

造船の統一データプラットフォームと インテリジェント CAD に関する研究

松尾 宏平*, 一ノ瀬康雄**, 谷口 智之*, 森下 瑞生*, 和中真之介***

Development of Data Integration Platform and Intelligent CAD for Shipbuilding

by

MATSUO Kohei*, ICHINOSE Yasuo**, TANIGUCHI Tomoyuki*,
MORISHITA Mizuki* and WANAKA Shinnosuke***

Abstract

The NMRI has been working on the “Digital Shipyard” concept as an initiative to promote digital transformation in shipbuilding. The aim is to create a shipyard where everything is planned and expressed numerically, everything is planned numerically, eliminating ambiguities that occur in various aspects of shipbuilding. To build a digital shipyard, the NMRI is working on the research and development of a data integration platform that handles ship life cycle data in a unified manner in the shipbuilding industry. The data integration platform will provide a detailed planning system in the early development stage, a high-speed design environment, an accurate production simulation system, and a precise production management system in a shop floor. This paper specifically reports on our basic research and development of a PLM (Product Lifecycle Management) system for shipbuilding that uses BOM (Bill of Materials) and BOP (Bill of Process) data as the master data in the shipbuilding industry. In addition, as a basic study on a next generation shipbuilding design system (intelligent CAD system), a prototype system that can evaluate propulsion performance, layout design, and productivity simultaneously in an initial design was developed to evaluate the effectiveness of front-loading of ship design.

*構造・産業システム系, ** 流体設計系, *** 知識データシステム系

原稿受付 令和6年10月17日

審査日 令和6年11月25日

目 次

1. まえがき	96
2. 造船の統一データプラットフォームに関する基礎的研究	96
2.1 統一データプラットフォームとその周辺システムの全体構成	97
2.2 BOM のデータ構造	98
2.2.1 M-BOM のデータ構造	98
2.2.2 BOP のデータ構造	98
2.3 PLM システムへの実装と建造シミュレータとの接続	99
2.3.1 M-BOM の作成	99
2.3.2 BOP の作成	99
2.3.3 建造シミュレータとの接続	100
2.4 設計データの再利用に関する検討	100
3. 次世代造船設計システム（インテリジェント CAD システム）についての基礎的研究	101
4. まとめ	103
References	104

1. まえがき

海上技術安全研究所（以下、当所）では、造船の製造現場における DX 推進の取り組みとして「デジタルシップヤード」構想を掲げている。「デジタルシップヤード」構想では、「すべてが数値表現され、すべてが数値計画され、すべてが計画通りに完結する造船所」を目指し、造船作業の様々な場面に発生するあいまいさを排除（デジタル化）する。「デジタルシップヤード」の構築のため、造船業におけるデータ連携の在り方として、設計－建造－運航に渡る船舶のライフサイクルのデータを統一的に取り扱う「統一データプラットフォーム」の研究開発に取り組んでいる。統一データプラットフォームにより、製品開発初期段階における精緻な検討体制、設計における高速設計・流用設計環境、建造における高精度な建造シミュレーション、製造現場の精緻な生産管理体制等の構築を図る。具体的には、BOM(Bill Of Materials), BOP(Bill Of Process)を造船業におけるマスターデータとする造船用 PLM (Product Lifecycle Management) システムに関する基礎的な研究開発を実施したので報告する。

また、前項を踏まえた次世代造船設計システム（インテリジェント CAD システム）に関する基礎的検討を実施した。ここでは、造船所の競争力強化に直結するフロントローディング設計の有効性を確認するため、造船設計 CAD 上に設計初期段階で推進性能、配置設計、生産性を評価できるプロトタイプシステムを開発し、その有効性を評価した。また、製品情報以外の設計データとして、特に、現場設計者・作業者の操作ミスや設計ミスを含む設計作業のモニタリングデータに着目し、これらの造船ビッグデータの利活用方法に関して、現場不具合を IoT デバイス等で収集し機械学習により不具合の発生を予測し、事前に注意を促すシステムの初期検討を行った。

なお、本報告は統一データプラットフォーム及びインテリジェント CAD システムの構築に関する研究開発の内、2020 年度から 2022 年度中に当所内の重点研究として実施した内容について報告する。

2. 造船の統一データプラットフォームに関する基礎的研究

造船の設計プロセスでは、基本計画、基本設計、詳細設計、生産設計の一連のプロセスの中で、始めに船の主要目、船型、区画配置、主要な機器配置が決められ、続いて中央横断面図、キープラン（鋼材配置図、外板展開図）等の主要な構造部材が設計される。この段階で製造面を考慮してブロック割りがされ、ブロック割りに応じて構造配置やスキャンリングが決定され構造図が作成される。そして生産設計にて、各ブロックの組立要領、組立ステージを考慮して、大組、中組、小組等のブロックツリーが決定され製造上の部品に展開される。また、

製造現場では各製品に対する作業プロセスの検討から作業に必要な設備類について検討される。これらの情報は、CAD システム、工程計画システム等の専用システム、各種図面、部品表、各種要領図内で管理される。しかし、例えば工作図はブロックの組立要領、部品名、溶接施工要領を指示する図面だが、工程や詳細な作業手順、船殻部品以外の先行艀装品、建造に必要な治具類に関する情報はなく、これらの情報は他の図面類が扱う。これまでの造船は、作業内容や担当部署ごとにそれぞれが必要な情報を取りまとめて図面類として作成してきたが、今後の設計及び製造のデジタル化において、その情報インフラとして製品や製造に関する情報を統合的に取り扱う必要がある。このため、あらかじめ必要なデータ構造を定め、造船所内に分散している情報を紐づけておく必要がある。このような背景の中、本研究では造船の統一データプラットフォームとして、造船用 PLM システム及び BOM, BOP のデータ構造に関して基礎的な研究を行った^{1),2)}。

造船におけるデータ連携の研究開発に関しては、1990 年代初頭に実施された「造船 CIMS プロジェクト³⁾」が重要な取り組み事例である。造船 CIMS プロジェクトでは「プロダクトモデル」として、製品情報、プロセス情報、リソース情報を統合管理する構想及びそのデータ構造が提案されている。本研究で提案する PLM システム及び BOM の概念はプロダクトモデルの理念・概念を参考にしつつ、現在の汎用 IT ツールでの具体的な実装を図るものと位置づけられる。

2.1 統一データプラットフォームとその周辺システムの全体構成

本研究では、統一データプラットフォームとして PLM システムを活用した。PLM システムは、製品のライフサイクル全体（企画、設計、開発、生産、保守、廃棄等）を管理するための統合ソフトウェアで、これにより情報の一元化、コラボレーションの促進、製品開発の効率化、品質の向上を図る。本研究で整理した造船用 PLM システムと周辺システムの構成及びシステム運用の概略を図 1 に示す。設計プロセスにおいて設計データが生成されると、それらを PLM システムに登録する（図 1 の①）。データ構造としては後述する BOM, BOP の形で表現するが、これにより製品情報と工程情報を統合的に扱う（図 1 の②）。次に、PLM システムに構築されたデータベースを利用して生産計画及び生産管理を行う。例えば、建造シミュレーションを運用（図 1 の③）し、生産計画、日程計画を立案したり、製造現場向けに詳細な作業手順書を作成する（図 1 の④）。その他、PLM システム内のデータベースを直接利用し、生産計画、日程計画、製造現場の生産管理（作業着完の管理等）、資材の調達管理を行う（図 1 の⑤）。生産計画や日程計画の検討の結果、ブロック割りや施工要領、施工ステージを変更する場合、設計システム内で PLM システム内の製品情報及び工程情報を更新し、再度、建造シミュレーションや生産計画、日程計画等を検討する（図 1 の⑥）。

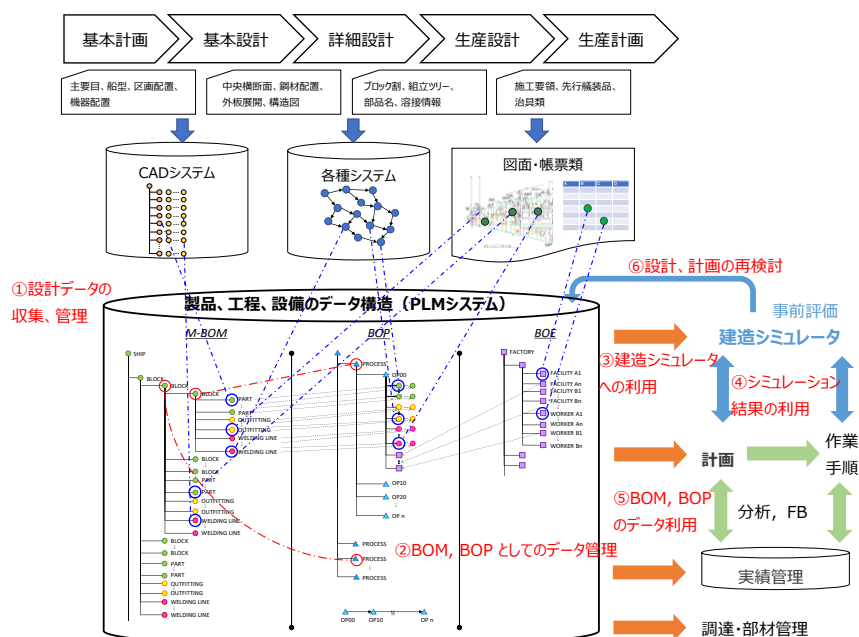


図 1 PLM システムとその周辺システムの全体構成

2.2 BOM のデータ構造

本研究では、造船における設計－製造のデータ連携のため、M-BOM, BOP のデータ構造について整理した。製品情報を M-BOM、工程情報を BOP で表現する。図 2 に M-BOM, BOP のデータ構造の概要を示す。

2.2.1 M-BOM のデータ構造

M-BOM は製品の部品構成を製造上の階層構造で表現する。船殻の場合、船殻部品について組立てる先行関係を階層構造で表現する。つまり、上位の階層に位置する製品の下位に、当該製品を構成する部品を定義する。階層構造の最上位に最終製品（船 1 隻等）を配置し、単一の部品（船殻一品）になるまで階層構造を展開する。階層構造を、いわゆる総組、大組、中組、小組、一品の単位で表現すると、造船所における典型的な組立ツリーに相当する。M-BOM は CAD システムで定義した船殻部品を階層構造の中に参照・登録することで作成する。階層構造には部品だけでなく、当該ブロックの時点で取り付ける先行艤装品、貼付け部材、作業用ピース（吊りピース、足場ピース、エアテストピース等）も登録する。また、ブロック製作時に発生する溶接線を構成部品として登録できる。M-BOM に製造に必要な部品を登録することで、BOP において工程とその対象部品と紐づけて管理する。

2.2.2 BOP のデータ構造

BOP は製品を製造する各工程の工程情報、作り方の情報を表現する。本研究で提案する BOP では、「工程」(PROCESS) を定義した上で各工程にそれを構成する「作業」(OPERATION) を定義する。各作業には当該作業に必要な部品と利用可能な設備を定義する。部品は M-BOM から参照し、設備は BOE (Bill Of Equipment) から参照する。これにより工程情報を介して製品情報と設備情報を結び付け、システム内で一元管理する。工程の粒度は任意に設定できるが、総組、大組、中組、小組で表現すると BOP は典型的な組立工程毎の作り方に関する情報となる。同様に、工程内の作業の粒度も生産計画や生産管理の粒度に応じて任意に設定できるが、一般には製造現場における生産管理（着完管理等）の単位に合わせる。BOP で表現する工程情報と M-BOM で表現する製品情報の粒度を合わせ、データ間の参照関係に対応性をつけることが運用面から重要である。

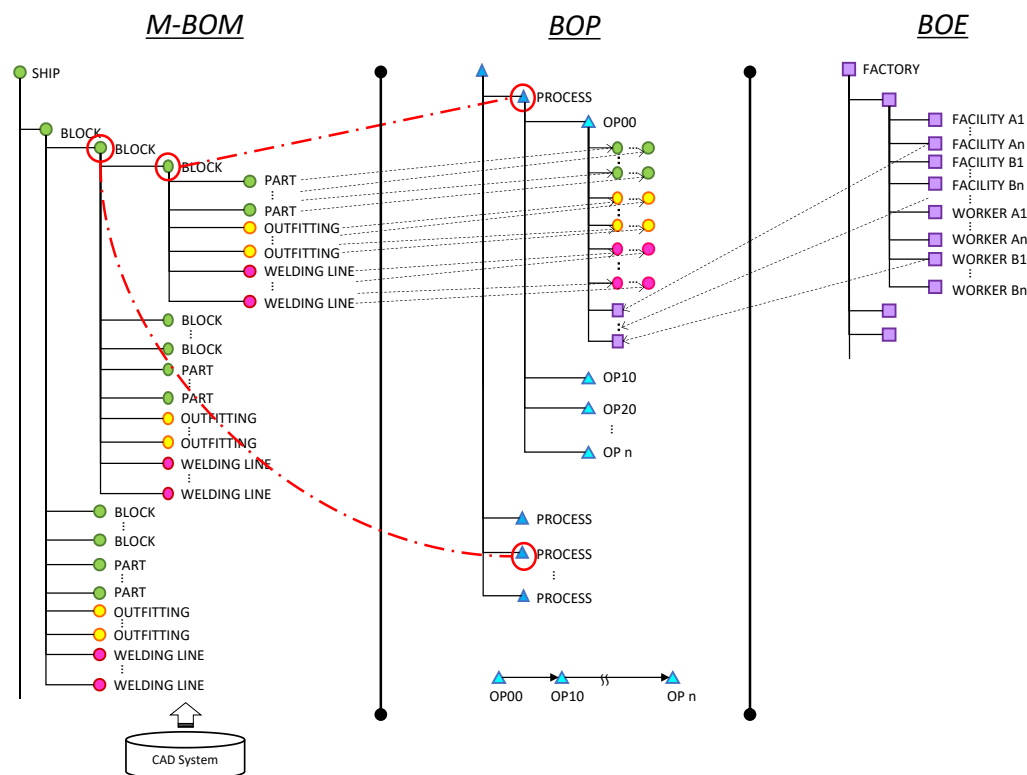


図 2 M-BOM, BOP 及び BOE の概念図

2.3 PLM システムへの実装と建造シミュレータとの接続

PLM システム内に BOM, BOP を実装し検証を行った。今回の検証は、造船所が一般的に作成している情報を対象に、それらを BOM, BOP 上で管理することを想定して実施した。つまり、造船所の設計図、工作図、部品表、作業要領図等で扱う情報を PLM システム内の BOM, BOP に束ねる。そして、建造シミュレーションの実施や作業手順書の作成に対して、入力情報としての情報内容や情報表現の妥当性を検証した。なお、今回の検証では、造船用 CAD システムとして Siemens 社製 NX Ship, PLM システムとして Siemens 社製 Teamcenter を使用した。

2.3.1 M-BOM の作成

船体中央平行部を対象に、造船用 CAD システムで船体のモデリングを実施した(図3)。CAD システムにて船体中央平行部の全体をモデル化し、これにブロック分割線を入力することで船殻ブロックを定義した。M-BOM は PLM システム内に構築した。M-BOM の製造上の階層構造に従って、CAD システムで生成した部品を登録した。今回の検証では、大組、中組、小組、先行小組、一品の組立ツリーの階層構造で M-BOM を作成した。PLM システム内の M-BOM には、上記の階層構造に従って、製品情報としてブロック、船殻部品、また、溶接線を定義した。船殻部品については、CAD システムでモデリングされた部品の形状情報（JT ファイル形式で管理）と属性情報（部品名、接続する部品、送り先情報等）が登録された。

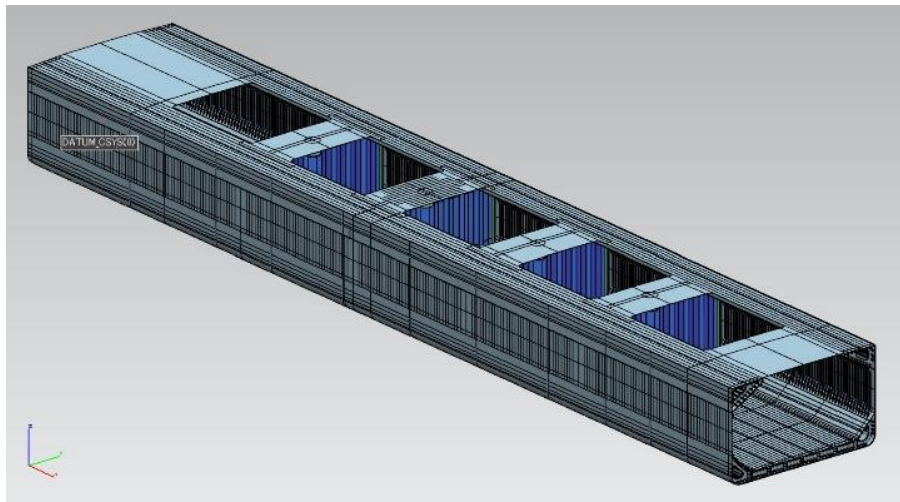


図3 検証用の船体モデル

2.3.2 BOP の作成

対象ブロックの大組、中組、小組、先行小組の BOP を作成した。各工程内の作業には配材、取付、溶接等を定義した。小組工程の場合、作業を OP10(配材)→OP20(取付)→OP30(溶接)→OP40(配材)→OP50(歪取)→OP60(取付)→OP70(溶接)→OP80(配材) とテンプレート化し、各作業に該当する製品、設備を参照・登録した。BOP の作成にあたっては、M-BOM に定義されている溶接線の情報を使って様々な作業を表現することに工夫した。つまり、溶接作業だけでなく、歪取り作業についても溶接線の情報でその作業を表現した。作業には利用可能な設備を併せて定義した。設備情報は作業可能な作業員情報も含めて BOE で定義する。今回の検証では、建造シミュレーションにおいて設備の使用上の干渉を表現するため、クレーン、溶接機、簡易自動台車等、干渉によって無視できない影響が生じる主要設備について定義した。以上を踏まえて作成した BOP の例を図4に示す。

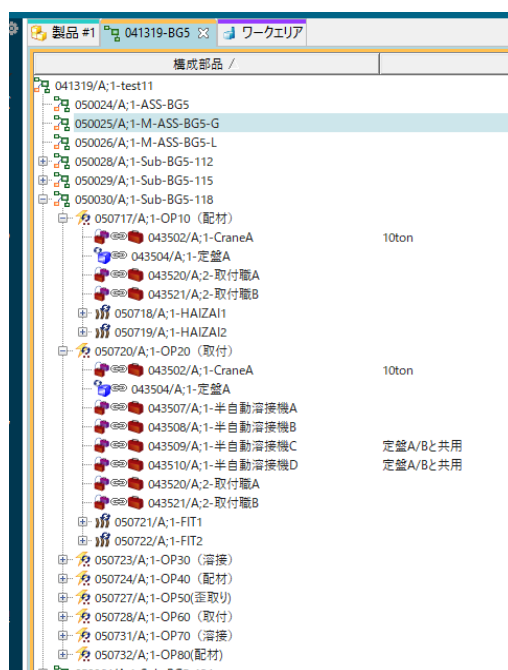


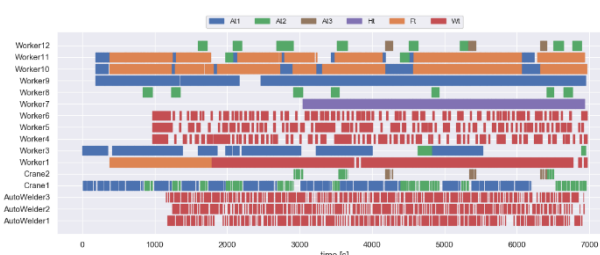
図4 PLMシステム内のBOPの例

2.3.3 建造シミュレータとの接続

PLMシステム内で作成したM-BOM, BOPデータを当所で開発している建造シミュレータと接続し、データ構造の妥当性を検証した。建造シミュレータ⁴⁾はマルチエージェントシステムにより付随作業まで含めた造船作業の詳細な動きを再現する。PLMシステム内で定義した工程、作業情報に基づき、シミュレータ内で作業者の詳細な作業を再現できるかについて検証した。今回、PLMシステム内に定義した工程、作業情報は一般的な造船所で作成している情報を対象としている。小組工程を対象とした建造シミュレータとの接続に関して、PLMシステム内の情報を入力データとして、不足する情報は途中で補完しつつ、小組工程の作業をシミュレータ内で再現することを確認した(図5, 図6)。これにより、PLMシステム内のデータから建造シミュレータ運用までの一連のデータフローを整理できた。



図5 建造シミュレーションのイメージ

図6 建造シミュレーションの結果で得られる
ガントチャート

2.4 設計データの再利用に関する検討

製品データをたちどころに生成できる仕組みや仕様変更等に柔軟に対応できる設計手法を整備するため、PLMシステムを基盤とする設計プロセス、データ生成機能について検討した。具体的には、過去番船モデルの流用設計により製品モデルをBOM/BOPデータまで含めて高速設計する手法について検討した(図7)。3次元モデルの設計変更については既存CADシステムのパラメトリック設計機能(形状情報をパラメトリックに表現すること

で類似形状部品を複製処理できる機能）及びルールベース設計機能（設計標準等の設計ルールを CAD に搭載することでスロット形状や開先処理等の生産設計を自動処理する機能）を活用することで、新船の3次元モデルが高速かつ低工数で設計できることを確認するとともに、それら機能の活用を想定した設計プロセスを整理した。また、新船のBOM/BOP データ生成について、PLM システムのテンプレート機能（レシピ機能）をカスタマイズすることで類似部品の BOM/BOP データを自動生成できることを確認した。これらの機能確認、機能開発にあたっては、実際の船舶製品モデルの生成を想定し、上流から下流までの設計プロセスを再現することで実施した。具体的には、代替燃料対応による機関室内燃料タンク拡張の設計変更を想定した上で、設計プロセスの一連のデモを実施した。図8及び図9にこの検証で利用した PLM システムの画面の例を示す。

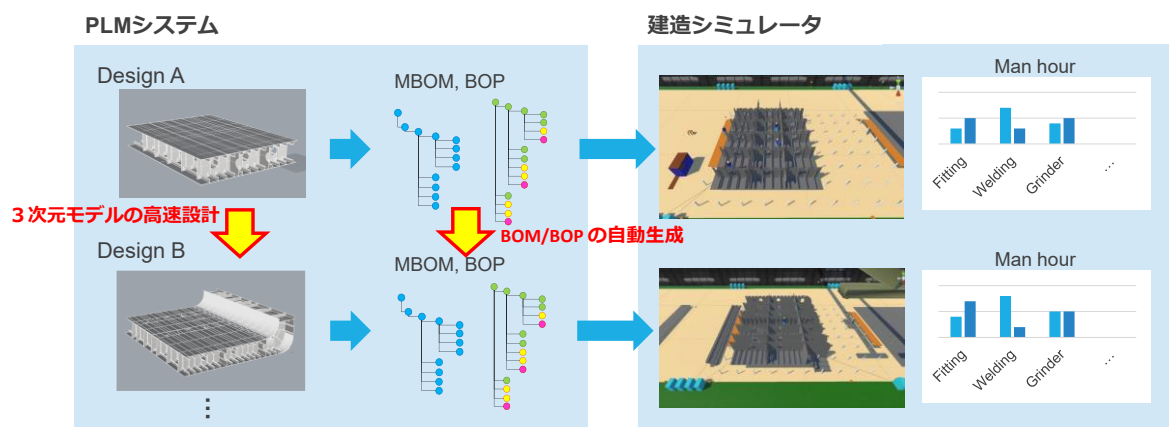


図7 流用設計による高速設計，データ生成の概念図

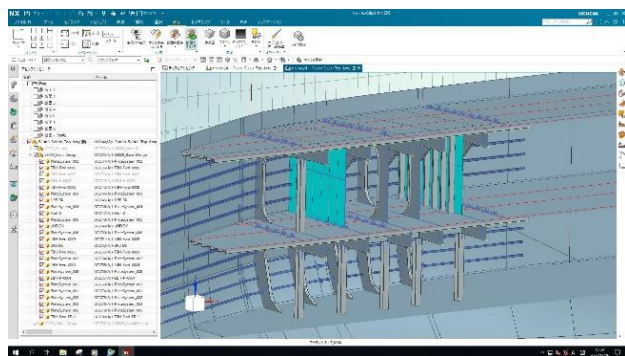


図8 機関室の流用設計デモ

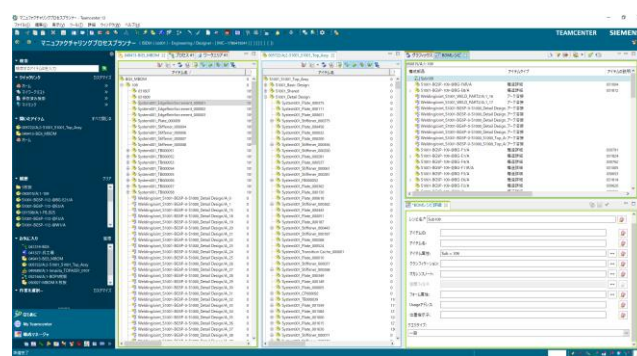


図9 BOM/BOP データとBOMのレシピ機能

3. 次世代造船設計システム（インテリジェント CAD システム）についての基礎的研究

「造船 CIMS プロジェクト³⁾」では、船舶設計の初期段階から3D プロダクトモデルを構築し、設計から生産までを一貫して最適化するという先進的な試みが行われた。しかし、その後3D CAD システムの導入が設計現場で進む中、設計の初期段階と生産段階で異なるシステムが使用されるように、市販 CAD システムが乱立し初期段階から一貫した3D プロダクトモデルを扱うような設計手法は実現していない。乱立した CAD システムとプロダクトモデルは、結果的に設計プロセスを推進性能設計、配置設計、構造設計、生産設計と順に行うウォーターフォール型に固定することとなり、基本設計段階で構造や生産性を定量的に評価できる設計、いわゆるフロントローディング設計が難しい現状となっている。造船所における建造コストの多くは鋼材の重量や製造に関連するコストであり、フロントローディング設計の実現は造船所の競争力強化に直結する。このため、次世代造船設計システム（インテリジェント CAD システム）の開発にあたって、フロントローディング設計の有効性を検証する必要がある。

本研究では始めに、基本設計段階でのフロントローディング設計の有効性を検証するため、当所で開発した CFD ソフトウェア⁵⁾と船舶設計用 CAD システム（NAPA⁶⁾）を連携させ、そこに主機周辺の構造部材の配置を自

動配置する機関室自動設計ツールと、機関室自動設計ツールで設計したエンジンルームバルクヘッドに対応した貨物倉を自動設計する貨物倉自動設計ツールを開発し、これらを組み合わせて推進性能と載貨容積の最適設計を行った。図 10 に開発したシステムを用いて試設計した 62,000DW バルクキャリアの推進性能と載貨容積に関する多目的最適化の例を示す⁷⁾。図の横軸は伝達馬力、縦軸は載貨容積を表しており、各点は異なる船型設計案を示している。通常、造船所では数種類の設計案を表形式で船主に提示するが、このシステムでは数十種類の設計案を自動生成して提示することで、表形式の設計案の比較であるポイント設計と比較し、設計空間全体を構造的に把握することが可能である。図の緑色の線は、多目的最適化問題の結果として得られたパレート解を示しており、全 216 ケースの探索結果である。このパレート解を詳細に観察すると、載貨容積が 62,800 m³ 付近で一定であるにもかかわらず、伝達馬力が大きく変動していることが確認できる。これは 62,000DW バルクキャリアの載貨容積における設計上限を示しており、従来の手法では把握できなかった船型設計の特性がこの図から明らかになった。従来の表形式の設計案と比較して、本手法は設計空間全体を構造的に把握することが可能で、設計者の設計空間の構造的な理解を促進するだけでなく、設計者と顧客との技術コミュニケーションにおいても顧客の要求や物理的な設計上限を数値的に明確するなどの技術コミュニケーションの改善効果があることが現場の設計者から指摘されている。このように多目的最適化によるフロントローディング設計は後戻り工程の低減などによる建造コストの削減だけでなく、顧客とのコミュニケーションの向上にも寄与することが分かった。

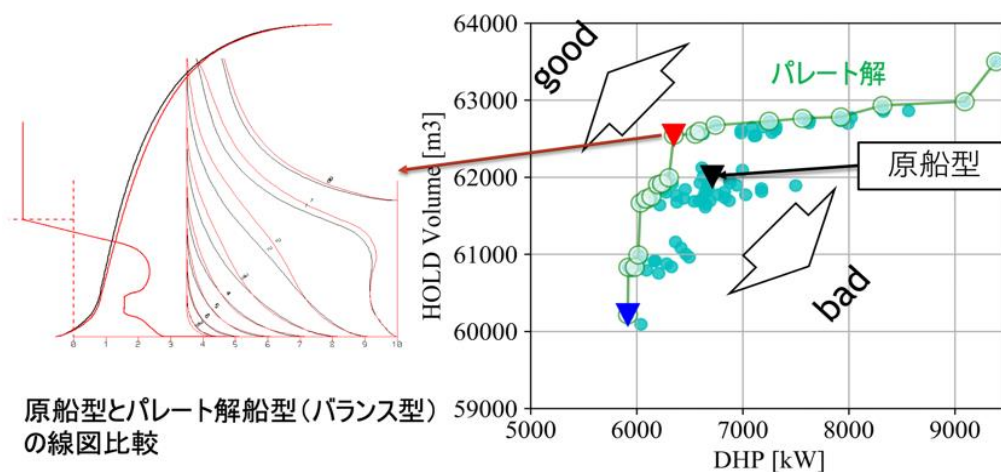


図 10 62,000DW クラスバルクキャリアの推進性能と載貨容積の多目的最適化例

次に生産設計のフロントローディングの効果を検証することを目的に、先ほどの船舶設計用 CAD システム (NAPA) に船体外板の工作性 (難易度) が評価出来る曲率線展開プログラム⁸⁾ (当所開発) を組み込み、外板の自動加工難易度評価ツールのプロトタイプを開発した。これらの開発したツールは CFD 用の外板データを読み込むと事前に設定した条件に従い、自動で外板の板割りを行い、板割りされた外板一品に対して当所の曲率線展開プログラムが実行され、その外板に対するプレス線およびガス加熱線が示される。本研究ではこのツールに対して造船所技術者と CAD メーカー技術者とで評価を行った。その結果、本ツールは加工難易度評価の概略を掴むツールとしては有効であるものの、実際の外板の板割りは造船所ごとの工場設備などにより細かい設定と調整が必要となるため実用的な評価結果を得るためには更なる改善が必要であることが明らかとなった。

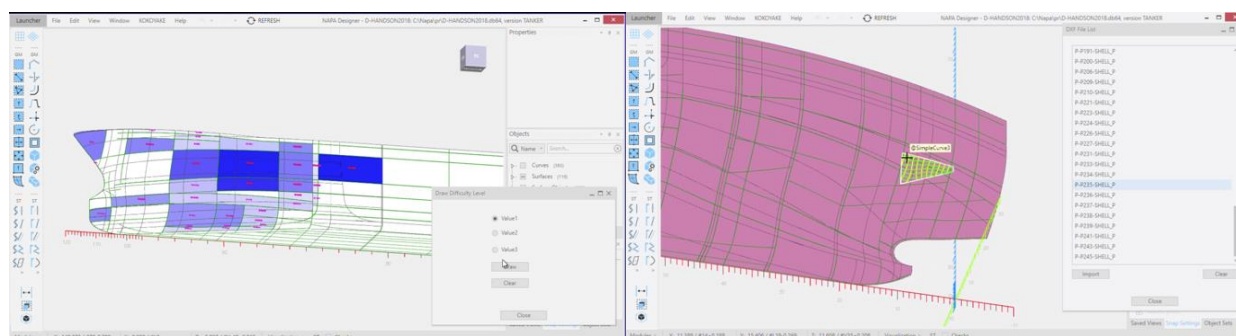


図 11 船舶設計用 CAD システム (NAPA) 上に組み込まれた自動加工難易度評価ツールの例

さらに、本研究では2章で議論されている製品情報以外の設計データとして、特に、現場設計者・作業者の操作ミスや設計ミスを含む設計作業のモニタリングデータに着目し、この造船設計ビッグデータをどのように設計に利活用できるのかの検討を行った。その結果、図12の通り、設計作業のログデータを設計事象データベースとして蓄え、このデータベースから機械学習等の知識抽出手段を用いて設計ナレッジベースを構築し、現場の不具合の発生を予測し、事前に注意を促すシステムの概念設計を行った。今後、システムのプロトタイプを開発し検証を行う予定である。

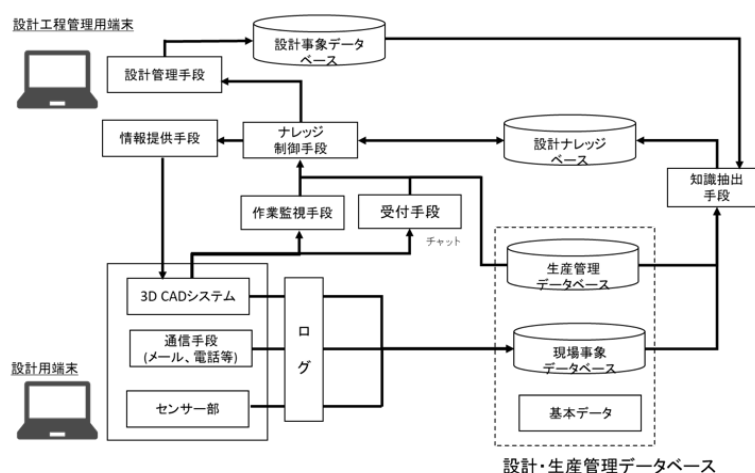


図 12 造船ビッグデータを活用した現場不具合予測システムの概念図

4. まとめ

本報告では、2020年度から2022年度中に当所内の重点研究として実施した造船用の統一データプラットフォーム及びインテリジェント CAD の研究について報告を行った。

造船用統一データプラットフォームの研究では以下のことを明らかにした。

- ・ 統一データプラットフォームとして汎用 PLM システムを活用する場合の周辺システムを含めたシステムの全体構成を整理した。
- ・ PLM システム内では BOM の形式で製品データを管理することとし、造船の M-BOM, BOP のデータ構造を設計した。
- ・ PLM システムを活用した検証によって、現在、造船所が一般的に作成しているデータを PLM システム内でデータ登録、データ管理できることを確認した。また、当所で開発している建造シミュレータと PLM システムの接続フローを整理した。

次世代造船設計システム（インテリジェント CAD システム）についての基礎的研究では以下のことを示した。

- ・ 推進性能と載貨容積とを多目的最適化する設計システムを開発し、設計のフロントローディングが建造コストの削減だけでなく顧客とのコミュニケーションの向上にも寄与することを明らかにした。
- ・ 船舶設計用 CAD システムに当所開発の曲率線展開プログラムを組み込み、外板の加工難易度を初期設計で評価するツールのプロトタイプを開発し、造船所・CAD メーカーと共に開発プロトタイプの初期評価を行い、有効性及び改善点を抽出した。
- ・ プロダクトモデル以外の造船ビッグデータの利活用法として、現場不具合を IoT デバイス等で収集し機械学習により不具合の発生を予測し、事前に注意を促すシステムの概念設計を行った。

References

- 1) Kohei Matsuo, Mizuki Morishita, Kentaro Hiyoku, Masaki Sueoka, Tomoyuki Taniguchi, Masahito Takezawa: A Fundamental Study on PLM System for Shipbuilding, Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 2022, Volume 34, 34, Pages 427-430.
- 2) Kohei Matsuo, Mizuki Morishita, Tomoyuki Taniguchi, Masahito Takezawa: Toward Data Standardization and PLM System Development in Shipbuilding Industry, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.22, (2022).
- 3) Japan Shipbuilding Research Association: FY 1988 Report of Research Study on Design, Construction and Maintenance Technology of Ships in the New Generation of SR210, 1989.
- 4) Tomoyuki Taniguchi, Masahito Takezawa: Development of High-Precision Production Simulation for Shipbuilding Based on Multi-Agent System, Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 2021, Volume 33, 33, Pages 327-333.
- 5) Hirata, N, Tahara, Y, Ohashi, K, Kobayashi, H, Onodera, N: CFD Software for Hull Form Design, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.15 No.4, (2011).
- 6) NAPA : <https://www.napa.fi/ja/software-and-services/ship-design/>, 2024.10 accessed.
- 7) Ichinose, Y., Tahara, Y., Takami, T., Kaneko, A., Masui, T., Arai, D. : A Study of Multi-objective Optimization for Propulsion Performance and Cargo Capacity, Proceedings of the 14th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, 2019.
- 8) Matsuo, K, Fujimoto, S: The System of Curved Shell Plate Developing by Lines of Curvature and the Assistant System for Press Work in Shipbuilding, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.15 No.4, (2015).