

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04607

研究課題名（和文）現実的なモデルに基づいたブロック積み替え・整列問題の効率的解法

研究課題名（英文）Efficient algorithms for the block relocation and premarshalling problems based on a realistic model

研究代表者

田中 俊二（Tanaka, Shunji）

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） 2,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、積み上げられたブロック（荷物、コンテナなど）を効率よく取り出す、あるいは整列することを目的とした、ブロック積み替え問題・ブロック整列問題（コンテナプリマーシャリング問題）を対象とした．現実的な状況を想定した2種類のクレーン動作モデルのもとで総処理時間を最小化する問題を考え、数値最適化問題としての定式化や、厳密解法の構成を行った．そして、計算機実験により、ブロックをなるべく持ち上げずに移動させることで、総処理時間を大幅に短縮できることを示した．また、総積み替え回数最小化を目的としたブロック積み替え問題に対する厳密解法の改善も行った．

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブロック積み替え問題・整列問題において、異なるクレーン動作モデルのもとで総処理時間を最小化する問題を対象とし、厳密解法を与えた．これにより、クレーン動作モデルの違いが総処理時間に与える影響を陽に評価することが可能となった．あわせて、積み替え回数最小化を目的としたブロック積み替え問題に対する厳密解法の改善を行った．以上の結果は、積み替え・整列問題に対する解法の理論研究に発展に寄与すると考えられる．また、クレーン動作モデルと総処理時間の関係を示したことは、新たなクレーンの開発・普及や、港湾などにおけるクレーンオペレーションの効率化につながると考えられる．

研究成果の概要（英文）：We considered the block (container) relocation problem and the container pre-marshalling problem in this project. The former aims to retrieve all blocks stacked in tiers with the minimum relocation effort, and the latter aims to rearrange blocks with the minimum effort so that they can be retrieved without any relocations in the future. We studied the problems of minimizing total working time, considering two types of crane trajectory models and proposed exact algorithms for them. We showed by computational experiments that hoisting up blocks only to a sufficient height to avoid collisions drastically reduces the total working time. We have also proposed an efficient exact algorithm for the block relocation problem to minimize the total number of relocations.

研究分野：オペレーションズ・リサーチ

キーワード：ブロック積み替え問題 ブロック整列問題 組み合わせ最適化 厳密解法

## 1. 研究開始当初の背景

積み上げられた荷物（ブロック、コンテナ）をクレーンにより移動する場合、クレーンは一番上に積まれた荷物しか動かせないため、下層の荷物を運び出すには、その上に積まれた荷物を別の荷物の上に積み替える必要がある（図1）。決められた順序で荷物を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はブロック（コンテナ）積み替え問題と呼ばれる。また、将来の取り出しに備えてブロックを整列するものとして、その際に必要となる積み替えの手間を最小化する問題はブロック整列問題（コンテナプリマーシャリング問題）と呼ばれる。ブロック積み替え問題・ブロック整列問題に対する従来研究のほとんどは、積み替えの手間の尺度として総積み替え回数を用いており、ブロックを移動させる際のクレーン動作を考慮して総処理時間を最小化する研究はこれまでほとんど行われてこなかった。また、クレーン動作を考慮した研究においては、ブロックを水平移動する際、つねに最上部まで持ち上げるとした動作モデルを用いていた。ガントリークレーンによりコンテナを移動させる場合、最上部まで持ち上げるのが安全上望ましいとされているが、実際には現場のオペレータの裁量に委ねられており、他のコンテナと衝突が起これない高さまでしか持ち上げず移動させる場合も多い。また、センサによりブロック位置を検出することで、衝突が起これない高さまで自動的にコンテナを持ち上げるガントリークレーンもすでに実用化されている。

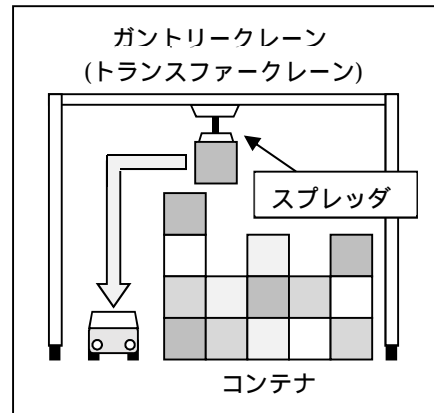


図1: コンテナヤードにおけるコンテナおよびクレーン

## 2. 研究の目的

以上をふまえ、本研究ではブロック積み替え問題・ブロック整列問題を対象とする。これらの問題におけるクレーンの現実的な動作モデルとして、ブロックを水平移動する際に（a）常に最上部までブロックを持ち上げる、（b）他のブロックと衝突しない高さまで持ち上げる、という2種類のクレーン動作モデルを考慮し、総処理時間を最小化を目的とした問題を考える（図2参照）。そして、これらクレーン動作モデルの違いによる影響の評価や、総積み替え回数を最小化した場合との比較を通じて、より現実的なモデルを構築し、理論と現実のギャップを埋めることを研究の目的とする。

## 3. 研究の方法

ブロック積み替え問題・ブロック整列問題はいずれも NP 困難な組合せ最適化問題である。このため、最適解を求めるのは一般に容易でない。そこで本研究では、まず、これら問題を数理最適化問題として定式化し、汎用ソルバを適用することで最適解を求める。ただし、この方法で求解可能な問題サイズは限定的であるため、分枝限定法を用いたより効率的な厳密解法を構成する。分枝限定法の探索効率を大きく左右するのが、目的関数の下界値の計算方法である。そこで、厳密解法を構成する際には効率的な下界値計算方法を中心に検討する。また、優越関係に基づく探索木の縮減方法も検討する。これは、解の探索過程で、より良い（優越する）解が別の探索方向に存在することが判明した場合、現在の探索を打ち切って探索の効率化を図る方法である。さらに並行して、総処理時間最小化を目的とした問題に対する解法の基礎となる、総積み替え回数最小化を目的とした問題に対する解法の改善も行う。構成した解法を用いて計算機実験を行い、クレーン動作モデルの違いが総処理時間に与える影響を評価する。また、総積み替え回数を最小化した場合の解と比較することで、総処理時間最小化と総積み替え回数最小化の差異をより詳細に解析する。

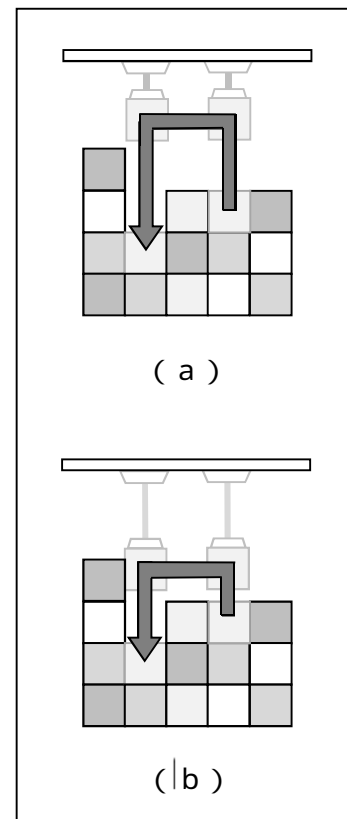


図2: クレーンの動作モデル

## 4. 研究成果

（1）平成30年度は、ブロック積み替え問題の一種である制限付きブロック積み替え問題を対象とした。制限付き問題とは、次に取り出すブロックの上に積まれたブロックのみ積み替え可能

とする問題である．本設定において，( a )，( b ) のクレーン動作モデルのもとで総処理時間を最小化する問題を考え，分枝限定法による厳密解法を構成した．下界値計算方法としては，総積み替え回数の下界値に基づく下界値計算方法を提案した．計算機実験の結果，( b ) の動作モデルを用いることで ( a ) の半分程度まで総処理時間を削減できることがわかった．これは ( b ) の動作モデルを採用するクレーンの有用性を示唆するものであり，実用上意義深い結果であるといえる．しかし，提案解法により求解可能な問題の規模は限定的であり，より詳細な検討を行うためには解法の求解効率を向上させる必要があることもわかった．

( 2 ) 令和元年度は，( b ) のクレーン動作モデルのもとで総処理時間を最小化することを目的とした制限付きブロック積み替え問題を，混合整数線形計画問題として定式化した．この定式化に汎用の数理計画ソルバを適用することで，求解性能は分枝限定法よりも劣るものの最適解を求めることができるようになった．また，これにより分枝限定法の妥当性・正当性の検証が可能となった．さらに，総積み替え回数最小化を目的としたブロック積み替え問題に対する研究として，総積み替え回数の下界値を動的計画法により効率的に求める方法を提案した．一方，ブロック整列問題についても，( a ) の動作モデルを採用するものとして，総処理時間を最小化する問題を混合整数計画問題として定式化した．これにより，小規模な問題については求解可能となった．

( 3 ) 令和2年度は，まず，平成30年度に構成した，ブロック積み替え問題に対する分枝限定法の改善を行った．とくに優越関係テストの検討を行って，( a ) についてはルールに基づく優越関係テスト・メモリに基づく優越関係テストの両方を，( b ) についてはメモリに基づく優越関係テストを，それぞれ適用することにより効率化をはかった．その結果，求解可能な問題規模を現実的な問題サイズにより近づけることができた．つぎに，( a )，( b ) 両方の動作モデルのもとで総処理時間を最小化するブロック整列問題を対象とした．そして，ブロック積み替え問題に対する分枝限定法を拡張することで，厳密解法を構成した．そして，計算機実験により ( a )，( b ) の動作モデルを比較したところ，ブロック積み替え問題と同様 ( b ) の総処理時間が ( a ) の半分以下となることが明らかとなった．

( 4 ) 令和3年度は，総積み替え回数最小化を目的とした問題に対する解法の改善をはかった．まず，既存の定式化とはまったく異なる方法で，制限付きブロック積み替え問題を整数計画問題として定式化した．そして，この定式化における制約条件を緩和した問題を，制約条件および決定変数を追加しながら反復的に解くことで最適解を求めるという，列行生成法を模した解法を構成した．この解法を計算機上で実装し，広く用いられているベンチマーク問題に適用したところ，これら問題の最適解をすべて求めることに初めて成功した．また，別の方向性として，積み替え・取り出しを拡張し，上端だけでなく下端からも積み替え・取り出し可能としたブロック積み替え問題の研究を行った．総積み替え回数を最小化する問題が NP 困難であることを示したのち，再帰計算による下界値計算法を提案した．そして，その下界値を用いた分枝限定法を構成した．計算機実験を行った結果，通常のブロック積み替え問題よりも規模の大きい問題を高速に解けることがわかった．

# 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shunji Tanaka and Stefan Voss	4. 巻 296
2. 論文標題 An exact approach to the restricted block relocation problem based on a new integer programming formulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Journal of Operational Research	6. 最初と最後の頁 485-503
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ejor.2021.03.062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 高田健太郎，田中俊二
2. 発表標題 2種類のクレーン動作モデルを考慮したコンテナ整列問題に対する分枝限定法
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shunji Tanaka and Akira Shikida
2. 発表標題 An improved branch-and-bound algorithm for the blocks relocation problem to minimize total working time under a realistic crane trajectory model
3. 学会等名 International Conference on Computational Logistics (ICCL 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shunji Tanaka
2. 発表標題 A new lower bound based on the longest increasing subsequence for the restricted block relocation problem with distinct priorities
3. 学会等名 International Symposium on Scheduling 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1．発表者名 Shunji Tanaka and Kentaro Takada
2．発表標題 Integer programming model for the pre-marshalling problem to minimize total crane working time
3．学会等名 SICE Annucal Conference 201 (国際学会)
4．発表年 2019年

1．発表者名 敷田暁，田中俊二
2．発表標題 現実的なクレーン動作のもとで総処理時間を最小化するブロック積み替え問題に対する分枝限定法の改善
3．学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会
4．発表年 2020年

1．発表者名 Yuki Inaoka and Shunji Tanaka
2．発表標題 The block relocation problem under a realistic model of crane trajectories
3．学会等名 The 20th international conference on Harbor, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation (国際学会)
4．発表年 2018年

1．発表者名 稲岡 有佑紀，田中 俊二
2．発表標題 現実的なクレーン動作を考慮したブロック積み替え問題の数理計画問題としての定式化
3．学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会
4．発表年 2019年

1. 発表者名 高田 健太郎, 田中 俊二
2. 発表標題 総処理時間の最小化を目的としたブロック整列問題の数理計画問題としての定式化
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡辺 駿, 田中 俊二
2. 発表標題 両側から積み替え可能なブロック積み替え問題に対する厳密解法の検討
3. 学会等名 2021年度 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺 駿, 田中 俊二
2. 発表標題 両端での積み替え・取り出しを考慮したブロック積み替え問題に対する厳密解法の検討
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

#### 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

#### 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	ハンブルク大学			