

# 工具の数理モデル化による自由曲面成形における 職人的技能の解明

独立行政法人 海上技術安全研究所 構造基盤技術系 基盤技術研究グループ

研究員 藤本修平

(平成 24 年度奨励研究助成 AF-2012027)

キーワード：プレス，自由曲面加工，最適化

最適化アルゴリズムを組み合わせ、造船プレスのモデル化ならびに最適プレス工程の算出法を検討した。

## 1. 研究の目的と背景

船舶の船体は滑らかな自由曲面で構成される(図 1)。こうした自由曲面の形状は船舶航行時の流体抵抗を減少させることを主眼として決定されるため、一般の工業製品とは違い、形状設計時に「加工のしやすさ」等の生産性はほとんど考慮されない。また、船体形状は基本的に船ごとに異なるため、加工する曲面形状も毎回異なる「一品物」である。このような事情のため、船体外板の加工は熟練した職人の技能に依った部分が多い。現在、熟練した職人が退職等により減少し続けており、経験の浅い作業員への技能伝承が課題となっている。こうした問題の解決を目指し、本研究ではプレス加工をモデル化し自由曲面成形工程の手順を明瞭に決定する方法の開発を目的とした。

船体の自由曲面外板を形成する作業を「ぎょう鉄(撓鉄)」と呼ぶ。ぎょう鉄は造船特有の職人技能の一つであり、特に高度な技量が必要とされる作業である。一般に、ぎょう鉄はプレス機やローラーベンダなどによる冷間曲げ(粗曲げ：大まかな形状をつくる工程)とガスバーナなどによる熱曲げ(仕上げ：形状を仕上げる工程)を組み合わせで行われる。熱曲げとは、ガス炎等による局所的な加熱により板材に収縮を発生させ面外方向の変形を引き起こす加工法である。この熱曲げは冷間曲げに比べてより高い技能が要求され、かつ工数を要するため、ぎょう鉄の効率を改善するには冷間曲げの割合を可能な限り増大させることが肝要である。こうした考えに基づき、著者らのグループではぎょう鉄の効率改善を目的とし、曲面の微分幾何学を基礎とした外板展開法(加工目的の形状を)「曲率線展開法」の開発やそのシステム化を実施したり<sup>1)2)</sup>。また、プレス施工(冷間曲げ)の効率を最大限向上させるため、より実践的な取り組みとして曲率線展開システムの現場適用性を高めた「プレス施工支援システム」の開発<sup>3)</sup>を行ってきた。

しかし、「プレス施工支援システム」にはプレスする箇所決定等に関して複数のパラメータが設定されており、それらの値は必ずしも明確な根拠を持たない。このような任意性は、プレス機条件(金型形状、加圧能力等)が一定である場合には適切なパラメータを設定すれば問題を生じさせない。一方で、プレス機条件の変更(新型プレス機の開発等)を含め「造船プレス作業の最適化」を考える際には出来るだけ任意性を排除したプレスのモデル化が望ましい。そこで、本研究ではプレスの最適化を考える基礎として、弾塑性有限要素解析と曲面幾何学的考察および



図 1 船体の自由曲面外板

## 2. モデル化の方法

### 2.1 曲面上の曲率分布

本研究の基礎となる曲面幾何学量について概説する。一般に曲面上の各点において、最も曲りの大きい方向と最も曲りの小さい方向が存在する。例えば、峠越えの道路は斜面に対してジグザグに交わるような「つづら折れ」になっている。斜面方向が最大曲り方向、道路方向が最小曲り方向であり、つづら折れで斜面を登ることにより走行距離は長くなるものの勾配の小さい経路を進むことが出来る。

このような最大曲り方向、最小曲り方向の曲率(曲率半径の逆数)をとるとともに主曲率と呼び、それぞれを最大主曲率、最小主曲率と呼ぶ<sup>4)</sup>。また、曲面上のある点から最大主曲率、最小主曲率の各方向につないだ曲線をそれぞれ最大主曲率線、最小主曲率線と呼び、これらは直交する。

図 2 に曲面上の最大主曲率線(赤実線)、最小主曲率線(青点線)のイメージを示す。最小主曲率がゼロ(曲りがない)場合、曲面は「可展面」と呼び、平面から面内の伸縮無しで成形できる。一方で最小主曲率がゼロでない場合の曲面を「非可展面」と呼び、その成形には面内の伸縮が必要となる。本研究の対象であるプレス加工は、完成目標の曲面形状のうち、可展面の部分を成形するものである。

図 3 に可展面(円筒形)、非可展面(鞍型)それぞれの曲面上での最大主曲率、最小主曲率、Gauss 曲率(最大主曲率×最小主曲率で定義され、非可展面において非ゼロの値をとる。非可展面か否かの指標となる)の分布を示す。平板からプレス加工により円筒形に加工し(図 3 の「円筒

形」における「最大主曲率」分布を形成し），次いで局所ガス加熱により「最小主曲率」分布を与えて鞍型を成形するのが最も効率的なぎょう鉄作業である。

以下では，加工目標形状とする曲面の最大主曲率分布をプレス曲げによってより良く表現できる方法を最適プレス工程と考える。

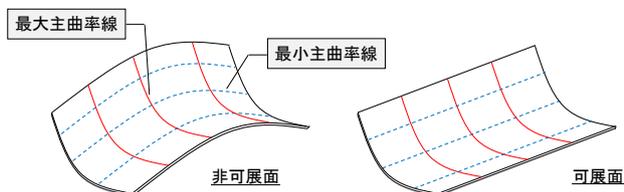


図2 曲面上の曲率

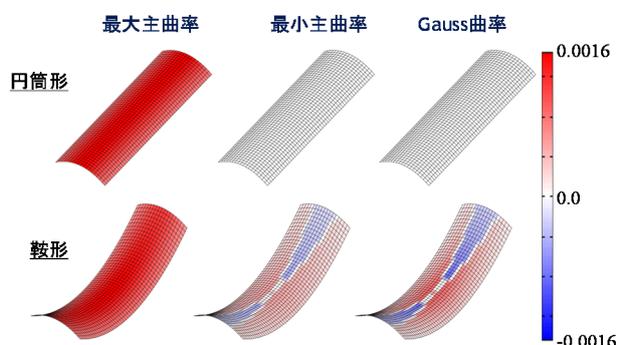


図3 各種の曲率分布

## 2.2 プレス加工の有限要素解析

まず有限要素解析によりプレスが加工材に与える変形影響を求める。本研究では解析ソフトに「ASU/P-form」(先端力学シミュレーション研究所(株)製)を使用し，3次元の弾塑性有限要素解析を実施した(図4)。本シミュレーションでは，上下の金型で加工材をはさみ所定の荷重まで加圧した後に除荷し，最終的に加工材に残る(スプリングバックの影響がない)塑性変形を評価する。

また，解析には図5に示すような，長手方向の各断面において一定の曲率を持つ上型・下型から構成される金型を使用した。これは造船所で一般に使用されるプレス(「条押しプレス」等と称される)を模擬している。パラメータは上型の曲率  $R_1$ ，下型の曲率  $R_2$ ，金型の長さ  $L$  および金型の幅  $W$  である。

一般の金型による塑性加工と違い，造船プレスではこのような単純形状の型を用いて一枚の平板を複数回(板によってはプレス位置を変えて数十回以上)プレスすることにより自由曲面を形成する。プレスする箇所やプレスの回数は現場の職人の判断(経験，勘)によって決定され，明確なプレス作業指示方案が無いのが通常である。

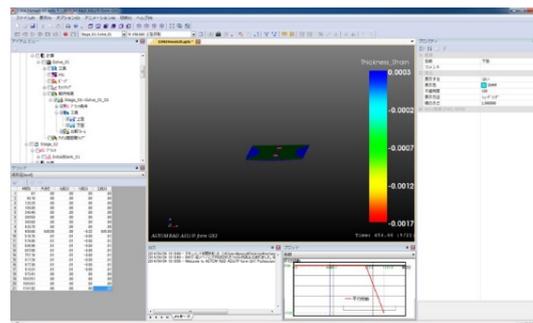


図4 ASU/P-form によるFE解析

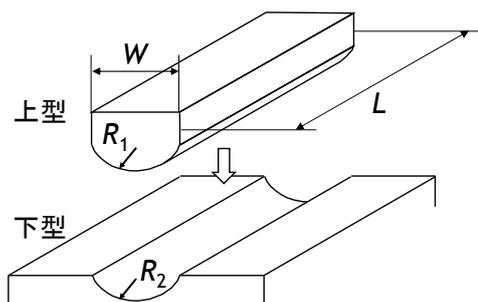


図5 プレス金型の形状

## 2.3 FE解析結果の曲率分布解析

前項で記述した有限要素解析の結果から，プレス後の板材形状の曲率分布を算出する。FE解析の出力結果である3次元形状(FE節点の  $x, y, z$  座標値)から主曲率の分布を求めた。岡庭・前川の方法<sup>5)</sup>を用い各節点において，その近傍の節点座標値から最大主曲率  $\kappa_{\max}$  および最小主曲率  $\kappa_{\min}$  を算出した。

岡庭・前川の方法は三角形メッシュに適用できる方法であるが今回の有限要素解析は四辺形メッシュで実施したため，四辺形を対角線で分割して三角形メッシュ $\times 2$ とみなした上で当該手法を用いた。なお，前掲の図3の各種曲率分布は本手法によって算出した結果である。

## 2.4 プレス加工のモデル化

本研究では，プレスを「プレスした箇所において一定の曲率変化を与えるもの」としてモデル化する。まずFE解析により平板をプレスで一回押しした際に形成される形状を計算し，その最大主曲率  $\kappa_{\max}$  の分布を算出する。付加する荷重，金型の幅，長さ，曲率等の条件や加工対象の物性値，板厚の条件により  $\kappa_{\max}$  の分布は種々変化する。

つぎにプレスの一押しによって与えられた  $\kappa_{\max}$  分布を抽出し，プレスのモデル(変形要素)とする(図6)。この変形要素を平板の色々な位置に配置することで曲面形状を作る。つまり，変形要素を重ね合わせて加工の目標形状に近くなるような主曲率分布を形成する。重ね合わせの際には，すでにプレスされ  $\kappa_{\max}^{\text{old}}$  の曲率がついている箇所を再度  $\kappa_{\max}^{\text{new}}$  の曲率でプレスする場合(重ね合わせの場合)に形成される曲率  $\kappa_{\max}^{\text{result}}$  を，

$$\kappa_{\max}^{\text{result}} = \text{MAX}(\kappa_{\max}^{\text{old}}, \kappa_{\max}^{\text{new}})$$

とモデル化する．式中の  $MAX$  関数： $MAX(A, B)$ は， $A$  と  $B$  を比較し大きい方の数値を返す関数である．

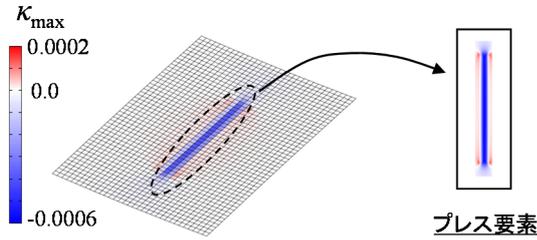


図 6 プレスのモデル化

### 2.5 プレス加工の最適化

前項に記述した「プレス変形要素」を，加工対象板のどの位置に配すれば目標形状に最も近くなるかを考える．つまり，完成形状の最大主曲率  $\kappa_{max}$  の分布と，ある箇所にプレス要素を配置した場合の  $\kappa_{max}$  の分布との差を目的関数とし，それを最小とする配置が最適なプレス位置である．最適化の変数は加工対象板上での位置  $(x, y)$  と角度  $\theta$  の 3 種である (図 7)． $n$  回のプレスを行う場合，変数は  $3n$  個となる  $(x_1, y_1, \theta_1, x_2, y_2, \theta_2, \dots, x_n, y_n, \theta_n)$ ．本研究では最適化手法としてモンテカルロ法を採用した．各変数の値をランダムに変化させて目的関数を最小とする変数の組み合わせを最適値とする．

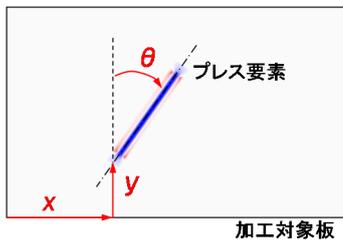


図 7 プレス最適化の変数

## 3. 研究結果

### 3.1 FE 解析の結果と主曲率分布

ASU/P-form を用いて，表 1 の条件で有限要素解析を実施した．各条件は実際の造船プレス現場での実スケールに近い値である．

表 1 FE 解析の計算条件

金型の曲率半径	1500 [mm]
金型の長さ	3000 [mm]
金型の幅	300 [mm]
加工材寸法	6000 [mm] × 4000 [mm]
加工材の板厚	24 [mm]
加工材の材質	熱間圧延軟鋼
加工材のヤング率	203 [GPa]
加工材のポアソン比	0.28
プレス荷重	605 [tonf]

図 8 に FE 結果形状の各種曲率分布算出結果を示す．加工対象材の中央部を一回プレスした結果である．図中左上が最大主曲率  $\kappa_{max}$  の分布であり，プレスした箇所には大きな曲率 (濃い青色部分) が与えられていることが判る．なお，プレスで押した方向への曲りを負としている．負の曲率を青色で，正の曲率を赤色で表現している．プレス型の端部には赤色の領域が現れており，実際の造船プレス工程で言われる「プレス端部に凹凸が生じやすい」という事実を反映しているものと考えられる． $\kappa_{max}$  に直交する方向の最小主曲率  $\kappa_{min}$  が全領域でゼロであるため Gauss 曲率もゼロとなる．つまり，本解析条件においてはプレス押しによる加工材の伸縮は発生していないことが判る．

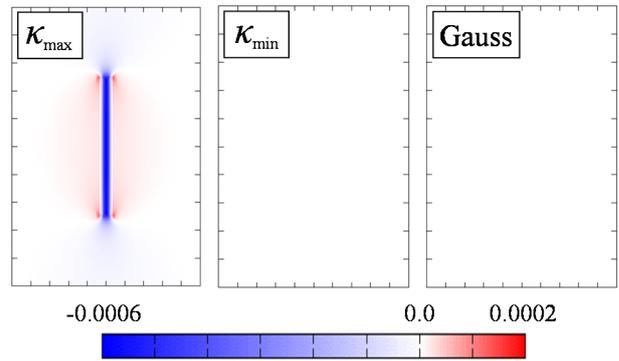


図 8 曲率分布の算出結果

### 3.2 プレス加工最適化の算出例

算出した  $\kappa_{max}$  分布の一部を抽出し，プレスの一押しが加工材に与えるプレス変形要素とする．ここでは図 8 の  $\kappa_{max}$  において  $-0.0006 \leq \kappa_{max} \leq -0.0002$  の領域を要素として取り出した．図 9 に簡易的な解析の例を示す．図の左端が目標形状の曲率分布であり，図の上方から下方に向かって曲率が增大していく ( $-0.0003 \rightarrow -0.0012$ )．この曲率分布を最大値が  $-0.0006$  の変形要素で近似する．前記 2.5 節の方法により最適配置を算出した．一個の変形要素を使用する (プレス押しを一回行う) 場合は図中の「 $N = 1$ 」の様な配置が，二個の変形要素 (プレス押しを二回行う) の場合は「 $N = 2$ 」の様な配置が最適と算出された．こうしたプレスのモデル化により，従来よりも厳密な手段でのプレス最適化が期待できる．

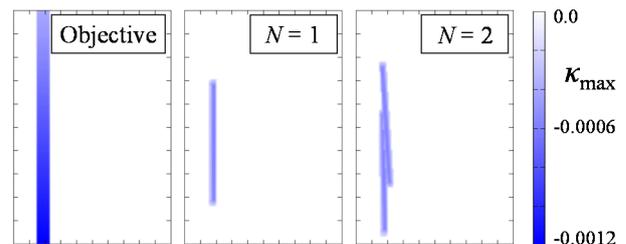


図 9 プレス最適化の例

### 3.3 プレス加工実験

前項までに記述したプレス加工手順算出法を用いて、実際にプレス加工実験を実施した。

ステンレス鋼(SUS304)の板材(幅 300mm × 長さ 200mm × 板厚 12mm)を、島津万能試験機(島津製作所製 UH-I 500kN)に設置した金型で6ヶ所をプレスした。図10に実験時の様子を示す。プレス金型の寸法は、図5の記号を用いて表すと、 $W = 44\text{mm}$ ,  $L = 100\text{mm}$ ,  $R_1 = 22\text{mm}$ ,  $R_2 = 150\text{mm}$ である。

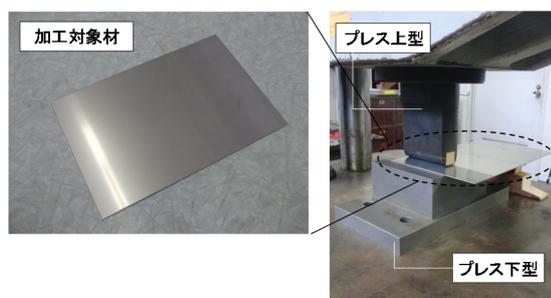


図10 プレス加工実験

プレス後、板材の形状を3次元スキャナ(ハードウェア: Microsoft製 Kinect for Windows, ソフトウェア: Artec Group製 Artec Studio 9.0)で計測し目的形状と比較した。比較結果を図11に示す。図では計測結果(プレス結果形状)および目的形状を点群データとして表し比較している。二つの形状は、おおよそ一致した。

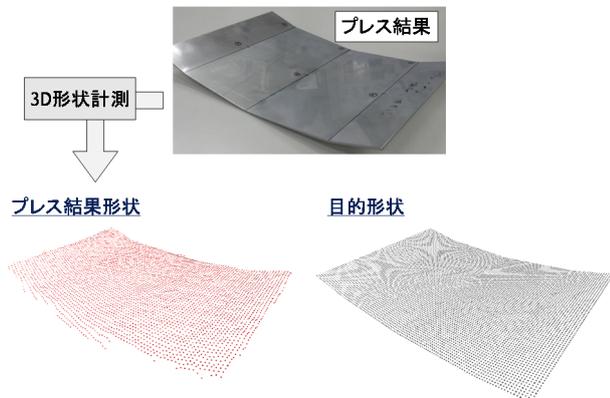


図11 プレス実験結果の比較

以上の例は、比較的簡易な形状についての結果である。より複雑な一般の曲面形状への適用のためには、本手法を改良する必要がある。改善すべき点は、(1) 入力できる目的形状の拡充(輪郭が矩形でない形状への適用等)、(2) プレス最適配置の算出アルゴリズムの改良である。

### 4. 結論

造船プレス作業の職人的技能の解明によるプレス施工最適化を目指し、プレスのモデル化を検討した。検討手法では三次元弾塑性有限要素解析により算出したプレス後の加工材形状の最大主曲率分布を求め、プレスによる加工材の変形影響を抽出する。プレスのモデル化により、従来よりも厳密な手段でのプレス最適化が期待できる。

今後はより実際的な曲面形状への適用が可能となるよう、手法の改良を実施する。

### 謝辞

本研究は公益財団法人 天田財団の平成24年度奨励研究助成(AF-2012027)を受けて実施した。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, 日本機械学会論文集C編, 76巻 771号, 2010, pp.2797-2802.
- 2) 奥本他: 造船工作法(船舶海洋工学シリーズ⑨), 成山堂書店, 2012, p.34.
- 3) 藤本, 松尾, 島田: 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論文集(CD-ROM), Vol.14, 2012.
- 4) 伊藤光弘: 曲面の幾何学, 遊星社, 2013, pp.35-36.
- 5) 岡庭, 前川: 三角形メッシュの主曲率と主曲率方向の計算方法, 日本機械学会 設計工学・システム部門講演会講演論文集, Vol.20, 2010, pp.3307\_1-3307\_5.