

# 局部加熱・冷却による板材の曲げ加工における最適加工条件の決定

大阪大学 基礎工学部 機械工学科

助手 楊 剛

(平成5年度奨励研究助成 AF-93044)

キーワード：局部加熱・冷却，曲げ加工

## 1. 研究の目的と背景

造船業において船舶の外板に用いる鋼板を任意曲率に成形する必要があるため、各板に応じて金型が必要になるプレス成形は適していない。目標形状に鋼板を成形する際の柔軟性を改善するために、複数のピストンを組合わせたプレスを用いる方法が提案されている。<sup>1)2)</sup>この方法では、1組のピストンを金型とパンチの代りに用いて、ピストンの位置を調節することにより任意の形状に成形している。しかしながら、曲率の小さな形状に成形すると、最終形状は鋼板の弾性変形によるスプリングバックの影響が大きく、所望の形状に鋼板を曲げるためのピストンの最適位置を決定することは難しい。

そこで、図1に示すような局部加熱により鋼板を曲げる方法が使われている。鋼板は片側から加熱され、板厚方向に温度勾配が生じ、次の冷却過程で不均一に収縮して目標形状に曲げられる。この方法は熱源で加熱する位置を調節することによって成形形状を変えられるため、フレキシブルな成形法であると考えられる。鋼板は高温下では降伏応力が低下するためにスプリングバック量が少なく、小さな曲率分布を持つ形状に簡単に成形できる。しかしながら、成形形状は温度勾配、板厚、材料特性などに影響されるため、目標形状を得るための加熱位置を決定することは困難である。この成形法は論理的な手法を用いずに、熟練者によって経験的に行われており、コンピュータ化されたシステムで用いるためには、成形条件を最適化する数値解析法の開発が必要である。

局部加熱による鋼板の曲げ加工プロセスを解析するために、幾つかの研究結果が報告されている。Tanigawaら<sup>3)</sup>は積層材料の熱伝導計算の近似手法を用いて得られた熱応力から板材の変形をシミュレーションしている。Nomotoら<sup>4)</sup>は弾性有限要素法を用いて局部加熱法による板材の曲げ角を求めているが、塑性変形の影響を考慮していないため精度は不十分である。また、Geigerら<sup>5)</sup>は熱応力の計算に差分法、板材の変形挙動を弾塑性有限要素法で計算している。Uedaら<sup>6)</sup>は弾性有限要素法によって加工後の板材における応力分布を計算し、一連の実験から得られた熱応力と加工条件の関係の実験式を用いて加工条件を決定している。

本研究では、局部加熱による板材の曲げ加工における曲率の計算手法を提案し、簡単のため平面ひずみ変形を仮定して計算を行う。鋼板を異なる温度分布を持つ2枚

の板材を1つに合わせたものにモデル化し、加熱過程では加熱側の板が塑性変形、他方は弾性変形すると仮定する。両方の板材の熱膨張量はそれぞれに働く力とモーメントの釣合から求める。冷却過程において両方の板材は弾性変形し、収縮量はそれぞれに働く力とモーメントの釣合から求める。

## 2. 計算方法

### 2.1 解析モデル

局部加熱による板材曲げ加工では、板材の曲げ角は主に板厚方向の温度分布に依存する。温度分布と曲げ角の関係を調べ、また実験によって計算結果を簡単に検証するために、図2のような局部加熱による板材曲げ加工プロセスの解析モデルを考える。長さL、厚さtの2枚の板材からなる試験片を用い、各板の温度は均一であると仮定する。実加工では熱源は移動しているが、解析モデルでは加熱位置は固定し、板材の変形は平面ひずみ変形を仮定する。

異なる温度勾配について曲げ角を調べるため、2枚の板材の間に断熱材を挿入する。加熱過程において、パー

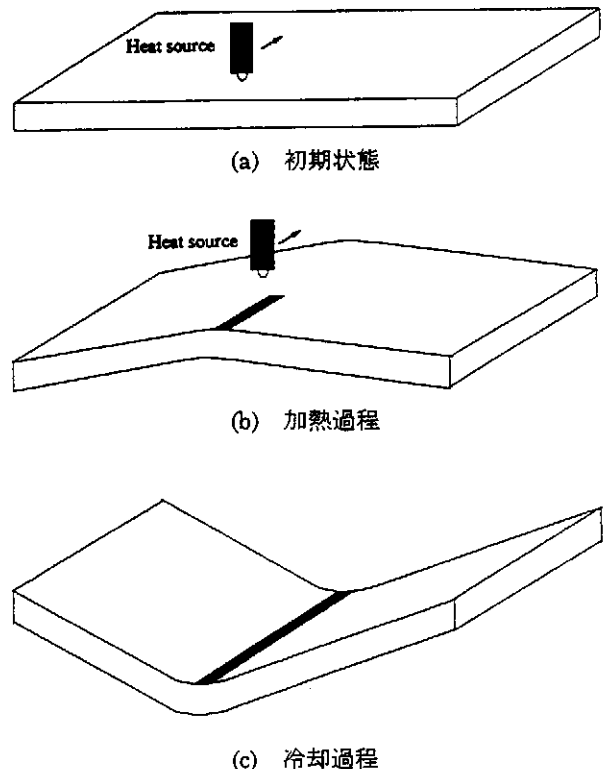


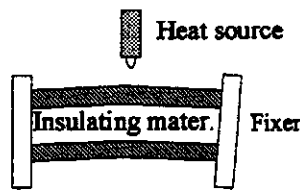
図1 局部加熱・冷却による板材の曲げ加工

ナ側側の板材を加熱すると初期温度  $T_0$  から  $T_h$  に上がり、反対側の板材の温度は  $T_0$  から  $T_c$  になる。各板材の温度はそれぞれ均一に  $T_h$ ,  $T_c$  に保たれ、2枚の板材の間に温度差が生じると仮定する。加熱過程では、加熱側の板材には高温で塑性変形が生じるため、試験片は図 2(b) のようにわずかに変形する。次の冷却過程において両方の板材の温度は初期温度  $T_0$  に下がると仮定する。試験片は板厚方向に不均一に収縮するため、試験片は図 2(c) のように変形する。図 2 における 2枚の板材間の幅  $d$  を調節したり、異なる断熱材を用いれば、様々な温度勾配における試験片の変形挙動を調べることができる。加工中の板材の温度は図 3 のように変化する。

シミュレーションでは加熱過程において加熱側の板材は塑性変形、他方の板材は弾性変形し、冷却過程では両方とも弾性変形すると仮定する。図 4 に示すように加熱側の板材の塑性変形は線形に加工硬化すると仮定する。



(a) 初期状態



(b) 加熱過程



(c) 冷却過程

図 2 局所加熱・冷却による板材曲げ加工のシミュレーションモデル

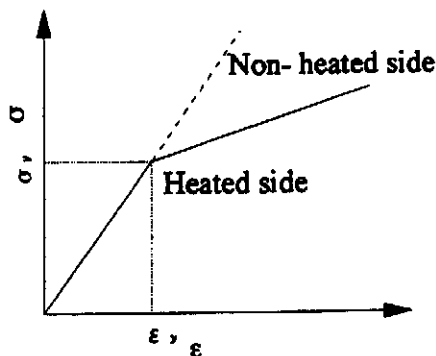


図 4 計算に用いた加熱側、非加熱側の板材における応力とひずみの関係

塑性変形、弾性変形における応力とひずみの関係を以下に示す。

$$\text{塑性変形: } \sigma = \sigma_y + F(\epsilon - \epsilon_y)$$

$$\text{弾性変形: } \sigma = E \epsilon_y$$

(1)

ここで  $\sigma_y$  は降伏応力、 $\epsilon_y$  は降伏応力に対するひずみ、 $E$  はヤング率、 $F$  は材料定数である。

## 2.2 加熱過程

試験片の両側の板材が自由に熱膨張したとき、加熱側、非加熱側それぞれの板の長さ  $L_h$ ,  $L_c$  は以下のようになる。

$$\text{加熱側: } L_h = (1 + \alpha \Delta T_h)L$$

$$\text{非加熱側: } L_c = (1 + \alpha \Delta T_c)L$$

(2)

$$\Delta T_h = T_h - T_0; \Delta T_c = T_c - T_0$$

ここで  $\alpha$  は熱膨張係数で温度に依存しないと仮定する。

熱膨張後における 2枚の板材の長さが異なり、加熱側の板材が塑性変形するため、図 5 に示すように板材の両端を固定すると試験片はわずかに曲げが生じる。曲率中心から試験片の任意の点までの距離  $r$ 、曲げ角  $\theta_1$ 、曲率中心から試験片の最も近い点までの距離  $r_0$  を考えると、加熱後の板材のひずみは次式で与えられる。

$$\text{加熱側: } \epsilon_h = \frac{\theta_1}{L_h} r - 1 \quad (r_0 + d + t \leq r \leq r_0 + d + 2t)$$

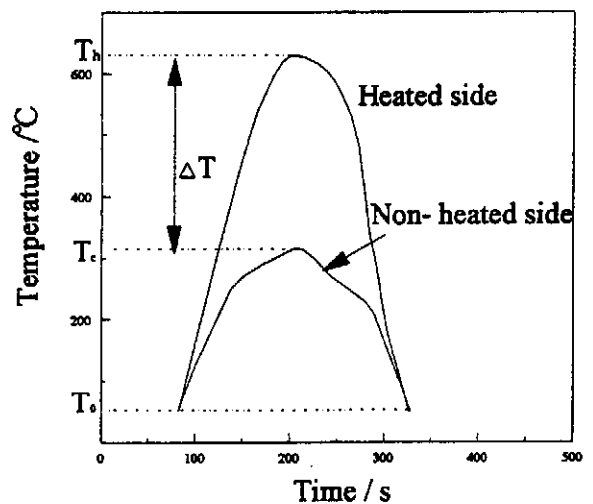
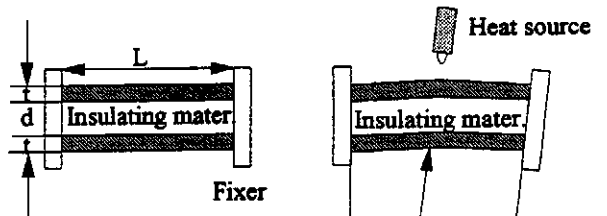
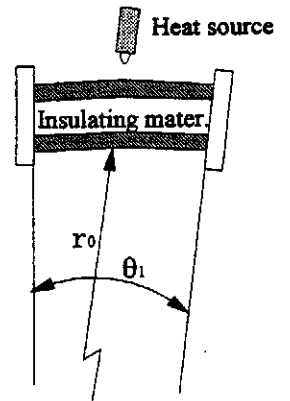


図 3 加熱側、非加熱側の板材の温度と時間の関係



(a) 初期状態



(b) 加熱過程

図 5 加熱過程における板材の変形

$$\text{非加熱側: } \varepsilon_c = \frac{\theta_1}{L_c} r - 1 \quad (r_0 \leq r \leq r_0 + t) \quad (3)$$

加熱後の板材の応力は得られたひずみから計算すると

$$\text{加熱側: } \sigma_h = \sigma_y + F \left( \frac{\theta_1}{L_h} r - 1 - \varepsilon_y \right)$$

$$\text{非加熱側: } \sigma_c = E \left( \frac{\theta_1}{L_c} - 1 \right) \quad (4)$$

となる。ここで $\sigma_h$ と $\sigma_c$ は試験片の両側の板材における応力である。

試験片の両端を固定している固定板に働く力の釣合式は以下のように固定板にかかる応力を積分して求められる。

$$\begin{aligned} & \int_{r_0}^{r_0+t} \sigma_c dr - \int_{r_0+t+d}^{r_0+2t+d} \sigma_h dr \\ &= \frac{E\theta_1}{2L_c} (2r_0+t) + \frac{F\theta_1}{2L_h} (2r_0+3t+2d) \\ & - [E - \sigma_y + F(1 - \varepsilon_y)] t \\ &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

同様に、固定板に働くモーメントの釣合式も以下のように求められる。

$$\begin{aligned} & \int_{r_0}^{r_0+t} \sigma_c r dr - \int_{r_0+t+d}^{r_0+2t+d} \sigma_h r dr \\ &= \frac{E\theta_1}{3L_c} [(r_0+t)^3 - t^3] \\ & - \frac{F\theta_1}{3L_h} [(r_0+2t+d)^3 - (r_0+t+d)^3] \\ & - \frac{Et}{2} (2r_0+t) + \frac{t}{2} [\sigma_y + F(1 - \varepsilon_y)] (2r_0+3t+2d) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

未知変数 $\theta_1$ 、 $r_0$ は式(4)、(5)を解いて求められる。

### 2. 3 冷却過程

冷却過程では図6に示すように試験片は弾性変形をするとし、試験片の任意の点から曲率中心までの距離 $R$ 、曲げ角 $\theta_2$ 、曲率中心から試験片の最も近い点までの距離 $R_0$ を考える。冷却前の板材の自然長は試験片の両端の固定板を取除いたとき弾性回復させることによって求められる。

$$\begin{aligned} \text{加熱側: } L_{h0} &= (1 - \sigma/E)\theta_1(R_0 + r_0 + 2t + d - R) \\ \text{非加熱側: } L_{c0} &= L \end{aligned} \quad (7)$$

ここで $\sigma$ は加熱側の板材の応力、 $E$ は温度 $T_h$ における板材のヤング率である。加熱過程において加熱側の板材に塑性変形が生じるため、弾性回復後には伸びが生じているが、非加熱側の板材の長さは初期長さに戻っている。冷却過程後の各板材の自然長は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \text{加熱側: } L_h' &= (1 + \alpha \Delta T_h) L_{h0} \\ \text{非加熱側: } L_c' &= (1 + \alpha \Delta T_c) L_{c0} \end{aligned} \quad (8)$$

冷却後の不均一収縮した板材のひずみは

$$\text{加熱側: } \varepsilon_h' = \frac{\theta_2}{L_h'} R - 1$$

$$\text{非加熱側: } \varepsilon_c' = \frac{\theta_2}{L_c'} R - 1 \quad (9)$$

となる。

冷却後の不均一収縮した板材の応力は得られたひずみから以下ようになる。

$$\text{加熱側: } \sigma_h' = E' \left( \frac{\theta_2}{L_h'} R - 1 \right)$$

$$\text{非加熱側: } \sigma_c' = E' \left( \frac{\theta_2}{L_c'} R - 1 \right) \quad (10)$$

ここで $E'$ は温度 $T_0$ におけるヤング率である。固定板にかかる力とモーメントの釣合式は次式で表される。

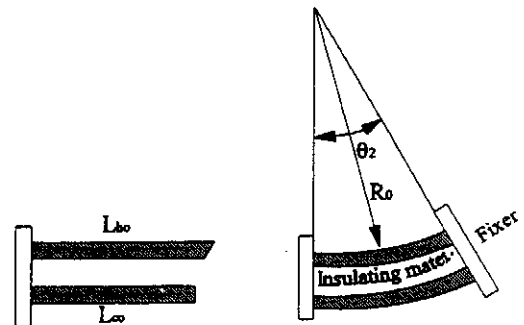
$$\begin{aligned} & \int_{R_0}^{R_0+t} \sigma_h' dR + \int_{R_0+t+d}^{R_0+2t+d} \sigma_c' dR \\ &= E' \left[ K_h \theta_2 \log \left( \frac{R_0+2t+d}{R_0+t+d} \right) - K_h t \theta_2 - t \right] \\ & + \frac{E' t}{2} \left[ \frac{(2R_0+3t+2d)\theta_2}{L_c'} - 2 \right] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \int_{R_0}^{R_0+t} \sigma_h' R dR + \int_{R_0+t+d}^{R_0+2t+d} \sigma_c' R dR \\ &= E' \left[ K_h \theta_2 (R_0 + r_0 + 2t + d)^2 \log \left( \frac{R_0+2t+d}{R_0+t+d} \right) \right. \\ & \left. - K_h t \theta_2 (R_0 + r_0) - \frac{1}{2} (K_h \theta_2 + 1) (2R_0 + t) t \right] \\ & + \frac{E' \theta_2}{3L_c'} [(R_0+2t+d)^3 - (R_0+t+d)^3] \\ & - \frac{E'}{2} (2R_0+3t+2d) t = 0 \\ & \frac{1}{K_h} = \left( 1 - \frac{\sigma}{E} \right) (1 - \alpha \Delta T_h) \theta_1 \end{aligned} \quad (12)$$

未知変数 $\theta_2$ 、 $R_0$ は式(10)、(11)を解いて求められる。

局部加熱による試験片の曲げ角度は以下のように近似できる。

$$\theta = \theta_2 \quad (13)$$



(a) 冷却前の板材の形状 (b) 冷却過程

図6 冷却過程における板材の変形

### 3. 局部加熱による板材曲げ加工のモデル実験

#### 3.1 実験装置

局部加熱による板材曲げ加工の実験装置の概略を図7に示す。天然ガスのバーナーを三次元に動くロボットアームのヘッドに固定する。試験片を図8(a)に示すようにサポーターA, B に取付け、重力などの外力による試験片の変形の影響を受けないようにするため、試験片の端付近を加熱する。

実験においては試験片の温度は試験片の表面から放射される熱線から温度分布を求める熱画像処理で測定する。熱画像処理によって測定した試験片の表面と内部の温度とは時間が経過しても同じであると仮定する。非加熱側の温度は熱画像処理によって直接求め、加熱側の温度は図8(b)に示すように反射板を用いて同時に測定する。

#### 3.2 モデル実験に用いる試験片

実験に用いる試験片は図9のように厚さ1.2mmの2枚の炭素鋼の間に断熱材をはさんだものを用いる。断熱材が試験片の変形におよぼす影響を少なくするため、柔軟な断熱材を用いる。4本のボルトで変形する板が平行になるように止める。ボルトの間隔は長さ方向に55mm、幅方向に38mmである。実験において2枚の板材の間隔は固定し、挿入する断熱材の量を変えて試験片の板厚方向の温度勾配を調節する。

試験片の幅方向の中心部分をバーナーで加熱し、加熱側の板材の温度が $T_0$ に達したら加熱をやめる。熱伝導のため非加熱側の板材の温度は一時的に上がり、測定される最高温度を $T_c$ とし、試験片の曲げ角 $\theta$ は空冷して温度が $T_0$ になったときに測定する。

### 4. 計算結果と実験結果

#### 4.1 計算及び実験条件

実験では加熱側の板材の最高温度が650℃、試験片の初期温度は26℃になるように設定する。実験における温度勾配を求めるため表1に示す条件の下で計算を行った。温度の関数であると考えられる試験片のヤング率を図10に示す。

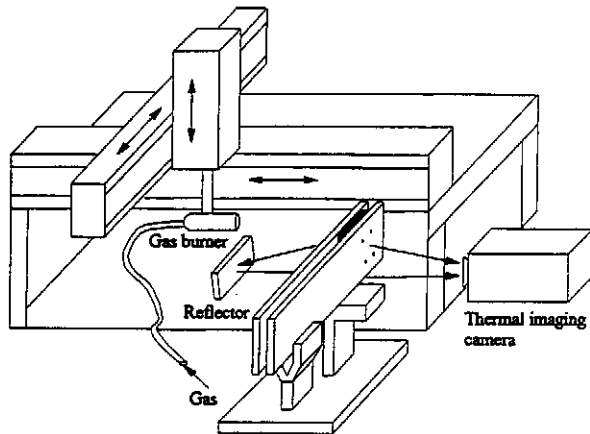
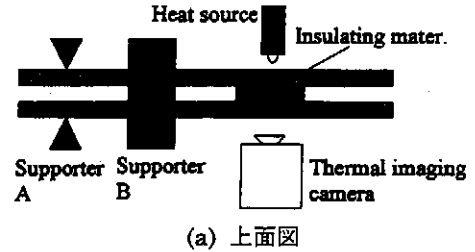


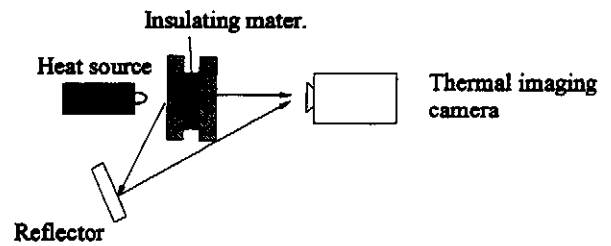
図7 局部加熱・冷却による板材曲げ加工のモデル実験装置

表1 局部加熱・冷却による板材の曲げ加工シミュレーションに用いた計算条件<sup>7)</sup>

板厚 $t$ / mm	1.2
2枚の板材間の距離 $d$ / mm	1.8
熱膨張係数 $/\text{C}^{-1}$	$1.2 \times 10^{-6}$
式(1)における $\sigma_y$ / MPa	61.8
式(1)における $\varepsilon_y$	$1.01 \times 10^{-3}$
式(1)における $F$ / MPa	548.8



(a) 上面図



(b) 左側面図

図8 曲げ加工における板材の温度測定

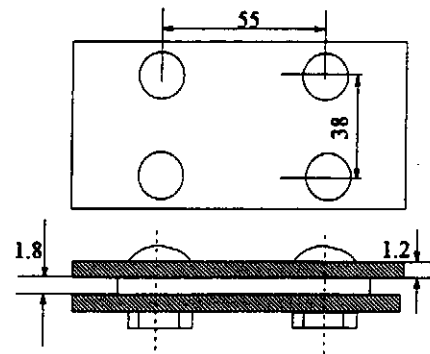


図9 モデル実験に用いた試験片の寸法

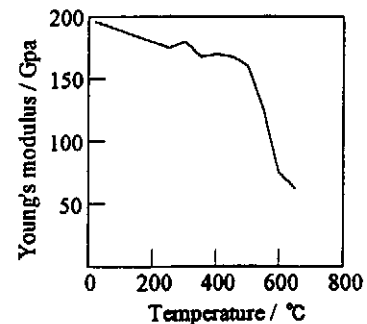


図10 炭素鋼のヤング率と温度の関係<sup>8)</sup>

#### 4. 2 計算結果と実験結果の比較

熱画像処理によって得られた温度分布を図 11 に示す。上方の熱画像は非加熱側の温度分布、下方は反射板に写った加熱側の温度分布である。熱源にガスバーナーを使用しており、線状に加熱するかわりに直径約 30mm の円状に加熱している。

実験における試験片温度の時間経過の結果を図 12 に示す。最初の 30 秒間は加熱側の温度は  $T_0$  から  $T_h$  に一定速度で上昇している。また、非加熱側の板材の温度も  $T_0$  から最高温度  $T_c$  になるまで一定速度で上昇している。

加熱、冷却過程後における試験片断面の応力分布を図 13 に示す。加熱過程後は加熱側の板材に圧縮応力が発生し、非加熱側は線形に分布している。冷却過程後は両方の板材とも線形に分布した残留応力が見られる。

計算及び実験によって得られた試験片の曲げ角を図 14 に示す。計算で得られた曲げ角の方が実験で得られたものよりも大きい、傾向は同じである。

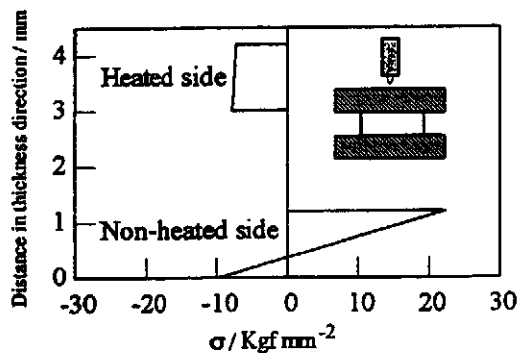
#### 5. 考察

曲げ角の計算結果と実験結果の違いは計算での高温での加熱側の板材の応力が消失することを考慮していなかったためと思われるため、式(7)における冷却前の板材の自然長を以下のように書き直す。

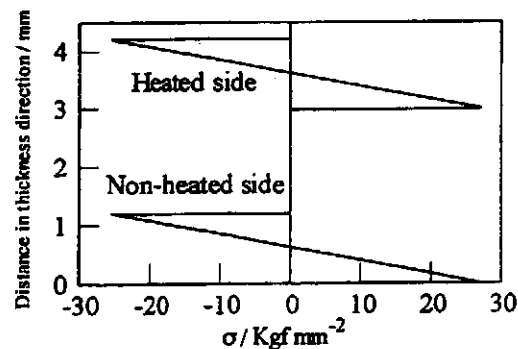
$$\text{加熱側: } L_{h0} = \theta_1 (R_0 + r_0 + 2t + d - R)$$

$$\text{非加熱側: } L_{c0} = L \tag{14}$$

冷却前の板材の自然長を訂正して試験片の曲げ角を計算



(a) 加熱後



(b) 冷却後

図 13 加熱後、冷却後の板厚方向の断面における応力分布の計算結果

した結果を図 15 に示す。計算結果は実験結果とよく一致しており、これは加熱側の板材の応力が高温において消失するという仮定が成立するからだと思う。

#### 6. 結言

本研究では簡単な塑性変形理論を用いて局部加熱による板材曲げ加工のシミュレーションを行った。計算から

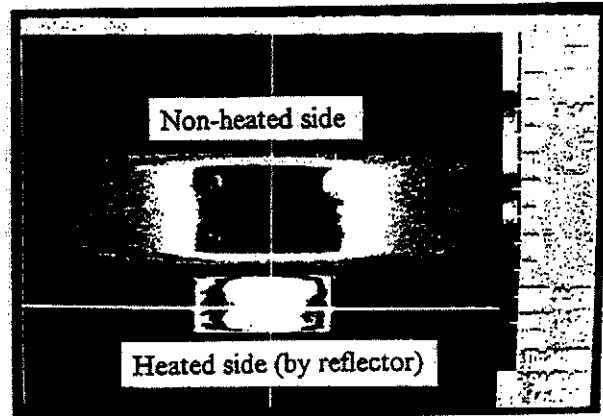


図 11 熱画像処理による試験片表面の温度分布

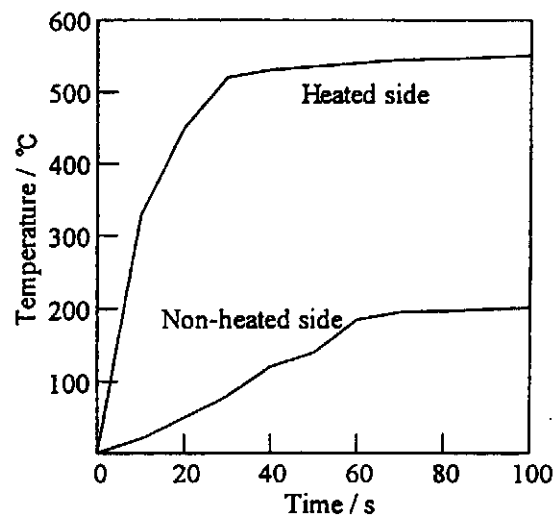


図 12 モデル実験における試験片の温度の時間経過

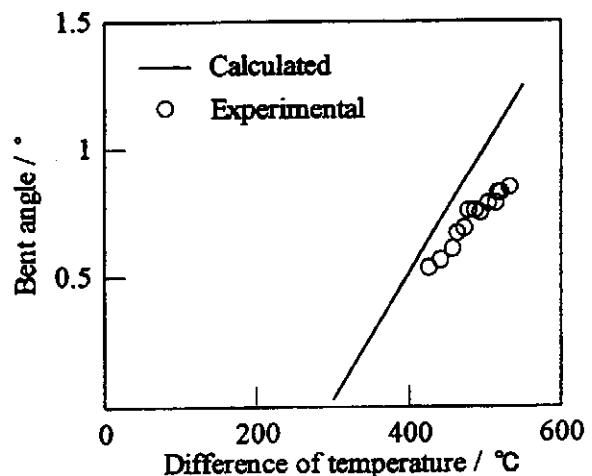


図 14 局部加熱・冷却による板材の曲げ角の計算結果と実験結果の比較

温度勾配と曲げ角度には近似的に線形関係があり、また曲げられた板材には板厚方向に線形に残留応力が分布することがわかった。計算結果を確かめるためにモデル実験を行い、炭素鋼を用いた計算結果と実験結果はよく一致した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、天田金属加工機械技術振興財団の平成5年度奨励研究助成を受けたことを記し、同財団に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) F. Nishioka, K. Nishimaki, M. Matsuishi T. Tanaka, W. Yasukawa, T. Yamauchi and O. Tohgoh, On automatic bending of plates by the universal press with multiple piston heads (1st report: fundamental study), J. Japan Soc. Shipbuilding, 132 (1972), 481. (In Japanese)
- 2) F. Nishioka, T. Tanaka, W. Yasukawa, T. Yamauchi, K. Nishimaki and M. Matsuishi, On automatic bending of plates by the universal press with multiple piston heads (2nd report: application study), J. Japan Soc. Shipbuilding, 133 (1973), 2911. (In Japanese)
- 3) Y. Tanigawa and Y. Ootao, Unsteady thermal stress analysis of an infinitely long, cross-ply laminated slab with a uniform heat supply, J. JSME C Series, 55-513 (1989), 1139. (In Japanese)
- 4) T. Nomoto, T. Ohmori, T. Sutoh, M. Enosawa, K. Aoyama and M. Saitoh, Development of simulation for plate bending by line-heating, J. Japan Soc. Shipbuilding, 168 (1990), 301. (In Japanese)
- 5) M. Geiger and F. Vollertsen, FDM-And FEM-simulation of laser forming : a comparative study, Ann. CIRP, 42-1 (1993), 301.
- 6) Y. Ueda, H. Murakawa, R. A. Mohanmed, R. Kamichika, M. Ishiyama and J. I. Ogawa, Development of computer aided process planing system for plate bending by line-heating, J. Japan Soc. Shipbuilding, 174 (1993), 683. (In Japanese)
- 7) Society of iron and steel research, Theory of rolling and flow stress, (1965), 114, Seibundo-Sinkousya Press.
- 8) JSME, Mechanical engineers' handbook, (1989), A4-6, Maruzen Press.

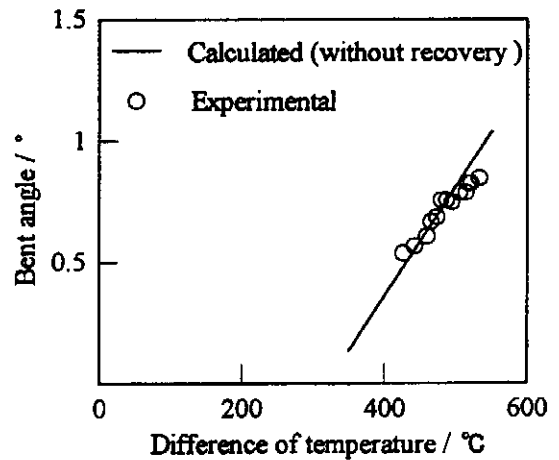


図 15 冷却前の板材の自然長を訂正したときの局部加熱・冷却による板材の曲げ角の計算結果と実験結果の比較