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

正員 野 本 敏 治* 正員 大 塚 守 三*
岡 村 俊 哉** 横 山 保*

Experimental Studies on the Bending Work Using
Multiple-Piston-Pressing Method for Outside Plate of Ship

by Toshiharu Nomoto, *Member* Morizou Ohtsuka, *Member*
Toshiya Okamura Tamotsu Yokoyama

Summary

In the previous paper, an analytical method was proposed as a fundamental study on the bending work by using multiple piston pressing method for outside plate of ship in which elasto-plastic large deflection analysis was used.

In this report, the relation between experimental phenomena and numerical results are discussed. At first, a prototype machine is made for multiple piston pressing method. And then, a lot of experiments are conducted in order to make clear the phenomenon of out-of-bending operation by using multiple piston pressing. It is clearly made in some cases that experimental data can easily be estimated by using the calculated results based on the previously proposed analytical method.

1. はじめに

造船業はシステム化へ向けて益々その歩を進めている。我が国の造船業では、従来からコンピュータを駆使したシステム化を進めてきたが長い間、設計や生産の各々の立場で個別的にシステム化を進めていた状態が続いてきた。

然るに、近年、この個別化されたシステムを統一するために造船 CIM と呼ばれる統合化が促進され、設計、生産計画など関連作業の一本化が叫ばれ、さらにこれらの作業内容は同時並行的、協調の段階へと移り、いわゆるコンカレント・エンジニアリングが強調されつつあることは喜ばしい。特に『プロダクトモデル』の概念の中で、この思想は成長し新たな造船技術の基盤となってきた。しかし、このように近代化された新しい船舶工学も情報の一元化と共に、生産現場の近代化が同時並行的に進められなければならない。そこで本研究では、生産現場の近代化・自動化の観点から、船体外板曲げ加工について検討している。

船体外板を塑性曲げ加工する試みの一つとして前報²⁾では多点プレス法を取り上げ、鋼板の面内及び面外の変形特性の基礎について解析的側面から検討した。そこでは弾塑性大撓み解析をする際に、材料非線形と幾何学的非線形性が議論されており、弾塑性域にわたって、面外の変形を仮定し、多点プレス曲げ加工法についての仮想仕事の原理式からポテンシャル・エネルギー原理式を導出した。その内部エネルギー項は面外変形の撓み係数 ΔC で、外部エネルギー項は反力係数 $\Delta \lambda$ の項で表現できることを示した。このポテンシャル・エネルギー原理式の停留条件より、スプリング・バック量を考慮した外板曲げ加工の負荷・除荷過程での弾塑性大撓み解析ができることを論じ、初期歪法に基いた数値計算法が有効な解析法であることを報告した。

本論文では、この解析法の詳しい数値解析例を示すと共に多点プレス機による実験を示し、数値解析結果との比較並びに解析法が適用できる範囲、限界を探り今後の研究を進める上で改良すべき問題点を述べたい。

2. 多点プレス機の試作

多点プレス試作機を製作したのでその概要を簡単に述べる。本試作機は一辺が 1200 mm の正方形板で、上下 2 枚の厚さ 40 mm の耐圧基板を主体とする Fig. 1 の構造になっ

* 東京大学工学部

** 東京ガス(株)基礎技術研究所

Fig. 1 Prototype machine of a universal-multiple-piston-pressing

ている。耐圧基板は上下対称の位置に蜂の巣状に 50 mm 間隔のピッチで穴があり、上部耐圧基板には直径 30 mm の抜き穴が、下部耐圧基板には直径 20 mm の螺子穴が空いている。この抜き穴と螺子穴は耐圧基板の横方向(x 方向)に 21 個、縦方向(y 方向)に 21 個の合計 441 個の穴が空いている。

多点プレス・ヘッド負荷機構は Fig. 2 に示すような上部アンビルを上部耐圧基板に、下部アンビルを下部耐圧基板に設置している。本装置では上部アンビルを横方向に 6 本、縦方向に 6 本、合計 36 本の電動スクリュージャッキ機能をもつ負荷荷重ヘッド (Fig. 2-a) を用意した。又、下部耐圧基板のそれは手でねじ微調整できる下部アンビル (Fig. 2-b) を同じ配置で 36 本取り付け、多点プレス・ヘッド負荷機構を構成している。上部耐圧基板は載荷能力が 30 トンの負荷荷重ヘッドに取り付けられているが、この負荷荷重ヘッドは荷重制御又は変位制御で可動できるように設計されており、今回は変位制御を用いた。

横方向に 21 個の穴が空いている上下耐圧基板に対して、横方向に 6 本のアンビルを割り当てると、50 mm ピッチの耐圧基板であるため、板幅 550 mm × 550 mm の正方形板の場合には縦・横方向とも 2 ピッチ毎 (100 mm 間隔) にアンビルを挿入し、板幅 800 mm × 800 mm の板に対しては 3 ピッチ毎 (150 mm 間隔)、板幅 1050 mm × 1050 mm の試験板には 4 ピッチ毎 (200 mm 間隔) にアンビルを使用することになった。

さらに上部耐圧基板部は上下動をするので、ガイドを兼ねて固定の支柱が四隅に一本ずつ設けられていて、下部耐圧基板部にはそのガイド・ロッドを通す抜き穴がやはり四隅にある。従って、外板曲面を決めるためには上下の多点プレス・ヘッドで予め設定曲面を定め、その間に試験片を挟み上部耐圧基板を徐々に下降させることで曲面形成が可能となる^{3),4)}。本試作機では前述のごとく板幅 $L=550$ mm, 800 mm, 1 050 mm の正方形板で、また板厚 $t=3.0$ mm より 5.6 mm 程度までの実験実績があるが、上部アンビルが荷重検力計の役目も果たしていることから、いくぶん耐圧力に欠けるので負荷能力を改良すると (現在のものは一本につき 150 kgf で設計されている)、板厚については 10 mm ぐらいまでは曲げ加工ができると考えている^{3),4)}。この試作機の製作に関しては、既に公表済みの成果を参考にしている⁵⁾。

3. 試作機による曲げ特性実験

曲げ実験中の写真を Fig. 3 に示す。まず多点プレス機の実験を知るために、板幅 $L=550$ mm (100 mm ピッチ) の正方形板で円筒曲げ、枕型曲げ、鞍型曲げの 3 種の曲げ曲面について曲げ加工実験を行った。この場合、ピストン間の距離は 100 mm であり、Fig. 2 から、ピストン・ヘッドの直径 45 mm ϕ を考慮すると、隣り合うピストン・ヘッド間隔 (スパン) は 55 mm である。

ここで後の整理のため若干の定義づけをする。前報告で²⁾、既に初期の曲げ曲面である設定曲面とスプリング・バック後の曲面に所要曲面の言葉を用いているが、これに対応して設定曲率半径 ρ_0 (ρ_1 : 横方向曲率半径: x 方向, ρ_2 : 縦方向曲率半径: y 方向)、スプリング・バック後の曲率半径のうちで実験で求めたプレス後の曲率半径 R_{exp} (R_x : 横方向曲率半径: x 方向, R_y : 縦方向曲率半径: y 方向)、弾塑性大撓み計算による所要曲率半径 ρ_{cal} (ρ_x : 横方向曲率半径: x 方向, ρ_y : 縦方向曲率半径: y 方向) を明確に定義し、以後、これら諸量を用いることにする。つまりプレス加工後の曲率半径との比を R_{exp}/ρ_{cal} で表わし、 R_{exp} の横方向 (x 方向) と ρ_{cal} の横方向 (x 方向) ρ_x との比に横方向比 R_x/ρ_x の意味をもたせ、さらに縦方向比を R_y/ρ_y で表わし、これら全体の集まりをプレス後の曲率半径の比率値、略して単に比率値という表現を用いる。

実験で用いた試験片は熱間圧延用鋼材で公称 4 mm であるが、実測値は 4.33 mm であり、ヤング率 $E=20724.4$ kgf/mm²、ポアソン比 $\nu=0.36$ 、降伏応力 $\sigma=31.5$ kgf/mm² であった。

本試作機による実験結果は Table 1 に纏めてある。設定曲率半径 ρ_0 (ρ_1, ρ_2) のうち、 ρ_2 は一定値 1500 mm に固定して、横方向設定曲率半径 ρ_1 の値を枕型曲げでは 1500 mm, 3000 mm, 5000 mm, 鞍型曲げでは -3000 mm, -4000 mm, -5000 mm と変えて実験を行った。これを基にして、

(a) upper anvil with electric motive type

(b) lower anvil of screw bolt type

Fig. 2 Press head of upper and lower part

Table 1 Results of test by the multiple-piston-pressing

	設定曲率半径 (R_o)	プレス後の曲率半径 (R_{exp})	所要曲率半径 (ρ_{cal})	比率値 (R_{exp}/ρ_{cal})
円筒曲げ	∞	∞	∞	---
	1100	4784.9	4014.9	1.19
	∞	∞	∞	∞
枕型曲げ	1500	146685.6	30707.0	4.77
	1500	3061.4	2091.9	1.46
	1500	2879.9	2091.9	1.37
	3000	7873.6	7443.7	1.05
	1500	5219.2	4402.7	1.18
	5000	54312.1	50166.6	1.08
	1500	11111.2	9015.9	1.23
鞍型曲げ	-3000	-10892.4	-4027.6	2.70
	1500	5565.1	2931.1	1.89
	-4000	-22385.7	-6146.4	3.64
	1500	10082.4	4123.5	2.44
	-5000	-38052.8	-8967.9	4.24
	1500	14143.0	5577.9	2.53
	1500	14143.0	5577.9	2.53

上段:横曲率半径 ρ_1 、下段:縦曲率半径 ρ_2 、単位 mm

Fig. 3 Photograph of the multiple-piston-pressing testing machine

プレス加工後の曲率半径の比 $R_{exp}(R_x, R_y)/\rho_{cal}(\rho_x, \rho_y)$ を論ずるが、この比率値が1に近いほうが実験と計算値とが良く合っていることを意味する。

この点より円筒曲げは $\rho_2=1100$ mm で、 $R_{exp}/\rho_{cal}=1.19$ であり良く一致するが、 $\rho_2=1500$ mm は4.77と実験が大きなスプリング・バック量を呈していて、設定曲率半径の小さい方が曲がり方が厳しく、実験と計算値とがよく合っている。枕型曲げでは、縦方向比 $R_y/\rho_y=1.18\sim 1.37$ 、横方向比 $R_x/\rho_x=1.05\sim 1.46$ と1に近く良い数値である。しかし、鞍型曲げでは縦方向比 $R_y/\rho_y=1.89\sim 2.53$ に対して、横方向比 $R_x/\rho_x=2.70\sim 4.24$ となっている。

本実験ではスプリング・バック現象の物理的特性を調べるため試験片の一部に歪ゲージによる計測を実施した。曲面設定状態における歪みの実験値および計算値の結果を Fig. 4～Fig. 9 に示す。本問題では面内の弾性歪と曲げ歪、及び塑性歪の和を全歪 ϵ_y, ϵ_x と定義して、実験で計測した歪ゲージより得た歪 ϵ_y, ϵ_x と比較検討をする。なお、変形については負荷荷重を取り除いた後の除荷段階での所要曲面、即ちスプリング・バックした後のプレス後の曲率半径 R_{exp} 、所要曲率半径 ρ_{cal} について述べたが、計測歪は荷重過程の最終時点である設定曲面の状態について議論する。

〈円筒曲げ〉

Fig. 4～Fig. 5 は設定曲率半径 $\rho_2=1100$ mm の円筒曲げ

Fig. 4 Distribution of strain ϵ_y on upper surface for cylindrical bending ($\rho_2=1100$ mm)

の全歪分布 ϵ_y である。Fig. 4 が板の表側の面(1層目)つまり上表面の歪で、黒のプロット点を実線で結ぶ曲線が数値計算で得られた全歪分布 ϵ_y であり、実験での歪 ϵ_y の実測値も併せて○印で記入してある。この Fig. 4 によれば計算値は、A-A' 線、B-B' 線、C-C' 線、D-D' 線と y 方向に板の上端部に進むにつれて、右下がりの曲線になるが、実測値はほぼ水平の歪分布を示している。Fig. 5 は板の裏側(10層目)つまり下表面の歪分布で、板全面にわたって圧縮の全歪分布 ϵ_y であり実験値も良く合うが、C-C' 線で両者に歪分布の絶対値にかなりの開きが見受けられる。円筒曲げは一般的に上表面が引張り、下表面が圧縮の歪分布を呈していて、多少、絶対値に差があるが実験値と数値計算は傾向は良くあっている。

〈枕型曲げ〉

Fig. 6 は枕型曲げの全歪分布であり、この場合の設定曲率半径 $\rho_0(\rho_1, \rho_2)$ は $\rho_1=1500$ mm、 $\rho_2=1500$ mm である。Fig. 6-a が上表面(表面側、1層目)、Fig. 6-b が下表面(裏面側、10層目)の全歪分布 ϵ_y (●; 計算値, ○; 実験値)であるが、特徴的なことは板の右側辺 O'-D' に近づくに伴い、板の表面と裏面には圧縮の全歪 ϵ_y が計算されており、実測値 ϵ_y も右側辺のデータが計測していないので明確に確認できないが、他のデータの傾向より実験でも同じ現象が生じていると推測できる。さらに、Fig. 7-a は上表面の全歪分布 ϵ_x (●; 計算値, ○; 実験値)で、今度は右側辺に

Fig. 5 Distribution of strain ϵ_y on lower surface for cylindrical bending ($\rho_2=1100$ mm)

(a) strain distribution ϵ_y on upper surface

(b) strain distribution ϵ_y on lower surface

Fig. 6 Distribution of strain ϵ_y of doughnut outside bending ($\rho_1 = 1500$ mm, $\rho_2 = 1500$ mm)

(a) strain distribution ϵ_x on upper surface

(b) strain distribution ϵ_x on lower surface

Fig. 7 Distribution of strain ϵ_x of doughnut outside bending ($\rho_1 = 1500$ mm, $\rho_2 = 1500$ mm)

引張の歪が生じている。Fig. 7-b は下表面の全歪分布 ε_x が圧縮歪であるが、絶対値は右側辺に近づくにつれて小さくなっている。この $O-X$ 軸で代表される縦方向 (y 方向) の圧縮歪と横方向 (x 方向) の引張歪の特性がプレス後の曲率半径の形成に影響し、とくに全歪中の弾性歪成分がスプリング・バックを起こす大きな要因と考えられる。枕型曲げは比率値が Table 1 のように、縦と横の方向比とも 1.05 から 1.46 の範囲の値であるので、弾塑性計算が実験の物理現象を良く捉えていると考えることができる。

〈鞍型曲げ〉

Fig. 8 は鞍型曲げの全歪分布図である。このとき、設定曲率半径 $\rho_0(\rho_1, \rho_2)$ は $\rho_1 = -3000$ mm, $\rho_2 = 1500$ mm である。Fig. 8-a は上表面(表面側, 1 層目), Fig. 8-b は下表面(裏面側, 10 層目)の ε_y の全歪分布 (●; 計算値, ○; 実験値) であるが、枕型曲げとは逆に右側辺に近づくにつれて、引張りの全歪 ε_y が計算されており、絶対値に少し差があるにせよ傾向的に正しいことは実験値から明らかである。Fig. 9-a は上表面, Fig. 9-b は下表面のそれぞれ全歪 ε_x の分布図であり、上表面は板全体が圧縮歪状態で、下表面は引張歪が支配的であるが板の上端部 C, D を除いてその絶対値は大きくない。この分布図からは $O-X$ 軸で代表される右側辺に生ずる大きな引張りの全歪 ε_y がプレス後の曲率半径の形成に影響を及ぼすことが考えられる。

以上、多点プレス曲げ加工で板を塑性加工する際、曲げ

特性を調べた結果、解析では曲面設定時における自由辺(具体的には $O-X$ 軸を中心として、板の右側辺)に生ずる歪量の大小がスプリング・バック現象を左右することが定性的に把握できたと思われる。本研究のように正方形板のときは当然であるが、対称位置の $O-Y$ 軸にも同じ現象が生じている事が確認できている。また、この領域の塑性歪が小さければスプリング・バック量が大きく、逆も成り立つと考えられる。また、簡単な曲率半径の比率値でスプリング・バック現象を論ずるには板面内の物理現象は複雑であるが、弾塑性の数値解析の適用範囲を知るには、比率値は一応の目安になることが明らかになった。次の節で、これについて詳述する。

4. 試作機による多点プレス板曲げ加工の検証実験

本節では、既に開発した弾塑性数値解析法²⁾の適用範囲を調べるために、3 節の一边の長さ $L=550$ mm (100 mm ピッチ) の試験に加えて、 $L=800$ mm (150 mm ピッチ), $L=1050$ mm (200 mm ピッチ) と試験片の長さ、及び板厚 $t=4.0$ mm, 5.0 mm, 5.6 mm と変化させ、先に述べた曲率半径比すなわち比率値で議論を進める。尚、本実験でも、150 mm ピッチ, 200 mm ピッチは隣り合うピストン・ヘッドの直径 $\phi=45$ mm を差し引いて、それぞれ、ピストン・ヘッド間隔(スパン)が 105 mm, 155 mm となるのは特性

(a) strain distribution ε_y on upper surface

(b) strain distribution ε_y on lower surface

Fig. 8 Distribution of strain ε_y of doughnut inside bending ($\rho_1 = -3000$ mm, $\rho_2 = 1500$ mm)

(a) strain distribution ϵ_x on upper surface

(b) strain distribution ϵ_x on lower surface

Fig.9 Distribution of strain ϵ_x of doughnut inside bending
($\rho_1 = -3000$ mm, $\rho_2 = 1500$ mm)

実験の場合と同様である。

供試材料の機械的性質、化学成分は Table 2 に示す。この供試材を使って試験片を作製し、3 種の曲げ曲面形状(円筒曲げ、枕型曲げ、鞍型曲げ)について実験を行った^{3),6)}。なおポアソン比は $\nu = 0.3$ である。

4.1 円筒曲げ

Fig. 10 から Fig. 12 は円筒曲げの実験結果である。図中に示す表は、設定曲率半径 ρ_0 、スプリング・バックした後の変形のうち実験で求めたプレス後の曲率半径 R_{exp} 、弾塑性大撓み計算による所要曲率半径 ρ_{cal} を試験片の板厚 $t = 4.0$ mm, 5.0 mm, 5.6 mm と変えて纏めてある。

Table 2 Chemical and mechanical properties of testing material

C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)
0.15	0.02	0.47	0.02	0.076

機械的性質	降伏点 (Kgf/mm ²)	引張強さ (Kgf/mm ²)	ヤング率 (Kgf/mm ²)	伸び (%)
JIS5号試験片	27.57	38.42	20626	42.2

Fig. 10 は $L = 550$ mm (100 mm ピッチ) の板幅について比率値 R_{exp}/ρ_{cal} と板厚 t との関係で、既に述べた様にこの比率値が 1 に近いほうが望ましいが、各設定曲率半径 $\rho_0 = 500$ mm (●印), 750 mm (▲印), 1000 mm (■印) の曲げ曲面形状とも比率値にそれほどの差異はなく、 $R_{exp}/\rho_{cal} = 0.78 \sim 1.58$ の範囲で板厚とは無関係に、この 550 mm の板幅では 100 mm ピッチが曲げ加工に適している。

Fig. 11 は $L = 800$ mm (150 mm ピッチ) の板幅の結果である。各設定曲率半径 $\rho_0 = 750$ mm (●印), 1000 mm (▲印), 1250 mm (■印) の円筒曲げ曲面形状において、 $t = 5.6$ mm は比率値 $R_{exp}/\rho_{cal} = 1.41 \sim 1.72$ であり、わずかな変化であるが、 $t = 5.0$ mm は $2.31 \sim 6.78$ 、さらに $t = 4.0$ mm では $2.58 \sim 3.75$ と大きく比率値に散らばりがある。図中に示す表によれば、この板幅に対してピストン間隔が 150 mm ピッチは設定曲率半径 ρ_0 が大きくなるにつれて、また板厚 t が薄くなるに伴い、計算値である所要曲率半径 ρ_{cal} より、実験値でのプレス後の曲率半径 R_{exp} の方が大きくなり、それだけ実験においてスプリング・バック量が大きく、この板幅に関して 150 mm ピッチは円筒曲げの所要曲面形状の予想が難しい。

Fig. 12 は板幅 $L = 1050$ mm (200 mm ピッチ) の結果であるが、はっきりした傾向はなく、各設定曲率半径 $\rho_0 =$

Fig. 10 Relation between R_{exp}/ρ_{cal} and plate thickness t of cylindrical bending (testing plate length 550 mm, 100 mm pitch)

Fig. 11 Relation between R_{exp}/ρ_{cal} and plate thickness t of cylindrical bending (testing plate length 800 mm, 150 mm pitch)

Fig. 12 Relation between R_{exp}/ρ_{cal} and plate thickness t of cylindrical bending (testing plate length 1050 mm, 200 mm pitch)

1400 mm(●印), 1500 mm(▲印), 2000 mm(■印)の曲げ形状において, R_{exp}/ρ_{cal} は $t=5.6$ mm が 3.07~6.63, $t=5.0$ mm が 2.28~3.32 の比率値の変化量である。しかし, $t=4.0$ mm になると, 各設定曲率半径 ρ_0 とも R_{exp}/ρ_{cal} 値は大きく変動してしまい, 設定曲率半径 $\rho_0=1400$ mm, 1500 mm では, プレス後の曲率半径 R_{exp} をそれぞれ 85633 mm, 97327 mm と算出できるが, 実験では, $\rho_0=2000$ mm は全く塑性変形の残らない非線形弾性の現象が見受けられる。Fig. 12 の中の表から全般的に所要曲率半径 ρ_{cal} は同じ設定曲率半径 ρ_0 ならば, ほぼ同じオーダーの所要曲率半径 ρ_{cal} を示すのに, 実験値 R_{exp} は設定曲率半径 ρ_0 が大きくなるにつれ, 又, 板厚が薄くなるに従い, 大きな曲率半径値が計算されている。つまり円筒曲げでは, この板幅 1050 mm に関してピストン間隔が 200 mm ピッチは曲げ加工にあまり適さないと判断できる。

4.2 枕型曲げ

Fig. 13 は $L=550$ mm (100 mm ピッチ) の板幅の計算と実験結果を図中にまとめている。二重曲率をもつ設定曲率半径 $\rho_0(\rho_1, \rho_2)$ は (2000, 2000), (3000, 1500), (4500, 1500),

(単位は mm) の曲げ曲面について調べてあり, 比率値 $R_{exp}(R_x, R_y)/\rho_{cal}(\rho_x, \rho_y)$ の値は R_x/ρ_x の横方向比(●, ▲, ■印)が $t=5.6$ mm では 0.66~1.17, $t=5.0$ mm が 0.52~1.26, $t=4.0$ mm の 0.58~1.20 とほぼ $R_x/\rho_x=0.52\sim1.26$ の範囲の比率値にある。縦方向比(○, △, □印) R_y/ρ_y は $t=5.6$ mm で 0.59~0.79, $t=5.0$ mm で 0.49~1.01, $t=4.0$ mm で 0.66~0.78 と $R_y/\rho_y=0.49\sim1.01$ の範囲の比率値にあり, 板厚とは無関係に所要曲率半径 ρ_{cal} とプレス後の曲率半径 R_{exp} の双方が良く合っている。従って, この板幅 $L=550$ mm での枕型曲げではピストン・ピッチ 100 mm は, 初期設定曲面からのスプリング・バック量の予想ができる事がわかる。

Fig. 14 は $L=800$ mm (150 mm ピッチ) の板幅において, 設定曲率半径 $\rho_0(\rho_1, \rho_2)$ が (3000, 3000), (4000, 2000), (6000, 2000), (単位は mm) の二重曲率を持つ曲げ曲面について, 板厚 t と比率値 $R_{exp}(R_x, R_y)/\rho_{cal}(\rho_x, \rho_y)$ の関係を図示したものである。これから縦方向比 R_y/ρ_y (○, △, □印) は $t=5.6$ mm が 0.79~0.95, $t=5.0$ mm が 0.84~1.03, $t=4.0$ mm が 0.72~0.80 と $R_y/\rho_y=0.72\sim1.03$ の範囲の比

板厚 t (mm)	設定曲率半径 ρ_0 (mm)	プレス後の曲率 半径 R_{exp} (mm)	所要曲率半径 ρ_{cal} (mm)	
5.6	2000	3521	4150	●
	2000	3314	4150	○
5.0	2000	4220	4131	▲
	2000	3585	4131	△
4.0	2000	3280	3792	■
	2000	2983	3792	□
5.6	3000	7350	6247	●
	1500	2255	3434	○
5.0	3000	7698	6109	▲
	1500	3649	3611	△
4.0	3000	6451	5351	■
	1500	2436	3676	□
5.6	4500	11670	17667	●
	1500	2860	4768	○
5.0	4500	9337	17924	▲
	1500	2665	5335	△
4.0	4500	9656	16487	■
	1500	4468	6505	□

上段: X 方向 (横方向), 下段: Y 方向 (縦方向)
 $R_{exp}(R_x, R_y)$; Experiments, $\rho_{cal}(\rho_x, \rho_y)$; Calculation
 t : thickness

Fig. 13 Relation between R_{exp}/ρ_{cal} and plate thickness t of doughnut outside bending (testing plate length 550 mm, 100 mm pitch)

Fig. 14 Relation between R_{exp}/ρ_{cal} and plate thickness t of doughnut outside bending (testing plate length 800 mm, 150 mm pitch)

率値であるが、横方向比 R_x/ρ_x (●, ▲, ■印) は $t=5.6$ mm が 0.85~1.75, $t=5.0$ mm が 1.27~2.72, $t=4.0$ mm では 1.29~2.91 と $R_x/\rho_x=0.85\sim2.91$ と大きく比率値に差が生じている。従って、この板幅 $L=800$ mm での 150 mm ピッチは横方向の曲率半径の予測は難しいが、縦方向の曲率半径は可能であり初期設定曲面からのスプリング・バック量の見積りができる。この場合も曲率半径が小さい設定曲面の方が評価し易いことを示している。

Fig. 15 は板幅 $L=1050$ mm (200 mm ピッチ) について、設定曲率半径 $\rho_0(\rho_1, \rho_2)$ が (4000, 4000), (6000, 3000), (7500, 2500), (単位は mm) の 3 種の曲げ曲面の板厚 t と $R_{exp}(R_x, R_y)/\rho_{cal}(\rho_x, \rho_y)$ の関係である。これより、縦方向比 R_y/ρ_y (○, △, □印) は $t=5.6$ mm が 0.47~0.61, $t=5.0$ mm で 0.52~0.68, $t=4.0$ mm が 0.76~1.09 と $R_y/\rho_y=0.47\sim1.09$ の変化であり、横方向比 R_x/ρ_x (●, ▲, ■印) は $t=5.6$ mm で 1.32~2.46, $t=5.0$ mm が 0.94~1.85, $t=4.0$ mm が 1.13~1.56, で $R_x/\rho_x=0.94\sim2.46$ の範囲の比率値に差がでている。特に、板厚 $t=4.0$ mm は縦方向比 R_y/ρ_y が 0.76~1.09 であり、横方向比 R_x/ρ_x も 1.13~1.56 と比較的散らばり方が小さいので、この板幅で $L=1050$ mm で 200 mm のピッチは初期設定曲面からのスプリング・バック量の予測ができることを示している。

枕型曲げでの板厚 t と比率値 $R_{exp}(R_x, R_y)/\rho_{cal}(\rho_x, \rho_y)$

の間には、はっきりした相互関係は見いだせないが、縦方向比 R_y/ρ_y については、 $L=550$ mm, 800 mm, 1050 mm の 3 種とも 0.49~1.09 の範囲で、割合、実験値と良く合っている。これは定性的に見て設定曲率半径 $\rho_0(\rho_1, \rho_2)$ の小さいほう、つまり強く曲げる方向の曲率半径が実験と計算の両者が合うことを示している。一般に枕型曲げの二重曲率を与えると、双方の曲率半径は互いに影響を及ぼし合い、特に一方のそれは曲率半径が小さい方の特性に左右されるが、縦方向比 R_y/ρ_y が 1.0 付近の値であるので、この方向での所要曲面の推定が可能である。

4.3 鞍型曲げ

Fig. 16 は板幅 $L=550$ mm (100 mm ピッチ) の板厚と比率値 $R_{exp}(R_x, R_y)/\rho_{cal}(\rho_x, \rho_y)$ の関係である。設定曲率半径 $\rho_0(\rho_1, \rho_2)$ は各板厚ごとに $(-2000, 2000)$, $(-3000, 1500)$, $(-4500, 1500)$, (単位は mm) の 3 種の曲げ曲面であり、比率値 $R_{exp}(R_x, R_y)/(\rho_x, \rho_y)$ の値は横方向比 R_x/ρ_x が $t=5.6$ mm では 1.16~2.02, $t=5.0$ mm で 0.88~1.22, $t=4.0$ mm が 1.68~2.01 の比率値で、やや実験値でのプレス後の曲率半径 R_x がどの板厚でも大きな値になっている。 R_y/ρ_y の縦方向比は $t=5.6$ mm が 0.589~1.08, $t=5.0$ mm で 0.598~0.889, $t=4.0$ mm で 0.70~0.74 の比率値であり、数値計算による所要曲率半径 ρ_{cal} の物理的意義が実験で保証されたことになる。従って、各設定曲率半径からのスプリング・バック

Fig. 15 Relation between R_{exp}/ρ_{cal} and plate thickness t of doughnut outside bending (testing plate length 1050 mm, 200 mm pitch)

Fig. 16 Relation between R_{exp}/ρ_{cal} and plate thickness t of doughnut inside bending (testing plate length 550 mm, 100 mm pitch)

Fig. 17 Relation between R_{exp}/ρ_{cal} and plate thickness t of doughnut inside bending (testing plate length 800 mm, 150 mm pitch)

ク量を推定でき、この板幅 550 mm で 100 mm ピッチは鞍型曲げ曲面を得るに適している。

Fig. 17 は板幅 $L=800$ mm (150 mm ピッチ) の板厚 t と $R_{exp}(R_x, R_y)/\rho_{cal}(\rho_x, \rho_y)$ の関係である。設定曲率半径 $\rho_0(\rho_1, \rho_2)$ は $(-3000, 3000)$, $(-4000, 2000)$, $(-6000, 2000)$ で、これによる $R_{exp}(R_x, R_y)/\rho_{cal}(\rho_x, \rho_y)$ も縦方向比 R_y/ρ_y が $t=5.6$ mm は 0.663~0.92, $t=5.0$ mm で 0.73~1.93, $t=4.0$ mm では 0.63~0.96 の比率値であり実験値と計算値がほぼ一致しているが、横方向比 R_x/ρ_x は $t=5.6$ mm で 0.43~2.57, $t=5.00$ mm で 1.93~3.86, $t=4.00$ mm では 1.79~2.72 と実験値の曲率半径 R_{exp} が大きなスプリング・バック量が生じている。従って、縦方向曲率半径の初期設定曲率半径 ρ_2 からのスプリング・バック量を見積もることができる。

Fig. 18 は板幅 $L=1050$ mm (200 mm ピッチ) の結果である。設定曲率半径 $\rho_0(\rho_1, \rho_2)$ は $(-4000, 4000)$, $(-6000, 3000)$, $(-7500, 2500)$ の 3 条件で、比率値 $R_{exp}(R_x, R_y)/\rho_{cal}(\rho_x, \rho_y)$ も縦方向比は $t=5.6$ mm が $R_y/\rho_y=0.80\sim1.01$, $t=5.0$ mm が $R_y/\rho_y=0.72\sim1.42$, $t=4.0$ mm で 0.54~0.88 と実験値 R_{exp} と計算値 ρ_{cal} とは良好な関係をもつのでスプリング・バック量を予測できるが、横方向比は $t=5.6$ mm で $R_x/\rho_x=2.09\sim2.98$, $t=5.0$ mm が $R_x/\rho_x=2.29\sim3.11$, $t=4.00$ mm にいたっては、 $R_x/\rho_x=2.52\sim8.87$ の比率値とやはり横

方向の曲率半径を推定するのは難しい。

鞍型曲げは比率値 $R_{exp}(R_x, R_y)/\rho_{cal}(\rho_x, \rho_y)$ のうち板幅 $L=800$ mm, $t=5.0$ mm で縦方向比 $R_y/\rho_y=0.73\sim1.93$ であるが、他の板幅の縦方向比は 0.54~1.42 の比率値である。しかし、縦方向に較べて、横方向設定曲率半径 ρ_1 の大きい横方向比 R_x/ρ_x は 0.43~8.87 と比率値に大きな差異が見られ、実験とはあまり合わない。これも枕型の曲げ曲面形状と同様に、二重曲率を有する設定曲面では両曲率の比率値 R_{exp}/ρ_{cal} を一致させることは困難である。

5. 考 察

<比率値について>

多点プレス機により曲げ加工する際、大撓み数値解析と実験解析結果の比較検討を行ってきた。検証実験では、予め定める設定曲面と曲げ加工終了後の所要曲面との間に、比率値という基礎量で所要曲面の適合性に関し調べてきた。その結果、比率値はスプリング・バックを見積るのに一応の基準量にはなるが、実験との適合性を満足するものではなく、ましてや、プレス後の曲率半径 R_{exp} 、所要曲率半径 ρ_{cal} が設定曲率半径 ρ_0 に対して定数倍であるかの検討ができなかった。現在のデータでこの関係量を検討することは可能であるが、この曲率半径についての実験と数値計算との比率値が 0.75~1.25 程度の範囲になければ、設定

Fig. 18 Relation between R_{exp}/ρ_{cal} and plate thickness t of doughnut inside bending (testing plate length 1050 mm, 200 mm pitch)

曲率半径を基準とする実験値や計算値との比率, すなわち設定曲率半径比に比率値を計算しての議論の展開は無意味と判断した。

その判断の裏付けとして, まず第一に検証実験で得られる設定曲率半径比である。Fig. 19 は横座標軸に ρ_1/ρ_2 , 縦座標軸に設定曲率半径比 R_{exp}/ρ_0 , ρ_{cal}/ρ_0 の値を選び, 両者の関係を図示したものである。この図は縦座標軸上が円筒曲げ, 縦座標軸の右側が枕型曲げ, 左側が鞍型曲げであり, 横座標に $|\rho_1/\rho_2|=1, 2, 3$ の各々について, 板幅 $L=550$ mm, 800 mm, 1050 mm の比率値をプロットしてある。この図によると, 除荷後, どの程度, スプリング・バックしているかが判る。例えば, $L=550$ mm は実験値および計算値もスプリング・バック量が見積り易い範囲の値であるが, 他の板幅は縦方向比を別にして, 横方向比に実験値と計算値の間に大きな隔たりが窺える。また, この図からも解るように, $L=550$ mm (ピストン・ピッチ 100 mm) の破線で囲む領域は, 比較的に良好な所要曲面の推定が可能である。

第二に Table 3 を示す。これは, 4 節の検証実験結果(板厚差を考慮していない)を, 板幅について横方向と縦方向の最大と最小の比率値を範囲で整理したものである。この Table 3 によると, 板幅 1050 mm は円筒曲げと鞍型曲げの横方向曲率半径の予測が難しいが, 他は比率値で物理的意義を見いだせそうである。つまり, 全般的に, 比率値が大

きいということは, $R_x > \rho_x$, $R_y > \rho_y$ を意味しており, 実験での曲率半径が大であり, 設定曲率からのスプリング・バックが大きい。逆に, 比率値が 1 より小さい場合は実験では板が良く曲がり, スプリング・バックが小さい事を意味している。従って, ある比率値の範囲を挟んで, その絶対値が大きく 1 より離れた値を有する事は, 数値解析主体の立場から言えば, 実験精度や試験機の特性が影響していると考えられ, 実験解析主体の観点からすれば, 弾塑性解析に考慮されていない問題があるとも言える。このように特性実験での現象の複雑さと, 検証実験での結果と数値解析の知見より前述の所要曲率半径の比率値に 0.75~1.25 の範囲が妥当であると考えた。従って, この基準値から考えて板幅 $L=550$ mm (100 mm ピッチ) の結果は, 完全に満たさない面もあるが, 他の板幅よりは基準値である各種の比率値に変動が少ないので, 本試作機では板幅 $L=550$ mm が板曲げ加工に最適との結論に達した。

〈所要曲率の推定について〉

既に開発した弾塑性大撓み解析プログラムを用いて, 設定曲率 $\rho_0(\rho_1, \rho_2)$ を種々に変えたシリーズ計算を行い, 所要曲率の一般的特性を推定するチャートの作成を試みる。板幅は $L=550$ mm を対象に, 推定チャートを Fig. 20 に示す。図の中で, ρ_1 , ρ_2 を横方向と縦方向の設定曲率半径, ρ_x , ρ_y を数値計算による所要曲率半径を意味するのは今ま

Fig. 19 Relation between $|\rho_1/\rho_2|$ and R_{exp}/ρ_0 or R_{cal}/ρ_0 Fig. 20 Relation between $\rho_0(\rho_1, \rho_2)$ and $\rho_{cal}(\rho_x, \rho_y)$

Table 3 Results of verification test by the multiple-piston-pressing

曲げ曲面	比率値	板幅(試験片長さ)		
		550mm	800mm	1050mm
円筒曲げ	R_{exp}/ρ_{cal}	0.78~1.58	1.41~6.78	2.28~測定できず
枕型曲げ	R_x/ρ_x	0.52~1.26	0.85~2.91	0.94~2.46
	R_y/ρ_y	0.49~1.01	0.72~1.03	0.47~1.09
鞍型曲げ	R_x/ρ_x	0.88~2.02	0.43~3.86	2.09~8.87
	R_y/ρ_y	0.58~1.08	0.63~1.93	0.54~1.42

でと同じだが、 x 座標は板厚 t を横方向の所要曲率半径 ρ_x で無次元化して、 y 座標は縦方向の所要曲率半径 ρ_y で無次元化した座標値をもつ。この推定図の見方は第一象限が x 座標、 y 座標値とも正なので同符号の二重曲率を表わし、枕型曲げ曲面形状である。また、第二象限は x 座標が負で、 y 座標が正であるので異符号の二重曲率となるので鞍型曲げ曲面を表わし、 $x=0$ (y 座標軸に近接する曲線 $\rho_1=\infty$)は円筒曲げの結果をプロットしている。

具体例として、 $\rho_1=1500$ mm、 $\rho_2=1500$ mm の設定曲率半径の推定曲線の交点 C では、横座標値 $t/\rho_x=2.00\times 10^{-3}$ 、縦座標値 $t/\rho_y=2.06\times 10^{-3}$ と仮に概略値を読み取るならば、 $t=4.33$ mm なので、 $\rho_x=t/2\times 10^{-3}$ より、 $\rho_x=2165$ mm、 $\rho_y=2061$ mm と所要曲率半径の推定値が求まる。

図では、枕型、鞍型曲げ曲線は対称な推定曲線に見えるが、第一象限の枕型の推定域で、縦方向設定曲率半径 $\rho_1=2000$ mm の曲線上に、横方向の $\rho_2=2000$ mm との交点 A を取り、つぎに $\rho_2=1500$ mm との交点 B 、および $\rho_1=1500$ mm の横方向設定曲率半径の曲線上に $\rho_2=1500$ mm 曲線との交点 C 、 $\rho_2=2000$ mm との交点 D を選ぶ。そして、これらの点を結ぶ曲線が囲む面積を近似的に四辺形と考えて、この四辺形の重心点を求める。これら設定曲率半径の各交点における x 、 y 座標値、つまり所要曲率半径 $\rho_{cal}(\rho_x, \rho_y)$ は A 点から順に D 点まで $(0.87\times 10^{-3}, 0.87\times 10^{-3})$ 、 $(1.35\times 10^{-3}, 1.61\times 10^{-3})$ 、 $(2.06\times 10^{-3}, 2.06\times 10^{-3})$ 、 $(1.62\times 10^{-3}, 1.35\times 10^{-3})$ であるから、重心点は $(1.47\times 10^{-3}, 1.47\times 10^{-3})$ である。同様にして、第二象限の推定域で、枕型と t/ρ_y 軸に関して軸対称な設定曲率半径 $\rho_1=-1500$ mm、 -2000 mm、 $\rho_2=1500$ mm、 2000 mm の囲む近似四辺形 $A'B'C'D'$ の重心点を求めると、 $(-1.93\times 10^{-3}, 1.93\times 10^{-3})$ であり、相対的に鞍型曲げが t/ρ_y 軸よりも遠方の位置を占めている。逆に、この鞍型曲げの近似四辺形での重心点は、もともと設定曲率半径で考えれば、 $\rho_1=-1750$ mm、 $\rho_2=1750$ mm についての所要曲率半径を定める座標値 ρ_{cal} である。このような考察により、四辺形 $ABCD$ 内は

所要曲率半径 ρ_x 、 ρ_y を与える平面と解釈でき、Fig. 20 は総ての所要曲率半径を推定する座標平面と見なせる。図中には3節の実験結果を▲印で載せてあるが、二重曲率のうち枕型は計算値 ρ_{cal} は実験値 R_{exp} と良く合うのたいして、鞍型曲げは枕型曲げに比べると合致度が低い。なお、Fig. 20 を作成するために数点の数値補間計算を実施した。

〈今後の開発について〉

造船界では、鋼板の曲げ加工については多大な労力を費やしてきた。このことは鋼板の曲げ加工が如何に困難な作業の一つに挙げられるかを示している。

著者らは、今回、多点プレス機を試作して、実験を試みた。また、前報²⁾では大挽みを考慮した板曲げ加工用の有限要素法に基づいた計算法を報告している。しかしながら、実験と計算とは必ずしも良く一致しているとは言い難い、その理由について述べてみたい。

(1) まず、今回の多点プレス機についてである。試作機のピストン間隔はできるだけ狭くしなければならない。本実験では、ピストン間隔 100 mm の試験片(ピストンヘッドが 45 mmφ のピストン 6×6 本が、550 mm×550 mm の試験片に作用している場合で、ピストンの端部の間隔は 55 mm の時)のデータが最も信頼性が高い。勿論、他の試験体(800 mm×800 mm、1050 mm×1050 mm)についても、実験データは得ているものの、その推定値を数値計算で、所要曲率半径 ρ_{cal} として予測するには信頼に欠ける。

また、多点プレス機にはその機械に特性が在るように思われる。例えば、曲率半径の等しい枕型曲げ曲面のような x と y 方向の二軸方向に関して対称な曲げ曲面を設定しても除荷後のプレス後の曲率半径 R_{exp} は二軸方向とも同一値にならないケースが多い(Fig. 14、および Fig. 15 の図中の表など好例である)。今後とも、多点プレス機の特性という観点からの研究が不可欠なのは否めない。

(2) 次に、計算手法について述べたい。計算方法については、すでに前報²⁾で十分に記述済みである。そして著者らは、その有効性について自信を持っていたにも拘らず、今回の実験値との対応が必ずしも良いものばかりとは言えない。どこに問題点が潜んでいて、何を解決すれば満足な成果が得られるかは不明だが、今後の研究に委ねられる処である。

(3) 最後に、試験片についてである。試験片は応力除去焼鈍を施し、バンドソーで切断するなど細心の注意を払って製作したが、曲げ加工実験データにバラツキが大きい場合が認められる。降伏応力、ヤング率、ポアソン比などの材料定数は計測値を使用しているものの、曲げ加工の結果は納得できるデータが得られてはいない。また、現場では鋼板中に残留応力が生じているなどの要因があるかも知れないことを考慮すると、益々、問題は複雑多岐になる。

上述の三点の問題点を内蔵している事を十分承知しながら、本論文では、比率値を中心に整理してみた。一辺が 550

mm×550 mmの正方形板(板厚4.0から5.6 mm)については、この比率値を用いて、ある程度の設定曲率半径の推定、つまり、どのくらいで設定すれば、所要曲率半径がどの範囲に納まるかの推定が可能となったと考えている。

6. ま と め

船体外板の曲げ加工生産を多点プレス加工法で行う場合、問題となる諸性質の中で、設定曲率半径 ρ_0 で板曲げ加工を実施したとき、板厚 t 、板幅 L が曲率半径値(R_{exp} , ρ_{cal})に及ぼす影響を調べるために、開発した弾塑性大撓み解析法と実験とがどの程度の適合性を有するかについて論じてきた。その結果、

(1)スプリング・バック後の所要曲率を推定するという観点からの実験と数値計算との対応であるが、板幅が狭く(ピストン間隔が狭いと換言できる)、板厚が厚い場合は、所要曲率を推定し易い。

(2)具体的には、板幅 $L=550$ mmでピストン間隔100 mmの試験片で、板厚は4.0 mm, 5.0 mm および5.6 mmとも、数値計算によって所要曲率を推定することができる。

(3)既に提案された弾塑性大撓み解析用プログラムを用いて、二重曲率を有する所要曲率半径を求めるための設定曲面の推定法を提案した。

謝辞

本研究を進めている上で、重要な試作機の製作には、参

照した文献⁹⁾はもとより、本学科の多くの教職員の方々の協力で完成しましたことに感謝します。又、本論文を作成するにあたり、本学科技官、細川弘美さんには英文タイプや手計算のチェックに大変お世話になりました。深くお礼申し上げます。尚、本研究は文部省科学研究費(試験研究1代表者：野本敏治)の補助により行われたものであり、計算は大型計算機M 880 Hを使用しました。

参 考 文 献

- 1) 船岡, 覚野, 伊藤, 長瀬, 雨宮ら: 特集 造船 CIMS より, 日本造船学会誌 759号 pp 2~40 1992年9月
- 2) 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年12月
- 3) 岡村俊哉: 多点プレスによる薄板の塑性曲げに関する研究, 東京大学修士論文, 1988年3月
- 4) 野本敏治: 板の自動曲げ加工に関する研究, 昭和63年度科学研究(試験研究1)成果報告書 1989年3月
- 5) 西岡他: ユニバーサル多点プレスによる船体外板曲げ作業の自動化に関する研究(第二報: 実用化研究) 日本造船学会論文集 第133号 pp 291~305, 1973年3月
- 6) 瀬尾寛治, 藤井一郎: 鋼板の曲げ加工設定曲面の決定法, 東京大学工学部船舶工学科卒業論文, 1989年3月