

グラフデータを用いた管製作工程におけるBOPの自動生成と生産計画立案システムの開発

三原, 由依
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

大久保, 友結
横浜国立大学大学院理工学府

村上, 拳太郎
横浜国立大学大学院理工学府

<https://hdl.handle.net/2324/7397147>

出版情報 : Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers.
38, pp.359-363, 2024-05-27. The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers
バージョン :
権利関係 : © The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers



グラフデータを用いた管製作工程における BOP の自動生成と生産計画立案システムの開発

学生会員 三 原 由 依*
学生会員 大久保 友 結***

正 会 員 満 行 泰 河**
学生会員 村 上 拳太郎***

Automatic Generation of BOPs in Pipe Fabrication Process Using Graphical Data
to Develop a Production Planning System

by Yui Mihara, *Student Member*
Yui Okubo, *Student Member*

Taiga Mitsuyuki, *Member*
Kentaro Murakami, *Student Member*

Key Words: BOP, M-BOM, Graph Data, Pipe Fabrication, Production Planning

1. 緒 言

近年、ガス運搬船の需要増大や、低温液化燃料船や二元燃料船の増加を理由に、商船の配管機装は増加・複雑化傾向にある。このような中で造船における管製作の重要性は増しており、造船所の競争力確保のためには管工場の生産効率向上が必須となっている。しかし現在の管工場では着手日・完了日レベルの管理しか行なわれておらず、工場内部の人やモノの動きは現場任せで、生産管理は不十分である。

従来、造船工程全体がその複雑さ故に詳細な生産計画の立案は難しいとされていた。しかし近年は研究が進み、造船工程一般に対してシミュレーションを用いた自動計画手法が提案され、その有効性が示されている。例えば、Lee ら¹⁾はシミュレーションを活用した造船計画システムを提案して実際の造船所の生産計画の改善効果を定量的に示しており、Okubo ら²⁾はシミュレーションを利用した手法により現実的で良好な生産計画を自動的に作成できることを示している。しかし、これらの既存の手法は M-BOM (Manufacturing Bill of Material, 製造部品表) や BOP (Bill of Process, 製造工程表) のデータが入力として使用可能であることが前提となっており、十分な入力データを有していない管工場には既存の手法をそのまま適用することができない。

工程の自動生成については、加工工程と組立工程のそれぞれにおいて様々な手法が提案されている。例えば、Zhu ら³⁾は製品の CAD モデルをグラフ構造化して多目的加工機における加工方法と加工順序を自動決定するシステムを開発している。市来寄ら⁴⁾は最適な組立順序決定のための自動的に実行可能な中間製品を網羅的に導出する手法を提案している。笠原ら⁵⁾は中間製品ネットワークを生成しそれを最短経路問題として解くことで最短加工時間を与える加工順序を求めるシステムを開発している。しかし、これらの手法は管製作の BOP 生成にあたり考慮すべき工場の設備や作業場の構成による制約が考えられておらず、

単純に応用することはできない。また、多数の製品を同時並行で製作する管工場の BOP は、工場の全体最適の観点から決められるべきである。

本研究では、管製作工程において工場に合った M-BOM データ及び BOP データを自動生成し、合理的な生産計画を自動立案するシステムを開発することを目的とする。入力に造船所の設計システムから出力された製品情報を用いることで、人の手による M-BOM, BOP データ作成を要さない生産計画立案の自動化を図る。

2. 提案手法

本研究の提案手法の概要を Fig. 1 に示す。本手法は、管製品の製品情報と納期情報、工場の作業場や設備、作業者等に関する工場情報と、工場における BOP 生成に必要な様々な情報である工場ルール情報を入力として生産計画を出力する。まず、製品情報を基に製品ごとに候補となる実現可能な BOP 案を複数生成する。次に工場が生産する多数の製品の生成した各 BOP 案を組み合わせ、シミュレーション⁶⁾により全体の生産性がより高い生産計画を立案する。

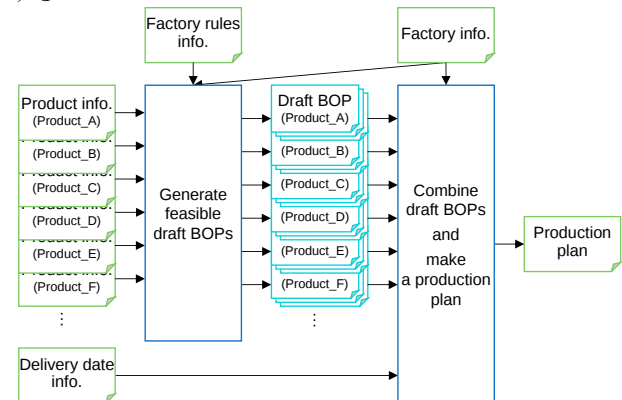


Fig. 1 Overview of proposed method

2.1 BOP 案自動生成手法

本手法における BOP を、各タスクの対象部品、実施作業場、作業内容とタスクの実施順序の情報であると定義する。BOP 案自動生成では、管製作に関する情報をグラフ構造化して扱う。なお、グラフデータのスキーマは Okubo ら²⁾が提案する造船システムモデルに基づき、管製作用の一部を改変した。Fig. 2 に本手法が用いるグラフデータの例として、孔のある管とエルボ、フランジが直列に溶接接続された製品をある管工場で作製するようなグラフデー

* 横浜国立大学大学院理工学府 (研究当時)

** 横浜国立大学大学院工学研究院

*** 横浜国立大学大学院理工学府

原稿受付 令和 6 年 3 月 1 日

公開日 令和 6 年 5 月 20 日

春季講演会において講演 令和 6 年 5 月 27, 28 日

©日本船舶海洋工学会

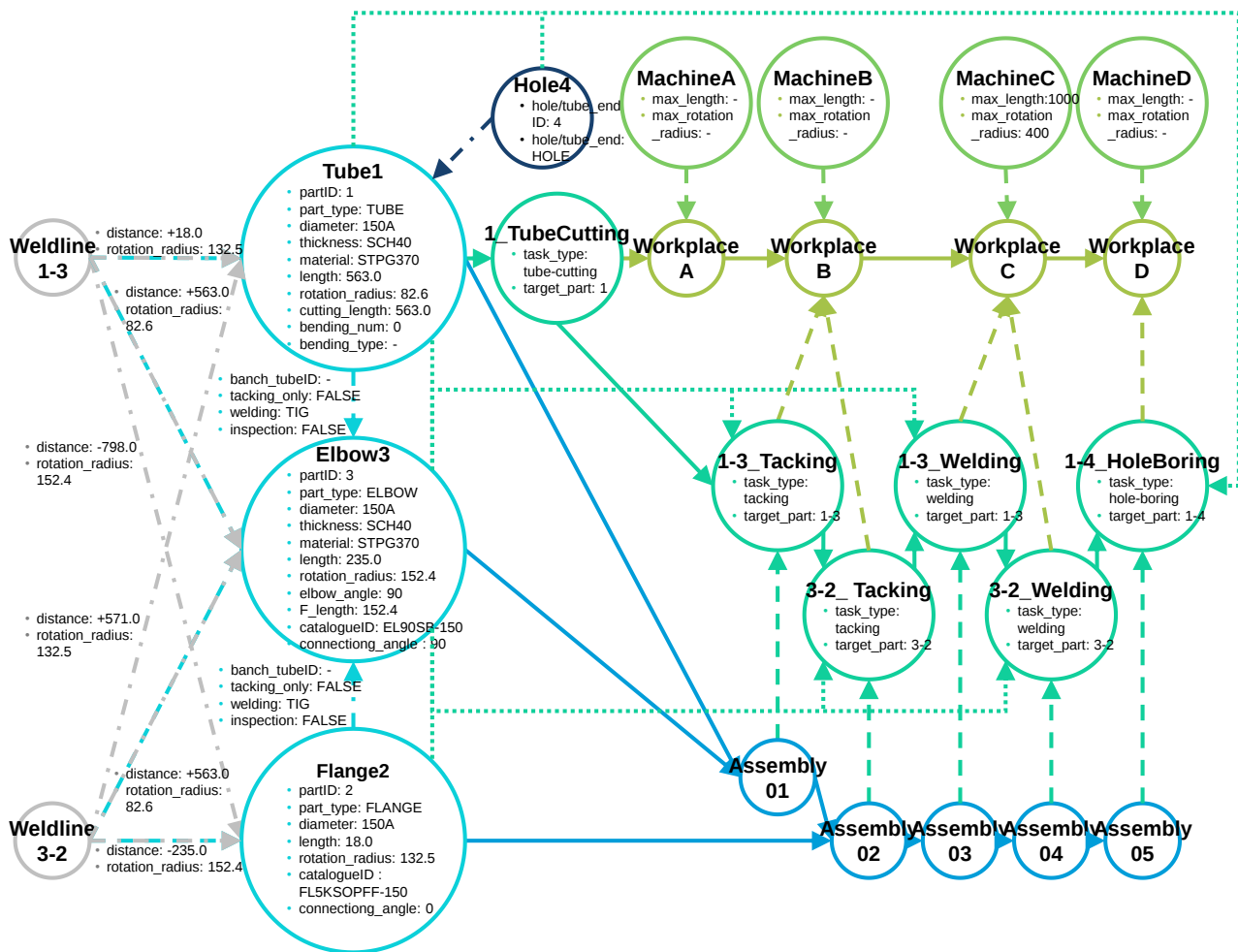


Fig. 2 Example of graph data

タの一例を示す。ノードは部品、孔/管端、溶接線、アセンブリ、タスク、作業場、設備の7種類から構成され、ノード間の9種のリレーションはそれぞれ接続関係や前後関係、親子関係、所属/被所属関係、対象/被対象関係を表す。

まず、製品情報を基に部品ノードと孔/管端ノードとそれらの間のリレーションからなる部品ネットワークをグラフデータベースに登録する。次に、例えば部品タイプが管の部品ノード1つに対して管切断タスクを1つ生成、2つの部品間のリレーション1つに対して取付タスクと溶接タスクを各1つ生成というように、部品ネットワークから対象工場において対象製品製作に必要なタスクを自動で生成する。続いて、タスク間の前後関係を考慮しない各タスクの実施可能作業場の組合せを全通り求める。タスクと作業場の各組合せに対し、作業場の前後関係に矛盾しないBOP案の候補を全パターン作成する。最後に、各BOP案候補に対して工場ルールに基づく制約に該当するか否かを判定することで、対象工場で実現可能なBOP案のみを生成する。

タスクと作業場の各組合せからBOP案候補を全パターン作成するにあたり、BOP案候補のM-BOMツリーを重ね合わせたM-BOMネットワークを作成する。Fig. 3に、フランジ、管、エルボ、管が直列に接続された製品の、作業場A、B、C、D、Eが直列に接続して作業場AからDまではモノの流れが一方方向、作業場D、E間では双方向に定められている管工場における、1管切断を作業場A、3-1取付が作業場B、3-1溶接が作業場C、1-4取付と4-2取付

を作業場D、1-4溶接と4-2溶接を作業場Eで実施する場合のM-BOMネットワークと、そのうちの一つのM-BOMに対応するBOP案候補を示す。Fig. 3のうち、アセンブリノードとそれに接続するリレーション以外はグラフ空間初めから登録されているものとする。管切断以外のタスクを実施する作業場のうち作業場ネットワーク上で一番前にあるのが作業場Bであるので、作業場Bで実施する3-1取付によってできるアセンブリ01ノードを1つ作成し、フランジ3ノード、管1ノードとの間のリレーションもそれぞれ作成する。その次の作業場は作業場Cであるので、作業場Cで実施する3-1溶接によってできるアセンブリ02ノードを1つ作成してアセンブリ01ノードとの間のリレーションも作成する。溶接タスクは必ず取付タスクの後になければならないので、作業場Dおよび作業場Eで実施するタスクのうちこの時点で実施可能なタスクは1-4取付タスクまたは4-2取付タスクの2つである。よって3-1溶接ノードとエルボ4ノードを始点とするリレーションの終点にアセンブリ03ノードを、エルボ4ノードと管2ノードを始点とするリレーションの終点にアセンブリノードを各1つ作成する。作成したアセンブリ03ノードについて、この次に実施可能なタスクは4-2取付または1-4溶接であるので、アセンブリ03ノードと管2ノードを始点とするリレーションの終点にアセンブリ05ノードを、アセンブリ03ノードを始点とするリレーションの終点にアセンブリ06ノードを作成する。同様の手順を繰り返すと、6つのM-BOMツリーが重なったM-BOMネットワークができるM-BOMネットワークの終点ノードの一つか

らネットワークを逆向きに辿ることによって一つの M-BOM ツリーを得、M-BOM ツリーに基づいてタスクノード間に前後関係を与えることで BOP 案候補のグラフが完成する。

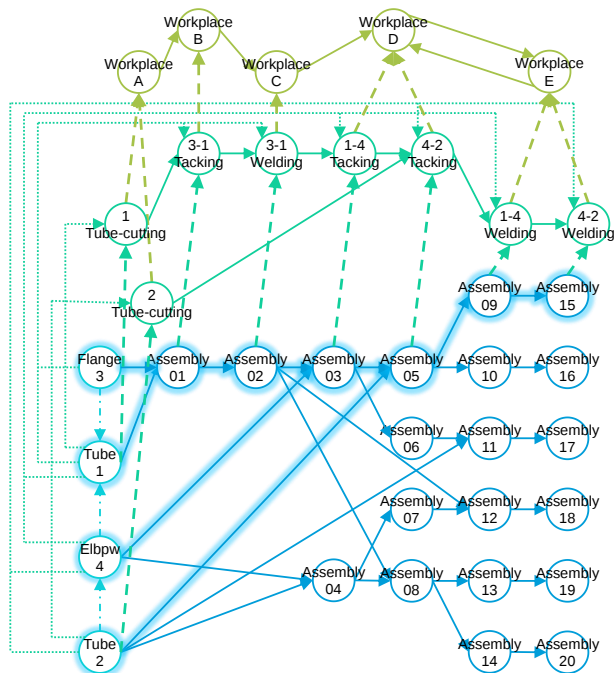


Fig. 3 M-BOM network and draft BOP candidate

BOP 案の候補に課される制約は、「製作上必要な制約」「設備のアセンブリ寸法制約」「その他工場による制約」の 3 種類に大別される。「製作上必要な制約」は、加工・組立の順序について満たさなければ物理的に製作できないような制約である。代表的な「製作上必要な制約」の一つに、中フランジはそれが接続する管の両端に金物が取付けられる前に取付けられなければならないという制約が挙げられる。「設備のアセンブリ寸法制約」は、自動溶接機やポジショナー等のアセンブリを掴んで回転させる設備について、搭載可能なアセンブリの長さ上限と回転半径上限の制約である。「その他工場による制約」は、工場の設備や作業場構成によるその他の制約で、物理的には実現不可能ではないが生産管理上の理由で工場が設定しているルールを含む。代表的な「その他工場による制約」は作業場ネットワークによる制約で、これは工場が設定している作業場間のモノの流れのルートを外れたり逆行したりするような BOP 案を禁じる制約である。また、特定の作業場（小組立作業場）ではアセンブリ同士の組立をおこなわないという小組立制約もある。これらの制約はグラフ構造で表され、グラフデータベースに登録されている BOP 案候補が制約のパターンを持てば制約に該当するとして候補から除外される。Fig. 4 に中フランジを含む製品の制約のグラフ表現を、Fig. 5 に作業場ネットワークによる制約のグラフ表現を示す。

2.2 合理的生産計画立案手法

生成した各製品の BOP 案から 1 つずつ選んで各製品の納期を起点とするバックワードシミュレーション²⁶⁾を実施することにより、生産計画案を 1 つ立案できる。遺伝的アルゴリズムを用いていくつかの BOP 案の組合せの作成と各組合せに対する生産計画立案を繰り返し、より生産効率の高い生産計画を探索・決定する。

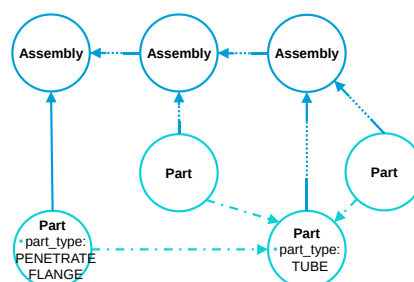


Fig. 4 Constraint to product with penetrate flange

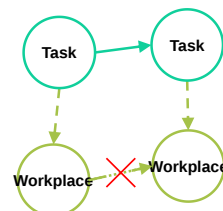


Fig. 5 Constraint by workplace network

3. BOP 案自動生成手法の検証

管製品 X の仮想的な 3 つの管工場 A, B, C それぞれにおける BOP 案生成に、提案手法を適用した。Fig. 6 に示す管製品 X は、フランジ 3、管 1、エルボ 4、管 2 が直列に溶接接続された製品である。Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 はそれぞれ、管工場 A, B, C の作業場と設備を表すグラフである。管工場 A では管切断作業場、小組立作業場、小組溶接作業場、総組立作業場、総溶接作業場の 5 つの作業場が直列に並び、モノはこの作業場ネットワークを一方方向に流れるよう制限されている。管切断タスクは管切断作業場で、取付タスクは小組立作業場と総組立作業場で、溶接タスクは小組溶接作業場と総溶接作業場で、孔あけタスクは総組立作業場でそれぞれ実施可能である。ただし、小組溶接作業場にはポジショナーが配備されており、搭載可能なアセンブリの回転半径上限が 350mm、長さ上限が 3000mm と制限されている。また、小組立作業場には小組立制約がある。管工場 B は管工場 A に酷似しており、小組溶接作業場に配備されているポジショナーの回転半径上限のみが 600mm と管工場 A と異なっている。管工場 C には小組立作業場と小組溶接作業場はなく、管切断作業場、総組立作業場、総溶接作業場の 3 つの作業場が直列に並んでおり、総組立作業場と総溶接作業場間には双方向のモノの流れがある。つまり、管工場 C ではアセンブリの取付と溶接を何度でも繰り返せる。

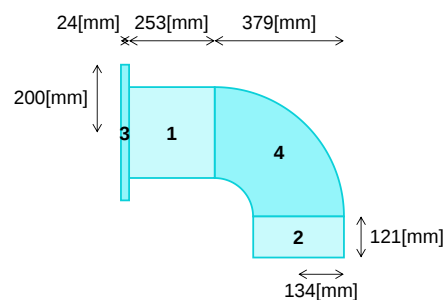


Fig. 6 Product X

結果、各管工場で生成される BOP 案は管工場 C, B, A の順に多かった。

管工場 A と B で生成された BOP 案を比較すると、小組

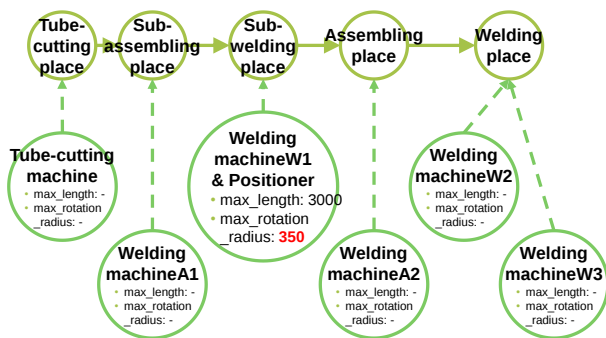


Fig. 7 Graph of Pipe factory A

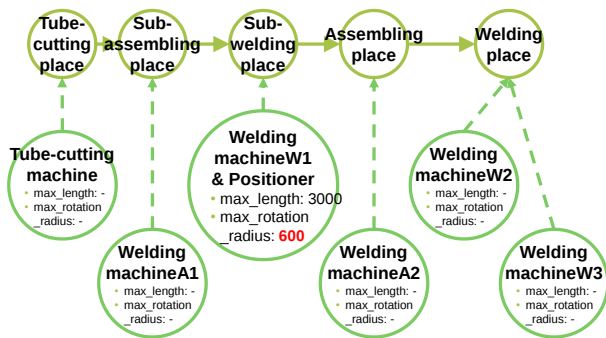


Fig. 8 Graph of Pipe factory B

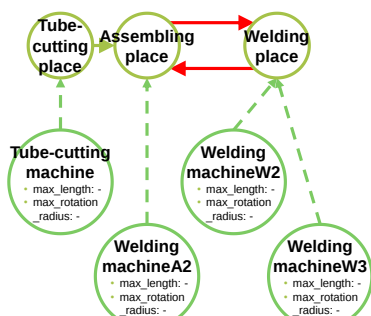


Fig. 9 Graph of Pipe factory C

溶接作業場で全接続部の溶接を実施する BOP 案は、管工場 A では生成されず管工場 B では生成された。このような BOP 案の一例のタスクツリーと各タスクの実施作業場を Fig.10 に示す。全接続部の取付が完了しているアセンブリの部品 4 と 2 の接続部を回転設備で溶接する時、この溶接線に対する回転半径は $522 (=379-134+253+24)$ mm となる。これは管工場 A, B の小組溶接作業場に配備されたポジショナーの回転半径上限 350mm と 600mm の間の値であるため、管工場 A では設備のアセンブリ寸法制約に該当して BOP 案の候補から除外され、管工場 B では除外されずに BOP 案として生成された。

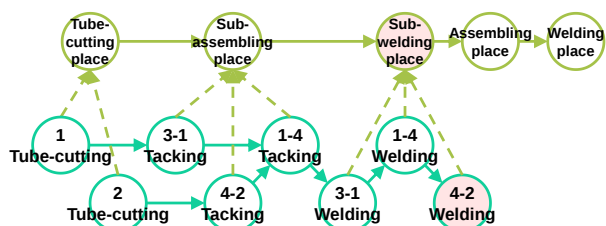


Fig. 10 Part of draft BOP for Pipe factory B

管工場 A と C で生成された BOP 案を比較すると、管製

品 X の一端から順に組立と溶接を繰り返す BOP 案は、管工場 A では生成されず管工場 C では生成された。このような BOP 案の一例のタスクツリーと各タスクの実施作業場を Fig. 11 に示す。管工場 A では、モノは各作業場を 1 回ずつしか通れないため、取付と溶接のセットを小組立・小組溶接と総組立・総溶接の最大 2 回しか実施できない。対して管工場 C では、総組立作業場と総溶接作業場間に双方向のモノの流れがあるため、モノは両作業場を往復して取付と溶接のセットを何回でも実施できる。故に管工場 A と C では、取付・溶接を 3 回繰り返す BOP 案の実現可否が分かれた。

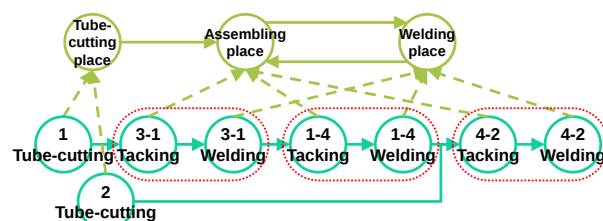


Fig. 11 Part of draft BOP for Pipe factory C

以上より、提案手法は BOP 案を対象工場の設備や作業場構成を反映して生成することを確認した。

4. 生産計画立案手法の検証

3 章で用いた管工場 A における、10 の管製品の生産計画立案に提案手法を適用した。管工場 A の作業員配置を、総溶接作業場に 2 人、それ以外の作業場に各 1 人とする。また、配備設備の違いにより、取付タスクは総組立作業場よりも小組立作業場で実施する方が短い作業時間で取付でき、溶接タスクは総溶接作業場よりも小組溶接作業場で実施する方が短い作業時間で溶接できるものとする。Fig. 12 には対象製品の部品タイプ構成の概要を示す。10 の管製品は全て形状が異なっており、部品数は 2 から 6 で、直管やフランジ、スリーブ、エルボ、レデューサによって構成される。また、管への孔あけ加工が必要な製品を含む。

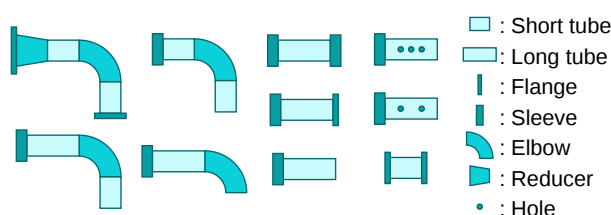


Fig. 12 Overview of 10 pipe products

Fig. 13 は各製品の単製品製作における製作時間最短となる BOP 案を用いた計画（生産計画 i）の作業員のガントチャート、Fig. 14 は提案手法を用いて遺伝的アルゴリズムにより求めた全体生産時間がより短くなる BOP 案の組合せを用いた計画（生産計画 ii）の作業員のガントチャートである。生産計画 ii は生産計画 i よりも全体の生産時間が約 27%短縮されている。

小組立作業場は総組立作業場よりも、小組溶接作業場は総溶接作業場よりも同じ部品接続部に対するタスクを短時間で実施できるため、各製品の単製品製作における製作時間最短となる BOP 案は小組立作業場と小組溶接作業場の使用が多い傾向にある。このため、生産計画 i では小組

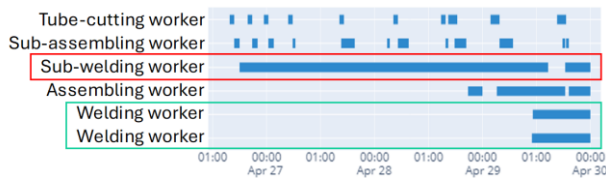


Fig. 13 Worker operation plan that combines the draft BOPs with the shortest production time for single product fabrication (Production plan i)

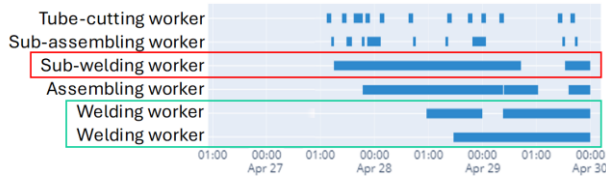


Fig. 14 Worker operation plan with shorter total production time (Production plan ii)

溶接作業場を担当する作業員（小グループ溶接作業員）にタスクが集中してボトルネックとなり、全体の生産時間が長くなっている。一方生産計画 ii は単製品製作における製作時間が最短とならない BOP 案も用いたことで、生産計画 i では小グループ溶接作業員に割振られていたタスクの一部が総溶接作業員に振り分けられ、全体の生産時間がより短くなっている。なお、さらに取付タスクと溶接タスクを総組立作業場と総溶接作業場に割当てている計画は、総組立作業員が担当するタスクが増加したことで、生産計画 ii よりも全体の生産時間が長くなっていた。

以上より、提案手法は複数製品の BOP の兼ね合いを考慮して生産計画を立案できることを確認した。

5. 結 言

本研究では、管製作工程について、製品情報を入力として、グラフデータを用いて対象工場に適した各製品の BOP 案を生成し、それらを組合わせて合理的な納期遵守の生産計画を立案するシステムを開発した。仮想的な管工場に対して提案手法を適用し、生成される BOP 案が工場の設定を反映して問題を解くこと、複数製品の BOP の兼ね合いを考慮して生産計画を立案できることを確認した。

参 考 文 献

- 1) Yong Gil Lee *et.al.* : Simulation-based planning system for shipbuilding, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 33, no. 6, pp. 626–641, 2020.
- 2) Yui Okubo, Taiga Mitsuyuki: Ship Production Planning Using Shipbuilding System Modeling and Discrete Time Process Simulation, J. Mar. Sci. Eng. 10(2), 176, 2022.
- 3) Jiang Zhu *et.al.* : Graph based automatic process planning system for multi-tasking machine, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, vol. 9, no. 3, JAMDSM0034–JAMDSM0034, 2015.
- 4) 市来寄治 *et.al.* : 制約を用いた効果的な組立順序の導出方法に関する研究, 日本経営工学会論文誌, 70 巻, 2 号, p. 71-80, 2019.
- 5) 笠原和夫 *et.al.* : 最短経路問題の解法を利用した加工工程設計支援システムの開発 (第 1 報), 精密工学会誌, 76 巻, 10 号, p. 1188-1193, 2010.

- 6) Taiga Mitsuyuki, Yui Okubo: pDESy: A Python package for discrete time-event simulation to engineering, Software Impacts, VOLUME 19, 100621, 2024.