

曲率線展開システム及びプレス施工支援システム

松尾 宏平*, 藤本 修平*

The System of Curved Shell Plate Developing by Lines of Curvature and the Assistant System for Press Work in Shipbuilding

by

Kohei MATSUO and Shuhei FUJIMOTO

Abstract

This paper describes systems developed by NMRI for mainly improving sheet metal forming work efficiently in a shop floor in shipyards, and also for improving an accuracy of a curved shell plate developing in a design stage. Those systems consist of the curved shell plate developing system by lines of curvature and the assistant system for press work in shipbuilding respectively. At first, we explain the general and practical background of a curved shell plate developing in a design stage and sheet metal forming work for those curved shell plates in a shop floor in Japanese shipyards. Both systems developed by NMRI are explained in detail respectively, including those theoretical principle, system structure and system operation in practical shipbuilding. The system of a curved shell plate developing by lines of curvature draws the developed shape of a curved shell plate by using lines of curvature as a base line of developing, and we can geometrically obtain the precise equivalent shape of a curved shell plate into a plane without any assumption or approximation. On the other hand, the assistant system for press work provides a set of indicating lines on the plate to instruct workers where and how much to press, and also gives quantitative information about the target shape after press work completion. Because those systems already have made some improvements in sheet metal forming works in actual shipyards, the paper introduces several results of those systems by comparing between the traditional and new methods in shipyards.

* 構造基盤技術系

原稿受付 平成28年1月28日

審査日 平成28年2月26日

目 次

1. まえがき	78
2. 造船における曲げ加工と海技研のアプローチ	78
2.1 曲り外板の外板展開と曲げ加工	78
2.2 造船曲げ加工を支援する海技研の研究開発	80
3. 曲率線展開システム	81
3.1 曲率線展開法の原理	81
3.2 曲率線展開システムの内容及び構成	83
3.3 曲率線展開システムによる効果とその運用実績	85
4. プレス施工支援システム	86
4.1 プレス施工支援システムの原理	87
4.2 プレス施工支援システムの内容及び構成	88
4.3 プレス施工支援システムによる効果とその運用実績	89
5. まとめ	90
参考文献	91

1. まえがき

本稿では、海上技術安全研究所が研究開発した「曲率線展開システム」及び「プレス施工支援システム」について解説する。「曲率線展開システム」及び「プレス施工支援システム」は、いずれも造船生産現場において匠の技と言われる外板曲げ加工を支援するシステムで、これらのシステムによって、現場での外板曲げ加工の効率化と定量化、技能育成への貢献に期待ができる。また、「曲率線展開システム」は、幾何理論に基づき、曲面外板を合理的かつ最適に外板展開する。

本稿では、始めに、外板展開及び造船曲げ加工に関する一般について概説した後、それらに対する海技研の取り組みを俯瞰する形で、「曲率線展開システム」及び「プレス施工支援システム」の内容や互いの関係を整理する。この後、各システムについて、基本原理、システム構成、導入・運用に関する事項、及びシステム導入によって期待される効果やこれまでの運用実績を紹介する。

曲率線展開法は、仮定や近似に依っていたこれまでの外板展開と比して、幾何学的には理論的に展開しうる唯一のもので、この方法に則って動作する両システムによって造船の外板曲げ加工の高度化が実現できる。曲率線展開法に基づく外板展開と外板曲げ加工が、我が国造船業界に普及していくことを期待している。

2. 造船における曲げ加工と海技研のアプローチ

本章では、「曲率線展開システム」と「プレス施工支援システム」の詳細な解説に先立ち、造船における曲り外板の外板展開と現場での外板曲げ加工について一般的事項を概説する。その後、それらに対する海技研の取り組みとして、「曲率線展開システム」と「プレス施工支援システム」について基本事項を紹介する。

2.1 曲り外板の外板展開と曲げ加工

船体は流体力学的な要請から滑らかな曲面形状になっているが、この船体曲面は滑らかに曲げられた鋼板、つまり曲面外板で構成されている。曲面外板は、平らな鋼板から現場での曲げ加工を経て目的の曲面に成形されるが、その過程で、設計（主に生産設計）では現図展開が、一方、製造現場では曲げ加工が行われる。

現図展開（以下、単に展開）とは、切り分けられた曲面外板1枚ごとに、それに相当する平面形状を製図することである。現図展開と曲げ加工は、原則的には逆作業であり、設計段階で曲面をどの様に平面に展開したかが分かっているれば、現場での曲げ加工の手順は一義的に定まることになる。しかし、造船で取り扱う曲面はそのほとんどが非可展面と呼ばれる、伸び縮み無しに平面へ展開することができない曲面であり、一般的に、このような非可展面の展開方法は唯一ではなく、むしろ、無限の方法が有るとするのが正しい（この身近な具体例として、地球の地図への投影法が用途に応じていくつも存在することを想像すればよい）。実際、船体曲面における非可展面（船首及び船尾付近の曲面外板のほとんどは非可展面である）の展開法にもいくつもの方法が存在し、また、同じ展開法で展開するとしても、展開基線（展開においては、曲面上を走る代表的な曲線を選び、その曲線を平面上に展開することで曲面全体の展開形状を得ることを行うが、この選択した代表的な曲線のことを展開基線と呼ぶ）等の選択によって展開結果は異なり、どの展開法で、どのように展開すればよいかは、各造船所や各展開システムによって経験的に纏められていた。加えて、これまで長く用いられた展開法は、設計の実用上の観点から製図的に展開するもので、非可展面の幾何的な取り扱いに限界があり、展開アルゴリズムに仮定・近似を含んでおり合理的な展開とは言いがたい。例えば、今現在も主流となっている「測地線展開法」（1950年代に三田村¹⁾・²⁾によって考案された）は曲面内の任意の2点の最短を結ぶ曲線（測地線）を展開基線として、それを直線に展開する方法だが、測地線の求め方が近似的であることや展開に伴って生じる伸ばしを原理的に考慮できないことなど問題点がある。他にも、板を細かく区切って展開を行う「真金送り法」、「送り返し法」、「タスキ送り法」などがあるが、展開作業に手間がかかることや現場での作業を要するものなど、一部の特殊な展開に用途が限られている。近年、ほとんどの造船所や設計会社では、これらの展開法を搭載した計算機による展開システムが導入されているが^{3),4)}、展開過程がブラックボックス化するなど、どのような展開を行なったかが不明な場合がある。このようなケースでは、現場へ適切な情報・作業指示を伝えることはできないという問題が残っている。

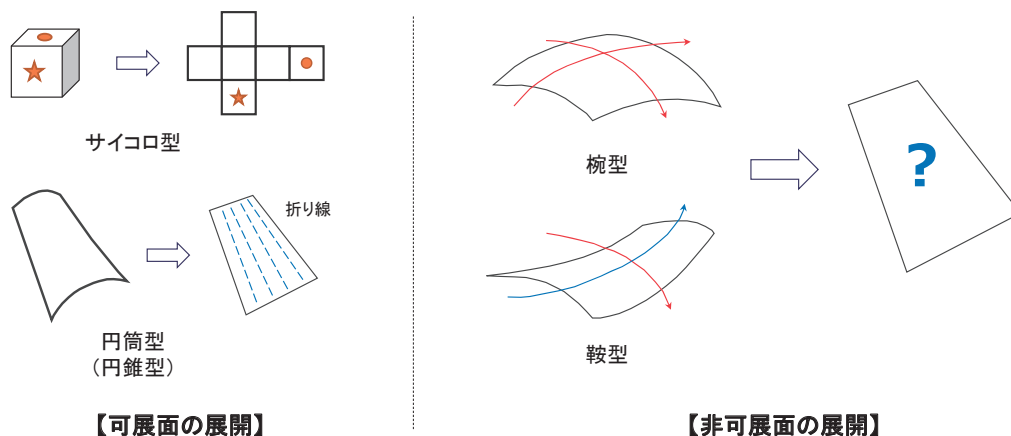


図1 可展面と非可展面の平面への展開のイメージ

次に、現場での外板曲げ加工について概説する。過去における曲げ加工は、加熱炉に鋼板の全体あるいは一部分を入れて加熱し、熱間でハンマーで叩くことで成形していたが、近年はプレス機械による冷間加工やガス炎による線状加熱の方法が定着している⁵⁾。まず、設計にて展開された曲面外板は、NC切断機により、鋼板から平面部材として取材される。その後、プレス・ローラー等による冷間曲げ加工で荒曲げを行い、更に、ガス加熱等による熱曲げ・熱絞りを行なって所定の曲面形状を得る。この外板の曲げ加工をぎょう鉄ともいう。曲げ加工は、造船における職人技の代表例として扱われることが多いが、その困難さの要因としては、3次元の曲面のイメージが難しいこと、目的の3次元曲面を得るためにどのような幾何学的変形をつければいいかの判断が難しいこと、また、それらが理解できたとしても思い通りの加工（特に熱間加工）が難しいことが挙げられる。特に、ガス加熱による熱曲げ・熱絞り加工は皿形や鞍型といった非可展面の成形に不可欠な作業であるが、ガス加熱による加工は思った通りに曲げにくい、変形がわずかずつで目に見えにくい・分かりづらい、非常に時間のかかる作業でわずかなミスが膨大な時間ロスとなってしまうなど、造船における特有の技能となっている。このため、技量不足のため曲げられない外板がある、必要以上に時間がかかってしまう、職人によって曲げ加工に要する時間や仕

上がりの品質にばらつきがある，作業手順を明確化できない，完成に要する時間等が読めない（作業の定量化がしにくい），熟練までに相当の年月を要する等，工作上及び生産管理上の問題がある．特に，建造する船舶の船型等が変わり，初めての曲面外板の加工の際，これらの問題が顕在化する．



図2 外板曲げ加工の手順

2.2 造船曲げ加工を支援する海技研の研究開発

このような現図展開及び外板曲げ加工の諸問題を解決すべく，海上技術安全研究所では，「曲率線展開システム」^{6),7)}と，その派生プログラムである「プレス施工支援システム」^{8),9)}を研究開発し，その成果をプログラムパッケージとして提供している．これらのシステムは，曲面と外板展開を，幾何学的厳密さを持って扱うことで，外板展開の最適化，曲げ加工の効率化及び定量化（曲げと絞り量の定量化）が可能となる．

図3は，造船所での曲面外板の生産設計と加工のプロセスに対する，「曲率線展開システム」及び「プレス施工支援システム」の対応付けを行ったものである．曲率線展開システムは，外板一枚ごとに外板展開を行うとともに，その展開情報から曲げ加工におけるプレス加工とガス加熱加工に関する施工情報を出力する．ここで施工情報とは，プレス線及びガス加熱線の施工線とプレス量及び収縮量等の各種情報である．

曲率線展開システムによって，現場に提供される外板にはプレス線とガス加熱線がNCマーキングされる．作業者は，これらの加工線に倣ってプレス加工及びガス加熱加工を行えばよい．特にプレス加工に関しては，プレス施工支援システムの援用によって，より正確なプレス線（「リアルプレス線」とも称している）を利用することができ，これによってプレス加工の効率化，加工時間や仕上がり精度の安定化，非熟練対応化に期待ができる．

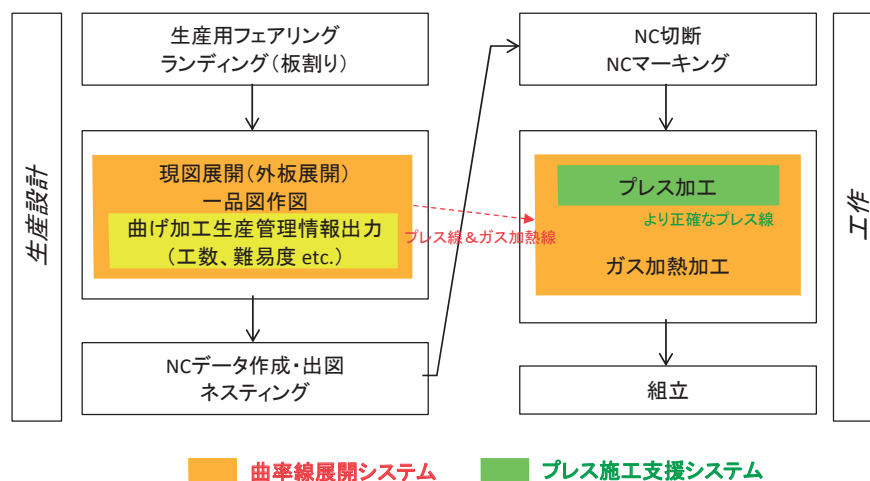


図3 曲げ加工の手順

以下の第3章及び第4章では、「曲率線展開システム」及び「プレス施工支援システム」についての詳細な説明を行う。

3. 曲率線展開システム

本章では、「曲率線展開システム」^{6),7)}について解説する。まず、システムの根本となる新しい外板展開法「曲率線展開法」の原理について説明する。次に、それを計算機上でシステム化した「曲率線展開システム」に関して、システムの内容及び構成に関すること、また、曲率線展開システムは既に造船所に導入の実績があるため、造船所での運用実績等について紹介する。

3.1 曲率線展開法の原理

外板曲げ加工で取り扱う曲面はそのほとんどが非可展面(伸び縮み無しに平面へ展開することができない曲面、数学的には面内でガウス曲率 $\neq 0$ の曲面)である。非可展面の展開方法は唯一ではなく、むしろ、無限の方法が有るとするのが正しい。ところが、造船における最適な曲げ加工方法は存在し、それに応じた逆作業としての曲面の展開方法は唯一と考えられる。多くの現場調査⁸⁾から、最適な曲げ加工方法は、「工場施設が許す限り、大きい曲がりには冷間加工を用い、非可展面の測地測度の調整に熱を用いること。また、熱による調整が最小になるように冷間曲げを行なうこと。」と分析し、この最適な曲げ加工方法に対応する展開方法として、曲率線を展開基線及び外板曲げ加工における施工線とする展開法を見出した。この展開法を「曲率線展開法」と呼ぶ。

曲率線とは、曲面上の最大曲率と最小曲率の方向(主方向)をそれぞれ連続して追っていった2組の曲面上曲線で、互いに直交する、曲面の曲がり方が最も際立った方向を走る曲線のことである。曲率線展開法の骨子は、上記の最適曲げ加工法における、冷間加工を行う大きい曲がりを曲率の絶対値の大きい曲率線方向(第1曲率線)、測地測度⁹⁾の調整のための熱絞りを曲率の絶対値の小さい曲率線方向(第2曲率線)とすることである。なお、主方向は与えられた任意の曲面外板を $z(x, y)$ のように関数表現すれば次のように表現でき、それぞれの主方向をルンゲ・クッタ法等で逐次追っていけば、曲率線を描くことができる。

$$dy/dx = -\left\{B \pm (B^2 - 4AC)^{1/2}\right\}/2C \quad (3.1)$$

$$dx/dy = -\left\{B \pm (B^2 - 4AC)^{1/2}\right\}/2A \quad (3.2)$$

ここで、(3.1)、(3.2) 式中の A, B, C は以下の通りである。また、 $z_{,x}$ は偏微分 $\partial z/\partial x$ 、 $z_{,xy}$ は偏微分 $\partial^2 z/\partial x \partial y$ を意味する。

$$A = \left\{1 + (z_{,x})^2\right\}(z_{,xy}) - (z_{,x})(z_{,y})(z_{,xx}) \quad (3.3)$$

$$B = \left\{1 + (z_{,x})^2\right\}(z_{,yy}) - \left\{1 + (z_{,y})^2\right\}(z_{,xx}) \quad (3.4)$$

$$C = (z_{,x})(z_{,y})(z_{,yy}) - \left\{1 + (z_{,y})^2\right\}(z_{,xy}) \quad (3.5)$$

図4は、ねじれ外板の曲率線（赤線：第1曲率線，青線：第2曲率線）の様子であるが，曲率線によって板の曲がりの傾向を掴むことができる．これらの曲率線が，外板展開では展開基線に，現場での曲げ加工ではプレス線（第2曲率線）及びガス加熱線（第1曲率線）となる．

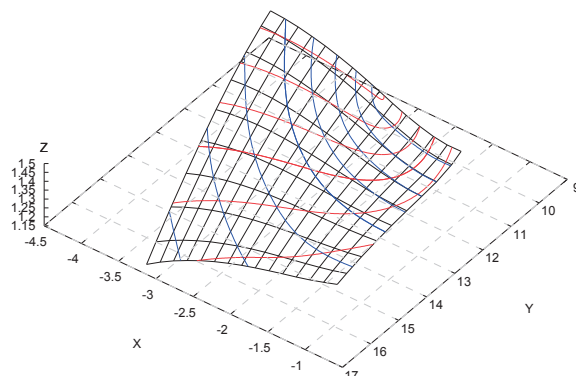


図4 ねじれ外板の曲率線の様子

曲率線は，その幾何学的な特性，つまり，測地的ねじれがないことから，測地的展開（測地的曲率を保ったまま，法曲率成分を除去して実長展開すること）すると，平面に展開することができる．この点が，曲率線展開法を造船古来の展開法に比べ理論的に優れたものとする所以のひとつで，曲率線によって展開過程に仮定を設けず厳密な展開ができる．曲率線による測地的展開の概念図を図5に示す．

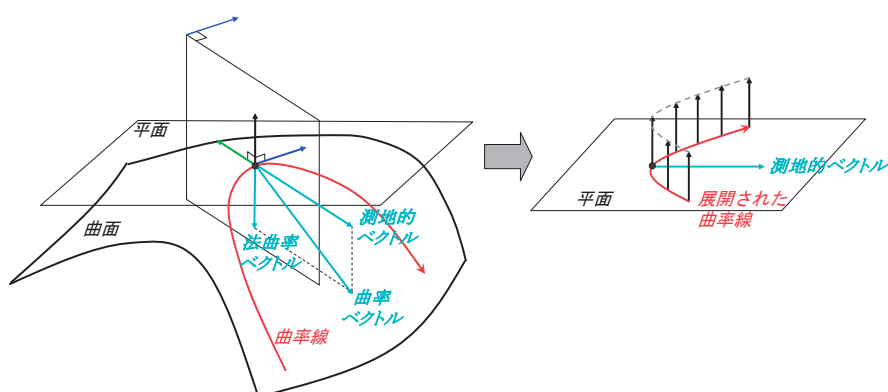


図5 曲率線の測地的展開のイメージ

測地的展開した第1曲率線を，測地的展開した第2曲率線で，伸ばしの量が最小となるように接続することで曲面全体の平面展開を得る．つまり，図6における各第2曲率線の伸ばし量 δ の総和 $\sum_{CL2} \delta$ が最小となるように接続の第2曲率線を定める．

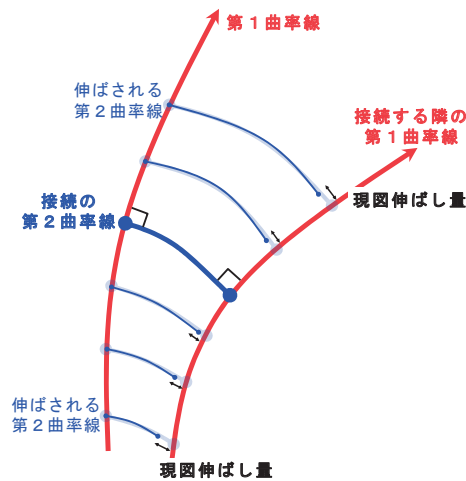


図6 曲率線の接続のイメージ

図7は曲率線による3次元曲面の成形をペーパークラフトで再現したものである。実際の船体外板を縮尺したもののについて、曲率線に沿って紙面に切り込みを入れ、システムによって計算された所定量を絞ることで目的の3次元形状を得ることができる。この例からも、曲率線に沿った曲げと伸縮によって、任意の3次元曲面を得ることができることが容易にイメージできる。なお、図7の写真の左は、同じ縮尺の外板を3次元プリンタで造形したものである。

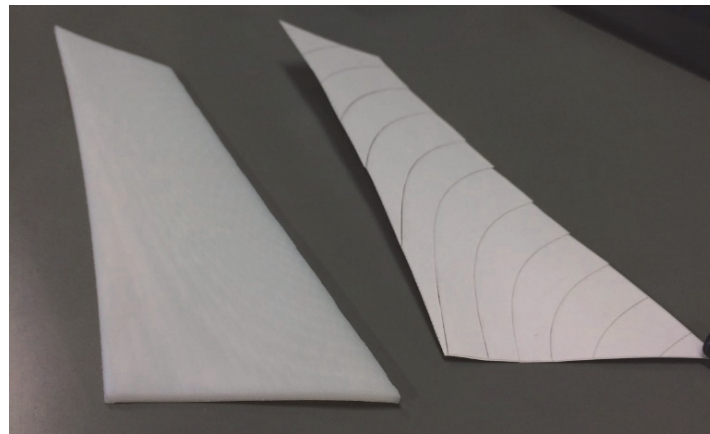


図7 縮尺した造船外板についてペーパークラフトにて曲率線曲げを再現したもの

曲率線の平面への展開と曲率線の接続は、曲率線特性により幾何学的に厳密に行なうことができるため、曲りや伸ばしの箇所・量が定量的に把握できる。本手法と既存の展開法による最終的な展開形状は異なるが、その差は絞りが強い板ほど大きくなる傾向にある。しかし、それは既存の展開形状に施工上設けられる伸ばしシロの範囲内に入る程度で、現場の施工上は妥当な精度を得ているものと考えている。

曲率線展開法は、曲面上に張られた曲率線を展開基線として面全体の展開形状を得る。この発想自体は測地線展開と同様だが、曲面を数学表現し曲率線を求めること、それを幾何学的に合理的に平面に展開すること、そして、面の伸ばしを定量的に考慮しながら展開する点が、これまでの展開法と異なる点である。曲率線を展開基線として展開する手法は、造船以外の他産業を見渡しても見受けられない。

3.2 曲率線展開システムの内容及び構成

曲率線展開システムは、造船の設計業務において曲率線展開法によって外板展開を行うために海上技術安全研究所が開発したシステムである。本システムは、2006年に第1版をリリースして以降、現在も改良を加えている。

曲率線展開システムの基本機能として、線図データの読み込みによる外板形状の認識、フェアリング精度の簡易的なチェック、曲率線展開による外板展開、展開図上での各種マーキン線（曲げ施工線、フレーム、ウォータライン等）の出力、曲げ型の出図機能が備わっている。システムは、Windows PC にて他の造船設計システム等に依存することなくスタンドアロン形式で動作し、外板の数値データ（ライン図の数値データ等）があれば単体で利用可能で、展開図の出図も AutoCAD に準拠した DXF 形式で出図される。図 8 に、曲率線展開システムのインタフェース画面の様子（左）と曲率線展開システムの処理フロー（右）を示す。処理フローでは、各社の設計システムが異なっていたとしても、線図データを本システムが指定する入力フォーマットに変換さえすれば、本システムを利用できることを示している。

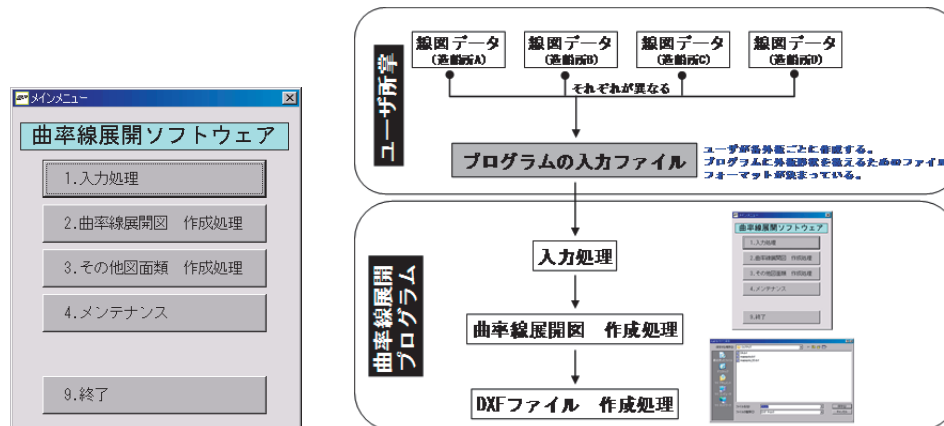


図 8 曲率線展開システムのインタフェース画面と処理フロー

曲率線展開システムで外板展開された実際の外板の例を図 9 に示す。曲率線展開システムによる外板展開図の最大の特徴は、展開図内にプレス線（図 9 において青線で示す）とガス加熱線（図 9 において赤線で示す）が表示されることである。これらのプレス線及びガス加熱線は最終目的形状における曲率線に相当するものであり、曲率線展開法に基づく外板曲げ加工とは、言い換えれば、展開図にマーキンされているプレス線及びガス加熱線を、曲げや面内収縮によって本来の曲率線形状にすることと言える。なお、どの程度の曲げを与えればよいか、どの程度の面内収縮を与えればよいかについてはすべて幾何情報として持っており、それを出力し、加工情報として利用することも可能である。図 10 は、面内収縮量の情報を展開図上にプロットし、面内収縮量の範囲及び量を可視化したものである。図でゼブラ状に黒く示した分を面内収縮すれば、目的の非可展面に成形することができる（図 9 の外板の場合は、耳絞りであることが一見して判明し、この面内収縮によって皿型の外板が成形される）。

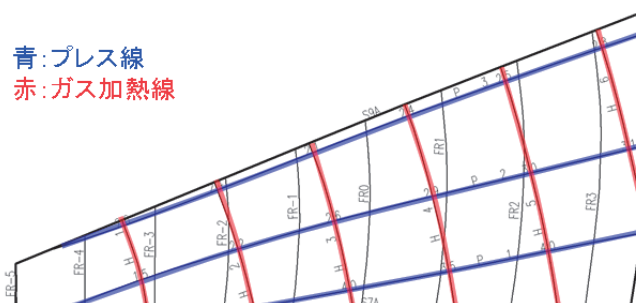


図 9 曲率線展開システムによる外板展開の出図例

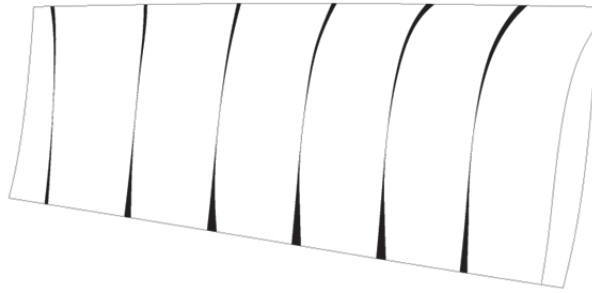


図10 面内収縮量の可視化の例

曲率線展開システムで展開することのできる外板としては、原則、すべての非可展面の外板を展開可能である。また、曲率線展開システムは、通常の外板展開システムと同様、曲げ型の出力にも対応している。図11は曲率線展開システムが出力する外板曲げ型図の様子である。ユニバーサル治具型のセットにも使えるように、CAD図面だけでなく、EXCELで利用できる帳票も出力する。

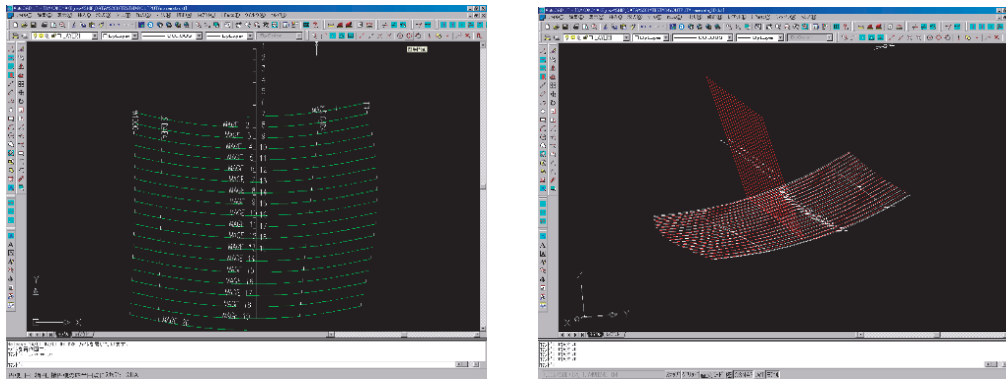


図11 曲率線展開システムの曲げ型出図の例

3.3 曲率線展開システムによる効果とその運用実績

曲率線展開システムは、既にいくつかの造船所に導入され、生産設計・生産現場で運用されている。導入された造船所では、曲げ加工の効率化、曲げ工数の安定化と定量化、技能工の育成に貢献している。

図12は、造船所での曲率線展開システムの導入前後での曲げ施工線の違いを示したものである。図12では左右両舷それぞれの外板の様子を示しているため左右対称になっているが、プレス線（図中青線で表示）が曲率線展開では外板の形状に応じて厳密に引かれている。従来システム（図中左）では1本の直線状のプレス線しか表示されておらず、このプレス線に従って加工すれば、特にこの外板の場合、図中で黄色にて囲んだ領域付近で本来の曲面形状とは異なるプレス線を適用したことになり、線状加熱での修正に余計な手間がかかってしまう。曲率線展開システムによるプレス線ではそのようなことが起こらず、外板の形状の違いにも追従して最適なプレスが実現でき、後工程である線状加熱作業の短縮を果たしている。なお、曲率線展開システムが出力する「曲がったプレス線」について、導入している造船所ではそれを部分的に直線近似し、条押しプレス機にてプレス加工することで対応している。このことから、曲率線展開法に基づく曲げ加工では、原理的にローラーバンダーでの加工に適しないことを付記しておく。また、図12によると、従来法には加熱線の指示も入っていない。

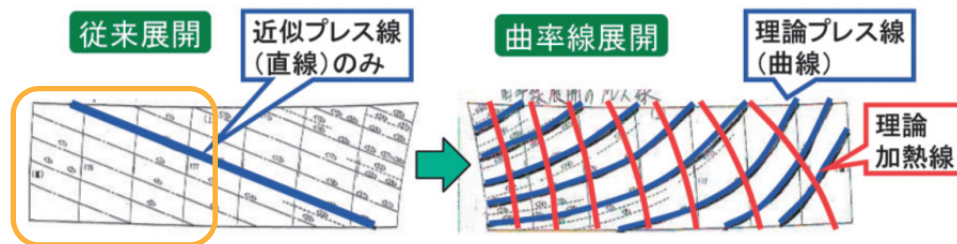


図12 曲率線展開システム前後の施工線の違い

図13は、図12とは別の外板ではあるが、曲率線展開の適用有無による加工時間の違いを示したものである。ガス加熱加工の時間が下がっていることが確認できるが、この理由は、先述の通り、正確なプレス線による荒曲げの実現に帰着できる。

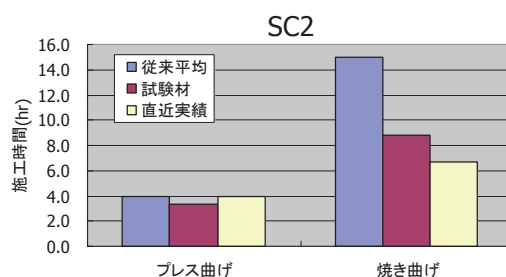


図13 曲率線展開システム前後の施工時間の違い

図14は導入造船所における曲率線展開システム導入前後の長期的な工数の推移を示すものである。この例でも、導入後、特にガス加熱加工の工数が減少していることが確認できる。

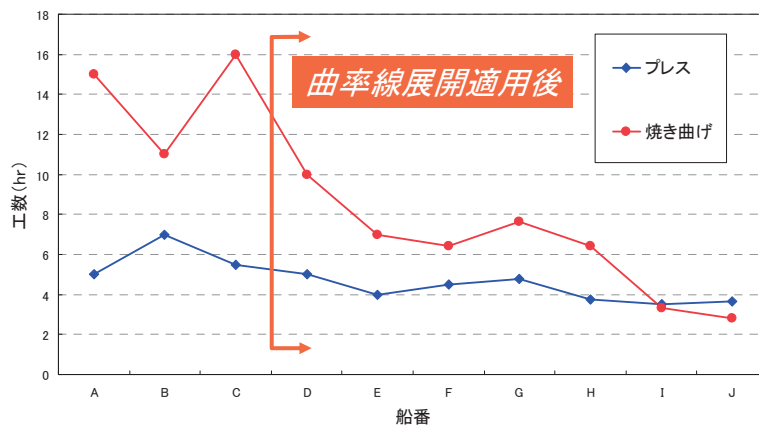


図14 長期的な工数の推移

このように、曲率線展開システムの導入によって、匠の技と言われる外板曲げ加工に対して、施工の改善と技能者の育成が実現できる。

4. プレス施工支援システム

本章では、「プレス施工支援システム」^{10), 11)}について解説する。3章と同様、まず、システムの基本原理について説明した後、「プレス施工支援システム」に関して、システムの内容及び構成と造船所での運用実績等について紹介する。

4.1 プレス施工支援システムの原理

曲率線展開システムによる外板展開の結果から、曲面上の最大曲がり方向をプレスによって加工することが可能となる。しかし、曲率線展開システムによる展開結果の表示は一意ではなく、展開後の外板内の曲率線の本数や曲率線同士の間隔に任意性があるため、プレスの作業指示としてあいまいさが残っていた。そこで、プレス施工支援システムにおいて、平板上の「どの箇所」を「どの程度の荷重」で加工すれば良いかの明確な指示手法を開発した。また、プレス作業の完了判断等への使用を想定し、プレス仕上がり時の形状の算出法を開発した。以下にこれら開発手法について述べる。

プレス箇所指示のための基本情報として、まず加工目標形状の上で「等角度線」を求める。法曲率 κ_n を任意の曲線に沿って積分すれば、当該積分区間の曲線に沿った角度変化量（積分区間の両端の点 P_0 , P_1 がなす角度）が次式で算出できる。

$$\int_{P_0}^{P_1} \kappa_n(s) ds = \theta(s) \quad (4.1)$$

ここでは角度変化量を算出する曲線として第1曲率線を採用する（図15(a)）。第1曲率線を用いることで、曲率線展開法と同様に、プレスによって与える曲がり量の最大化が図られる。第2曲率線の一つを選択し、その線を基準として各第1曲率線に沿って（図15(a)において、点 P_0 から点 P_s まで）積分を実行し角度を算出する。次いで、図15(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に、2本の等角度線の間が一定角度となる曲線で、曲がりが大きい形状であるほど、その間隔が密になる。

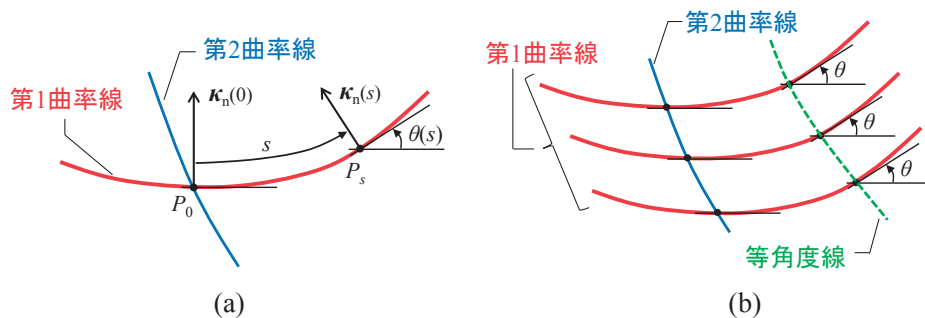


図15 等角度線の算出方法

「等角度線」は、一定角度ごと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）ことで目的の形状が成形できる。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。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ため、プレス箇所を決定する際には図16(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（ P_{start} ）を固定し終点（ P_{end} ）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が覆われるまで繰り返す（図16(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。以上の手順から、外板上の「どの箇所」をプレスすれば良いかの指示線が得られる。

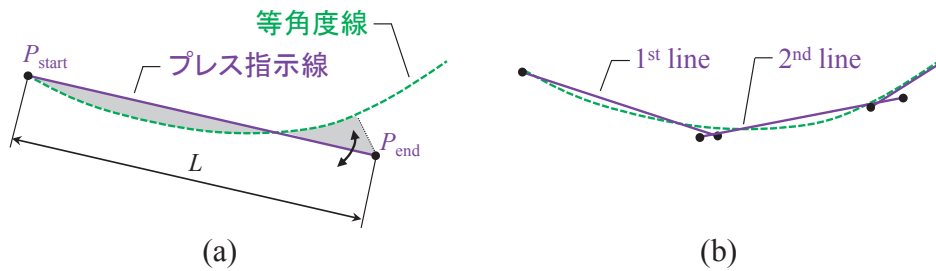


図 16 プレス指示線の算出

以上から、「どの箇所」をプレスすれば良いかの情報が得られた。これに加えて、「どの程度の荷重」でプレスすれば良いかを算出する。当該情報を算出するためには、まず、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を定量的に把握しておく必要がある。ここでは、弾塑性有限要素法を用いた 2 次元板曲げ解析により、付加荷重に対する板の曲がり角度を算出した。加工対象材の物性値（造船用鋼板として一般的に用いられる TMCP 鋼を想定）、板厚、上下のプレス金型形状、荷重の条件等は、実際の造船現場に則した値を使用した。解析には汎用コード ANSYS を使用した。解析では、所定の荷重を加えた後に除荷し、スプリングバックが発生した後の曲がり角度を評価した。この板曲げの解析から、「荷重-曲がり角度」のデータベースを構築した。このデータベースを使用し、「所定の曲がり角度を与えるには、板材に何 tonf の荷重を加えれば良いか」が算出できる。データベースに登録のない値については、データベースの値から補間して算出する。前述の「プレス指示線」算出の際に求めた「等角度線」間の角度に対応する荷重をデータベースから取得し、その荷重値情報をプレス指示線に付加することで、加工対象材の「どの箇所」を「どれだけの荷重」でプレスすれば良いかの作業指示が可能となる。

プレス施工支援システムは、プレス指示線に加えて、プレス作業の完了判断等への使用を想定し、プレス仕上がり時の形状も出力する。一般に造船曲げ加工の加工対象は非可展面であり、非可展面は平板を単純に曲げるだけでは成形できず、平板を曲げた上で、その一部を収縮させて成形する必要がある。プレス作業の仕上がり形状として、加工目的形状の非可展面から収縮変形成分を除いて得られる可展面を考え、これを造船におけるプレス後の最適な仕上り形状として出力する。なお、具体的な出力手順としては、非可展面の曲率線格子のうち、第 2 曲率線の法曲率 κ_n をゼロとし、第 1 曲率線の法曲率のみを残した可展面をプレス仕上り形状としている。第 2 曲率線に沿った法曲率がゼロとなるため、第 2 曲率線は第 1 曲率線と直交する直線に投影される。図 17 は、プレス施工支援システムが出力するプレス仕上り形状の一例である。

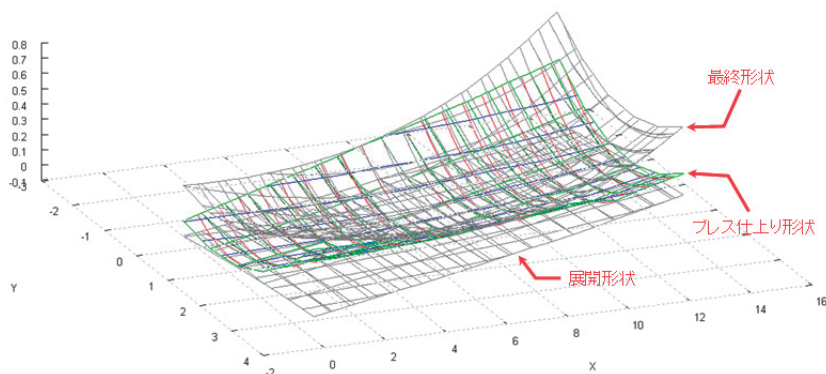


図 17 プレス仕上り形状の例

4.2 プレス施工支援システムの内容及び構成

前節までに述べたプレス指示手法およびプレス作業の仕上がり形状算出法を組み込んだプログラム「プレス施工支援システム」を開発した。システムは第1曲率線および第2曲率線による曲率線格子で表示された形状データ（3次元の座標値）を入力とし、プレス指示線またはプレス仕上がり形状をDXF形式の図面で出力する。プレス施工支援システムのユーザインタフェースを図18に示す。ユーザインタフェースとしてGUIを具備し、簡便な操作が可能である。

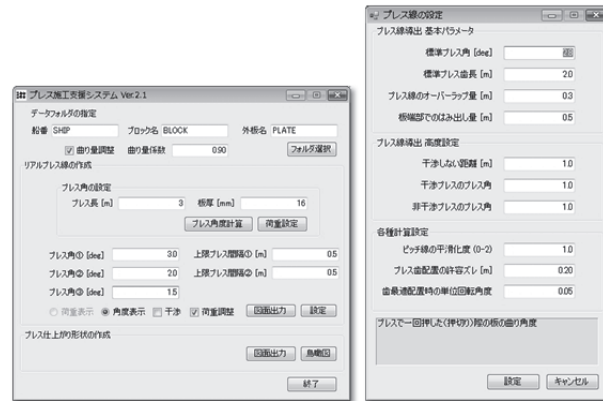


図18 プレス施工支援システムのインタフェース画面

また、プレス施工支援システムが出力する実際の造船外板に対するプレス線の出力例を図19に示す。図19に示す通り、外板展開図上に、その工場に設備されているプレスヘッド（プレス型の断面形状、プレス歯の長さ、板端部でのみ出し量等）に応じた具体的なプレス線が、プレス箇所だけでなく、プレス荷重まで指示された状態で出図される。作業者はこの作業方案に従って場所及びプレス荷重でプレス作業をすればよく、プレス加工の効率化と品質の安定化が期待できる。

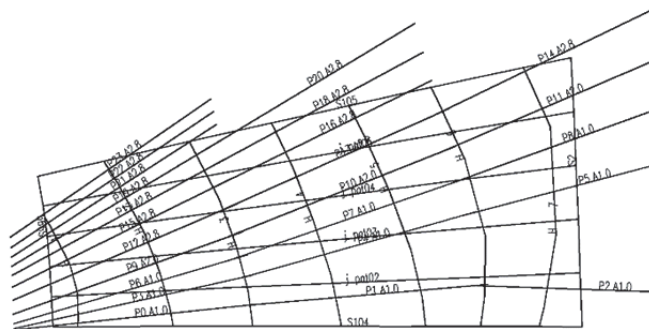


図19 プレス施工支援システムによるプレス線の出力例

4.3 プレス施工支援システムによる効果とその運用実績

プレス施工支援システムは既に造船所に導入され、プレス施工ラインで運用されている。プレス指示線は加工対象の鉄板上に直接マーキングされる。プレス作業者は金型をマーキング位置に合わせて施工することにより、初級作業者であっても的確なプレス施工が可能となるため、作業のガイド等として好評を得ている。

図20は左右両舷の（同形状の）外板のプレス加工後の形状を3次元スキャナで計測し、比較した結果である。左右両舷での工程能力の差は0.01と小さく、また左右両舷ともに全体の70%程度が許容誤差内に収まっている。本システムの導入による工程改善の一例である。

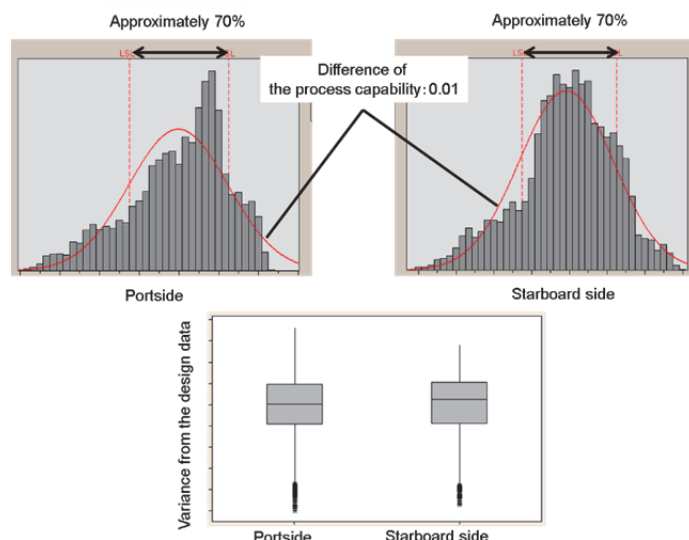


図 20 プレス施工支援システム導入による工程能力の平準化

図 21 に、プレス施工支援システム導入後の外板曲げ加工の工数変化を示す。同型の 1 番船、2 番船および 3 番船について工数を調査した結果である。後の番船ほどプレス施工支援システム適用の割合（図中の▲）が増加している。プレス工程の工数は大きく変化していないが、ガス加熱工程で明確な工数減少効果が表れている。これは、プレス施工を最大限活用することにより後工程であるガス加熱の作業量を削減することにつながっているためだと考える。

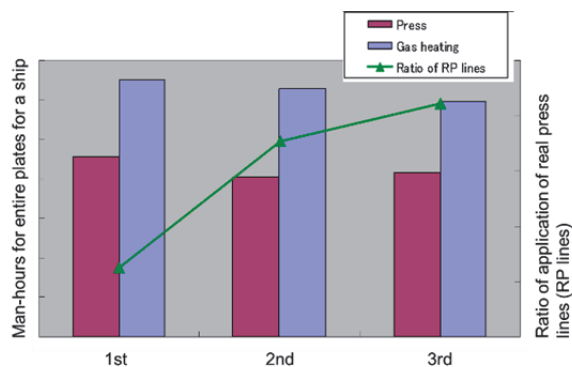


図 21 システム導入によるガス加熱工数の削減効果

5. まとめ

本稿では、造船曲げ加工の効率化と技能者の育成のために研究開発した「曲率線展開システム」及び「プレス施工支援システム」について、その基本原理、システム的内容及び構成、システムの運用実績等について紹介した。各システムについて纏めると以下のとおりである。

【曲率線展開システム】

- ・ 曲率線を展開基線に外板展開するものである。
- ・ 外板展開図に、外板の曲面形状に応じて正確なプレス線とガス加熱線が出図される。同時に、必要なプレス量や面内収縮量も計算される。
- ・ 幾何学的に厳密に展開を行っている。このため、展開形状の最適化も図れる。

- ・ 既に造船所にて実用化されており、特に曲げ加工の工数削減に貢献している。

【プレス施工支援システム】

- ・ 工場のプレス型に応じた、具体的なプレス線が展開図上に出力される。これによって、作業者は、指示された場所について、指示された荷重でプレス加工を行えばよい。
- ・ 外板ごとにプレスの回数等を計量でき、プレス作業の工数、作業時間を見積もることができる。
- ・ 既に造船所にて実用化されており、プレス加工の効率化及びプレス仕上り形状の定量化を実現している。

現在、曲率線展開システム及びプレス施工システムが出力する曲げ加工に関する各種施工情報を、造船設計や生産計画・管理の面で、更に高度利用する取り組みを行っている。具体的には、曲げ加工の難易度や加工工数の推定・定量化、曲げ加工の最適な工程計画(加工順番、スケジュール、担当作業等)の出力、曲率線に沿った新しい外板割り(外板ランディング)手法の提案などである。

今後、本手法及び本システムが、多くの造船所等に普及していくことを期待している。

謝 辞

本稿で記載したもののうち、図7で示したペーパークラフトの作成については、共同研究を実施している横浜国立大学 前川卓教授より情報提供受けたものを記載している。また、プレス施工支援システムに関しては、住友重機械マリンエンジニアリング株式会社のご協力のもと、研究開発を実施した。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 三田村 利武：近似測地線に依る外板展開に就いて，造船協会論文集 1955(96), 131-141, 1955.
- 2) 三田村 利武：非可展外板の展開に就いて，造船協会論文集 (104), 363, 1959-01
- 3) 北村 昌一：数値計算法による現図諸展開作業（第1報），造船協会論文集 (112), 191-199, 1962.
- 4) 高武 淳夫 他：船殻外板総合処理システム; SHELL, 日本造船学会論文集 (139), 185-196, 1976-06.
- 5) 日本造船学会 鋼船工作法研究委員会編，新版鋼船工作法 第Ⅲ巻 内業工作法 (1975).
- 6) 松尾 宏平, 松岡 一祥：船舶の曲り外板製造を支援する新しい外板展開システムの開発，日本機械学会論文集 C 編, 76 巻 771 号(2010), pp.2797-2802.
- 7) 松尾 宏平他：曲率線展開による新外板展開法とそのソフトウェア・パッケージ化について，日本船舶海洋工学会講演会論文集第1号(2005), pp.285-286.
- 8) 林 慎也 他：ぎょう鉄技術・施工の現状，日本造船学会講演会論文集第3号(2004), pp.107-108.
- 9) 松岡 一祥 他：ぎょう鉄作業と曲面の展開，日本造船学会講演会論文集3号(2004), pp.103-104.
- 10) 藤本 修平, 松尾 宏平, 島田 道男：曲面幾何に基づくプレス作業指示手法の開発，日本船舶海洋工学会講演会論文集第14号(2012).
- 11) Kohei Matsuo, Shuhei Fujimoto: Development and Practical Introduction of a Support System for a Cold Bending Work in Shipyard, The 12th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures(PRADS 2013), 2013.