

B19 線状加熱の自動化を目的とした 船体任意形状外板加工システムの開発

春木 大典 （指導教員：柴原・深沢）

Development of System For Forming Arbitrary Plates of Ship Hull to Automate Line Heating Process

by Daisuke Haruki

Abstract

Steel plates of the ship hull are mainly made by Line Heating. Curved plates of ships are divided into about three types of shapes that are called Bowl Shape, Saddle Shape and Twist Shape. These curved shapes are undevelopable surfaces, therefore bending and contracting are necessary for forming flat plates into undevelopable surfaces. The relation between the amount of contraction and flexure, and the amount of heating and angular distortion is non-linear, so it is difficult to automate the Line Heating process. There are a lot of study for automation of Line Heating, but in this way that heating line is located in the area that has a large curvature, orbiting paths tend to be complicated. Therefore, it is difficult to control the heating line. In this study, by replacing plastic strain with elastic strain based on the theorem of inherent strain, the author solves for distributions of inherent strain that is needed for bending flat plate, and in order to control heating lines in a linear manner, also solves for new distributions of inherent strain that is not contained shear strain, and chooses heat conditions from inherent deformation database of Line Heating, and by using FEM thermal elastic-plastic analysis, forms three type of shapes under simulated conditions.

1. 緒 言

船体の外板曲面は非常に巨大であり、プレス加工だけでは作ることができないため、古くから線状加熱によって作られてきた。それらの曲面形状は大きく碗型・鞍型・捩れ型に分けることができるが、いずれも非可展面であるため、線状加熱によって平板に角変形（曲げ）と同時に熱による収縮（絞り）を与えないと成形できない。よって、線状加熱による曲げ加工の技能は造船分野において欠かすことのできないものとなっている。しかし、絞りの量とその結果生じるたわみ量の関係や、入熱量と角変形のとの関係は非線形であり、予測が非常に困難なものとなっているため、線状加熱の技能を修得するのにおよそ10年から20年の時間が必要になると言われている。そのため、熟練工の知識と経験を基に成り立っているのが現状であるが、近年の急激な高齢化によって、その数も減少傾向にあり、その技能をいかに伝えていくということが問題となっている。よって、線状加熱の作業工程を自動化し、熟練工の判断に頼らなくとも目的形状を成形できる技術の確立は非常に重要である。

線状加熱における自動化の研究は以前から行われてきたが、曲率の大きな箇所に加熱線を置いているため、加熱線が複雑になってしまうことが多い。よって、自動化を行う際に加熱線の制御が困難となる。

そこで本研究では、塑性ひずみを固有ひずみ理論を根拠においた弾性計算で置き換えることによって、曲げ加工に必要な固有ひずみ分布を求め、さらに、加熱線を直線で制御できるようにするために、目的固有ひずみのせん断成分を排除した新たな目的固有ひずみ分布を求め、

そこから任意形状を成形するための加熱条件の選定し、FEM熱弾塑性解析を行うことで、シミュレーション上で任意形状を成形できるようなシステムの開発を目的とする。

2. システムの概要

本研究の目的である、平板から目的形状を成形するための作業概要を以下に示す。

- ① 目的形状を決定する。
- ② 目的形状を平面へ強制変形させる FEM 弾性解析を行い、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線状加熱で近似できるような加熱条件を選定する。
- ④ ③で選定した加熱条件を用いて、FEM熱弾塑性解析を行う。そして、計算形状と目的形状との間に差が生じた場合、計算形状と目的形状が一致するまで②と③の操作を繰り返す。

3. FEM 弾性解析による目的固有ひずみの算出

3.1 目的固有ひずみの算出方法

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。

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 ε_x , ε_y , γ_{xy} は固有ひずみの面内成分 ε_x^* , ε_y^* , γ_{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。

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

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

船舶の基本形状となる形状は、碗型・鞍型・捩れ型の 3 種類であるが、本研究ではその 3 種類の基本形状に対して強制変位を与えて、目的固有ひずみを算出した。このとき、全モデル中央の節点座標を $(0, 0, 0)$ 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.1 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.2, Fig.3 に示す。主ひずみ分布は一定の傾向を示さないが、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が、Fig.2 に示した主ひずみ分布はいずれもせん断成分を含んでいるため、このままでは xy 方向のみの加熱によって目的形状を成形するのに必要な固有ひずみ分布を作り出すのは難しい。そこで、加熱条件を選定するに当たって、目的固有ひずみのせん断成分を排除した新しい目的固有ひずみ分布を求めることができれば、 xy 方向の加熱で目的形状を成形することができる。その手順を、次の①～⑤に示す。

① 正の値だけで表された目的固有ひずみに対して、

$$\gamma_{xy}^* = 0 \quad (3.5)$$

として、面内のせん断成分 γ_{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 6 成分を $\{\varepsilon^*\}$ とする。

② せん断成分を排除した $\{\varepsilon^*\}$ を初期ひずみとして平板へ与え、FEM 弾性解析を行って得られる形状を $\{u'\}$ とし、目的形状 $\{u\}$ と $\{u'\}$ の各節点の z (板厚) 方向座標の比較を行い、差を求める。

③ $\{u\}$ と $\{u'\}$ に差がある場合、 $\{u\}$ を $\{u'\}$ まで変形させる FEM 弾性解析による強制変形計算を行い、そ

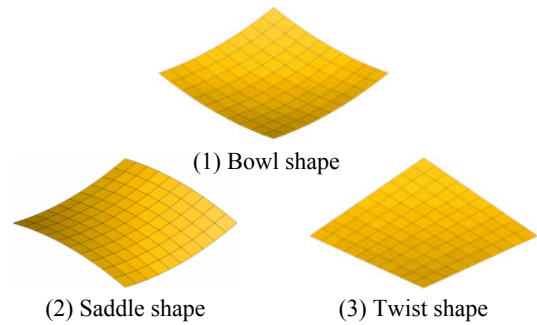
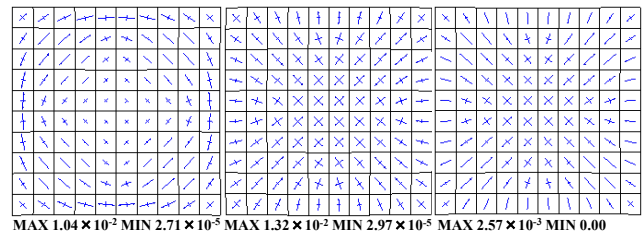
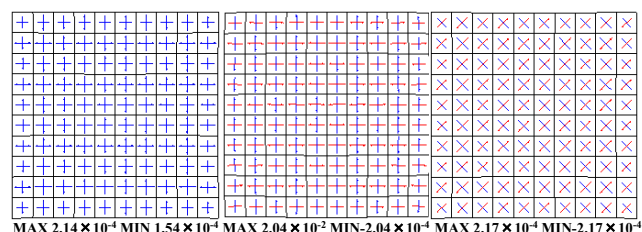


Fig.1 Analytical model for FEM elastic analysis.



(1) Bowl shape (2) Saddle shape (3) Twist shape

Fig.2 Principal strain computed by FEM.



(1) Bowl shape (2) Saddle shape (3) Twist shape

Fig.3 Principal curvature computed by FEM.

のときに発生する固有ひずみ分布を求める。さらに、その固有ひずみ分布の正負を逆にしたものに対して、①と同様の処理を行う。こうして得られる固有ひずみ分布を $-\{\Delta\varepsilon\}$ とする。

- ④ $\{\varepsilon^*\} = \{\varepsilon^*\} + \{\Delta\varepsilon\}$ (面内成分のみ) として、②の処理を再度行う。
- ⑤ この処理を $\{u\} \leftarrow \{u'\}$ となるまで繰り返し、せん断成分を排除した、新たな目的固有ひずみ分布 $\{\varepsilon^*\}$ 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 3 種類の形状に対して行い、求められる主ひずみ分布を Fig.4 に示す。この処理により、成形のための加熱方向が定まる。

4. 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の 4 成分 δx^* , δy^* , θx^* , θy^* 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 $\times$ 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。

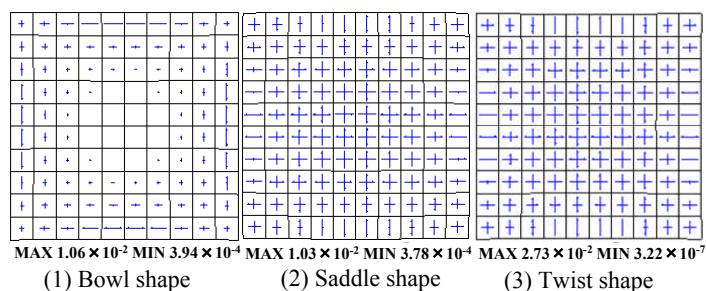


Fig.4 Modified principal strain distribution.

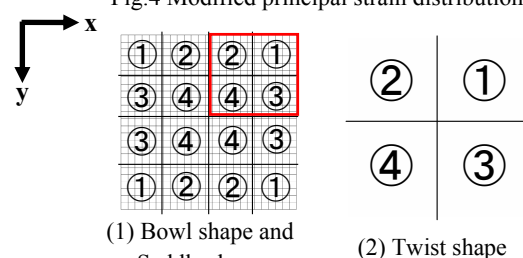


Fig.5 Division of area for correcting heating condition.

4.2 目的固有ひずみを元にした加熱条件の選定

Fig.5 は、加熱条件を求めるための展開形状の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。展開形状は 1000mm 四方の平板とし、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。ただし、分割数はこの限りではない。Fig.1 で示した 3 種類の基本形状については対称形状であるため目的固有ひずみ及び主曲率分布が対称に分布することを考慮すれば、①から④の 4 つの領域を考えれば良いことがわかる。ただし、捩れ型については対称条件をとれないために、全体形状を 4 分割することによって解析を進めた。分割数を長さ方向、幅方向に均等に 4 分割した場合に、目的固有変形量を近似する加熱条件をデータベースから選定すると、各領域における目的固有変形量は Table 1 のようになる。このようにして得られた目的固有変形量を近似するような加熱条件をデータベースを元に選定した。以下、このような目的固有変形量を近似する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目的形状の成形

5.1 一次加熱条件を用いた解析

Fig.6 は解析モデルであり加熱線の本数と方向を示している。碗型・鞍型については長さ 500mm、幅 500mm、板厚 16mm であり、捩れ型については長さ 1000mm、幅 1000mm、板厚 16mm であり、要素数と節点数は共通であり、それぞれ 2500 と 3380 である。Fig.7 の(1)、Fig.8 の(1)、Fig.9 の(1)、は 3 種類の形状に関する 1 次加熱条件を用いた解析で得られる形状における節点の z 座標変位の分布であり、Fig.10 は碗型・鞍型については y=0mm における xz 断面形状と x=0mm における yz 断面形状を比較し、捩れ型については x=500mm における yz 断面形状と x=-500mm における yz 断面形状を比較したものである。碗型については、碗型の傾向を示す形状は得られたものの、xz 断面、yz 断面共に変位が不足するという結果になった。これは、加熱条件の選定や、固有変形データベースの作成は全ての加熱線において、平板を加熱したという仮定の下で行われたが、実際はすでに加熱による変形が発生した状態で

Table 1 Target inherent deformation into each area

(1) Bowl shape

Area	δ_x^*	δ_y^*	θ_x^*	θ_y^*
①	232.02	236.27	22.67	22.69
②	341.29	102.53	23.83	22.91
③	100.99	342.69	22.90	23.83
④	93.58	93.93	24.26	24.26

(2) Saddle shape

Area	δ_x^*	δ_y^*	θ_x^*	θ_y^*
①	436.95	442.05	23.23	-23.23
②	334.62	570.27	23.95	-23.48
③	568.07	336.89	23.48	-23.95
④	577.51	578.49	24.47	-24.47

(3) Twist shape

Area	δ_x^*	δ_y^*	θ_x^*	θ_y^*
①	2005.20	2000.12	0.23	0.81
②	2005.19	2000.25	-0.22	-0.83
③	2006.08	1999.15	0.24	-1.13
④	2005.95	1999.49	-0.10	1.14

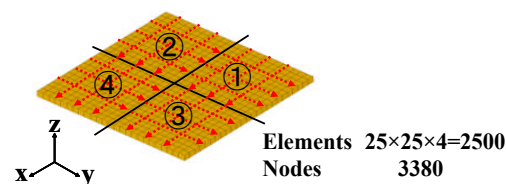


Fig.6 FEM model for thermal elastic-plastic analysis

Table 2 Target inherent deformation for modified heating condition

(1) Bowl shape

	δ_x^*	δ_y^*	θ_x^*	θ_y^*
2nd heating	738.18	723.20	31.25	48.44
3rd heating	496.15	321.16	16.71	0.50

(2) Saddle shape

	δ_x^*	δ_y^*	θ_x^*	θ_y^*
2nd heating	1401.10	1290.79	10.33	-11.42
3rd heating	551.41	413.90	-30.02	-30.12

(3) Twist shape

	δ_x^*	δ_y^*	θ_x^*	θ_y^*
2nd heating	2302.71	4704.68	14.68	-45.66
3rd heating	2580.08	2735.64	-5.47	-26.57

加熱を行ったため、データベースから選定した条件では変形量が不足したためと考えられる。鞍型では、xz 断面、yz 断面共に定性的に一致した形状が得られたものの、碗型と同様に変位が不足するという結果になった。理由は碗型のととき同様であると考えられるが、碗型よりも精度が良いことがわかる。これは、加熱によって必要な収縮領域が碗型ではほぼ全体であるのに対して、鞍型では中心付近のみでよいという形状に依存した理由が考えられる。また、捩れ型については、捩れの傾向は見えていないものの、目的形状とは大きく異なった形状を示してしまっている。これは、領域数が碗型・鞍型に対して少なかったため精度が落ちてしまったと考えられる。よって、領域数を増やし、加熱線の本数を増やすことによって、全体の入熱量は変化させずに、加熱線 1 本当たりの入熱量を減らすといった操作により、精度の向上が期待できると思われる。

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

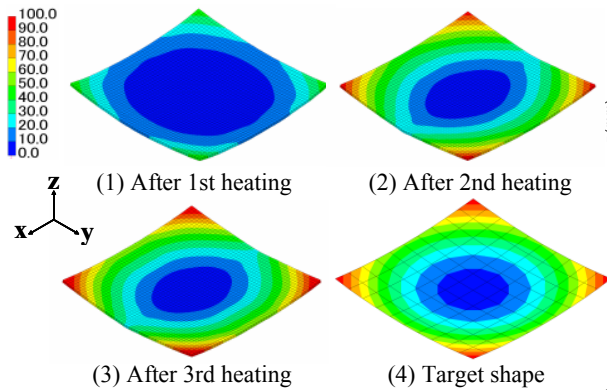


Fig.7 Distribution of coordinate in z-direction after heating in Bowl shape

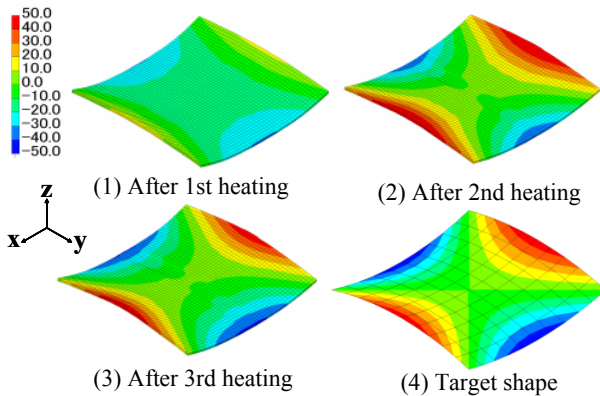


Fig.8 Distribution of displacement in z-direction after heating in Saddle shape

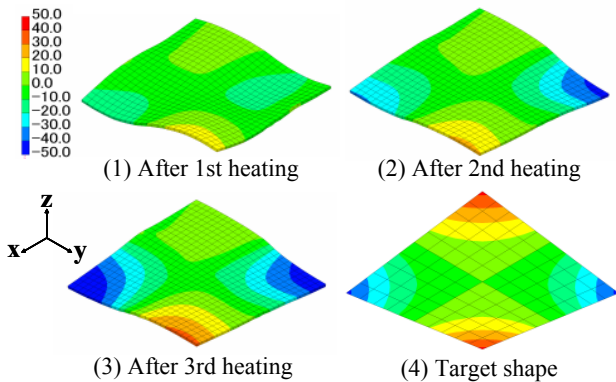


Fig.9 Distribution of displacement in z-direction after heating in Twist shape

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、Table 2 に示した。選定された修正加熱条件を二次加熱条件、三次加熱条件とする。Fig.7 の(2), (3), Fig.8 の(2), (3), Fig.9 の(2), (3)は二次加熱条件を用いた解析で得られる形状における節点の z 座標変位の分布である。これらによって示されるように、部分的に変形量に若干の不足・超過が見られるものの、Fig.10 から示されるように、修正を繰り返すことによって目的形状に近づいていることがわかる。

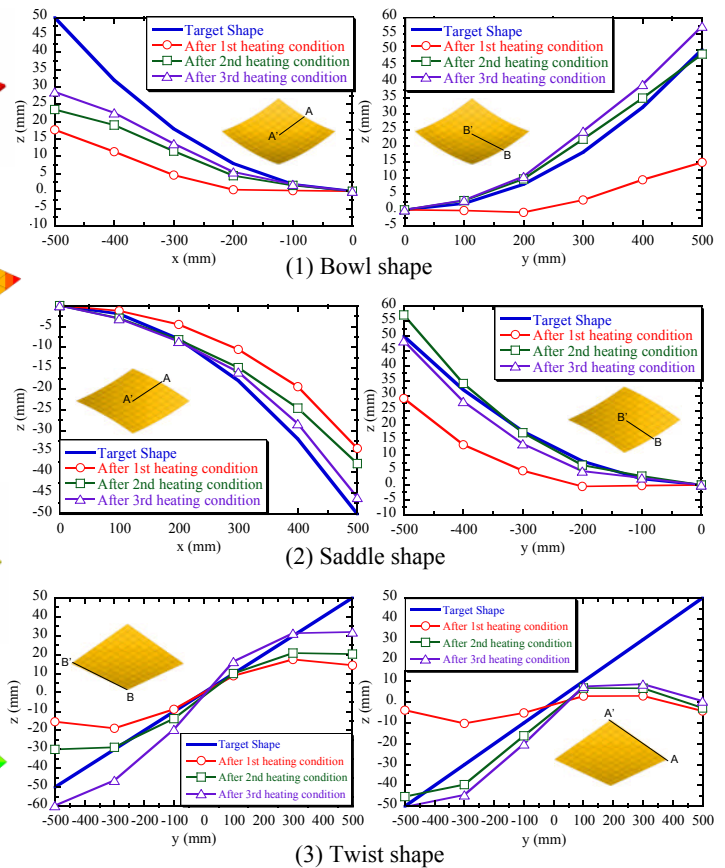


Fig.10 Comparison of shape after heating

6. 結 言

本研究では、線状加熱の自動化を目指し、FEM を用いた変形シミュレーションによる、線状加熱によって 3 種類の基本形状を成形するための加熱条件選定方法を提案した。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、3 種類の基本形状を成形した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) FEM 弾性解析を用いて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、そのせん断成分を排除した新たな固有ひずみ分布を求めることによって、線状加熱によって近似しやすい形で目的固有ひずみを求めた。
- (2) 平板から任意形状を成形するために必要な目的固有変形量を求め、それを近似するような加熱条件を固有変形データベースから選定した。
- (3) FEM 熱弾塑性解析を用いて提案手法の妥当性検証を行った結果、今回目的形状とした 3 種類の基本形状に関して、碗型・鞍型については定性的に一致した形状を、捩れ型については、おおむね一致した形状を作成できることを確認し、本手法による任意形状成形の可能性を示した。

参 考 文 献

- 1) 新垣宏司：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，大阪府立大学卒業論文，2009
- 2) 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