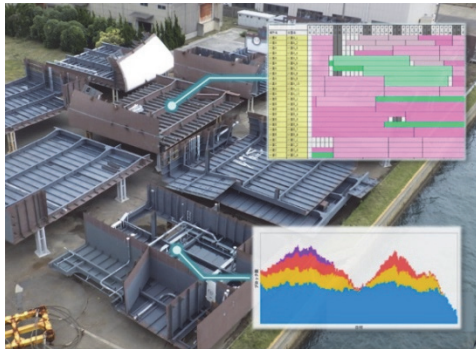


造船所の建造能力向上のための 数理最適化を用いたブロックストック計画技術

Block Storage Planning Using Mathematical Optimization
for Enhancing Shipyard Construction Capacity



昆野 修平^{*1}
Shuhei Konno

笠野 学^{*2}
Manabu Kasano

木本 亮^{*3}
Ryo Kimoto

小林 康高^{*4}
Yasutaka Kobayashi

竹本 圭吾^{*4}
Keigo Takemoto

松岡 義和^{*4}
Yoshikazu Matsuoka

三菱造船株式会社では、建造隻数増に向けた建造能力の拡大に取り組んでいる。本報では、この取組みの一環として開発した数理最適化を活用したブロックストック計画の自動策定技術について報告する。過去の実績データを用いた比較評価により、従来の手作業による計画と比べてブロックの移動・保管に掛かる費用を最大 42%削減できることを確認し、本技術が造船の建造プロセスを効率化できることが示された。

1. はじめに

造船事業における建造能力の拡大には、設備投資だけでなく、生産計画の最適化や工程管理の合理化によるリードタイム短縮が不可欠である。一般に、船舶の建造プロセスでは、船体を工場設備の能力に適した大きさのブロックで構成し、組立工場内で加工し組み立てて、これを船台上またはドック内に順次搭載していくことで建造する⁽¹⁾(図1)。組立工場で完成したブロックは先行艀装や塗装等の地上工事が行われることや、ブロックの搭載は工場組立と比べて短期間に行われることなどから、組立直後に即座に搭載することは困難であり、搭載前のブロックは予めストックしておく必要がある。このため造船所内にストック用の敷地(以下、ストックヤード)が設けられていることが多い。ストックヤードの面積は有限であり、またブロックの移動や場所の使用に掛かる費用は区画ごとに異なることなどから、ストックヤードにおけるブロックの運用計画(以下、ブロックストック計画)では、建造の工程を順守しつつも、費用を最小とするブロックと区画の組合せを決定することが望まれる。三菱造船株式会社では、現状、この計画策定はベテランの担当者に依存しており、かつ多大な時間と労力を要している。さらに、候補となるブロックと区画の組合せは膨大であるため、費用を最小化するような合理的な計画を手導出することには限界がある。

そこで、ブロックストック計画を数理モデルとして定義し、最適化計算によって自動策定する技術、及び、本技術を現場で利用するためのシステムを開発した⁽²⁾。



図1 工場で組み立てられているブロック(左写真)と搭載されているブロック(右写真)

*1 三菱重工業株式会社 デジタルイノベーション本部 デジタルインテリジェンス研究開発部

*2 三菱重工業株式会社 総合研究所 ファクトリーイノベーションセンター 室長 技術士(経営工学部門)

*3 三菱造船株式会社 造船工作部 課長

*4 三菱造船株式会社 造船工作部

2. ブロックストック計画の最適化技術

2.1 ブロックストック計画の概要

図2に、ブロックストック計画の例を示す。各日のストック状況は、ストックヤードの区画ごとの格子状の平面配置図として表現できる。計画は建造スケジュールに従って作成される。組立工場で完成されたブロックは翌日までにいずれかの区画に保管され、搭載されるブロックはストックヤードから払い出される。また、組立後のブロックは先行艀装工場等の作業内容に応じた専用の工場で作業が行われることがあり、各工程のスケジュールに従ってブロックを移動する。(このような工場は厳密にはストックヤードではないが、本計画においては他のヤードと同様に扱う。)さらに、ブロックによっては、搭載直前に、工場で組み立てた複数のブロックを合体接合する作業である合体・総組を行うことがある。このため、合体・総組のスケジュールに従い、所定の区画で所定のブロックの組合せを集約して配置する。同図は、一日分の例を示したものであるが、実際ではブロック移動に関わる人員や設備使用の予定を計画的に確保しておく必要があることから、数週間から数か月分の計画を作成することが求められる。

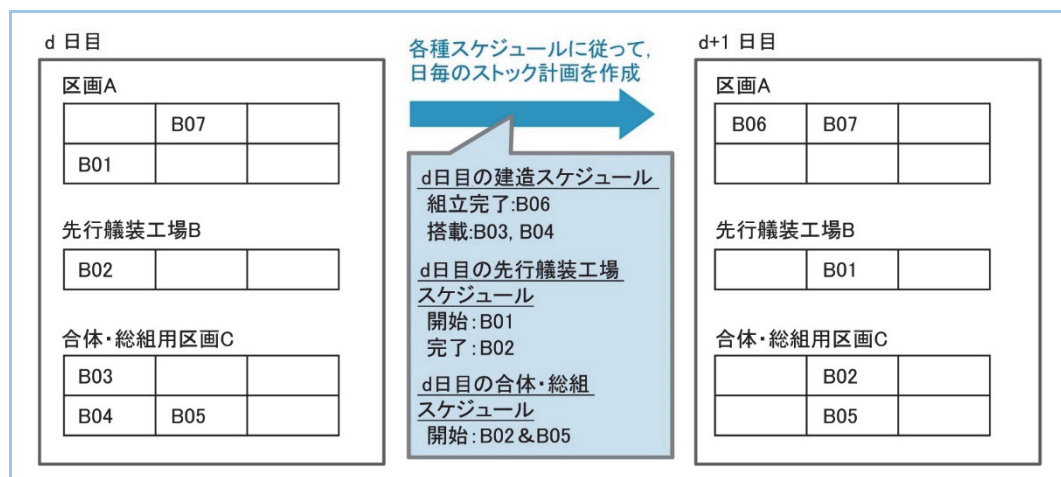


図2 ブロックストック計画の例

2.2 ブロックストック計画における制約条件の整理

表1に、計画策定実務の担当者へのヒアリングを通じて整理した、ブロックストック計画における主要な制約条件を示す。制約 No.1, 2 は、ブロックの配置に関する論理的な整合性を担保するための制約である。No.3 以降は、業務上の要求に基づき定義した制約である。

表1 ブロックストック計画における主要な制約条件

No.	項目	説明
1	ブロックの配置	保管開始から終了までの間、何れか1つの配置位置に必ず配置する。
2	配置位置の配置可能数上限	各位置には、ブロックを1つまでしか配置できない。
3	禁止する配置位置	作業場所の制限や移動設備能力に応じて、保管禁止される配置位置がある。
4	作業工程の考慮	作業工程上の前後関係を考慮し、同じブロックはなるべく同じ位置に保管する。
5	隣接させるブロックペア	合体・総組の対象ブロックは、隣り合う位置に必ず配置する。
6	ブロックの大きさ	ブロックの大きさに応じて、占有される位置の数が変わる。

図3に、ストック期間中のブロックの作業と制約 No.3～5 を説明する概念図を示す。ブロックストック計画では、1章で述べたように、組立工場で完成された日(図中の組立完了日)から搭載日までの間のストック場所を決定する。先行艀装や合体・総組等の作業を伴うブロックは、各工程のスケジュールで定められた開始日及び完了日に従って配置場所を決定する必要がある。例えばブロック1は期間2で先行艀装工場のような所定の場所に配置しなければならない場合がある(制約 No.3)。一方、作業が行われない期間1や期間3では、ストック可能ないずれかの区画に配置する。その際、作業前後で区画に空きがある場合には、同一の位置で継続して保管することで移

動回数を抑えられるため、連続する期間で同一の位置に配置することが望ましい(制約 No.4)。また、合体・総組の対象となる複数のブロックは、それらを隣接するように配置する必要がある(制約 No.5)。なお、同図は総組が行われず合体のみが行われるブロックの例であるが、合体後から搭載までにさらに他の合体ブロックを接合する作業である総組が行われる場合もある。

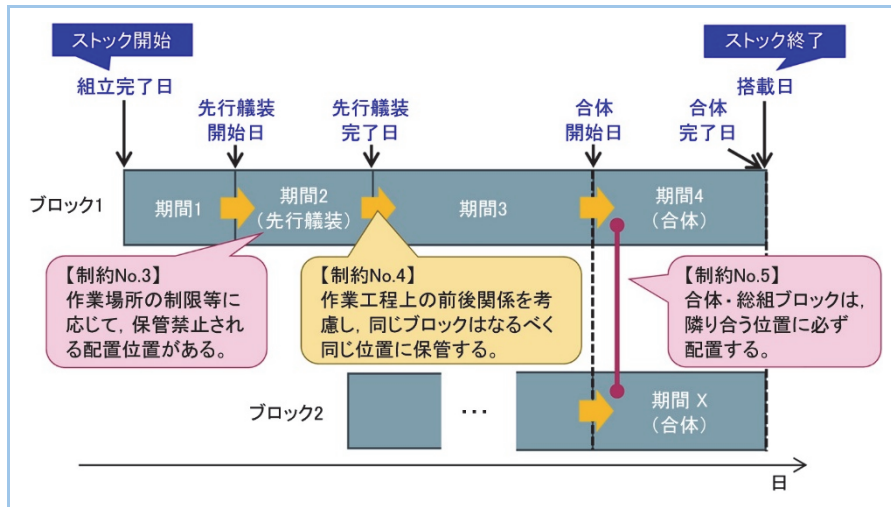


図3 ブロックと作業工程

2.3 数理最適化モデルの構築

ブロックやストックヤードに関する入力データに基づいて、ストック計画策定の意思決定の要素を 0-1 整数変数で表し、2.2 節に示した制約条件を表現する数式(以下、制約式)と、ブロックの移動・保管に掛かる費用等の計画評価指標を表す関数(以下、目的関数)から構成される数理最適化モデルを考案した。以下に、考案したモデルの概要を示す。なお、以降の説明は、モデルの着想や構造を理解しやすくするため、一部簡略化して記述している。実装したモデルでは業務上の各種制約に基づく入力データや制約式等を追加し、計算効率向上のためのモデル化の工夫も取り入れている。

(1) 変数

表2に、本モデルにおける変数の例を示す。図3に示したブロックと期間の表現に従うと、ブロックストック計画は、ブロック b を、そのブロックに対応する期間 $t(b)$ の間にヤードを構成する区画内のどの位置に保管するかという計画であるため、各位置を特定する位置番号 j を用いて、決定変数 x を定義する。また、連続する2つの期間で、保管位置の変更の有無を判別するための変数 y を定義する。

表2 変数の例

変数名	説明
$x(b, t(b), j)$	ブロック b を、期間 $t(b)$ で、位置 j に保管するならば 1、そうでなければ 0 をとり、0-1 整数変数
$y(b, t(b), j)$	ブロック b を期間 $t(b)$ と期間 $t(b)+1$ の間で、位置 j にて保管し続けて保管位置が変わらないならば 1、そうでなければ 0 をとり、0-1 整数変数

(2) 制約式

表3に、制約式の例を示す。表1に示した制約条件は、変数を用いて不等式の形式にて定義する。

表3 制約式の例

制約式	説明
任意のブロック b と期間 $t(b)$ に対して、 $\sum_{j=1}^{ J } x(b, t(b), j) = 1$	すべてのブロック b は期間 $t(b)$ に、すべての配置位置 $J = \{1, \dots, J \}$ のいずれか 1 か所に必ず配置される。制約条件 No.1 に対応。
計画対象期間中の任意の日付 d と、任意の位置 j に対して、 $\sum_{b, t(b) \in \text{Stored}(d)} x(b, t(b), j) \leq 1$	計画対象期間の各日付、各位置において、配置されるブロック数は、高々 1 個 (0 個または 1 個) である。制約条件 No.2 に対応。 Stored(d) は、 d 日目に保管しなければならないブロック b と期間 $t(b)$ の集合を表す。
任意のブロック b と期間 $t(b)$ に対して、 $2y(b, t(b), j) \leq x(b, t(b), j) + x(b, t(b) + 1, j)$	変数 y を定義するための式であり、『 $y(b, t(b), j) = 1$ ならば $x(b, t(b), j) = x(b, t(b) + 1, j) = 1$ 』という論理関係を定義する。

(3) 目的関数

目的関数 (最小化関数) の一部は、ブロック b を位置 j に移動・保管する際の費用 cost と、同一の場所に保管した際の費用の低減率を表す係数 α を用いて、

$$\text{目的関数} = \sum_b \sum_{t(b)} \sum_j \text{cost}(b, j) \cdot x(b, t(b), j) - \sum_b \sum_{t(b)} \sum_j \alpha \cdot \text{cost}(b, j) \cdot y(b, t(b), j)$$

と定義する。第一項は、ブロック b を期間 $t(b)$ に位置 j へ移動して保管したときの費用の総和を表す。この項を最小化することで、工場や船台等から離れており移動費用が大きくなる場所への配置を抑制し、移動に掛かる費用の低減を図る。第二項は、ブロック b の期間 $t(b)$ の後に保管位置が変わらない、つまり $y = 1$ となった場合に、当該ブロックの移動 1 回分の費用を打ち消すことを意味する。したがって、この目的関数は、同じ位置に保管したときの費用の低減を考慮したものとなっている。

2.4 ブロックストック計画最適化システムの開発

2.3 節に示したモデルを利用して汎用の数理最適化ソルバーで計算することで、最適化されたブロックストック計画を自動策定するシステムを開発した。図 4 に、本システムの主操作画面及び最適化計算結果から得られる計画帳票を示す。計画策定時の入力となるデータや、システムの入力となるブロックストック計画に関するデータは Excel の表形式で管理されることが多いことから、入力データの取込み・編集をはじめ、ソルバーによる最適化計算実行、各種帳票の出力までの全操作を 1 つの Excel 画面で容易に実行できるようにした。

本システムによれば、図 2 に示した従来形式の帳票生成に加えて、人手による計画作成では困難であった 1 年以上の計画を一括に作成できるようになり、長期的な保管場所の推移や、ピーク時にレンタルする区画の必要期間等を見積もることが可能となった。

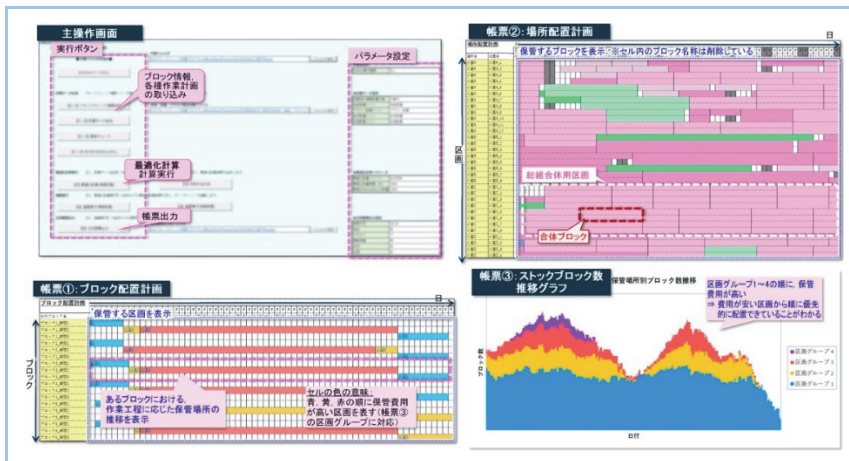


図4 システム画面例

3. 実データによる検証

2.4 節に示したシステムを用いて、開発した技術の効果検証を行った。検証にあたっては、過去のある時点におけるブロック情報や搭載スケジュール等の各種スケジュール、ストックヤードの区画や位置関係に関する実際のデータを作成し、業務上求められる上限時間内で最適化計算を行って、計画を作成した。

図 5 に、開発した技術による計画と実際の運用実績とで、移動・保管に掛かる費用を試算し比較した結果を示す。本技術によれば、工程間の移動、特に工場から離れ移動費用の大きい場所への移動回数を極力少なくする運用計画を実現することで、移動・保管に掛かる費用を最大 42%削減でき、造船の建造プロセスを効率化できることを確認した。

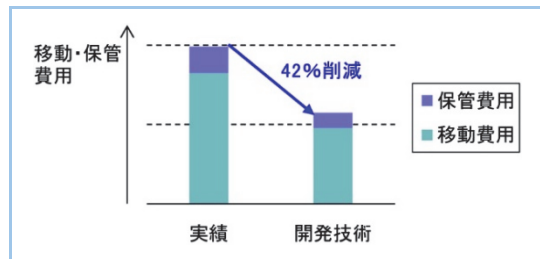


図5 移動・保管に掛かる費用の比較結果

4. まとめ

本報では、造船所の建造能力拡大のため、ストックヤードにおけるブロックの運用計画(ブロックストック計画)を数理モデルとして定義し、最適化計算によって自動策定する技術と、本技術を現場で利用するためのシステム開発について紹介した。過去の実績データを用いた効果検証により、実際の運用実績よりも移動・保管に掛かる費用を最大 42%削減できることを確認した。

今後は、ブロックストックの前工程であるブロック組立等の他の工程においても、人手で作成している計画に数理最適化等の技術を適用することでさらなる最適化・自動化を進めるほか、それらをシステム連携することで造船工程全体の業務効率化を図り、建造隻数増に向けた建造能力の拡大に貢献していく。

参考文献

- (1) 奥本泰久, 造船技術と生産システム, 成山堂書店, (2009)
- (2) Konno, S., A Mixed-Integer Programming Model for Optimizing Block Storage Planning in Shipyards, 24th Conference of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS2026), (2026)