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

正会員 松 尾 宏 平*
島 田 道 男*

正会員 藤 本 修 平*

Press Working Guidance System for Sheet Metal Forming in Shipbuilding Based on Geometric Lines of Curvature

by Kohei Matsuo, *Member* Shuhei Fujimoto, *Member*
Michio Shimada

Summary

In order to improve sheet metal forming work in shipbuilding, this paper focuses on press working, and introduces R&D on a system that outputs detail guidance information for press working based on geometry theory. The system outputs a guidance line of press working on a plate and an ideal target shape after press working. This allows workers to proceed according to guidance lines by using the conventional press machine. The validity of the proposed algorithm is confirmed in numerical simulation in this paper.

This paper consists of 7 chapters. Chapter 1 is an introduction to explain the background and the purpose of this research as well as the composition of this paper. Chapter 2 reviews related works on sheet metal forming work in shipbuilding, especially on press working. Chapter 3 outlines a theory of lines of curvature. Chapters 4 and 5 are main subjects of this paper. Chapter 4 describes an algorithm for finding an accurate guidance line of press working based on lines of curvature. Chapter 5 introduces the development of a system which implements the above algorithm. In Chapter 6, simulation of press working by a FE method is carried out to confirm the validity of the proposed method. Chapter 7 is a summary of the paper.

1. 結 言

本論文は造船の曲げ加工のうち、特にプレス加工の高度化に関するものである。造船曲げ加工はぎょう鉄とも呼ばれ、造船における典型的な匠の技とみなされており、生産性の向上、技能者育成の面で問題となることが多い。造船曲げ加工は、過去においては、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、近年はプレス機による冷間加工やガス炎による熱間加工の方法が定着している。まず、生産設計にて3次元形状から平面に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、プレスまたはローラーベンダーによる冷間曲げ加工で荒曲げを行い、更に、ガス加熱による熱曲げ・熱絞りを行なって所定の曲面形状を得る。曲げ加工における困難さの要因として以下が挙げられる。

- ・ 目的形状である曲面の3次元イメージが難しいこと
- ・ 目的の曲面を得るためにどのような幾何学的変形をつければよいかの判断が難しいこと

- ・ それらが理解できたとしても思い通りの加工が難しいこと

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、以下の理由で造船特有の高度な職人技能となっている。

- ・ ガス加熱による加工は意図した通りに曲げるのが難しい
- ・ 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のためわずかなミスが膨大な時間ロスにつながる可能性がある

このため、次のような工作上及び生産管理上の問題が生じている。

- ・ 技量不足のため曲げられない外板がある
- ・ 作業者によって作業手順、作業時間や仕上がりの品質にばらつきがある（作業や品質の定量化がしにくい）
- ・ 技能の習得に相当の年月を要する

これらの問題は、建造する船舶の船型等が変わり、初めての曲面外板を加工する際、特に顕在化する。これらを解決するため、著者らは曲げ加工の高度化に関する研究開発に取り組んできた。特に、幾何学的観点からそのメカニズムの解明、上述の問題の解決に取り組んでおり、「曲率線展開法」という曲り外板展開法及びその逆操作としての曲げ加工法を提案、実用化している。曲率線展開法は、自由曲面上の曲率線を、外板展開における展開基線に、また、現場での曲げ加工

* 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所

における加工線（プレス線及びガス加熱線）とするもので、既に実際の生産ラインに導入され、その効果を確認している^{1), 2)}。

一方、近年、製造リードタイムの短縮及び生産性や品質の安定化、定量化に対する要求は益々高まり、製造現場へより詳細な加工情報を提供することが求められている。これまでの曲率線展開法に基づく曲げ加工では、外板展開時に展開基線として使用した曲率線をそのままプレス加工及び熱間加工における目安の線として利用するものに留まっており、厳密にどこを、どのように加工するのかの加工指示線ではなかった。このため、まずはプレス加工を取り上げ、より詳細で精密なプレス線の出力を目指して研究開発に取り組んだ。本論文では、既に実用化している曲率線展開法を発展させ、現場にどこを、どのようにプレスすればよいかの加工指示線を出力するアルゴリズムとそれを実装したソフトウェアの開発を主題に論を展開する。これにより、将来的には、造船プレス加工における標準作業の確立によるリードタイムの短縮、品質の一定化と定量化、熟練工依存からの脱却を目指す。

本論文は7章で構成される。第1章は緒言で、研究の背景、目的（造船曲げ加工の課題、著者らのこれまでの取り組み、本論文の主題）について説明するとともに、本論文の構成を説明している。第2章は造船曲げ加工、特にプレス加工に関する国内外の関連研究のレビューを行い、その動向から本論文で提案する手法の位置づけを整理している。第3章は本論文のベースとなる曲率線展開法について概略を説明している。第4章からが本論文の主題の部分である。第4章は曲率線情報に基づく厳密なプレス加工線の出力アルゴリズムについて説明している。第5章はそのアルゴリズムを実装したプレス施工支援システムの開発について紹介している。第6章は提案手法の妥当性の確認として、有限要素法によるプレス加工シミュレーションとその考察を行い、第7章において本論文を総括する。

2. 造船曲げ加工における関連研究

造船曲げ加工については、これまで国内外を問わず、多くの研究開発が取り組まれてきた。ここでは、本論文の対象であるプレス加工に重点を置き、過去に行われた造船曲げ加工に関する研究開発をレビューし、本論文で提案する手法の位置づけについて整理する。

我が国において、造船プレス加工に関する主な先駆的研究は多点プレス法に関するものである。多点プレス法とは、複数の点状のプレスヘッドを対象外板の全面ないしは一部分に対し、数値制御（NC）の基、一度に押し当てて曲面を成形するものである。その取り組みは古く、文献としては北野による1961年のもの³⁾から見つけることができる。その後、プレスヘッドをボールジョイント方式で全方向に回転可能とし、多種の曲面を精度よく成形できるように改良した「ユ

ニバーサル多点プレス法」^{4), 5)}や、スプリングバックを精度良く見積もるため固有歪法を用いた変形シミュレーションによる多点プレスの改良の検討^{6), 7)}が行われてきた。また、多点プレス法における設備投資・運用上の障壁を下げるため、多点プレス法の概念を引き継ぎつつ、機械的には簡素化した「三条プレス」の開発及び造船所における生産ラインへの実運用の事例⁸⁾もある。しかし、多点プレス法は、大型のNCプレス機の初期投資及びそのメンテナンスコストが大きいことから現時点ではいずれの造船所でも運用されていない。

熱間加工を含む曲げ加工に関する研究開発としては、線状ガス加熱を固有歪法で表現し、弾塑性解析で外板の成形をシミュレーションする研究開発が活発に行われている^{9)~15)}。これにより、外板曲げ加工の完全自動化を達成し、生産ラインへの導入も行われている。更に、近年では、情報通信技術を活用し、製造中の外板をレーザスキャナで計測し、曲げ型を使わずに、形状を定量的に比較・評価するシステムの研究開発も取り組まれている^{16), 17), 18)}。

国外の曲げ加工に関する研究開発の動向も概ね事情は同じであるが、プレス加工については、多点プレス法を発展させた多点のローラーによるプレスで、非可展面まで成形する研究開発が取り組まれている¹⁹⁾。また、熱弾塑性解析によって、熱間加工を含む曲げ加工をシミュレーションする取り組みも見受けられる^{20), 21)}。これらの研究開発については、Das らが網羅的に文献をサーベイしている²²⁾。

以上より従来の造船曲げ加工に関連する研究開発の傾向としては、多点プレス法を含め、曲面外板の成形を弾塑性的アプローチで扱っているものがほとんどであると言える。一方、本論文では、幾何学的に取り扱うことで、非可展面の成形を面外曲げと面内伸縮に完全に分離し、面外曲げと面内伸縮の組み合わせで構成される造船曲げ加工において最短の加工手順となる最適化された成形プロセスを提案する。幾何学的な成形プロセスは人間の直観的な理解を得やすく、現場に受け入れられやすいことが期待される。加えて、弾塑性解析と比べ計算量が少なく、現在の造船所での現図 CAD によるものと同程度であり、システム導入の障壁は低い。更に、本論文で提案する手法は、既存設備（プレス機）の活用を前提にプレス加工を提案するものであるため、大規模な設備投資、設備運用を必要としない点に特色がある。

3. 曲率線展開システムと曲げ加工方案

本章では、4章以降で説明する本論文の提案手法の基となる曲率線及び曲率線展開法¹⁾についてその概要を説明する。

3.1 曲率線と曲率線展開法

曲率線とは、曲面上の極大曲率の方向（主方向1）と極小曲率の方向（主方向2）をそれぞれ連続して接続していった2組の曲面上曲線で、互いに直交する、曲面の曲がりか最も

際立った方向を走る曲線のことである。具体的には、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、主方向は次のように表現できる。

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

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

$$A = \{1 + (z_x)^2\}(z_{xy}) - (z_x)(z_y)(z_{xx}) \quad (3)$$

$$B = \{1 + (z_x)^2\}(z_{yy}) - \{1 + (z_y)^2\}(z_{xx}) \quad (4)$$

$$C = (z_x)(z_y)(z_{yy}) - \{1 + (z_y)^2\}(z_{xy}) \quad (5)$$

ここで、 z_x は偏微分 $\partial z / \partial x$ を、 z_y は $\partial z / \partial y$ を意味する。各主方向をルンゲ・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。Fig.1 は船舶のねじれ外板に曲率線を張ったものであるが、曲率線は曲面のねじれ方向を正確に表現しており、これによって板の形状や成形プロセスの概略を掴むことができる。

Fig.1 Lines of curvature on an actual curved shell plate.

曲率線展開法は、曲率線を展開基線とし幾何学的に曲面外板を平面に展開する手法である。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、平面にねじれなく展開できる(Fig.2)。

Fig.2 Geodesic development of a line of curvature.

曲面全体の展開形状（展開図）は、測地的展開した極大の主方向1の曲率線（以下、第1曲率線 CL1）を、測地的展開した極小の主方向2の曲率線（以下、第2曲率線 CL2）で、

直交関係を保ちながら接続することで得る(Fig.3)。

Fig.3 Arrangement of developed lines of curvature on a plate.

曲率線展開法では、曲面から平面に展開する際、曲りの除去量（曲率線を測地的展開する際の法曲率の除去量に相当）と伸ばし量（CL2の曲率線で接続する際に発生、Fig.3の δ に相当）を定量的に把握している。これらは展開の逆操作である曲げ加工において、それぞれ面外曲げ量と面内収縮量に相当し、曲げ加工に必要な幾何学的変形量を定量的に把握できる。

曲率線展開法に基づく曲げ加工法を整理すると(Fig.4)、まず、曲がりの大きい CL1 の曲率線の曲率を、それに直交する CL2 の曲率線に沿って曲げる。通常、これは効率的に面外曲げをつけることができる冷間加工で行う。次に、CL2 の曲率線の測地測度の調整のため、CL1 の曲率線に沿って熱絞りを行う。CL1 と CL2 は互いに直交関係にあるため、幾何学的には、CL2 に沿う面外曲げと CL1 に沿う面内収縮は互いに独立で、それぞれの変形は他方の変形に影響を与えない。しかし、実際の鋼板の曲げ加工において、鋼板は連続体で弾塑性的に挙動するため、CL2 に沿う面外曲げ（冷間加工で対応）と CL1 に沿う面内収縮（熱間加工で対応）の独立性が維持できるとは限らない。つまり、以下に示す加工の独立性を阻害する要因のため、特に複雑な形状の外板や入力（曲げ量、収縮量）の大きい加工にあたっては加工の独立性について十分な配慮が必要である。

- 冷間加工や熱間加工の影響が周囲に伝播し、周囲の変形に干渉してしまう。
- ガスバーナーによる熱間加工においては、面内収縮以外の変形要素が避けられない。具体的には、CL1 に沿う熱間加工によって、CL2 の測地測度の調整のみならず、CL1 の面外曲げにも影響を与える。
- 板内部における周囲からの拘束等により、幾何学的に想定する変形プロセスが鋼板でも実現可能とは限らない。
- 造船固有の曲げ加工方法の制約のため、完全に曲率線に沿った加工は不可能である。

Fig.4 Work process of sheet metal forming works along lines of curvature.

曲率線は曲面上の曲り成分の固有ベクトルに相当し、この固有ベクトル方向による加工で最適・最短の成形を得る。造船の曲げ加工に当てはめる場合、いわゆる横曲り、縦曲り、絞りを複合的に合わせることになる。著者らの現場観察によると、技能レベルの高い職人ほど、曲率線に近い加工線で加工を行っている。長い経験に基づき、自ら導き出した効率的な加工線として曲率線に漸近していったものと思料される。

3.2 曲率線展開法による曲げ加工

曲率線展開法に基づく曲げ加工の造船現場での運用について説明する。前節で説明した通り、曲率線展開法に基づく曲げ加工は、まず始めに、CL2の曲率線に沿って冷間加工を行い、次にCL1の曲率線に沿って熱間加工を行うことで構成される。

CL2の曲率線に沿う冷間加工は、条押しプレス機によるプレス加工を想定している。条押しプレス機とは、Fig.5に示すもので、直線状のオス型とメス型の間に鋼板を挿入し、油圧によってオス型を降下、鋼板をメス型との間に挟み込んで加圧し、鋼板に面外曲げをつけるものである。造船の曲げ加工において、条押しプレス機によるプレス加工は、熱間加工の前工程として、荒曲げ成形のために使用されることが一般的である。この場合の条押しプレス機は、通常、プレス型の歯長が1~3メートルで、プレス圧は最大1500トン程度のものが多く使われる。また、プレス型の断面形状は様々あり、目的の面外曲げ（プレス角）に応じて、適宜、プレス型の取り替えを行っている。プレス加工は、目安とするプレス線（職人が自身で求める、あるいは、CADシステムから目安の線が予めマーキンされている）に沿って、職人が曲り量を曲げ型（木型）で調整しつつ、行われる。

曲率線展開法による冷間加工は、条押しプレス機によるものを想定しつつ、そのプレス線をCL2の曲率線とする。これにより、曲面外板の局所ごとに最適化されたプレス方向に沿ってプレス加工が可能となり、後工程である熱間加工の最適化、リードタイム短縮を実現する。なお、曲率線展開法によるプレス線は外板の局所ごとの形状に応じて最適化されるため、必ずしも直線状で出力されず、「曲がったプレス線」が出力される。回転するローラー状のプレス型に外板を挿入し、転がしながら一気に一定の曲りをつけるローラーバンダーを設備している造船所も多いが、「曲がったプレス線」に

沿ってなるべく忠実に曲げる方針から、曲率線展開法に基づく曲げ加工ではローラーバンダーの利用は適しておらず、推奨していない。

Fig.5 Snapshot of a press machine in a shipyard.

次に、CL1の曲率線に沿う熱間加工は、通常の造船所で行われている線状加熱によって行う。曲率線展開法では、目的形状を得るために必要な幾何学的な絞り量を算出している。このため、線状加熱における加熱条件（ガス種、ガス流量、トーチ種、加熱速度、鋼板の種類、板厚）とそれに対応する絞り量の関係を示すデータベースを用意することで、目安となるガス加熱条件の指定が可能となる。

しかし、これまでの課題として、展開基線として使った曲率線がプレス加工及びガス加熱加工の目安線としては出力されるが、それらはあくまで目安に過ぎず、具体的な加工手順として、どこをどのように加工すればよいかまでは出力されていなかった。このため、本研究では、特にプレス加工に注目し、どのプレス型を使って、鋼板のどの箇所を、どの程度の荷重でプレスすればよいかの詳細な加工方案を出力する手法を開発した。

4. 曲率線に基づくプレス加工方案

曲率線展開法に基づく曲率線によって、プレス加工が最適化できるが、展開後に外板にマーキンする曲率線はその本数や曲率線同士の間隔に任意性があるため、プレスの加工指示としてあいまいさが残っていた。そこで、より詳細なプレス加工指示情報を提示するため、鋼板上の「どの箇所」を「どの程度の荷重」で加工すれば良いかを明確に示す加工指示線を考案した（4.1及び4.2）。また、プレス加工における完了判断のため、プレス仕上がり時の目標形状の算出法を考案した（4.3）。

4.1 プレス加工のモデル化に関する基本方針

曲率線展開法に基づくプレス加工とは、曲面上に張られたCL1の曲率線に対して、その主曲率から定められる角度を付与することと解釈する。つまり、ある n 番目の $CL1(n)$ に対

してその主曲率 Kn から定まるプレス角を付け、それを N 本すべての CL1 に対して繰り返すことで曲面全体を成形する。プレス作業を数式化すると次の通りである。ここで、 L は各 CL1 の実長を表す。

$$\sum_{n=1}^N \int_0^{L(CL1(n))} Kn(CL1(n)) ds \quad (6)$$

一方、曲率線展開法による曲げ加工においては条押しプレス機によるプレス加工を推奨している。これによって、既存設備を有効利用できることに加え、板の曲りに応じて局所ごとに最適なプレス（プレス角、プレスの方向）が可能となる。条押しプレス機によるプレス加工を定式化とは、ある量のプレス角 ΔP によって式(6) のプレス角を離散的につけることである。つまり、条押しプレス機でのプレス加工は、式(6) を以下のように離散化する。

$$\sum_{n=1}^N \sum_{CL1(n)} \Delta P \quad (7)$$

この式で表現している通り、本論文で提案するプレス加工のモデル化では、「一回ごとのプレスではそのプレス箇所以外に他に影響を与えない」、「一回ごとのプレスはそれぞれ独立しており、板全体の成形はそれらの足し合わせで構成される」と考えている。

このモデル化の妥当性（条押しプレス機による一回ごとのプレスは他の箇所へのプレスへ影響を与えず、独立なものとして扱える）に関して、1 回の条押しプレスによる平板の 3 次元弾塑性解析結果を Fig.7, Fig.8, Fig.9 に示す。これらの図は、条押しプレス機による鋼板へのプレス加工を Fig.6 のようにモデル化し、汎用コード ANSYS にて数値計算を実施した結果である。Fig.7, Fig.8 はプレス後に板に付与された相当塑性歪みを示している。図が示す通り、プレスによって塑性歪みはプレス歯の当たる箇所付近にのみ発生し、他に影響を与えていない。このケースの場合、プレス歯の横方向に関してプレス歯幅 W の 1 倍、縦方向に関してプレス歯長 L の 1.275 倍の外では塑性歪みは発生しない。Fig.9 はスプリングバック後の板の変形の曲率を表しているが、プレスによる変位についてもプレス型があたっている塑性歪発生箇所を中心に発生し、その周囲はプレス型の長手方向において歪発生箇所に引っ張られるように弾性的な変形が見られるが、横手方向にはほとんど変形がないことが伺える。実際の造船現場の観察からも、プレス同士はその横方向において互いのプレス箇所が重ならない程度に離してプレスする造船現場があるが、これは互いのプレスが干渉しないことを意識しているためと考えられる。また、長手方向についても、通常は長手方向に渡って連続してプレスを行う。これにより、結果的には長手方向についても単独のプレス変位の足し合わせで全体の変形を近似できる傾向を観察している。以上の観点より、式(7) の表現は条押しプレス機によるプレス加工の基本モデルとして妥当であるものと考えている。

Fig.6 Simulation model of single press work for a flat plate.

Fig.7 Distribution of equivalent plastic strain in the plate after single press work.

Fig.8 Distribution of equivalent plastic strain in the plate after single press work in section at $X=0$ and $Y=0$.
 (Upper: Section at $X=0$, Lower: Section at $Y=0$)

Fig.9 Distribution of curvature of deformation after single press work.

4.2 曲率線情報に基づくプレス加工指示線の出力

4.1 におけるプレス加工の基本方針に基づき，具体的なプレス加工指示線の出力アルゴリズムを提案する．ここで，プレス加工指示線とは，鋼板上の「どの箇所」を「どの程度の荷重」でプレスすれば良いかの情報である．

Fig.10 にプレス加工指示線の出力アルゴリズムのフロー図を示す．以降，本節における【】，() 内のローマ数字等は本フロー図内のものと一致している．

①プレス線の位置の決定【A部】

与えられた鋼板上の「どの箇所」をプレスすれば良いかは，式(7)における離散化された一つずつのプレス角 ΔP を付与する鋼板上の位置を定めることに相当する．始めに，プレス角 ΔP を指定し(I)，目標形状に対するそのプレス角の「等角度線」を求める．CL1 の曲率線に沿って法曲率 Kn を積分すれば，当該積分区間の曲線に沿った角度変化量 θ （積分区間の両端の点 P_0, P_1 がなす角度）は次式で算出できる．

$$\theta(s) = \int_{P_0}^{P_1} Kn ds \quad (8)$$

CL2 の曲率線の一つを選択し，その線を基準として各 CL1 に沿って (Fig.11 において，点 P_0 から点 P_s まで) 積分を実行し角度変化量 θ を算出する．角度変化量 θ が設定したプレス角 ΔP と一致した時，CL1 上に点を打つ (II)．「等角度線」は隣り合う CL1 上の点同士を滑らかにつなぐことで得られる (Fig.12) (III)．等角度線の間隔は一定角度を意味し，曲がりが大きい箇所ほどその間隔は密になる．

Fig.11 Calculation of angle change amount along a line of curvature.

Fig.12 Calculation of Iso-angle curve.

Fig.10 Flow chart for output of press work guidance lines.

等角度線は、プレス角 ΔP のピッチで引かれた曲線群である。この等角度線に沿ってプレス角 ΔP の通りにプレスすれば目的の形状が成形できる。一方、条押しプレスのプレス型は直線形状である。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 Fig.13(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ことにより、加工対象外板上のプレス加工指示線が算出できる (Fig.13(b))。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 (IV)。

Fig.13 Optimum arrangement of straight guidance line.

②プレス荷重の決定【B部】

プレス箇所を「どの程度の荷重」でプレスするかについては、設定のプレス角 ΔP に対応するプレス荷重を求めることに相当する。このプレス荷重とプレス角の対応は弾塑性解析にて求められる。Fig.14 は、ある材料特性の下、汎用コード ANSYS を用いて、所定のプレス荷重及びスプリングバック発生を考慮して求めたプレス角を示したものである。図の横軸はプレス荷重（プレス型の単位長さあたりの荷重）、縦軸はプレス角であり、板厚を変化させて計算した結果である。板厚が増大すると一定荷重に対するプレス角は小さくなる。また、比較的低い荷重に対してはプレス角が急激に変化し、荷重が高くなるにつれて徐々にプレス角の変化が頭打ちになる。プレス角の上限値は、いわゆる、プレスによる押切を表現しており、プレス型の曲り角度とほぼ等しい値になる。プレス角は、荷重の増加に伴い、その値に漸近していく。なお、本解析では板の変形は曲がりのみを考慮しており、荷重による板厚の減少（板のつぶれ）等の影響は小さいと考え、無視した。プレス型の形状、鋼板の板厚、降伏応力に対して弾塑性解析を行い、プレス荷重とプレス角の関係を得て、特定のプレス角に対応するプレス荷重を求める (VI)。以上により、鋼板上の「どの箇所」を「どの程度の荷重」でプレスすれば良いかの情報が得られる。

Fig.14 Relation between press load and press angle for several thickness obtained by simulation.

一方、プレス角 ΔP を先に決めるのではなく、プレス荷重を先に決め (VII)，そのプレス荷重に対応するプレス角 ΔP を決めることも可能である (VI)。造船で使われるプレス機は任意のプレス荷重を自在に指定できるものが少なく、予め設定できるプレス荷重は固定的に数パターンのみというものが多いためである。

(I) で指定するプレス角 ΔP あるいは (VII) で指定するプレス荷重については、施工上及び品質上の観点から、以下の点を考慮して決定する必要がある。

- Fig.14 が示す通り、弾性域を超えた直後の低いプレス荷重域において、プレス角は急激に上昇する。仮にこの付近のプレス角を設定すれば、わずかなプレス荷重の変動に対してプレス角は大きく変動するため、精密なプレス荷重の制御が必要になる。造船で使われるプレス機においては精密なプレス荷重制御が難しい場合が多いため、プレス荷重の変化に対してプレス角の変化が小さい領域でプレス角 ΔP を指定する。
- 大きなプレス角 ΔP を設定すれば、プレス線の本数は減少する反面、1 回当たりのプレス角が大きいため、滑らかなプレス形状が得られない。品質上の観点から、過度に大きなプレス角 ΔP の選定は避けるべきである。

プレス角の選定は、上述のプレス角の安定性及びプレス回数、プレス形状の品質面でトレードオフの関係となり、最終的には各社の施工方針に基づいて決定することになる。

4.3 プレス仕上がり時の目標形状の出力

プレス加工における完了判断への使用を想定し、プレス仕上がり時の目標形状を算出する方法を以下に述べる。

一般に造船曲げ加工の加工対象は、平板を単純に曲げるだけでは成形できない複雑な曲面形状を有する。複雑な形状とは、平板を曲げた上で、その一部を収縮または伸長させて成形する必要がある形状である。このような形状を、平面展開できない曲面という意味から、非可展面 (Non-developable Surface) と呼ぶ。対して、曲げのみで成形できる曲面を可展面 (Developable Surface) と呼ぶ。これらの概念を造船曲

げ加工と対応させると、プレス加工により鋼板に曲がりを与えて可展面を成形し、続いて線状加熱により収縮を与え非可展面を成形する作業であると表現できる。

プレス加工における仕上がり形状は、外板の最終的な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と比較する必要がある。この可展面は、最終目的形状（非可展面）の曲率線格子のうち、CL1 の接続に使った CL2 の法曲率成分 Kn を除去することで得られる。即ち、Fig.15 に示すように、CL2 の法曲率 Kn をゼロとし、CL1 の法曲率のみを残した可展面がプレス仕上がり時の目標形状となる。この方法により、実際の造船外板について、本研究で開発したシステムにより最終的な完成形状とその成形過程にあるプレス仕上がり時の目標形状を算出した結果を Fig.16 に示す。

Fig.15 Elimination of normal curvature for minimum line of curvature (CL2).

Fig.16 Target shape after press working and the final target shape after gas heating work.

5. 「プレス施工支援システム」の開発

5.1 「プレス施工支援システム」の概要

前章で述べたプレス加工指示線、プレス後の仕上がり形状の出力機能を実装したプログラム「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 CL1 および第 2 曲率線 CL2 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、プレス加工指示線と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 Fig.17 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。

Fig.17 User interface of the guidance system for press work in shipbuilding.

5.2 「プレス施工支援システム」によるプレス加工方案の出力

プレス加工支援システムは 4 章で説明したアルゴリズムに基づき、プレス加工指示線及びプレス仕上がり形状を出力する。プレス施工支援システムにおけるプレス加工方案の出力処理について説明する。

5.2.1 プレスデータベースの整備

4 章で説明した通り、プレス施工支援システムにおいて、設定プレス角を付与するために必要なプレス荷重は、予め計算したプレス荷重とプレス角の関係曲線から求める。鋼板に対するプレス角は、鋼板の材料特性、板厚、プレス型の断面形状、プレス荷重で決まるが、本プレス施工支援システムでは、様々な外板形状や板厚に対応できるように、特定のプレス型、特定の材料特性（ヤング率、ポアソン比、降伏応力、応力-歪特性）に対して、プレス荷重と板厚をパラメータとするプレス角のデータベースを整備している。Fig.18 が特定のプレス機に対する実際のデータベースの例で、X 軸に板厚、Y 軸にプレス荷重、Z 軸にプレス角を取っており、任意の板厚とプレス荷重を指定することでデータベースからプレス角を求めることが可能である。使用されるプレス機、プレス型及び主要な鋼板材料特性に対して、FE 解析あるいは曲げ実験によって、プレス荷重とプレス角の関係曲線を用意し、これをシステムに登録することで、プレス加工指示線を出力できる。

Fig.18 Contents of "Press Database".

5.2.2 その他の補助機能

プレス施工支援システムは、4章で説明したアルゴリズムに加えて、実際のプレス加工の実態を鑑み、追加の補助機能を備えている。主なものは以下の通りである。

①外板端部付近におけるプレス荷重の調整機能

条押しプレス機によるプレス加工では、外板の端部まで不足なくプレスするため、その端部においては、プレス型が外板からはみ出した状態でプレスされる。このような場合にも目的通りのプレス荷重を鋼板に付与するため、鋼板からはみ出した分の長さを差し引き、鋼板に実際乗っている分の長さに応じてプレス荷重の指示値を調整する機能をつけている。具体的には、プレスによる圧力が一定となる様に、鋼板に実際乗っている分の長さでプレス荷重を比例配分している。プレス型がはみ出した状態のプレスの場合、そのプレス荷重 $Load_{adj}$ は式(9)の通りである。式(9)において、プレス型が鋼板にすべて乗っている場合の正規のプレス荷重を $Load_{ori}$ 、プレス歯長の全長を $Length_{total}$ 、鋼板からはみ出した分のプレス歯の長さを $Length_{out}$ としている。

$$Load_{adj} = \frac{Length_{total} - Length_{out}}{Length_{total}} * Load_{ori} \quad (9)$$

②プレス幅の自動調整機能

それぞれのプレスの独立性を保つため、隣り合うプレス同士はプレス型の幅で重複しない程度に間隔を空けるべきであるが、一方で、過度に大きいプレス荷重及びプレス角を適用した間隔の広いプレス加工は、外板の品質の面から避けるべきである。このため、プレス施工支援システムでは、外板の形状に応じて隣り合うプレスの間隔並びに指定プレス荷重を自動的に調整する機能を設けている。具体的には、「プレス上限間隔」を設け、プレス線の間隔がこの設定値を超える場合は、指定プレス荷重を下げて「プレス上限間隔」の範囲内で隣り合うプレス線が配置されるように調整する。現状、「プレス上限間隔」はユーザが経験に基づいて入力することとしているが、将来的には、造船における曲面成形上の品質

の許容値を幾何的にモデル化し、「プレス上限間隔」を外板の形状に応じて定量的に算定する機能を付与する。

③熱間加工を考慮したプレス仕上がり形状の調整機能

プレス加工においては、次工程の熱間加工を考慮して、意図的に曲げ過ぎ、曲げ不足の状態を作る場合がある。具体的には、ガス加熱による CL1 の面外曲げの付きや戻りを考慮して、最終目的形状が皿形の外板については曲げ不足、鞍型の外板については曲げ過ぎの状態ではプレスを仕上げる。一方、4.2 のプレス加工指示線及び 4.3 で説明したプレス仕上がり形状は、式(6)に示す通り、最終形状のプレス角 (CL1 の法曲率成分) の通りに仕上げることを想定している。熱間加工を考慮して意図的に曲げ過ぎ、曲げ不足のプレス仕上がり形状とするため、プレス施工支援システムでは「曲り量係数」を用意し、この係数にてプレスにおける仕上がり形状を調整できるようにした。具体的には、曲り量係数 c とした場合、プレス加工指示線及びプレス仕上がり形状は、式(6)に代わり、式(10)をプレス仕上がり形状としてそれぞれ出力される。なお、現状は、「曲り量係数」について、ユーザが経験に基づいて任意で指定することとしており、形式知化が完成していない。熱間加工における CL1 の面外曲げへの影響は鋼板の熱弾塑性応答によるもので幾何学的なものではないため、熱間加工の CL1 の面外曲げへの影響量、即ち「曲り量係数」を定量的に設定するためには熱弾塑性解析等の援用が必要である。

$$\sum_{n=1}^N \int_0^{L(CL1(n))} c \cdot Kn(CL1(n)) ds \quad (10)$$

以上の通り、プレス施工支援システムは、実際の造船現場における外板曲げ加工手順の経験を考慮して構成されている。実際の造船外板に対して、プレス施工支援システムが出力するプレス加工指示線の例を Fig.19 に示す。外板形状、材料特性、板厚、プレス型を入力とし、それに諸計算パラメータ (曲り量調整、プレス上限間隔等) を設定すれば、その外板に適用すべきプレス加工指示線及びプレス荷重が出力される。なお、Fig.19 に示した外板は、Fig.16 にプレス仕上がり形状を示したものと同一である。

Fig.19 Work guidance lines for press work.

6. 提案手法の妥当性についての考察

6.1 造船用プレスシミュレータ

本章では、プレス施工支援システムが出力するプレス加工指示線の妥当性を、弾塑性解析による数値シミュレーションを用いて検証する。本節では、この検証に用いた数値シミュレータについてその概略を説明する。

シミュレーションは、株式会社先端力学シミュレーション研究所が開発した汎用 3 次元プレス成形シミュレーションソフトウェア ASU/P-form をベースに、造船の条押しプレスを想定して、指定のプレス箇所を指定のプレス圧にて繰り返しプレス（プレスの多工程解析）する機能を追加したもので行った。造船プレス用に機能追加した ASU/P-form による造船プレスのシミュレーションの例を Fig.20 に示す。

Fig.20 Image of press simulation.

条押しプレス型（オス型，メス型）を 3 次元でモデル化し、それぞれの型を上下に移動させて時々刻々の鋼板の変形をシミュレーションする。なお、ASU/P-form において弾塑性解析を静的陽解法によって解くが、プレス型が下死点を過ぎて鋼板から離型する際は、鋼板のスプリングバックも考慮される。なお、造船のプレスでは、板の変形は面外曲がり为主成分であり、板厚の減少（板のつぶれ）や板の伸縮の影響は小さいと考え、シェル要素を採用した。なお、重力による鋼板の自重たわみについて、現状では考慮していない。

6.2 単純な円柱形状におけるシミュレーション実験

単純な形状に対して、前述のソフトウェアを用いたシミュレーションを行い、プレス加工指示線の妥当性を検証した。

中心半径 3750mm 及び中心角 30.55 度の円形の一部の断面を持つ、長さ 9000mm、板幅 2000mm の外板モデル (Fig.21) をプレス仕上がり形状の対象として検証を行った。鋼板の板厚は 14mm、材料特性は Table 1 に示す通りであり、プレス荷重を 150ton とした場合、プレス加工指示線は Fig.22 のようになる。今回のシミュレーション実験においては、プレス荷重とプレス角の関係曲線は、ASU/P-form による単純平板のプレスシミュレーションにより整備したものを利用した。

レス荷重 150ton に対してプレス角 6.11 度の関係が予め得られたので、これを基にプレス加工指示線は求められた。

Fig.21 Cylindrical shape as a target shape of press work.

Table 1 Material properties used in simulation.

Young's modulus [GPa]	205.8
Poisson's ratio [-]	0.3
Yield stress [MPa]	380
Density [g/cm ³]	7.86

P 1 L150	P 6 L150	P 11 L150
P 2 L150	P 7 L150	P 12 L150
P 3 L150	P 8 L150	P 13 L150
P 4 L150	P 9 L150	P 14 L150
P 5 L150	P 10 L150	P 15 L150

Fig.22 Work guidance lines for press work for cylindrical shape.

Fig.23 に、プレス加工指示線及び荷重により全 15 回のプレスを実施した場合の ASU/P-form によるシミュレーション結果（灰色で表示）と目的形状（黒い実線で表示）を重ね合わせたものを示す。Fig.24 には中央部（Mid-section）での両者の断面形状を示す。シミュレーション結果はやや曲り不足の結果となっているが、現場加工における実用上の観点からは想定範囲内と言える。また、Fig.25 は全プレス終了後に板に付与された相当塑性歪み分布を示したものであるが、プレスによって塑性歪みが付与されるものの、歪みはプレス型が当たった箇所付近のみに付与されており、個々のプレスが他のプレスに影響を与えていないことが分かる。これらの結果から、本論文で提案するプレス加工指示線の基本方針や出力アルゴリズムの妥当性が示された。

Fig.23 Comparison between target shape and the shape after press work by simulation.

Fig.24 Comparison between target shape (solid line) and the shape (dash line) after press work in Mid-section.

Fig.25 Distribution of equivalent plastic strain in the plate after press work.

6.3 実際の造船外板におけるシミュレーション実験

次に、実際の造船外板に対してシミュレーション実験を行い、プレス加工指示線の妥当性を検証した。対象とする外板は長さ約 5m、幅約 3.3m、板厚 17.5mm であり、材料特性が Table 2 に示す通りである。この外板について、4.3 で説明したプレス仕上がり形状（曲り量係数：1.0）をプレス後の目標形状として、シミュレーション実験を行った。プレス施工支援システムが出力したプレス加工指示線を Fig.26 に示す。このプレス加工指示線は、想定したプレス荷重を 200ton、その対応プレス角を 2.8 度として出力したものである。プレス角とプレス荷重の関係曲線については、6.2 と同様、ASU/P-form により単純平板のプレスシミュレーション結果から求めた

ものを用いた。

Table 2 Material properties used in simulation.

Young's modulus [GPa]	205.9
Poisson's ratio [-]	0.3
Yield stress [MPa]	320
Density [g/cm ³]	7.86

Fig.26 Work guidance lines for press work for actual sheet metal plate in shipbuilding.

対象外板のプレス仕上がり形状とシミュレーション結果の比較を Fig.27, Fig.28 に示す。プレス加工指示線に基づくプレスによって、目標形状に近い形を得られた。外板の船尾側はほぼ一致したが、船首側で 30mm 程度の曲り過ぎが発生した。船首側の曲り過ぎについては、今回のシミュレーションにおいて、ソフトウェアの都合上、外板からはみ出すプレス線についてプレス荷重の調整を行わなかったため発生したものと考えられる。一方で、対象外板の曲げ加工において 30mm 程度の誤差は実用上の観点からは想定範囲であり、実際の外板において、プレス加工指示線は有効であると評価できる。

Fig.27 Comparison between target shape (solid line) and the shape (dash line) after press work by simulation.

Fig.28 Comparison between target shape (solid line) and the shape (dash line) after press work for each section.

6.4 提案手法の現場展開に関する考察

前節までで、単純形状外板モデル及び実際の造船外板モデルを用いたシミュレーションにより、特定の荷重におけるプレス加工指示線とプレス仕上がり形状を出力し、数値シミュレーション上でその妥当性を確認した。

本提案手法及びプレス施工支援システムは実際の造船現場の生産ラインで運用されているが、実際の造船現場への展開にあたって、数値シミュレーションでは表面化されない課題を抽出した。この課題とは、本手法のアルゴリズムの前提となっている「独立的なプレスの足し合わせによって外板全体としての曲面を成形する」に関し、その要素である 1 回のプレスが、実際の現場では必ずしも想定通りに曲げられないというものである。このため、本来はプレス加工指示線に従ったプレス加工のみで完了するはずであるが、一部で曲げ過ぎや曲げ不足が発生し、職人判断による追加のプレス加工が発生している（ただし、曲率線に沿ったプレス加工によって外板のねじれや縦曲りは正確についている。ここで言う曲げ不足あるいは曲げ過ぎとは横曲りに対する微調整のことである）。この想定通りに曲げられないという課題は以下の要因で発生しているものと考察する。

- ・ 現場のプレス加工の運用、プレス機の問題：本研究で提

案するプレス加工指示線においては、各プレス線に対してプレス荷重を指示する、プレス荷重制御型のプレス加工を想定している。一方、多くの造船所においては、荷重を制御した加工は行われておらず、職人が目視により変位を確認しながらプレス加工を行う、変位制御的なプレス加工が行われている。このような背景があるためか、特に経年劣化したプレス機では、プレス機が指定した荷重を正確に再現しない場合がある。

- ・ 鋼板の材料特性のばらつき：プレス加工対象の鋼板が必ずしも設計仕様通りになっているとは限らず、一般に鋼板は発注した仕様よりも安全側に製鋼される傾向がある。これによって、プレス角とプレス荷重の関係について実際の対応曲線が得られず、プレス角に誤差が生じる原因となっている。
- ・ 幾何学的理論と現実の違い：本手法においては、各プレス線における加工は、互いに独立であり干渉しないことを前提としているが、実際には 3.1 にて整理した加工の独立性を阻害する要因が顕在化する場合がある。具体的には、プレス線同士の干渉、板内部拘束等による場所（板中央部、板端部等）による曲り量の変化、曲がったプレス線による影響が顕在化する場合であり、特に外板形状及びそのプレス加工が複雑になるほど、幾何的に求めたプレス加工指示線及び荷重は、弾塑性的に変形する実際の外板に与える結果と差を生じる。

これらの課題を最小化するため、本研究により提案する手法を現場に展開するにあたって、注意すべき事項を次のとおり整理した。

- ・ プレス荷重を精度よく制御できるプレス機を用いること。
- ・ 鋼板の材料特性を正しく把握した上で、適用すること。
- ・ 加工の独立性を維持するため、プレスはなるべく曲率線に沿って押すべきである。プレス加工が曲線の場合には、必要に応じて条押しプレス機のプレス型歯長を短くするなど、より精密にプレスするように工夫する。
- ・ 外板曲げ加工の弾塑性による影響を考慮する。具体的には、外板の形状や曲率線に対して、弾塑性の影響をパターン化し、それを「曲り量係数」の設定に反映する。

7. 結言

造船における曲げ加工の高度化のため、特にプレス加工に注目し、曲面幾何理論に基づく詳細なプレス加工方案を考案し、プレス加工指示線及び目標形状を出力するシステムを開発した。本システムで得られる、特定の荷重に対するプレス加工指示線とプレス仕上がり形状については、複数の対象外板を用いたプレス加工シミュレーションにより、その妥当性を確認した。

本研究で得られた重要な知見は以下の通りである。

- ・ 造船のプレス加工は曲率線に沿って施工可能である。
- ・ プレス加工は条押しプレス機による単独のプレスの重ね合わせでモデル化できる。しかし、板の形状が複雑な場合はその原理が適用できないこともある。
- ・ 本提案手法によるプレス施工指示を着実に実行するには、プレス機の改良や鋼板の材料特性の把握・反映等、精密なプレス加工が必要となってくる。

今後は、本研究開発の最終的な目標達成（造船現場でのプレス加工のリードタイム短縮、現場判断の不要なプレス加工体制の確立）に向かって、引き続き、6.4 で述べた課題解消に取り組んでいく。これによって、曲げ加工の最適化、標準化、技能者育成の問題に貢献できればと期待している。

謝 辞

本研究の実施に際し、住友重機械マリンエンジニアリング(株)の中垣憲人氏、菅原晃佳氏、阿折幸康氏より多くの有益な助言をいただいた。ここに記し謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 松尾, 松岡 : 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, 日本機工学会論文集 C 編, 76 巻 771 号, pp.2797-2802, 2010.
- 2) K.Matsuo, S.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.
- 3) 北野広雄 : 鋼板曲げ加工用万能調整式プレス機械の研究, 京都大学学位論文, 1961 年.
- 4) 西岡他 : ユニバーサル多点プレス法による船体外板曲げ作業の自動化に関する研究 (第 1 報:基礎的研究), 日本造船学会論文集第 132 号, pp.481-501, 1972.
- 5) 西岡他 : ユニバーサル多点プレス法による船体外板曲げ作業の自動化に関する研究 (第 2 報:実用化研究), 日本造船学会論文集第 133 号, pp.291-305, 1973.
- 6) 野本, 大塚, 横山 : 多点プレスによる船体外板の曲げ加工に関する基礎的研究, 日本造船学会論文集第 170 号 pp.587-598, 1991.
- 7) 野本, 大塚, 岡村, 横山 : 多点プレス法による船体外板の曲げ加工に関する実験的研究, 日本造船学会論文集第 174 号 pp.635-650, 1993.
- 8) 岩崎安宏他 : 三条プレスの開発, 三菱重工技報, pp.946-954, 1976.
- 9) 野本, 大森, 須藤, 榎沢, 青木, 斎藤 : 線状加熱による板曲げ加工用シミュレータの開発, 日本造船学会論文集, 第 168 号, pp.527-535, 1990.
- 10) 上田, 村川, Rashwan, 奥本, 神近 : 計算機支援曲げ方案自動作成システムの開発 (第 1 報) 成形形状と固有ひずみの関係, 日本造船学会論文集第 170 号, pp.577-586, 1991.
- 11) 上田, 村川, Rashwan, 奥本, 神近 : 計算機支援曲げ方案自動作成システムの開発 (第 2 報), 日本造船学会論文集第 171 号, pp.405-415, 1992.
- 12) 上田, 村川, Rashwan, 根木, 神近, 小川 : 計算機支援曲げ方案自動作成システムの開発 (第 3 報) 加熱条件と固有変形, 日本造船学会論文集第 173 号, pp.409-419, 1993.
- 13) 上田, 村川, Rashwan, 神近, 石山, 小川 : 計算機支援曲げ方案自動作成システムの開発 (第 4 報) 加熱位置, 方向, 加熱条件の決定法, 日本造船学会論文集第 174 号, pp.683-695, 1993.
- 14) 石山, 神近, 小川, 根木, 矢垣, 神田, 椎野, 高倉 : 線状加熱曲げ加工法の自動化, 石川島播磨技報, Vol.34, No.2, pp.120-125, 1994.
- 15) 石山, 丹後, 中村 : FEM を応用した線状加熱自動化の実用化研究, 日本造船学会論文集, 第 183 号, pp.335-342, 1998.
- 16) 稗方, 大和, 笈田, 榎本, 古川 : レーザースキャナを用いた曲がり外板の精度評価システムの開発, 日本船舶海洋工学会論文集第 13 号, pp.231-236, 2011.
- 17) 中垣, 菅原, 稗方, 大和, ソン : レーザースキャナによる曲がり外板の工作精度評価システムの研究開発 (第 2 報), 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.17, pp.169-176, 2013.
- 18) 松尾 : 造船曲げ加工への AR (Augmented Reality) 技術の適用について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集第 15 号, 2012.
- 19) Shim, D.-S., Yang, D.-Y., Kim, K.-H., Chung, S.W., Han, M.S. : Practical design equations for cold roll forming of doubly curved hull plates using line array roll set, Journal of Ship Production, 26 (3), pp.177-186, 2010.
- 20) JG Shin, YG Kim, JH Nam : An integrated approach to determine optimal process information of large-scale line-heating process with deformation simulation, Journal of Ship Production, 20 (4), pp.211-220, 2004.
- 21) Zhou, Han, Tan and Liu: Study on Plate Forming Using the Line Heating Process of Multiple-torch, Journal of Ship Production and Design, Vol.30, No.3, pp.142-151, 2014.
- 22) Das, B., Biswas, P. : A review of plate forming by line heating, Journal of Ship Production and Design, 34 (2), pp.155-167, 2018.