

計算機支援板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

正員 上田 幸雄*

正員 Rashwan Ahmed Mohamed**

正員 神近 亮一***

正員 村川 英一*

正員 奥本 泰久***

Development of Computer Aided Process Planing System for Plate Bending by Line-Heating
(1st Report) Relation between the Final Form of the Plate and the Inherent Strain

by Yukio Ueda, *Member*

Rashwan Ahmed Mohamed, *Member*

Katsuichi Kamichika, *Member*

Hidekazu Murakawa, *Member*

Yasuhisa Okumoto, *Member*

Summary

Plate bending by line-heating can be considered as a process in which plates are bent to the three dimensional form by the plastic strain caused during the gas heating and the water cooling. Therefore, the plan making for this process can be separated into two parts. The first part is to decide what type and how much plastic strain should be given in which part of the plate. The second part is to find what is the proper heating and cooling condition to get the desired plastic strain.

The authors investigated the relation between the final form of the plate and the plastic strain or the inherent strain to be given for the plate bending. For this purpose, the Finite Element Method is employed. Based on the knowledge obtained through the analysis, a method to determine the part of the plate to be heated and the magnitude of the required inherent strain is proposed.

1. 結 言

造船所における曲り部材の曲げ加工の多くは線状加熱によって行われてきた。一般に線状加熱は熟練を必要とするが、最近の熟練工の高齢化および作業者の数そのものの減少は処理能力の確保、さらには技能の継承という点で重大な問題となりつつある。これに対する一つの対策として、いわゆる技能の技術化、すなわち、計算機や有限要素法等のシミュレーション技術をフルに活用した板曲げ方案の自動作成、また、加工を自動的に実施するための設備開発が考えられ、これらを実現するための基礎研究がいくつかの論文^{1)~7)}として報告されている。線状加熱では、ガス加熱および水冷により塑性ひずみが形成され、これにより板が曲げられる。したがって問題は、どのような形態のいかなる大きさのひずみを板のどの位置に与えるか、また、所定のひずみ量を得るための加熱・冷却条件を如何に決定するかと

いう2点に集約される。

そこで著者らは、まず、目的とする最終成形形状とこれを得るために必要な固有ひずみの関係を、有限要素法を用いた一連の解析で明らかにした。さらに、得られた知見に基づき、線状加熱するべき位置、方向や与えるべき固有ひずみの量を決定するひとつの方法を考案した。

2. システム構築の基本構想

線状加熱による鋼板の曲げ加工は、線状加熱時に生じた塑性ひずみによる板の面内収縮や角変形を利用し、目的とする3次元形状を作り出す加工法と考える事ができる。そこでまず、成形すべき曲り部材の形状と線状加熱により与えるべき面内収縮量および角変形量について検討する。Fig.1およびFig.2は、平板からシリンダー形状と部分球殻を作成した場合を例に、線状加熱の位置と線状加熱によって生じる角変形(収縮量が板厚方向に変化)と面内収縮(収縮量が板厚方向に一樣)の関係を模式的に示している。これらの図中の(a)は、曲げ加工後の形状と加熱線を示し、(b)は、3次元曲面を有する曲り部材に加熱線に沿って切り込みを入れ、これを平面展開した状態を示している。直

* 大阪大学溶接工学研究所

** 大阪大学工学研究科

*** 石川島播磨重工業(株)

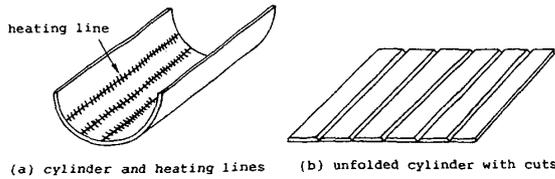


Fig. 1 Forming of cylinder.

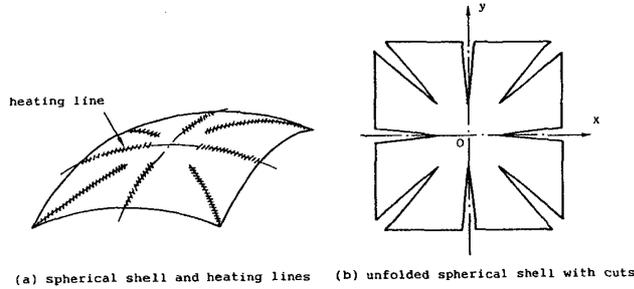


Fig. 2 Forming of shallow spherical shell.

感的には、(b) 図中に示された切り込みに生じた開き量が、線状加熱によって与えるべき面内収縮量および角変形量を表している。この例が示すように、一方向のみに曲率を有するシリンダー形状を作成するためには角変形のみが必要であるが、2方向に曲率を有する部分球殻の場合には、面内収縮も考慮しなければならない。したがって、任意の形状を対象とした板曲げ加工を行うためには、目的とした形状に合わせて、面内収縮と角変形の両者を意識的に使い分ける必要が予想される。一方、これらの面内収縮量や角変形量は、スプリングバック等の2次的影響を無視すれば幾何学的な計算により求めることができ、線状加熱方案を理論的に作成する一つの方法として、幾何学的計算に基づく手法⁹⁾が提案されている。

ここで、本研究の目的である線状加熱方案自動作成システムに問題を戻すと、システムは基本的に次の三つのサブシステムから構成されると予想される。

Subsystem-1

条件として与えられた曲り部材の最終形状と線状加熱前の初期形状より、線状加熱を施すべき位置、付与すべき固有変形の種類（面内縮み or 角変形）、およびその大きさを定める。

Subsystem-2

Subsystem-1 で定められた固有変形量を作り出すための加熱、冷却条件を定める。

Subsystem-3

Subsystem-1 および 2 に基づき曲げ加工を実施した後に残された形状的誤差を修正するための諸条件を定める。

3. プレス加工における固有歪

3.1 計算モデル

前章で触れたように、板曲げ加工で面内固有変形（面内

縮み）と面外固有変形（角変形）を状況に応じて使い分けなければならない。また、板に固有変形を与えた場合、その固有変形あるいは固有ひずみが適合条件を満足しない時には、2次的な弾性変形が生じる。このような弾性変形は、プレス加工においてはスプリングバックとして現れ、線状加熱の場合においてもこれを考慮しておく必要がある。一方、面内固有変形と面外固有変形の関係およびスプリングバックは、板の寸法や曲げ加工量と密接な関係を有していると予想される。そこで、ここでは、プレス加工を模擬した数値シミュレーションによりそれらの関係を明らかにする。

成形すべき板は、Fig. 3 に示されるような、半径 a 、板厚 t の平板であり、これを、半径 R の球面状プレス型でプレスしたと想定する。なお、シミュレーションは、次の2段階に分けて行った。

- (1) プレス型で完全に球形に押しきった状態までを FEM を用いて弾塑性大たわみ解析し、押しきった状態での弾性ひずみ ϵ^e と塑性歪 ϵ^p の分布を計算する。なお、具体的には面内変形は自由とし、プレス型に相当する面外変形を強制変位として増分的に与えた。
- (2) 第1段階で計算したひずみを基に、次に示されるような種々の固有ひずみ分布 ϵ^* を作成し、これらを平板に与えた時の変形を計算する。ただし、この時の板は弾性的に変形するものと仮定する。
 - a) 全ひずみを固有ひずみとする $\epsilon^* = \epsilon^e + \epsilon^p$
 - b) 塑性ひずみのみを固有ひずみとする $\epsilon^* = \epsilon^p$
 - c) 弾性ひずみのみを固有ひずみとする $\epsilon^* = \epsilon^e$
 - d) 面内ひずみのみを固有ひずみとする $\epsilon^* = \epsilon^m$
 - e) 曲げひずみのみを固有ひずみとする $\epsilon^* = \epsilon^b$

なお、面内ひずみと曲げひずみは次式で定義される。

$$\epsilon^m = \frac{1}{t} \int_{-t/2}^{t/2} (\epsilon^e + \epsilon^p) dz \quad (1)$$

$$\epsilon^b = (\epsilon^e + \epsilon^p) - \epsilon^m$$

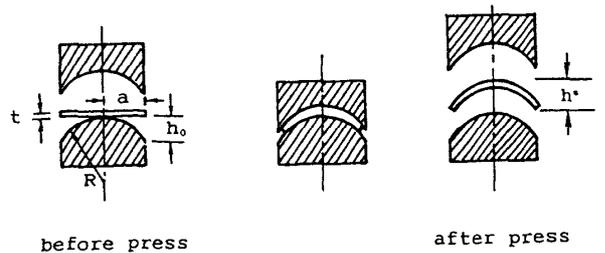


Fig. 3 Press forming of spherical shell.

また、本論文で用いられる固有ひずみおよび固有変形は、変形と残留応力の生成源という一般的な意味を持ち、計算上は、これを初期ひずみとして板に与える。

上記のような2段階の計算を行い、部分球殻を作り出すために、塑性ひずみ、弾性ひずみ、面内ひずみおよび曲げひずみがそれぞれ果たしている貢献度を検討した。特に、板の寸法および曲げ加工の大きさの影響も合わせて検討するため、板厚 t と部分球殻の高さ h_0 を変化させたシリーズ計算を行った。シリーズ計算では、板の半径 a は一定で 500 mm とし、鋼材は、降伏応力 σ_Y が 30 kgf/mm² (294 MPa) の完全弾塑性体であると仮定した。一方、板厚 t および高さ h_0 については次のような値に対して計算を行った。

$$t = 5, 10, 20, 30, 40 \text{ mm}$$

$$h_0 = 20, 50, 100, 150 \text{ mm}$$

3.2 適合ひずみ場とスプリングバック

第2段階の計算で、固有ひずみとして全ひずみを用いると、全く拘束の無い自由状態での板の形状は、プレス型の形状に一致し、内部応力はゼロとなる。これは、残留応力の問題において、応力の生成源になるのは非適合ひずみ場であり、適合ひずみ場は応力を作らないという事と、この場合の全ひずみは適合条件を満足することから説明できる。さらに、残留応力がゼロであるから弾性ひずみもゼロとなり、スプリングバックも生じない。このように、全ひずみを固有ひずみとして与えた時に、数値計算の結果、正しい状態が再現できた事は、解析用のプログラムが理論的に正しく作られている事を同時に示している。

3.3 塑性ひずみと弾性ひずみ

第2段階の計算で塑性ひずみまたは弾性ひずみのみをそれぞれ固有ひずみとして与えた時の結果を比較すると、曲げ加工における各ひずみ成分の貢献度が把握できる。具体

的な計算は、問題の対称性を考慮し、円板の 1/4 を Fig. 4 に示される要素分割を用いて行った。Fig. 5 および Fig. 6 は、塑性ひずみおよび弾性ひずみを固有ひずみとして与えた時の板の変形状態を解析し、円板の中心における高さ h^p , h^e とプレス型の高さ h_0 との関係を、板厚の異なるいくつかのケースについて示したものである。なお、変形後の板の高さはプレス型の高さ h_0 で無次元表示されている。まず、塑性ひずみのみを固有ひずみとして与えた時の結果を検討する。Fig. 5 に示された h^p/h_0 は、一度プレスされた円板をプレス型から解放し、拘束無しの状態にした時の残留変形の割合とも考えることができる。したがって $(1 - h^p/h_0)$ は、スプリングバックによって解放される変形の

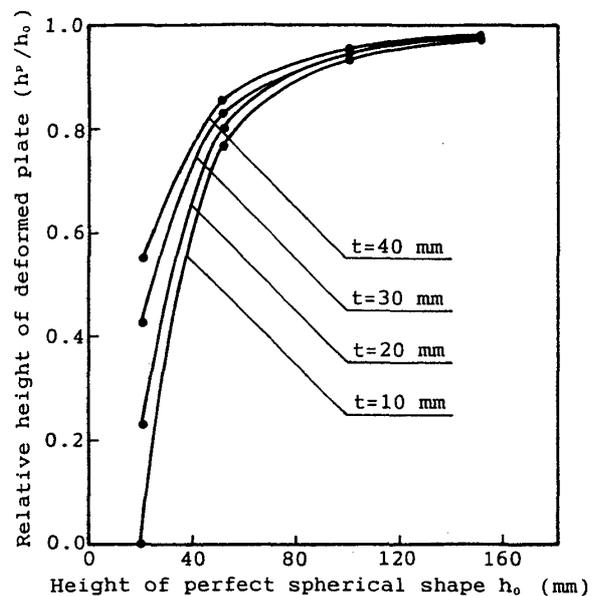


Fig. 5 Deformation of plate due to plastic strain.

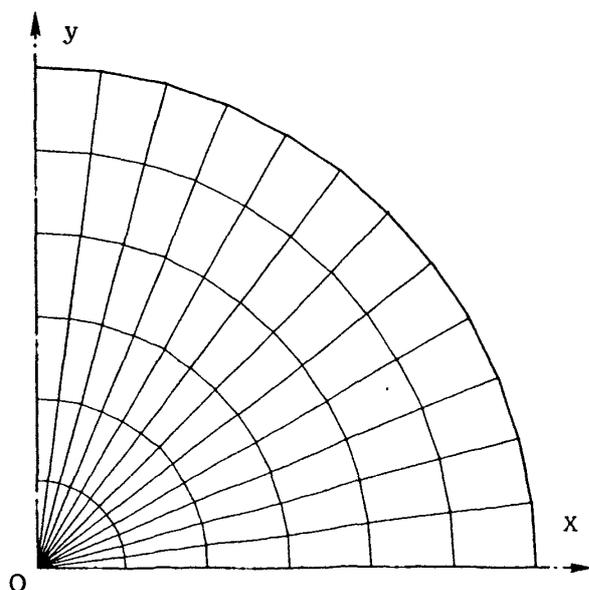


Fig. 4 Mesh division (one quarter of circular plate).

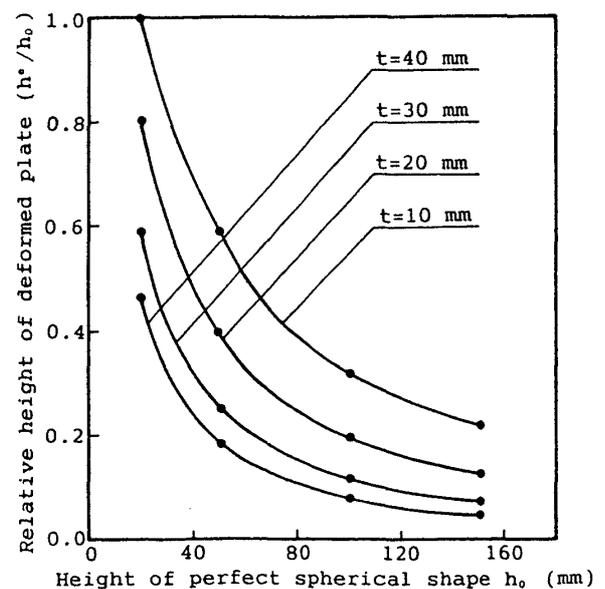


Fig. 6 Deformation of plate due to elastic strain.

割合を表している。例えば、板厚が 40 mm の場合に注目すると、プレス型の高さ h_0 が 20 mm の時には、約 45% の変形がスプリングバックにより解放され、永久変形として約 55% の変形が得られる。板厚が同じく 40 mm の場合で加工度すなわち h_0 が大きくなると、永久変形の割合は増加し、 $h_0=120$ mm ではその割合が約 95% になる。また、 h_0 が同じで 20 mm の場合について板厚の影響を比較すると、板厚が小さい程、スプリングバックが大きく、特に、板厚が 10 mm の時には 100% の変形がスプリングバックにより解放されている。これは、第 1 段階のプレス過程で板に生じるひずみは小さく、塑性変形が全く生じていないためである。

次に、弾性ひずみのみを固有ひずみとして与えた時の結果を検討する。前述のように、塑性ひずみを固有ひずみとする場合は現実の物理現象に対応しているが、ここで検討する弾性ひずみの場合は全く架空の状況であり、単に弾性ひずみの曲げ加工における影響度を把握するためのものである。弾性ひずみのみを与えたときの円板の相対的高さ h^e/h_0 が Fig. 6 に示されており板厚が小さい程、また、 h_0 が小さい程、 h^e/h_0 の値が大きくなっており、この結果は Fig. 5 で示されたスプリングバックに関する傾向と一致している。

さらに、プレス加工における塑性変形と弾性変形の貢献度を相対的に評価するため、塑性ひずみおよび弾性ひずみを、それぞれ固有ひずみとして与えたときの円板の高さの比、 h^p/h^e に注目し結果を整理したものが Fig. 7 である。同図の横軸は加工度を表し、この場合は板に生じる最大曲げひずみに対応する t/R を加工度を表すパラメータとして採用している。このようなパラメータの導入により、

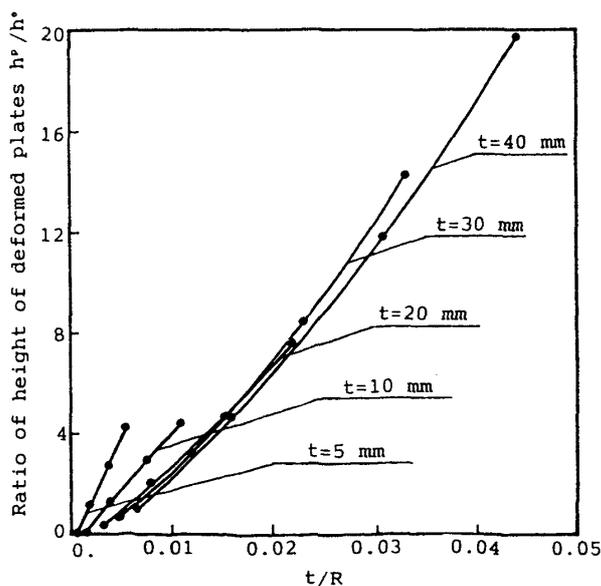


Fig. 7 Relative contributions of plastic and elastic strains for forming sphere.

それぞれ異なった板厚に対する結果がほぼ同一曲線上に重なる。なお、わずかに見られる曲線間の差は、もう一つの幾何学的パラメータ a/R の差による。したがって、もし、 a/R が同一であれば相似性が成立し、全ての曲線が一致するものと予想される。図より明らかなように h^p/h^e の値は、パラメータ t/R の増加と共に増加する。これは、板厚 t が大きい程、また、曲面の曲率半径 R が小さい程、スプリングバックの対的大きさは小さくなることを示している。なお、同様の考察は文献⁴⁾にも報告されている。

3.4 面内ひずみと面外ひずみ

第 2 段階の計算で面内ひずみまたは曲げひずみのみをそれぞれ固有ひずみとして与えた時の結果を比較する。Fig. 8 および Fig. 9 は、面内ひずみおよび曲げひずみを固有ひ

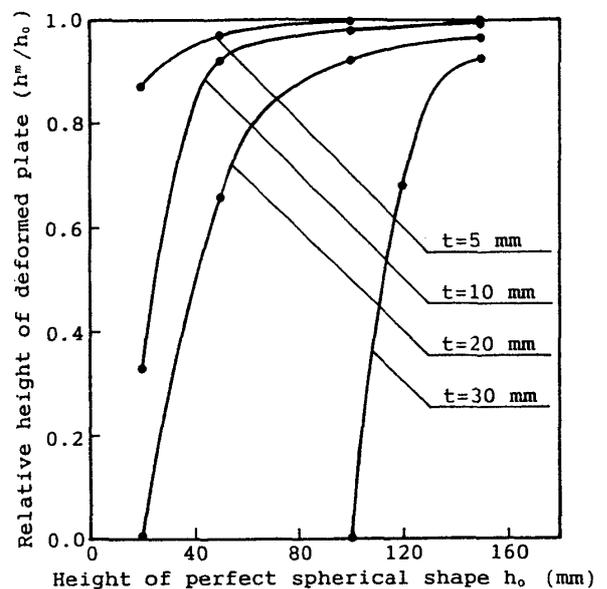


Fig. 8 Deformation of plate due to inplane strain.

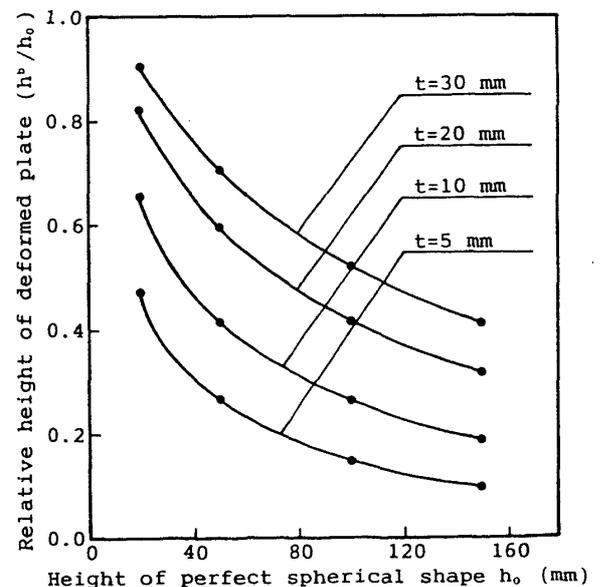


Fig. 9 Deformation of plate due to bending strain.

ずみとして与えた時の板の変形状態を解析し、円板の中心におけ高さの相対値 h^m/h_0 , h^b/h_0 とプレス型の高さ h_0 の関係を示している。

一般に、初期たわみの無い平板に面内の固有ひずみを与えても面外変形は生じないが、固有ひずみの大きさが限界値より大きい場合は、板は座屈し、面外たわみを生じる。例えば、Fig. 8 中の板厚 t が 20 mm で、プレス型の高さ h_0 が小さく 20 mm の場合は、固有ひずみが限界値に達していないために、座屈は生じない。それ以外のケースでは座屈が生じている。まず、加工度すなわち h_0 に注目すると、 h_0 が大きい程、面内のひずみが曲げ加工においてより支配的であることが分る。たとえば、板厚が 10 mm の場合に注目すると、 $h_0 > 60$ mm の時、変形の 90% 以上が面内のひずみによって形成されている。また、板厚について検討すると、薄板ほど面内ひずみの影響が大きい。

同様に、曲げひずみのみを固有ひずみとして与えた場合の結果が Fig. 9 に示されている。曲げひずみは、面内ひずみとは逆に板厚が大きく、 h_0 が小さいときにその影響が大きいことが分る。さらに、プレス加工における面内変形と曲げ変形の貢献度を相対的に評価するため、それぞれを固有ひずみとして与えたときの円板の高さの比 h^m/h^b に注目しパラメータ a^2/Rt について結果を整理したものが Fig. 10 である。なお、このパラメータは、球殻の最外部に生じる周方向の面内ひずみ ϵ^m と曲げひずみ ϵ^b の比に対応し、 ϵ^m , ϵ^b は次の関係を近似的に満たすことから導かれる。

$$\epsilon^m \propto (a/R)^2$$

$$\epsilon^b \propto t/R$$

板厚の大きさにかかわらず Fig. 10 中に描かれた各曲線はほぼ重なり合うので、同図を用いて一般的な考察を行うことができる。すなわち、 h^m/h^b の値は、パラメータ a^2/Rt

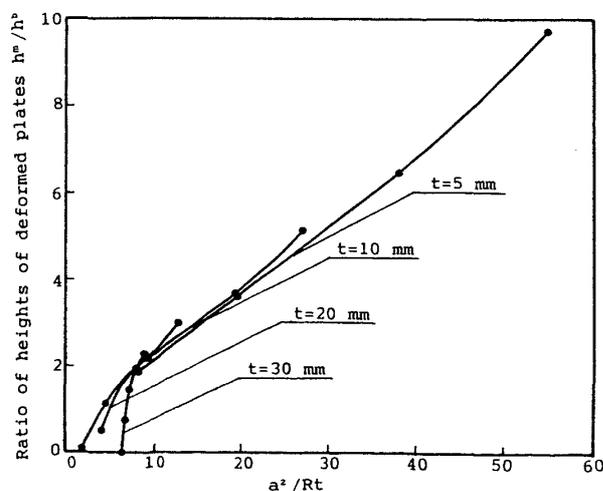


Fig. 10 Relative contributions of inplane and bending strains for forming sphere.

の増加と共に増加する。これは、板厚 t および曲面の曲率半径 R が小さい程、曲げ加工において面内ひずみの果たす役割が曲げひずみと比較して大きいことを意味する。このことは、効果的な曲げ加工を行う際の一つの指針として、 a^2/Rt が小さい領域では曲げひずみを、また、 a^2/Rt が大きい領域では面内ひずみを意識的に活用すべきであることを示唆している。

4. 部分球殻の成形

前章では、プレス成形を例に、面内および面外固有ひずみと曲げ加工、さらにはスプリングバックについて一般的考察を行ったが、この章では対象を線状加熱に移し、加熱位置、方向、付与すべき固有変形の大きさを決定するための方法を検討する。

4.1 線状加熱位置と方向の決定

固有変形として面内収縮のみを考慮した場合については幾何学的条件から加熱位置および付与すべき縮み量を決定することができる。しかし、一般には、面内および曲げ固有ひずみの両方を状況に応じて適宜使い分ける必要があり、また、ロール加工やプレス加工による一次曲げ加工を受けた部材の二次曲げ加工等への対応性を考えると、幾何学的な計算に基づく手法には限界がある。一方、曲げ加工を現象に忠実に模擬するという点においては有限要素法は優れており、最近の EWS 等の性能向上とあいまって日常的な道具の一つとなっている。そこで、この研究では、FEM による弾性たわみ解析に基づき、線状加熱の位置および固有変形量を決定する方法の可能性を検討した。

加熱位置および方向は次の手順に従って決定する。

前準備

- (1) 初期形状（一次曲げ後の形状でも良い）と最終成形形状に関する幾何学的情報の入力。
- (2) 初期形状に対応した FEM のメッシュ分割。

加熱位置および方向の決定

- (3) 初期形状から最終形状まで強制的に弾性変形させ、その過程で生じるひずみを計算する。
- (4) 計算されたひずみを面内成分と曲げ成分に分離し、それぞれの主ひずみ分布をグラフィック画面に表示する。
- (5) 面内のひずみ分布に注目し、圧縮の主ひずみが大きい領域を加熱領域に選び、加熱の方向は主ひずみの方向に垂直な方向とする。
- (6) 曲げひずみの分布に注目し、曲げひずみの絶対値が大きい領域を加熱領域に加え、加熱の方向はひずみの絶対値が最大である主方向に垂直な方向とする。

4.2 付与すべき固有ひずみの種類と大きさの決定

固有変形量は、Fig. 2 に示されたように板に切り込みを入れ、平面展開した時の隙間に対応しており、この切り込みを模擬するため、加熱位置にある要素の弾性係数を他の部

分の1/1000に設定する。この状態で、初期形状から最終形状までの変形を弾性解析すると、本来、板全体に分散しているひずみが、加熱部分に集中し、その値は線状加熱で与すべき固有ひずみあるいは固有変形の大きさを与える。

4.3 具体例

モデルケースとして前章と同様、円板を部分球殻に加工する問題を採用する。まず、円板を一様弾性体と仮定して初期形状から最終形状まで変形させた時のひずみを計算した。計算で得られた面内ひずみの分布を $a=500$ mm, $t=20$ mm, $h_0=100$ mm の場合を例に示したものが Fig. 11 である。図中の矢印はひずみの主方向と大きさを表す。最大圧縮ひずみの方向は、円周方向であるから、加熱はこれに直

角の半径方向でなければならない。また、分布は円周方向に一樣であるから、加熱間隔は円周方向に等間隔でなければならないことが分る。一方、曲げひずみの値はほぼ、 $t/2R = 7.7 \times 10^{-3}$ で一樣分布している。したがって、曲げひずみの分布からは特に優先的な加熱位置は決まらない。なお、この例では、面内圧縮ひずみの絶対値の最大値は、 1.6×10^{-2} であり、面内ひずみが支配的になっている。以上の考察から、加熱線を模擬した弾性係数が小さい要素すなわち加熱領域要素の位置を Fig. 12 のように定める。

次に、固有変形の量を求めるために、Fig. 12 に示されたモデルの変形解析を行った。その結果、Fig. 13 のような面内固有ひずみの分布が得られた。図から明らかなように、圧縮のひずみは加熱領域の要素にほとんど集中している。この結果に基づき、加熱領域にある要素のひずみを積分す

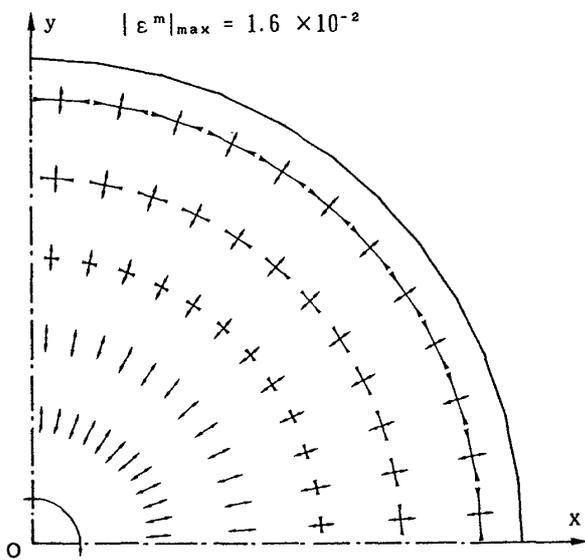


Fig. 11 Distribution of inplane strain ($t=20$ mm, $h_0=100$ mm, $R=1300$ mm).

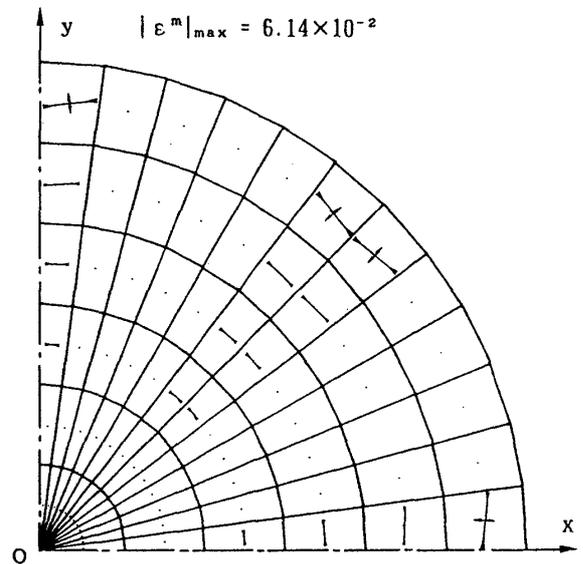


Fig. 13 Inplane strain distribution in plate with heating zone ($t=20$ mm, $h_0=100$ mm, $R=1300$ mm).

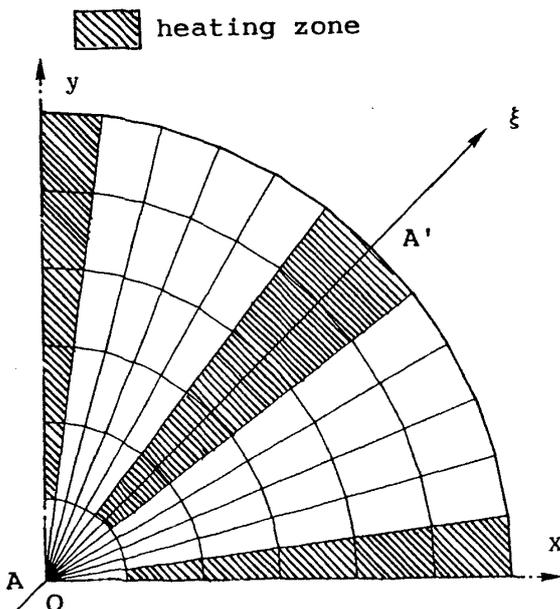


Fig. 12 Location of heating zone.

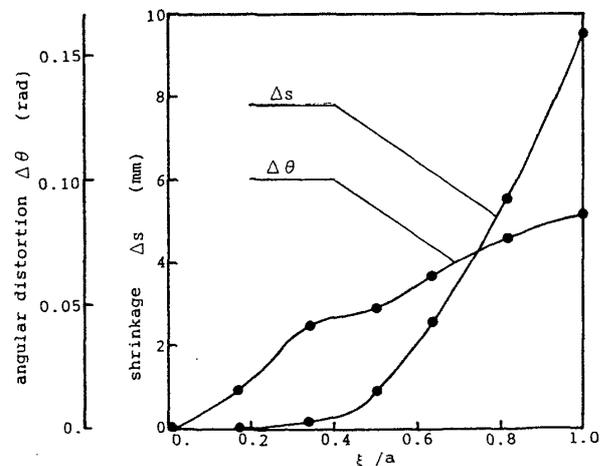


Fig. 14 Distribution of shrinkage Δs and angular distortion $\Delta \theta$ along A-A'.

ることにより固有変形量が求まる。このようにして求めた縮み量 Δs および角変形量 $\Delta \theta$ の A-A' 線上の分布が Fig. 14 に示されている。

上記のような方法で、加熱領域に付与すべき固有ひずみあるいは固有変形が求まったので、検証の意味でこれをたわみの無い円板に与え、これによる変形を解析した。この計算では、加熱領域の要素に生じているひずみのみを固有ひずみとして与えた。また、面内および曲げの固有ひずみの影響を比較するため、全ひずみを与えた場合、面内あるいは曲げひずみのみを与えた場合の三つの場合について計算を行った。

まず、Fig. 15 は、加熱領域内の全ひずみを固有ひずみとして与えた結果、変形した円板の中央点での高さ h^* を示している。いずれの場合も、目的の形状であるの球殻の高さ h_0 よりも h^* は小さい値に止まっている。これは、加熱領域以外の要素に生じたひずみは固有ひずみとして考慮されていないためである。その影響は、板厚が厚く、加工度、すなわち h_0 が小さい場合大きい。前章での考察と対比させると、 h^*/h_0 が小さいケースは、曲げの固有ひずみが支配的なケースに対応している。

面内ひずみおよび曲げひずみをそれぞれ単独に与えた結果が Fig. 16 および Fig. 17 に示されており、板厚が小さく、球殻の高さ h_0 が大きい時には、加熱領域に集中させた面内ひずみのみで目的とする形状の約 90% を実現することができる。しかし、逆に板厚が大きく、 h_0 が小さい場合は、曲げひずみが支配的になるためその効果も考慮する必要がある。

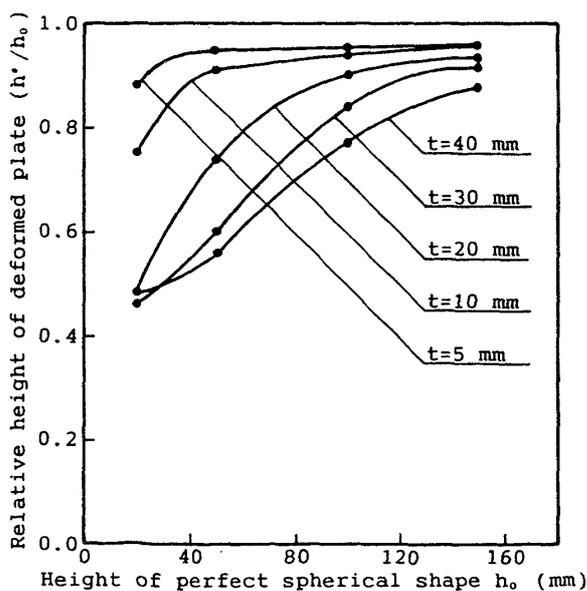


Fig. 15 Deformation of plate due to inherent strain concentrated in heating zone.

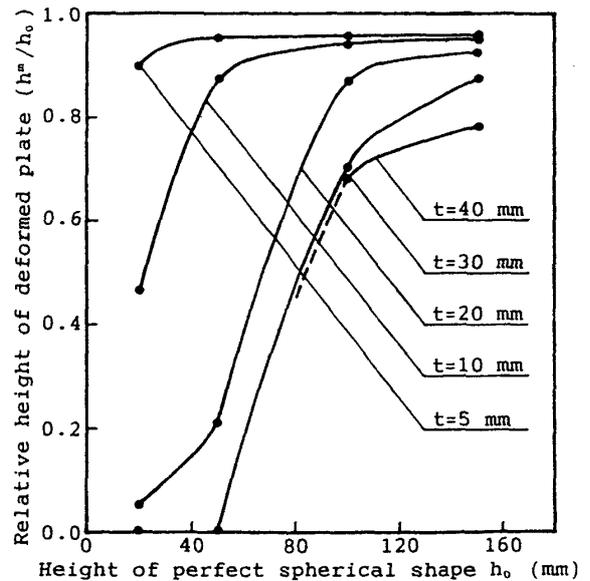


Fig. 16 Deformation of plate due to inplane inherent strain concentrated in heating zone.

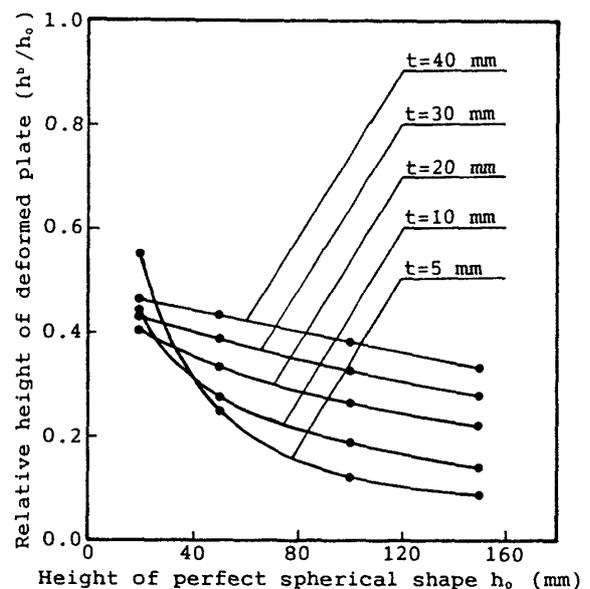


Fig. 17 Deformation of plate due to bending inherent strain concentrated in heating zone.

5. ドーナツ型曲面の成形

単純な球殻を例に、手法の概要を説明したが、ここでは、実船の曲がり部材に近い例題について検討する。実際の曲がり部材は、Fig. 18 のように、2 方向に曲率を有するドーナツ型曲面に近く、曲率半径 R および r の値を実船について調査した結果が文献⁴⁾に報告されており、その範囲は

$$-1.0 \times 10^{-4} < 1/r < 3.0 \times 10^{-4} \text{ (1/mm)}$$

$$0.0 < 1/R < 3.0 \times 10^{-5} \text{ (1/mm)}$$

である。実験等との相似則を考えると、板厚 t も考慮したパラメーター t/r , t/R で整理した方が良いので、実船の板

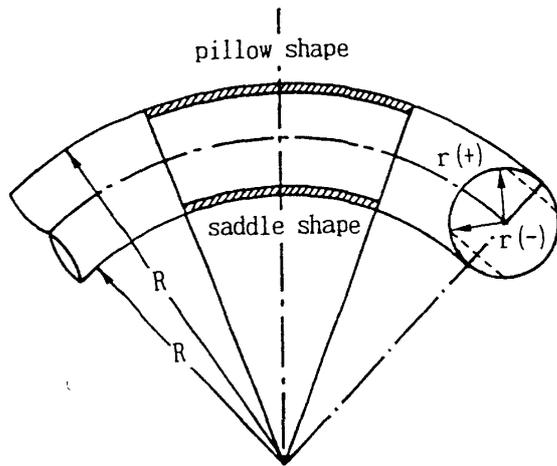


Fig. 18 Plates with doughnut shape.

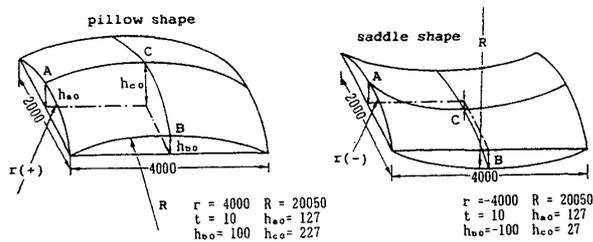


Fig. 19 Doubly curved plate models.

して得られた面内ひずみの、圧縮すなわち最小主ひずみの分布が Fig. 20 に示されており、絶対値の最大値は、 3.17×10^{-3} である。一方、曲げひずみは、短辺方向の曲げが支配的で、 $t/2r = 1.25 \times 10^{-3}$ に相当するひずみが、ほぼ一様に分布する。この場合は、面内ひずみと曲げひずみの大きさが同じオーダーであるので、面内の固有ひずみのみでは曲げ加工は不可能である。したがって、現場で実際行われているように、まず、ロールで短辺方向の一樣曲げを行い、その後、線状加熱する方法が有効である。そこで、ここでは一次加工で曲率半径 r の円筒状に成形された板を、長辺上の中央点での高さ h_{c0} が 100 mm の枕型に加工する工程を考える。Fig. 21 は、面内のひずみ分布を、主ひずみの分布として示している。一方、曲げひずみについて、表面の最大主ひずみの分布を示した図が Fig. 22 である。面内と曲げひずみ分布を比較すると、面内ひずみは x - y 平面上で大きく変化しているが、曲げひずみはほぼ一様である。また、ひずみの最大値に注目すると、面内および曲げひずみの最大値はそれぞれ、 3.15×10^{-3} 、 1.24×10^{-4} であり、この場合は、平板から成形する場合と比較して曲げひずみの大きさは減少し、面内ひずみの大きさより一桁小さくなっている。このように、面内ひずみが支配的であるので、加熱位置と方向を面内ひずみ分布から定めることにする。大きい圧縮ひずみが生じている部分をひずみの方向と垂直に加熱するとすれば、加熱領域は、Fig. 23 のよう定まる。同図は、中

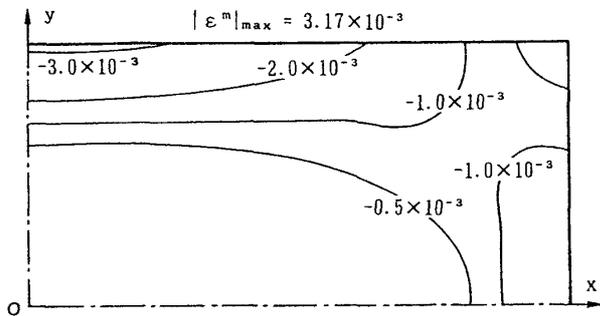


Fig. 20 Inplane strain distribution for plate formed from flat plate (pillow shape).

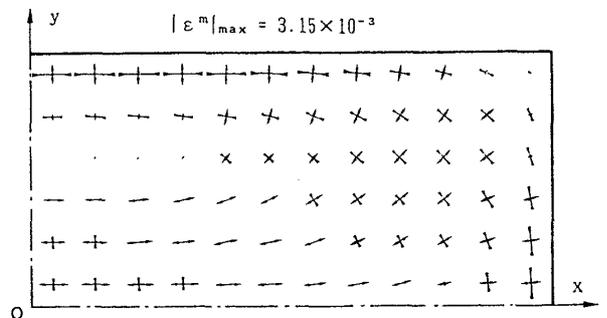


Fig. 21 Inplane strain distribution for plate formed from cylinder (pillow shape).

厚を約 20 mm とすると、パラメーターの範囲は、

$$-2.0 \times 10^{-3} < t/r < 6.0 \times 10^{-3}$$

$$0.0 < t/R < 6.0 \times 10^{-4}$$

となる。そこで、この範囲に含まれ、

$$t/r = \pm 2.5 \times 10^{-3}$$

$$t/R = 5.0 \times 10^{-4}$$

である二つのケースを検討する。それらの、寸法および曲率が Fig. 19 に示されており、一つは同方向の曲率を有する枕型、他方は曲率の方向が異なる鞍型である。

まず、枕型の曲面を平板から加工すると想定して、切り込みを入れない状態でのひずみ分布を計算した。なお、解析は対称性を考慮し板の 1/4 について行った。計算結果と

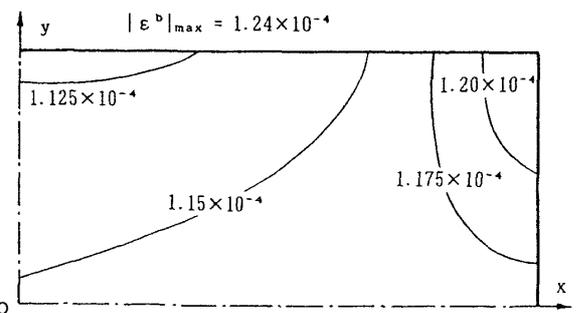


Fig. 22 Bending strain distribution for plate formed from cylinder (pillow shape).

心部を残し、板の周辺部を加熱すべきであることを示しており、これは、現場での実際の作業と対応している。なお、Fig. 21 に示されたように、板の中央部で x 軸に沿った位置にかなりの大きさの引張りひずみが生じている。この引張りひずみの影響も固有ひずみに取り入れるため、加熱領域に引張りが生じる部分を一部含めた。次に、加熱領域のヤング率が他の $1/1000$ であるとして変形解析を実施し、得られた面内ひずみ分布が Fig. 24 に示されている。ひずみは、ほとんど加熱領域に集中しており、Fig. 21 に見られた引張りひずみは消えていることが分る。さらに、加熱部のひずみを固有ひずみとして円筒板に与えたときの変形を計算した。その結果が板の A, B, C 点の高さ h_a, h_b, h_c について Table 1 に示されている。

同様に、円筒から鞍型を成形する場合を検討した。まず、枕型と同様、円筒から鞍型に変形させた時のひずみを解析した。曲げひずみ分布は、枕型と絶対値がほぼ同じで符号が逆の分布となるので、面内ひずみ分布のみを Fig. 25 に

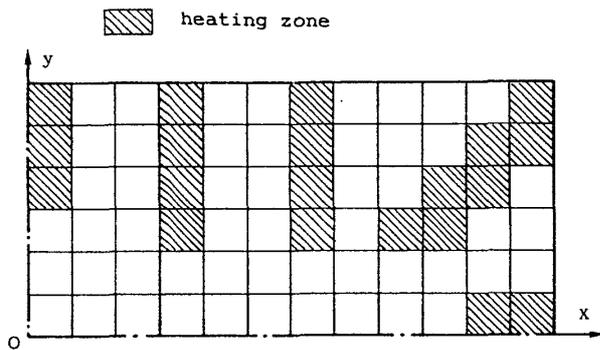


Fig. 23 Heating zone for forming pillow shape.

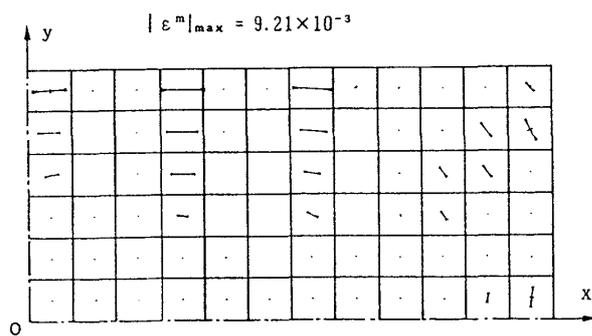


Fig. 24 Inplane strain distribution with heating zone (pillow shape).

Table 1 Geometry obtained by applying inherent strain.

	pillow (mm)	saddle (mm)
h_{oa}/h_a	127.0/124.8	127.0/109.4
h_{ob}/h_b	100.0/100.2	-100.0/-79.7
h_{oc}/h_c	227.0/219.5	27.0/54.2

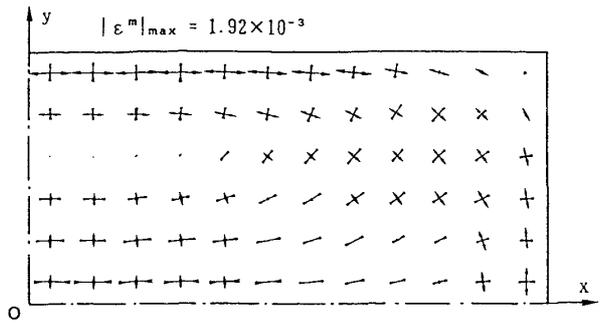


Fig. 25 Inplane strain distribution for plate formed from cylinder (saddle shape).

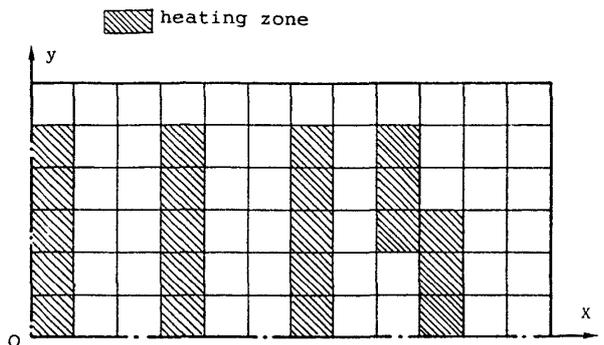


Fig. 26 Heating zone for forming saddle shape.

示している。このひずみ分布を基に、加熱領域を Fig. 26 のように定め、固有ひずみの計算、さらに、固有ひずみを与えたときの変形を解析した。その結果が、枕型の場合と合わせて Table 1 に示されている。Table 1 に基づき、固有ひずみを与えることにより得られた形状について検討すると、円筒にさらに付与したい変形量、すなわち h_0 が 100 mm であるのに対し、枕型の場合は各点における高さの誤差が約 8 mm 以内の形状が得られている。一方、鞍型の場合はやや誤差が大きく、その値は 17~27 mm である。このことは、場合により、成形誤差が相対的に大きくなることもあるが、ここで考案した方法が、実際の板曲げ加工に対しても有効な方法となり得ることを示している。なお、単に予測された固有ひずみを与えるのみでは、100%目的とする形状は得られないので、さらに微調整の手順を今後の課題として考える必要がある。

6. 結 言

線状加熱による板曲げ加工では、まず、加熱位置、方向および加熱によって付与すべき固有変形の大きさを事前に把握しておく必要があり、次に、所定の固有変形を得るための加熱、冷却条件を決定しなければならない。本論文では、有限要素法を用いて、線状加熱の位置、方向、および固有変形の大きさを決定する方法を考案し、その有効性を検証した。そのために、プレス加工を例に、曲げ加工にお

ける、面内ひずみおよび曲げひずみの役割、また、スプリングバックに関する一般的な特性を検討した。さらに、得られた知見を基に、著者らが考案した方法の有効性を、部分球殻、枕型、鞍型の2方向曲がり部材を対象に検証し、以下の結論を得た。

- (1) 線状加熱による曲げ加工では、目的とする形状により、適宜、面内と曲げの固有変形を使い分ける必要がある。
- (2) 部分球殻作成の例では、板厚が薄く曲げ加工の曲率が大きい程、すなわちパラメーター a^2/Rt が大きい程、面内の固有変形が支配的となる。したがって a^2/Rt が大きい曲げ加工には縮み変形を主体とした線状加熱が効果的である。
- (3) 初期形状から目的とする最終形状までの変形を弾性解析し、面内および曲げひずみの主方向および大きさから、線状加熱の位置と方向を決める方法の有効性を、枕型、鞍型の成形について確認した。これらの例では、ロールによる一次加工の必要性についても的確な情報が得られた。
- (4) 線状加熱領域を切り込みに想定し、線状加熱で付与すべき固有変形量を決定する方法の、有効性と適用限界を数値計算により検討した。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、藤野宏氏（石川島播磨重工業（株）船舶海洋事業本部生産技術部部长）から種々の御支援および貴重な御討論を頂いたことを記し謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 矢村：曲面成形加工に必要な板材の伸縮量の近似計算式(第1報)，造船協会論文集，第96号，pp.143-156，(1954)。
- 2) 石川島播磨重工業造船部：線状加熱板曲加工法(第1報)，石川島技報，第11巻35号，pp.54-62，(1954)。
- 3) 佐藤，松井，寺井，岩村：線状加熱板曲げ加工における水冷の効果，日本造船学会論文集，第126号，pp.445-458，(1969)。
- 4) 西岡，西牧，松石，田中，安川，山内，東郷：ユニバーサル多点プレス法による船体外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) 荒木，井上，堀岡，安藤：線状加熱加工による鋼板の角変形量について，日本造船学会論文集，第133号，pp.343-348，(1973)。
- 6) Y. Iwamura and E. F. Rybicki: A Transient Elastic-Plastic Thermal Stress Analysis of Flame Forming, Journal of Engineering for Industry, pp. 163-171, (February 1973).
- 7) 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)。