

# 船殻外板の全自動曲げ加工システム “IHIMU- $\alpha$ ” の開発

## “IHIMU- $\alpha$ ” A Fully Automated Steel Plate Bending System for Shipbuilding

丹 後 義 彦 株式会社アイ・エイチ・アイ・アムテック 製造部 課長  
石 山 隆 庸 株式会社アイ・イー・エム 技師長 工学博士  
鈴 木 博 之 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド 生産・システム技術統括部 部長

船殻曲がり外板の曲げ加工法として半世紀以上前から線状加熱が用いられてきた。この線状加熱は造船固有の技能であり、習得に10～20年かかる造船を代表する「匠の技」である。しかし、近年の後継者不足によって技能の伝承、加工能力の確保が喫緊の課題になっている。株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッドはこの技能の自動化研究を石川島播磨重工業株式会社（現、株式会社 IHI）時代の1990年に開始し、1997年には初号機 “IHI- $\alpha$ ” を開発した。今回この初号機を大幅に改良し、旧装置では人手に頼らざるを得なかった最終仕上げも含めた全工程を無人で処理する新型機 “IHIMU- $\alpha$ ” を開発したので紹介する。

For more than half a century, line heating has been used in shipbuilding as a method of forming curved shell plate. This technique relies completely on the experience, instincts and know-how of the worker involved. In 1997, in order to automate this technique, “IHI- $\alpha$ ” was developed, the world’s first automatic processing system for bending steel plate. Since then, the IHI- $\alpha$  system has been used for actual ships under construction while being continuously improved. A new version of the system has now been successfully developed that can automatically handle the entire process, including the additional heating used for finishing the plates. This paper details the latest IHIMU- $\alpha$  system.

### 1. 緒 言

線状加熱とは、鋼板加熱時の局所的な熱応力による塑性変形を組み合わせる目的の非可展曲面を実現する鋼板曲げ加工法の一つである。ガスバーナと水ホースを主な工具とする従来法による線状加熱の作業状況を第1図に示す。

造船技術として手軽な装備で任意の曲面が実現できる万能加工方法である。一方、加工対象は千差万別でその作業工程も多岐にわたるため、いわゆる作業指示書と呼べるものはなく、すべてが作業者の経験とノウハウにゆだねられ

てきた。このため品質、コストおよび納期の管理が難しく、近年の後継者不足による技能伝承、加工能力の確保が喫緊の課題になっている。

この技能の技術化、すなわち計算機や有限要素解析などのシミュレーション技術をフル活用した板曲げ方案の自動生成や、プレスなどによる冷間加工も含めた自動化のための取組みが多数報告<sup>(1)~(3)</sup>されているが、いずれも技能の代替および支援技術には至っていない。

筆者らは1990年に同技能の技術化に向けた取組みを開始し、1997年には自動曲げ加工システムの初号機

(a) 線状加熱作業 1



(b) 線状加熱作業 2



第1図 従来法による線状加熱の作業状況  
Fig. 1 Conventional line heating work

“IHI- $\alpha$ ”<sup>(4)~(7)</sup> (第2図)を開発して、株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド (IHIMU) の主要製品であるバルクキャリア、VLCC (Very Large Crude Carrier) およびコンテナ船の外板曲げ加工に適用してきた。

その後、株式会社 IHI (IHI) 技術開発本部および大阪大学との共同研究を続け、2007 年度および 2008 年度に独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の実用化開発事業の助成を受けて完全自動化への研究を進めた。

本稿では、実船板の曲げ加工実績とこれまでの研究成果を反映し、IHI 技術開発本部、株式会社 IHI エスキューブをはじめとした IHI グループの技術力を結集して開発した、最新鋭の全自動曲げ加工システム “IHIMU- $\alpha$ ” (第3図) について紹介する。

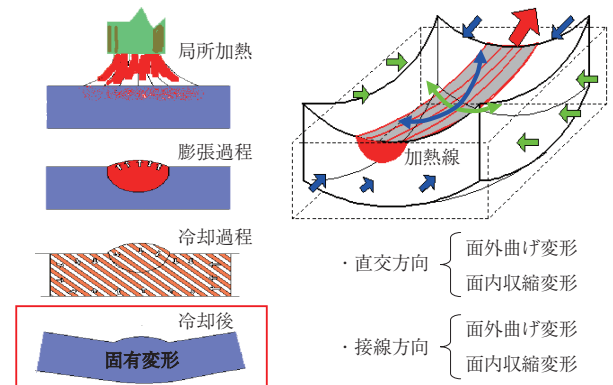
## 2. $\alpha$ システムの概要

目的形状を実現するために「鋼板のどこを、どの方向に、どういう順序および支持状態で、どれくらいの入熱量を与えるか?」を数値で表したものを加熱方案と称している。

$\alpha$  システムは、加熱条件と変形量の関係を系統的に整理した「加熱-変形データベース」と、このデータベースを参照しながら加熱方案を自動算出する加熱方案生成プログラムおよびこの加熱方案を実行するハードウェアによって構成されている。

### 2.1 局所加熱による変形メカニズム

鋼板への局所加熱による変形メカニズムを第4図に示す。線状の加熱では加熱線に対して直交方向と接線方向そ



第4図 局所加熱による変形メカニズム  
Fig. 4 Mechanism of deformation caused by local heating

(a) 外観



(b) 自動加熱

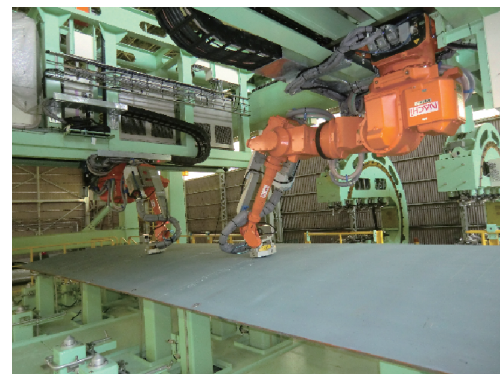


第2図 初号機 “IHI- $\alpha$ ”  
Fig. 2 View of the first IHI- $\alpha$  system

(a) 外観



(b) 自動加熱



第3図 新型機 “IHIMU- $\alpha$ ”  
Fig. 3 View of the latest IHIMU- $\alpha$  system

れぞれに面外曲げと面内収縮が生じる。このため作業者はこの四つの変形成分を意識し、鋼板上の適切な箇所に加熱線を配置しながら目的の曲面に仕上げていく。 $\alpha$  システムではこれら四つの変形成分のすべてをデータベース化した。

## 2.2 加熱方案

### 2.2.1 加熱方案の算出フロー

筆者らは、固有ひずみ理論に基づく弾性 FEM ( Finite Element Method ) 解析を中核とし、独自の解析手法と最適化によってこの加熱方案を実用的な精度および計算時間で算出する加熱方案生成プログラムを開発した。 $\alpha$  システムの加熱方案算出フローを第 5 図に示す。

設計情報である CAD データから生成される目的形状 FEM モデルと板厚、材質を入力すると、① 加熱位置 ② 加熱順序 ③ 加熱速度 ④ 鋼板の支持方法 ⑤ 反転のタイミング、などが出力される。

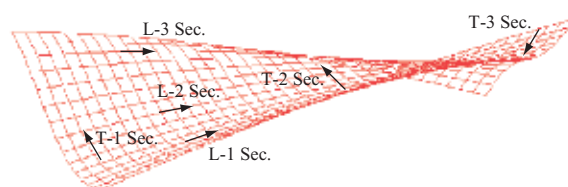
### 2.2.2 加熱方案の実施例

曲げ加工の目的形状の一例を第 6 図に示す。コンテナ船のエンジンルームの外板で、幅方向は S 字カーブ、長さ方向はねじれを伴う複雑な形状をしている。

この形状に対して算出された加熱方案を第 7 図に示す。

加熱線は 100 ~ 200 mm 長さの線素に分割されており、各線素で加熱速度は滑らかに変化している。

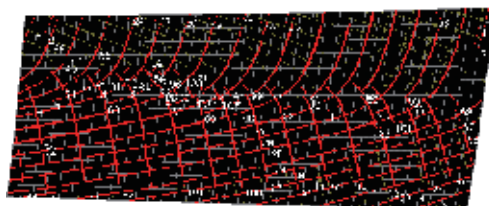
この加熱方案に従って初号機“IHI- $\alpha$ ”で自動曲げを行った結果を第 8 図に示す。第 8 図 - ( a ) , - ( b ) に示すグラフは、目的形状 ( 実線 ) と加熱後の計画形状 ( ● ) , 第 8



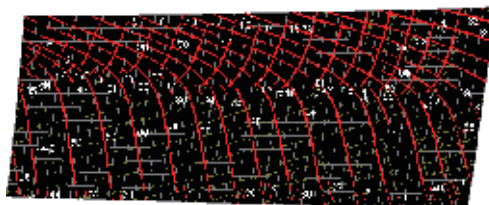
(注) 鋼板サイズ：7 500 (長さ) × 3 000 (幅) × 17 (厚さ) (mm)

第 6 図 曲げ加工の目的形状  
Fig. 6 Target shape for bending

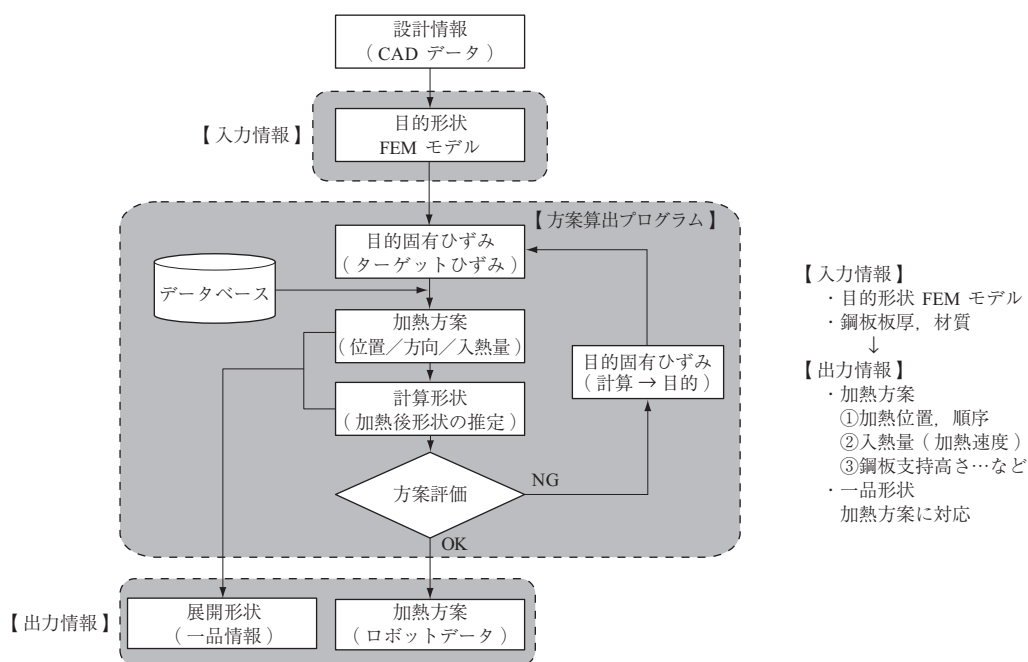
( a ) 鋼板表面の加熱線配置



( b ) 鋼板裏面の加熱線配置

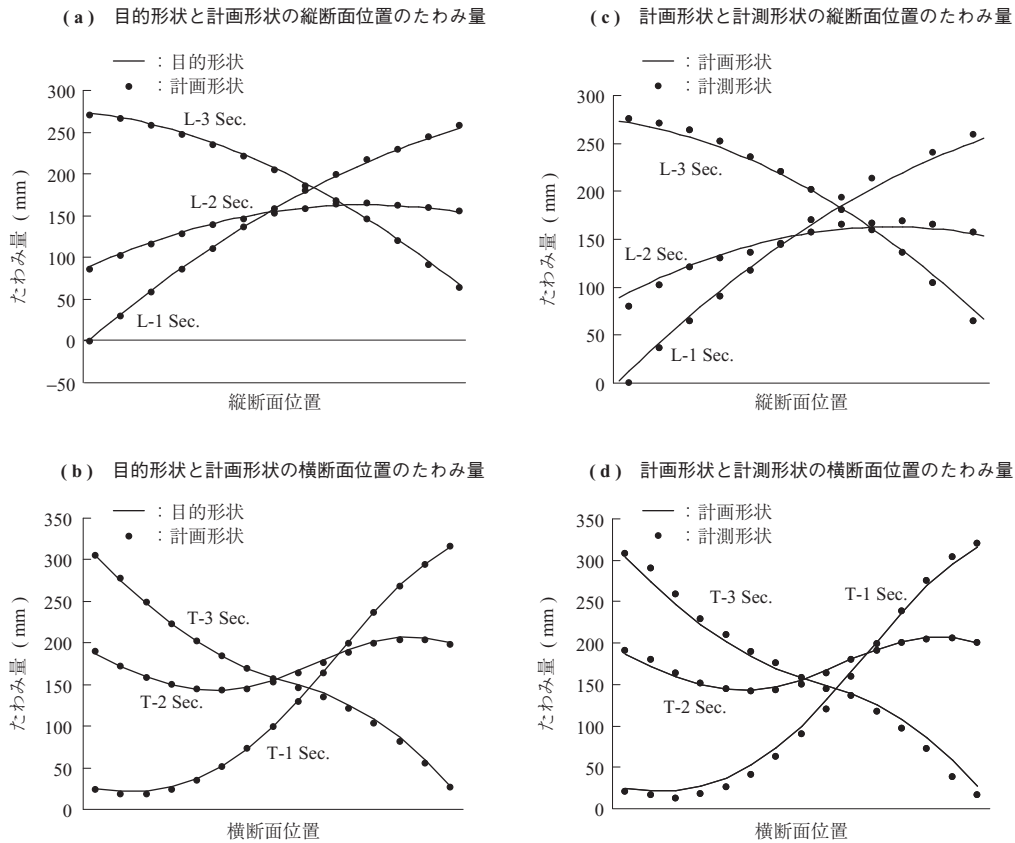


第 7 図 加熱方案  
Fig. 7 Heating plan



第 5 図 加熱方案算出フロー  
Fig. 5 Calculation process for heating plan





第 8 図 “IHI- $\alpha$ ” による自動曲げ加工の結果  
 Fig. 8 Results of automatic forming

図 - (c), - (d) に示すグラフは加熱後の計画形状（実線）と加熱後の計測形状（●）を比較したもので、それぞれ、第 6 図で示した各断面のたわみ形状を示している。

銅板支持高さの不具合によって加工途中に部分的な折れが生じたため、一部目的形状とのズレが生じたものの全体的に非常に良く一致した結果が得られた。

### 3. 新型機 “IHIMU- $\alpha$ ” の概要

#### 3.1 “IHIMU- $\alpha$ ” 開発の狙い

$\alpha$  システムの加熱方案によって、船尾構造の厚板（25～50 mm）、球状船首部の大曲率板（曲率半径 5 m 以下）を除く緩曲率板は許容精度内で仕上げることができる。

一方、1 枚の板を仕上げるにはある程度の時間を要し、さらに加工ステップも多岐にわたるため稼働途中の作業者の介在は、高度で複雑な自動機としてはメリットが小さく、さらに技能からの脱却の妨げになる。したがって、実績のある緩曲率板を対象に現状の  $\alpha$  システムのもてるすべての能力を最大限に引き出すことが “IHIMU- $\alpha$ ” システムの開発の狙いである。

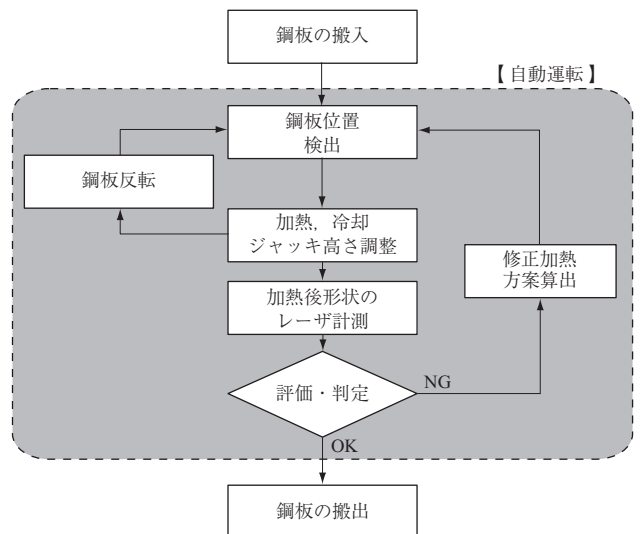
そのための主なターゲットは以下である。

- (1) 曲げ型による評価・判定の自動化

- (2) 素材の物性値や残留応力など避けられないばらつきに対する修正加熱の自動化による対応
- (3) 目的曲面に無理なく近づけていくために随時発生する反転作業の自動化
- (4) 加熱方案を正確に実施する熱源ハンドリング装置

#### 3.2 自動運転処理フロー

新型機 “IHIMU- $\alpha$ ” における自動運転処理フローを第 9 図



第 9 図 “IHIMU- $\alpha$ ” における自動処理フロー  
 Fig. 9 Process of IHIMU- $\alpha$ 's automatic processing

に示す。

装置オペレータが鋼板を鋼板支持定盤上にセットし、安全柵扉の外に設置されている機側操作盤のスタートボタンを押すと自動運転がスタートし、鋼板位置検出 → ジャッキ高さ調整 → 加熱・下面冷却 → 鋼板反転 → 鋼板位置検出 → ジャッキ高さ調整 → 加熱・下面冷却 → 形状計測 → 結果の評価 → 修正加熱方案算出 → 修正加熱 → 形状計測…を自動で繰り返す仕組みになっている。

### 3.3 “IHIMU- $\alpha$ ”の特長

#### 3.3.1 多関節ロボットの採用

初号機の加熱コイルは、自重によって鋼板表面に接触した状態で曲面に沿ってしゅう動する機構であったが、この方法ではたわみ量が大きくなると鋼板端部の加熱位置決めが難しく、端部に大きな収縮変形が要求される碗型形状では十分な加工精度が得られなかった。また端部収縮の不適合によってエッジ部分が波打つなどの不具合があるため、実作業における端部絞り加熱の大部分は人手にゆだねていた。

このような課題を解決するため、“IHIMU- $\alpha$ ”では加熱コイルのハンドリング装置として7軸多関節ロボット2台を導入した。第10図にロボット加熱装置を示す。

各ロボットはランウェイガーダ上を走行する2台の搬送台車につり下げられており、初号機では困難であった鋼板端部の加熱に対し、2台のロボットが両面から挟み込んで一定時間加熱することができるため、効果的に端部収縮を与えることが可能となった(第10図-(a))。さらに鋼板上面からの曲げ加熱も2台のロボットが協調移動しながら行うことが可能である(第10図-(b))。

#### 3.3.2 鋼板支持定盤と下面冷却システム

第11図に“IHIMU- $\alpha$ ”の鋼板支持定盤を示す。定盤上に



第11図 鋼板支持定盤

Fig. 11 System for supporting of plates

配置されている46本の電動ジャッキは、加熱の進捗に伴って変化する鋼板形状と連動して、逐次自動で高さ調整される。

また、初号機では加熱コイルの周り、すなわち曲げ鋼板の上方から冷却用の水を噴射していたため、水の流れる方向が加熱方向とは無関係になり、さらに対象が碗型形状の場合には鋼板上に水たまりができる。このため冷却効果の再現性に欠けるという課題があった。

“IHIMU- $\alpha$ ”では、鋼板支持定盤内に配置された電動ジャッキの頂部に噴水ノズルを取り付け、鋼板下面から噴水して鋼板を冷却し、その課題を解決した。

#### 3.3.3 曲げ鋼板の反転

$\alpha$ システムの加熱方案では鋼板両面からの加熱が必要であり、さらに1枚の鋼板を仕上げるまでに最低でも3回の反転作業が必要であるため初号機では人離れおよび夜間無人運転ができなかった。

“IHIMU- $\alpha$ ”では、最大長さ12m、幅3.5m、たわみ深さ600mm、重さ10tまでの曲げ鋼板を反転する装置を組み込んだ。第12図に鋼板反転装置を示す。これによって加熱途中の反転作業も自動となり完全無人化を実現した。

(a) 端部静止加熱



(b) 上面移動加熱



第10図 ロボット加熱装置

Fig. 10 Robotic heating system



第 12 図 鋼板反転装置  
Fig. 12 System to turn over plates

### 3.3.4 曲げ後形状の確認・評価

初号機にも形状計測装置は装備されていたが、その結果を評価する仕組みが不十分であった。よって、自動曲げ後は作業者が断面曲げ型を当てて形状の確認および評価を行っていた。

“IHIMU- $\alpha$ ”では加熱終了後に曲げ後形状を自動で計測し、その結果を評価する仕組みを導入した。また、評価パラメタとして、従来までの目的形状と加熱によって得られた形状のたわみ差のほかに、板厚や曲面剛性によって要求精度が異なるという視点から、計測形状から目的形状まで矯正するために必要なひずみエネルギーによる形状評価の仕組みも導入した。

### 3.3.5 最終仕上げ加熱

最終の仕上げ作業は作業者が行う場合も難しいため、作業工数の大半がこの作業に費やされる。初号機では、修正加熱方案を算出する仕組みが不十分であったため形状確認、形状評価以降の仕上げ作業までを作業者にゆだねていた。

“IHIMU- $\alpha$ ”では、計測形状から目的形状までの修正方案を算出する仕組みを組み込んでおり、評価結果によって自動で修正加熱方案を算出し、継続して修正加熱を実施することが可能である。

## 4. 結 言

1997年に開発した自動曲げ加工システムの初号機“IH- $\alpha$ ”を大幅に改良し、初号機では人手に頼らざるを得なかった曲げ後形状の評価および修正の要否判定、必要であれば修正加熱方案の算出および修正加熱までの全工程を自動で処理する新型機“IHIMU- $\alpha$ ”を開発した。この新型機では、熱源である加熱コイルのハンドリング装置とし

て多関節ロボットを採用し、初号機では仕上げるのが難しかった全曲がり外板の7割を占める椀型形状も処理対象となった。

さらに $\alpha$ システムの加熱方案では不可欠な裏面加熱に伴う鋼板の反転も自動で行うことができるため、鋼板の搬入・搬出を除く全工程の無人化が可能になった。

本システムの当面の適用対象は、曲率半径5m以上(幅方向)×60m以上(長さ方向)、板厚は12～25mm(全曲がり外板の6～7割)である。将来はさらに高度な船尾厚板(30～50mm)および船首大曲率板(曲率半径3m)に対象を拡張する予定である。

## 参 考 文 献

- (1) 造船部：線状加熱板曲加工法(第一報) 石川島技報 第11巻第35号 1954年10月 pp.54 - 62
- (2) 西岡富仁雄, 西牧 興, 松石正克, 田中 武, 安川 度, 山内俊雄, 東郷 修：ユニバーサル多点プレス法による船体外板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 1972年 pp.481 - 501
- (3) 野本敏治, 大森拓也, 須藤 拓, 榎沢 誠, 青山和浩, 斎藤政男：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 1990年 pp.527 - 535
- (4) 上田幸雄, 村川英一, Nohamed Rashwan Ahmed, 奥本泰久, 神近亮一：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 1991年 pp.557 - 586
- (5) 上田幸雄, 村川英一, Nohamed Rashwan Ahmed, 神近亮一, 石山隆庸, 小川潤一郎：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 1993年 pp.683 - 695
- (6) 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 1996年 pp.731 - 738
- (7) 丹後義彦, 石山隆庸, 永原章二, 長島智樹, 小林 順：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 日本造船学会論文集 第193号 2003年 pp.85 - 95