

ICT 技術を活用した生産管理技術及び造船用ロボットの開発

松尾 宏平*, 竹澤 正仁**, 藤本 修平*, 安藤 孝弘*
谷川 文章***, 谷口 智之*, 櫻井 昭男*

Development of Production Management System and Robots for Shipbuilding

by

MATSUO Kohei*, TAKEZAWA Masahito**, FUJIMOTO Shuhei*, ANDO Takahiro*
TANIGAWA Fumiaki***, TANIGUCHI Tomoyuki* and SAKURAI Akio*

Abstract

In order to strengthen the competitiveness of Japan's shipbuilding industry, we have conducted research and development on a production management system and robots for shipbuilding. This paper introduces the developed production management system which uses ICT to provide information to workers after monitoring and analyzing information on the shop floor. Specifically, we present an assistance system that suggests appropriate work procedures in real time for sheet metal forming work in shipbuilding, an AR application that supports sheet metal forming, welding, and painting work, and a production simulator that reproduces shipbuilding work in detail. In addition, toward the development of shipbuilding robots, we present CFRP molding technology, film technology for ship hulls, and a shipyard management system which uses drones.

* 構造・産業システム系, ** 構造・産業システム系 (研究当時), *** 産業システム系 (研究当時)

原稿受付 令和5年4月26日

審査日 令和5年5月18日

目 次

1. まえがき	2
2. ICT 技術を活用した生産管理技術に関する研究	3
2.1 曲げ加工支援システムの開発	3
2.1.1 曲率線情報による曲げ加工支援	3
2.1.2 「リアルプレス線」と「リアルタイムプレス線」の出力	3
2.1.3 プレス施工支援システムの開発と造船所での実証実験	5
2.1.4 ガス加熱加工に対する作業支援	6
2.2 造船作業を支援する AR アプリケーションの開発	7
2.2.1 造船作業における AR 技術の応用	7
2.2.2 曲げ加工支援 AR アプリケーション	8
2.2.3 溶接作業支援 AR アプリケーション	11
2.2.4 塗装作業支援 AR アプリケーション	12
2.3 生産シミュレータによる造船作業のモデル化に関する研究	14
2.3.1 造船作業の特徴と課題	14
2.3.2 造船作業における 2 つの「臨機応変」	14
2.3.3 生産シミュレーションによる造船作業の臨機応変の表現	15
3. 造船用ロボットに関する研究	20
3.1 曲面幾何に基づく曲面の CFRP 成形技術の開発	20
3.1.1 船舶への CFRP の適用と造船作業のロボット化	20
3.1.2 提案手法の概要	20
3.1.3 設計形状の展開とパスの算出	21
3.1.4 成形事例	22
3.2 船体フィルムの設計技術の開発	23
3.2.1 船体フィルムの適用	23
3.2.2 曲率線展開法による船体フィルム形状の設計アルゴリズム	23
3.2.3 船体フィルムの設計事例	24
3.3 ドローンによる定盤管理システムの開発	26
3.3.1 ドローンによる定盤のモニタリング	26
3.3.2 造船ブロック定盤管理システムの開発	30
4. まとめ	31
謝 辞	31
References	31

1. まえがき

海事産業の技術革新の促進と海上輸送の新ニーズへの対応を通じた海事産業の国際競争力強化及び我が国経済の持続的な発展に資するため、海事産業の発展を支える革新的技術、人材育成に資する技術、海上輸送の新たなニーズに対応した運航支援技術、海上輸送の効率化・最適化に係る基盤的な技術等に関する研究開発の一環として、第 1 期中長期計画（平成 28 年度～令和 4 年度）において、重点研究「造船業の競争力強化や新たなニーズに対応するための新しい生産システムの構築並びに新材料利用技術に関する研究」に取り組んだ。本報告では、この内、特に平成 28 年度～平成 31 年度（令和元年度）に実施した造船の生産技術の高度化に関する以下の研究開発について報告を行う。

- ・ ICT 技術を活用した生産管理技術に関する研究：造船所構内の製造状況に関する情報を取得し、その情報を分析した上で、製造現場の作業者に作業に関する情報を提供するための研究開発。
- ・ 造船用ロボットに関する研究：造船作業の自動化、省人化を図るため、造船用ロボットに関する研究開発。

2. ICT 技術を活用した生産管理技術に関する研究

造船所構内の製造状況に関する情報を取得した上で、その製造状況を分析して作業者に適切に作業に関する情報を提供する生産支援システムについて研究開発を実施した。具体的には、製造中の製品の状況（製品の種類、製品の状態）を把握した上で、品質の適合性評価や追加の作業指示等を出力するシステムについて研究開発した（2.1 節、2.2 節）。また、作業者の臨機応変な判断によって作業が進行する造船の組立工程に対して作業者の作業を精密に再現する生産シミュレーションの適用について検討を行った（2.3 節）。

2.1 曲げ加工支援システムの開発^{1)~4)}

2.1.1 曲率線情報による曲げ加工支援

当所では従来から造船曲げ加工の高度化に関する研究開発に取り組んできた。曲面幾何理論に基づく曲り外板加工の高度化技術として「曲率線展開法」を提案し、実際の造船所にて実用化している。近年、造船業においては更なる生産性向上への指向とともに、少子高齢化に伴う熟練技能者の育成、確保への対応が喫緊の課題となっている。また、新しい ICT デバイスの普及が進み、これらを応用した新しい研究開発の機運も高まっている。このため、造船曲げ加工におけるプレス加工（冷間加工）及びガス加熱加工（熱間加工）について、作業者に、鋼板上のどこを、どのようにプレスあるいはガス加熱すればよいかを随時、情報提供する作業支援システムについて研究開発を行った。具体的には、プレス加工に関して曲げ加工途中段階においてもリアルタイムにプレス位置とプレス荷重を指示する「リアルタイムプレス施工支援システム」を開発した。これにより、従来はプレス加工開始前に作業指示を示すのみであったが、作業途中段階においてもリアルタイムに曲げ加工指示することができ、指示がより詳細になり、作業の容易化・仕上がり品質の向上につながる。また、ガス加熱加工について、ガス加熱加工の開始段階でガス加熱位置とガス加熱要領を出力するシステムを開発した。

2.1.2 「リアルプレス線」と「リアルタイムプレス線」の出力

「リアルプレス線」とは、施工初期の段階（鋼板がフラットな段階）で「どの箇所」を「どの程度の荷重」でプレスすればよいかを示す鋼板上の作業指示線である。リアルプレス線は鋼板に直接 NC マーキンすることで、作業員はマーキンされたリアルプレス線に沿ってプレス作業できる。

リアルプレス線は、曲面の第 1 曲率線に沿って一定のプレス角で等分することで求められる。具体的には、法曲率 κ_n を第 1 曲率線に沿って積分することで当該積分区間の第 1 曲率線に沿った角度変化量（プレス角）が算出できる。第 2 曲率線の一つを選択し、その第 2 曲率線を基準として各第 1 曲率線に沿って積分を実行し角度を算出する（図 1(a)）。次いで、図 1(b)に示すように、各第 1 曲率線上に任意の角度 θ ごとに点を打ち、これらの点を滑らかにつないで等角度線を描く。等角度線は曲線であり、地図上での等高線と同様、2 本の等角度線の間が一定角度となる曲線で、曲がり大きい形状であるほどその間隔が密になる。

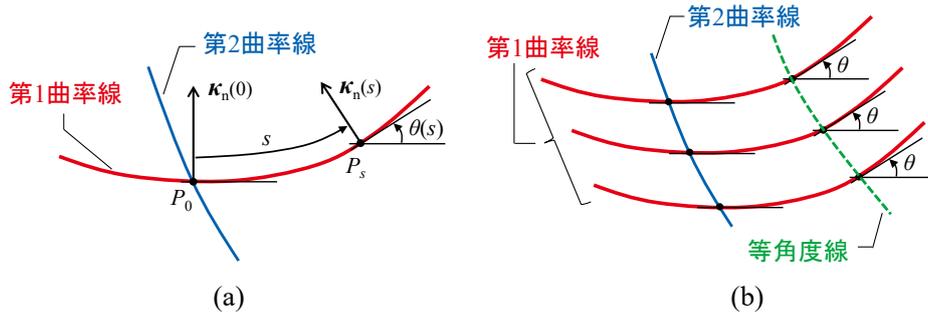


図1 曲率線と等角度線の導出イメージ

等角度線は一定角度ピッチに引かれた曲線群である。ここで、プレスの一押しが外板に与える曲がり角度を等角度線の「一定角度」として採用すれば、等角度線に沿ってプレスする（所定の曲がり角度を与える）ことで目的の形状を成形できる。条押しプレスによる板曲げを理想化して考え、プレスした箇所において一定の角度（曲率）を外板に与える作業と考える。ここで条押しプレスのプレス型は直線形状である一方、等角度線は一般に曲線である。そのため、プレス箇所を決定する際には図 2(a)に示すように、等角度線とプレス指示線のズレ（図中のグレー部分の面積）が最小となる配置を探す。指示線の始点（Pstart）を固定し終点（Pend）を一定角度範囲内で回転させ、ズレ量が最小となる位置をプレス指示位置とする。以上の処理を、板上のすべての等角度線について繰り返す（図 2(b)）ことにより、加工対象外板上のプレス指示線が算出できる。以上の手順で、外板上の「どの箇所」を「何度」でプレスすれば良いかの指示線が得られる。

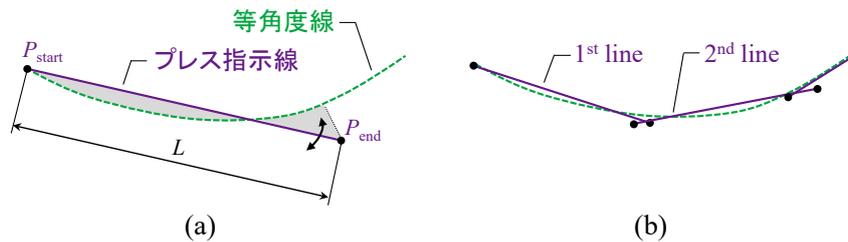


図2 リアルプレス線の導出イメージ

「どの箇所」を「何度」でプレスすれば良いかの情報に加え、「どの程度の荷重」でプレスすれば良いかを算出する必要がある。この情報を求めるため、どの程度の荷重を掛ければどの程度の曲がり角度（プレス角）が生じるかを定量的に把握しておく必要がある。この「どの程度の荷重を掛ければどの程度の曲がり角度が生じるか」については、工場に設置されているプレス機、具体的にはプレス機のプレス型とプレス圧、鋼板に依存する。

リアルプレス線の運用に関して、「どの程度の荷重」でプレスすれば良いかの情報までを現場に指示するため、工場のプレス機に応じた「プレス圧-プレス角」のプレス・データベースを整備する。プレス・データベースは以下の項目に依存するもので、プレス工程の実運用にあたっては、これらの項目に対して広範にデータベースを整備しておく。

- ・プレス型（オス型，メス型の形状，型の長さ）
- ・プレス圧
- ・鋼材の材料特性（板厚，ヤング率，降伏応力，特に降伏点以降の塑性域の応力-歪み特性）

「リアルタイムプレス線」は、プレス加工中の外板に対して、その外板の最終形状が得られるよう、プレス加工中にリアルタイムで追加のプレス作業（プレス位置，プレス荷重）を指示するものである。想定としては、初期のリアルプレス線とセットで運用し、リアルプレス線では形状を合せられない分について、プレス加工中にリアルタイムで追加のリアルタイムプレス線を出力する。これは、鋼板の材料特性やプレス作業を設定通りには合

わせられず、初期のプレス線だけではプレス施工が完了できない、このため漸近的にプレス作業を仕上げていくという考えに基づく。リアルタイムプレス線の出力は、施工中の曲り外板の現在形状を外板全域に対して計測することを前提に運用される。現在形状を板全域に対して計測するため、本研究ではレーザースキャナによる点群データを利用する。リアルタイムプレス線出力のシステムフローは図3に示す。まず、レーザースキャナから外板の点群データが取得される。点群データの処理を行い、CADから抽出された目標形状のサーフェスと重ね合わせる。レーザースキャナの点群データに対して、NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline)曲面をフィッティングし、サーフェスとして扱う。目標形状のサーフェスと現在形状のサーフェスを比較することで、リアルタイムプレス線を出力する他、作業者に形状の比較結果について情報提供する。

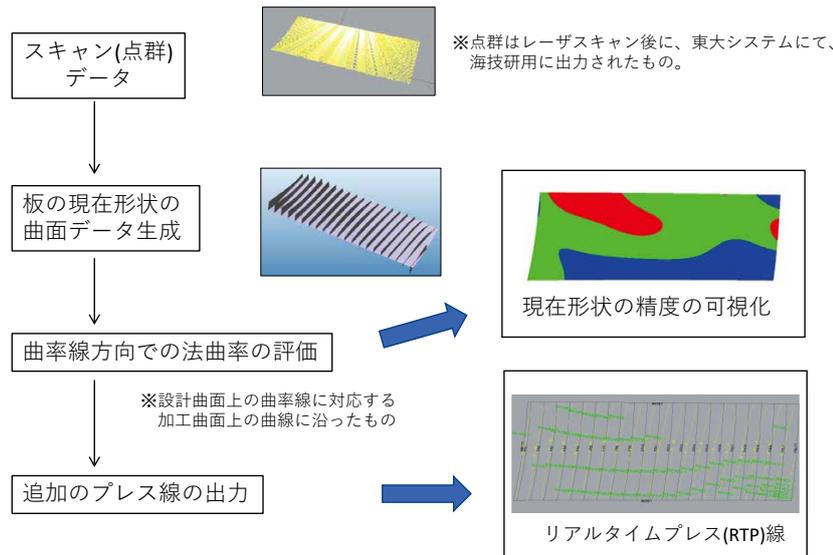


図3 リアルタイムプレス線の出力フロー

2.1.3 プレス施工支援システムの開発と造船所での実証実験

本研究では、初期の「リアルプレス線」を出力する「プレス施工支援システム」、施工中の「リアルタイムプレス線」を出力する「リアルタイムプレス施工支援システム」を開発した。また、リアルプレス線及びリアルタイムプレス線によって、目的のプレス形状を曲げ型レスで加工できることを造船所での実証実験で確認した。造船所での実証実験によると、修正プレス作業は2回で済み、通常作業と同程度の作業工数でプレス加工が完了できることを確認した。図4は、実証実験におけるリアルタイムプレス線の推移を示している（図4左の青線は曲げ不足を修正するプレス、赤線は曲げ過ぎを修正するプレスを示す）。図に示す通り、プレス加工が進展するとともに、必要となるプレス線が減少しており、プレス仕上がり形状に向かって形状が収束していることが確認できる。また、図5はプレス作業終了時におけるリアルタイムプレス線と職人判断による追加プレス線の結果である（図5下の青丸は曲げ不足箇所、赤丸は曲げ過ぎ箇所を示す）。職人による判定とほぼ同じ結果となり、職人の目標形状に対する認識と大きな差異がないシステムであることを確認できた。職人感覚との差異がなかっただけでなく、ガス加熱加工後に、縦曲り、ねじれまで含めて外板の全体形状を精度良く合わせることができたことから、プレス仕上がり形状を正しく設定できている。

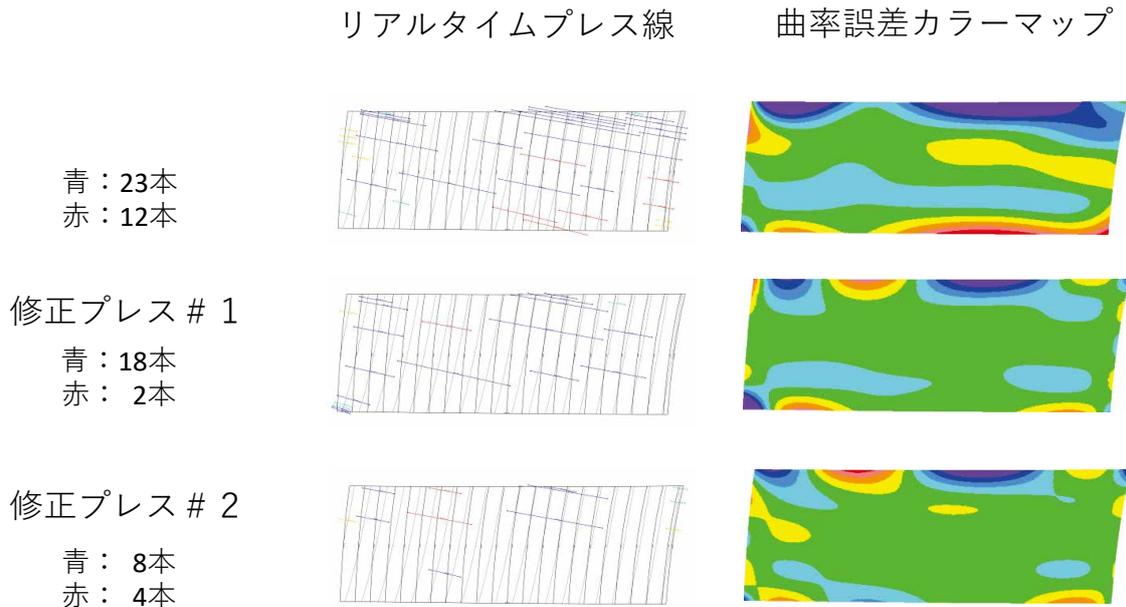


図4 実証実験におけるリアルタイムプレス線の推移

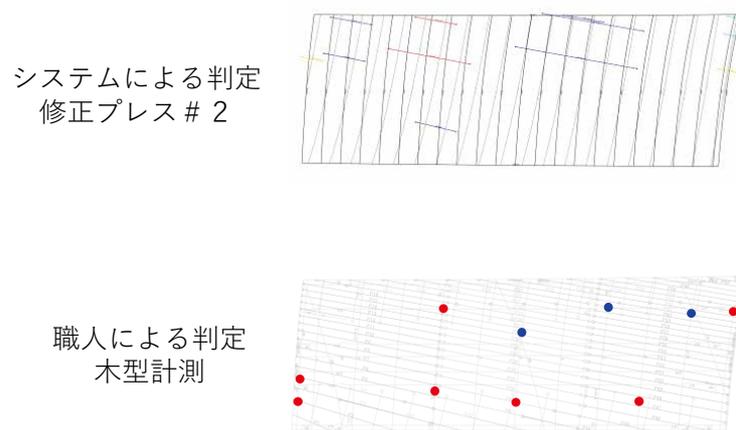


図5 開発システムと職人判断による追加プレス線の比較

2.1.4 ガス加熱加工に対する作業支援

曲率線展開法に基づくガス加熱方案は、外板の現図展開時における鋼板の現図伸ばし量を、ガス加熱による鋼板収縮に対応させることで出力する。このため、1本のガス加熱線によって、鋼板にどれ程の面内収縮が発生するかをガス加熱データベースを用意する。一般にガス加熱データベースは、ガス種、ガス流量、トーチ種類、加熱速度、鋼板種類、板厚等をパラメータとし、工場毎に特化したガス加熱データベースを整備する。表1にガス加熱データベースの一例を示す。

表1 ガス加熱データベースの例

燃焼熱	板厚	白芯長mm	真流量		加熱速度	理論入熱	Q/T	Q/T ²	加熱線1本に対する収縮量 mm	作業者
			T(mm)	l/h						
LPG	16	-	2,000	33	422.4	6,810	426	27	0.166	作業員A
86.31	16	-	2,000	33	208.3	13,810	863	54	0.337	
(kJ/l)	16	-	2,000	33	389.1	7,394	462	29	0.181	作業員B
	16	-	2,000	33	208.3	13,810	863	54	0.337	

ガス加熱データベースに基づき、実際の外板を対象に初期ガス加熱線の妥当性を評価するため実証実験を行った。対象外板に対する初期ガス加熱線を図6,7に示す。図6には、初期ガス加熱線の導出の根拠となっている外板展開時の現図伸ばし量についても併せて掲載している。この現図伸ばし量をガス加熱で収縮するものと仮定し、ガス加熱量による収縮量をガス加熱データベースから想定してガス加熱線を配置する。図7がガス加熱データベースを反映し、当該工場向けに最終的なガス加熱線を出力したものである。結果として、ガス加熱線は、上シームに12本、下シームに12本、合計24本が配置されている。これらのガス加熱線を、表1に示すガス加熱施工要領に従ってガス加熱する。

実証実験において、作業者はマーキングされたガス加熱線に従ってガス加熱を行うが、24本のガス加熱線を一気にガス加熱せず、始めに1本ずつ間引いたガス加熱線についてガス加熱を行い、その後、外板形状を確認しながら、不足箇所があればそれに近傍の未焼きのガス加熱線を選択してガス加熱を継続するという作業方法でガス加熱を実施した。最終的にマーキングした加熱箇所24本のうち、8本のガス加熱線を残した段階で作業が完了した(完成形状に至った)。本来は24本の初期ガス加熱線に対して、16本の加熱で作業が完了した点については線状加熱作業のばらつきによるものと考察する。線状加熱速度は加熱線毎にばらつきがあり、また作業者毎の差も見られた。特に耳絞りについては加熱速度及びガス流量の点で設定値より多めの入熱が入り、想定より過大の収縮、縦曲り変形がついたものを考察される。入熱量以外の諸条件(環境、鋼板の材質、盤木の置き方等)も収縮量に影響すると思われる、今後の更なる検討が必要である。

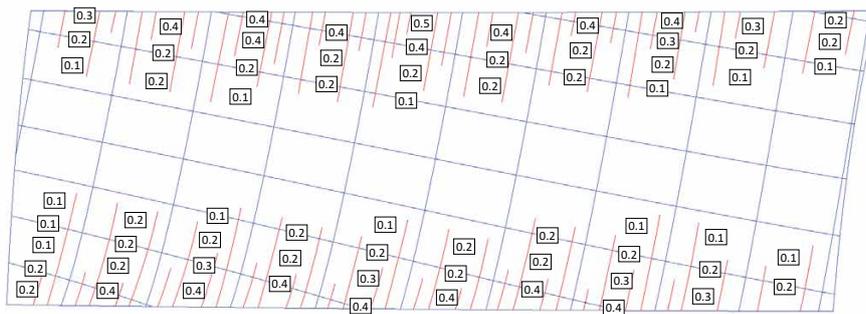


図6 外板展開時の現図伸ばし量(図中の数値の単位はmmを示す)

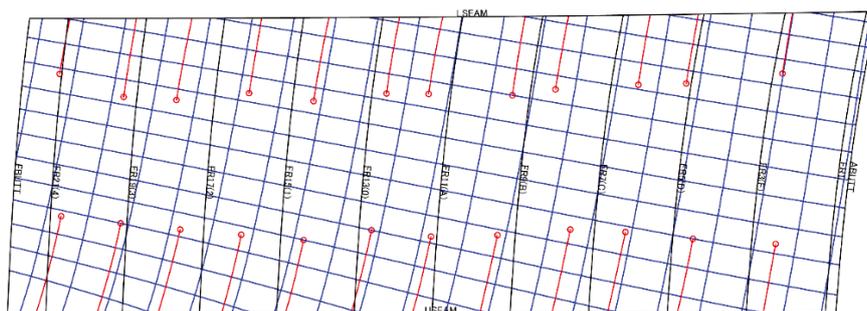


図7 システムが出力する初期ガス加熱線

2.2 造船作業を支援するARアプリケーションの開発⁵⁾

2.2.1 造船作業におけるAR技術の応用

AR (Augmented Reality)は拡張現実と訳され、現実の空間にコンピュータで作成した擬似情報を追加することで人の認知を拡張する。特に視覚の拡張に関して、人が実際に見ている現実、コンピュータグラフィックス(CG)で絵や文字情報等を重ね合せ表示し、人の認知を拡張する。AR技術とは人への情報提供の新しいインターフェー

スのことで、人はよりダイレクトに、より直感的に情報を取り込むことができ、その応用について多くの可能性が期待されている。AR 技術を造船工程に応用することを考えると、その用途としては以下に整理できる。

- ・生産の指示，支援のためのツール
- ・教材，技能伝承のためのツール
- ・計測・測定のためのツール

当所では 2011 年より造船への AR 技術の応用に関する研究開発を実施している。造船現場における AR 技術応用のための基礎研究を含め、具体的な AR アプリケーションとして、曲げ加工作業支援 AR アプリケーション、現場合わせ管作業支援 AR アプリケーション、艀装作業支援 AR アプリケーション、溶接作業支援 AR アプリケーション、塗装作業支援 AR アプリケーションの開発を行っている。AR 技術は情報の重畳表示によって分かり易い作業支援だけでなく、造船現場にタブレット端末やスマートフォン、眼鏡型端末等を持ち込むことにより、造船現場のデジタル化、IoT ネットワーク網の整備を促進する。表 2 は造船への AR 技術の適用に関して、AR 技術の機能ごとに造船での適用について整理したものである。

2.2.2 曲げ加工作業支援 AR アプリケーション⁶⁾

造船の曲げ加工への AR 技術の適用に関しては生産指示を目的とすることが有望である。造船の曲げ加工は典型的な匠の技と見なされるが、その理由は以下に通りである。

- ・曲面の 3 次元形状がイメージしにくい。
- ・目的曲面への成形プロセスの立案が難しい。
- ・計画した成形プロセス通りに成形するのが難しい。
- ・曲げ型を用いた仕上りの形状計測が難しい。

これらの問題点の解消に AR 技術によるダイレクトで直感的な情報提供が役に立つ。具体的には次のような AR アプリケーションが想定される。

- ・完成形状や成形プロセスをイメージするもの。
- ・リアルタイムで施工要領を指示するもの。
- ・外板の形状計測をサポートするもの。

また、造船向けの AR アプリケーションの開発に際しては、次のような技術的課題が挙げられる。

- ・大型の物体への AR 表示
- ・状況に応じた最適な情報のビジュアル化
- ・外板施工に十分な精度の確保
- ・造船所内での利用に耐えうる実用的なシステム

このような目的、内容、技術的課題に対して、本研究では「曲げ加工作業支援 AR アプリケーション」の開発を行った。図 8 は開発した AR アプリケーションのシステムフローである。システムフローは、2.1 節で報告したリアルタイムプレス線出力のフローと共有しており、現在形状に対する様々な情報（形状評価情報、リアルタイムプレス線などの追加指示情報）について AR アプリケーションを介して情報提供する。

表2 AR技術の基本機能と造船への応用

AR技術の機能		AR技術の造船への応用
認知の拡張	見えないものを可視化 豊かな表現による情報提供	<p>現実空間にCGを重畳表示 情報をプッシュ通知 物の内部や奥の状況を表示 (物理的に見えないものを見る)</p> <p>過去や未来の様子を表示 (時間的に見えないものを見る) 動く情報 (アニメーションなど) の表示 オン・デマンドな表示</p>
センシングの拡張	データ (映像, 音声, 位置, 環境データ等) の取得	<ul style="list-style-type: none"> ・生産管理に関する情報 (スケジュール, 遅延等) をプッシュする ・ブロックや艀装品に関する情報 (作業状態, 置場等) をプッシュする ・設備や機器に関する情報 (稼働状態, 補給品の残量, エラー等) をプッシュする ・安全や周辺環境に関する情報 (立入禁止区画, 粉じん量等) をプッシュする ・作業者本人の健康状態に関する情報 (体温, 心拍, 疲労度等) をプッシュする ・隔壁の先や奥の区画の様子を見る ・ブロックや艀装品の完成後の様子を表示する ・作業者, クレーン, 台車等の行先案内をする ・ブロックや艀装品の3次元モデルを重畳表示する ・リアルタイムかつステッパバイステッパな作業手順, マニユアルを表示する ・技能レベルに応じた作業手順, マニユアルの表示 ・鋼板や艀装品へのマーキングをAR化する
ネットワーキングの拡張	データ (映像, 音声, 位置, 環境データ等) の取得	<ul style="list-style-type: none"> ・作業者の一連の作業や操作を記録する ・施工後の製品 (ブロック, 艀装品) や施工箇所 (溶接, 塗装等) の状態を記録する ・コンピュータビジョンにより製品を認識し, 取付け状態等の確認をする ・コンピュータビジョンによりブロックや外板の形状を認識し形状評価をする
ネットワークの拡張	情報通信ネットワークの整備	<ul style="list-style-type: none"> ・作業状況や作業結果のリアルタイムな報告 ・ブロックや船内に気付き事項のアノテーションをつける ・造船所外部のベテランによる作業指示・支援

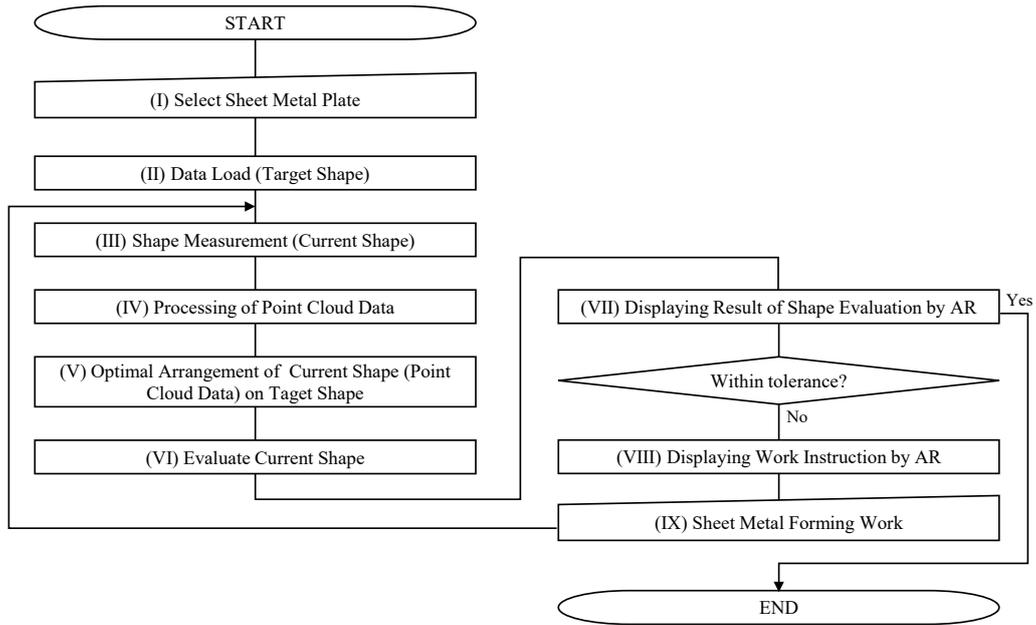


図8 曲げ加工作業支援 AR アプリケーションの処理フロー

実際の造船所において開発した曲げ加工作業支援 AR アプリケーションについて実証実験を実施した。図9は実証実験の様子とともに、AR アプリケーションの表示内容のスクリーンショットを示している。AR マーカーのマーカーサイズやマーカー種類を適切に選択することによってリアルタイムプレス線の CG を鋼板に安定的に AR 表示できることが確認できた。一方、画面内からマーカーが外れると CG 表示の安定性が低下し、日常的な作業にあたっては今後の更なる改善が必要であることを認識した（具体的には複数のマーカーを設置し、そのいずれかを認識すれば AR 表示できるようにシステムの改良を行っている）。今後は、大型の対象物に対しても簡便かつ安定的に AR 表示するため、マーカーレストラッキング技術等の応用が必要である。

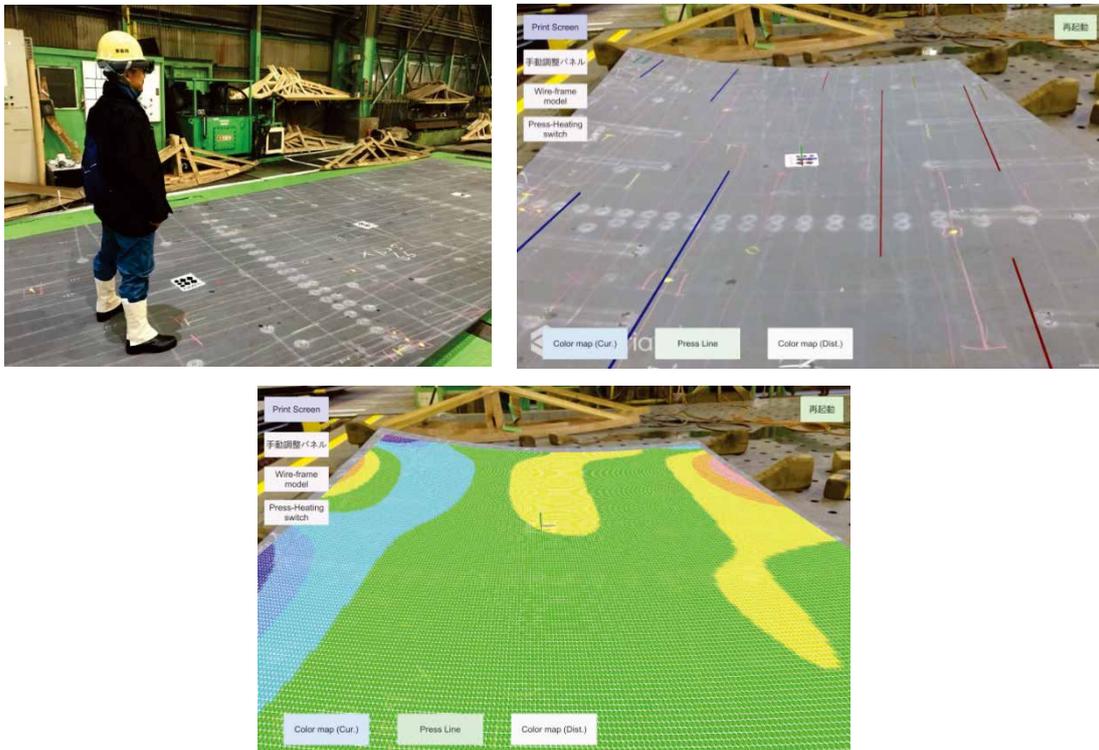


図9 曲げ加工支援 AR アプリケーションの様子

2.2.3 溶接作業支援 AR アプリケーション⁷⁾

造船は多くの溶接作業で構成されている。それらの溶接箇所については、構造物の十分な強度を保証するため、溶接に関する脚長等の仕様が予め設計にて決められる。作業者はこの溶接条件に従って溶接施工を行わなければならない。通常、溶接条件の指示は紙の図面を通して行われる。しかし、図面による溶接施工条件の指示は次のような問題を抱えている。

- ・ 2次元による図面は複雑で、特にブロック構造が複雑な場合、図面内で該当箇所を照合するのに時間を要する。
- ・ 溶接施工条件の指示には特有の記号や表現法が使われる。これらの表現は造船所によって異なり、共通しておらず、読み取りの困難やミスが発生につながっている。
- ・ 一部の造船所では、溶接作業者の図面読解の負担やミスを避けるため、現場管理者が溶接線ごとに溶接条件を予めマーキングする場合もある。
- ・ 溶接作業は工場内や船内の各所に散らばっており、溶接線ごとの生産管理、品質管理がされていない。リアルタイムにそれらをモニタリングすることはできていない。

これらの問題を解決するため、溶接施工支援 AR アプリケーションを開発した。溶接箇所ごとの溶接施工指示を AR 表示で確認でき、作業者は現場で図面を開かずに間違えることなく効率的に溶接作業を行えることができる。本システムは次の機能で構成されている。

- ・ ブロックや艀装品に溶接箇所を重畳表示し、作業者に溶接箇所を直感的に知らせる。
- ・ 各溶接線に対して溶接条件を表示する。
- ・ 作業者は、AR アプリケーションを介して、各溶接線に対して各種の情報（作業の開始・終了、気づき事項、写真、ビデオ等）を入力、登録できる。

これらの機能を実現するため、AR アプリケーションとして以下の要件を整理した。

- ・ 複雑な構造物における溶接線に対しても、AR にて溶接線の重畳表示ができること
- ・ 溶接施工に必要な溶接条件の情報を正しく準備し、それを AR アプリケーションにインポートできるようにすること。
- ・ 造船現場の環境内で十分な操作ができること。特に、溶接 1 本ごとに施工条件の確認や作業進捗の入力をする場合でも、実用的に操作できること。

図 10 は開発した溶接施工支援 AR アプリケーションのシステムフローである。

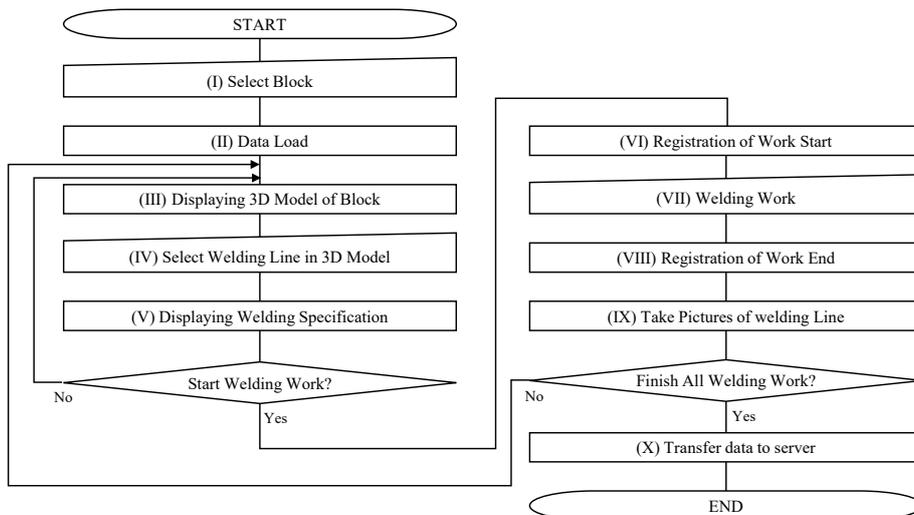


図 10 溶接作業支援 AR アプリケーションの処理フロー

開発した溶接作業支援 AR アプリケーションについて当所内にて実証実験を実施した。図 11 は実証実験の様子である。船体ブロックを模擬した鋼製構造物に認識用のマーカーを複数枚設置することで、船体ブロックと溶接線の 3 次元 CG を重畳表示できる。CG 上の溶接線をタッチすることで当該溶接線に関する情報を確認できる他、当該溶接線について写真やメモを登録できる。実際の造船所での運用を想定すると、大型のブロックであればあるほど、認識のため多数のマーカーを設置する必要がある。このため、今後はマーカーレストラッキング技術等、マーカーを要しない AR 技術の適用が必要であると認識している。

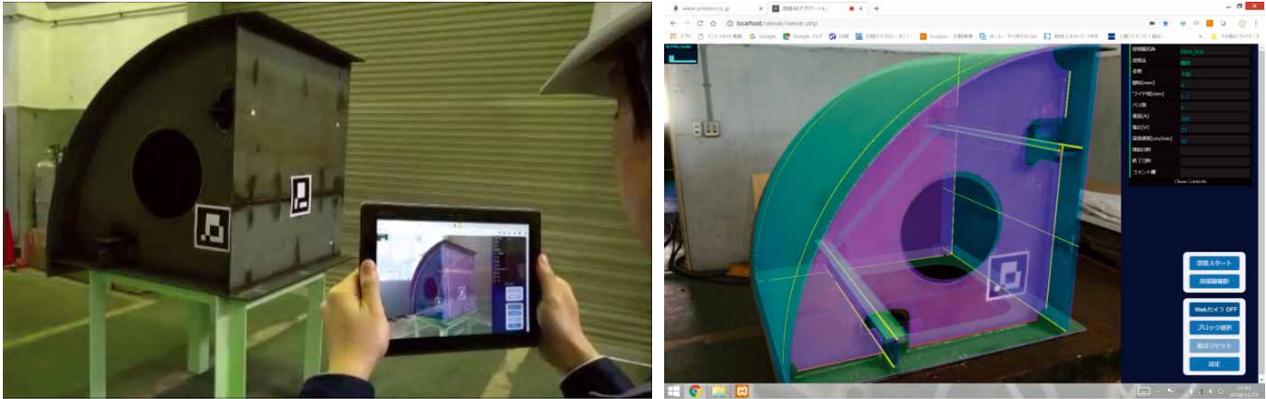


図 11 溶接作業支援 AR アプリケーションの様子

2.2.4 塗装作業支援 AR アプリケーションの基礎検討⁸⁾

造船塗装は船舶の寿命を左右する極めて重要な作業工程である。しかし、その技能教育についてはほとんど現場での見様見真似により行われており、技能上達の度合や速度は作業者によってばらつきが大きい状態である。団塊世代の熟練技能者の退職に伴って生じる技能伝承の困難さが表面化してから久しく、例えば、塗装後に塗料のタレが発生しやすい作業者に対して、どのような助言をすれば良いか判らない等の問題が生じている。こうした問題が生じる要因の一つは、実際の現場では塗装作業に対する評価（適正な膜厚分布が得られているか、所定の膜厚が確保されているか等）がほとんど行われていない点にあると考える。実施した塗装作業結果の良否を作業者自身が簡便に確認する手段がないため、自らの技能（スプレーガンの操作等）を見直す機会が少ない。そこで、実際の塗装作業時の仕様も想定した、AR 技術を利用した塗装シミュレータの基礎検討を実施した。ここで、実際の塗装作業支援 AR システムとは、スプレー塗装による被塗物への塗着を AR 上でシミュレートし表示するものである。既存の類似の装置として 3D-VR を利用した塗装シミュレータ（旭エレクトロニクス製「SPT-3D」^{9) -11)} などがあるが、AR でのシミュレーションの利点として実際に作成した被塗物のモデル上への塗装シミュレーションが行える点が挙げられる。

本研究では塗装作業支援 AR システムの要素技術について研究開発を実施した。具体的には、スプレーガンの位置把握機能及び塗着シミュレーション機能について開発を行った。スプレーガンの位置把握は光学式モーションキャプチャで行うこととし、モーションキャプチャシステムの導入、及びセンサを組み込んだスプレーガンの試作を実施した。モーションキャプチャからは、スプレーガンの位置と姿勢（3次元空間内の x, y, z の各座標値とロール、ピッチ、ヨー各方向の回転位置）の情報がリアルタイムで得られる。モーションキャプチャでの位置計測用に、スプレーガンの背面に反射マーカーを取り付けた（図 12(a)）。

また、スプレーガン操作で重要なトリガの on/off を検出するためのセンサを試作した。トリガが on（握られた）のときに塗料が噴霧され、off（離れた）のときに噴霧は停止される。塗着シミュレーションのためには、トリガが on か off かの状態をリアルタイムに記録する必要がある。そこで、磁気センサ（ホール素子）を利用したトリガ検出センサを作成した。スプレーガンの持ち手の部分にホール素子を、トリガの裏面（持ち手に正対する面）にシート状の永久磁石をそれぞれ貼付した（図 12(b)）。トリガが on（握られた）ときには磁石が磁気センサに近づくため大きな磁気の値が計測され、off のときにはその計測値が小さくなる。これによりトリガの状態（on か off か）をリアルタイムで計測・記録できる。

また、以上に述べたスプレーガンの位置と姿勢ならびにトリガの on/off 状態の各種データを利用して、被塗物への塗着量シミュレーションが可能となる。塗着量のシミュレーションができれば、塗装作業の結果の良否（被塗物表面の塗膜厚分布等）に加えて、塗装作業自体の良否の評価が可能となる。つまり、スプレーガン操作の定量的な評価ができるようになり、例えば「被塗物とスプレーガンとの距離を（現状より）大きくとった方が良い」、「スプレーガンを動かす速度をもう少し速くした方が良い」等といったデータに基づく技能の改善点が提示できる。

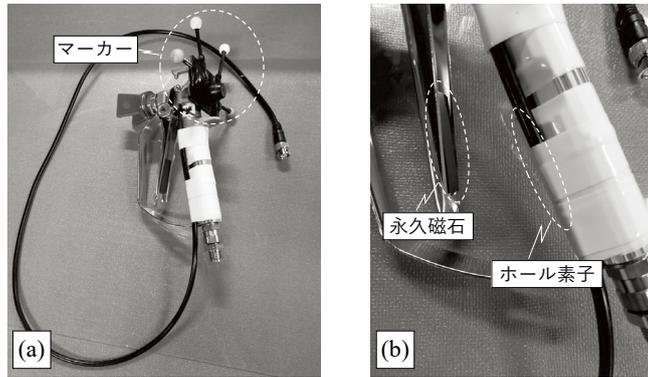


図12 ARシステム用スプレーガン ((a) ガン位置検出用マーカー, (b) トリガ on/off 検出用センサ)

図13は既存の3D-VR塗装シミュレータを用いて実際に塗装技能者のスプレーガン操作のデータを記録した例である。熟練者（左）と初級者（右）それぞれのデータを比較した。上側のグラフはスプレーガンの位置の変化を示したものである。横軸が時間を、縦軸が座標値を表しており、青色の線と橙色の線はそれぞれx方向（スプレーガンの横方向）の座標値とy方向（スプレーガンの縦方向）の座標値を示している。上級者ではx方向、y方向ともに規則的な変化をしている（一定のパターンでスプレーガンが操作できていることを示している）が、初級者では不規則な変化となっている。

図13下側のグラフはスプレーガンのトリガ on/off の変化を示している。緑色の線がトリガ状態を表しており、値の大/小がそれぞれトリガの on/off に対応している。トリガ状態についても上級者は規則的でかつ位置の変化に対応しているが、初級者では不規則な変化となっている。以上の様にスプレーガン操作を見える化し定量的に評価することで技能の改善すべきポイントを明確にし、上達の加速につなげられると考える。

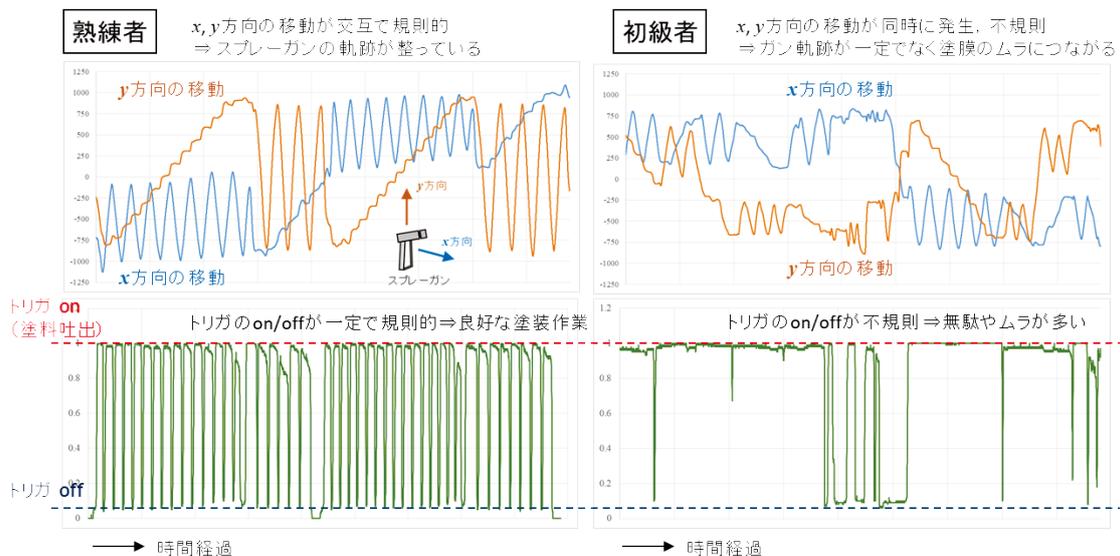


図13 スプレーガン操作の記録例（熟練者（左）と初級者（右））

2.3 生産シミュレータによる造船作業のモデル化に関する研究^{12), 13)}

2.3.1 造船作業の特徴と課題

生産マネジメントにおいて、作業は主作業、付随作業、無付加価値作業に分類できる。主作業とは製品がその完成に近づくための正味の作業のことである。溶接作業の場合、溶接トーチからアークを放ち、部品と部品をまさに接合しているときである。付随作業とは、主作業を行うために必要な作業ではあるが、この作業自体が製品に直接的には価値を付与しないもので、準備作業、段取り作業が相当する。溶接作業の場合、溶接のために溶接装置を用意したり、溶接箇所をあらかじめ清掃する等が相当する。必要な作業ではあるが、作業手順を見直したり、専用の治具を使用するなどして極力これを減らす。無付加価値作業とは不要な待ち時間や計画されていない休憩時間等を指す。図14は、日本の中小型造船業におけるワークサンプリングの結果¹⁴⁾を示したものであるが、造船作業において、主作業率は4割に対し、付随作業と無付加価値行為の合計は6割となっている。

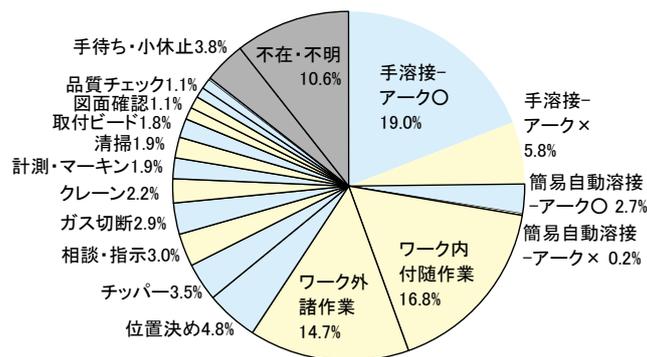


図14 造船作業に対するワークサンプリング結果（青：主作業，黄色：付随作業，灰色：無付加価値行為）

図14からも伺えるように、造船作業には長年、以下の課題が残されている。

- ・主作業率が低い
- ・標準作業や標準時間の設定が難しい
- ・合理的なコスト管理や生産管理が難しい
- ・技能者不足，技能者育成に対する問題を抱えている

これらの課題に対して、当所ではその原因として全体の約6割を占める付随作業と無付加価値行為にあると認識している。付随作業と無付加価値行為は作業による臨機応変な振る舞いに依存しているため曖昧であり、俗に言う「要領よく動く」の類の作業で、作業者の動き次第で長くも短くもなり得る。作業者に依存しているため、作業が計画通りに作業が進まないだけでなく、作業に対する判断が作業者に内在し、外部に明示されにくい。このため技能差を生じる。

上記の造船作業に対する課題を解決するため、本研究では造船作業の付随作業と無付加価値行為に含まれる人間要素の科学的な解明に取り組んだ。これにより、造船作業の曖昧さを排除し、造船作業者の「要領よく動く」や臨機応変な振る舞いを表現する。

2.3.2 造船作業における2つの「臨機応変」

造船作業における「臨機応変」は2種類に分類できる。図15は造船作業の構成をその粒度毎に表現したものであるが、ワークレベル（例：小組の製作順）や作業レベル（例：1個の小组の中での部材の取付け順）については原理的に事前確定として扱える。つまり、製品形状や基本工法が決まれば、丹念に解析することによって作業に対する生産計画、作業手順を出力できる。しかし、考慮すべきパラメータが膨大のため、現状は多くの造船所でこの出力を諦め、現場任せとしている。このように、本来は事前確定的に扱えるのにもかかわらず、結果として職場任せとし作業者の臨機応変になっている臨機応変がある。

次に、事前確定的な作業計画や作業手順に従って作業を進めたとしても事前に計画することができず、臨機応変にならざるを得ないことが起こる。計画段階では分かりえず、その時になってみないと分からないといった臨機応変である。例えば組立工程において、取付ける部材の寸法精度が前工程の影響で都度異なるため、作業者が

その製品の状態を見て臨機応変に対処すること等が相当する。専ら製品の個体誤差によるもので事前計画的に扱えず、その都度作業員任せになる臨機応変である。

これら2種類の臨機応変に対してそれぞれ異なるアプローチで対処すべきと考えている。つまり、前者の臨機応変については、ワークレベル、作業レベルで生産計画や作業手順を精度よく求める。ベテランの要領の良い動きや先読みを作業現場ではなく、設計段階で事前に検討する。このため、生産シミュレーションによる臨機応変の表現が必要となる。また、後者の臨機応変について、個体誤差に対して臨機応変に対応するベテラン作業員の作業を形式知化し、これをエキスパートシステム等の人工知能で代替するAIの開発を想定している。このため、ベテラン作業員の作業を形式知化あるいは機械学習させるため、作業員の作業データの収集のための画像システム、音声収集・認識システムを検討している。また、中間製品の個体誤差を計測するためのレーザースキャナ等の3次元計測、解析システムも重要となる。後者の臨機応変への対応のその先には、「部材個体誤差を反映した作業指示」や「段取りロボット」の研究開発を見据えている。

本報告では、前者の臨機応変への対応として、造船作業における生産シミュレーションの適用に関して報告を行う。

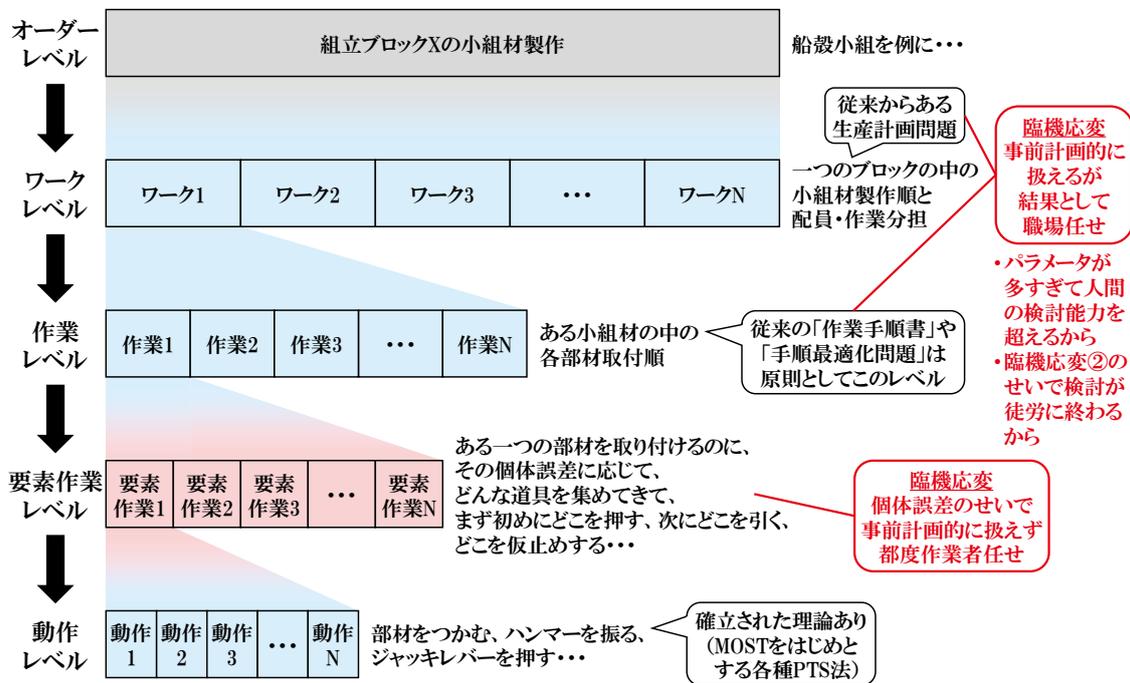


図15 造船作業の構成と作業の粒度

2.3.3 生産シミュレーションによる造船作業の臨機応変の表現

本来は事前確定的に扱えるのにもかかわらず、結果として職場任せとし作業員の臨機応変になっている臨機応変について、ワークレベル、作業レベルで作業計画、作業手順を定める。これについては計算機上の生産シミュレーションにより演繹的に出力する。具体的には、ワークあるいは作業の順番、手順のすべてのパターン（順列問題）に対して生産シミュレーションを行い、最適解を探し、それを生産計画、作業手順、作業時間として出力する。

本研究ではその一環として、小組工程のワークレベルでの生産計画問題に関する生産シミュレーションについて検討した。対象とする小組工程は、鉄工職による部材の配材、部材の仮付け、溶接職による部材の溶接作業で構成される（図16）。

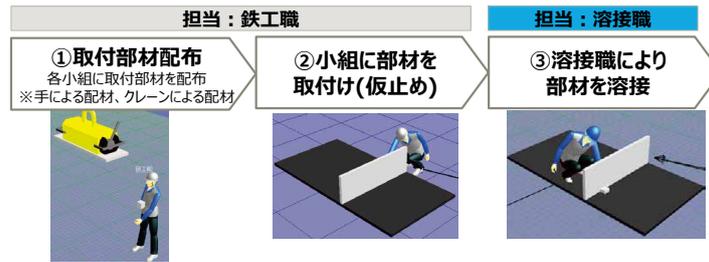


図 16 小組工程の作業構成

生産シミュレーションは離散イベントシミュレーションで行った。離散イベントシミュレーションは生産工程を離散的にモデル化し、それに作業条件が入力されることで生産時間、稼働率などを出力する。今回の生産シミュレーションでは富士通の OPTEMILIS と GP4 を使用した。OPTEMILIS は工場の生産を再現する生産シミュレータで、作業順序まで最適化する最適化エンジンを内蔵する。GP4 は、OPTEMILIS による計算結果を工場レイアウト上にて生産の流れとして可視化する。図 17 は GP4 上での今回の生産シミュレーションのイメージである。

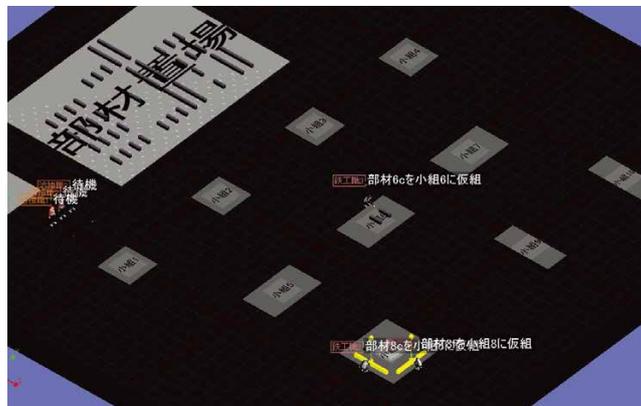


図 17 生産シミュレーションのイメージ

生産シミュレーションの条件は次の通りとした。

- ・ 作業員として鉄工職 3 名，溶接職 3 名を設定した。溶接職は小組材単位での部材取付け作業が完了するまで溶接作業を着手できない。
- ・ それぞれの作業を始める前に必要な道具を準備する。作業に必要な道具は作業パラメータで設定する。道具を取得して各小組材まで運ぶのに要する時間を一律 3 分に設定した。一人が 1 回で持ち運べる道具は最大 2 つまでとした。つまり，必要な道具が 3 つの場合，所要時間は 6 分（3 分×2 往復）となる。
- ・ 道具は始め，工具箱に収めてある。必要な道具が工具箱にあるうちは工具箱から取得するが，工具箱からなくなると他の小組材に放置されているものから取得する。
- ・ 各作業員が処理する小組材の順番はランダムで変動する。次の処理に必要な道具と現在の処理で使っている道具が重複しない場合，それらの道具は現在処理している小組材に放置する。これにより，処理の順序によって，道具の準備にかかる動作が変わり，作業全体での道具取得に要する時間が変動する。道具取得時間を段取り時間(付随作業の時間)とする。

小組材 10 個に関する生産シミュレーションを実施した。生産シミュレーションにあたり，表 3 の通り，それぞれの小組材に対して，取付する部材数，部材の配材方法（手またはクレーン），配材に要する時間，部材の取付に必要な道具，取付作業に要する時間，溶接作業に必要な道具，溶接作業に要する時間等の作業パラメータを設定した。

表3 作業パラメータ (工場レイアウト表現なしのシミュレーション)

	小組1	小組2	小組3	小組4	小組5	小組6	小組7	小組8	小組9	小組10
●鉄工職業務										
小組1つに対する取付け部材数	[個]	4	4	4	4	5	5	5	6	3
手で運べる部材数	[個]	4	4	4	4	3	3	3	2	3
それを手で配る際の手作業時間	[分]	4	4	4	4	3	3	3	2	6
1部材取付けに要する時間	[分]	12	12	12	12	9	9	9	8	12
クレーンで運ぶ部材数	[個]	0	0	0	0	2	2	2	4	0
それをクレーンで配る処理時間(移動時間)	[分]	0	0	0	0	10	10	10	20	0
1部材取付けに要する時間	[分]	0	0	0	0	20	20	20	48	0
取付けに要する道具の種類		A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	B,C,D,E,F,G	B,C,D,E,F,G	B,C,D,E,F,G	A,B,C,D,E	D,E,F
取付け段取りに要する時間(必要道具取得に要する時間)	[分]	3	3	3	3	5	5	5	7	3
道具の片付けに要する時間	[分]	2	2	2	2	2	2	2	4	2
●溶接職業務										
溶接に要する道具の種類		X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z
溶接段取りに要する時間(必要道具取得に要する時間)	[分]	4	4	4	4	5	5	5	5	4
1部材溶接に要する時間 (手で運べる部材)	[分]	16	16	16	16	15	15	15	8	15
1部材溶接に要する時間 (クレーンで運ぶ部材)	[分]	0	0	0	0	15	15	15	40	0
道具の片付けに要する時間	[分]	3	3	3	3	4	4	4	4	3

図18は、10個の小組材の製作順序をランダムに入れ替えて生産シミュレーションしたもののうち、10000ケースのシミュレーション結果について道具準備に要する作業時間の頻度分布で示したものである。作業順番によって、道具準備(付随作業)の時間にばらつきが発生していることが確認できる(分布の左側が効率の良い作業であることを示す)。現状のように製作順序を現場作業者に委ねる場合、この分布が作業員の臨機応変による付随作業の時間分布を表現している。このケースの場合、次の作業で同じ道具を使えるような小組材の作業順序を設定することによって効率の良い作業を実施できるが、このことは処理毎に使用する道具が異なる場合、次の作業場所まで手ぶらで移動し、そこで新たに道具を準備する時間が発生するためである。道具取得のための移動回数の最小化や同じ作業をまとめることによる作業の巧拙によって付随作業時間が変わりうる。

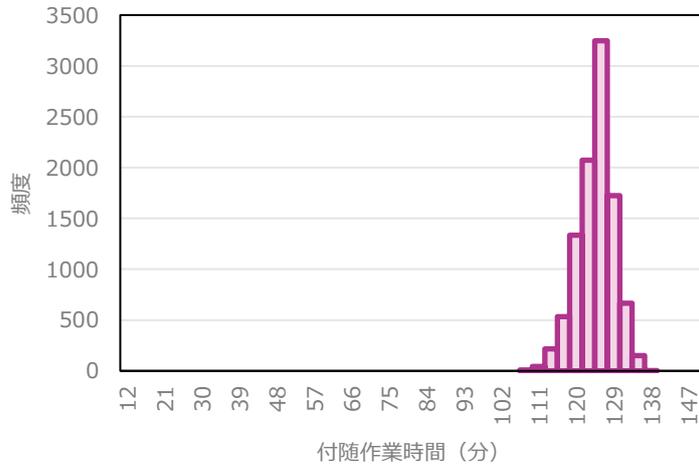


図18 付随作業時間の時間分布

図19は、ベテランと非ベテランをそれぞれモデル化してシミュレーションした結果である。ここで、本シミュレーションにおいて、非ベテランは各タイミングで必要な道具がどこに置いてあるかの判断ができず、道具を探す際必ず一旦道具箱を見に行くとモデル化した。非ベテランでは付随作業時間の増加に伴い、ヒストグラムの裾野が増加する方向に広がっている。ただし、作業順序によってはベテランと同様のパフォーマンスを非ベテランでも発揮できることが確認できる。このシミュレーションの想定では、現在、自身が保有している道具を継続して使用できるような作業手順を立案すれば、ベテラン同様のパフォーマンスを発揮することができる(道具を探し回るときに生じる非効率が発生しないため)。

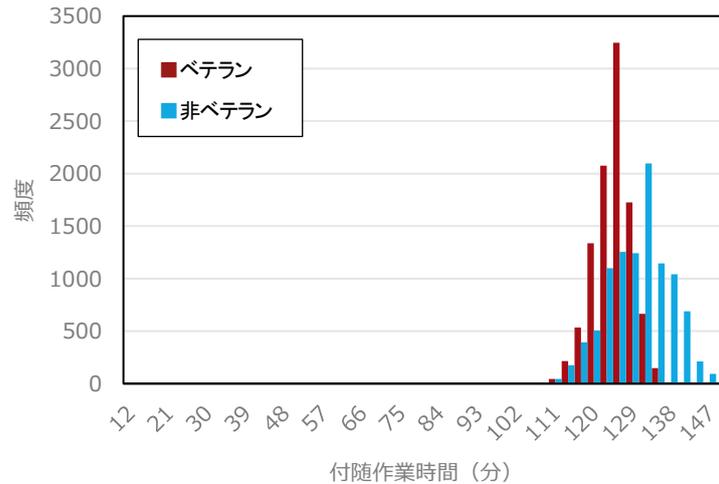


図 19 付随作業時間の時間分布 (ベテラン, 非ベテランの比較)

更に工場のレイアウトの概念を入れて生産シミュレーションを行った。これにより、部材の配材や道具準備にかかる時間が物理的な距離に応じて変動値となる。空間の概念を入れることでクレーンの干渉を考慮に入れる。表 4 がこのシミュレーションにおける作業パラメータで、図 20 がこのシミュレーションで用いた工場レイアウトである (レイアウト 2 が定盤上に部材を詰めて置いている)。また、本シミュレーションでは、小組材の順序だけでなく、それを構成する各部材の順番についてもランダムに入れ替えてシミュレーションを実行した。部材の製作順序を考慮することにより、クレーンの必要性の有無やクレーン待ちによる作業時間の変動を詳細に確認する。

表 4 作業パラメータ (工場レイアウト表現付きのシミュレーション)

●小組		小組1	小組2	小組3	小組4	小組5	小組6	小組7	小組8	小組9	小組10
小組1つに対する部材数	[個]	4	4	4	4	5	5	5	6	3	3
部材の種類		1a.1b.1c.1d	2a.2b.2c.2d	3a.3b.3c.3d	4a.4b.4c.4d	5a.5b.5c.5d.5e	6a.6b.6c.6d.6e	7a.7b.7c.7d.7e	8a.8b.8c.8d.8e.8f	9a.9b.9c	10a.10b.10c
●鉄工職業務											
手で運べる部材数	[個]	4	4	4	4	3	3	3	2	3	3
手で運べる部材の種類		1a.1b.1c.1d	2a.2b.2c.2d	3a.3b.3c.3d	4a.4b.4c.4d	5a.5b.5c	6a.6b.6c	7a.7b.7c	8a.8b	9a.9b.9c	10a.10b.10c
それを手で配る時間	[分]	4	4	4	4	3	3	3	2	6	6
1部材取付けに要する時間(主作業)	[分]	12	12	12	12	9	9	9	8	12	12
クレーンで運ぶ部材数	[個]	-	-	-	-	2	2	2	4	-	-
クレーンで運べる部材の種類		-	-	-	-	5d.5e	6d.6e	7d.7e	8c.8d.8e.8f	-	-
それをクレーンで配る時間	[分]	-	-	-	-	10	10	10	20	-	-
1部材取付けに要する時間(主作業)	[分]	-	-	-	-	20	20	20	48	-	-
取付けに要する道具の種類		A.B.C	A.B.C	A.B.C	A.B.C	B.C.D.E.F.G	B.C.D.E.F.G	B.C.D.E.F.G	A.B.C.D.E	D.E.F	D.E.F
道具取得に要する時間(段取り時間)	[分]	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
道具の片付けに要する時間	[分]	2	2	2	2	2	2	2	4	2	2
●溶接職業務											
溶接に要する道具の種類		X.Y.Z	X.Y.Z	X.Y.Z	X.Y.Z	X.Y.Z	X.Y.Z	X.Y.Z	X.Y.Z	X.Y.Z	X.Y.Z
道具取得に要する時間(段取り時間)	[分]	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1部材溶接に要する時間(手で運べる部材)(主作業)	[分]	16	16	16	16	15	15	15	8	15	15
1部材溶接に要する時間(クレーンで運ぶ部材)(主作業)	[分]	0	0	0	0	15	15	15	40	0	0
道具の片付けに要する時間	[分]	3	3	3	3	4	4	4	4	3	3
●設備											
クレーンの台数	[台]	2									

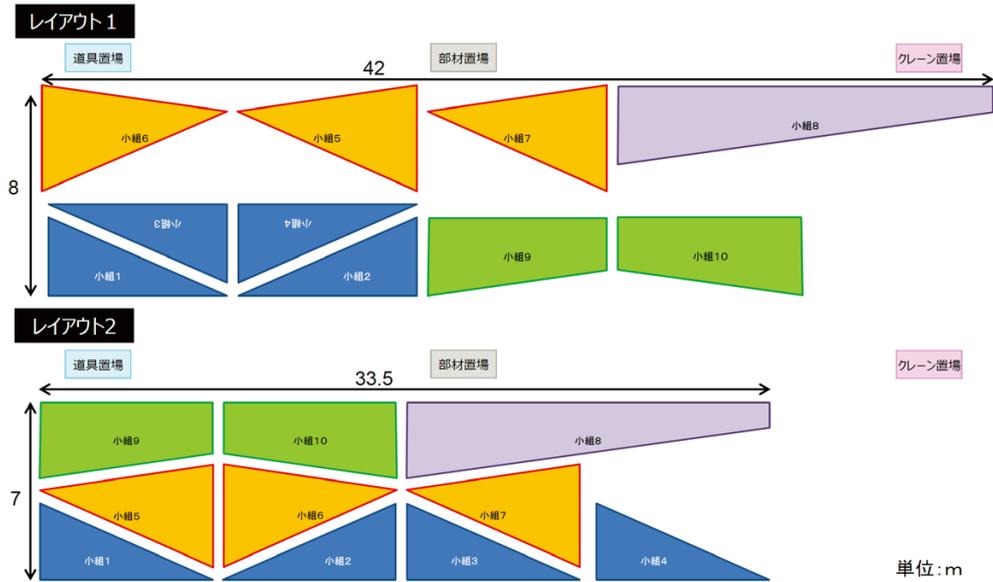


図 20 工場レイアウト

図 21 はそれぞれのレイアウトについて、作業全体の完了時間と道具取得時間（付随作業時間）の分布を示したものである。この図 21 には小組単位で作業を実施した場合（図中黄色のドット）と部材単位で作業を実施した場合（図中青色のドット）を併せて表示している。一般に部材単位の方が小組単位よりも作業完了時間が短くなる傾向がある。なぜなら、全体の工数を部材単位に分割することでそれらを複数人で分担でき、溶接職への引継ぎが早くなるためである。一方、作業が部材ごとに移り変わるため道具取得の時間は増加する。シミュレーション結果によると、クレーンを考慮することにより、小組単位の方が部材単位よりも作業完了時間が早くなることが確認された。部材単位で作業を行うと、クレーン干渉が多発し、クレーン使用部材の処理が後回しになる。その分、溶接職への引継ぎが遅れ、作業完了時間が伸びたと考察できる。また、レイアウトの違いに関して、定盤上に部材を詰めて配置しているレイアウト 2 で短時間の作業が確認できる（特に移動距離に直接関係する道具取得時間で大きな違いが確認できる）。付随作業を適切に表現することによって、レイアウトの違いも考慮した作業時間の定量的な見積もり、評価が可能となる。

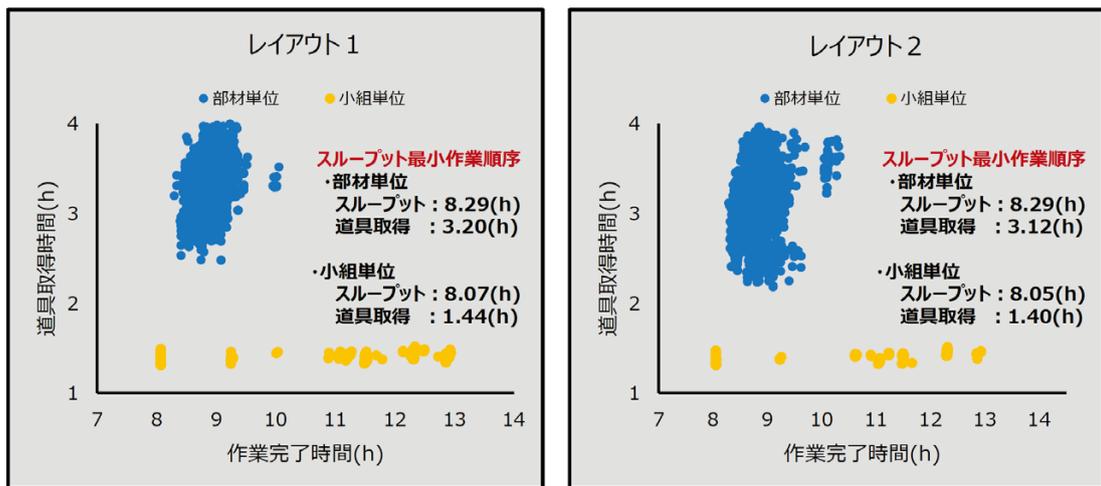


図 21 各レイアウトに対する作業完了時間と付随作業時間の分布

3. 造船用ロボットに関する研究

本研究では、造船作業の自動化、省人化を図るため、造船用ロボットに関する研究開発を実施した。造船用ロボットとして、「造船上向き作業用アシストスーツ」の研究開発（日本船舶技術研究協会の研究プラットフォームの元で実施）の他、船舶材料の CFRP 化に注目し、CFRP 用炭素繊維のロボット等による自動積層技術に向けた研究開発に取り組んだ。また、AGV（Automatic Guided Vehicle、無人搬送車）やドローンを活用した造船所の生産管理の自動化に関する研究開発を実施した。この内、本稿では CFRP に係る研究開発（3.1, 3.2 節）とドローンによる生産管理に関する研究開発（3.3 節）について報告する。

3.1 曲面幾何に基づく曲面の CFRP 成形技術の開発^{15), 16)}

3.1.1 船舶への CFRP の適用と造船作業のロボット化

炭素繊維強化樹脂（Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP）は、その機能性の高さから金属部材の代替材料として注目を集めている。特に重量に対する強度や剛性の高さにより、自動車や航空宇宙分野では特に普及が進んでいる。従来の金属部材をより軽量の複合材部材に代替することで、静粛性能の向上や、燃費向上による温室効果ガス排出量の削減等が期待できる。

当所では代替材料として CFRP の船舶への適用について研究開発を行っているが、この内、本研究では、造船作業のロボット化の観点から船舶への CFRP の適用と CFRP 成形技術について研究開発を実施した。本報告では、船用 CFRP 翼などを対象とした、製品内の繊維配向を自在に制御させる新しい CFRP の設計・成形手法について報告する。

3.1.2 提案手法の概要

本研究で提案する CFRP 成形技術と造船作業のロボット化は、Tailored fiber placement (TFP) と呼ばれる繊維の刺しゅう技術と、複雑曲面の平面展開技術とを組み合わせることで実現する。図 22 に本手法のフローを示す。まず、成形対象の設計形状データ（図 22 (a)）に対して、繊維を配向させたい方向に沿った 2 組の曲線群を計算する。CFRP 成形では、一般的に複数枚の中間基材であるプリフォームを積層して成形するため、例えば、各層毎に繊維を主応力の最大/最小方向に沿って交互に配向させたい場合は、設計曲面上に主応力線群を配置する。次にその曲線群を基準に平面展開図を出力する（図 22 (b, c)）。提案する手法を用いることで、先に配置した曲線群の 2 方向が切断線方向となる 2 種類の平面展開図を得る。展開形状はそれぞれ異なるものの、同様に設計形状を復元することができる。この切断線が繊維を配向させる方向に沿っているため、切断線の流れに沿って展開図内部に繊維を配置することで、3 次元形状に復元した際、所望の方向に繊維が配向されることになる。TFP 刺しゅう機によってプリフォームを自動製作するため、展開図の内部に繊維の配置経路（ツールパス）を算出する（図 22 (d)）。このデータを刺しゅう機に入力することで、設計方向に繊維を配置したプリフォームを製作し（図 22 (e)）、目的の CFRP を成形する（図 22 (f)）。以上の手順により、目的の方向に繊維を連続的に配置した CFRP の設計・成形を実現する。本手法を用いることで、繊維方向を設計パラメータとした複雑 3 次元曲面形状の複合材部材の成形が可能となるため、新たな機能性を有する製品の開発が期待される。

TFP 技術が搭載された刺しゅう機を図 23 に示す。TFP では、入力された経路データに基づき、360 度任意の方向に沿って炭素繊維トウを基材上に配置できる。ここでトウとは、撚りのほとんどない繊維フィラメントの束を指す。TFP は基材に対してトウを直接縫い付けるのではなく、トウをまたぐように、両脇を交互に縫っていくことで基材への配置を実現する（図 23 右）。TFP を用いて製作したプリフォームによる成形法は、プリフォームの製作を自動化するだけでなく、繊維方向を局所的に制御することができるため、これまでになく新しい製品設計を可能にする。

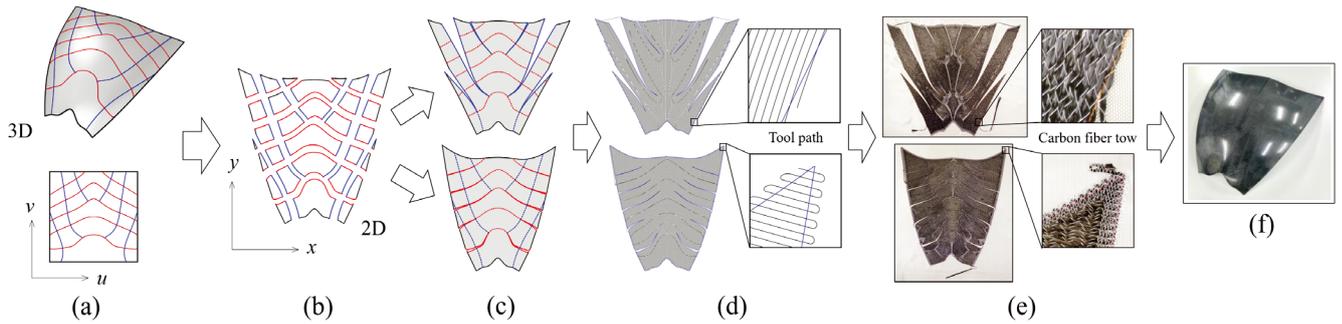


図22 提案手法のフロー

(a) 設計曲面と繊維を配向させる方向に沿った曲線群の配置, (b) (a)の曲線群で構築された領域の展開図, (c) 展開パッチを並び替えることにより構築した2種類の平面展開図, (d) 展開図内部へのツールパスの計算, (e) TFP 刺しゅう機を用いたプリフォームの製作, (f) CFRP の成形,



図23 TFP 刺しゅう機

(左:「TCMM-101 TFP」(タジマ工業株式会社), 右: 基材に配置された炭素繊維トウ)

CFRP の成形法は様々に存在するが, 本研究では FRP 製の簡易型を用いる VaRTM 法 (Vacuum assisted Resin Transfer Molding, 真空含浸工法) と L-RTM 法 (Light Resin Transfer Molding) を用いた. いずれの手法も, 大掛かりな設備を必要としない低コストな手法であり, かつ有機溶剤の揮散が少なく環境にもやさしいという利点がある. 2 手法の成形装置の概略を図 24 に示す. VaRTM 法は, 雌型のみを用いるためコストが低く, L-RTM 法は, 雌雄の両型を用いるため成形品の両面を鏡面に仕上げることができる, 等の特徴がある.

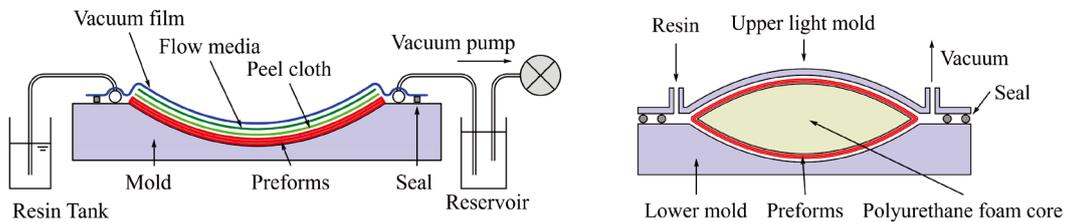


図24 成形装置の概略図 (左: VaRTM 法, 右: L-RTM 法)

3.1.3 設計形状の展開とパスの算出

図 22 で示す平面への展開と炭素繊維の配置経路の決定法について説明する. 中間基材であるプリフォームの形状は, 設計形状の平面展開図から決定する. 曲面への成形のためプリフォームに切込みを入れつつ, かつ所望の方向に沿って炭素繊維トウを連続的に配向させるためには, まず配向させたい方向に沿って切断線が入った展開形状を算出し, その展開図内部に沿って繊維を配置すればよい. そのようなアプローチにより, 切断はプリ

フォームの基材に対してのみで済み、炭素繊維トウの裁断を避けることが出来る。本研究では、任意方向に沿って複雑曲面を展開するアルゴリズムを開発した。アルゴリズムの概要は以下の通りである。

手順1. 設計形状に対して、繊維を配向させたい2組の方向の曲線群を配置する (図22 (a)).

手順2. 手順1で配置した曲線群で囲まれたそれぞれの領域について展開形状を求める (図22 (b)).

手順3. 展開パッチを元の接続関係に従って、平面上で並び替えることにより、2種類の全体展開形状を求める (図22 (c)).

次に展開図内部にツールパスを計算する。プリフォーム基材上への炭素繊維トウの配置は、成形品の強度や品質を考慮すると、①トウが目的の方向に沿って配置されていること、②トウが粗密のばらつきなく密に配置されていること、③トウ同士の重なりがないこと、④展開図内部での折り返しがないこと、が望まれる。例えば単純な配向方向と単純な展開形状であれば、①~④をすべて満たすことは可能であるが、一般的にこれらはトレードオフの関係にあり、すべてを同時に満たすことは困難である。特に目的の配向方向に粗密のばらつきが生じている場合は特に難しくなる。今回は、展開形状の外周線を基準にした等距離オフセットをベースとした手法を考案し、トウ同士の重なりが少なくなるようなツールパスを算出した。提案アルゴリズムを用いて、それぞれの展開図の内部に一筆書きのツールパスを算出し、刺しゅう機への入力データを準備する。その際に、刺しゅう機の性能を考慮し、鋭角な折り返しを避ける、入力データのサイズ容量を考慮する等に対応する。

3.1.4 成形事例

提案手法に基づき、船舶プロペラを想定した曲面モデルに対して成形実験を行った。成形サイズはいずれも50cm角程度の縮小モデルとし、繊維の配向方向は曲率線とした。曲率線は、曲面の微分幾何に基づいて算出される曲面上の曲線群であり、曲面の曲がりの最大/最小方向を示す。主応力線のように特異点を除いて、最大/最小主方向は互いに直交する性質を有する。曲率線を利用することによって、炭素繊維トウを層ごとに直交させ、任意方向からの外力に対する強度向上を図った。成形にあたり、プリフォームの基材は、0.18mm厚のガラスクロス材「MARINETEX 0.2 A」(ニチアス株式会社)を利用し、炭素繊維トウは、「Toho Tenax HTS40 F22 12K 800TEXS」(帝人株式会社)を利用した。また樹脂は「ウレタンアクリレート樹脂 CBZ-500LM-AS」(日本ユピカ株式会社)を利用した。

図25はその成形フローである。まず図25 (a)に示す船用プロペラの曲面に対して曲率線を計算し (図25 (b)), 2種類の展開図を算出した。展開図上にツールパスを算出した結果が図25 (c)である。曲率線の最大主方向に沿った展開図 (図25 (c)上段) はプロペラの前縁を横切るような展開図となっており、一方、最小主方向に基づく展開図 (図25 (c)下段) では、曲率線がプロペラの前縁と一致するため、展開図の切断線は前縁に沿っている。これらのプリフォームを交互に積層し、L-RTM法を用いて成形を行った。成形途中の様子を図26に示す。製品重量を

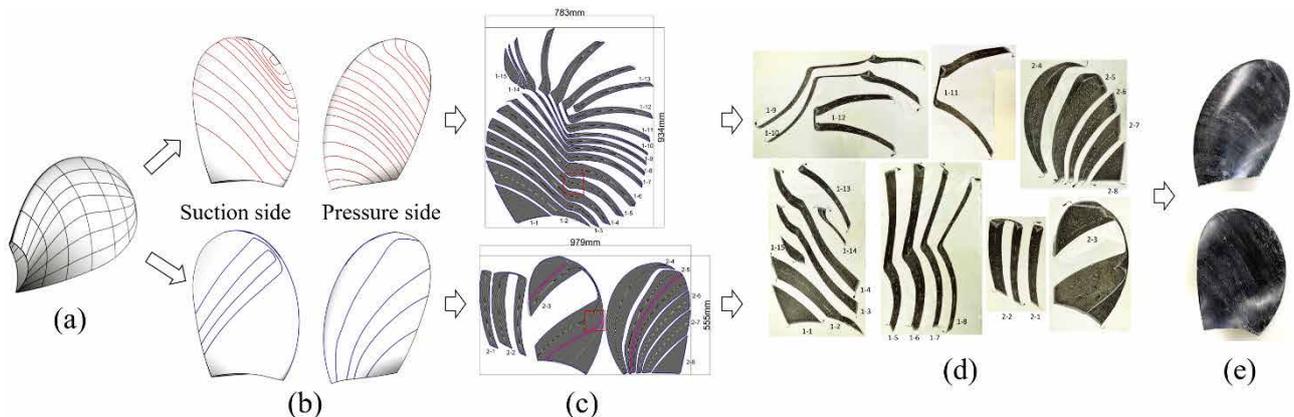


図25 船用プロペラモデルへの適用例

(a) 設計曲面, (b) 曲率線の様子 (上段: 最大主方向, 下段: 最小主方向), (c) 曲率線に基づき算出した2種類の平面展開図と内部に計算したツールパス, (d) TFP刺しゅう機を用いたプリフォームの製作, (e) CFRPの成形

考慮して、プロペラの心材には発泡ウレタン材を利用している。L-RTM法を用いることでプロペラを分割することなく、一体で形状全体を成形することが出来た。また両面ともに鏡面に仕上げることができた(図27)。成形後の製品については、X線透過試験を行い、炭素繊維トウが所望の角度に配向されているかを確認した。

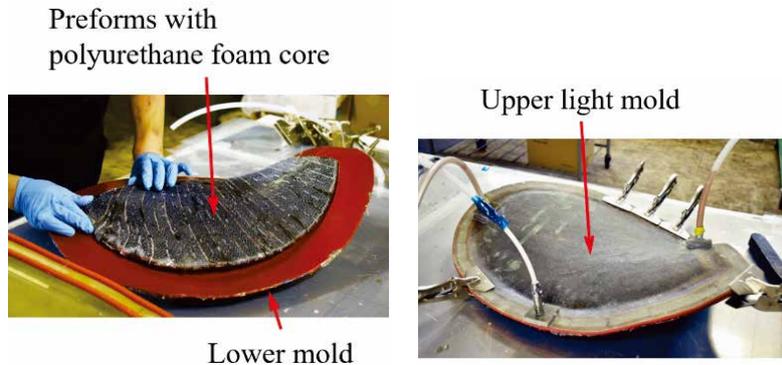


図26 船用プロペラモデルの成形時の様子(L-RTM法)。



図27 船用プロペラモデルの成形結果

3.2 船体フィルムの設計技術の開発¹⁷⁾

本研究では、3.1節の曲面の平面展開技術を応用し、船体曲面外板への船体フィルム貼付技術について検討したので報告する。

3.2.1 船体フィルムの適用

船は常に海水にさらされていること等から、陸上構造物に比べても腐食が進みやすい環境にある。このような厳しい環境においても、長期間にわたって船の腐食等を防ぎ健全に運用するために様々な塗料が用いられている。近年、塗料を塗装する代わりに、製品に直接フィルムを貼ることで塗装を代替する技術に注目が集まっている。塗装代替フィルムは、塗装されていない対象物に薄いフィルムを貼ることで塗装作業を省略しつつ、従来の塗料の機能を保証するものである。将来、このフィルム貼付方式が船舶に実用化されれば、塗膜乾燥や重ね塗りの時間が省略できるため、塗装工数の大幅な削減が期待される。しかし曲がった船体の曲面形状に対して、伸び縮みが少ない薄いフィルムを小さな歪みで覆うことは難しい。そこで本研究では、船舶への塗装代替フィルムの実用化を見据えて、自由曲面に対するフィルム形状の最適な設計法について研究を行った。3次元曲面を薄いシート状の材料で覆う場合、対象形状の平面展開図が必要となる。そのため本研究では曲面上の曲率線に基づく平面展開手法をベースとしたフィルム形状の設計法について研究した。

3.2.2 曲率線展開法による船体フィルム形状の設計アルゴリズム

曲率線に基づく非可展面の平面展開手法について説明する。曲率線展開法は曲率線を展開基線として非可展面の船舶外板のCADモデルを平面に展開する手法であり、船舶外板の現図展開や造船現場での曲げ加工支援に応

用されている. この手法は, 曲面上の曲率線をその測地線曲率 κ_g の値を用いて平面に長さを保ったまま展開し, 展開された平面曲線を平面上で組み立てることにより展開図を生成する. 本研究では展開精度を向上させるため新たな展開アルゴリズムを提案した. 本手法では曲面上の曲率線に囲まれた領域(曲率線パッチ)に注目し, 曲率線パッチを平面に展開した後(展開 quad), 平面上で曲率線に沿って並べることで, 曲面境界まで精度良く復元する. 本研究ではこの展開アルゴリズムを適用する.

展開の手順について簡単に説明する. 曲面上の曲率線パッチは 4 本の曲率線 (最大・最小主曲率線, それぞれ 2 本) によって構成される場合が一般的である(図 28 (a) 参照). 初めに曲率線パッチを構成する 4 本の曲率線を, それぞれ測地線曲率 κ_g を用いて平面に実長展開する. 平面に展開された 4 本の曲率線を, 曲面上での接続関係に基づいて接続すると, 平面上で展開 quad が形成される. しかしその形状は自由度を有しており, 一意に定まらない. そこで曲面上の曲率線が曲面上で直交網を形成することから, 展開 quad の頂点角度が 90 度からの誤差が最も小さくなるような形状を求める. そこで図 28 (b), (c) のように, 展開 quad の頂点とその頂点角度をそれぞれ V_i, ω_i ($i=0, \dots, 3$) とし, 角度 $\phi_i, \delta_{(i,1)}, \delta_{(i,2)}$ ($i=0, \dots, 3$) を定義すると, 頂点角度 ω_i は以下のように表される.

$$\omega_i(\psi_0) = \psi_i(\psi_0) + \delta_{i,1} + \delta_{i,2}, (i = 0, \dots, 3). \quad (1)$$

ここで ω_i は角度 ψ_0 を変数とする関数である. 目的関数は以下のように表される.

$$F(\psi_0) = \sum_{i=0}^3 \left(\omega_i(\psi_0) - \frac{\pi}{2} \right)^2. \quad (2)$$

式(2)を最小化するために, Newton 法を用いて式(3)を満たす角度 ψ_0 を求める.

$$\dot{F}(\psi_0) = \sum_{i=0}^3 2 \left(\omega_i(\psi_0) - \frac{\pi}{2} \right) \dot{\omega}_i(\psi_0) = 0. \quad (3)$$

ここで $\dot{\cdot}$ は角度 ψ_0 に関する微分を表す.

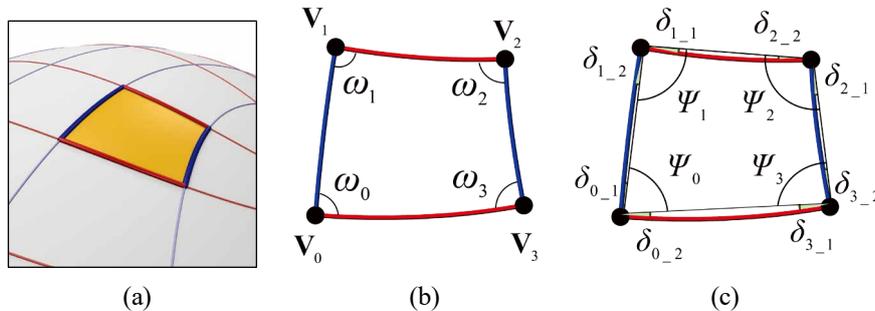


図 28 曲率線パッチから展開 quad への生成のイメージ

3.2.3 船体フィルムの設計事例

提案手法に基づき, 実際の船体形状に対して船体フィルムの設計を行った. 図 29 は対象船舶の船首部形状とその曲率線格子の様子である. 曲率線格子についてはその格子形状が平滑になるように, 曲率線格子の平滑性を目的関数とする曲面形状のフェアリング処理を行っている.

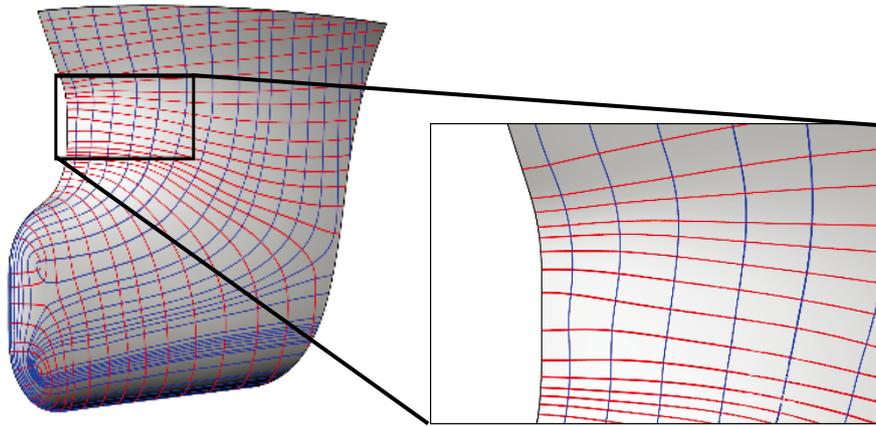


図29 船体船首部の曲率線格子の様子

図29の曲率線格子に基づき、実際に展開対象となる曲率線パッチを生成する。図29を初期の曲率線配置として、展開の角度誤差が大きい曲率線パッチに対して逐次、曲率線を配置して曲率線パッチの領域を小さくしている。図30は曲率線パッチの展開角度の誤差に着目して、曲率線の本数を(a)から(d)の順に増やした様子を示す。各(a)~(d)の左側の列が、展開の際における角度の誤差のカラーマップを示している。右側の列が、その曲率線配置により得られる展開図である。曲率線が増えるごとに展開図である展開quadの数も増えている。今回は、経験的に、曲率線パッチ内の角度誤差の平均値が0.3[deg]以下の曲率線パッチは展開精度が十分であると判断し、図30ではその曲率線パッチは白色にしている。(b)~(d)になるにつれて曲率線パッチの枚数は増えていき、展開の際の角度誤差が小さくなっていく。また角度の誤差が大きい曲率線パッチの領域から優先に曲率線を配置して曲率線パッチを分割することで、結果として、曲面の曲がり方が大きい領域には数多くの曲率線が配置され、曲がり方が小さい領域には少ない曲率線が配置されている。これにより、曲面への復元精度に基準を与えつつ、最適な曲率線パッチの配置ができる。

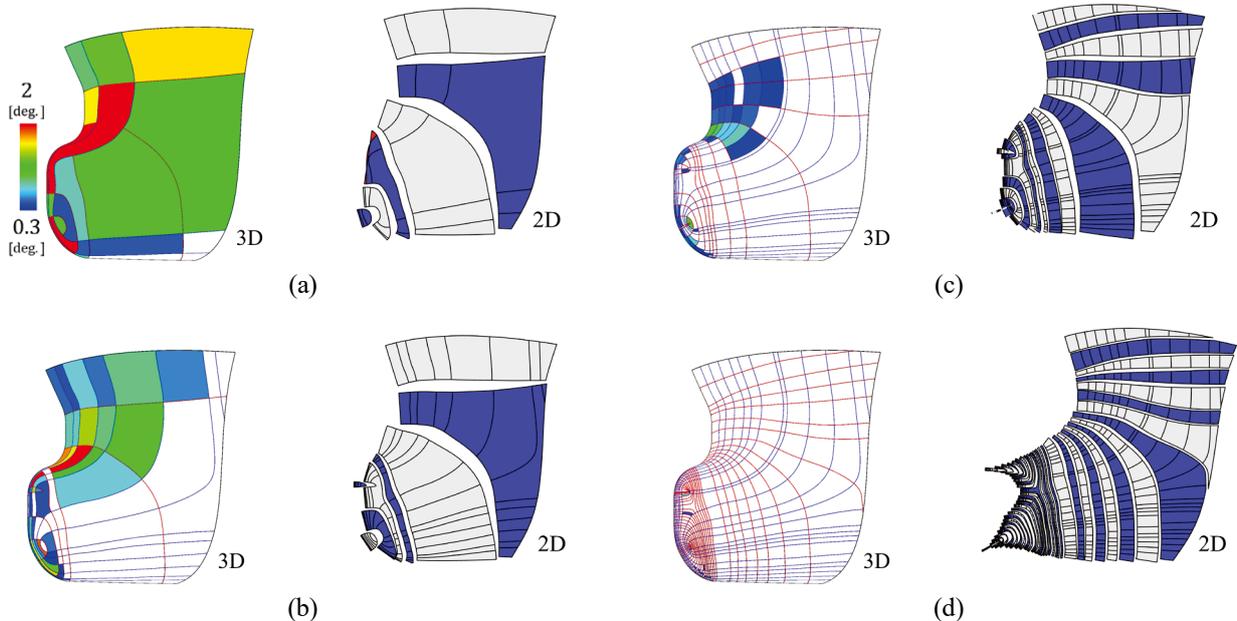


図30 曲面形状に応じた曲率線パッチ配置の最適化

曲率線パッチに基づいて平面展開を行い、船体フィルムとして模擬した平面シールにネスティングを行った後、NCにて切り出したものを貼付した例が図31である。このように曲率線展開に基づく船体フィルムでは、複雑な曲面に対してもフィルム同士の重なりや隙間がなく、曲面上にまんべんなくフィルムを覆うことができる。これ

はフィルム貼付の品質維持だけでなく、予め決められたところに、決められたフィルムを貼付することから、非熟練工であっても貼付作業に従事できることを意味している。



図 31 船体船首部への曲面フィルムの貼付例

3.3 ドローンによる定盤管理システムの開発

3.3.1 ドローンによる定盤のモニタリング

本研究では、造船業の生産管理の高度化のため、ドローンを活用した造船所のモニタリング技術について研究開発を行った。ドローンによる造船所のモニタリングでは、造船所構内を定期／不定期に飛行し、ブロックや艀装品の状態、作業者の状況等をモニタリング、データ化することで、造船所の生産管理業務の効率化を図る。この内、本研究では造船ブロックを対象にその施工管理及び在庫管理の高度化を目指して検証を行った。検証では造船所の屋外のブロック置场上空を試験飛行し、マーカーを設置したブロックを撮影した。そして、撮影した動画データまたは静止画データを解析し、造船ブロックの識別可否評価、マーカーの有効性を実施した。

本検証では造船所の実際の船殻ブロックについての実証実験を行った。使用したドローンとして自律飛行が可能で一般に入手可能な機体を選定した。具体的には DJI 製 Phantom4 Pro (図 32, 表 5, 表 6) を選定した。



図 32 使用機材 (DJI 製 Phantom 4Pro)

表 5 ドローンの機体仕様

諸元	内容
機体形式	4 軸ローター (機体寸法: 290×290×196 mm, 重量: 1388 g)
航法	選択式: 手動操縦, 自律飛行 (GPS, 各種センサーによる飛行)
飛行性能	最大航続時間: 約 30 分 5870mAh 耐風性能: 10m/s 飛行速度: 上昇 6m/s, 下降 4m/s, 水平 20m/s
標準装備	専用カメラ (約 1700 万画素), GPS 受信機, 加速度計 3 軸, ジャイロ 3 軸, 高度計

表6 高度別の地上分解能

高度(m)	撮影可能範囲 長辺(m)	撮影可能範囲 短辺(m)	地上分解能 (mm/pix)
10	15	10	3.1
20	30	20	6.2
30	45	30	9.3
40	60	40	12.3
50	75	50	15.4
60	90	60	18.5
70	105	70	21.6
80	120	80	24.7
90	135	90	27.8

ドローンによるモニタリング対象とする定盤は屋外のブロック置場であり、今回の検証ではその対象範囲として65m×75mの範囲とした。ドローンによるブロックの計測はドローンの自動飛行による連続写真撮影で行った。撮影高度は造船ブロックの大きさを鑑み、40m、60mの2設定とし、オーバーラップ率90%、サイドラップ率70%、飛行速度1m/sで実施した。撮影された映像データから高度別にオルソ画像及び点群データを生成した。図33～35が実際に撮影されたオルソ画像、点群データ、3次元モデルである。



図33 オルソ画像 (左: 高度40m, 右: 高度60m)

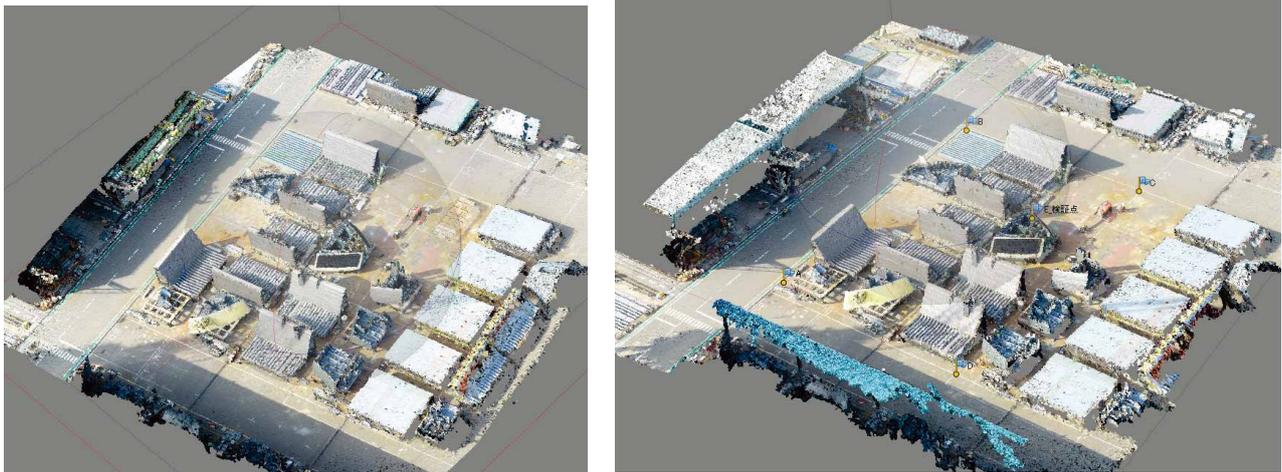


図 34 点群データ (左 : 高度 40m, 右 : 高度 60m)



図 35 3次元モデル (左 : 高度 40m, 右 : 高度 60m)

生成したデータから地上点の位置計測精度について検証したところ、表 7 に示す通り、水平方向で平均 2cm、垂直 (高度) 方向で誤差は生じなかった。このことから、約 1700 万画素のカメラで高度 60m 以下で撮影を行えば、ミリオーダーの位置計測ができ、船体ブロックに対してブロック種別、ブロック位置、ブロック形状の再現ができることが分かった。

表 7 ドローンによる地上点の位置計測結果

ケース	飛行高度	地上分解能 (mm/pix)	目標値			誤差	
			緯度	経度	高度 (m)	水平 (m)	高度 (m)
基準値	-	-	-53021.25239	118638.1145	3.1	-	-
1-2	40m	12.3	-53021.25229	118638.133	3.1	0.02	0
1-3	60m	18.5	-53021.25229	118638.133	3.1	0.02	0

※日本直交座標 (4系)

また、船殻ブロックに上空から見通せるマーカーを貼付し、上空からのマーカー認識性能について確認した。マーカーの読み取りはドローンの自動飛行による動画撮影で行い、高度 20m からの読み取りを行った。撮影した動画から汎用のマーカー読み取りプログラムにてマーカーの検知を行い、マーカー間の相対距離の計測を行った。図 36 はマーカーが貼付されたブロックを上空から撮影したものである。マーカーは設置位置や高さの違いによる影響を検証するため、対象ブロック上に 6 個、地上の定盤上に 7 個設置した。マーカーは A3 サイズの白紙に

印刷した。図37はプログラムで読み取ったマーカー配置図を示す。すべてのマーカーに対して読み取りができており、マーカー同士の相対距離計測については、定盤上に設置したマーカー（図37で「1023」と付番されたマーカー）を基準として地上点で平均1.8m、ブロック上で平均1.3mの誤差であった（表8）。ブロック上のマーカーは高いところに位置しており、これにより撮影分解能が高いために誤差が小さくなったものと考えられる。マーカーには様々な属性情報を埋め込むことができる。そのため、ブロックの種類、ステータス等の情報をマーカーに埋め込むことで、ドローンからのブロック状況の確認ができるものと考えられる。また、上空からのマーカーの視認性は良好のため、ブロックだけでなく、艀装品や作業者にマーカーを貼付し上空から状況把握、在庫管理することも可能である。ただし、あくまで、視認できるのはドローンから見渡せる状況に限られる。

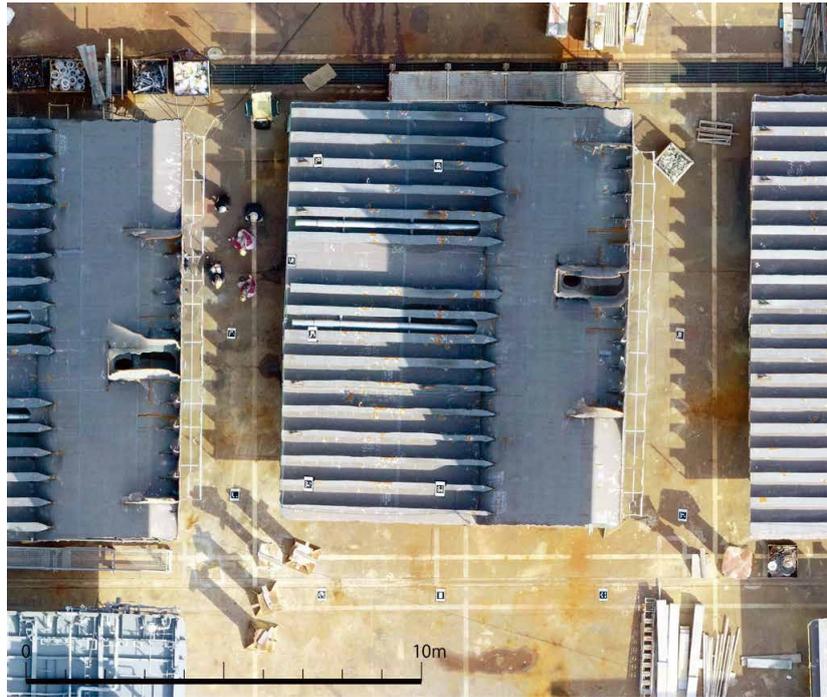


図36 マーカー貼付のブロックの上空写真

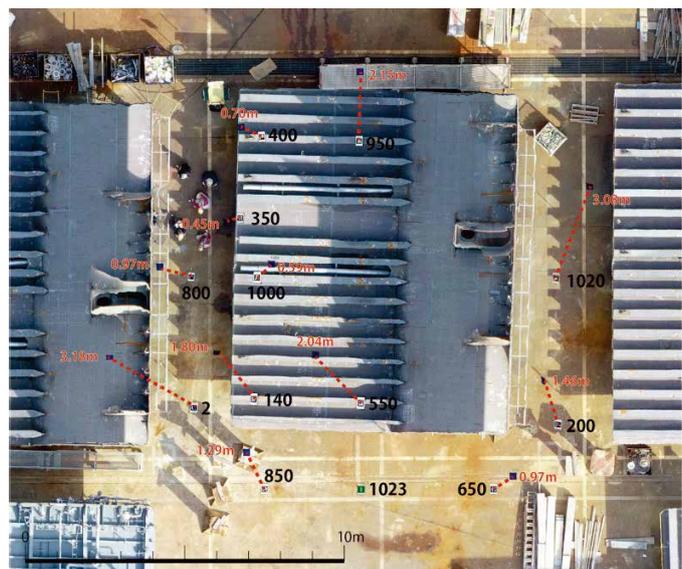
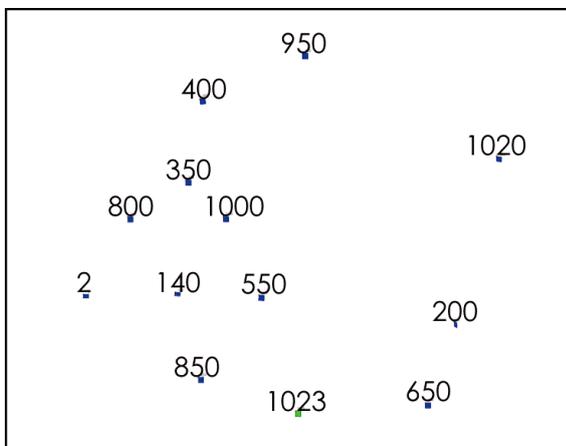


図37 上空からのマーカーの読みとり

表 8 マーカー間の相対距離の計測結果

地上地点 No.	誤差 (m)	ブロック上地点 No.	誤差 (m)
800	0.97	400	0.70
2	3.18	950	2.15
850	1.29	350	0.45
650	0.97	1000	0.59
200	1.46	140	1.80
1020	3.08	550	2.04
平均	1.83	平均	1.29

※No.1023 を基準点

3.3.2 造船ブロック定盤管理システムの開発

ドローンによるモニタリング情報を取り込むための造船ブロック定盤管理システムについて検討した。定盤管理システムは、工場の生産計画（ブロック定盤計画）と連動させることで、ブロック置場の予実管理を行う。具体的には、システム内に実際のブロック定盤を模したバーチャル定盤を構築し、バーチャル定盤上に計画上のブロック配置とドローン等からモニタリングした実績としてのブロック配置を重畳表現する。これにより、ブロック置場の現在状況、計画からの遅延等をビジュアルに確認できる。図 38 は本研究で開発したブロック定盤システムの概念図である。工場（定盤）の日程計画等に加えて、定期的にモニタリングされるドローンからのモニタリング情報を取り込むことで、バーチャル定盤上で時系列に沿ってブロックの計画／実績の状況を可視化する。図 39 は実際に開発したシステムの様子であるが、時間を調整するスライダーを操作すると、計画データとしてブロックの 3 次元モデル、実績としてドローンから取得した画像データ、3 次元データがバーチャル定盤上にマッピング表示される。また、マーカーによって読み込んだブロックに関する属性情報のデータもシステムに登録することができる。

将来的には、様々な計画データ／実績データを登録、分析するプラットフォームとすることで、例えば、ブロックの取り扱いに関する情報（ブロックの移動タイミング、移動先等に関する情報）を作業者に提供する機能、ブロック搬送台車の AGV 化（自動走行化）の元となるデータを提供する機能、定盤上のブロックに対するブロック艀装作業等を支援する機能等の機能拡張を考えている。

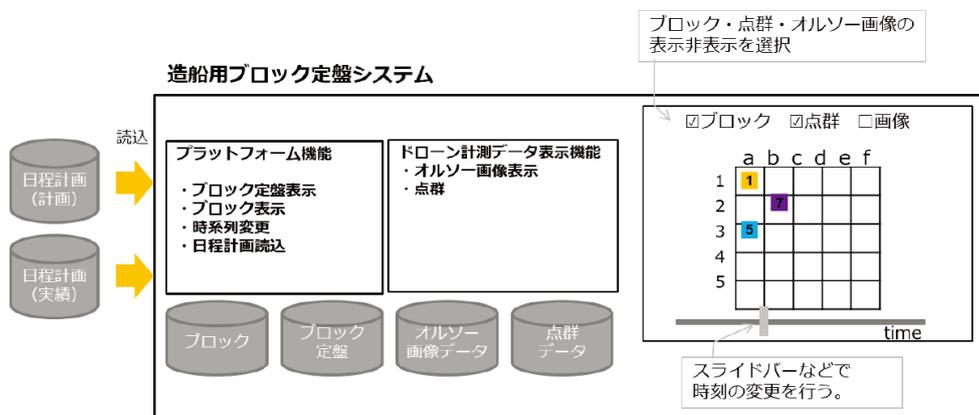


図 38 造船ブロック定盤管理システムの概念図

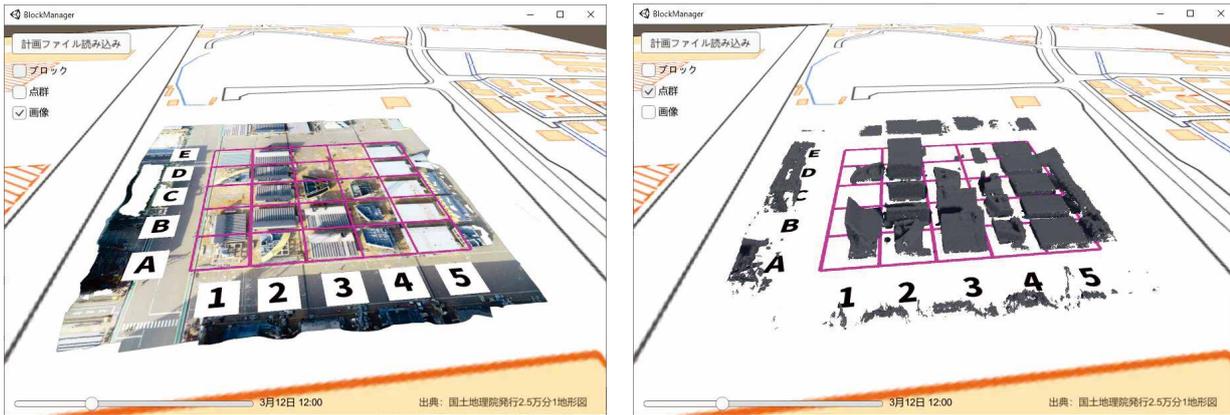


図 39 造船ブロック定盤管理システムの様子

4. まとめ

第1期中期長期計画（平成28年度～令和4年度）において、重点研究「造船業の競争力強化や少子高齢化等に対応するための新しい生産システムの構築に関する研究」に取り組んだ。本報告では、上記重点研究で取り組んだ研究開発の内、平成28年度から平成31年度（令和元年度）に実施した造船の生産技術の高度化に資する研究開発について報告を行った。

現在、当所ではここで研究開発した知見を踏まえ、「デジタルシップヤード」構想として研究開発を継続している。デジタルシップヤード構想では、造船を「すべてが数値表現され、すべて数値計画され、すべてが計画通りに完結する」ものとし、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。本報告で紹介した研究開発はデジタルシップヤードを実現するための技術要素である。今後は、デジタルシップヤードの技術要件及びその要件を満たす要素技術、ソリューションを整理した上で、優先順位の高い要素技術から研究開発を進めるとともに、それらを統合してデジタルシップヤード全体を構築する研究開発を推進していく。

謝 辞

2.1節で報告した曲げ加工支援システム及び2.2.2節で報告した曲げ加工支援ARアプリケーションの研究開発については、今治造船株式会社が国土交通省海事局の「先進船舶・造船技術研究開発費補助金（革新的造船技術研究開発）」事業の採択を受けて実施したものです。関係各位に深く感謝申し上げます。

References

- 1) 松尾宏平, 藤本修平他：曲率線情報に基づく造船プレス加工支援システムに関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集第28号, pp.189-201, (2018).
- 2) K. Matsuo and M. Takezawa: Development of work support system of press work for sheet metal forming, The 19th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS2019), (2019)
- 3) M. Takezawa, K. Matsuo, T. Maekawa: Control of lines of curvature for plate forming in shipbuilding, Computer Aided Geometric Design, Volume 75, pages 101785, (2019).
- 4) M. Takezawa, K. Matsuo, T. Ando: Development of Support System for Ship-Hull Plate Forming Using Laser Scanner, International Journal of Automation Technology 15(3) 290-300, (2021).

- 5) K. Matsuo, S. Fujimoto, M. Takezawa: Application of Augmented Reality Technology to Manufacturing in Shipbuilding, Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT 2022), 137-152, (2022).
- 6) 松尾宏平他, 造船のぎょう鉄作業を支援する AR システムの開発, 職業能力開発総合大学校 PTU フォーラム, (2019).
- 7) 松尾宏平: 造船溶接施工を支援する溶接支援 AR アプリケーションの開発について, 日本船舶海洋工学会平成 29 年春季講演会論文集, 189-190, (2017).
- 8) 藤本修平, 谷口智之: 拡張現実(AR)を利用した塗装作業支援システムのプロトタイプ開発, 塗料・塗装研究発表会講演予稿集, 35, 15-18, (2020).
- 9) 旭エレクトロニクス株式会社 web サイト: VR 塗装技能訓練システム
(<https://www.aec.co.jp/solution/ss/spt3d.html>)
- 10) 松岡和彦: 塗装シミュレータによる技能伝承, 咸臨, 78, 26-27, (2018).
- 11) 藤本修平, 谷口智之: 3D-VR 塗装シミュレータを活用したスプレー塗装技能研修の開発, 日本船舶海洋工学会論文集, 34, 185-195, (2021).
- 12) 松尾宏平, 谷川文章: 生産シミュレータによる造船作業のモデル化に関する研究 ~海技研のデジタルシッ
プヤード構築に向けた方針とその取り組み~, 海上技術安全研究所研究発表会講演集, 第 18 号, pp.104-113,
(2018).
- 13) K. Matsuo, F. Tanigawa: Modelling of Flexibility of Shipbuilding Work by Production Simulation, Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT 2020), 63-70, (2020).
- 14) 中小型造船工業会:「中小造船業への新しい生産管理手法の導入による人材活用」2018 年度最終報告書, (2019).
- 15) K. Matsuo, M. Takezawa, and A. Sakurai: On a Concept of a 3D CAD/CAM system based on geometric theory for CFRP plates molding process in shipbuilding, The 18th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS 2017), (2017)
- 16) 松尾宏平, 竹澤正仁, 櫻井昭男: 複合材における炭素繊維の曲率線配置に関する研究, 第 9 回日本複合材料会議 (JCCM-9) 講演論文集, (2018).
- 17) M. Takezawa and K. Matsuo: Sticking paint replacement films on ship hull surface based on lines of curvature, The 19th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS2019), (2019).