

船舶建造工程シミュレーションを用いた生産計画立案手法の現場適用に関する研究

大久保, 友結
横浜国立大学大学院理工学府

満行, 泰河
横浜国立大学大学院工学研究院

<https://hdl.handle.net/2324/7397152>

出版情報 : Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. 37, pp.115-123, 2023. Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

バージョン :

権利関係 : Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International



船舶建造工程シミュレーションを用いた 生産計画立案手法の現場適用に関する研究

学生会員 大久保 友 結* 正会員 満 行 泰 河**

Study of the practical application of production planning method using shipbuilding process simulation

by Yui Okubo, *Student Member* Taiga Mitsuyuki, *Member*

Summary

Shipbuilding is one of the most complex production systems in the manufacturing industry because of the incredible variety of parts and highly complex processes. However, production plans are currently prepared manually depending on the experience of expert workers. In this paper, a production planning method based on shipbuilding process simulation is proposed for use in actual shipyards, which simultaneously satisfies the needs of both production managers, who require on-time delivery plans, and field workers, who aim to minimize waiting time and improve operating rates. Specifically, the authors developed a hybrid method that combines backward and forward simulation for planning front-loading to meet deadlines and reduce waiting time. In the case study, the method was applied to a sub assembly conveyor line in an actual shipyard to demonstrate the validity and feasibility of the simulation results.

1. 緒 言

近年、日本の造船業は、中国や韓国の著しい台頭により厳しい状況にある。近隣国との価格競争に対応するためには、船舶の建造工程における高度な建造マネジメント手法の確立を行い、生産性向上を図っていくことが不可欠である。船舶建造の生産性向上を目指す重要な要素となるのが、生産計画である。生産計画とは、造船所内の限られた生産資源を上手く使い、納期に合わせて如何に効率的に低コストで船を製造していくかを計画する業務のことである。しかしながら、船舶は一隻につき数十万点の部材と大量の設備・作業者がそれぞれ複雑に関連して建造されるため、これらすべての関係性を考慮した生産計画の作成は困難である。現状、最も複雑な工作現場レベルの作業計画は、生産管理者が作成した納期情報を含む大まかな日程計画を元に、作業場の班長が過去の経験則に基づいた詳細な指示情報を加えて作成することが

多い。そのため、生産管理者は現場の詳細な作業計画と進捗を正確に把握できず、適切な現場管理や計画評価を実施できていないという課題が存在する。

デジタル技術の発展に伴い、属人化された造船所の生産管理業務に対して、シミュレーションや最適化計算を活用した業務支援や効率化を図る研究が数多く取り込まれるようになってきた。青山ら[1-3]は、生産計画立案の支援を目的として、離散的な事象をモデル化することができるペトリネット・モデルを用いて造船所の生産資源の様々な制約を考慮した工場シミュレータを構築した。梶原ら[4-5]は、ブロック組立工程を Max-Plus 代数に基づく線形システムで表現し、モデル予測制御という手法によって、ジャストインタイムが実現されるブロック組立開始日とストック期間を調整する制御則を導出できることを示した。大野ら[6]は、船殻工場の生産管理システムの課題解決を図り、ブロック分割の評価、そのシステムのプロダクト・フロー、中日程段階の計画平準化方策と評価方法を提案している。佐々木ら[7]は、市販ラインシミュレータで工場制約を外部プログラムで制御したバーチャルファクトリーによる生産計画システムを開発し、中日程計画の検討時間を短縮する手法を提案している。Jeong ら[9] は、Lee ら[8]が提案した PPR-S (Product, Process, Resource, and Schedule)に基づいて定義された情報モデルに対して、造船所の KPI(Key Performance Index) を考慮したプロセス中心のシミュレーションを行うフレームワークを構

* 横浜国立大学大学院理工学府

** 横浜国立大学大学院工学研究院

築し、マスタープラン (中間計画) の検証を行った。Krause ら[10]は、DES(離散事象シミュレーション)を用いて造船所の投資とスケジューリングを支援するアプリケーションツールを開発した。Woo ら[11]は造船所の屋外シミュレーションモデルをベースにブロックロジスティクス支援システムを開発した。

上記の研究では、造船工程の一部や特定の製品・工程を対象としてモデル化を実施している。また、マスタープランなどの中長期計画を対象とした研究は多いが、実際に作業者が使えるような粒度の作業計画を対象とした例は少ない。造船業界でシミュレーションによる生産管理を実現するためには、特定の工程に特化したモデル化とシミュレーションにとどまっている範囲を広げ、造船所のどの工程でもモデル化できる統一的な枠組みが必要である。著者ら[12]は、造船業特有の複雑な生産システムを考慮して、対象の生産工程を Product モデル、Workflow モデル、Workplace モデル、Team モデルの 4 つの汎用的なモデルでモデリングすることで、プロセスシミュレーションを用いて納期を遵守した生産計画を自動で立案できる手法を提案した。更に、船体ブロックを製造する仮想の造船所を対象にケーススタディを実施することで、提案手法が造船業の生産計画やプロジェクト管理における意思決定ツールとして有効であることを示した。本論文では、著者ら[12]の成果であるプロセスシミュレーションを利用した生産計画立案手法を実際の造船所へ適用することを試みる。特に、実際の生産現場で活用するためには、納期順守の計画を求める生産管理者側と、手待ちをなるべく少なくして稼働率向上を狙う現場作業側側の両者のニーズを同時に満たす必要がある。ここでいう「納期順守の計画」とは、単に納期より前に出荷を目指すだけのものではない。保管場所(ストックヤード)の面積が限られている場合は、必要以上に早く製品が完成すると在庫過多の原因につながる。よって、個々の製品が納期に合わせてジャストインタイムで出荷し、在庫保有コストを抑えた計画を目指す。本論文では、これらの点を考慮するために新たなスケジューリング手法の提案を加えた点が特徴である。

本論文の構成は次の通りである。第 2 章では、管理側と現場側の双方にとって最適な計画を立案できる新たなスケジューリング手法を提案する。第 3 章では提案手法を小さなモデルに適用し、その有効性を示す。第 4 章では実際の造船所の生産現場に適用し、現場適用の可能性を示す。第 5 章では今後の展望について考察する。

2. 提案手法

本論文では、納期厳守かつ最小在庫を狙った計画を求める生産管理者側と、手待ちをなるべく少なくして稼働率向上を狙う現場作業側側の両者のニーズを同時に満たすために、手待ちをなるべく少なくして稼働率向上を狙うフォワードシ

ミュレーション[13]と納期順守の計画を出力するバックワードシミュレーション[14-15]の両方を活用したハイブリッドシミュレーション手法によって生産計画を立案する。

2.1 対象の建造工程のモデル化[12]

Fig.1 に対象の建造工程をモデル化するために採用したシステムモデルとその関係の概要を示す。先行研究[12]と同様に、製品を表す Product モデル、作業内容を表す Workflow モデル、作業場と設備を表す Workplace モデル、組織と作業者を表す Team モデルの 4 モデルで対象の建造工程をモデル化する。各モデルの詳細と、モデルを構築するために必要なデータの詳細については先行研究[12]を参照されたい。

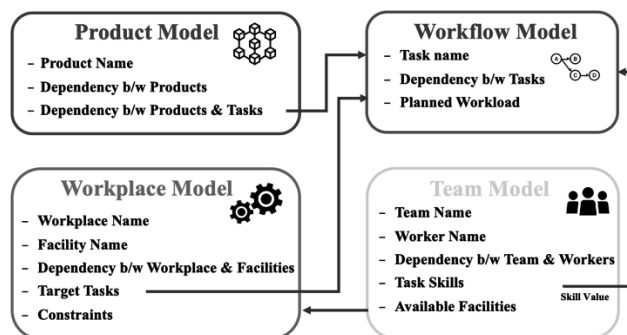


Fig. 1 Proposed System Models and These Relationships. [12]

2.2 フォワードシミュレーションとバックワードシミュレーション

フォワードシミュレーションとは、製品を生産ラインに投入する時刻を開始点とし、時間軸の流れに従って、タスク間の実行順序通りに生産資源を割り付けていく手法である。資材が揃い次第、随時的に作業員や設備を割り当てるため、生産オーダーの最早完了時刻を算出することができる。Fig.1 に沿って作成したモデルを用いてフォワードシミュレーションを実施するためには、タスクや作業員割り当てのディスパッチングルール[16]を設定して離散事象シミュレーションを実施する必要がある。

バックワードシミュレーションとは、製品が生産ラインに出荷する時刻を開始点として、時間軸に遡って、タスク間の実行順序の逆向きに生産資源を割り付けていく手法である。Fig.1 に沿って作成したモデルを用いてバックワードシミュレーションを実施するためには、Fig.1 におけるタスクの依存関係をすべて逆順にし、最後尾に Auto タスクを追加した Workflow モデルを作成した上で、離散事象シミュレーションを実施する必要がある。Auto タスクとは、特定の作業場、設備、作業員を割り当てずに処理できるタスクで、Okubo

ら[17]が提案している.一つひとつの製品の納期が具体的に決まっている場合,プロジェクト全体の納期に対して,該当の製品がいつ出荷するべきかを Auto タスクの計画工数で設定することで,製品の出荷タイミングを意図的に調整する便宜的な役割を担う.

2.3 提案するハイブリッドシミュレーション

提案するハイブリッドシミュレーション手法の概要を Fig.2 に示す. 具体的にはバックワードシミュレーションで納期を満たす後ろ詰め計画を作成した後に,フォワードシミュレーションし直して,現場の流れに沿った前詰め計画にする方針で生産計画を立案する. 具体的な手法を Step1~4 の手順に示す.

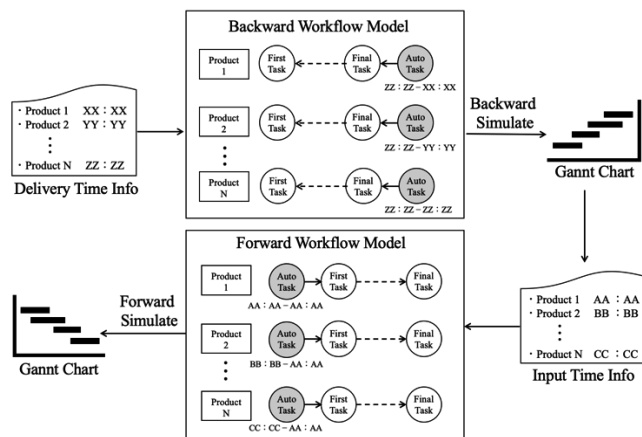


Fig. 2 Proposed Method Overview.

Step1.

計画対象の全ての製品について,バックワードシミュレーション用の Workflow モデルを 2.1 節に倣って作成する. 製品の納期情報(Delivery Time Info)に従い,各製品の Auto タスクの計画工数は,最も納期が遅い製品の納期時刻と自身の納期時刻との差分値を設定する.

Step2.

上記で設定した Workflow モデルを用いて作成したシミュレーションモデルを入力としてバックワードシミュレーションを実行する.

Step3.

計画対象の全ての製品について,フォワードシミュレーション用の Workflow モデルを作成する. それぞれの Workflow モデルの先頭に Auto タスクを定義する. Step2 のバックワードシミュレーション結果で取得できる製品の生産ライン投入時刻情報(Input Time Info)に従い,各製品の Auto タスクの計画工数は,最初に生産ラインに投入する製品の投入時刻と自身の投入時刻との差分値を設定する.

Step4.

上記で設定した Workflow モデルを用いて作成したシミュレーションモデルを入力としてフォワードシミュレーションを実行する.

3. 提案手法の検証

3.1 問題設定

納期が個別に設定された 5 つの製品 (Block A, Block B, ..., Block E)を生産する単純な問題に対して,提案手法を適用し検証を行う. 対象の生産工程を表現するモデリング情報 Fig.3 に示す. 計画工数の単位は[分]で示す.

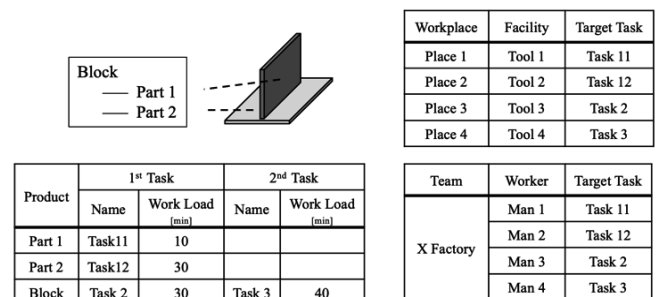


Fig. 3 Modeling Data for Toy Model.

与えられた製品の納期情報と作業手順に関する情報から,提案手法の Step1 を適用すると,バックワードシミュレーション用の Workflow モデルは Fig.4 のように表される. Auto タスクの計画工数の単位は,納期時刻間の差分を分変換して定義している.

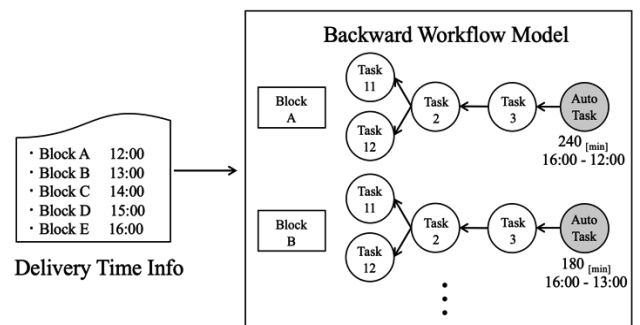


Fig. 4 Backward Workflow Model for Toy Model.

Step2 でバックワードシミュレーションを実施した後に,取得された各製品の生産ライン投入時刻情報と作業手順に関するデータから,提案手法の Step3 を適用すると,フォワードシミュレーション用の Workflow モデルは Fig.5 のように表される. なお, Auto タスクの計画工数の単位は,投入時刻間の差分を分変換して定義している.

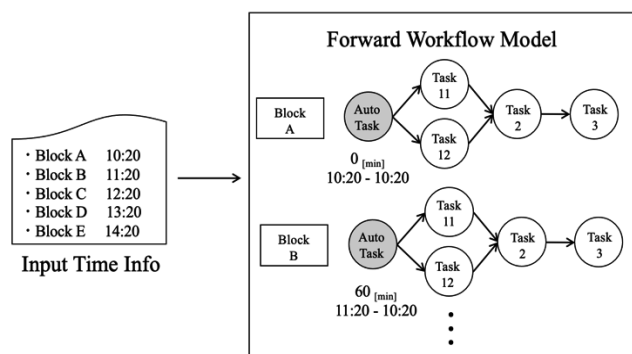


Fig. 5 Forward Workflow Model for Toy Model.

3.2 シミュレーション結果

提案手法の有用性を示すために、フォワードシミュレーションだけの結果、バックワードシミュレーションだけの結果とハイブリッドシミュレーション手法の結果を比較する。

フォワードシミュレーション結果を、Fig. 6 にガントチャートで示す。縦軸に各タスク名、横軸に時刻を記載し、各タスクが実行している時間帯を塗りつぶして表示している。また、各製品の納期を Delivery Time と表記して黒の実線で示している。Fig. 6 より、フォワードシミュレーションでは各製品が納期よりも早い時刻に出荷する結果が得られていることがわかる。これは着手可能な作業があると、作業者がすぐに取り掛かるためである。一方で、後工程との接続を考えると、各製品について納期から大きく前倒しして作業を完了させることは、製品が滞留することになり必ずしも良いとは限らない。この状況と Fig. 6 の結果を踏まえると、フォワードシミュレーションだけでは、納期に合う適切な各製品の生産ライン投入時刻を算出できないことがわかる。

バックワードシミュレーション結果を、Fig. 7 にガントチャートで示す。黒の点線で示された各製品の生産ライン投入時刻を指定することで、全ての製品は納期を厳守して出荷できていることがわかる。本章で扱う生産工程は、作業者 Man1 が Task11 を、作業者 Man2 が Task12 を別々に担当するモデルであるため、どちらも指定した生産ライン投入時刻に同時に開始できるはずである。具体的に Block A の Task 11_A と Task 12_A に着目すると、Task 12_A は Block A の投入時刻 10:20 に開始するのに対して、Task 11_A は 20 分後に後ズレした時刻 10:40 に開始する計画になっている。バックワードシミュレーションを実行すると、全てのタスクが、後ろ詰めで計算されて、計画上で是最遅着手時刻を表示するからである。このように、バックワードシミュレーションだけでは、作業間に手隙な時間を発生させてしまう。作業指示として、この結果を用いることを考えると、この作業計画案は、現場作業者にとって作業ができるのに作業をしてはいけない時間が発生することになる。実際に作業をする際には、現場作業者は手待ちをなくすために目の前の作業を実施する傾向

があるため、この作業計画案が遵守される可能性は低く、結果として計画と実績のズレが生じる原因になることが想定される。

今回提案するハイブリッドシミュレーション手法を適用した結果を Fig. 8 に示す。全ての製品は、それぞれの納期を厳守していることがわかる。また、各製品の Task 11 と Task 12 は共に黒の点線で示された生産ライン投入時刻に開始しているので、バックワードシミュレーション結果の懸念事項であった両 Task 間の開始時刻のズレは解決された。必要以上に製品が早く完成し在庫過多となるフォワードシミュレーションの欠点は、決められた納期から逆算して、納期を厳守する最適な生産ライン投入時刻を求めることで解決できる。また、単純に納期から後ろ詰めして生産資源の稼働時間内に不必要の手隙時間を引き起こすバックワードシミュレーションの欠点は、求めた生産ライン投入時刻から再度、前詰め計算し直すことで解消できる。

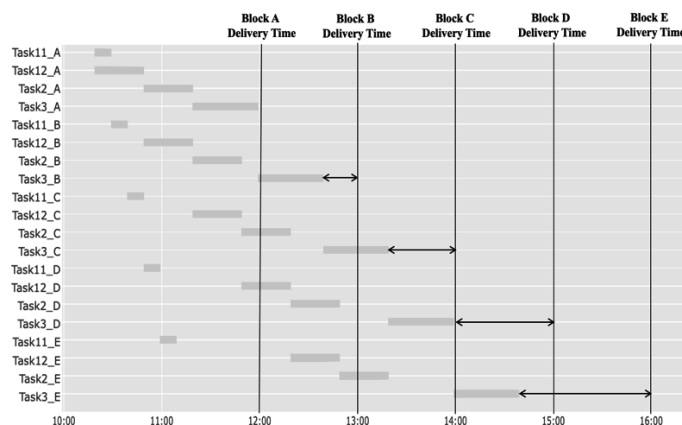


Fig. 6 Forward Simulation Gantt Chart.

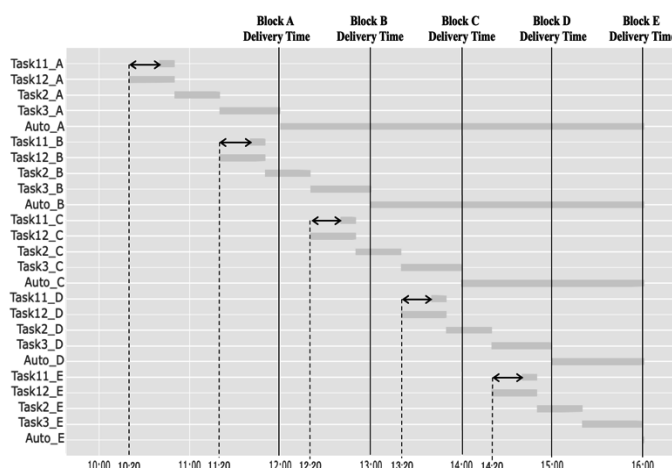


Fig. 7 Backward Simulation Gantt Chart.

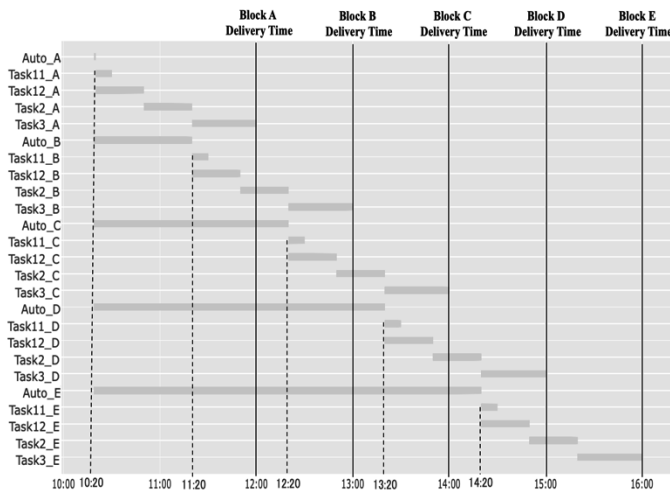


Fig. 8 Hybrid Simulation Gantt Chart.

4. 現場適用ケーススタディ

4.1 対象の造船所

ケーススタディでは提案手法を、実在する造船所内の小組立工場(Sub Assembly Shop)に適用した。対象の造船所では、作業効率化を図るために、コンベアラインを用いた小組立方式を採用している。Fig.9 に、現場の作業割り当て状況を含んだ南北2台のコンベアレイアウトを示す。今回は、左舷(Port side)側を構成する小組立部材を北コンベアに、右舷(Starboard side)側を構成する小組立部材を南コンベアで製造する状況を想定する。コンベアを出荷した小組立部材は、ストックヤードに一度保管され、その後ブロック単位を形成する分の小組立部材を引き取って、大組立工場(Block Assembly Shop)で大組立ブロックを製造する。そのため、小組立部材は大組立工場から指定された引き取り要求日に丁度よく間に合うように、コンベアラインを出荷する必要がある。本ケースでは、3種類の大組立ブロックを構成する小組立部材をコンベアラインに流す作業計画を立案する。

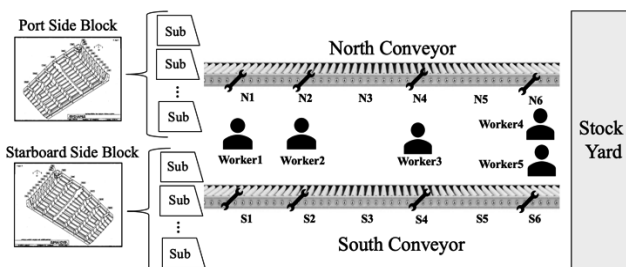


Fig. 9 Target Shipyard.

なお、本論文では現場適用を主眼としているため、提案しているハイブリッドシミュレーションの他にも、作業者の休憩時間や土日祝日などの稼働していない時間帯も考慮して

いる。具体的には、8:00 から 17:00 を業務時間とし、10:00 から 10:10 までの午前休憩、12:00 から 13:00 までの昼食休憩、15:00 から 15:10 までの午後休憩を設定した。また、今回は 2022 年 1 月 6 日から 2022 年 1 月 18 日までのシミュレーションを実施しているが、そのうち 1 月 8 日、9 日、10 日、15 日、16 日は土日祝日なため、作業を実施しないものとしてシミュレーションを実施している。

4.2 対象工程のモデリングデータ

造船所で取得可能な情報や聞き取り調査をもとに、現場をモデル化するモデリングデータを作成した。

4.2.1 M-BOM データ

今回の製造対象である大組立ブロックの M-BOM データを Fig.10 に示す。

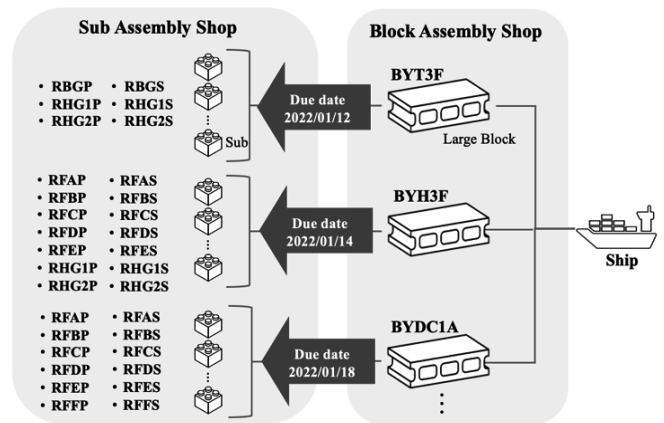


Fig. 10 M-BOM data for Case Study.

大組立ブロックは BYT3F, BYH3F, BYDC1A の 3 種類で、それぞれを構成する小組立部材が表記される。また、納期情報として、大組立ブロックの製造を開始する引き取り要求日(Due date)が与えられる。例えば、Fig.10 では大組立ブロック BYT3F を親製品としたときに、小組立部材 RBGP, RBGS, RHG1P, RHG1S, RHG2P, RHG2S が子製品で、2022 年 1 月 12 日が引き取り要求日である。

4.2.2 作業内容に関するデータ

小組立部材の製造は、前工程で切り出した加工部材を配材、取付、自動溶接、手溶接という 4 工程をコンベア上で順番に行う手順である。各工程はコンベア上で区画分けされた作業場単位で実行される。対象のコンベアの特徴として、何も作業を行わずに小組立部材を置いておく作業場(バッファ区画)が、取付と自動溶接の間、自動溶接と手溶接の間に存在する。今回は、全ての小組立部材は必ずバッファ区画を通過すると捉え、バッファ区画を通過する現象も 1 つのタスクとして定義した。各小組立部材は配材(Distribute)、取付(Install)、

通過 1(Pass 1), 自動溶接(Auto Weld), 通過 2(Pass 2), 手溶接(Manual Weld)の手順を「タスク間の実行順序」として定義した。また, 各タスクの「計画工数」に関して船体は一品受注品なので, 新規建造船の工数データそのものは存在しない。今回は, 個々の船体は完全に一致はしないが類似するという考えのもと, 過去建造船の作業実績をもとに統計的解析手法で工数を見積もった。具体的には, 小組立部材の設計由来データと実績工数から重回帰分析を行い, 新規建造船の各工程の工数を見積もる推定モデルを作成した。説明変数には, 設計部門の csv データから出力可能な部品点数, 溶接線数, 溶接線長を採用した。通過タスクの計画工数には仮で 1[分]を与えた。

4.2.3 設備情報・作業情報

生産管理板や小組立工場レイアウトを参考に, 設備情報と作業情報を Table 1 と Table 2 のように定義した。造船所特有の設備機能・特性をシミュレーションモデルで表現するために, 以下に示す工夫を加えてデータ設定を行なった。

コンベア上の 1 区画を 1 つの作業場とする。今回の対象現場では, 南北のどちらかのコンベアに小組立部材が一度投入されると途中で別のコンベアへの移動は発生しない。このような作業場間の一方通行の移動制約を考慮するために, 作業場の属性情報に, 「前の作業場(Prev. Workplace)」と「次の作業場(Next Workplace)」を設定した。また, 作業場の属性情報に「許容数(Capacity)」を追加し, 配置できる小組立部材の個数制約を定義した。1 つの作業場に対し 1 つの小組立部材を配置するため, 許容数を 1 と設定した。対象のコンベアは, 南北で流す小組立部材の種類を明確に区別する。よって, 「対象タスク(Target Task)」に関して, 名称末尾に P が付く小組立部材のタスクを北コンベアに, 名称末尾に S が付く小組立部材のタスクを南コンベアに紐づけた。作業情報については, 実際の現場における過去の作業実績をもとに作業者の割り当て情報を取得した。また, 「使用可能な設備(Target Facility)」を属性に追加し, 作業者を特定の作業場に割り当てている。

Table 1 Workplaces Info for Case Study.

Workplace	Facility	Target Task	Capa	Prev. Workplace	Next Workplace
N1	Tool N1	Distribute	1	-	N2
N2	Tool N2	Install	1	N1	N3
N3		Pass 1	1	N2	N4
N4	Tool N4	Auto Weld	1	N3	N5
N5		Pass 2	1	N4	N6
N6	Tool N6	Manual Weld	1	N5	-
S1	Tool S1	Distribute	1	-	S2
S2	Tool S2	Install	1	S1	S3
S3		Pass 1	1	S2	S4
S4	Tool S4	Auto Weld	1	S3	S5
S5		Pass 2	1	S4	S6
S6	Tool N6	Manual Weld	1	S5	-

Table 2 Workers Info for Case Study.

Worker	Target Task	Target Facility
Worker1	Distribute	Tool N1
		Tool S1
Worker2	Install	Tool N2
		Tool S2
Worker3	Auto Weld	Tool N4
		Tool S4
Worker4	Manual Weld	Tool N6
		Tool S6
Worker5	Manual Weld	Tool N6
		Tool S6

4.3 シミュレーション結果

上記で定義した情報に, 造船所の休暇情報を追加してハイブリッドシミュレーションを実行した結果を Fig.11 に示す。

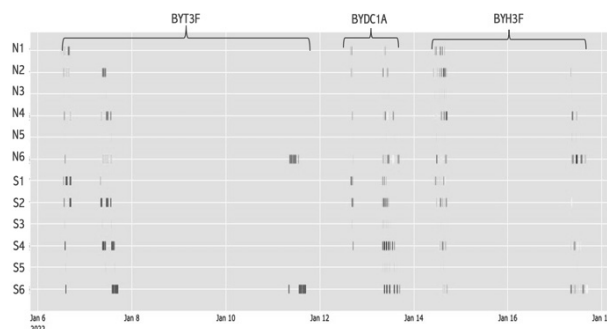


Fig. 11 Gantt Chart for Case Study (Break time considered).

縦軸はコンベア上の各作業場を示し, 横軸は時刻を示す。色付けされた箇所は, 各小組立部材に対して何らかの作業が実施されている状態であることを表す。Fig.11 に示すガントチャートとチャート作成元の時系列出力データを造船所の生産管理者に提示し, 全ての小組立部材の作業流れについて, 普段の現場作業指示と矛盾がないかの検証を依頼した。ガントチャートは, 造船所のベルトコンベアの機能特性を正

確に捉えており,十分に現場管理に使える計画案として妥当なものであるという評価を得た。

同一のモデリング情報を入力とし,フォワードシミュレーション,バックワードシミュレーション,提案手法(ハイブリッドシミュレーション)を適用した出力結果を,定量的に比較する.それぞれのシミュレーション手法で出力された,最初にコンベアへ投入した小組立部材のコンベア投入時刻(Start Time)と,最後にコンベアを出荷した小組立部材のコンベア出荷時刻(Finish Time)を Table 3 に示す.なお,それぞれのシミュレーション手法を定量的に比較するため,シミュレーション実行開始時刻を 2022/01/06 11:57 で揃えている。

Table 3 Result for Case Study.

Large Block	Due Date	Forward		Backward		Hybrid	
		Start Time	Finish Time	Start Time	Finish Time	Start Time	Finish Time
BYT3F	01/12	01/06 11:57	01/11 16:20	01/06 11:57	01/11 16:59	01/06 11:57	01/11 16:54
BYDC1A	01/14	01/07 08:01	01/12 16:26	01/12 15:32	01/13 16:59	01/12 15:32	01/13 16:57
BYH3F	01/18	01/12 08:39	01/14 11:55	01/14 09:32	01/17 16:59	01/14 09:32	01/17 16:53

Table 3 で全てのブロックの Finish Time に着目すると,フォワードシミュレーションでは,引き取り要求日よりも余裕を持って小組立部材が出荷する計画となる.一方で,バックワードシミュレーションとハイブリッドシミュレーションでは,引き取り要求日の前日の終業時刻 17:00 を厳密に守って小組立部材が出荷する計画となる.フォワードシミュレーションだけでは,納期を考慮した生産計画を作成できない。

続いて,バックワードシミュレーションとハイブリッドシミュレーションを稼働率の観点で比較する. Fig.12 にバックワードシミュレーションの結果における作業者の稼働状況を可視化し, Fig.13 にハイブリッドシミュレーションの結果における作業者の稼働状況を可視化した.両図では,見やすいように大組立ブロック BYT3F に関わる部分を抜き出して表示している.グラフの縦軸に各作業者,横軸に時刻を示す.青色箇所は作業者が稼働中であることを,グレー色箇所は造船所規定の休憩時間帯を表す.5人の作業者の休憩時間以外の手待ち時間の総和をガントチャートから抽出したところ, Fig.12 では 1827[分], Fig.13 では 678[分]であった.また, worker1 に着目すると, Fig.12 では 1 月 11 日 8:46 に終了する仕事を, Fig.13 では 1 月 7 日 8:06 には終えている.以上より,ハイブリッドシミュレーションの実行により無駄な手待ち時間が 1149[分]削減され,できる限り前詰めされた計画に修正されたことがわかる.大組立ブロック BYDC1A

と BYH3F についても同様の結果を示すことが確認できた.本ケーススタディより,ハイブリッドシミュレーション手法を,実際の造船所のデータ・生産工程モデルに適用し,納期厳守かつ前詰め計画が立案できることが示された。

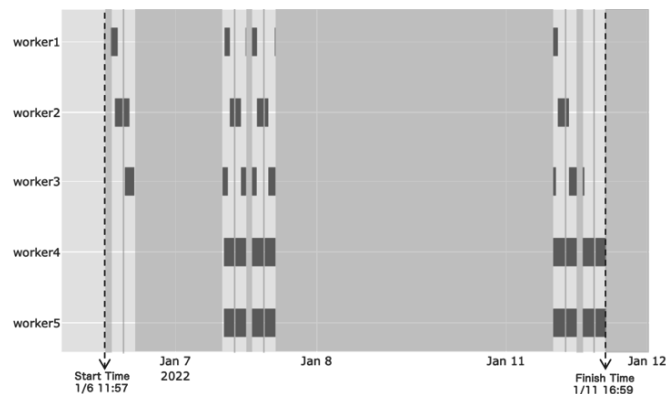


Fig. 12 Backward Gantt Chart for BYT3F.

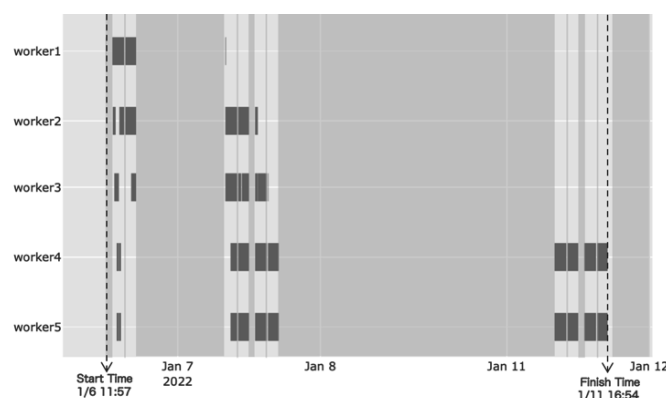


Fig. 13 Hybrid Gantt Chart for BYT3F.

5. 考 察

高精度な生産管理を目指すためには,シミュレーション出力を実績に近づける必要がある.シミュレーション出力精度を決定付ける要素には,生産工程のモデリング精度と個々のタスクの計画工数見積もり精度に分類できる.生産工程のモデリング精度について,今回のケーススタディでは実績で発生した事象を表現できていない点がいくつか存在する.例えば,小組立部材の重量が小さい場合にはコンベアの1区画に2つずつ乗せていくケース,一部の作業員だけ残業したケース,計画外の付随作業が発生したケースなどが挙げられる.これらの事象を含めて現場で起こり得る生産状況を細かくモデリングし,実績と比較しながら精度を向上させる取り組みが必要である.個々のタスクの計画工数見積もり精度については,本論文では造船所内に存在する過去の実績データか

ら重回帰分析を活用した簡易的な推定手法で工数を見積もった。一方で、本手法はシミュレーションで設定する工数の精度が重要であり、対象の工場や工程によっては、工数推定の精度を担保できない場合もあることが想定される。対象とする工程に応じて、別の推定手法の検討や採用する説明変数の検討などを別途行う必要がある。

建造工程の効率化・DX(デジタルトランスフォーメーション)のためには船舶建造シミュレーションの活用は必須であるが、その精度向上のための研究活動を継続して実施することが、今後の競争力の源泉になると考えられる。また、造船所では、船舶建造シミュレーションに必要な情報のうち、明示的に記述されていない情報や形式が統一されていないデータが散在する。船舶建造シミュレーションを活用した建造工程の効率化・DXのためには、必要なデータの定義とデータベース構造について標準化する必要がある。一方で、造船工程の効率化を図った商用ソフトウェアツールは数多く存在する。前報[17]や本論文で主張するオリジナリティは造船所の工程情報を、Product, Workflow, Workplace, Team という汎用的なモデルにシステムチックに変換することで、現場のさまざまな制約条件や機能特性を細かく表現し、シミュレーションを実施できる点にある。本論文では、そのために必要なデータについて一つの案を提示し、実際の造船所の工程を対象にその有効性を検証した。今後、造船業界に船舶建造シミュレーションを活用・普及させるためには、造船工程管理のためのデータ標準化など、より広い視野での検討が必要であると考えている。

6. 結 言

本論文では、船舶建造シミュレーションを用いた生産計画立案手法を実際の造船所で活用することを目的とし、納期順守の計画を求める生産管理者側と、手待ちをなるべく少なくして稼働率向上を狙う現場作業側との両者のニーズを同時に満たす生産計画立案手法を提案した。具体的には、著者ら[12]の研究成果を基盤としたバックワードシミュレーションとフォワードシミュレーションを併用するハイブリッド手法を提案し、納期厳守かつ手待ち時間の短縮を目指した前詰め計画を立案する手法を提案した。

実際の造船所における小組立コンベアラインにおいて、大組立ブロックを構成する複数の小組立部材を製造する生産計画を立案するケーススタディを行った。その結果、全ての小組立部材について、大組立工場から与えられた引き取り要求日を満たしつつ、現場の作業流れに即した前詰めで生産される計画が立案された。造船所の生産管理者の判断のもと、シミュレーション結果は普段の現場管理業務に活用できる妥当な計画案であることを確認した。以上より、提案手法が納期順守を求める生産管理者と稼働率向上を狙う現場作業者のどちらのニーズも満たす生産計画を立案することがで

き、生産管理者が本手法を造船工程の生産計画/現場管理における意思決定支援ツールとして実用していく可能性を示した。

謝 辞

本研究は造船学術研究推進機構(REDAS)の助成を受けて実施したものである。また、川崎重工業株式会社エネルギーソリューション&マリンカンパニー船舶海洋ディビジョン坂出工場の松野二郎様、山崎健太郎様、山口聖様、安部岳志様には、造船所見学の際に工場ツアーの実施や、現場データの提供、オンライン会議での議論などの沢山のご協力を頂いた。株式会社ユニークスの皆様には、本研究に必要なシステム開発の面で多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Aoyama, K., Nomoto, T., Watanabe, K.: Development of Shipyard Simulation System based on Petri Net, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, vol.182, pp.795-807, 1997 (in Japanese).
- 2) Aoyama, K., Nomoto, T., Inoue, F.: Development of Shipyard Simulation System based on Petri Net (2nd Report: Factory Simulator that has Flexibility for Changes of Job Structure), Journal of the Society of Naval Architects of Japan, vol.186, pp.673-682, 1999 (in Japanese).
- 3) Takechi, S., Aoyama, K., Kobayashi, M., Makihara, K.: Development of Shipyard Simulation System based on Petri Net (3rd Report: Factory Simulator introduced the concept of the Job-Shop Floor), Journal of the Society of Naval Architects of Japan, vol.190, pp.449-458, 2001 (in Japanese).
- 4) Kajiwar, H., Nakao, Y.: On scheduling ship-building lines based on discrete-event system theory, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, vol.4, pp.89-94, 2006 (in Japanese).
- 5) Kajiwar, H., Hitoi, Y., Nakao, Y., Iwashita, T.: Max-plus algebra based scheduling of ship building lines for tandem construction of a pair of ships, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, vol.20, pp.205-220, 2014 (in Japanese).
- 6) Ohno, I.: Systemization of Production Control in the Shipyard, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, vol.187, pp.321-328, 2000 (in Japanese).
- 7) Sasaki, Y., Miura, M., Yamamoto, I., Ito, K., Iida, A.: Development of production planning system by using

- virtual factory, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, vol.186, pp.683-688, 1999 (in Japanese).
- 8) Lee, D.K., Kim, Y., Hwang, I.H., Oh, D.K., Shin, J.G.: Study on a process-centric modeling methodology for virtual manufacturing of ships and offshore structures in shipyards, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.71, pp.621-633, 2014.
 - 9) Jeong, Y.K., Woo, J.H., Oh, D.K., Shin, J.G.: A shipyard simulation system using the process-centric simulation modeling methodology: case study of the simulation model for the shipyard master plan validation, *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, vol.21, pp204-214, 2016.
 - 10) Krause, M., Roland, F., Steinhauer, D., Heinemann, M.: Discrete event simulation: an efficient tool to assist shipyard investment and production planning, *Journal of Ship Production*, vol.20, pp.176-182, 2004.
 - 11) Woo, J.H., Song, Y.J., Kang, Y.W., Shin, J.G.: Development of the decision-making system for the ship block logistics based on the simulation, *Journal of Ship Production and Design*, vol.26, pp.290-300, 2010.
 - 12) Okubo, Y., Mitsuyuki, T.: Ship Production Planning Using Shipbuilding System Modeling and Discrete Time Process Simulation, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol.10, 2022.
 - 13) Arakawa, M., Fuyuki, M., Inoue, I.: A Simulation-Based Production Scheduling Method Aiming to Optimize Due-Date Related Criteria: Schedule Generation Method and Due-Date-Deviation Minimization, *Journal of Japan Industrial Management Association*, vol.52, 2001 (in Japanese).
 - 14) Kalinowski, K., Grabowik, C., Ćwikła, G., Paprocka, I., Balon, B.: Production orders planning using additional backward pass scheduling approach, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol.400, 2018.
 - 15) Fuyuki, M., Inoue, I.: Due-Date-Conformance Oriented Production Scheduling in a Make-To-Order Production on the Basis of Backward Forward Hybrid Simulation, *Journal of Japan Industrial Management Association*, vol.46, 1995 (in Japanese).
 - 16) Mitsuyuki, T., Yamato, H., Hiekata, K.: A study on designing task priority rule considering rework risk of system development project, *Transactions of the Japan society of mechanical engineers*, vol.82, pp.15-00474, 2016 (in Japanese).
 - 17) Okubo, Y., Mitsuyuki, T.: Study on job shop scheduling for keeping the requested shipping sequence by production system modeling and backward simulation, *Proceeding of ISTE 28th International Conference on Transdisciplinary Engineering*, vol.16, pp. 203-212, 2021.
 - 18) Mitsuyuki T., Hiekata K., Yamato H.: Design of production strategy considering the cutting peak demand of electricity in the shipbuilding industry, *Journal of Marine Science and Technology*, vol.19, pp. 425-437, 2014.