

## 11 DX造船所の実現に向けた研究開発

松尾 宏平\*, 谷口 智之\*, 津村 秀一\*, 松尾 剛\*

### Concept of “Digital Shipyard” towards Digital Transformation in Shipbuilding

by

MATSUO Kohei, TANIGUCHI Tomoyuki, TSUMURA Shuichi, MATSUO Tsuyoshi

#### Abstract

In response to the demand for digital transformation (DX) in shipyards, NMRI has been engaged in research and development on DX in shipyards for a "digital shipyard" concept. We define our digital shipyard as a shipyard where everything is expressed and planned numerically.

This paper describes the concept of our digital shipyard and introduces the related research and development that we have conducted thus far and will conduct in the future. Specifically, we present research on data integration between design and manufacturing using a PLM system, the representation of shipbuilding operations using production simulator for shipbuilding and its application to production planning, the digitization of quality data, and manufacturing methods such as a novel joining method.

---

\* 構造・産業システム系

原稿受付 令和5年4月26日

審査日 令和5年5月15日

## 1. はじめに

造船所の DX 化が求められる中、海上技術安全研究所（以下、当所）では、「デジタルシップヤード」構想として、造船所の DX 化に関する研究開発に取り組んでいる。ここでは「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」をデジタルシップヤードと定義し、製品開発における納期／品質／コストを計画通り達成する造船所を目指す。

本稿では当所の「デジタルシップヤード」に関する研究開発に関して、そのコンセプトを説明した上で、これまでに取り組んだ関連する研究開発と、これから取り組む予定の研究開発について紹介する。これらの研究開発にあたって、当所ではデジタルシップヤードに対する具体的な造船イメージを掲げている。本稿ではデジタルシップヤードの造船イメージの一例を紹介するとともに、将来の造船設計、製造の在り方について考察する。

## 2. 「デジタルシップヤード」と関連研究

始めに当所が掲げる「デジタルシップヤード」について当所が考える造船の現状課題とその解決へのアプローチについて説明する。その後、その解決のため第 1 期中長期計画期間中に実施した造船の設計－製造のデータ連携に関する研究と建造シミュレーション技術に関する研究について紹介する。

### 2.1 「デジタルシップヤード」のコンセプト<sup>1)</sup>

始めに、「デジタルシップヤード」に関して当所の造船における課題認識から説明する。現在、国内の造船所では同種同型の船舶を連続的に建造するシリーズ船建造が一般的である。シリーズ船建造により、設計リソースの有効活用（ひとたび設計した船舶の図面、モデルを次番船以降にも活用する）と製造における生産向上、品質向上（習熟効果によって次番船以降の能率、品質が向上する）が期待できる。国内の造船所において一般的となっているシリーズ船建造であるが、依然として以下の課題が残っている。

- ・ シリーズ 1 番船に対して正しい工数、コストの見積もりができない：一般に、造船所が保有する膨大な過去の設計資産、実績データを参考に新船の物量、能率等を設定した上で、新船の工数、コストを見積もるが、過去の設計資産（図面、モデル類）、実績データが造船所内で体系的に整理されていないため、データの有効活用が十分にできない。
- ・ 建造コストが悪化する：上記の問題はあるものの、実績データを参照して新船向けの能率を設定し、物量から工数、コストを見積もるが、実際は工数、予算オーバーとなることがある。船体構造や機器配置が異なる新船の工数、コストを過去番船の能率ベースで見積もることに課題がある。
- ・ 習熟したシリーズ後番船であっても突如、工数が増加する：品質の問題により、造船所の工程が大きく乱れ

ることがある。

これらの課題に対して当所ではその解決のためのアプローチとして以下を考えている。

- ・ 造船所内のデータ連携：設計から製造に至る各部署で取り扱うデータ項目、データ構造を予め取り決め、それをシステム内で一元的に管理する。一元化されたデータをマスターデータとし、それを最新の単一情報源として造船所内で情報共有するだけでなく、データ間の関連付けを行ってデータ管理することで、関連のあるデータを速やかに検索、利用する。
- ・ 造船作業の正しい表現：工数やコストの見積もりを物量×能率の計算によるマクロ的な手法から、作業を構成する要素作業の積み上げ計算によるミクロ的な手法に基づくものに転換する。製品の性質（形状、構造配置、機器配置、製造方法等）に応じて製品固有に要素作業の展開から工数、コストの見積もりを行う。
- ・ 品質のデジタル化：溶接や塗装等の品質管理箇所に対して原則、定量的な全数検査を行う。品質達成の評価基準を定量化し品質のグレーゾーンをなくす。全数的な品質検査のため、検査の機械化、自動記録化を行う。

造船所内のデータ連携を基盤とし、造船所内の設計プロセス、製造現場の造船作業、品質を数値化、見える化する。そして、全てを数値的に計画し、数値的に管理することによって、納期／品質／コストを計画通り達成することがデジタルシップヤードの達成目標である。このため、当所では、これまで以下の研究開発に取り組んできた。

- ・ 一貫したデータ生成と再利用：特に設計－製造のデータ連携の観点から、造船所のデータを BOM (Bill of Materials, 部品表)/BOP (Bill of Process, 工程表) の体系でデータ管理する手法について研究している。BOM/BOP データは PLM (Product Lifecycle Management, 製品ライフサイクル管理) システムでデータ管理するため、PLM システム上での造船業務プロセス、データ生成手法について研究している。併せて、BOM/BOP データの生産計画や生産管理でのデータ活用について研究している。
- ・ 建造工程の精密なシミュレーション：造船作業をその付随作業（準備作業、段取り作業等）も含め、要素作業単位で再現する建造シミュレーション技術について研究している。建造シミュレーションは造船の様々な場面（引合対応、設計、製造等）で活用できる。様々な場面に応じた建造シミュレーションの用途や利用方法について研究している。
- ・ 品質のデジタル化：溶接や塗装の検査自動化技術について研究している。

この内、本章では設計－製造のデータ連携及び建造シミュレーション技術についてこれまでの研究成果について報告する。

## 2.2 デジタルシップヤードの関連研究

デジタルシップヤードの実現のため、当所でこれまで実施した研究開発について紹介する。3章で詳細を紹介するが、第2期中長期計画期間ではこれらの研究開発を継続、拡大する形で研究開発を実施する。

### 2.2.1 設計-製造のデータ連携に関する研究<sup>2), 3)</sup>

造船の製造部門は、設計部から図面類を引き継いだ上で、詳細な製造プロセスや作業手順、リソース（定盤等）の割当、製造日程の作成を行っている。製造部門で作成されるデータは（少なくともシステム上の観点からは）独立であり、造船所内の他部署（設計部、調達部等）とデータ共有やデータ連携されない。このような中、本研究では設計-製造のデータ連携の観点から、製造部が生成する製造情報を設計部が生成する設計情報と紐づけてデータ管理する手法について研究している。具体的には、製品の設計情報と製造部が生成する工程情報を BOM/BOP の体系でデータ管理することに関して、造船業の特徴を踏まえた上でデータ項目やデータ構造について研究している。BOM/BOP のデータ構造やそれらの PLM システムによるデータ管理（図-1 参照）に関する詳細については既報<sup>2), 3)</sup>を参照いただきたいが、これまで製造部が主となって生成する工程情報を BOP として製品情報である BOM と紐づけて体系的にデータ管理することに意義がある。これにより、例えば設計変更による製造への影響箇所や製造側の遅れによる他工程への影響箇所等がデータ連携されているため即座に分かる（関係部署にも適切に情報伝達できる）。また、BOP をマスターデータとして製造現場の体系的な生産管理ができる。例えば、BOP で定義された作業順に従ってタブレットを介して製造現場の作業指図や作業の着完管理ができる。作業情報は製品情報と紐づいているため、現在どの製品が製造されているか等を製品情報（例えば 3次元モデル）上で共有できる他、どの製品にどれくらいの工数をかけたか等、作業実績データとの紐づけができる（品質データも紐づけできる）。

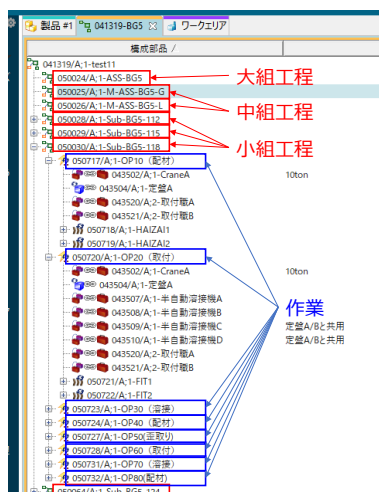


図-1 PLMシステム上でのBOPのイメージ

BOPの運用にあたっては、製品単位（例えばブロック単位）でBOPデータを生成する必要がある。このため、プレート機能等によるBOM/BOPのデータ生成手法についても併せて研究を行っている。

### 2.2.2 建造シミュレーション技術に関する研究<sup>4)</sup>

大型構造物の一品生産である造船業では、他産業に比べてライン生産は進んでおらず、定盤上に置かれたブロックに作業が入り替わりながら作業を実施する。このため準備、段取り作業（付随作業）が多く、これらの作業は作業者の臨機応変な判断に基づき実施されている（熟練工ほど要領よく作業を実施できる。当所では造船作業における巧拙とはこの付随作業に対する要領の良さではないかと考えている）。現在、作業工数は物量（製品の重量、数量、溶接長、面積等）に能率をかけることで求めるのが一般的であるが、付随作業の量は物量に比例しないため造船作業の工数を能率ベースで求めることには精度上の限界がある。このため、当所では造船作業に対して付随作業まで含めてそれを構成する要素作業を展開し、その結果として工期、工数を求める建造シミュレーション技術の開発を行っている。

建造シミュレーション技術はマルチエージェント技術を応用して開発している（図-2参照）。建造シミュレーション技術は人間作業の表現、解明に相当するが、人間作業が欠かせない造船業にこそ重要な技術である。建造シミュレーション技術の詳細については既報<sup>4)</sup>を参照いただきたいが、これまでに船殻の小組工程、大組工程の建造シミュレーションのプロトタイプを開発しており、順次、艀装工程を含めて適用工程を拡張中である。また、造船所と共同研究を実施し、建造シミュレーションの造船現場での活用法について検討を進めている。共同研究では製造現場における生産管理の観点から、作業者に詳細な作業手順を提示する、ち密な管理工数を出力する等について建造シミュレーションを活用する検討を行っているが、今後は製造予算の見積もり、製造日程の作成等、様々なユースケースにおける建造シミュレーションの活用について検討を広げていく予定である。

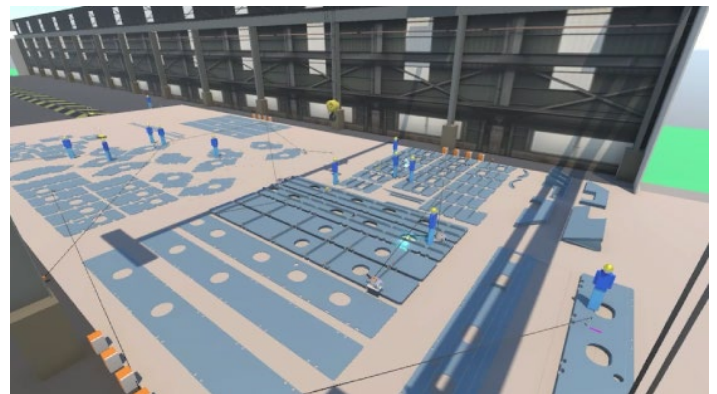


図-2 建造シミュレーションのイメージ

### 3. 第2期中長期計画で実施する研究

第1期中長期計画期間中の研究開発を受けて、第2期中長期計画で実施予定の研究について紹介する。個別の研究の紹介に先立ち、その目指すべき姿としてデジタルシップヤードの具体的な造船イメージ例を紹介する。

#### 3.1 デジタルシップヤードの具体的な造船イメージ

図-3 はデジタルシップヤードの造船イメージを示したもので、同図の左側が従来の造船の製品開発スパイラルのイメージ、右側がデジタルシップヤードにおける製品開発イメージを表している。同図の右側では、製品開発スパイラルが外側から内側に向かって同心円的に進んでいるイメージを表している。これは、従来の基本設計→詳細設計→生産設計や船殻→艀装等の設計フローにおいて製品情報をラフな情報から詳細な情報に成長させるものに対して、過去番船の設計資産を有効活用することによって設計初期段階から詳細モデル(3次元モデル+BOM/BOP情報等)ベースで流用設計し、製品情報の仮モデルから確定モデルへと情報生成を進展しているイメージを表している。仮モデルから確定モデルへ

の成長にあたり、各部署が随時、モデルに対して設計変更を実施する。これまでのように各部署に順次的に図面を引き渡すのではなく、同時にモデルに触るイメージであり、このためPLMシステムでのデータ管理によるモデルベース開発が基本となる。また、複数部署からモデルを同時に触るため、設計変更管理機能や承認管理機能等の設計業務管理機能が必要となる。

計画初期段階から(仮ではあるが)詳細モデルを活用できるため、建造シミュレーションによる精緻な生産計画が実施できる。設計変更による確定モデルへの進展の都度、生産計画も確定化していくが、初期段階から詳細モデルを用いてミクロ的に、具体的には要素作業の積み上げに基づいて製造現場の生産計画を実施する点は従来のものと大きく異なる。図-3の右側のイメージでは、建造シミュレーションで作成された精緻な生産計画、詳細作業指示情報を製造現場に適切に伝達し、製造現場から実績を収集するイメージも含まれている。また、施工品質に関して、全数的な品質検査とデータ化により、データに基づく品質検査と製品データ-品質データの連携について併せて記載している。

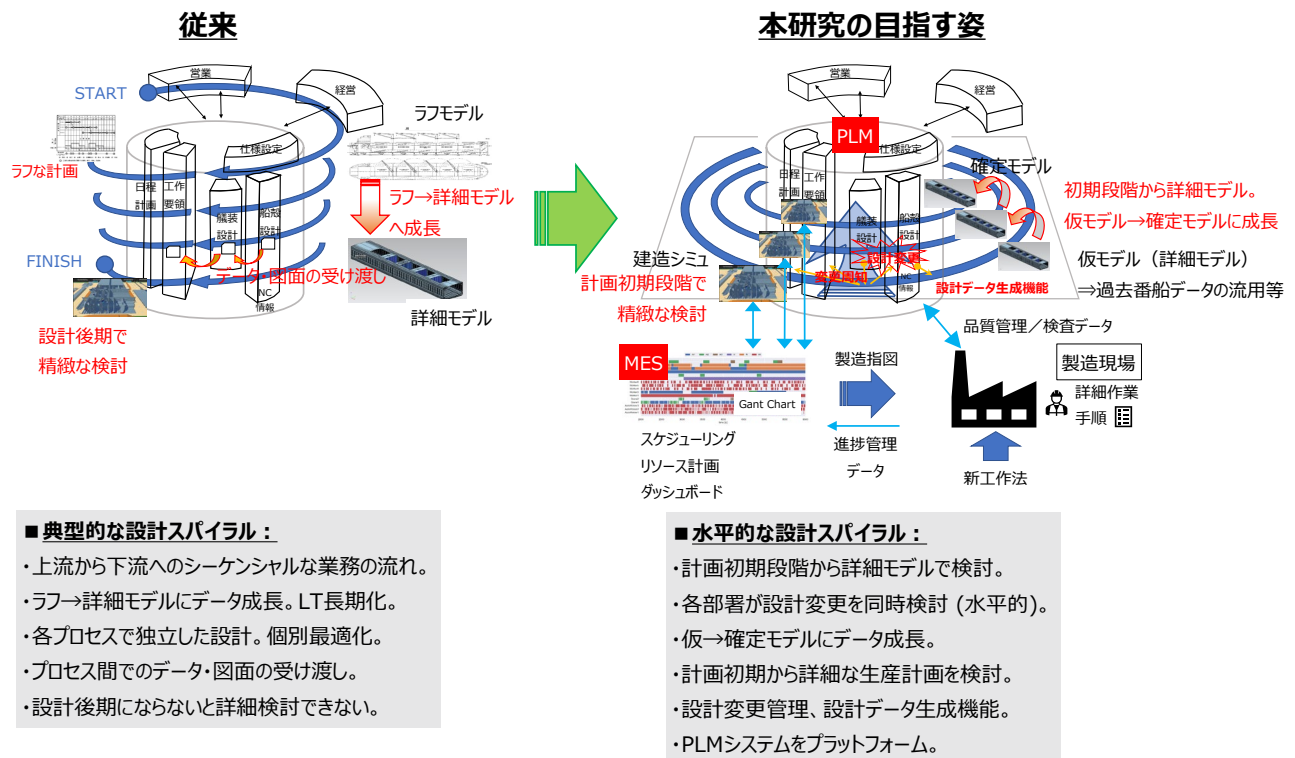


図-3 デジタルシップヤードにおける造船所イメージ例

#### 3.2 第2期中長期計画で実施する研究

第2期中長期計画では3.1節で紹介したようなデジタルシップヤードを実現するための研究開発を実施する。計画している研究は設計、製造、品質管理、新工作法に関するものであるが、これらの研究計画は、始めにデジタルシップヤード

を実現するための技術要件を網羅的に整理<sup>9)</sup>した上、それを参照して計画したものである。以下、それぞれの研究計画について概要を説明する。

### 3. 2. 1 船舶のモデルベース設計に関する研究開発

造船プロセスにおけるデータ連携及び PLM システムによるデータ管理について、その対象範囲を設計上流まで拡張する。

開発初期段階においても建造船の実際のモデルに基づき、リアリティをもって検討する船舶のモデルベース開発が不可欠である。船舶のモデルベース開発のため、製品モデルの生成、データ管理に関する研究開発を実施する。MBSE (Model Based Systems Engineering) の概念を取り入れつつ、造船の製品開発における上流から下流までの一連のデータ構造 (BOM/BOP) を体系的に整理し、それを PLM システムで管理するための研究開発を実施する。また、設計データの自動生成機能に関する研究を実施する。具体的には、設計履歴機能等によるデータ生成手法やモジュール化設計手法等について研究する。併せて、組立ツリー情報や工程情報に関して M-BOM/BOP のデータ生成機能に関する研究開発を実施している。図-4 は流用設計におけるデータ生成のイメージであるが、設計履歴機能等によってモデルが設計変更されると、それに対応して BOM/BOP データが更新されることを表している。

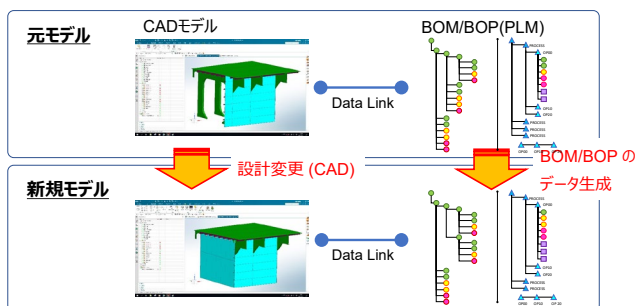


図-4 流用設計における設計データの生成イメージ

### 3. 2. 2 造船製造現場のDXに関する研究

造船所の製造現場の効率化を実施するため、製造実行システム (Manufacturing Execution System: MES) のDXに関する研究を継続する。造船は自動車産業等のライン化が進んだ産業に比べ、主作業よりも付随作業の割合が多い。このため、作業効率化のためには付随作業に注目する必要がある。付随作業まで緻密に演繹的に解析・予測するための建造シミュレーション技術と、それに基づく工程計画・管理システムに関する研究開発を実施する。

建造シミュレーション技術については、3次元空間上での作業者の経路や作業間の干渉、配置場所等を自律的に判断するエージェントの構築と、付随作業まで再現する汎用的なタスクの構築手法について検討・実装を行う。また、実際の大組立や艀装工程等の需要の高い工程を優先対象としてユースケースを選定し社会実装を進める。工程計画・管理システムについては、建造シミュレータを活用して、スケジューリングや詳細な作業指示、作業進捗管理やダッシュボード等、MESに関する研究開発を実施する。建造シミュレータとモニ

タリングデータに基づく統一的な工程計画・管理システムの構築を進める。

### 3. 2. 3 品質管理のデジタル化に関する研究

品質問題による造船所内の工程の乱れを排除することを目的として、検査の機械化、自動記録化による品質デジタル化を想定した品質管理手法の研究及び検査自動化に関する研究開発を行う。

溶接の品質管理を対象として、まずは疲労損傷のリスクが高い接合部を対象に外観検査ロボットや高精度 UT 等による検査の機械化、自動記録化の研究開発を実施するとともに、欠陥/無欠陥 (健全部) を総合的に品質評価する手法について研究する。

また、3.2.2 節でも取り組む造船作業の数値表現にあたり、製造中に発生する製品の寸法誤差は、事前に作業計画がし難く作業者の臨機応変な判断に委ねることになり、作業の数値表現において大きな阻害要因となる。このため、船殻ブロックについて体系的な品質マネジメント手法を整理する。具体的には、ブロックの寸法計測作業の経済性評価を行うことで、合理的に計測対象 (計測箇所と計測点数等)、計測頻度を決定する手法を開発する。

これらの品質の定量的データ管理により、製造現場における検査レス等のデータドリブンな検査体制への移行が期待される。データドリブンな検査体制のため、品質データのデータ構造の策定を含め、製品-工程-品質データの PLM システムによるデータ管理について研究する。

### 3. 2. 4 予防保全高度化のための接合の新工法・評価技術に関する研究

溶接変形等による船殻ブロックの寸法誤差は工数増加の観点のみならず工程の制御が困難であることから、造船の数値的な表現において阻害要因となる。このような阻害要因を根本から除外するため、造船の新工法について研究する。新工法の観点から、接合の代替施工法及びその評価法について基盤的な研究を実施する。

具体的には、溶接後の止端部の応力集中低減を目的とする新たな二次加工法や溶接に代わる接着接合法を、3.2.2 節で取り組む建造シミュレータ等を活用して、適用箇所を見極め提案する。二次加工法としては、ニードルピーニング法を有望視している。現状、溶接止端部の後処理は、グラインダーを用いた研削加工が実施され、熟練した技能が必要であり、かつ工数増加の要因でもある。ニードルピーニングによる止端部打撃で代替できれば、大幅な工数低減に繋がる見込みがある。また、溶接に代わる接着接合は、ある程度寸法誤差を許容して組み付けることができる。例えば居住区組み付け時に溶接施工では必須の鋼板ひずみ取り工程を省略できる可能性がある。さらに、火気の使用制限がある部位での接合や、溶接工具の届かない入り組んだ部位の補強施工においても、接着接合であれば簡便かつ安全に実施できる利点がある。

このように、造船作業における工数削減や数値化に資する

接合新工法を実現するため、接合部の安全性に関する実験的検証を行う。様々な接合パターンを再現する要素試験体を試作し、提案する二次加工法や接着接合による接合部の疲労損傷・腐食・破壊挙動試験を実施する。これに対して、新たに必要となるガイドラインや認証試験につながる試験法や評価技術を検討し、従来試験法と比較・検証を行う。また、新施工法を取り入れた将来の造船工程について研究する。

#### 4. まとめ

本稿では、DX造船所の実現として当所のデジタルシップヤード構想について説明し、それに関連するこれまでの研究とこれからの研究について紹介した。デジタルシップヤードでは、全てを数値的に計画し、数値的に管理することによって、造船所の工数削減、製造リードタイムの短縮、構内スペースの削減を行い、製品開発における納期／品質／コストを計画通り達成する。

#### References

- 1) 安部昭則：デジタルシップヤードに向けた海技研の取組，SEA JAPAN 海上技術安全研究所セミナー，2022.
- 2) 松尾宏平他：造船用 PLM システムに関する基礎的検討，日本船舶海洋工学会講演論文集，第 34 号，2022.
- 3) 松尾宏平他：造船業におけるデータ標準化と PLM システムの開発に向けて，海上技術安全研究所報告，第 22 号，2022.
- 4) 谷口智之他：マルチエージェントシステムに基づく造船用高精度建造シミュレーションに関する基礎的研究，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 33 号，2021.
- 5) 松尾宏平他：DX 造船所の技術要件とその具体像に関する一考察，日本船舶海洋工学会講演論文集，第 36 号，2023.