

# 計算機支援板曲げ方案自動作成システムの開発

(第2報) 固有ひずみの観点から見た現場での作業手順

正員 上田 幸雄\*

正員 村川 英一\*

正員 Rashwan Ahmed Mohamed\*\*

正員 奥本 泰久\*\*\*

正員 神近 亮一\*\*\*

Development of Computer Aided Process Planing System for Plate Bending by Line-Heating  
(2nd Report) Practice for Plate Bending in Shipyard Viewed from Aspect of Inherent Strain

by Yukio Ueda, *Member*

Hidekazu Murakawa, *Member*

Rashwan Ahmed Mohamed, *Member* Yasuhisa Okumoto, *Member*

Ryoichi Kamichika, *Member*

## Summary

In the plate bending process by line-heating, the decisions on which part of the plate should be heated and in which direction are usually made by skillful workers. However, the number of skilled worker is reducing rapidly and this becomes a serious problem in shipyard today. To solve this, the authors proposed a method to make these decisions based on theoretical analyses focussed on inherent strain in the previous report. The potential usefulness of the method was demonstrated through example problems dealing with mathematical ideal geometry. In this report, comparison between the theoretical prediction and the real practice in the shipyard to form curved members of ship hull are made and it is attempted to visualize the knowledge of skilled workers, which was unvisible, using computer graphic images showing inherent strain. Further, it is demonstrated that the same idea can be applied not only to make decisions on line-heating process but also to design the total plate bending process including those using the bending roller and the press machine.

## 1. 緒 言

船舶の船殻形状は推進抵抗の低減や美的観点からどうしても滑らかな曲面でなければならない。こうした船体の曲面は、所定の3次元曲面に曲げ加工された曲り部材を組み合わせることにより作られるので、個々の曲り部材の形状は千差万別である。そのような曲面を一品づつ平らな鋼板から作り出すためには熟練工の経験と勘が不可欠であった。しかし、近年における熟練工の高齢化や減少の傾向は、板曲げに関する技能の継承と作業能力の維持という面で、深刻な問題となりつつある。この問題は、言い換えると、技能の技術化ということであり、板曲げをより理論的な立場から理解し、生産工程の合理化を図る試みは古くから行わ

れてきた<sup>1),2)</sup>。ただし、板曲げの問題は大変形や塑性現象を含んだ高次の非線形問題であり、さらに線状加熱では熱ひずみと諸物性値の温度依存性を考慮しなければならないので、計算機の登場以前あるいは計算機が普及した後においても演算能力に限界があった当時においては、理論的研究を実用的成果に結びつける上で難しさがあった。この点、強力な演算能力と3次元カラーグラフィックス機能を備えたEWSが日常的な道具として使える現在は、条件的に整っており、こうした状況を背景とした新しい理論的試みが最近の研究として報告されている<sup>3-6)</sup>。

著者らは前報<sup>6)</sup>において、有限要素法を用いた解析に基づいて線状加熱の手順を理論的に決定するための一つの考え方を示した。これは、まず目的とする曲面形状とこれを得るために必要な固有ひずみの関係を明らかにし、得られた知見に基づき、線状加熱すべき位置や方向を決定するという方法である。前報では、その有効性を数学的理想曲面を対象に示した。本報では、現実の船体構造に見られる代表的な曲り部材を対象に、曲面形状と固有ひずみの関係を分析するとともに、単純平捻りを対象とした実験を行い、

\* 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)

原稿受理 平成4年1月10日

春季講演会において講演 平成4年5月12, 13日

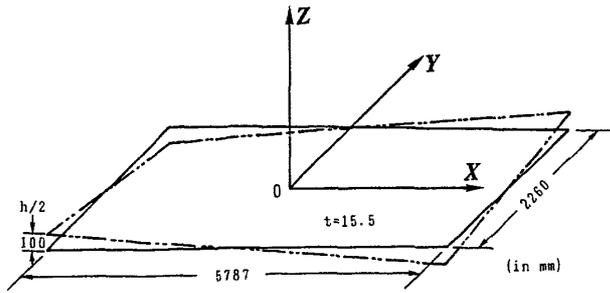


Fig. 1 Model for experiment (twisted shape).

熟練工による板曲げの工程がいかに理にかなっているかを検証する。また、これらの検討を基に、著者らが提案している固有ひずみに着目した板曲げ方案作成法が、線状加熱のみならずプレスやベンディングローラー等による機械曲げを含めた一貫した作業としての曲げ加工工程を設計するためにも適用できることを示す。

2. 単純平捻り曲面の製作

2.1 熟練工の作業手順

前報ではドーナツの一部を切り出したような枕型および鞍型の理想曲面を対象に、それらの曲げ加工について検討した。しかし、船殻外板の曲り部材には捻れた曲面も存在する。枕および鞍型の曲面を平面座標  $x, y$  の2次関数で近似すると、 $a, b, c$  を定数として次のような関数で表現され

る。

$$\text{枕型: } w_0(x, y) = ax^2 + by^2 + c \quad (1)$$

$$\text{鞍型: } w_0(x, y) = ax^2 - by^2 + c \quad (2)$$

一方、いわゆる平捻り曲面は、

$$\text{平捻り: } w_0(x, y) = axy \quad (3)$$

で表されるような曲面である。今回は、まず平捻り曲面を対象に、実験とFEMによる分析を行い、両者を比較検討した。曲げ加工すべき板の寸法と曲面形状が Fig. 1 に示されている。直交する中心線の位置を基準高さにし、四隅におけるたわみ量の差を捻り量  $h$  として表すことにする。実験では、捻り量  $h$  が 200 mm の曲面を目標として設定した。曲げ加工は全て線状加熱によるものとし、加工の手順は熟練工の判断に任せた。その手順を箇条書きにして次に示す。なお、用語については日本造船学会鋼船工作法研究委員会編の文献<sup>7)</sup>に従った。

- 1) Fig. 2 に示されるように、板の表面に 45° 傾斜した間隔が 177 mm の平行な線をマーキングする。
- 2) 図中に示された番号の順に板の中央から矢印の方向に水冷しながら線状加熱を施す。なお、最初は、一本飛ばしに一面全体を加熱した後、未加熱の線上を再び中央部から加熱する。加熱条件は Table 1 に示されており、板厚方向に温度勾配を付け曲げひずみを作り出すために加熱速度は比較的早い。また、長辺側の板の縁では 100 mm 程が加熱せずに残されているのに対し短辺側は完全に板の縁まで加熱されている。
- 3) 板の曲りに従って、木矢(台)を挿入する。例えば、一本飛ばしに表面全体を加熱し終わった時点で A および C 点における木矢の高さは約 50 mm であり、その中間も加熱し、表面の加熱が完了した時点での高さは 100 mm である。木矢は板の自重による曲面の開きを防止したり逆に自重による変形を有効に利用するためにも用いられるが、曲りの程度を計測する治具の役割を持っており、線状加熱の強弱は、木矢で上げた角部でのたわみが、目安として設定した値になるように調節される。
- 4) 一面が加熱終了後、板を反転し表と同様にマーキング

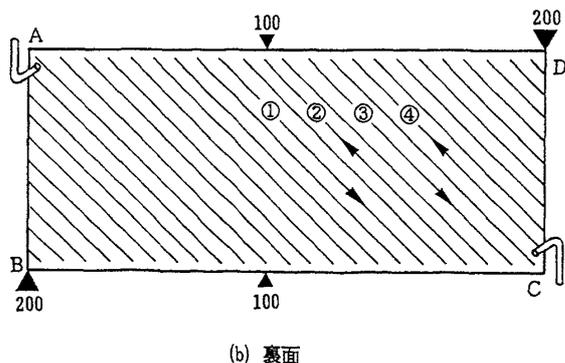
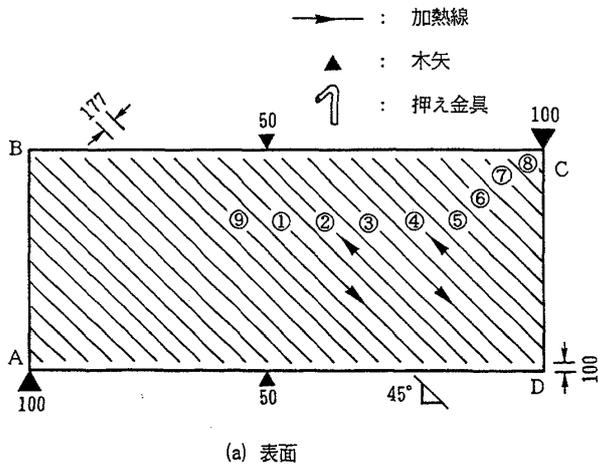


Fig. 2 Actual plate forming procedure.

Table 1 Condition of line heating.

加熱バーナー	L-200S (小池酸素製)
LPG 圧力	0.5 気圧*
酸素圧力	5.0 気圧*
加熱速度	表面 1.6 m/分 裏面 2.1 m/分

(\*) 工場配管の接続口での圧力でありバーナーのLPGバルブは全開し酸素を調節した。LPGと酸素の流量比は約 1:4 である。

を施す。

- 5) 裏の加熱手順も表と基本的に同じであるが、下がった側の角 A, C をジャッキ（押え金具）と呼ばれる治具で拘束しながら木矢の高さを順次上げていく。木矢の高さが所定の 200 mm に達したところでマーキングに沿ったたすき状の加熱を終了する。
- 6) 定規を各部に当て局部的な凹凸を修正するが、手直しを必要としたのは数か所のみであった。
- 7) 再度反転し、目的の曲面の高さにセットされた木矢をかませた状態で板の曲面を点検。板自身の重量によるたわみの影響も含めて、曲面の誤差が許容範囲内であることを確認し、全作業を終了。

## 2.2 固有ひずみ分布

実験と同じ寸法の板を、同じ量だけ平捻りした状態における固有ひずみを前報に示した方法で計算した。すなわち、面内方向の変位は拘束せずに、面外方向に目的とする曲面の  $z$  座標と等しい変位を強制変位として与え、その時の変形を FEM を用いて弾性たわみ解析し、曲げひずみ  $\epsilon^b$  と面内ひずみ  $\epsilon^m$  を求める。こうして得られた曲げひずみと面内ひずみの分布が Fig. 3 および Fig. 4 に示されている。Fig. 3 は、曲げひずみ分布を主ひずみの分布としてベクトル図で示したものである。曲げの主ひずみは板全面に一樣に分布し、その方向は、板の方向に対して  $45^\circ$  傾斜しており、二つの主ひずみの絶対値は同じ大きさで、符号が逆になっている。これは、板のたわみを与える (3) 式を 2 回微

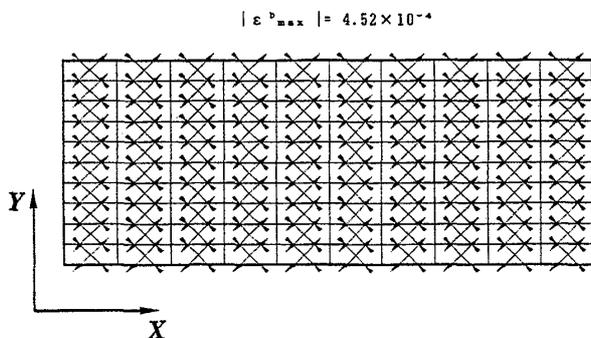


Fig. 3 Distribution of bending inherent strain for twisted shape.

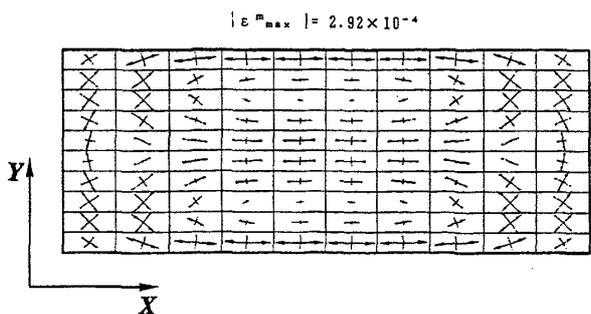


Fig. 4 Distribution of inplane inherent strain for twisted shape.

分し曲率を計算すると、

$$\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} = a \quad (5)$$

となり、曲げひずみが剪断成分のみになることから理解できる。これを曲げ加工の観点から解釈すると、板を同時に互いに直行する方向にしかも逆向きに曲げるということになる。したがって、このような曲げ加工を、一方向の曲げを基本とするローラーやプレスなどの機械曲げのみで行うことは不可能である。これに対し線状加熱では、熟練工が実際に行っているように、板の裏表を  $45^\circ$  方向に互いに直交する平行線状に加熱することにより、剪断型の曲げひずみを作り出すことができる。なお、一方向の曲げ固有ひずみはローラーで与え、これに直交する曲げは線状加熱で与えることも可能であり、現場では作業の効率化を図るためにそのような方法が一般に採用されている。

次に、面内固有ひずみ分布を示した Fig. 4 に注目すると、板の中央部に  $x$  方向の圧縮ひずみが大きい領域が認められる。その絶対値は約  $2.9 \times 10^{-4}$  であり、Fig. 3 に示された曲げひずみの値の  $4.5 \times 10^{-4}$  とほぼ同程度の大きさを有している。そのため、線状加熱では板を曲げるのと同時にその中央部を縮めなければならない。この点について、熟練工の作業手順を検討すると、Fig. 2 に示されたように板の縁から約 100 mm を残して中央部のみ加熱するということで、その縮みを作り出しているものと思われる。このように、板曲げの過程を固有ひずみの観点から理論的に分析すると、熟練工の作業手順がいかにも理にかなっているかが理解できる。

## 2.3 捻れ量と曲げ加工法

便宜的に板の曲りの原因を次の 4 種類に分類する。すなわち、

- 1) 自重による弾性変形
- 2) ローラーやプレスで作られる一方向の曲げひずみによる曲り
- 3) 曲げひずみを主体とした線状加熱による曲り
- 4) 三角焼きなどの絞りを主体とした加熱による曲り

この分類を今回の実験対象である平捻り曲面に当てはめると、曲面は自重による弾性変形の範囲を超えており、これを塑性的に曲げるためには、まず二方向に同じ大きさの曲げひずみを付与する必要がある。その方法として、一方向の曲げは機械曲げにより行うとしても、これと直交する曲げは線状加熱で行わなければならない。さらに、最後の絞りを主体とした加熱の効果も利用されており、曲げ加工としては高度な種類に属する。しかし、同じ平捻りでも捻り量が小さいと、自重による曲りのみで目的の曲面が得られる場合もあるだろうし、面内の絞りを与えなくても曲げひずみと自重だけで曲面を作ることも可能であろう。そこで、

このような、捻り量と必要な曲げ加工の段階の関係を数値的に検討した。

このための計算では、高さが目的の曲面の形状に合わせて調節され、FEMの節点の位置に配置された支持治具があると仮定し、この上に、板を載せた状態を接触問題として解析した。なお、重力は物体力として、また曲げの固有ひずみは初期ひずみとして解析の中で考慮した。捻り量が100 mmの場合を例に、自重のみを考慮した時と自重および曲げの固有ひずみを与えた時のたわみ $w$ と目的とする曲面の $z$ 方向の座標 $w_0$ の差をFig. 5とFig. 6に示す。なお、図中の丸印は、支持治具の位置を示し、黒く塗りつぶされた丸印は、板と支持治具が接触を保っている点を示す。自重による曲りは主として $x$ 方向の曲りであり、曲面の誤差は約86 mmと大きい。これに対し、曲げの固有ひずみを与えた板が自重で変形する場合には、曲面の誤差は約1.6 mmに減少する。ここで、加工精度上許される形状的な誤差が例えば3 mmであるとすれば、捻り量が100 mmの板の場合、面内の絞りを与えなくても、曲げの固有ひずみと自重のみで曲面が製作できることになる。しかし、さらに捻り量が多い場合には、面内の絞りが必要になると予想されるので、こうした曲げ固有ひずみのみで製作可能な曲面の限界を明らかにするために、捻り量を変化させたシリーズ計算を行った。自重のみによる変形および曲げの固有ひずみと自重による変形を計算し、目的とする曲面に対する各節点での誤差の最大値を捻り量の大きさに対してプロットしたものがFig. 7である。図より明らかなように、自重のみで曲面を形成できるのは、捻り量が小さく約20

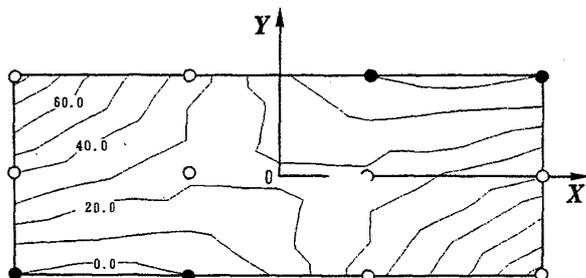


Fig. 5 Distribution of error in geometry of flat plate deformed under gravitational force ( $h=100$  mm).

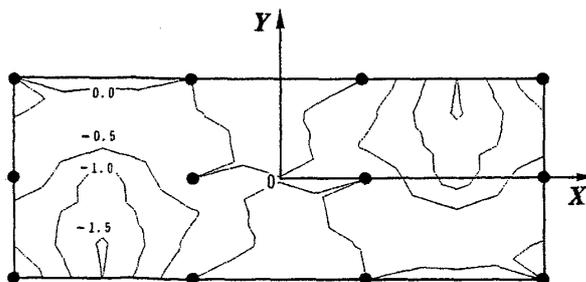


Fig. 6 Distribution of error in geometry of plate with bending inherent strain deformed under gravitational force ( $h=100$  mm).

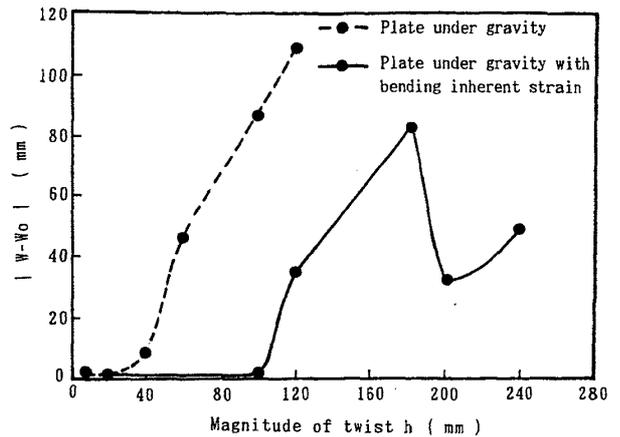


Fig. 7 Relation between the maximum error in geometry of plate and the magnitude of twisting.

mmまでの板である。一方、曲げの固有ひずみを板に与える曲げ加工では、捻り量が100 mm以下であれば、許容範囲内の精度で曲面を製作できることが分る。しかし、これより捻り量が多い場合には、曲面の誤差は急速に増加する。この原因は、面内の固有ひずみであり、曲げおよび面内の固有ひずみの最大値と捻り量との関係を示したFig. 8から明らかなように、曲げひずみは捻り量 $h$ に比例するが、非線形ひずみ成分である面内ひずみは、ほぼ $h^2$ に比例し、 $h$ が大きい領域で、曲げひずみと比較して無視できない大きくなる。参考のために捻り量が多く、 $h=200$  mmの場合について、曲げ固有ひずみのみを与えて曲げた板が支持治具上に置かれ、自重の下で変形している状態における応力分布を $x$ 軸方向の面内応力成分について示したものがFig. 9である。板の中央部は圧縮、板の縁では引張りの面内応力が発生し、その絶対値は小さいが約 $2.07 \text{ kgf/mm}^2$  ( $20.3 \text{ MPa}$ )である。このような残留応力を低減し、曲面の形状誤差を小さくするためには、曲げひずみに加えて、面内のひずみを与える必要がある。

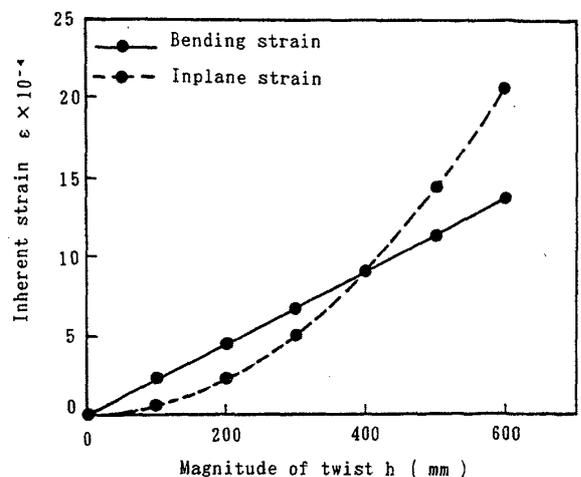


Fig. 8 Relation between the maximum inherent strains and the magnitude of twisting.

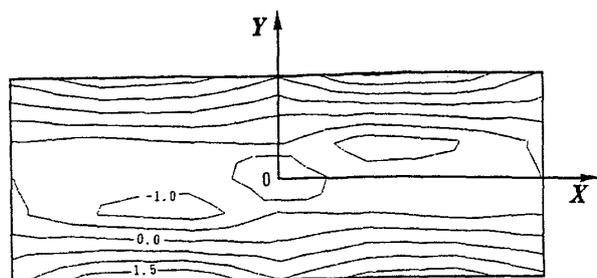


Fig. 9 Inplane stress distribution of plate with bending inherent strain in deformation under gravitational force ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ ).

### 3. FEM 解析に基づく板曲げ工程の段取り

前報では、主として線状加熱を対象とし、曲げおよび面内の固有ひずみ分布に注目した FEM 解析に基づき、線状加熱すべき位置と方向を定める方法を提案した。しかし、前章で平捻り曲面を対象にした実験と FEM に基づいた分析が示唆するように、その考え方は、線状加熱のみならず、ベンディングローラーやプレスさらには曲げあるいは面内の絞りを主体とした線状加熱を含めた一貫した板曲げ加工に 응용が可能で、与えられた曲面を製作するために最適な加工手段および手順を、合理的に決定することが可能である。このような理論解析による作業の段取り作成手順を概念的にフローチャートとして示したものが Fig. 10 である。なお、フローチャートで太線の矩形枠 (a), (b), (c), (d) は種々の FEM 解析を表し、それらは、

- 目的とする曲面の高さにセットされた多点支持治具上に置かれた平板の自重による弾性大たわみ変形を接触問題として解析する。
- 平板を目的の曲面に強制的に変形させた時の曲げひずみと面内ひずみを計算する。
- 目的とする曲面の高さにセットされた多点支持治具上に置かれた平板の、曲げ固有ひずみおよび自重による弾性大たわみ変形を接触問題として解析する。
- 自重を考慮しない状態での、曲げ固有ひずみのみを与えた板の変形を解析する。この場合は、重力が無いので接触問題として扱う必要がない。

である。また、同じ枠の中には計算あるいは評価すべき項目が示されている。ひし形の枠は判定を表し、 $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  は判定の基準となる限界値を示しているが、それらの具体的な値を決定する段階に研究はまだ至っていない。また、矩形枠は、必要な曲げ加工を示している。

図に示された流れに従って、フローチャートの説明を行うと、

- 1) 曲面の曲率および寸法より曲げ加工が必要な板材の粗選別<sup>8)</sup>を行う。
- 2) 自重による曲りを FEM を用いて計算し、境界領域にある板材の曲げ加工の要不要を判断する。

- 3) 板材を目的の曲面に成形するために必要な曲げ固有ひずみと面内固有ひずみの分布を計算し、次の値を求める。

- 曲げひずみおよび面内ひずみの絶対値を比較する

$$|\epsilon_{\text{max}}^m|/|\epsilon_{\text{max}}^2|$$

- 曲げひずみを主ひずみ分布としてベクトル図に表示し、二つの主ひずみの比、すなわち主曲率の比を計算する。

$$|\epsilon_2^1|/|\epsilon_1^1|$$

- 4) 二つの主方向に対する曲げひずみの内、どちらか一方が支配的である場合と、二方向とも同程度の大きさを持つ場合に分類する。
- 5) 一方向の曲げが卓越し、曲げ軸の方向が一定している場合はローラーあるいはプレスのみで必要とする曲げ固有ひずみが与えられる。
- 6) 二方向の曲げが同程度の場合は、ローラーやプレスによる機械曲げと、曲げを目的とした線状加熱を組み合わせる必要がある。
- 7) 曲げの固有ひずみのみを与えた板の変形を解析し、さらに面内の固有ひずみを与える形の線状加熱が必要かどうかを判定する。
- 8) 面内の固有ひずみ分布を参考に、絞りを目的とした線

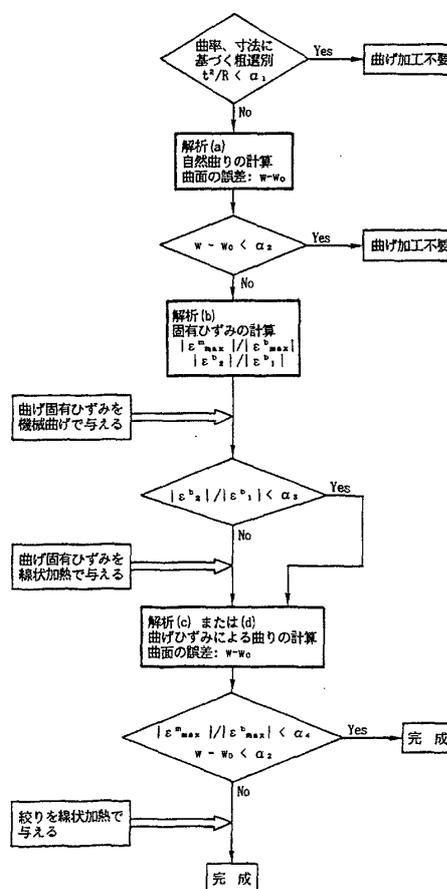


Fig. 10 Flowchart of the process design for plate bending.

状加熱を施す位置と方向を定める。

#### 4. 船殻曲り外板への適用

##### 4.1 典型的曲面の例

船殻曲り外板の典型的な例として、排水量 32,000 トン級バルクキャリアの船首部、船側部および船底部の外板を選んだ。それらの寸法および曲面形状が Fig. 11-a, b, c に示されているが、個々の曲面はそれぞれ、枕型、鞍型、捻れ型の特徴を有している。そこで、便宜的にこれらの曲り部材を、枕型 (pillow shape), 鞍型 (saddle shape), 捻れ型 (twisted shape) 部材と呼ぶことにする。なお、それぞれの板厚は 19.0, 14.0, 18.0 mm である。

##### 4.2 自重による曲り

松石ら<sup>8)</sup>は、主曲率半径  $R_1, R_2$  と板厚  $t$  の二乗の比、すなわち、 $t^2/R_1, t^2/R_2$  をパラメーターとして、自重による曲りのみで曲面が得られる限界を示した。その限界は、曲りが大きい方向のパラメーター  $t^2/R_1$  に注目すると、おおよそ  $t^2/R_1 < 10^{-2}$  である。一方、ここに挙げた三つの例では、 $t^2/R_1$  の値が、それぞれ、約 2.4, 8.1,  $5.0 \times 10^{-2}$  であるので自然曲りのみで曲面を作り出すことが不可能である。なお、パラメーターを求めるための曲率半径は、曲面の曲率から幾何学的に求めることもできるが、ここでは、後で

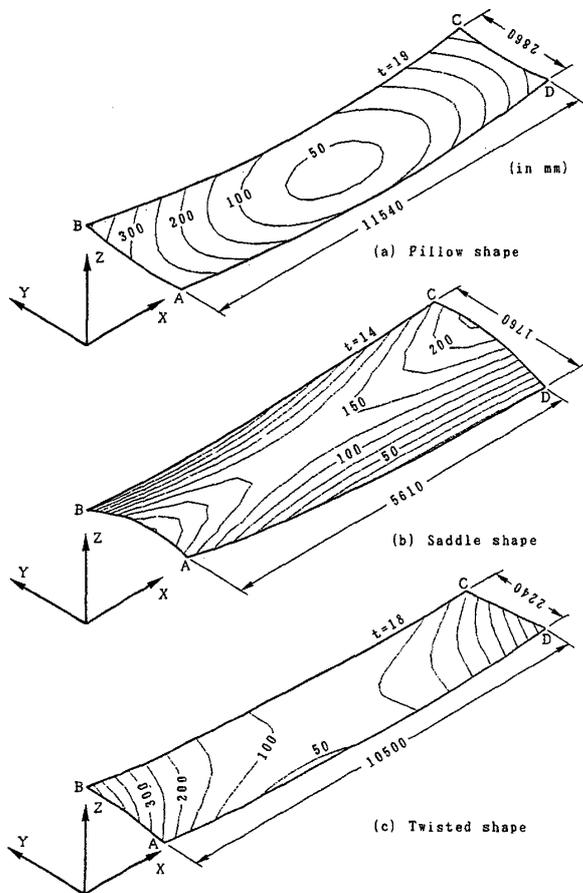


Fig. 11 Typical examples of curved plates in ship structure.

Fig. 12 に示す曲げひずみの最大値より求めた。

##### 4.3 固有ひずみ分布

曲面の特徴を把握するために、それぞれの曲面を製作する際に必要な曲げおよび面内の固有ひずみ分布を解析した結果を Fig. 12 と Fig. 13 に示している。分布図には、ひずみの絶対値の最大値が示されている。まず、曲げひずみに注目すると、枕型および鞍型部材では、短辺方向の曲りが支配的で、曲げひずみはほとんど一方向とみなすことができる。これに対して、捻り型部材では、2章で示した平捻りと同様、絶対値がほぼ同じで符号が異なる二方向の曲げひずみが存在する。したがって、前者における曲げひずみは、ローラーあるいはプレスのみで与えることができるが、後者の場合は、一方向の曲げはローラー等による機械曲げで行い、これと直行する曲げは線状加熱で行う必要がある。

次に、Fig. 13 に示された面内ひずみに注目すると、いずれの場合も面内ひずみの絶対値の大きさは、曲げひずみの大きさとほぼ同程度であり、しかも、Table 2 に示されているように降伏ひずみのオーダーである。したがって、曲面加工においてこれらの面内ひずみを無視することはできないと予想される。

##### 4.4 機械曲げに対する指針

Fig. 12 に示された曲げひずみの分布に基づき、個々の曲り部材の機械曲げの要領を検討する。まず枕型および鞍型では、板幅方向の曲げひずみが卓越した一方向曲げになっ

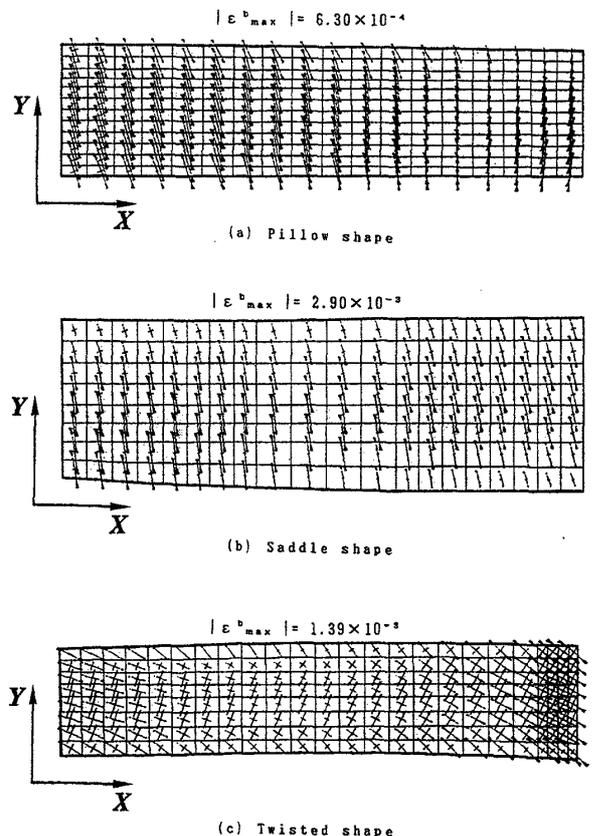


Fig. 12 Distribution of bending inherent strain.

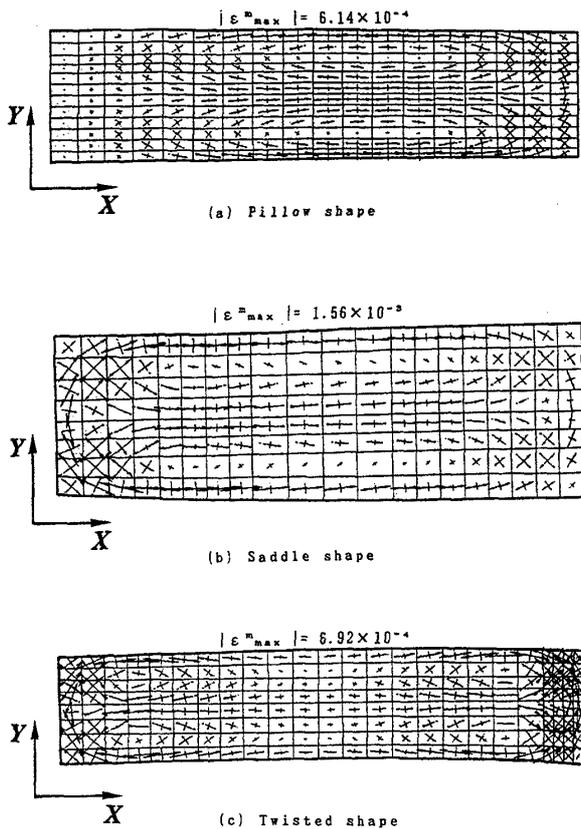


Fig. 13 Distribution of inplane inherent strain.

ており、これらの曲げひずみは、主としてローラーあるいはプレスにより付与できるものと予想される。これに対して捻り型では二方向の曲げひずみが存在し、板中央では少し傾いているが板幅方向の曲げひずみが板の長さ方向にほぼ一様に分布しているので、この方向の曲げひずみをローラーで与えれば良い。

4.5 曲げを主体とした線状加熱の指針

既に検討したように、線状加熱によって曲げひずみを与える必要が有るのは捻れ型曲面のみである。Fig. 12 に示された曲げひずみのうち板幅方向はローラーで与えるとすれ

Fig. Table 2 Maximum bending and inplane inherent strains for the three typical curved plates.

	pillow shape	saddle shape	twisted shape
$ \epsilon^b_{max} $	$6.3 \times 10^{-4}$	$2.9 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-3}$
$ \epsilon^m_{max} $	$6.2 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-3}$	$6.9 \times 10^{-4}$
$ \epsilon^m_{max}  /  \epsilon^b_{max} $	0.98	0.55	0.50
$ \epsilon^{b_1} $	$6.3 \times 10^{-4}$	$2.9 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-3}$
$ \epsilon^{b_2} $	$1.3 \times 10^{-4}$	$3.8 \times 10^{-4}$	$8.5 \times 10^{-4}$
$ \epsilon^{b_2}  /  \epsilon^{b_1} $	0.21	0.13	0.61

ば、板の長さ方向の曲げひずみを線状加熱で与えることになる。加熱面は板幅方向の曲りが凸の面であり、加熱の方向は時計方向に約25度傾いた板幅方向である。また、板の長さ方向の加熱の程度については、端部を相対的に強く加熱すれば良いことが分る。

4.6 曲げ固有ひずみのみによる加工の可能性

曲げひずみのみを用いた曲げ加工の可能性を検討するため、曲げの固有ひずみのみを与えた板の、自重を考慮した時およびその影響を無視した時の変形を前述の解析(c), (d)により計算した。特に、自重を無視した場合について変形した板の形状を示したものが Fig. 14-a, b, c である。図から明らかなように、いずれの曲りの部材においても、曲げひずみのみでは、長さ方向の曲りが不足しており、十分な精度の曲面は作り出せないことが分る。また、ローラーやプレスによって、一方向に卓越した曲げ固有ひずみが理想に近い形で付与できるとすれば、Fig. 14(a), (b) に示された枕型および鞍型の形状は、曲げひずみを利用した機械曲げ加工の段階で達成すべき中間形状を具体的に示していることになる。従ってこのような場合には、同図から得られる情報を実作業情報として活用することができる。この解析により得られた中央断面の形状(実線)を、目的と

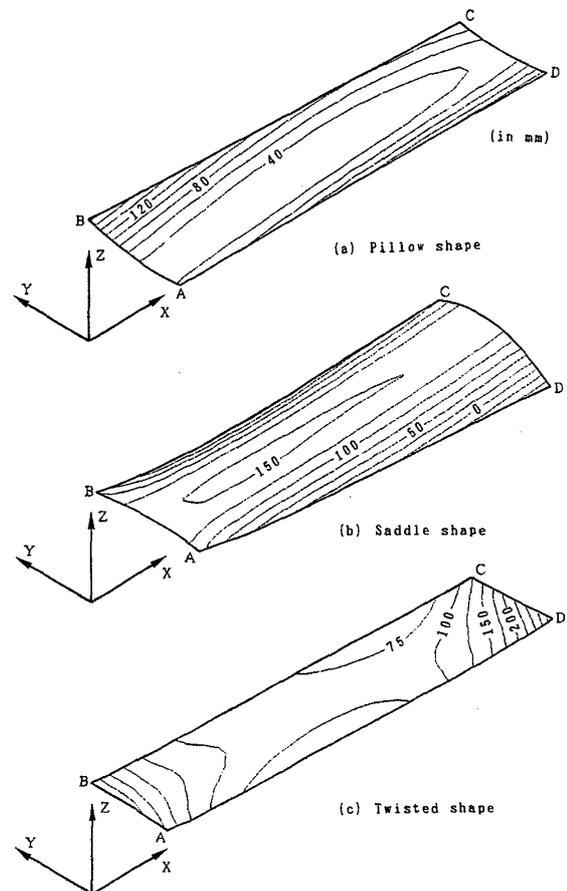


Fig. 14 Deformation of plates with bending inherent strain.

する断面形状 (破線) と重ね合わせ、それぞれの曲面について Fig. 15 に示した。捻り型では両者の差は小さいが、枕および鞍型では曲げ固有ひずみのみで作られる曲面の曲がり量の方が大きくなっている。一方、このような中間形状が現実的状态として存在するためには、曲げ加工の結果発生する残留応力が降伏応力より小さい必要がある。そこで、枕型部材を例に、中間形状で自重の影響を無視した時の曲げ応力と面内応力の分布を Mises の相当応力について Fig. 16 に示した。また、全てのケースについて応力の最大値を表として Table 3 にまとめた。それぞれの応力の最大値は降伏応力と比較して十分小さく、曲げひずみだけで作られた曲面が、力学的にも現実的状态として存在することが分る。なお、ここで例として示された曲面では、中間形

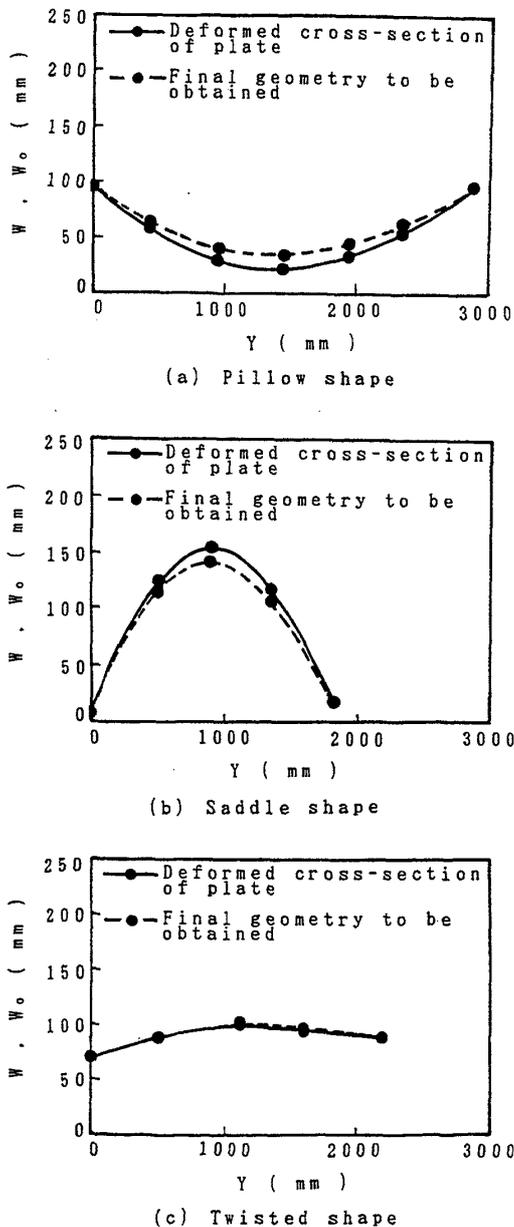


Fig. 15 Cross-sectional shape of plate with bending inherent strain.

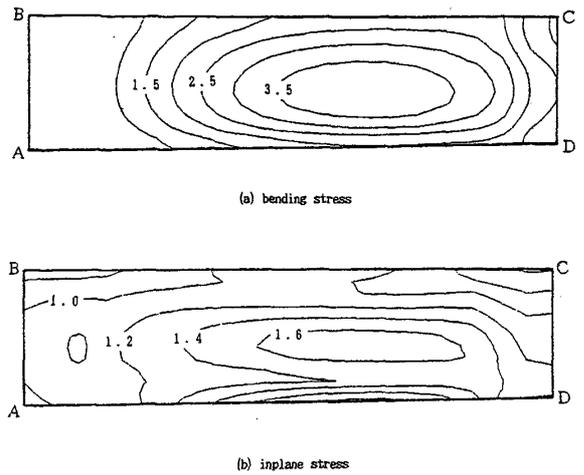


Fig. 16 Residual stress distribution in pillow shape with bending inherent strain (kgf/mm<sup>2</sup>).

状と目的とする曲面形状が明らかに異なるため、強いて自重を考慮し接触問題として精密な解析をする必要はない。

4.7 絞りを主体とした線状加熱の指針

次に、最終段階として行う絞りを目的とした加熱の要領は、面内固有ひずみ分布を示した Fig. 13 に基づき前報で示した指針に従って作成することができる。すなわち、絞りを与える領域は面内の固有ひずみが圧縮である領域とその近傍であり、加熱の方向は圧縮の主ひずみの方向に対して垂直の方向である。このような指針に従い、加熱線を決定したものが、Fig. 17 である。なお、現段階では、加熱条件と線状加熱により作られる固有ひずみの関係が定量的に明らかにされていないので、加熱線間隔の絶対値については情報を与えることができない。ただし、固有ひずみ分布に現れたひずみの大きさに基づき相対的な方針を与えることはできる。例えば、枕型部材の面内ひずみ分布に注目すると、絞りを与えるべき部位は、長辺上の縁であり、加熱の方向は板の幅方向である。また絞りすなわち加熱の強さは、縁に近い程強く加熱し、長さ方向には、端部、特に AB 側での加熱を控えるべきであることが分る。また、鞍型部材については、板の中央部におけるひずみ分布は長さ方向

Table 3 Maximum bending and inplane stresses for the three typical curved plates with bending inherent strain.

		pillow shape	saddle shape	twisted shape
stress without gravity (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma^b_{max}$	3.04	7.95	6.54
	$\sigma^m_{max}$	2.90	7.26	4.71
stress with gravity (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma^b_{max}$	7.84	6.40	7.14
	$\sigma^m_{max}$	3.18	7.30	4.14

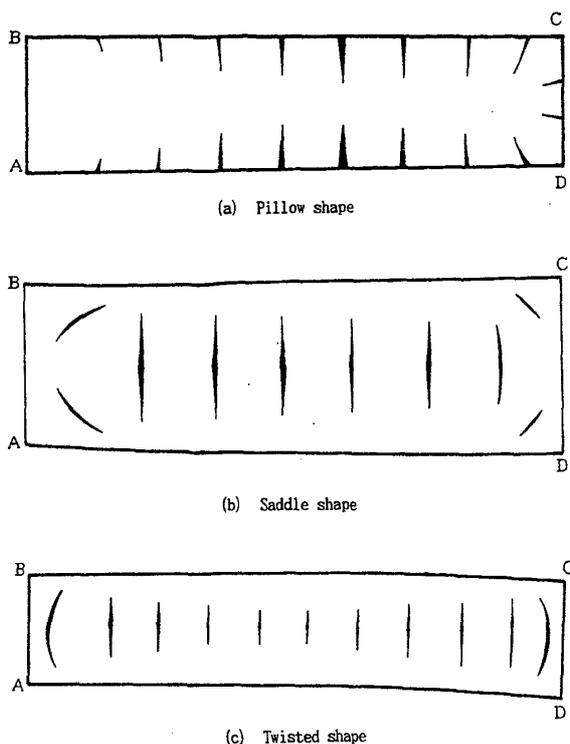


Fig. 17 Proposed position and direction of heating lines.

にほぼ一様で、中央部が圧縮になっているので、その部分を板幅方向に加熱しなければならない。しかし、端部については、絶対値がほぼ同じの二方向の面内ひずみが複雑に分布しているので、適切な方針を示すことができない。同様な傾向が捻り部材にも見られるが、板幅の中央部における圧縮ひずみの長さ方向の分布は板の端部近傍で大きく、線状加熱は端部で強く行う必要がある。

4.8 熟練工による実際の手順

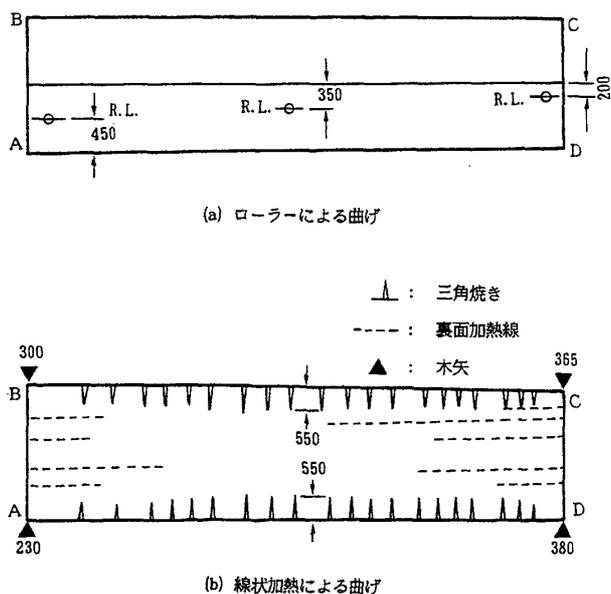


Fig. 18 Real practice for forming plate with pillow shape.

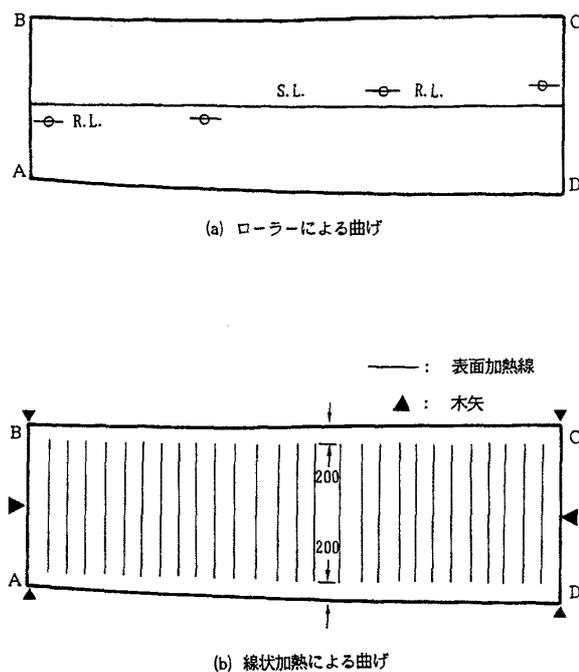


Fig. 19 Real practice for forming plate with saddle shape.

ここで取り上げた三種の曲り部材を熟練工が曲げ加工した際の作業手順がローラーによる機械曲げと線状加熱について Fig. 18, 19, 20 に示されている。機械曲げにおいて S.L. は基準となる見通し線を表し、R.L. はローラーの軸方向を指示するロールラインである。また、線状加熱については、実線および破線がそれぞれ表面と裏面からの線状加熱を表し、枕型における長い三角印は三角焼きを表す。黒く塗りつぶされた三角形印と数値は、木矢とその高さを示している。それぞれの曲り部材について、具体的な作業手

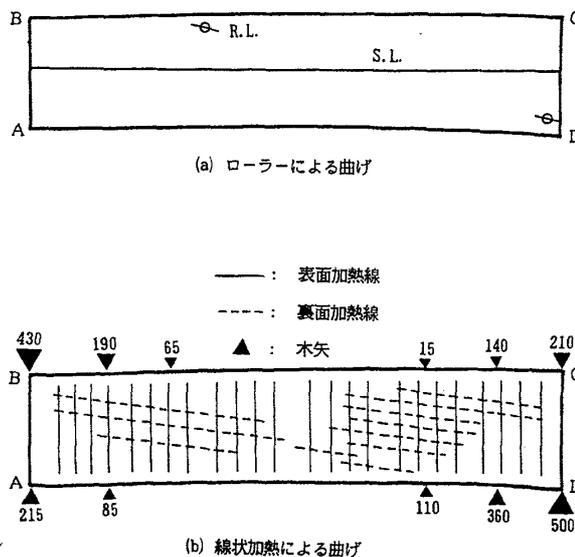


Fig. 20 Real practice for forming plate with twisted shape.

順および注意事項は次のように与えられている。

#### 《枕型》

- 1) 後の凹面側からの三角焼きにより板の端部から 550 mm の位置で約 5 mm の横曲り変形の過ぎが出るのでローラー曲げは、全体に曲り不足ぎみに仕上げる。
- 2) AB 端の絞りは少なめにする。
- 3) 三角焼きの後、AB および CD 端の横曲りが約 10 mm 過剰となるので、これを戻すため反対側の面(凸面側)の端部を縦方向に線状加熱する。

#### 《鞍型》

- 1) 後の凸面側からの中絞りで横曲りが開く(戻)るので、ローラー曲げでは全体に曲げを 15~20 mm 多目に仕上げる。
- 2) 線状加熱は、板耳から 200 mm の位置で止める。

#### 《捻り型》

- 1) 後の中絞りで曲りが開くので、ローラー曲げは全体に 15~20 mm 多目に仕上げる。
- 2) 横曲りが凸となる面に中絞りを行う。
- 3) 中絞りで開いた横曲りを補正し、部分的な横曲りの変化を調整するために、反対側の面(横曲りが凹となる面)から縦方向に線状加熱する。

#### 4.9 解析に基づく加工手順の妥当性

前節で示した FEM 解析に基づいて作成した加工手順と熟練工による手順を比較し、項目別に両者の妥当性を検討する。

- 1) 加工手段の選択について理論解析に基づく判定は、枕および鞍型は機械曲げの後、絞りを主体とした線状加熱を行う。また、捻り型は、捻りをだすために、曲げと絞りを目的とした線状加熱の両方を用いるということであったが、現実の曲げ加工と一致している。
- 2) 機械曲げによる板幅方向の曲げに関する理論的予測では枕、鞍型ともに過剰気味の曲げを与える必要性が示された。これに対して、実際の加工では、鞍型で約 15~20 mm 過剰気味の曲げが指示されており理論的予測と対応しているが、枕型については、曲げ不足ぎみが良いとされており、予測と食い違っている。この原因として、理論では理想的に絞りのみを与えられると仮定しているが、現実の線状加熱では純粹の絞りのみを与えたい時にも多少の曲げひずみが含まれ、これにより付加的な曲りが生じるのではないかと予想される。
- 3) 捻り型における曲げを目的とした線状加熱では、実際の曲げ加工の中絞りが、曲げを目的としていると解釈するならば、加熱すべき面および加熱の方向は理論的予測と対応している。
- 4) 面内の絞りに関しては、加熱位置、方向ともに予測と実験が良く一致している。特に枕型の場合では長さ方向の加熱強さの分布についても両者は良く一致してい

る。ただし、板を長さ方向に見た時の端部については固有ひずみの分布が複雑なので、具体的な加熱の要領を決定するためには、さらに詳細な検討が必要である。

## 5. 結 言

本研究では、前報で提案した線状加熱方案を理論解析に基づき作成する方法の妥当性を検討するため、主として実船の曲り外板を対象に理論的予測と熟練工による加工手順の比較を行った。また、同じ考え方をさらに進めて、機械曲げと線状加熱を組み合わせた一貫した曲げ加工を対象とした加工方案作成の可能性についても検討し、次の結論を得た。

- (1) 前報では検討していなかった平捻りを対象に、線状加熱による曲げ加工を実際に行い、FEM 解析で得られる固有ひずみ分布に基づいて予測した加工手順と実際の手順が良く対応していることを確認した。
- (2) 曲り部材の形状が与えられた時に、自重による曲り、プレスやローラーによる曲げ加工、および線状加熱を効果的に組み合わせた一貫性のある曲げ加工手順を作成するための基本的考え方を示した。
- (3) 実際の船体外板の中で、枕型、鞍型、捻り型の三つの典型的な曲面を選び、固有ひずみ解析に基づき、曲げ加工の作業手順を検討し、理論的予測が熟練工による実際の手順と良く対応していることを確認した。

## 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きました。また、実験に関しては、力和雄氏を始め、(株)アイ・エイチ・アイ・アムテック製造設計部の方々に協力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) 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).
- 3) 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).
- 4) 野本, 大塚, 横山: 多点プレス法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).
- 5) 野本, 武市, 将基, 青山, 榎沢, 斎藤: 面内縮みを考慮した撓鉄作業用シミュレータの開発—線状加熱による板曲げ加工用シミュレータの開発(続報)—, 日本造船学会論文集, 第170号, pp. 599-607, (1991).

- 6) 上田, 村川, Rashwan, 奥本, 神近: 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, 日本造船学会論文集, 第170号, pp. 577-586, (1991).
- 7) 造船技術シリーズ (船殻編) 第三巻, 専門技術編, III 加工作業, (社)日本造船学会鋼船工作法研究委員会, 産報(1980).
- 8) 松石, 名本, 安藤: 自重による船体外板の曲げ加工に関する研究, 日本造船学会論文集, 第140号, pp. 296-303, (1976).
-