

# オペレーションズ・リサーチを用いた コンテナターミナルにおける本船荷役作業の高速自動計画技術

## High-speed Automatic Planning Technology for Ship Cargo Handling Operations at Container Terminals Using Operations Research



古賀 祐一\*<sup>1</sup>  
Yuichi Koga

森本 陽\*<sup>2</sup>  
Yo Morimoto

小林 栄治\*<sup>3</sup>  
Eiji Kobayashi

福原 成浩\*<sup>4</sup>  
Shigehiro Fukuhara

坂本 正志\*<sup>5</sup>  
Masashi Sakamoto

武本 浩一\*<sup>6</sup>  
Koichi Takemoto

三菱ロジスネクスト株式会社(以下、ML)では、これまで多くのコンテナターミナルにコンテナ荷役機器と情報管理システム(TOS:Terminal Operation System)を導入することにより、ターミナルの業務効率化に貢献してきた。一方、昨今では、少子高齢化による港湾労働者の減少とグローバル化による輸出入コンテナの取扱量増加に伴う労働力不足を解決する手段の開発が課題である。今般、三菱重工業株式会社デジタルイノベーション本部(以下、DI 本部)と ML は共同で、オペレーションズ・リサーチ(OR:Operations Research)を活用し、ベテランと同程度の本船荷役作業の計画を短時間で自動作成する独自の技術を開発した。本報では、当技術の概要、独自技術、及び評価結果について説明する。

## 1. はじめに

本船荷役作業とは、コンテナターミナルでのコンテナを本船から陸に揚げる作業(以下、陸揚げ作業)と陸から本船に積む作業(以下、船積み作業)に関わる一連の作業を表す。現状、その作業順とコンテナの置き場所は、プランナーによって、本船が運航する上で安全な重心バランスを保ちつつ荷役機器の稼働のムダが最小となるよう、荷役機器の干渉回避や積載重量の上限など多数の制約条件を考慮しながら手作業で作成されている。しかし、これら制約条件を成立させることはプランナーの暗黙知と経験に依存している。また、計画作成には荷役対象のコンテナ数が多いと時間を要することから直前の変更に対応できない可能性がある。今後の少子高齢化と輸出入コンテナの取扱増加に伴う労働力不足を踏まえると、これらの問題は円滑なターミナル運営の妨げになることが懸念されることから、プランナーの熟練度によらず、短時間で本船荷役作業の計画を作成できる手段の開発が急務である。

一方、現実の問題を数理モデルに置き換えて、数学的な理論に基づき、解決策を導くことのできる手法として OR がある。DI 本部では、三菱重工グループにおいて、工場の生産計画立案<sup>(1)</sup>や素材の在庫量計算<sup>(2)</sup>などの様々な問題を OR で解決すべく、長年取り組んできた。

今般、我々は、前述の経験をもとに OR を活用してベテランと同程度の本船荷役作業の計画を作成する問題を数理モデルに置き換えて、数理最適化やルールベースといったアルゴリズムにより短時間で自動計算する技術を開発した。

\*1 デジタルイノベーション本部 EPI 部 主席チーム統括 技術士(経営工学部門)

\*2 デジタルイノベーション本部 EPI 部

\*3 三菱ロジスネクスト株式会社 技術本部 物流ソリューションエンジニアリング部 主席

\*4 三菱ロジスネクスト株式会社 技術本部 物流ソリューションエンジニアリング部

\*5 三菱ロジスネクスト株式会社 技術本部 商品企画部 \*6 三菱ロジスネクスト株式会社 国内営業本部 主席

## 2. 本船荷役作業の概要と課題

本船荷役作業は図1に示す手順で行われる。まず、本船がコンテナターミナルに到着すると、陸揚げする全コンテナの荷役作業から実施される。コンテナは、ガントリークレーン(GC: Gantry Crane)と呼ばれる大型の荷役機器を使って、本船内の置き場から船の近くで待機しているトレーラーのシャーシに積み替えられる。コンテナ数が多い場合には、同時に複数台の GC が使われ、同時並行で作業が進められる。トレーラーはコンテナを載せられた後、事前に指定された一時置き場であるコンテナヤード近くまで移動し、到着した場所で別の荷役機器である RTG (Rubber Tired Gantry crane) (図2)によりコンテナヤードへ荷下ろしされる。そして、陸揚げ作業完了後、逆の流れで、船積みする全コンテナの荷役作業が実施される。

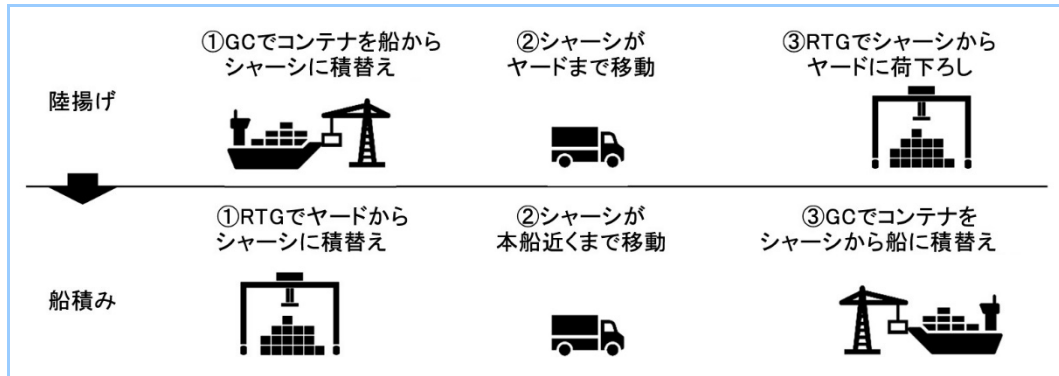


図1 本船荷役作業の流れ



図2 三菱ロジスネクスト株式会社が販売する RTG

前述の本船荷役作業を円滑に推進するには、事前にGCなどの荷役機器にムダのない作業計画を作成しておくことが不可欠である。本船荷役作業計画は計画のタイミングと目的に応じて図3のとおり4つの計画に分割される。(1)では、船積み対象とするコンテナに対して、本船が送り届ける寄港地でのGCの作業がスムーズとなるように、可能な限り寄港地ごとに本船内へ置き場所（積み枠）を枠取りする（ただし、積み枠については本船の運営会社から指定される場合がある）。これにより、予め置き場所がわかっている陸揚げ対象のコンテナも含めれば、全ての作業が本船内のどこで実施されるかが決まる。(2)では、船積み対象のコンテナの置き場所を決めた寄港地ごとの積み枠の中から、本船のバランスが入港時から維持されるよう割り当てる。続いて、(3)では、コンテナの陸揚げと船積みの作業順を、陸揚げであればGC、船積みであればRTGがそれぞれ円滑に作業できるように決める。最後に、(4)では、GC同士が干渉せず、かつ最短で作業を完了できるGCの作業スケジュールを求める。

しかし、実際には、プランナーはそれぞれ異なる様々な制約条件が守られていることを確認しながら試行錯誤して計画を作成している。したがって、各計画で、制約条件を守り、目的に沿った計画を自動で作成する技術が必要である。次章ではその概要を説明する。

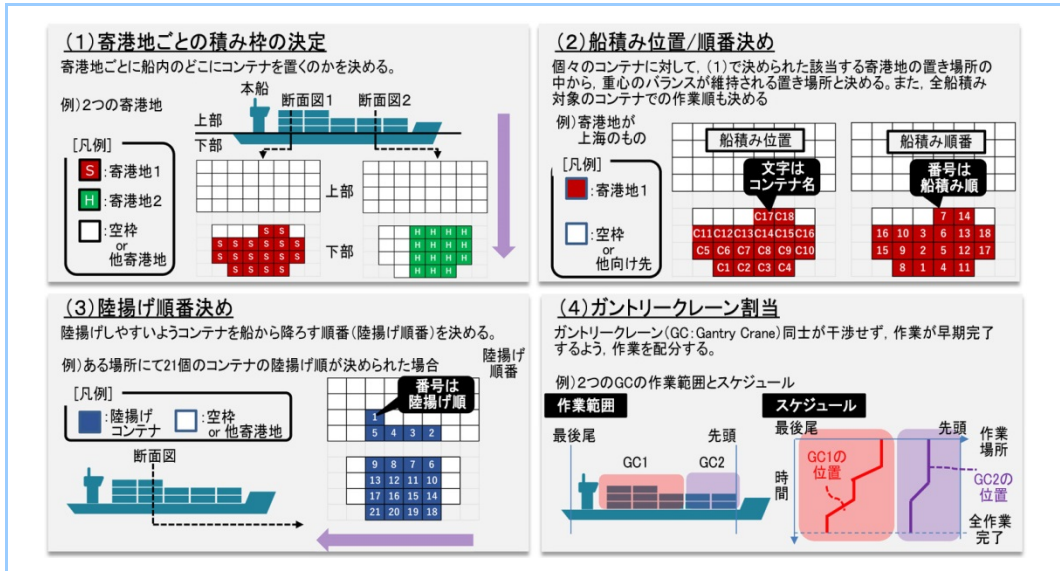


図3 計画一覽

### 3. 本船荷役作業の最適化技術

#### 3.1 技術概要

今回、本船荷役作業の4つの計画段階をそれぞれ数理最適化問題として定義し、最適化計算やルールベースのアルゴリズムにより自動で計算する技術を開発した。各段階では計画を運用する上で求められる制約条件を守りつつ、ベテランと同程度の計画を短時間で作成することが可能である。各段階における問題の概要を以下(1)～(4)に示し、解法を3.1.1～3.1.4節で説明する。

- (1) GCの移動回数が最小となるように寄港地ごとの積み枠を求める問題
- (2) 寄港地ごとの積み枠から、積み重ねる重量の上限などの制約を遵守しつつ、重心バランスの安全性が維持される本船内のコンテナの置き場所を求める問題
- (3) 陸揚げ作業が円滑に推進できる作業順を求める問題
- (4) GC同士が干渉することなく最短で作業を完了できるGCへの作業割当を求める問題

##### 3.1.1 寄港地ごと積み枠を求める手法

本手法では、寄港地ごとに使うベイ数の上限などの制約条件(表1)を遵守しつつ、GCの移動回数が最小となる積み枠を算出する。具体的には、本手法の特徴は、前述の制約条件の下で、GCの移動回数が最小となる積み枠を、数理最適化技術により膨大な候補(積み枠への配置候補)の中から効率的に導き出すことである(図4)。ここで、数理最適化技術を用いた解法について説明する。まず、STEP1では寄港地ごと積み枠を求める問題で要求される制約条件(表1)と目的関数(GCの移動回数の最小化)を数式に置き換える。図5には表1に記載のNo.1～2の条件を定式化したものを掲載している。この数式を入力として、市販の最適化ソルバ(例、Gurobi)により、分枝限定法や分枝切除法など様々な数学的な理論を用いて最適化計算が行われる。

表1 制約条件の例

No.	制約条件
1	同一高さ方向に積むことのできるコンテナ数は定められた上限を超えてはいけない。
2	寄港地ごと積み枠を確保した位置にGCは必ず一度だけ移動する。
3	同一高さ方向に積むことのできるコンテナの総重量は定められた上限を超えてはいけない。
4	同一寄港地行きの船積み作業を行う際にGCの移動回数が定められた上限を超えてはいけない。
5	同一高さ方向に一定種類以上の寄港地行きのコンテナは積まない。
6	寄港地ごと船積みするコンテナの数と積み枠数は一致する。

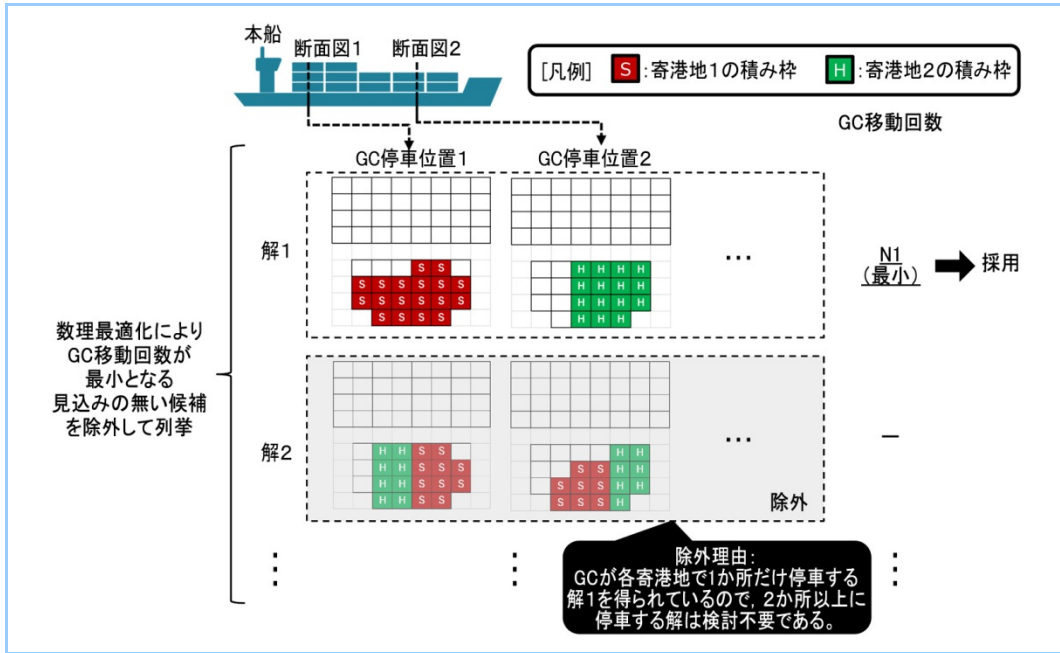


図4 寄港地ごと積み枠を求める手法の概要

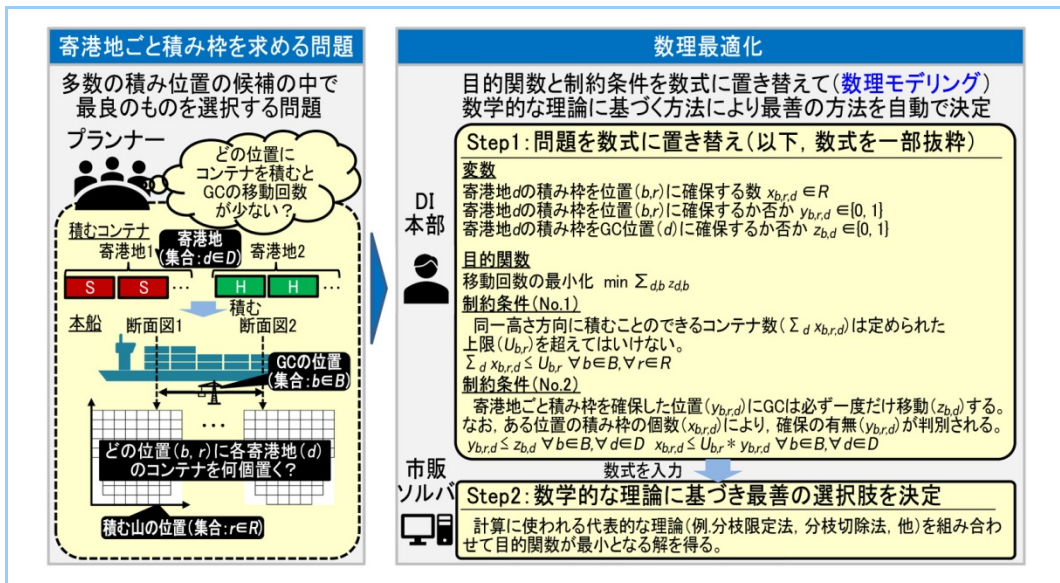


図5 数理最適化技術を用いた解法

### 3.1.2 船積み位置と順番を決める手法

本手法では、コンテナの種類別の置き場所の規制や段積み時の重量上限といった制約条件(表2)を遵守しつつ、寄港地ごとの積み枠の中から、各コンテナの置き場所と作業順を算出する。本手法の特徴は、前述に記載した制約条件の下で、本船内のコンテナの置き場所と作業順を入港時との重心の差と RTG がヤードからコンテナ取り出す際の荷繰り回数が最小となるように数理最適化技術により効率的に導き出すことである。数理最適化技術による計算の流れは 3.1.1 節の制約条件と目的関数を本項に入れ替えれば同等である。なお、RTG の荷繰り作業とは、船積み対象のコンテナの上に積まれている別のコンテナを一時退避する作業であり、本来、船積み順に上から積まれているのであれば発生しない作業である。

表2 制約条件の例

No.	制約条件
1	同一高さ方向に積むことのできるコンテナの総重量は定められた上限を超えてはいけない。
2	寄港地ごとの積み枠の中から置き場所を選択する。
3	コンテナの種類別に規制される場所には置かない。例えば、冷凍コンテナであれば、電源がついている場所以外に置かない。
4	危険品は互いに定められた距離を確保して置く。

3.1.3 陸揚げ順番を決める手法

本手法では、陸揚げコンテナに対し、円滑に推進できる陸揚げの順番を決定する。本手法の特徴は、プランナーの経験と勘に基づくルールベースにより、自動で陸揚げコンテナに作業順が割り当てられることである。経験と勘とは、例えば、図6に示す通り、GC の設置される陸上側から取り出した方が、コンテナを避けて移動する手間がなくなることなどが挙げられる。

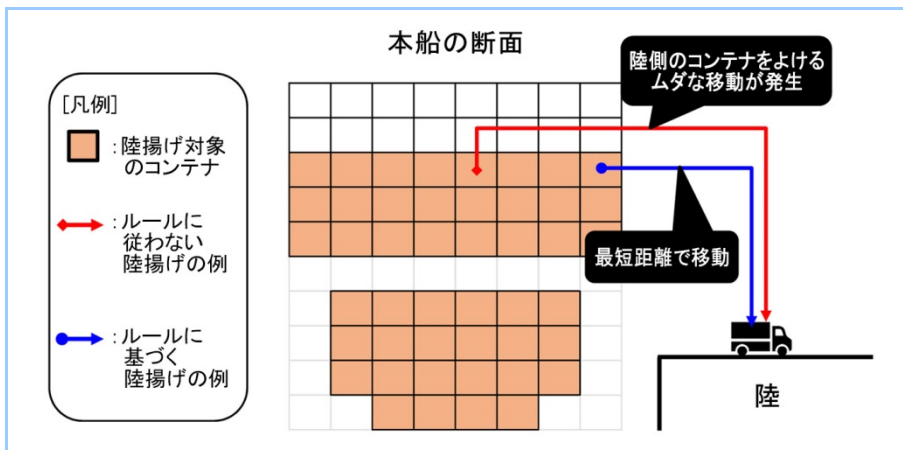


図6 プランナーの経験と勘に基づく陸揚げ順決めの効果例

3.1.4 GC への作業割当手法

本手法では、GC 同士が干渉しないなどの制約条件を遵守しつつ作業時間が最短となる GC の台数と作業順を算出する。本手法の特徴は、GC ごとの揚げ作業と積み作業を行う範囲の分割パターンと走行パターンから、陸揚げと船積みの作業手順で、最短で作業が完了できる組み合わせを算出することである(図7)。

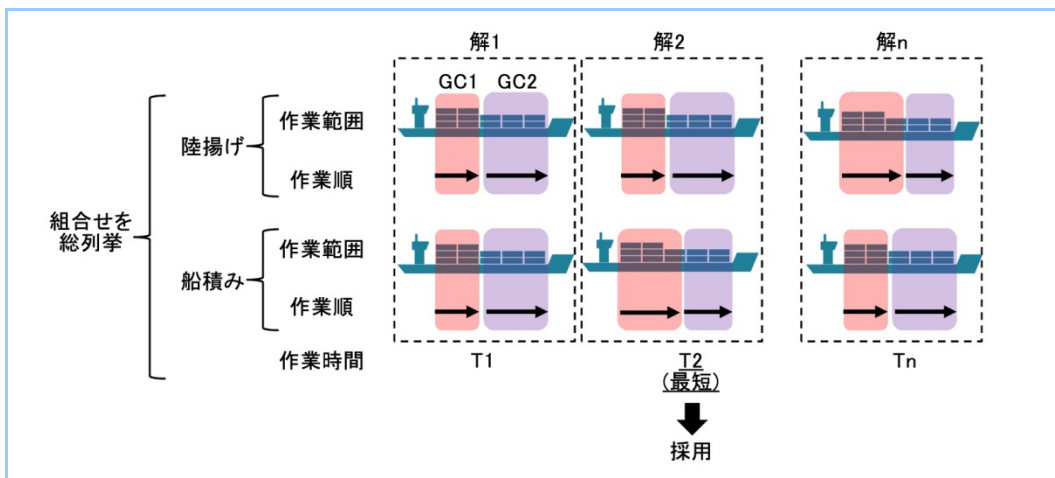


図7 GC への作業割当手法の概要

3.2 評価結果

3.1 節の(1)～(4)の技術の有効性を確認するため、実在するコンテナターミナルの実績をもとに設定した最大規模の本船を対象に、本船荷役作業の計画を算出し、計算にかかる時間を定量評価した。計算対象とする本船は、陸揚げと船積みされるコンテナ数をそれぞれ 1000 本とし、コ

ンテナの重さの分布を変えた複数パターンを用意した。

その結果、熟練プランナーが作成する場合と比べて、重心バランスの安全性と荷繰り回数が同等となる荷役計画の作成時間を約 75%短縮でき、本開発技術の有効性を確認できた(図8)。

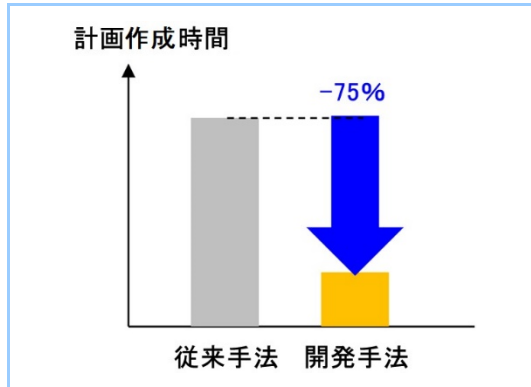


図8 計画作成時間に対する本船荷役作業計画最適化技術の有効性確認結果

## 4. まとめ

本報では、本船荷役作業の計画作成に要する時間短縮のため、本船が安全に運航できる重心バランスを維持しつつ、荷役機器の効率的な作業順と本船内のコンテナの置き場所を数学的なアルゴリズムにより自動で求める技術について紹介した。そして、プランナーが計画する場合に比べ、ベテランと同程度の計画作成に要する時間を大幅に短縮できることを示した。既に ML が販売する TOS<sup>(3)</sup>に組み込んでおり、今後は、国内のコンテナターミナルに順次展開(2024 年度に稼働開始予定)すると共に、ヤードでのコンテナの置き場所や RTG の作業スケジュールなど本船荷役作業に関わる他の計画作成の自動化にも取り組み、ターミナル全体の業務効率化の実現に貢献していく。

### 謝辞

本報の最適化技術開発にあたり、京都大学数理解析研究所 牧野和久教授には有益なご助言を賜りました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) 三菱重工業, MHI REPORT 2017(2017), p20
- (2) 古賀祐一ほか, 修理期間短縮を実現する在庫戦略立案技術, 三菱重工技報, Vol.60 No.4(2023)サービス技術特集
- (3) 三菱ロジスネクスト, HOME>製品情報>特殊搬送車両>港湾荷役機械>コンテナターミナルシステム, (2023) [https://www.logisnext.com/product/product-12/container\\_system\\_5.html](https://www.logisnext.com/product/product-12/container_system_5.html)