配置に積み替えるものとして、その際に必要となる手間を最小化する問題である。しかし、これら問題に対する解法、とくに厳密解法の研究は、これまであまり進んでいなかった。

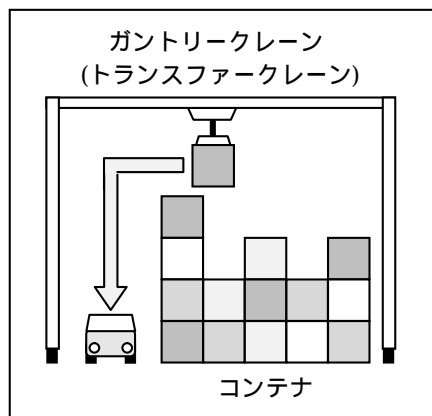


図1: コンテナヤードにおけるコンテナおよびクレーン

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ブロック積み替え問題・ブロック整列問題に対して効率的な解法を構成することである。以下では、コンテナをより一般的にブロックと呼ぶものとする。

ブロック積み替え問題は次のように記述

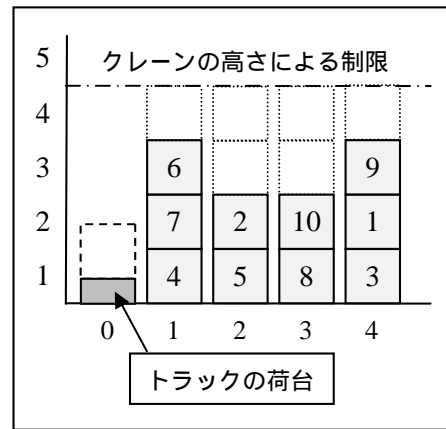


図2: ブロック配置の例(ブロックの番号は取り出し優先順位を表す)

される。積み上げられたブロック1列分をスタック、スタックを横に並べたものをベイという。ブロックの移動にはガントリークレーンが用いられる。ガントリークレーンは、ベイ間およびベイ内(スタック間)を移動することができるが、ブロックを複数のベイ間で移動させるのは、時間がかかる・安全上の問題がある、などの理由から原則として行われない。そこで、ブロック積み替え問題では単一のベイを対象とする。図2のように複数のスタックからなるベイに同じサイズのブロックが積み上げられている状況を考える。ただし、ひとつのスタックに置くことのできるブロック数には、クレーンの高さによる制限があるものとする。各ブロックにはあらかじめ優先順位が与えられており、その順位にしたがってブロックをすべて運び出すものとする。ブロックの運び出しには以下のクレーン操作を用いる。

#### (1) 積み替え操作

スタックの一番上に積み込まれたブロックを、高さ制限に達していない別のスタックの一番上に積み替える。

#### (2) 取り出し操作

優先順位が最も高い(番号がもっとも小さい)ブロックがスタックの一番上に積み込まれているとき、トラックの荷台に移動させる。一般的なブロック積み替え問題では、積み替え操作の総回数が最小となる操作列を求めることを目的とする。

ブロック積み替え問題は、積み替え可能なブロックおよびブロックに与える優先順位により、以下のように分類される。

#### (1) 制限付き問題 / 無制限問題

制限つき問題では、次に取り出すべきブロックの上に積み込まれたブロック(図2では、次に取り出すべき1番のブロックの上に積み込まれた9番のブロック)のみ積み替え可能とするが、無制限問題ではそのような制限を設けない。

#### (2) 優先順位に重複のない問題 / 重複のある問題

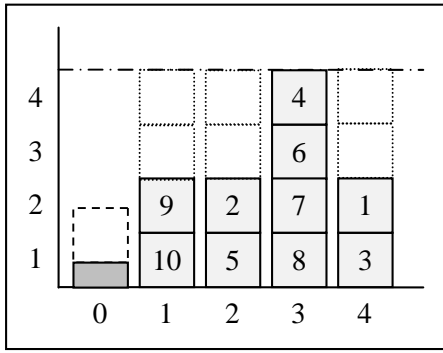


図 3: 積み替えなしに取り出せるブロック配置の例

図 2 では、各ブロックに重複のない優先順位が与えられており、取り出し順序は一意であるが、優先順位に重複のある問題では、同じ優先順位のブロックが複数存在し、それらの間の取り出し順序は任意である。

一方、ブロック整列問題では、ブロック積み替え問題とは異なり、ブロックの取り出し操作は行わずに積み替え操作のみを行う。ブロック整列問題の目的は、積み替えなしにすべて取り出せる配置にブロックを整列させることである。すなわち、図 3 のような、優先順位の低い（番号の大きい）ブロックが下層に、優先順位の高い（番号の小さい）ブロックが上層に積まれた配置に、最小の総積み替え回数でブロックを並べ替えることが目的となる。ブロック整列問題では、優先順位に重複のない問題・重複のある問題を区別せず、すべて重複のある（可能性がある）問題として扱う。

本研究の主目的は以下のとおりである。

- (1) 無制限ブロック積み替え問題に対して効率的な解法を構成する。
- (2) すでに提案している、制限付きブロック積み替え問題に対する解法[1]の改善をはかる。
- (3) 総積み替え回数ではなく、クレーンによる総作業時間を最小化することを目的としたブロック積み替え問題に対し、解法を構成する。
- (4) ブロック整列問題に対する解法を構成する。
- (5) ブロック積み替え問題・ブロック整列問題を広く周知するため、これらの問題をパズルゲーム化してウェブ上に公開する

### 3. 研究の方法

ブロック積み替え問題・ブロック整列問題に対し、分枝限定法に基づく厳密解法を構成するため、分枝限定法の効率を大きく左右する以下の点を中心に検討を行った。

#### (1) 総積み替え回数の下界値計算方法

最適値に近い総積み替え回数の下界値が得られれば、最適解となる見込みのない解の探索を抑制することができる。しかし、下界値の計算に時間がかかると、その利点は相殺されてしまう。そこで、良好な下界値を高速に求めることのできる方法を検討する。

#### (2) 総作業時間の下界値計算方法

総作業時間を最小化する場合は、その下界値を計算する方法を検討する。

#### (3) 無駄な解の探索を抑制するための優越関係の導出

分枝限定法をそのまま適用して解（積み替え操作の列）を探索した場合、たとえばあるブロックを別のスタックに積み替えて、またすぐにもとのスタックに戻す、というような無駄な解が探索されてしまう。そこで、解の間の優越関係を用いて無駄な解の探索を抑制する。具体的には、ある解に対し、少なくともその解と同程度のよさの別の解が存在するかを判定するための条件を導出する。

#### (4) 上界値計算方法の検討

下界値による効率改善には、良好な上界値（近似解）も必要となる。ただし、分枝限定法内で繰り返し適用するためには、十分高速に計算できることも要求される。そこで、高速に動作する貪欲法に基づく近似解法を構成する。

### 4. 研究成果

おもな研究成果は以下のとおりである。

#### (1) 優先順位に重複のない無制限および制限付きブロック積み替え問題

制限付き問題に対してすでに提案している、反復深化分枝限定法に基づく解法を、無制限問題に対して拡張した。

まず、効率的な下界値計算方法を提案した。この下界値は既存の下界値[2]を改善したものであるが、計算方法は少し複雑である。そこで、探索木における親節点での計算結果を利用することで、高速に下界値を計算できることを示した。

つぎに、無駄な解の探索を抑制するための優越関係を導出した。優越関係の導出には、ブロックが取り出されることによるブロック配置の変化を考慮しなければならない。また、得られた優越関係は簡単に判定できるものでなければならない。これらの点に注意して、6通りの優越関係を理論的に導出した。

得られた下界値・優越関係を組み込んだ解法を用いて数値実験を行った結果、ブロック数が 50 個のベンチマーク問題が最大 10 分程度で解けることが示された。従来の厳密解法により 1 時間以内に解くことのできる問題の規模は、ブロック数 30 個程度であり、提案解法の方が大幅に高速であることがわかる。実際、提案解法は、同じ問題を最大 2 秒程度で解くことができた。さらに、提案した優越関係を制限付き問題へと拡張し、既提案の解法[1]の高速化にも成功した。以上の成果は（雑誌論文 1）として掲載されている。なお、C 言語で作成した解法プログラムのソースコードも、ウェブページで公開している。

#### (2) 優先順位に重複のある無制限ブロック積み替え問題

(1) の下界値および優越関係を優先順位に重複のある問題へ拡張した。なお、下界値に

については、2通りの拡張方法を提案した。これらを用いて、優先順位に重複のある無制限ブロック積み替え問題に対する厳密解法を提案し、数値実験を行った。そして、その有効性を検証した(学会発表(2))。

(3) クレーンの総処理時間最小化を目的とした、優先順位に重複のない制限付きブロック積み替え問題

まず、積み替え回数の下界値を用いてクレーンの総作業時間の下界値を計算する手法2通り提案した。つぎに、(1)の優越関係のうち、本問題に適用可能なものを抽出した。これらを組み込んだ分枝限定法を構成して数値実験を行ったところ、既存の数値計画問題としての定式化に基づく解法よりも高速に求解可能であることが示された(学会発表(1))。

(4) ブロック整列問題

ブロック整列問題に対して効率的な厳密解法を構成するために、まず、総積み替え回数の下界値計算法を提案した。具体的には、既存の下界値[3]を2段階で改善するものとして、それらが可能となる条件を理論的に導出した。つぎに、(1)および(2)の優越関係をより単純化した優越関係が成り立つことを示した。さらに、上界値を計算するために、貪欲法に基づく近似解法を構成した。

これらを組み込んだ反復深化分枝限定法を構成した。そして、数多くのベンチマーク問題に対する数値実験から、既存解法よりも大幅に高速に求解可能であることを示した(雑誌論文(2))。ただし、ブロック積み替え問題に対する解法に比べると、求解可能な問題の規模は小さく、ブロック数25個のベンチマーク問題に対する計算時間は最大20分程度であった(既存解法で安定して求解可能な問題の規模は、ブロック数20個弱)。本解法についても、C言語で作成したプログラムのソースコードをウェブページで公開している。

(5) パズルの公開

ウェブブラウザ上で実行可能なブロック積み替え問題・ブロック整列問題のパズルを作成し、公開した。後述のウェブページから実行可能である。

参考文献

[1] S. Tanaka and K. Takii: A faster branch-and-bound algorithm for the block relocation problem, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 13, pp. 181-190 (2016)

[2] F. Forster and A. Bortfeldt: A tree search procedure for the container relocation problem, Computers & Operations Research, vol. 39, pp. 299-309 (2012)

[3] A. Bortfeldt and F. Forster: A tree search procedure for the container pre-marshalling problem, European Journal

of Operational Research, vol. 217, pp. 531-540 (2012)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

(1) Shunji Tanaka, Fumitaka Mizuno: An exact algorithm for the unrestricted block relocation problem, Computers & Operations Research, vol. 95, pp. 12-31 (2018), [査読あり]

DOI: 10.1016/j.cor.2018.02.019

(2) Shunji Tanaka, Kevin Tierney: Solving real-world sized container pre-marshalling problems with an iterative deepening branch-and-bound algorithm, European Journal of Operational Research, vol. 264, no. 1, pp. 165-180 (2018), [査読あり]

DOI: 10.1016/j.ejor.2017.05.046

[学会発表](計9件)

(1) Yuki Inaoka and Shunji Tanaka: A branch-and-bound algorithm for the block relocation problem to minimize total crane operation time, The 19th International Conference on Harbour, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation (HMS 2017), pp. 98-104, 2017/9/18, パルセロナ(スペイン), [査読あり] [Best Paper Award 受賞]

(2) Shunji Tanaka and Fumitaka Mizuno: An exact algorithm for the unrestricted block relocation problem with duplicate priorities, International Symposium on Scheduling 2017, pp. 63-68, 2017/6/23, 名古屋, [査読あり]

(3) 稲岡 有佑紀, 田中 俊二: 移動時間を考慮したブロック積み替え問題に対する分枝限定法, 第61回システム制御情報学会研究発表講演会, CD-ROM (6 pages), 2017/5/23, 京都

(4) 田中 俊二: ブロック積み替え問題に対するmemory-based dominanceの適用, 第59回自動制御連合講演会, pp. 201-205, 2016/11/10, 北九州

(5) 水野 史崇, 田中 俊二: 優先順位に重複のある無制限ブロック積み替え問題に対する下界値計算法, スケジューリング・シンポジウム 2016, pp. 99-104, 2016/9/25, 大阪

(6) Shunji Tanaka and Fumitaka Mizuno: A new lower bound for the unrestricted block relocation problem, 7th International Conference on Computational Logistics (ICCL'16), pp. 14-16, 2016/9/7, リスボン(ポルトガル), [査読あり]

(7) 水野 史崇, 田中 俊二: 優先順位に重複がある無制限のブロック積み替え問題に対する分枝限定法, 計測自動制御学会関

西支部・システム制御情報学会 若手研究  
発表会, pp. 96-101, 2016/1/8, 大阪

- (8) Shunji Tanaka: Extension of the dominance properties for the unrestricted block relocation problem, 2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM 2015), pp. 224-229, 2015/12/7, シンガポール, [査読あり]
- (9) Shunji Tanaka, Fumitaka Mizuno: Dominance properties for the unrestricted block relocation problem and their application to a branch-and-bound algorithm, The 11th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (IEEE CASE 2015), pp. 509-514, 2015/8/25, ヨーテボリ(スウェーデン), [査読あり]

〔その他〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/shunjitanka/brp>

<https://sites.google.com/site/shunjitanka/pmp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 俊二 (TANAKA, Shunji)

京都大学・国際高等教育院/大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90324657