

B22 ぎょう鉄による任意形状成形のための加熱条件決定方法の提案

新垣 宏司 (指導教員：柴原正和)

Proposal of Method to Decide Heating Condition on Forming Arbitrary Shaped Plate by Line Heating

by Koji Shingaki

Abstract

Forming of steel plate by line heating is the technique that uses residual deformation when steel plate is heated by using gas burner etc. This technique is used forming plates of the ship hull frequently. It is one of the techniques that automation is difficult because its deformation is complicated, and it is difficult to predict it. The deformation includes four kind of inherent deformation, and is influenced by heating area and order, cooling method etc. This makes its automation difficult. These inherent deformations which consist of inherent strain, in other words, plastic strain that remained after line heating. In this study, Inherent strain distribution that is necessary to make arbitrary shape from flat shape is calculated by using FEM elastic analysis, and it is changed into simple to be approximate it by residual deformation by line heating. Next, combination of heating condition that approximates it is chosen from inherent deformation database of line heating. Its precision is verified by using FEM thermal elastic-plastic analysis, and method of choosing heating condition is not made is examined.

1. 緒言

船舶の船首、船尾部における複雑な曲面形状は、複数の鋼板に対して曲げ加工を行い、それらを溶接で接合することにより製作される。その多くが腕型、鞍型、捩れ型等の非可展曲面である。平らな鋼板を非可展曲面に加工するためには曲げと同時に絞り（縮めること）が必要となる。そこで、ぎょう鉄の手法として線状加熱が用いられる。線状加熱によるぎょう鉄は表面をガスバーナーで加熱した際に発生する熱変形を利用するものであり、現在国内の多くの造船所で採用されている技術である。その変形は縦・横収縮、縦・横曲がり混在する複雑なものであり、入熱量や速度、加熱位置等にも依存するため、予測が難しい。現在まで様々な研究が行われてきたが、その自動化が困難とされる技術の一つである。また、この造船固有の技能である線状加熱によるぎょう鉄は習得するのに10年以上を要すると言われている。技能者の知識と経験の基に成り立っているのが現状であるが、近年のベテラン層の減少に伴ってその技能伝承が問題となっている。

そこで本研究では、線状加熱によるぎょう鉄の自動化を目指し、FEM弾性解析を用いた変形シミュレーションによる、線状加熱によるぎょう鉄によって任意形状を成形するための加熱条件選定方法、および修正加熱条件選定方法の提案、さらにFEM熱弾塑性解析によってその妥当性について検証し、対象形状を成形するための加熱条件の決定を目的とする。

2. ぎょう鉄による任意形状成形のための加熱条件決定方法の提案

本研究の目的である、平板から任意形状を成形するための作業概要をFig.1に示す。

- ① 設計曲面形状を目的形状として決定する。
- ② 目的形状を平面へ強制変形させる FEM 弾性解析を用いて計算されるひずみ分布より、平板を目的形状に変形させるのに必要な目的固有ひずみ分布を求める。
- ③ 適当な加熱条件と固有変形4成分の関係を、データベースとしてまとめておく。その中から、②で求めた目的固有ひずみ分布を近似的に実現するような加熱線の組み合わせを選定する。
- ④ ③で選定した加熱条件を用いて、得られた展開形状に対して線状加熱を行う。その結果、目的形状と実形状との間に差が生じた場合、②及び③の処理を再度行い、修正する。なお、本研究においては線状加熱の代用として、FEMを採用した。
- ⑤ ④の処理を繰り返すことによって、任意の目的形状を得るための加熱条件を決定する。

3. FEM弾性解析による目的固有ひずみの算出

平板を目的形状に変形させるために必要な、平板に与えるべき固有ひずみ分布を目的固有ひずみ分布と呼ぶ。本来、目的固有ひずみは塑性ひずみであるが、本研究では、目的形状を平面へ強制変形させる FEM弾性解析により、その際に発生した弾性ひずみの正負を逆にしたものを、目的固有ひずみとして取り扱う。

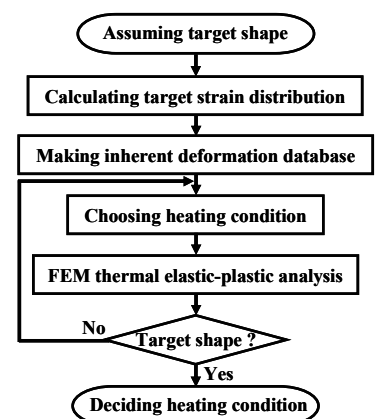


Fig.1 Outline of method to decide heating condition.

3.1 目的固有ひずみの算出方法

まず任意の曲面を節点座標で定義し、FEM 弾性解析により各節点の z 座標 (板厚方向) がすべてゼロとなるような強制変位を与えて計算を行い、曲面を初期形状 (平板) へと強制変形する。このとき、各要素において x, y 軸方向垂直弾性ひずみ ϵ_x, ϵ_y 及び xy せん断弾性ひずみ γ_{xy} を求める。さらに、中立面からの距離を z とする任意の点の $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ は固有ひずみの面内成分 $\epsilon_x^*, \epsilon_y^*, \gamma_{xy}^*$ 及び面外成分 κ_x^* (x 軸方向の曲げ曲率), κ_y^* (y 軸方向の曲げ曲率), κ_{xy}^* (捩率) を用いて下式のように表される。

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \epsilon_x^* - z\kappa_x^* \\ \epsilon_y &= \epsilon_y^* - z\kappa_y^* \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xy}^* - z\kappa_{xy}^* \end{aligned} \quad (3.1)$$

各要素上下面のガウス点において求められるこれらの値の和および差をとり、その平均値を求めることにより、曲面を平板へ展開した際に発生する各要素における 6 成分の固有ひずみを求める。さらに全要素に対してこの計算を行い、板全体に亘る目的固有ひずみ分布を求める。

3.2 任意形状に対する目的固有ひずみの算出

Fig.2(1), (2), (3)に示す 3 種の鋼板を模擬したモデルについて強制変形計算を行い、固有ひずみ分布を算出した。解析には 4 節点アイソパラメトリックシェル要素を用い、要素数を 100, 節点数を 121, 板厚を 16mm とした。さらに各節点座標の定義域を $-500\text{mm} \leq x \leq 500\text{mm}$, $-500\text{mm} \leq y \leq 500\text{mm}$ として z 座標を、(1)鞍型, (2)碗型, (3)捩れ型それぞれに関して式(3.2), (3.3), (3.4)で定義した。また、中央の節点座標は (0,0,0) とした。

$$z = (x^2 - y^2) / (5.0 \times 10^3) \quad (3.2)$$

$$z = (x^2 + y^2) / (5.0 \times 10^3) \quad (3.3)$$

$$z = xy / (5.0 \times 10^3) \quad (3.4)$$

Fig.2 で示した解析対象について、強制変形計算を行った結果から求められる主ひずみ分布, 主曲率分布を Fig.3, Fig.4 に示す。主ひずみ分布は全体的に不定であるのに対して、主曲率分布に関しては 3 種ともに、各要素において一様な分布をとることがわかる。

以下、これらの正負を逆にしたものを目的固有主ひずみ及び目的主曲率分布と呼ぶ。

3.3 目的固有ひずみにおける面内ひずみ成分の調整

線状加熱による残留変形は基本的にはせん断成分を含まない、加熱線方向と加熱線に垂直な方向の収縮と曲がりで表すことができる。そこで、目的形状を成形するための加熱線は、目的固有ひずみのせん断成分を排除した、主軸に垂直な方向に配置すればよいと考えられる。

目的固有ひずみ分布を近似するような加熱条件を選定するにあたり、目的固有主ひずみと目的主曲率の主軸の方向を一致させることができれば、選定する加熱線の方法を単純に 2 本の主軸に垂直な、2 方向 1 組に定めることができる。そこで、面内成分の主軸を、面外成分の主軸と一致させるように調整することを考える。Fig.5 は目的固有ひずみの面内成分調整方法の概略図であり、その手順を次の①~⑤に示す。

① 目的固有主ひずみと目的主曲率, 双方の主軸の方向 θ, ϕ を一致させる, つまり $\theta = \phi$ とするためには、主軸の方向の定義から、下式が成り立てばよい。

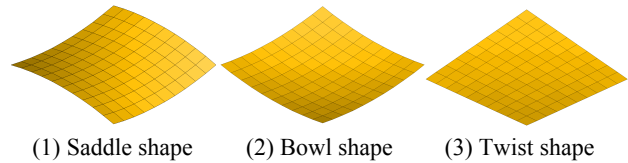


Fig.2 Analytical model for FEM elastic analysis.

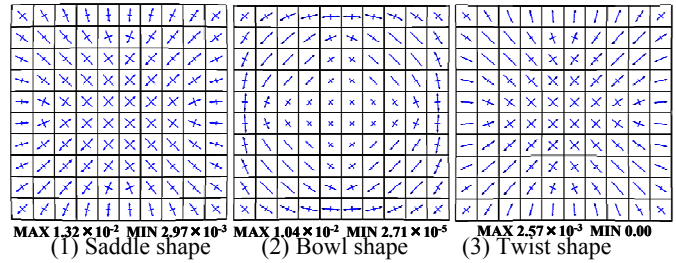


Fig.3 Principal strain computed by FEM.

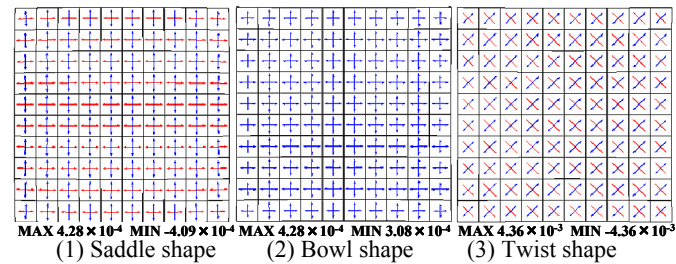


Fig.4 Principal curvature computed by FEM.

$$\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\gamma_{xy}^*}{\epsilon_x^* - \epsilon_y^*} \right) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\kappa_{xy}^*}{\kappa_x^* - \kappa_y^*} \right) \quad (3.5)$$

さらに、

$$\gamma_{xy}^* = \frac{\kappa_{xy}^*}{\kappa_x^* - \kappa_y^*} (\epsilon_x^* - \epsilon_y^*) \quad (3.6)$$

として、面内のせん断成分 κ_{xy}^* を置き換える。この置き換えを行った目的固有ひずみ分布を $\{\epsilon^*\}$ とする。このとき $\{\epsilon^*\}$ は、厳密には目的形状を成形するためのひずみ分布とはならないため、さらに以下の処理を行う。

- ② $\{\epsilon^*\}$ を初期ひずみとして平板へ与え、FEM 弾性解析により得られる形状を $\{u\}$ とし、目的形状 $\{u\}$ と $\{u\}$ の各節点の z (板厚) 方向座標の差を求める。
- ③ $\{u\}$ と $\{u\}$ に差がある場合、 $\{u\}$ を $\{u\}$ まで強制変形させる、FEM 弾性解析を行い、そのときの固有ひずみ増分の分布を求める。こうして得られる固有ひずみ増分の分布を $-\{\Delta\epsilon\}$ とする。
- ④ $\{\epsilon^*\} = \{\epsilon^*\} + \{\Delta\epsilon\}$ (面内の 3 成分のみ) として②の処理を再度行う。
- ⑤ 以上の処理を $\{u\} = \{u\}$ となるまで繰り返し、目的固有主ひずみと目的主曲率の方向が一致した、新たな目的固有ひずみ分布 $\{\epsilon^*\}$ を求める。

Fig.2 に示した主ひずみ分布に対して、以上の処理を (1) 鞍型と (2) 碗型に対して行い、求められる主ひずみ分布を Fig.6(1), (2) に示す。この処理により、成形のための加熱方向が定まった。

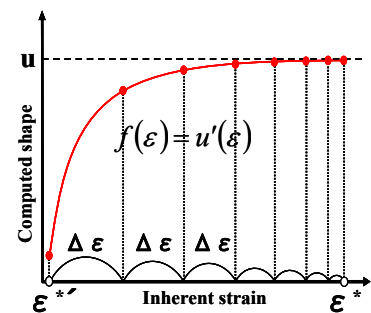


Fig.5 Method to converge temporary strain to target strain.

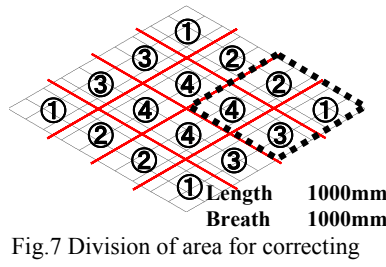
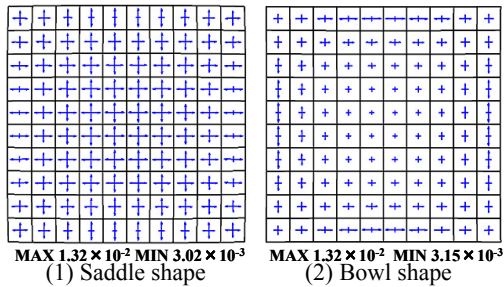


Table 1 Target inherent deformation into each area

Area	δ_x^*	δ_y^*	θ_x^*	θ_y^*
①	449.79	453.16	23.25	-23.25
②	344.40	585.17	23.48	-23.95
③	584.47	344.86	23.95	-23.48
④	594.10	593.65	24.47	-24.47

Table 2 Heating condition for each area for saddle shape

Area	Direction	Side	Speed(mm/s)
①	X	lower	4.6
		upper	2.7
	Y	lower	6.3
		upper	4.7
②	X	lower	2.7
		upper	4.0
	Y	lower	4.1
		upper	11.1
③	X	lower	11.1
		upper	4.0
	Y	lower	4.1
		upper	2.7
④	X	lower	3.2
		upper	3.6
	Y	lower	3.2
		upper	3.6

4. ぎょう鉄による任意形状成形のための加熱条件の選定

4.1 加熱条件選定方法

まず、展開形状を複数の領域に分割し、各領域における目的固有主ひずみと目的主曲率の計 4 成分の分布を求める。次に、各領域の目的固有変形量なるもの 4 成分 δ_x^* , δ_y^* , θ_x^* , θ_y^* を、領域内での目的固有ひずみの積分値として求める。添え字の X, Y は主軸方向を意味する。各領域において、固有変形量の総和が目的固有変形量を満足するような加熱線 (2 方向×3 本=6 本) の組み合わせを、固有変形データベースから求める。

4.2 目的固有ひずみを元にした加熱条件の選定

Fig. 7 は、(1)鞍型成形のための加熱条件を求めるための展開形状と領域分割を示しており、それぞれに①から④までの番号を割り当てている。各領域の寸法は展開形状を長さ方向、幅方向に均等に 4 分割したものとした。目的形状である(1)鞍型が対称形状であり、その目的固有主ひずみ分布及び主曲率分布が対称に分布することを考慮すれば、同等の目的固有変形量を持つ実質 4 領域について考えればよい。Table 1 は各領域における目的固有変形量を示しており、Table 2 に前節のように選定した(1)鞍型成形のための各領域における加熱条件を、その方向、面、速度に関して示している。なお、用いた固有変形データベースは、FEM 熱弾塑性解析により、熱源の出力を一定とした複数の入熱速度における解析を行い、各速度における固有変形四成分をまとめたものである。

以下、このような加熱条件を一次加熱条件と呼ぶ。

5. FEM 熱弾塑性解析による提案手法の妥当性検証

5.1 一次加熱条件を用いた解析

Fig. 8 は解析に用いた FEM モデルと Fig. 7 に対応した領域番号を示している。Fig. 7 の破線部を考慮した展開形状の 1/4 モデルを用い、(1)鞍型が対称形状であることから、対称条件を考慮した拘束条件で解析を行った。また、Fig. 9(a), (b) は条件別に入熱箇所を模式的に示したものであり、矢印が加熱線 (点線は-z 側の面への入熱)、矢印始端の数字は入熱順序を表している。なお、入熱条件はガスバーナーによる加熱を想定したものをを用いた。

Fig. 10(a) は X 軸方向、つまり裏面(-z 方向の面)の入熱を全て終了後の形状、(b) は Y 軸方向も含めて入熱を全て終了後の形状における各節点の z 方向変位分布を、また、(c) は目的形状の板中央を基準とした z 座

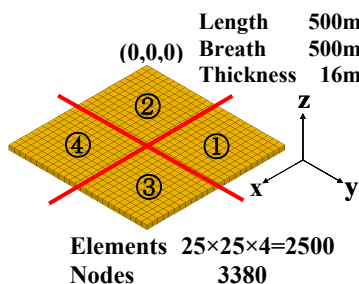


Fig. 8 1/4 FEM model for thermal elastic-plastic analysis.

標の分布を示している。(a)においては、裏面の X 軸方向の加熱線群による横曲りの影響で+z 方向に凸な円筒状の z 方向変位分布となっている。その後の表面の Y 軸方向の加熱線群による横曲りの影響で-z 方向に凸な変形が得られる。(b)と(c)を比較するとその分布は類似しており、一次加熱条件を用いた FEM 熱弾塑性解析によって、目的形状と定性的には一致した形状が得られたと言える。

Fig. 11(a) は y=0mm における xz 断面形状、(b) は x=500mm における yz 断面形状を、目的形状及び Fig. 10(a), (b) と同条件下の形状の 3 パターンで比較したものである。全加熱終了後の xz 断面形状、yz 断面形状における最大変位量に着目すると、目的形状に対してそれぞれ約 10%、約 23% 変位量が不足している。これは、加熱条件を選定する際、加熱線群間に単純な変形量の加算性が成り立つことを前提としており、先行の加熱線による変形や残留応力の影響により、後行の加熱線による変形量が、平板へ入熱することを想定した場合と比べて変化していることが原因であると考えられる。

5.2 修正加熱条件の選定と解析

修正加熱条件は、まず目的形状を一次加熱条件を用いた解析によって得られる形状まで強制変形させ、その後は一次加熱条件と同様に選定する。このとき、目的固有変形量はさほど大きな値とはならないため、一次加熱条件を選定した際とは異なり、板全体を 4 つの領域、対称形状であることを考慮して 1 つの領域(500mm 四方)に関して目的固有変形量を求めた。選定された修正加熱条件を一次加熱条件に加えた加熱条件を二次加熱条件とする。

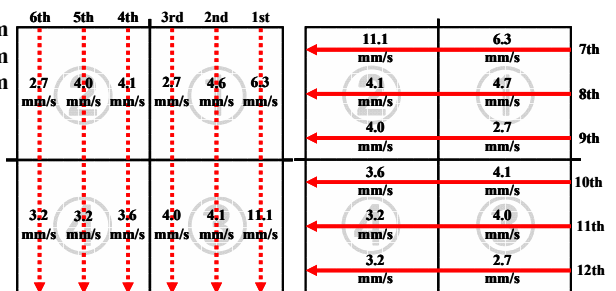


Fig. 9 Heating area and condition for saddle shape.

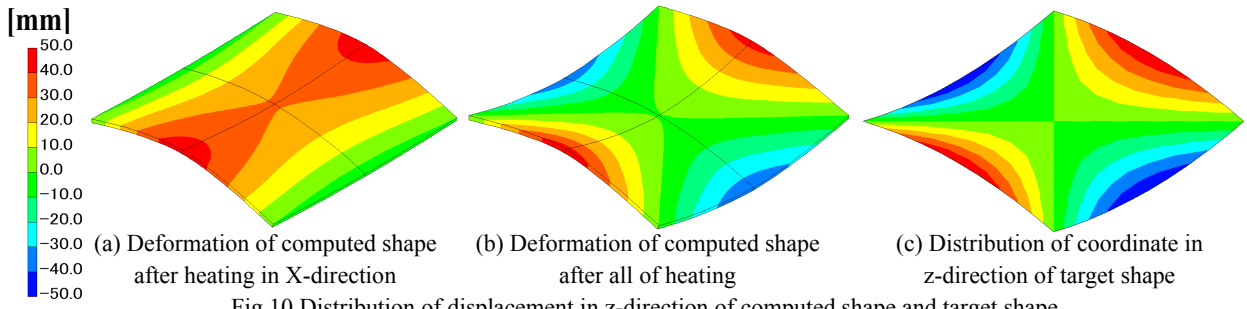
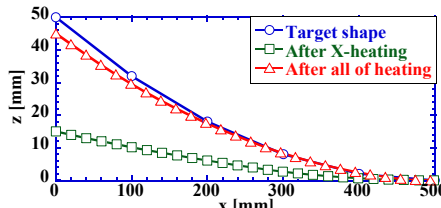


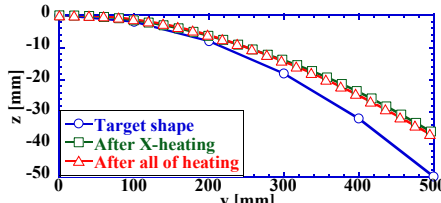
Fig.10 Distribution of displacement in z-direction of computed shape and target shape.

Table 3 Target inherent deformation and modified heating condition

(a) After 1st heating condition			
δ_x^*	δ_y^*	θ_x^*	θ_y^*
466.15	535.22	39.59	-33.45
Direction	Side	Speed(mm/s)	
X	lower	3.4	
	lower	6.2	
Y	upper	4.5	
	upper	5.4	
(b) After 2nd heating condition			
δ_x^*	δ_y^*	θ_x^*	θ_y^*
142.01	430.96	27.83	-19.70
Direction	Side	Speed(mm/s)	
X	lower	4.0	
	upper	8.7	
Y	upper	8.9	
	(c) After 3rd heating condition		
δ_x^*	δ_y^*	θ_x^*	θ_y^*
152.69	189.77	17.18	-10.99
Direction	Side	Speed(mm/s)	
X	lower	6.5	
	upper	7.6	
Y	upper	13.8	

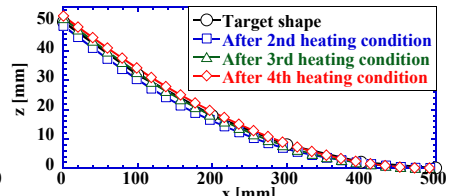


(a) Comparison of shape of x-z cross section

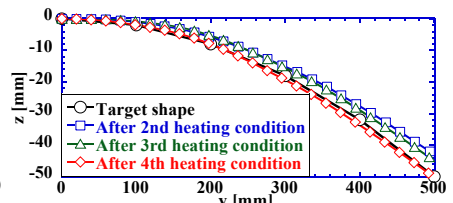


(b) Comparison of shape of y-z cross section

Fig.11 Comparison of shape of cross section after 1st heating condition.



(a) Comparison of shape of x-z cross section



(b) Comparison of shape of y-z cross section

Fig.12 Comparison of shape of cross section after 2nd and 3rd, 4th heating condition.

以上の処理を、一次を二次、二次を三次、三次を四次というように、目的形状との差が許容範囲に収まる

ような形状が得られるまで繰り返し、目的形状成形のための加熱条件を最終決定する。なお、元の加熱条件に修正加熱条件を加えて解析を行う際には、数本選定される修正加熱線を、板全体に対して等間隔に配置した。

Table 3(a), (b), (c)はそれぞれ一次、二次、三次加熱条件を用いた FEM 熱弾塑性解析によって得られる形状と目的形状との変位差から求められる目的固有変形量、及びそれによって選定された修正加熱条件を示している。これらを元の加熱条件に加えて、随時解析を行った。

Figure 12(a), (b)はそれぞれ二次、三次、四次加熱条件を用いた FEM 熱弾塑性解析によって得られる形状の $y=0\text{mm}$ における xz 断面形状、 $x=500\text{mm}$ における yz 断面形状の比較を示している。この比較から、修正加熱条件を加えていくにつれて、両者が目的形状に近づいていることがわかる。(a)の xz 断面形状については三次加熱条件を用いた解析によって、目的形状とほぼ一致した形状が得られている。(b)の yz 断面形状については、最大変位量だけに着目すると、修正加熱条件を加える毎に目的形状へと近づいているが、部分的に見ると、三次加熱条件まで、 $0\text{mm} \leq y \leq 100\text{mm}$ の範囲で曲げが不足しており、この部分的な不足が、全体の曲げの不足の主因となっていると考えられる。そこで、四次加熱条件での解析を行う際には、三次加熱条件で得られた形状を考慮し、明白に不足している局所的な変形が得られるように個々の修正加熱線を配置した。四次加熱条件による加熱終了後の断

6. 結 言

本研究では、線状加熱によるぎょう鉄によって任意形状を成形するための加熱条件選定方法、および修正加熱条件選定方法を提案、さらに FEM 熱弾塑性解析によってその妥当性について検証し、以下の知見を得た。

- 1) 平板から任意形状を成形するために必要な目的固有ひずみを算出し、その面内、面外成分の主軸を一致させることにより、加熱条件選定の方法を確立した。
- 2) 提案手法によって選定した一次加熱条件を用いて FEM 熱弾塑性解析を行った結果、定性的には目的形状と一致した形状が得られることを確認した。
- 3) 提案手法によって選定した修正加熱条件を用いて FEM 熱弾塑性解析を行った結果、今回目的形状とした鞍型に関しては、三回の修正を行った四次加熱条件を用いた解析で、目的形状とおおむね一致した形状が得られることを確認した。

参 考 文 献

- 1) 上田幸雄, Rashwan Ahmed Mohamed, 石山隆庸, 村川英一, 神近亮一, 小川潤一郎: 計算機支援板曲げ方案自動作成システムの開発 (第 4 報), 日本造船学会論文集第 174 号, pp683-695, 1993
- 2) 石山隆庸, 顧斯美, 小川潤一郎, 高倉大典: FEM を応用した線状加熱の精度向上の試み, 日本造船学会論文集第 180 号, pp731-738, 1996