

## 線状加熱によるT型組立鋼のねじり変形について

奥本泰久\* 清島祥一\*\* 江口茂男\*

### Torsional Deformation of Built-up T-Bars by Line Heating

Yasuhisa OKUMOTO, Shoichi KIYOSHIMA, Shigeo EGUCHI

#### Synopsis

Since the stiffeners for reinforcement of curved shell structure like ship hull are fitted along the complex surface, they are often deformed as twisted figure, and the three-dimensional bending process in the manufacturing is required. The process has been done by the line heating method using gas heating and water cooling, which is also applied for the steel plate bending of ship hull. It is desired to achieve the mechanization and automation by the operation of non-skilled workers, because this operation needs a lot of experience of 10~20 years. Hence, it is necessary to generalize and digitize these heating and cooling phenomena. For the preliminary study, measurements of temperature distribution and deformation of the stiffener are carried out during the line heating process. Furthermore, thermal elastic-plastic FEM analysis using general-purpose FEM software "Quick Welder" to simulate the phenomenon. The result showed that the FEM analysis was well coincided with the experimental results.

Key words: T-bar, Stiffener, Torsional deformation, Line heating, FEM analysis, Quick Welder

#### 1. 緒 言

船体外板のような曲面構造の内部補強材は、曲面に沿って取り付けられるため、2次元曲げに加えて3次元曲げ（ねじり）加工が必要となる場合が多々ある。一般に、2次元曲げはプレス機によって加工されるが、これらの補強材は長尺であるため3次元曲げは機械による加工が難しく、現在、線状加熱法（ガスバーナーと水ホースによる加熱冷却法）に依存している<sup>1), 2)</sup>。この技術は同じく船舶の外板構造の曲げ加工に用いられているが、10~20年の実務経験が必要とされ、脱熟練化や機械化、自動化を進めるためには、この加熱冷却現象の一般化、数値化が必要となる。

線状加熱曲げによる鋼板の曲げ加工は、既に各所で研究され現象の把握とこれに基づいた自動化装置が開発されているが<sup>3)</sup>、補強材の曲げ加工については研究が始まったばかりである。この基礎研究として、本稿では小型試験材を用いて、線状加熱による鋼板の温度分布と変形量を計測すると同時に、熱弾塑性FEM解析を行い、加熱冷却現象をシミュレートしたものである。

解析には汎用FEMソフトQuick Welderを使用した。

#### 2. 組立鋼の加熱変形

##### 2.1 加熱法

曲面構造の内部補強に使われる補強材は、図1に示すように2枚の鋼板をT型断面に溶接で組み立てた組立材と、引き抜きのL型断面の形鋼がある。いずれもウェブ(Web)とフェース(Face)またはフランジ(Flange)から構成される。図2に線状加熱法によってこれらを曲げ（ねじり）加工している現場の写真を示す。定盤上に部材を置き、予め治具（馬や矢）を用いて目的形状に合わせ、ガスバーナーでウェブ面とフェース面を斜めに加熱しながら水ホースで冷却していく。最後に治具を取り去ったとき、スプリングバック（弾性変形）が生じなければ初期の目的を達成したことになるが、変形が生じれば、再度加熱・冷却を繰り返す。写真にはウェブ面に斜めの白線（加熱線）が記入されているが、これは、どこをどのように加熱すれば目的の形状に成形できるかを、長年経験した現場の熟

\* 近畿大学工学部システムデザイン工学科 Department of System Design, School of Engineering, Kinki University  
\*\* 樹計算力学研究センター Research Center of Computational Mechanics, Inc.

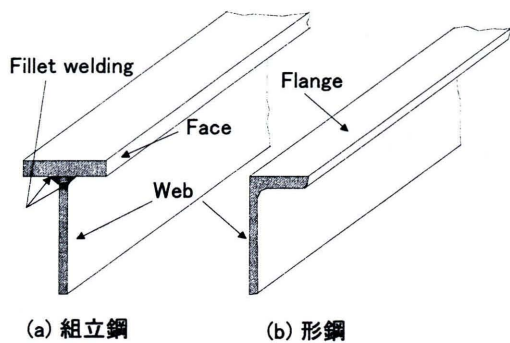


図1 補強材

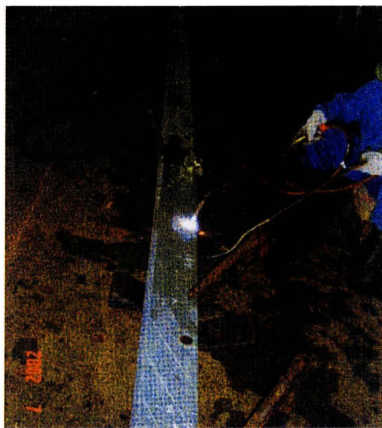


図2 組立鋼の加熱曲げ作業

練工が図面を見ながら決めたものである。さらに作業員は鋼板の表面の焼け具合（温度）を見ながら、ガスバーナーの移動速度やガス流量、水ホースによる散水を調整している。

## 2.2 加熱曲げ実験

線状加熱による組立鋼の加熱曲げ現象を熱弾塑性有限要素法によってシミュレーションすることを目的に、この計算精度を確認するため小型の供試材を用いて加熱曲げ実験を実施した。実験に用いた組立鋼は、船体構造用高張力鋼（降伏点  $32\text{kgf/mm}^2$ ）を隅肉溶接によってT型に組み立てた部分組立鋼2体（試験体B）で、形状を図3に示す。板厚は全て12mmとした。実構造に用いられる組立鋼は、この寸法よりやや大きく、長さは10~20mにもなるが、実験の都合でこの寸法としている。

なお、予備実験として、長さ400mm（試験体A）の試験を実施した。

加熱法は実際の工場で、加工する標準的な方法を用い、供試体をプロパンガスによるガスバーナーで図3に示す加熱線に沿って加熱した。通常ガス加熱と併用し、水ホースによる水冷を行っているが、今回はこれを省略している。また、一般にはフェース材も加熱しているが、ここではウェブ加熱のみとした。

計測はフェース材を下面にした状態で組立鋼を定盤

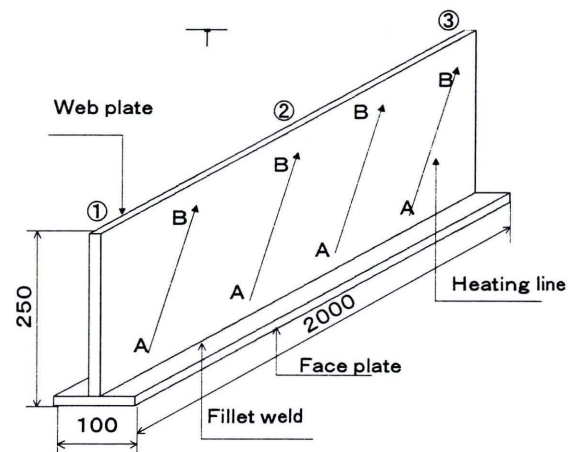


図3 試験体 (B)

上にして、鋼板の表面温度とウェブ材の横変形を実測した（図4）。表面温度は鋼板の加熱面と裏面をそれぞれアピオニクス社製の赤外線サーモグラフィによって計測し、加熱前、加熱中および加熱後の各ステップでデータを取った。

変位の計測はウェブ材の先端にダイヤルゲージを取り付け、図3に示す①②③の位置で、横変位を同様のステップで読み取った。

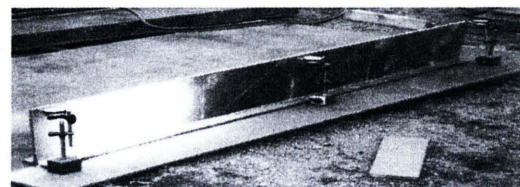
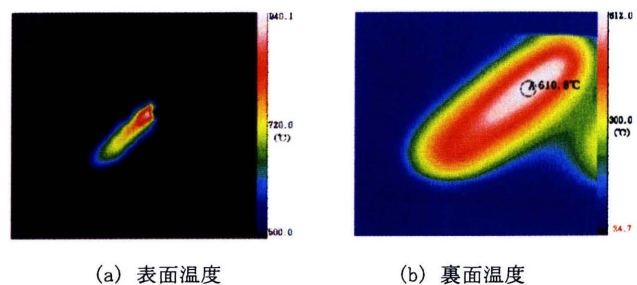


図4 実験状況

## 2.3 計測結果

温度計測結果の一例（試験体B）として、ガストーチが一つの加熱の中間に達した時点の加熱側表面温度分布を図5(a)に、裏面の温度分布を図5(b)に示す。最高到達温度は表面で  $906.7^\circ\text{C}$ 、裏面で  $610.8^\circ\text{C}$ であった。また、加熱終了後、安定した30分経過時の横変形を図6に示す。

試験体B1、B2は同一の寸法、材質で加熱方法もほぼ同一であるが、下端（フェース）に横滑りが生じたため、絶対値はやや異なった結果になった。



(a) 表面温度

(b) 裏面温度

図5 温度計測結果

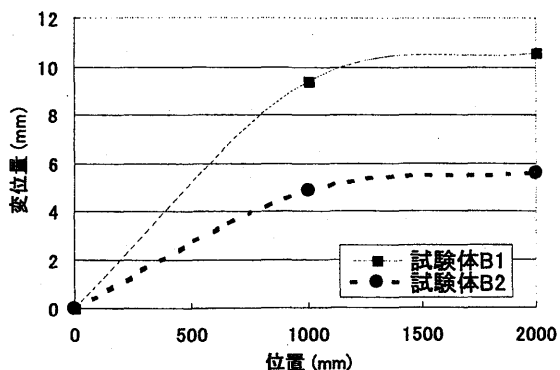


図6 横変位計測結果

### 3. 有限要素解析

#### 3.1 適用ソフト

線状加熱のシミュレーションには、溶接時の温度や変形を解析する市販プログラム Quick Welder (開発元: (株) 計算力学研究センター) を用いた。本プログラムは、溶接シーケンスに従って溶加金属と溶接熱を加えながら熱弾塑性解析を行なうものである<sup>4)</sup>。ここでは、本プログラムを線状加熱曲げの解析に用いることにした。溶接と違って線状加熱の場合は溶加金属の付加はなく、加熱源の移動のみを行なえばよい。加熱はガスバーナーによって行われるため中心からの距離によって異なった分布となり、熱の入力としてガウス分布による熱流束分布を用いた。

以下に、Quick Welder によって線状加熱のシミュレーションを行なう際に用いられる熱弾塑性解析の概要を述べる。

#### 3.2 熱弾塑性 FEM 解析の理論

ベースとなる方程式は、非定常の熱伝導方程式と、熱膨張ひずみを考慮した弾塑性体の力の釣合い式である。いずれも有限要素法を用いて、節点温度と節点変位を未知数として離散化している。熱伝導解析と応力変形解析のタイミング関係を図7に示す。

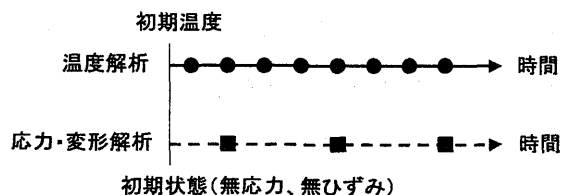


図7 温度解析と応力解析のタイミング

温度解析の時間きざみは、時間積分精度を確保するために、定められた最大温度変化量となるように内部制御される。応力変形解析は計算時間がかかるため、定められた温度変化量を超えたときに挿入される。

温度解析は、熱物性や熱伝達率の温度依存性を考慮した非定常の熱伝導方程式 (1) を解く。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \lambda \nabla T \quad (1)$$

- $\rho$  : 密度
- $c$  : 比熱
- $T$  : 温度
- $t$  : 時間
- $\lambda$  : 熱伝導率
- $\nabla$  : 勾配演算子

(1) 式に対し、時間差分に後退差分法を用いて離散化すると、節点温度を未知数とする有限要素式 (2) を得ることができる。

$$(k + m)T = mT_p \quad (2)$$

- $k$  : 要素熱伝導マトリクス
  - $m$  : 要素熱容量マトリクス
  - $T$  : 時間増分出口での節点未知温度ベクトル
  - $T_p$  : 時間増分入口での節点既知温度ベクトル
- 熱源からの入熱や外気への放熱条件は、節点集中化法を用いて、

$$hT = hT_\infty + q \quad (3)$$

- $h$  : 節点に分配した熱コンダクタンス  
(= 熱伝達率 × 節点の受け持ち面積)
- $T_\infty$  : 雰囲気温度
- $q$  : 節点に分配した流入熱量  
(= 熱流束 × 節点の受け持ち面積)

(2)式を、固体部を分割した全部の要素に、(3)式を入熱や放熱のある全部の節点について重ね合わせると、以下の全節点温度に関する連立方程式が得られる。

$$(K + M)T = MT_p + HT_\infty + Q \quad (4)$$

- $K$  : 全体熱伝導マトリクス (=  $\sum k$ )
- $M$  : 全体熱容量マトリクス (=  $\sum m$ )
- $H$  : 全体熱伝達ベクトル (=  $\sum h$ )
- $Q$  : 全体流入熱ベクトル (=  $\sum q$ )
- $T$  : 時間増分出口での全体節点未知温度ベクトル
- $T_p$  : 時間増分入口での全体節点既知温度ベクトル

(4) 式を時間に沿って解き進めればよいが、1ステップの増分温度  $T - T_p$  が大き過ぎると時間積分の精度が悪化するので、一定の目標値を設定し時間きざみを制御する。また、 $K$ 、 $M$ 、 $H$  は一般に温度に依存するが、時間増分の出口温度  $T$  における熱物性値と熱伝達率を採用して収束計算を行なう。線状加熱の移動熱源は  $Q$  の分布に反映される。

応力変形解析は、熱ひずみを考慮した弾塑性体の力の釣合い式 (5)、(6) を解く。

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ep,ijkl} (\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{th,kl}) \quad (6)$$

- $\dot{\sigma}_{ij}$  : 応力速度テンソル
- $D_{ep,ijkl}$  : 弾塑性応力ひずみテンソル
- $\epsilon_{kl}$  : 全ひずみ速度テンソル
- $\dot{\epsilon}_{th,kl}$  : 熱ひずみ速度テンソル

(5) 式に仮想仕事の原理を用い、(6) 式に有限の応力増分に対する不平衡力を考慮すると、節点変位増分を未知数とする有限要素式 (7) を得ることができる。

$$k\Delta u = \Delta f_{th} + f_r \quad (7)$$

$k$  : 要素接線剛性マトリクス  
 $\Delta f_{th}$  : 熱ひずみによる等価節点力ベクトル  
 $f_r$  : 速度式を増分化したことによる不平衡力  
 $\Delta u$  : 節点変位増分ベクトル

固定条件と弾性支持条件や節点力は、節点集中化法を用いて、

$$h\Delta u = \Delta f \quad (8)$$

$h$  : 節点に集中化したばね定数、  
 固定節点では十分大きな値

$\Delta f$  : 節点に集中化した力増分

$\Delta u$  : 節点変位増分

(7)式を、固体部を分割した全部の要素について、(8)式を固定、弾性支持や荷重をかけている全部の節点について重ね合わせると、以下の全節点変位増分に関する連立方程式が得られる。

$$K\Delta u = \Delta F_{th} + \Delta F + F_r \quad (9)$$

$K$  : 全体接線剛性マトリクス ( $= \sum k$ )  
 $\Delta u$  : 全体節点変位増分ベクトル  
 $\Delta F_{th}$  : 熱ひずみによる全体等価節点力増分ベクトル ( $= \sum \Delta f_{th}$ )

$\Delta F$  : 全体節点荷重増分ベクトル ( $= \sum \Delta f$ )

$F_r$  : 全体節点不平衡力ベクトル ( $= \sum f_r$ )

ここで、(9)式の $F_r$ は、速度式(6)を有限の増分について解いているために生じる残差力で、これが十分小さくなるまで $K$ を更新して解き直している。

図7に示したように、(9)式は小さくない温度増分に対して解かれる。このため、収束が遅い場合や塑性ひずみ増分が大き過ぎる場合は、温度増分を分割してそれぞれの温度増分に対して(9)式を適用する。

#### 4. 実験体のFEM解析

##### 4.1 FEM 計算法

実験に用いた供試体を3次元ソリッド要素でモデル化し、線状加熱を負荷して温度分布を求め、次いで応力と変形の計算を行った。FEMモデルを図8に示す。実験部材は長さ2,000mmで加熱線は4個あるが、FEM計算ではこの1/2の1,000mmをモデル化した(解析1)。加熱は半径20mmの移動熱源をかけるものとする。

材料物性値は図9、図10のように温度依存性を考慮しているが、以下のものは温度依存性を無視して一定値とした。

密度 :  $7.8 \times 10^{-6}$  (kg/mm<sup>3</sup>)

比熱 : 0.13 (J/g/°C)

ポアソン比 : 0.3

線膨張係数 :  $1.5 \times 10^{-5}$  (1/°C)

解析は、まず、仮定した熱入力に対し、非定常熱伝導解析によって温度分布を求め、加熱ライン終点の最高到達温度を出力した。次のステップとして、この最高到達温度と、実験によって得られた最高到達温度とを比較して、この値に合うよう熱入力値を修正し、熱伝導解析と非線形構造解析を行った。

追加計算として、実際の試験に用いた全モデルを解

析する方法として、塑性ひずみによる検討を行った(解析2)。まず、全長さの1/2のモデルで熱弾塑性解析を行い、この計算で得られた2ブロック分(2加熱ライン)の塑性ひずみを全体モデルの4ブロックに初期ひずみとして与えた弾性解析を行った。このように解析を2段階に分けた理由は、各加熱線近傍に発生する塑性ひずみはほぼ同一のものと推定されるので、比較的小さなモデルの熱弾塑性解析でこれを求めておき、全体モデルの弾性解析で再利用すれば、計算時間と全体モデルの拡張性の両面で有利になるためである。

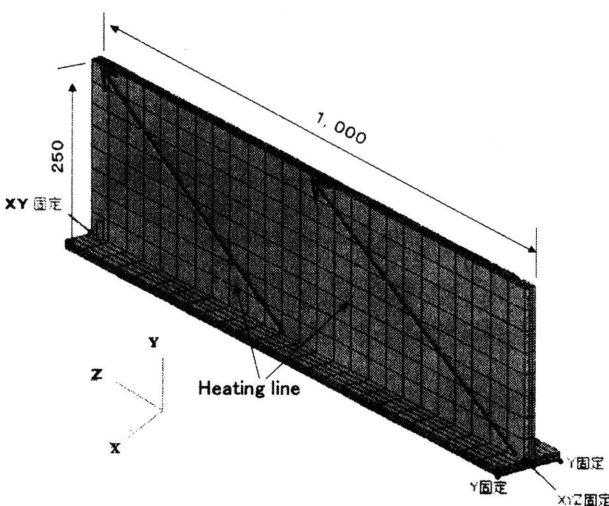


図8 FEMモデル

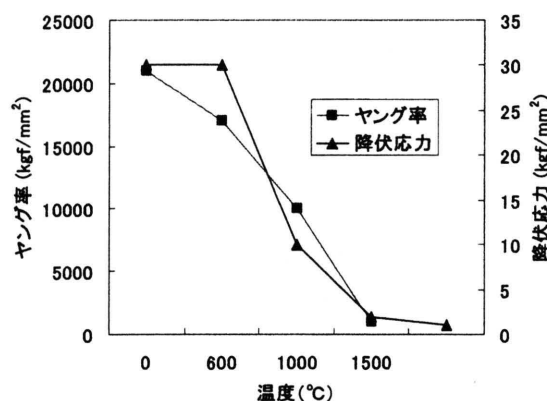


図9 材料常数の温度依存

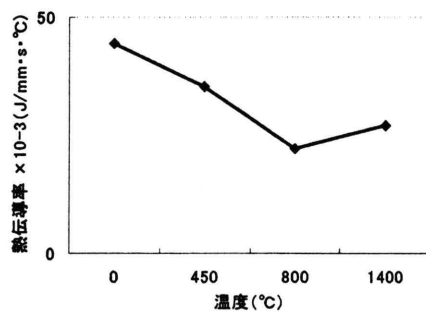


図10 熱伝導率の温度依存

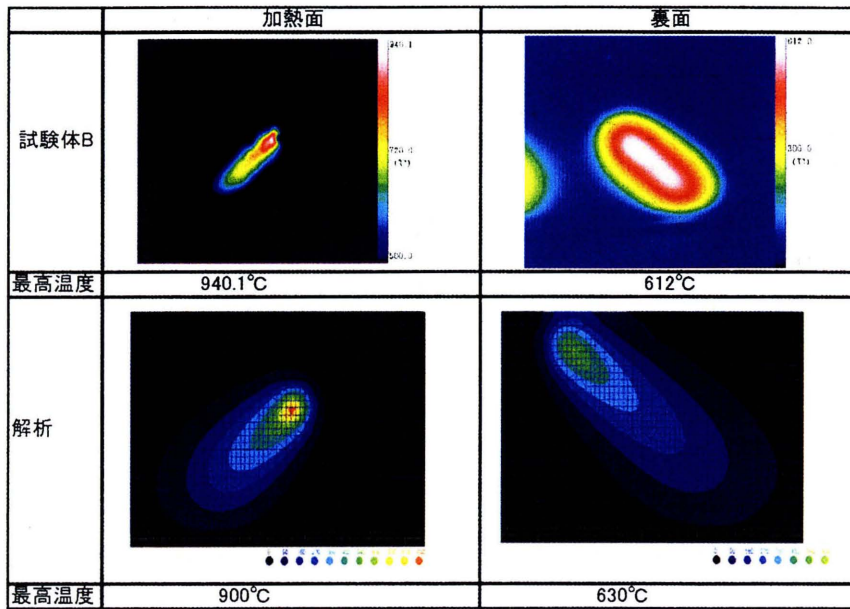


図 11 鋼板温度分布 (B2)

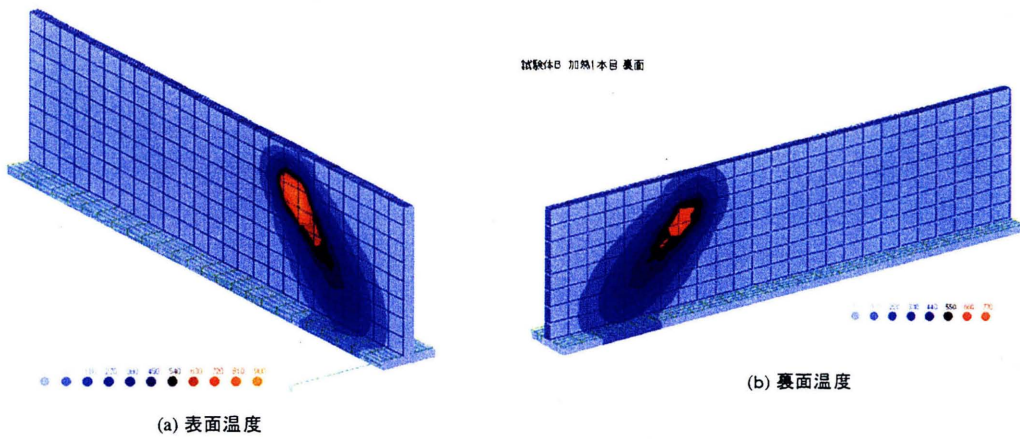


図 12 加熱時の鋼板温度分布 (解析 1)

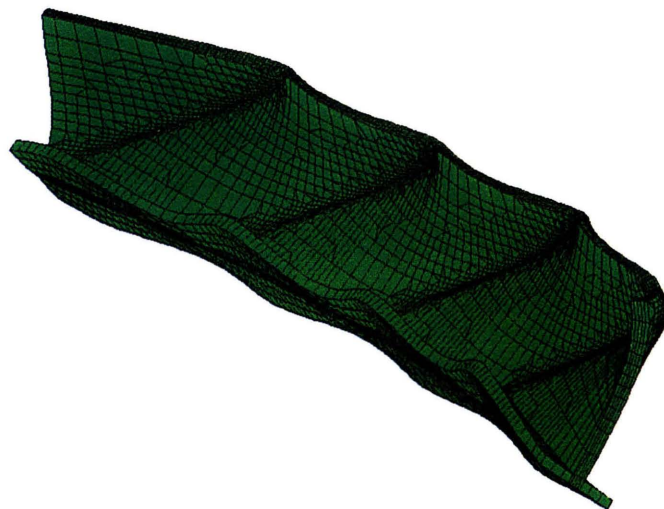


図 13 最終全体変形 (解析 2)

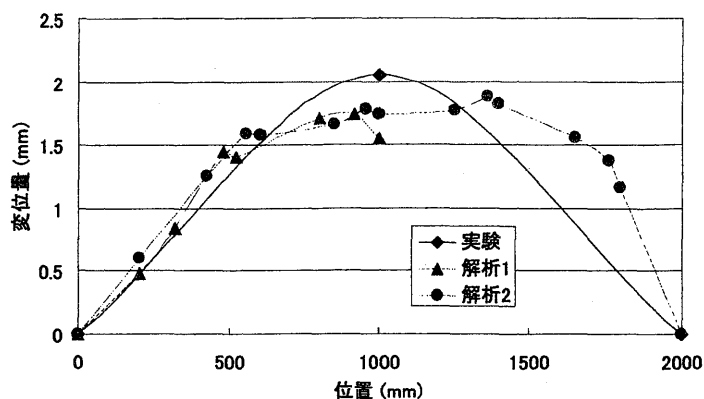


図 14 局部変形

#### 4.2 計算結果

熱伝導解析による温度分布を実験データと合わせ図 11 に示す (解析 1)。両者がよく一致しているのは、既述のように熱入力値を調整したためである。同じ試験体の加熱途中の温度分布を図 12 に示す。次に、この温度分布を使って変形計算を行った結果を図 13 (解析 2) に示す。線状加熱部で局部変形が見られ、目的とするねじり変形が生じている。また、実験結果との比較を図 14 に示す。ここで実験値は横全体変形成分を無視し、2,000mm 長さの両端で横変位は零としたローカル成分のみプロットしている。実験点は両端を除いて中央に 1 点しかないが、解析 1、解析 2 いずれもほぼ妥当な値と思われる。

#### 5. 結 言

線状加熱によってねじり加工を行う組立鋼について、加熱曲げ実験により温度分布と変形の計測を行った。併せて、熱弾塑性 FEM 計算によって変形を計算し、両者がよく対応することを確認した。これまで、熟練工の長年の経験に依存していた線状加熱曲げ現象を数値シミュレーションによって確認でき、今後の機械化、

自動化につなげる第一ステップとなった。

#### 謝辞

加熱曲げ実験は栄和電機(株)にて実施しました。関係者に謝意を表します。また、実験を担当した小林崇志君 (研究当時近畿大学学生) の労に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) (社) 日本造船研究協会 第 246 部会：船殻ブロックのデジタル生産技術の基礎研究、平成 13 年度報告書、(2002.3)
- 2) M. S. NAIR, and H. MURAKAWA: Theoretical study on Forming of Twisted T-Section Longitudinal (1st Report) Journal of Kansai Society of Naval Architects, Vol. 237, (2002.3), pp. 247-254.
- 3) 丹後、石山、奥本：鋼板の自動線状加熱曲げ加工装置の開発、経営工学実践研究論文集、No.6、(1999)、pp.112-118
- 4) 清島：パソコンを用いた溶接シミュレーション、溶接学会 溶接構造研究資料、(2002.1)