線状加熱自動鋼板曲げシステムの実船適用

－システムの概要と適用実績－

正員 丹 後 義 彦* 正員 石 山 隆 庸*
 永 原 章 二** 長 島 智 樹***
 小 林 順*

Automated Line Heating for Plate Forming by IHI-ALPHA System
 and its Application to Construction of Actual Vessels
 -System Outline and Application Record to date-

by Yoshihiko Tango, *Member* Morinobu Ishiyama, *Member*
 Syouji Nagahara Tomoki Nagashima
 Jun Kobayashi

Summary

In many shipyards, shell plates having complex curvature are formed using line heating or a combination of line heating and cold forming. These processes are effective but labor intensive. In this paper, we describe a new system that plans and carries out line heating automatically. This system, called IHI-Alpha, projects the desired curved geometry onto the original flat plate, and calculates a heating plan which includes the travel and heat input rate of the heating head. Once calculated, this heating plan is forwarded to a special shop workstation where the final curved form is then produced directly, with no iteration. This differs from the conventional process which is based on operator experience plus trial-and-error.

The IHI-Alpha system has been employed in the construction of a number of vessels including bulk carriers, VLCC's, and containerships. In this paper, we introduce the system, its theoretical foundation, and how it works including both software and hardware aspects. Examples of its use in actual ship production are described. Finally, ideas for future development of this technology are discussed.

1. 緒 言

一般商船の船殻外板は、厚さ 15～30 ミリの非可展任意形状の曲面鋼板によって構成されており、その曲げ加工方法として古くから線状加熱が用いられてきた。この造船固有技能である線状加熱は習得するのに 10 年以上を要すると言われているが、近年のベテラン層の急激な減少に伴って技能伝承、さらには曲げ加工の品質の確保すら危惧されている。

著者らは、椀型、鞍型、ねじれの組み合わせである船体曲面の形状情報から、それを実現するための加熱条件と加熱位置（以後両者を合わせて「加熱方案」と称する）および加熱前の平らな形状（以後「展開形状」と称する）を同時に算出するシミュレーションソフトと、高周波電磁誘導による熱源および加熱コイルを搭載した数値制御台車を開発して、これまでにバルクキャリアー、VLCC、コンテナ船の外板曲げを行ってきた。

従来の線状加熱が、“加熱→確認→加熱・・・”を繰り返す試行錯誤作業なのに対して著者らの方法では目的形状とそれを実現するための加熱方案および展開形状が理論的に結びついており 1 回の加熱によって実用上

* 株式会社 IHI マリンユナイテッド
 ** 株式会社宇宙船
 *** 株式会社アイ・イー・エム

許容範囲内の精度で目的形状が得られる。

本稿では、現在 IHI マリンユナイテッド呉工場で実船適用されている線状加熱自動鋼板曲げシステム (IHI- α) の概要および加熱実績と実用化のために取り組んだ検討例について紹介するとともにベテランの完全代替を可能にするための今後の課題について述べる。

2. 自動鋼板曲げの実用化条件

2.1 処理の対象と要求する精度

実用化には、様々な条件と水準が考えられる。処理対象の範囲も条件のひとつである。船殻外板に限定すると、平行ビルジ部のような可展曲面とバルバスパウのような非可展かつ大曲率板では加工方法や曲げ作業の難易度が大きく異なる。また船体曲面は任意形状であるため、腕、鞍、ねじれといった基本形状からこれらの組み合わせによる S 字形状、タンジェンシーラインを含む板のように一部平らな曲面など対象は様々である。

線状加熱で期待する加工精度についても、ベテラン技能者の不足を補えればよし、とするレベルから、曲がりブロックの組立精度を画期的に向上させるための高い要求水準まで幅がある。開発当初においては船体の大半を占めて、自動化もやさしいであろう比較的緩やかな非可展開曲面を対象とした。その後の取り組みにおいて多トーチ装着の簡易型加熱装置などと競合する上記のような対象より、もっと複雑な曲面が装置化に向けた対象であるという認識に変わり、現在では船首船尾や一部特殊な曲面を除いた船体曲がり外板の 70~80% 程度を対象としている。

現状実現している精度は 1 枚の板全体で板厚程度のたわみ誤差、面内寸法精度は ± 1 mm 程度のレベルであり、これは人が加工する場合より高い精度と言う認識である。

2.2 IHI- α の開発方針と現状

加熱方案を自動算出して技能者がいなくても曲げられるソフトを作ること、そのソフトを動かすのに必要なハードを用意すること、それらを充実させながら周辺の装置環境を順次整えること、というのがここまでの開発方針である。今後、周辺支援機能や効率的な熱源など、装置の充実に課題が多いと考えている。

開発の位置付けに関する認識を Fig.1 に示す。

3. IHI- α のシステム構成

3.1 運用体制

システムを運用するにあたってラインの作業分担を Fig.2 に示す。まず内業課が、板サイズ (←定盤サイズ)

Fig.1 Policy and Status quo of IHI- α

Fig.2 Flowchart of IHI- α System

Table1 Shell plates for IHI- α in container ship

No	ブロック	横曲がり (mm)	縦曲がり (mm)	捻れ (mm)	加熱時間 (H)	収縮量 (横/縦)
1	BG1-G	60.3	38.0	3.4	6.9	1.0/4.5
2	BG1-H	75.8	89.1	2.9	5.8	1.2/5.5
15	SL1-MU	43.7	41.3	0.0	6.0	1.0/4.0
16	BL16-L	140.1	370.7	6.3	14.2	2.7/29.0
17	BL16-M	94.4	431.1	2.2	9.6	1.6/18.5
18	BL17-L	145.0	422.2	0.0	16.2	2.2/26.2
70	SU41-TU	64.1	198.2	5.6	6.1	1.7/11.0
71	SU42-TL	53.8	244.8	7.0	5.5	2.0/10.0
72	SU42-TU	76.0	266.0	4.9	7.1	3.3/23.3

やたわみ深さ (←加熱ストローク) などハードの物理的制約を考慮して IHI- α 対象候補リストを作成する。その後、現図グループがグリットデータを作成、加熱方案を算出し対象候補リストに結果を書き込む。

対象候補リストの一部を Table1 に示す。これには、板のサイズ・形状や自動算出された加熱方案による加熱

後推定形状と目的形状のたわみ差、加熱時間、収縮量などが記入されている。

この候補リストをもとに方案の良否や IHI- α 適用の可否、板形状の良否（時には板割りも）などについて検討会を行って対象板を決定する。

その後この対象板リストをもとに投入スケジュールが組まれ、 α で曲げ加工する板については α 用一品データと加熱用 NC データが作成され、IHI- α 用マーキンおよび切断後加熱が行われる。

3.2 ハードおよびユーザーインターフェース

加熱台車と鋼板支持定盤の写真を Fig.3 に示す。

熱源は出力制御が容易で再現性のある高周波電磁誘導熱源を採用し、直径 80 ミリの円形コイルによって加熱する。加熱後は、コイル周りから水とエアーが噴射されて自動冷却される。加熱後の形状はレーザーによって計測、その場で変形形状の確認が可能である。

曲げ対象の板サイズが大きいので鋼板の支持状態は大切である。支持機構には ± 1 ミリの精度で高さ制御が可能な電動の定点ジャッキシステムを導入している。また自重たわみを考慮して置かれた状態での形状を計算するプログラムも備えている。

Fig.3 Hardware of IHI- α system

専用のグラフィックユーザーインターフェースにより、対象形状の回転 (Fig.4) や、任意断面のたわみ形状の確認 (Fig.5) が可能で、事前のイメージングにも活用されている。また加熱方案の確認や施工条件の変更、加熱線の追加削除 (Fig.6) なども容易に行うことができる。

Fig.4 Target shape on PC display

Fig.5 Deflection of optional section on PC display

Fig.6 Confirmation and modification of the heating plan

4. 加熱方案の算出

4.1 方案算出フロー

すでに述べてきたように加熱方案は技能の代替の核であり、その算出過程は本システムの中核である。現在の加熱方案の算出フローを Fig.7 に示す。入力情報である目的形状を現すグリッド座標と板厚から加熱方案と展開形状が同時に自動算出される。

FEM モデルで現した目的形状を面内方向の移動を許した状態で平面まで強制変形させる。ここで得られる平面形状を最初の展開形状 (第1近似) として採用し、これを再度目的形状まで持ち上げる強制変形を行って得られるひずみを目的固有ひずみ (第1近似) とする。次にこの目的固有ひずみを加熱線による固有変形で離散化し加熱方案を求める。加熱方案は、展開形状を目的形状に変形させるものであるから3者 (目的形状、加熱方案、展開形状) は1対1の関係にある。算出された加熱方案によるひずみ (以後「生成固有ひずみ」と称する) を入力して、FEM 弾性シミュレーションによって変形形状を推定する。内部応力などの影響で普通1回では目的形状にはならない。そこで出てきた形状を目的形状まで強制変形して差分に対応したひずみを算出し、この差分ひずみだけ目的固有ひずみにバイアスを掛けて計算を繰り返し、見かけ上目的形状になる加熱方案を算出する。これに伴って展開形状も最初のものから逐次変化する。

最終的に目的形状を実現する加熱方案と、この加熱方案に対応した展開形状が求まる。
以下の節では各プロセスについて説明する。

Fig.7 Flowchart for heating plan calculation

4.2 目的固有ひずみ

曲げ加工の対象となる曲面形状（目的形状）が与えられたとき“ある平面”からこの目的形状に至る変位に対応したひずみ分布を固有ひずみとして“ある平面”に与えると目的の形状が得られる。この時の固有ひずみ分布を目的固有ひずみと呼ぶ。なおこの目的固有ひずみは、面内方向の自由な変位を許して“ある平面”から目的形状まで強制的に変形させることにより求めることができる¹⁾。

Fig. 8 に碗型、鞍型およびねじれ形状とこれらの組み合わせである碗鞍（S字平行四辺形）形状の目的固有ひずみ分布を示す。

曲げひずみ成分は一定の方向（最大・最小主曲率方向）を向いており、面内ひずみ成分は、碗型の場合に、板中央が引っ張りで縁が圧縮、鞍型および平ねじりの場合には板中央が圧縮で縁が引っ張りの渦巻き状分布になることは一般的によく知られている。これを目的固有ひずみ分布の第1近似とする。

4.3 目的固有ひずみの離散化と加熱線への置き換え

Fig. 8 の連続的な目的固有ひずみに対応した変形を、局所的な加熱による不連続な固有変形で置き換えていく。この離散化が、線状加熱自動化の鍵で、以下の経緯を経て現状システムに至っている。

4.3.1 静止ステップ加熱（第1世代）

隣接する加熱線との関連性に束縛されず FEM 要素ごとに目的固有ひずみを満足する加熱条件を決定し、長さ 200mm ほどの短い加熱線を組み合わせる。

Fig.8 Required inherent strain distribution of various shapes

静止ステップ加熱⁵⁾を試みた。この方法では、加熱線の切れ目に大きな残留応力が発生し、さらに熱源の位置決めにかかるなど実用化という観点では課題が残ったが、線状加熱自動化のための道具建てが整った。具体的には曲面展開・目的固有ひずみ計算法、ひずみ分布が与える曲面形状の確認計算法³⁾などである。

Fig.9 に当時実験した対象形状、Fig.10 に加熱線配置、Fig.11 に実験の写真を示す。

<The 1st Generation : Stationary step heating>

Fig.9 Target saddle shape

(a) At top surface

(b) At bottom surface

Fig.10 Heating plan by the stationary step heating for the saddle shape

Fig.11 Heating scene in laboratory experiment

<The 2nd Generation : Continuous travel heating>

Fig.12 Target shape of bow bottom shell in VLCC

— : At top surface - - - : At bottom surface

Fig.13 Heating plan for bow bottom shell plate

Fig.14 Confirmation of heating result

4.3.2 定速移動加熱 (第2世代)

一本の加熱線は同時に4つの変形成分を与えるが、これを取り扱いを難しくした。具体的には加熱線に直交する横曲がり、横収縮、加熱線方向の縦曲がり、縦収縮成分である。このうち加熱線がもたらす曲げ変形、面内変形成分の大きなものだけに着目することでより実用的な連続移動加熱による加熱方案の算出⁶⁾が可能となった。

目的固有ひずみの曲げ成分に対しては、最大・最小主ひずみの積算値に対して等高線を求め、それぞれ横曲がり変形を対応させる加熱条件を選択、目的固有ひずみの面内成分に対しては、同じ形状を与える直交した圧縮ひずみに変換⁴⁾した後、最大主ひずみ成分に対して横収縮を対応させる加熱条件を決定する。

この方法では、剪断も含めて無視した成分が引き起こす付随的な変形により、対象形状によっては変形計算の収束性が悪く、また実際の加熱においても、曲げ加熱線と面内加熱線が無関係に配置されるため両者が重なった時には十分な精度が得られないなどで適用板も限定されていた。

Fig. 12 に当時曲げ加工した実船板、Fig. 13 に加熱線配置、Fig. 14 に加熱後の形状確認の写真を示す。

4.3.3 主曲率方向に沿った移動加熱（現在）

曲げの最大・最小主曲率方向に加熱線を配置して、この格子の上で曲げおよび面内変形を実現していく。これによって曲げと面内加熱線による剪断成分の影響が避けられ、4つのひずみ成分の取り扱いも容易になった。また、これまでの定速度（一本の加熱線の速度は一定）移動加熱に対して加熱線格子単位に速度が変化するため、より滑らかな固有変形を与えることが可能となった。

4.4 面内ひずみの計算

加熱線が作る変形が、曲げあるいは面内収縮だけならば取り扱いはずっと易しくなる。実際の加熱線はひとつの入熱条件に対して加熱線方向、及びその直交方向それぞれに曲げ変形と面内収縮の4成分の変形を作り出す。また、加熱線がもたらす面内変形は剪断を作れない、という特徴もある。そのためFig. 8のような目的固有ひずみ分布を加熱線による生成固有ひずみの組み合わせで実現するのは困難である。そこで、加熱方案を求める前に加熱線による生成固有ひずみの4成分の組み合わせによって実現可能な目的固有ひずみ分布を求めて、これを生成固有ひずみで置き換えて加熱方案としている。

曲面に沿った曲げひずみ分布は曲面形状に対応して1組のみ存在する。著者らはFEMによって求めているが幾何学的な手法でも求められる。これに対応する面内ひずみは曲げ主軸方向を向いて、たわみ形状に適合しておりかつ加熱線のもたらす変形からつくり出だせるものであることが必要である。これはFEMの繰り返し計算によっても得ることができるが、著者らはひずみとたわみの間の適合条件式を制約条件としてひずみエネルギーを最小にする解として2次計画法で求めている。

4.5 形状別方案算出の計算例

4.5.1 曲げ変形と面内変形の使い分け

熟練工による従来の線状加熱では、目的とする形状に

よって適宜、曲げと面内の固有変形を使い分けている。このことは、まず一方の曲げ（横曲がり）を合わせた後にもう一方（縦曲がり）を合わせて行く加工手順からも伺えるが、この時、作業者は無意識のうちにFig. 8の各方向について支配的な固有変形（ひずみ成分）をターゲットにしているのである。この使い分けは、有効で直感的に理解しやすいという利点がある²⁾。

本システムによる加熱方案の算出においても、意識的に使い分けを行っており、基本形状（碗型・鞍型）をターゲットにした場合は、曲げ成分と面内成分のうち支配的な成分のみに着目して加熱条件を決定する。ところが船体曲面の中には、どれが支配成分とも言えない形状、あるいはどちらの成分も無視できないという形状が存在する。その場合、作業者は勘と経験による微調整で目的形状を実現していくが、本システムではフィードバックによる微調整を考えないのであらかじめその影響について把握しておくことが必要である。

4.5.2 変形モードの飛び移り

碗型形状を実現するための加熱要領は一般的に良く知られている。基本は、まず目的形状の横曲がりに合わせる。従来法ではプレスなどの冷間加工によることが多いが、線状加熱による場合には比較的早い速度で様に加熱する。その後、シーム部分（長さ方向のエッジ）をゆっくり加熱して徐々に縦曲がりを合わせていく。前者は曲げの固有変形、後者は面内の固有変形を狙った加熱である。

碗型形状の場合には、本システムでも従来法とよく似た加熱方案が求まり、これまで行った実船の加熱でも良好な結果を得ているが、無視した成分が無視できない変形を誘発する変形モードの飛び移り現象について以下に紹介する。

対象形状をFig. 15に示す。

Fig.15 Target bowl shape

Fig.16 Heating line arrangement for bowl shape

板サイズおよびたわみ形状は、長さ 4m、幅 2m、たわみ量は縦横ともに 0.1m でそれぞれ 20m と 5m の曲率半径に相当する。

梔型形状に対して算出される加熱方を Fig. 16 に示す。従来法では、幅方向の加熱は両シームから 1/4 程度を集中的に加熱するが、本システムによる加熱方案では端から中央に向かって連続的に滑らかな収縮を与える目的で加熱線が上シームから下シームまで貫通している。

ここでは飛び移り現象を捕まえるために長さ方向の加熱線間隔を 150mm に固定し、幅方向の加熱線間隔 dx を変えてシリーズ計算を行った。

Fig. 17 は、算出した加熱方案に対する計算形状と目的形状のたわみ差の最大値を示している。この計算では $dx=180$ から 179 ミリのところで突然たわみ差が大きくなっている（変形モードの飛び移り現象）。この時の各計算形状と目的形状を Fig. 18 に示す。

加熱線間隔 dx と一本の加熱線に要求される X 方向の面内収縮量は比例関係にあるため dx に伴って選択される加熱条件は変化する。各場所で要求される X 方向の面内収縮量 (δm) を満足する加熱条件に伴う曲げ変形によって飛び移り現象がおき、この梔型形状の場合には、その臨界点がこの近辺に存在したと思われる。

Fig.17 Maximum difference between target & calculated shape (the 1st iterating cal.)

Fig.19 Additional bending component

$dx=179$ と 300 ミリの時に選択される各加熱条件に付随する曲げ変形量と要求される曲げ変形量を Fig. 19 に示す。これより、付随的な曲げ変形量が最大となる場所では「実現曲げ変形／要求曲げ変形」比は $dx=300$ ミリで 3.5、 $dx=179$ ミリでは 6.1 にもなっている。

Fig. 20 には実際の加熱実験において起こった同様な変形モードの飛び移り現象の写真を示す。

Fig.18 Calculated deflection (the 1st iterating cal.)

Fig.20 Experimental result

4.5.3 平ねじりの加熱方案

対象形状を Fig. 21 に示す。両面 45° 方向からの互いに直交する曲げ変形と板中央の面内収縮によって実現 (Fig. 8) される平ねじりに対して、曲げの最大・最小主曲率方向に加熱線を配置し、最大主曲率方向に対しては、加熱線による横曲がり、もう一方に対して加熱線による横収縮を対応させる前節の加熱方案 (「A-Type 方案」と称する) による計算結果を Fig. 22 に、両方向とも曲げ成分のみを考慮した加熱方案 (「B-Type 方案」と称

による結果を Fig. 23 に示す。

これより平ねじり板においては2方向の曲げひずみを組み合わせることによって作られる剪断ひずみが支配的であることが分かる。ただし、平ねじり曲面もねじり量が大きくなると面内ひずみを無視することはできない。Fig. 24 に 200mm のねじれを持つ平ねじり板に曲げ変形のみを与えたケースを示す。
ここでは曲げ変形と併せて面内ひずみを与える必要がある。

Fig.21 Target twist shape & evaluate sections

(a) Longitudinal Section

(b) Transverse Section

Fig.22 Deflection by A-Type (Twist=100mm)

(a) Longitudinal Section

(b) Transverse Section

Fig.23 Deflection by B-Type (Twist=100mm)

(a) Longitudinal Section

(b) Transverse Section

Fig.24 Deflection by B-Type (Twist=200mm)

5. 実船板への適用

5.1 加熱時間と修正について

コンテナ船に適用したときの加熱時間は短いもので 1 時間以下、長いもので 10 時間を越えるものを含み、平均 4 時間程度であった。これは鋼板のハンドリング時間などを含まない、実際に NC 台車が動いて加熱している時間でこの間は完全に放置無人状態である。

自動加熱終了後、シームの折れの補正など簡単な部分修正を経験 3 年目のオペレータが行うケースもある。

いくつかの実施例を次に示す。

5.2 加熱方案と加熱結果例

5.2.1 BS32-GA 板 (エンジンルーム後部外板)

ボス部と平行部を滑らかに結ぶために組立ブロックの構成上 1 枚の中にいくつもの基本形状(枕・鞍・ねじれ)を含む曲面の板が出てくる。Fig. 25 に示す対象の BS32-GA 板は、幅方向は S 字で全体にねじれを伴う非常に複雑な曲面形状をしている。自動算出した加熱方案を Fig. 26、方案シミュレーションによる加熱後の推定形状を Fig. 27 に示す。

Fig.25 Target shape (BS32-GA) in Container Ship

Fig.26 Calculated heating plan for BS32-GA

(a) Longitudinal Section

(b) Transverse Section

Fig.27 Calculated deflection by entire heating plan

この板の加熱は 2 回の反転をはさんで 3 ステップで行い、各ステップの加熱時間は各々 1 時間 30 分、2 時間 30 分、1 時間 10 分でトータル 5 時間 10 分を要した。

Fig. 28 に Step-2 加熱後の計画形状と計測形状の比較を示す。計測状態(支持状態)に不具合があるが全体的に目的形状とよく合っている。なお一部楕円で囲んだ部分に形状差が見られるが、これは鋼板の自重がコーナー部に集中した状態で Fig. 26 の楕円部分の加熱線を実行したため、この部分で板に折れ曲がりが発生したものである。

Fig. 29 に Step-3 加熱後の最終計測形状と計画形状の比較を示す。Step-2 加熱によるコーナーの折れの影響が残っている(支持定盤の上で板が転がっている)部分を除いては目的形状とよく一致している。

5.2.2 BC11-B 板の自重たわみ

前項に示した例で支持状態の不具合を指摘したが、曲がっていく大きな曲面鋼板を正確に支えることは難しい。従って観測される加熱後形状、支持点の配置や高さそこに働く自重影響を考慮して評価する必要がある。

本システムでは、計画形状に対して支持状態を考慮した自重たわみ形状を算出、計測形状と比較して評価する

Fig.28 Measured and calculated shape after Step-2

Fig.29 Measured and calculated shape after Step-3

ことが可能である。また重力と板継ぎ定盤の支持点を考慮することによって、自重による自然たわみ検討も行っている。

対象の板を Fig.30 に示す。この板に対して支持状態と重力を考慮した計算形状を算出し、計測形状と比較した。支持点配置を Fig.31、計算結果を Fig.32 に示す。またこの時の支持点板力と支持点位置のたわみを Table2 に示す。

Fig.30 Target shape (BC11-B) in Container Ship

Fig.31 Supporting Points at measuring

Fig.32 Calculated deflection under own weight & supporting condition at measuring

Table2 Supporting condition under own weight

支持点	支持高さ (mm)	計算形状 (mm)	支持反力 (kgf)	支持点	支持高さ (mm)	計算形状 (mm)	支持反力 (kgf)
1	409.4	409.4	-426.2	9	60.5	60.5	-508.3
2	104.5	104.5	-625.0	10	55.8	55.8	-507.1
3	299.4	299.4	-367.9	11	26.2	26.2	-137.7
4	46.2	46.2	-268.0	12	123.6	123.6	-410.0
5	198.4	198.4	-493.1	13	49.8	49.8	-593.4
6	21.2	21.2	-340.2	14	234.6	234.6	-466.7
7	115.5	115.5	-609.9	15	116.5	116.5	-510.6
8	27.8	27.8	-656.0	16	376.9	376.9	-361.3

6. 今後の課題

開発方針に関連するが、技能代替を目指す上で処理範囲の拡大、中でも曲率の大きな板への拡張が課題である。

現在シミュレーションに使っているFEMプログラムでは曲率をたわみの2階微分で近似しているため、曲率が大きくなると誤差が無視できなくなる。この改造が必要である。加熱-変形関係を表すデータベースに大曲率を与えるための大きな変形が得られる加熱条件を付け加える必要もある。これらを進めることで曲げ精度の一層の向上も期待できる。従来にない曲げ精度が実現すれば曲がり部構造の組立生産性の改善に大きな貢献ができるよう。

7. 結論

IHIマリンユナイテッド呉工場で実船適用されている線状加熱自動鋼板曲げシステム(IHI- α)の開発経緯、実績とそこでの特徴的な取り組みを示した。

著者らは船体曲面の形状情報から、それを実現するための加熱方案および加熱前の展開形状を同時に算出するシミュレーションソフトと、高周波電磁誘導による熱源および加熱コイルを搭載した数値制御台車を開発して実船の外板曲げを行ってきた。

従来の線状加熱が、“加熱→確認→加熱・・・”を繰り返す試行錯誤作業なのに対して、著者らの方法は目的形状とそれを実現するための加熱方案および展開形状が理論的に結びついており1回の加熱によって実用上許容範囲内の精度で目的形状が得られる。

謝 辞

大阪大学上田名誉教授、村川教授には種々のご支援および貴重な御討論を頂いたおかげで実用化に結びつけることができました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 上田, 村川, Rashwan, 奥本, 神近: 計算機支援板曲げ方案自動生成システムの開発(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.557-586, (1991)
- 2) 上田, 村川, Rashwan, 奥本, 神近: 計算機支援板曲げ方案自動生成システムの開発(第2報)固有ひずみの観点から見た現場での作業手順, 日本造船学会論文集, 第171号, pp.83-93, (1991)
- 3) 上田, 村川, Rashwan, 根木, 神近, 小川: 計算機支援板曲げ方案自動生成システムの開発(第3報)加熱条件と固有変形, 日本造船学会論文集, 第173号, pp.409-419, (1993)
- 4) 上田, 村川, Rashwan, 神近, 石山, 小川: 計算機支援板曲げ方案自動生成システムの開発(第4報)加熱位置, 方向, 加熱条件の決定法, 日本造船学会論文集, 第174号, pp.683-695, (1993)
- 5) 石山, 顧, 小川, 高倉: 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, pp.731-738, (1996)
- 6) 石山, 丹後, 中村: FEMを応用した線状加熱自動化研究の, 日本造船学会論文集, 第183号, pp.335-342, (1998)