

三角焼きにより生じる絞り量に及ぼす 線状加熱加工因子の影響

正員 寺崎 俊夫* 正員 水上 優**
中谷 光良*** 大澤 守彦***

Effect of line heating factors on transverse shrinkage generated by triangle heating

by Member, Toshio Terasaki* Member, Masaru Mizukami**

Mituyoshi Nakatani*** Morihiko Ohsawa***

Summary

For automatization of the line heating work that is a basic technology in making curved surfaces of ships it needs to evaluate transverse shrinkage generated by triangle heating quantitatively. In this paper, techniques were examined in triangle heating tests and an estimation method using FEM analyses were developed in the first place. Secondly numerical simulations of triangle heating discussed effects of line heating factors that were curvature radius in the transverse direction, water-cooling and heating length. It was concluded that curvature radius in the transverse direction had least effect in transverse shrinkage and water cooling following the heating touch led to efficient shrinkage. And as the parameter value of heat input in the panel end part was increasing with varying travel speed, transverse shrinkage generated larger, so that it was approximately proportional to the parameter value. The maximum shrinkage was achieved when heating length was from 0.3 to 0.4 times as long as plate width.

1. 緒言

造船製作に必要な固有技能の一つである線状加熱加工はぎょう鉄と呼ばれ、熟練技能工の技能により製作が成り立ってきた。この分野も熟練技能工の高齢化が問題となり、線状加熱加工の自動化に関する研究が盛んに行われている^{1)~4)}。自動化の研究においては、加熱装置の自動化、計測技術の自動化などハードウェアのシステム開発が重要であるとともに、線状加熱加工の基礎技術を明確化する必要がある。線状加熱加工の基礎研究は古くから行われており有用な知見が報告されている^{5)~9)}。しかし、現場作業で絞りを与えるために使用されている三角焼きに関する研究はほとんどなされていない。三角焼きは板をお椀型に曲げるときに使用される代表的な焼き方であり、ぎょう鉄の重要な技能である¹⁰⁾。熟練技能者が利用している技能知識（ナレッジ）を技術として検証する研究は自動化装置開発の基礎研究として重要である。

本研究では最初に線状加熱加工実験を行って絞りの実験値を求めた。またその一方で熱弾塑性数値解析を使用して、三角焼きの実験値が推定できる数値解析手法を確立した。次に、三角焼きで使用されている技能者のナ

レッジを基礎にして、三角焼きの諸因子である板幅方向の曲率半径、水冷の有無、加熱長さなどが絞りに及ぼす影響を数値解析により検討した。

2. 実験と数値実験

2.1 実験

現場で用いられている三角焼きの加熱条件を調査するとともに、その変形状態を把握する目的で、現場の熟練技能者による三角焼きの線状加熱実験を実施した。特に熟練技能者の三角焼きを実施する際の加熱手法に関する技能知識（ナレッジ）を定量的に把握するため、実験では、加熱中のトーチの動き、高さ、速度及び変形量など

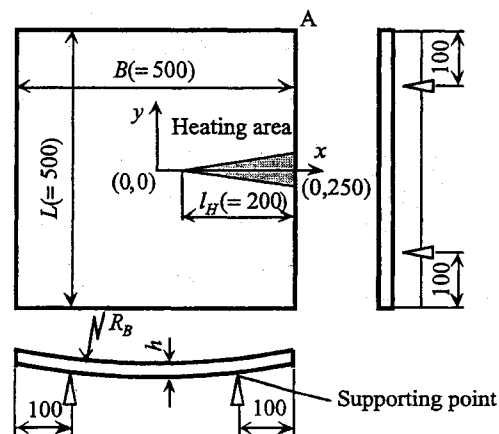


Fig.1 Specimen

* 九州工業大学工学部物質工学科

** ユニバーサル造船（株）技術研究所

*** 日立造船（株）技術研究所

Table 1 Experimental conditions and results

Specimen	R_B (mm)	h (mm)	C_2H_2 (l/min)	l_H (mm)	t_h (s)	WQ	Q_{net}/h^2 (J/mm ³)	$S^{B/2}$ (mm)
sp1	1000	19.5	53.1	225	143.5	Y	44	1.44
sp2	1000	19.5	52.8	225	163.8	N	44	0.56
sp3	500	19.5	53.9	219	127.9	Y	44	1.3
sp4	1000	17	42.9	198	99.5	Y	31.7	1.19
sp5	2000	17	46.1	188	92.5	Y	31.9	1.11
sp6	1000	18	47.2	191	38.3	Y	11.8	0.24
sp7	1000	18	46	186	66	Y	19.4	0.5

を計測した。

試験体は造船用32キロ降伏点鋼を用い、寸法は板幅500mm、板長さ500mm、板厚17,18,19.5mmを使用した。Fig.1に示すように加熱時に曲げモーメントの影響をあまり受けないように試験体の四隅から約100mmの位置4点で支持した。試験体は、図中の曲率半径 R_B が1,000mmを持つ円筒曲板である。実験条件をTable 1に示す。記号 h は試験体の板厚を、 C_2H_2 は下に詳細を記述するアセチレンガス流量を、 l_H は加熱長を、 t_h は加熱時間を、WQは水冷の有無を示し、Yが水冷あり、Nが水冷無しを、 Q_{net}/h^2 は板幅端部における加熱速度から計算された入熱パラメータを、 $S^{B/2}$ は板幅端部に最も近い位置での横収縮を意味する。

加熱ガスはアセチレンガスとし、加熱トーチには酸素用とアセチレンガス用の圧力計及び流量計を取付けて、圧力と気温の補正を行ったガス流量を計測した。

加熱中は、遮光フィルタを取付けたビデオ撮影を実施し、白心だけが撮影された画像を処理することで、白心の動きを観察し、変化する加熱速度、白心長さ、トーチ高さを計測した。

加熱前後での試験体の形状計測には接触式の高精度三次元計測機を用いた。計測点は加熱前に予め試験体に設定しておき、加熱前後で三次元計測機先端に取付けた ϕ 0.1mmの接触プローブを用いて計測し、線状加熱後の変形を把握した¹¹⁾。

加熱中の温度変化はクロメル-アルメル熱電対(線径0.32mm)を用いて計測した。

2. 2 数値計算方法

(1) 解析モデル

現場における三角焼きの代表的な条件として、Table 1

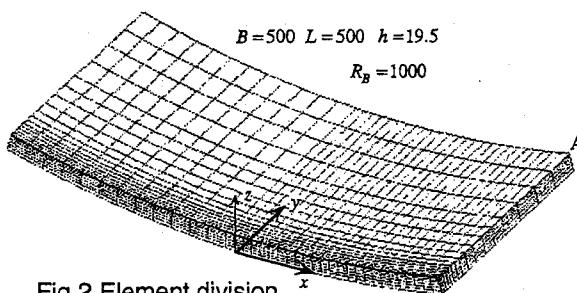


Fig.2 Element division

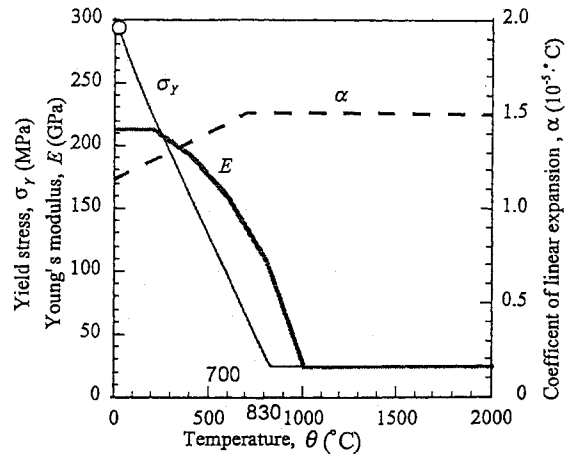


Fig.3 Temperature dependence of material properties

に示す試験体sp1を対象に非定常熱伝導および熱弾塑性FEM解析を実施した。試験体寸法はFig.1に示す500×500×19.5mmであるが対称性を考慮して、加熱線(x=0)位置で1/2モデルとした。Fig.2に有限要素法(FEM)解析で使用した要素分割を示す。

三角焼きの実験では板中央から約25mmの位置より開始し、予め $R_B=1000$ mmに曲げられた板表面を端部まで加熱、すなわち、加熱長さ約225mmに線状加熱の熱量を与えている。そこで、FEM解析では加熱中のガス流量、酸素流量等の条件は一定と仮定し、板中央x=25mmからx=250mmまで加熱し、加熱速度を変化させることで三角焼きを実現させた。解析ソフトとしてABAQUSを使用し、熱伝導は3次元1次要素DC3D8を、弾塑性は3次元1次低減要素C3D8Rを使用した。

計算に使用した材料定数の温度依存性をFig.3に示す。温度の計算に必要な材料定数である比熱 $c=0.473$ (J/g·°C)、密度 $\rho=0.0078$ (g/mm³)、熱伝導率 $\lambda=0.0369$ (J/mm·°C·sec)は一定とし、温度依存性をもたせなかった¹³⁾。降伏応力 σ_y の温度依存性は室温での降伏強さ293MPaの実験値を参考に種々の文献より図中に示すように決定した^{14),15)}。線膨張係数 α 、ヤング率 E の温度依存性は種々の文献を参考にした^{16),17)}。

(2) 加熱速度

Fig.4にsp1試験体の三角焼きで使用された加熱速度の変化を●印で示す。実線は実験値を滑らかに結んだ曲線である。横軸は時間で加熱開始(板中央部x=25mm近傍)を時間の原点にしている。図に示す熟練技能工の加熱速度の特徴は加熱開始位置で速度が速く、加熱終了部(板端部x=250mm)に向かって徐々に速度を遅くしている。また、加熱速度が大きい範囲ではばらつきが大きく、板端部で速度変化が急に変化している。熟練技能工に聞き取り調査すると、加熱開始位置は絞りにあまり影響を与えないため、速度変化に神経を集中させないとの

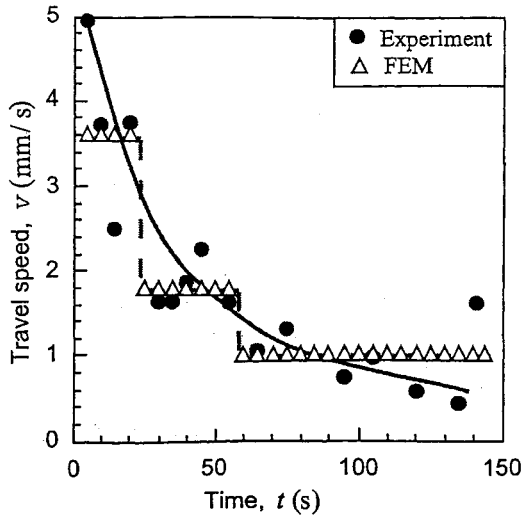


Fig.4 Change of travel speed used in line heating experiment and finite element method

こと、また端部で絞りを調整するため端部近傍で速度変化があるとのことであった。加熱速度は滑らかに変化させることが腕型成形では理想であるが¹⁰⁾、重要となるのは加熱速度の小さい範囲で目標の入熱を与えることである。数値解析では熟練技能者の加熱速度計測結果を参考にして、図中に△印と破線で示す3段階の加熱速度変化で近似した。近似にあたっては加熱速度の小さい板端部付近の平均速度を設定し、加熱速度が比較的大きい範囲で全加熱時間が一致するように調整した。

(3) 線状加熱熱源による熱量分布の近似

アセチレンガスによる線状加熱の熱源分布は2つのガウス分布の和で近似できる^{9), 10)}。別途実施した温度計測の実験結果からガウス分布の係数として以下の値を得た²⁰⁾。

$$q(r) = (Q_1 / \pi a_1^2) \cdot \exp(-r^2 / a_1^2) + (Q_2 / \pi a_2^2) \cdot \exp(-r^2 / a_2^2)$$

ただし、 r : 加熱熱源の中心位置からの距離 (mm) ,

$q(r)$: 単位面積単位時間当たりの熱量 ($J/mm^2 \cdot s$) ,

$Q_1 = 14,500 J/s$, $a_1 = 85 mm$, $Q_2 = 5,000 J/s$, $a_2 = 25 mm$

数値解析では加熱点の移動に合わせて上式から得られる熱流束を板表面に時々刻々を与えて熱伝導解析を実施した。

(4) 水冷のモデル化

現場作業では加熱開始の加熱点後方より水冷を開始

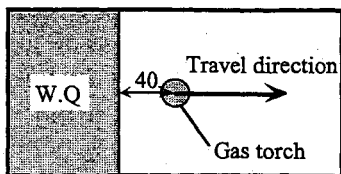


Fig.5 Water cooling model

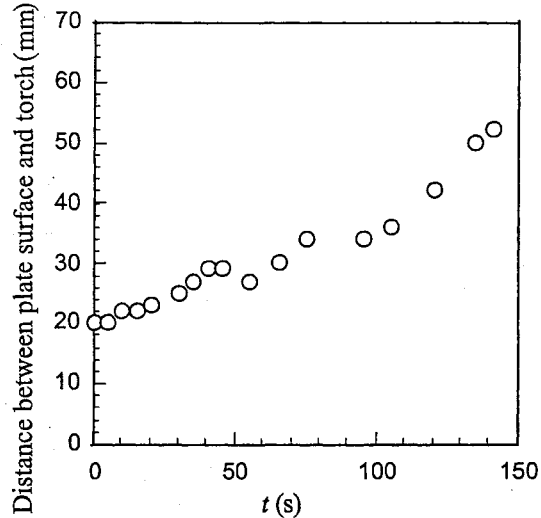


Fig.6 Change of torch height with heating time

し、加熱終了後は板全体が冷えるまで実施する。加熱点後方での水冷は板からの熱伝達を定義することでモデル化できるが、高温の板表面に水が散布される状態を正確にシミュレートすることは困難と考える。従って数値解析では加熱点から後方の熱伝達定義位置までの距離と熱伝達係数をパラメータとし、温度計測結果に良く適合する組合せを求めた。簡略化のために熱伝達係数は加熱中で常に一定とした。Fig.5に水冷のモデル化のイメージを示す。

(5) トーチ高さ変化のモデル化

Fig.6に熟練技能工が実施した加熱中のトーチ高さの時間変化を示す。時刻0はスタート点であり、時刻150秒は板幅端部にトーチが移動したときである。図よりトーチ高さは板端部に近づくほど高くなっている。Fig.4とFig.6より、熟練技能者はトーチが板幅端部に近づくとともに、加熱速度を小さくして単位長さ当りの入熱量を増加させている。入熱量が増加すると板表面が溶融し易くなるため、表面が溶融しないようにトーチ高さを高くして

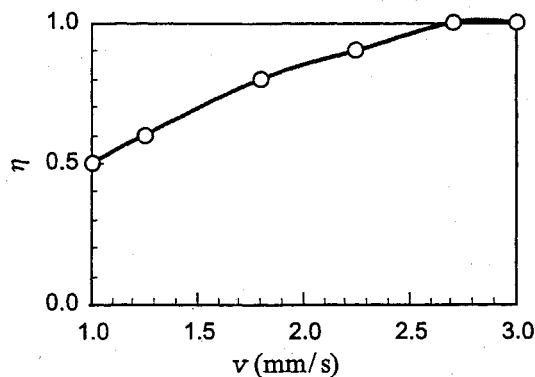


Fig.7 Relation between travel speed and heat efficiency

調整している。トーチ高さ変化が板に投与される熱量に及ぼす影響を厳密に把握した報告はないが、トーチ位置を高くすることで板への入熱量は下がると考えられる。数値解析ではこの熟練技能工が行ったトーチ高さ変化をFig.4とFig.6より加熱速度との関係と考えると、トーチ高さ変化を入熱効率の変化に置換えた。熱サイクルの実験値と計算値が概ね一致するように検討した加熱速度と熱効率の関係をFig.7に示す。

2.3 実験結果と数値計算結果の比較

(1) 熱サイクルの比較

熱弾塑性解析で最も重要な因子は温度上昇分布である¹³⁾。温度上昇は内的拘束により力に変換されるため、力の源である温度上昇が熱弾塑性問題では重要である¹⁵⁾。すなわち、線状加熱加工で生じる各点の熱サイクルの実験値が数値解析値で再現されることが重要となる。

Fig.8に熱サイクルの実験値(実線)と数値解析で得られた値(破線)との比較を示す。水冷のモデル化として加熱点から後方40mm以降に熱伝達係数を 2×10^{-3} (J/s/mm²/K)を与えている。熱サイクルの計測は加熱裏面側の6点で行った。図には加熱長さの中間近辺である($x=110$ mm, $y=0$ mm)の位置と板幅端部に近い(210 mm, 0 mm)の位置での熱サイクルを示している。加熱開始付近の比較的加熱速度の大きい範囲では速度の近似がラフなため、各計測点での最高到達温度上昇に達する時刻にはずれが生じているが、計測点での最高温度上昇は 10°C から 20°C 程度の誤差で推定できている。水冷が熱サイクルに及ぼす影響は温度履歴の最高温度上昇到達以降に大きくあらわれるが、図に示された実験値(実線)と計算値(破線)は概ね一致していると思われる。ガスによる線状加熱加工の熱サイクルの実験値がFig.8の程度にしか一

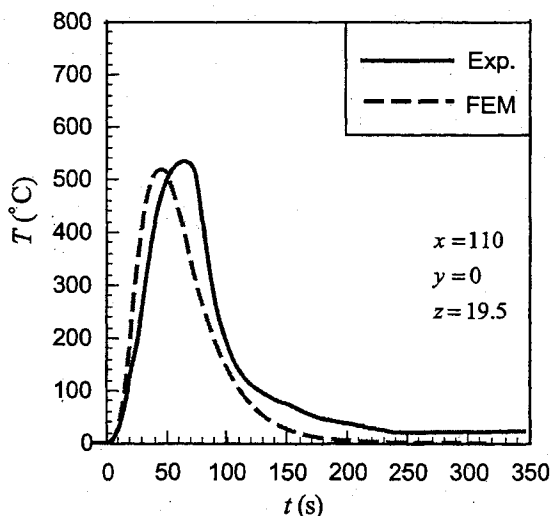


Fig.8(a) Comparison between experimental data and numerical results of thermal cycle at the middle part of heat length

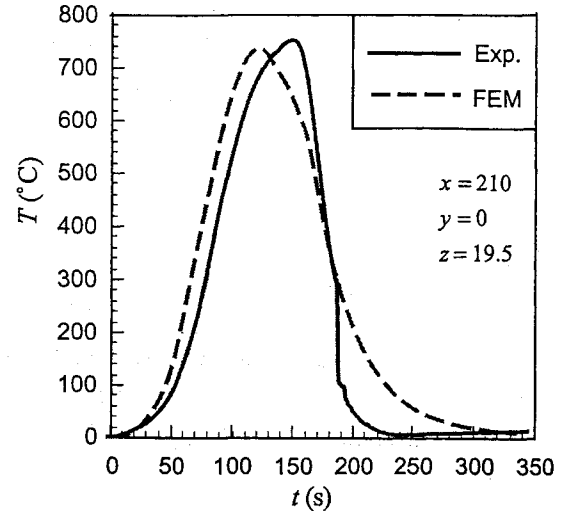


Fig.8(b) Comparison between experimental data and numerical results of thermal cycle at the vicinity of width edge

致していないが、トーチ移動が手作業であることや種々の未知因子を2.2節で仮定した過程を考えれば、やむを得ないと思われる。

(2) 変形の比較

線状加熱加工による変形を数値解析で予測する場合に、重要なのは横収縮(絞り)とたわみ(z 軸方向の変位)である。Fig.9に $y=0$ 上近傍の横収縮の実験値と数値解析値を示す。横収縮量は次式に示すように加熱線をまたぐ100mmの収縮量の板表裏面の平均値とした¹⁹⁾。

$$S = (S_T + S_B) / 2$$

ただし、 S_T : 加熱面側100mm間の収縮量(mm)、 S_B : 加熱裏面側100mm間の収縮量(mm)

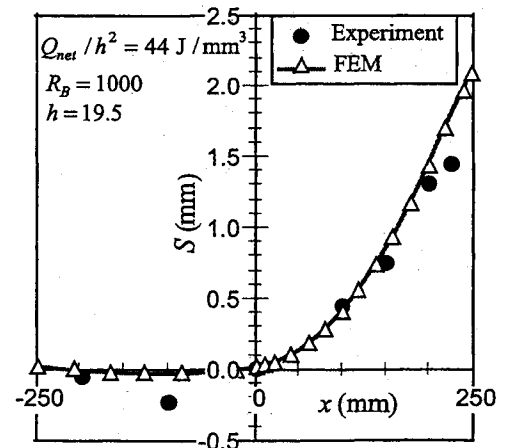


Fig.9 Comparison between experimental data and numerical results of transverse shrinkage on x axis

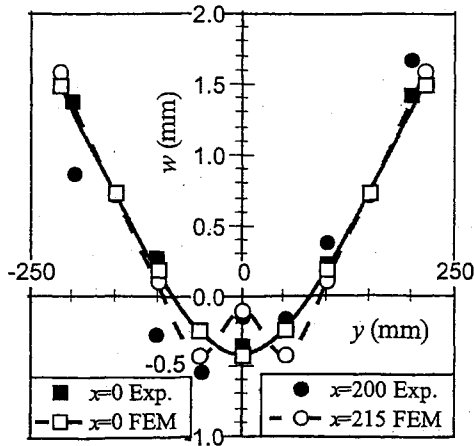


Fig.10 Comparison between experimental data and numerical results of deflection on y line

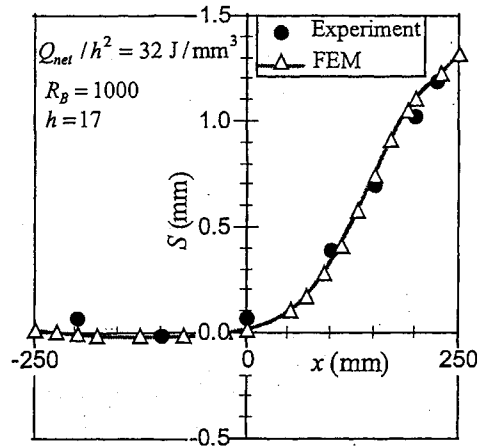


Fig.11 Comparison between experimental data and numerical results of transverse shrinkage on x axis

Fig.9の横軸は板中央から加熱線方向位置を示し、加熱範囲は $x=25\text{mm}$ から $x=250\text{mm}$ である。sp1の実験では板幅端部での入熱のパラメータ Q_{net}/h^2 は 44 J/mm^3 であった。●印が実験値で、△印と実線が数値解析値である。図より加熱されない範囲では横収縮がほぼ0mm、加熱開始点から徐々に増加し板端部で最大2.1mmであった。板幅端部近傍 ($x=250$) で実験値と計算値でずれているが、全体的な傾向は良く一致しており、数値計算で実験値が予測できている。

Fig.10にz軸方向の面外変位であるたわみ w を示す。計測点はすべて加熱側である。計測は $x=-100\text{mm}$, 0mm , 100mm , 200mm の断面で行ったが、図には $x=0\text{mm}$ の中央断面と 200mm の板幅端部近傍でのたわみを示している。実験値は $x=225, y=0$ の表面の位置のたわみをゼロとして整理されているため、数値解析値も $x=225, y=0$ の表面でゼロになるように全たわみをシフト (0.423mm である) している。実験値である●、■印と数値解析値である○、□印は概ね一致している。なお、 $x=200$ の実験値および $x=215, y=0$ の計算値が $y=50$ の位置のたわみより大きくなっているのは、板厚方向であるz方向に生じた膨張の影響と考えられる。すなわち、加熱領域は温度上昇過程でy方向へ熱膨張しようとするが、内的拘束のために膨張しにくい¹⁹⁾。一方、板厚方向であるz方向には膨張しやすいため、y方向の熱膨張量は熱膨張体積を保つためにz方向に転換して膨張する。冷却過程ではz方向膨張量は温度変化だけ収縮するだけであるから、加熱過程でのy方向から転化したz方向膨張量はそのまま残留すると考えると実験値と計算値が示した挙動が説明できる。

次に、Table 1に示す試験片sp4の実験で得られた横収縮分布と数値解析値をFig.11に示す。sp4の実験では板厚が17mmで、板幅端部での入熱のパラメータ Q_{net}/h^2 は

31.7 J/mm^3 であった。●印が実験値で、△印と実線が数値解析値である。数値解析値と実験値は良く一致している。

以上より現場の熟練作業者が実施した三角焼き加熱により生じた加熱線の横収縮（絞り）および板の面外変形量が数値解析により概ね推定できている。従って、次節以降では使用する数値解析手法を数値実験の道具として採用できる。

3. 三角焼き因子の影響

本節では数値実験により三角焼きの基本因子である板幅方向の曲率半径、水冷の有無、移動速度および加熱長が横収縮に及ぼす影響を調べた。板寸法は板幅 $B=500$ 、板長さ $L=500$ 、板厚 $h=19.5$ である。なお、施工条件が異なったときのトーチ高さの変化が明確でなく、しかも、基本因子が絞りに及ぼす影響を検討するのが目的であるので、Fig.7の熱効率を使用せずに、熱効率1として数値解析した。

3.1 板幅方向の曲率半径

板幅方向の一次曲げ曲率半径 R_B が横収縮に及ぼす影響を検討した。 $R_B=500, 1000, 2000$ (mm)と変化させて、Fig.12に示す○印の加熱速度で計算した。加熱速度の変化は滑らかになるように設定した。○印の加熱速度では加熱開始位置 ($x=50\text{mm}$) の速度が $v=13.3\text{ mm/s}$ で、板幅端部の速度が $v=1.0\text{ mm/s}$ である。入熱を板厚の2乗で割った入熱のパラメータは板端部において、速度 $v=1.0\text{ mm/s}$ より $Q_{\text{net}}/h^2 = 44\text{ J/mm}^3$ であった。なお、△印と□印の速度変化は後節の計算で使用する。入熱のパラメータの決定方法は○印と同じである。

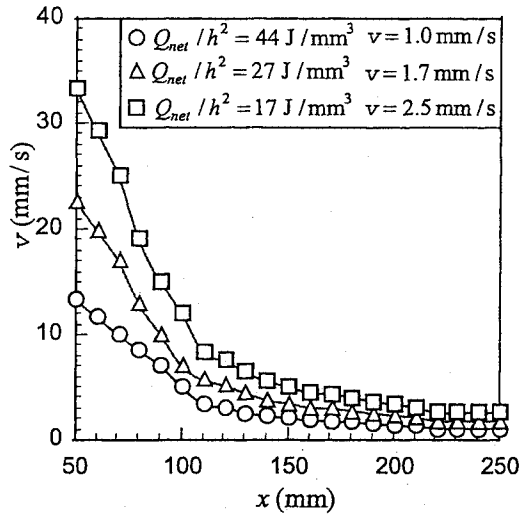


Fig.12 Travel speeds used in calculation

Fig.13に板幅方向の曲率半径 R_b を変化させて数値解析した結果である横収縮分布の変化を示す。横収縮は板幅端部近傍 $x=200$ 以上で曲率半径の影響を少し受けているが、概ね一本の曲線上に載っている。板幅端部での収縮量は $R_b=500, 1000, 2000$ (mm)でそれぞれ2.43, 2.23, 2.05 mmであった。平板($R_b=\infty$)で計算した板幅端部での収縮量は2.22mmであった。従って、板幅方向の曲率半径 R_b は横収縮にあまり影響を与えないと結論できる。

3. 2 水冷の有無

線状加熱の現場ではガストーチ後方からホースで水冷を行っている場合が多い(F-WQとする)¹⁹⁾。また、板に連続して数本の線状加熱加工を行ってから、まとめて板

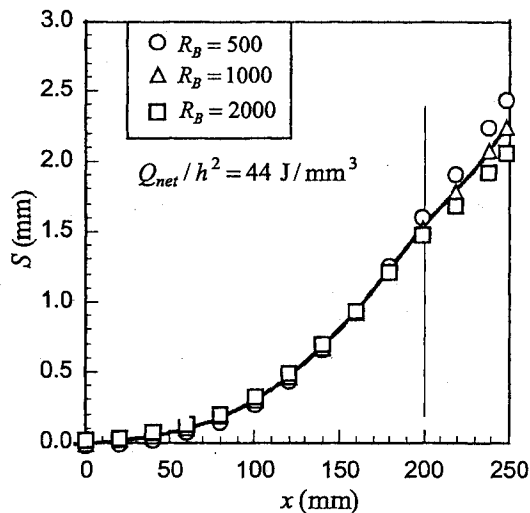


Fig.13 Effect of curvature of plate width on transverse shrinkage

全体を水冷する場合も見られる。そこで、まとめて水冷する代表例として1本の線状加熱が終了直後に全体を水冷する場合を取り扱った(W-WQとする)。一方、水冷と空冷の変形にあまり差がないという報告もある⁷⁾。また、線状加熱加工を自動化する場合において、横収縮を効率よく与えるためにトーチと一体となった水冷機能が必要か否かは重要なことである。そこで、水冷が横収縮に及ぼす効果を確認するために数値実験を実施した。

Fig.14に計算結果を示す。○印で示すF-WQはガストーチ後方40mmの位置から水冷を行っている場合であり、△印で示すW-WQは線状加熱が板幅端部で終了後に直ちに板全体を水冷した場合であり、□印で示すNon-WQは水冷せずに空冷した場合である。板端部での横収縮量はF-WQ, W-WQ, Non-WQでそれぞれ2.23, 0.87, 0.56mmとなった。数値解析結果より現場の熟練作業者が実施する加熱点後方の水冷(F-WQ)は効率よく横収縮を与えていることがわかる。線状加熱後に板全体を水冷する方法も横収縮を与えるのに有効であるが、熟練工の水冷方法には及ばない。空冷では横収縮量が最も小さく、しかも横収縮の分布も滑らかでない。

水冷が横収縮に有効である理由は次のように考えられる。水冷を加熱直後に行くと水冷部分によりy方向の内的拘束が大きくなるため、y方向への熱膨張が拘束され、加熱点に与えた熱によるy方向の熱膨張はy方向に膨張できずに、z方向に膨張し、冷却とともに与えた熱量による膨張量だけ収縮するようになる^{15),21),22)}。加熱後冷却する場合には冷却開始までに拡散した熱により、加熱線線上はある温度まで温度上昇するため、内的拘束は緩くなり拘束部分の温度上昇に相当する値だけy方向に膨張する。空冷では加熱線線上のy方向の膨張は更に大きくなり、その結果として収縮量は小さくなる。Fig.15にFig.2に示す

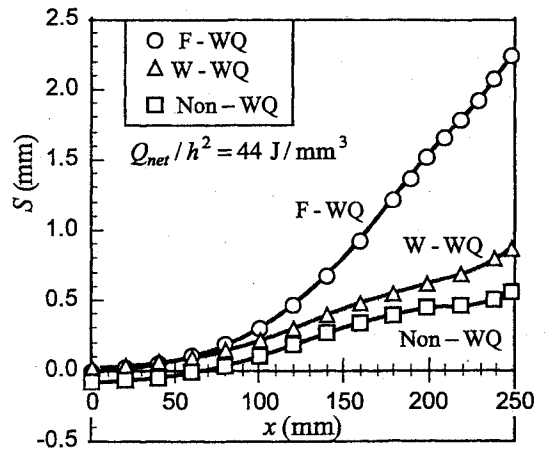


Fig.14 Effect of water quench conditions on transverse shrinkage

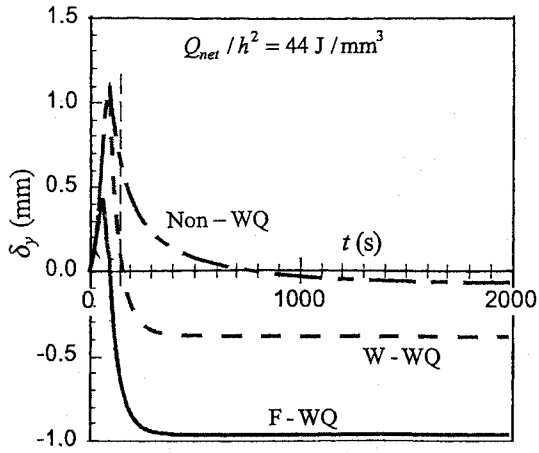


Fig.15 Transient displacement of y-direction at the corner in case of changing water conditions

コーナーA部のy方向の過渡変形を示す。水冷開始が遅いほどy方向の膨張が大きくなっており、上記の定性的な考察と一致している。Fig.16に加熱終了直後(97.7秒)でのy=250の線上でのy方向変位 δ_y を示す。上述の定性的な考察結果を支持するように、熟練工の加熱直後の水冷方法(F-WQ)では膨張 δ_y はほとんど生じていないが、空冷(Non-WQ)では δ_y は大きな膨張分布を示している。

3. 3 移動速度

現場の熟練作業者が実施する三角焼きについて現場調

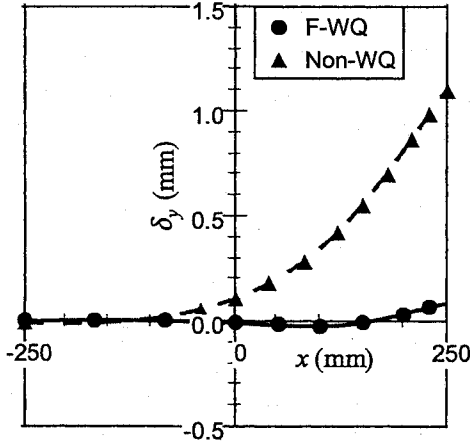


Fig.16 Distribution of transient displacement of y-direction along y=250 in case of changing water conditions

査した結果、使用される移動速度の変化はおおよそ次の3パターン：(1)大きい絞りを与えるパターン、(2)標準絞りを与える、(3)仕上げで使用した小さな絞りを与えるパターンであった。各パターンでの板幅端部での平均加

熱速度は2.5, 1.7, 1.0m/sであり、入熱のパラメータ Q_{net}/h^2 はそれぞれ17, 27, 44J/mm³であった。加熱速度をFig.12のように滑らかに近似して数値実験を実施した。Fig.17に加熱速度2.5, 1.7, 1.0m/sで得られた横収縮分布を示す。3ケースとも横収縮の分布傾向は同様となり板中央ではほぼ0mm、板端部での最大横収縮量は0.28, 0.90, 2.23mmとなった。図より横収縮の分布が滑らかになっており、Fig.9に示す熟練技能工の横収縮分布の傾向は再現できている。従って、Fig.12に示す速度変化は技能工の三角焼きでの速度変化を表していると考えられる。

最大横収縮量が0.28, 0.90, 2.23mmとなっており、横収縮量の比は0.13, 0.40, 1.0となり、入熱パラメータ Q_{net}/h^2 の値17, 27, 44J/mm³の比0.39, 0.61, 1.0と一致していな

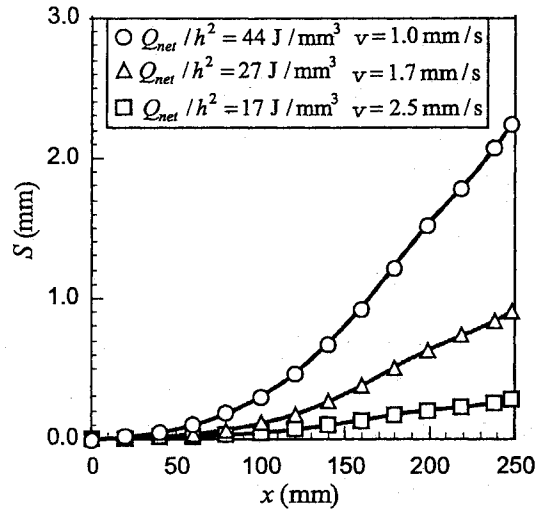


Fig.17 Effect of travel speed on transverse shrinkage

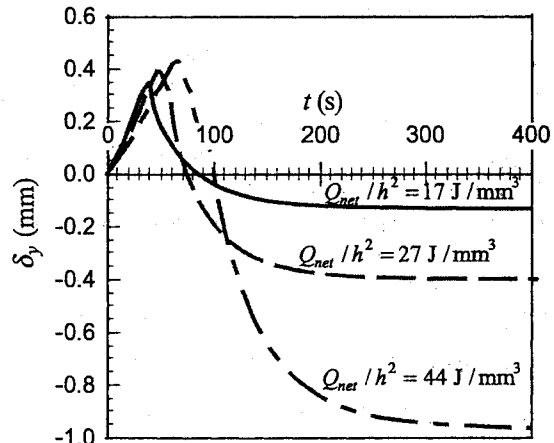


Fig.18 Transient displacement of y-direction at the corner

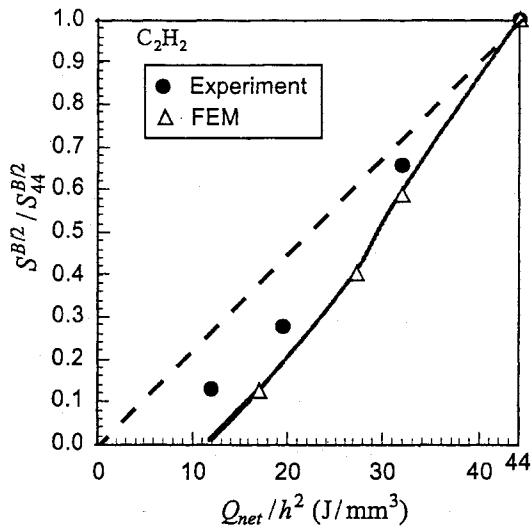


Fig.19 Relation between transverse shrinkage and heat input parameter

い. この原因は3. 2節の水冷の考察で説明した y 方向の熱膨張と考えられる. 入熱のパラメータが小さくなると板厚裏面の最高温度上昇が低くなり, その結果として降伏応力値が大きくなり, 板厚方向の温度が一樣になるまでに y 方向の熱膨張が大きくなったためと想像される. そこで, Fig.2に示すコーナーAの y 方向の過渡変形をFig.18に示す. 図中の実線, 破線および一点鎖線は入熱パラメータ Q_{net}/h^2 の値17, 27, 44 J/mm³での過渡変形である. 最大膨張量はそれぞれ0.347, 0.391, 0.429mmであり, 最大膨張量からの収縮値はそれぞれ0.48, 0.792, 1.394 mmであり, 入熱パラメータの変化の割合と同程度である. 入熱パラメータが小さくなると, 全体の変形に占める膨張量が大きくなっており, 上記の定性的な考察を指示している. $Q_{net}/h^2=44$ J/mm³での最大膨張量からの収縮値1.394 mmを基準にして, 入熱パラメータの値の比から $Q_{net}/h^2=17, 27$ J/mm³の最大膨張量からの収縮値を予測すると0.539, 0.855mmとなり約10%の誤差で予測できている. 以上より, Fig.17の横収縮値が入熱パラメータの値の増加に比例していない最大の原因は板厚裏面の温度上昇値の相違に起因した熱膨張である. 従って, 入熱パラメータが変化したときの横収縮の変化の仕方は比例関係とならない.

本論文で対象としたアセチレンガスを使用した三角焼きの線状加熱加工について, 実験値と計算値を整理するとFig.19が得られた. 縦軸の $S^{B/2}/S_{44}^{B/2}$ は $Q_{net}/h^2=44$ J/mm³での板幅端部の横収縮であり, $S^{B/2}$ は任意の入熱パラメータ Q_{net}/h^2 での板幅端部の横収縮である. 図中の破線は $S^{B/2}$ が Q_{net}/h^2 に比例する直線である. Δ 印は数値解析

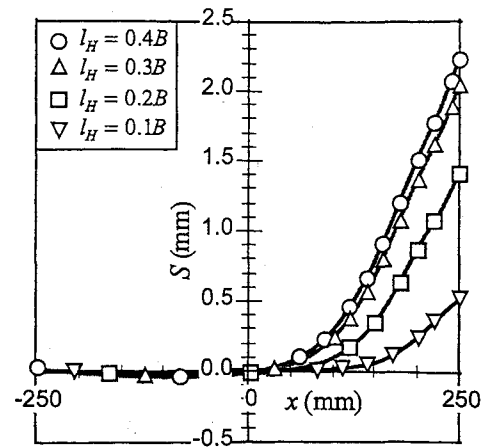


Fig.20 Effect of heating length on transverse shrinkage

値であり, ●印は実験値である. 横収縮の実験値は上記で考察したように, 入熱パラメータが30 J/mm³以上の大きい領域では熱膨張量が小さく, 入熱パラメータにほぼ比例するが, 入熱パラメータが小さくなると, 急激に小さくなっており, 数値解析値と同じ傾向を示している. しかし, 横収縮値の増加の概略を知る場合には誤差は大きい, 入熱のパラメータに比例すると考えることは一つの目安になる.

3. 4 加熱長さ

Fig.1に示す加熱長さ l_H を板幅 B の0.1から0.4倍に変化させて, 横収縮に及ぼす加熱長の影響を調べた. 計算では板幅端部に与える熱量である入熱パラメータ Q_{net}/h^2 を44 J/mm³と一定にしている. Fig.20に横収縮の分布を示す. 図より加熱長さが0.3 B 以上であれば, 横収縮の分布はほぼ同じであるが, 0.2 B 以下となると横収縮値はかなり小さな値となった. 熟練工のナレッジでは加熱長さは0.3 B から0.4 B であるから, 彼らのナレッジは効率の良い横収縮値を与える施工法と考えられる.

4. 結論

本研究では実験と熱弾塑性数値解析を使用して, 三角焼きの実験値が推定できる数値解析手法を確立した. また技能者のナレッジを基礎にして, 三角焼きの諸因子である加熱速度, 板幅方向の曲率半径, 水冷の有無および加熱長さが横収縮(絞り)に及ぼす影響を検討した. 得られた知見を以下に示す.

- 1) 技能者の三角焼き加熱に対して, 温度履歴の計測結果に計算値が概ね一致するように水冷の効果と熱効率を設定した結果, 熱弾塑性数値解析により計算された横収縮および面外変形は実験値と良い一致を示した.
- 2) 板幅方向の曲率半径 R_B を500mmから2000mmの範囲

で変化させた数値実験により、横収縮量に曲率半径はほとんど影響を与えないことが示された。

3)現場の熟練作業者が実施する加熱点後方の水冷方法は、横収縮を効率的に与える方法であることが明らかになった。

4)加熱速度を変化させて、板幅端部での入熱のパラメータ Q_{net}/h^2 値を変化させたとき、横収縮値は入熱のパラメータに比例して大きくならないことが明らかになった。しかし、横収縮値の増加の概略を知る場合には入熱のパラメータに比例すると考えることは一つの目安となる。

5)板幅端部での入熱のパラメータ値を一定にして、加熱長さが横収縮値に及ぼす影響を検討した結果、加熱長さが板幅の0.3倍から0.4倍であれば、ほぼ同じ横収縮の分布を示すが、0.2倍から0.1倍では横収縮値はかなり小さな値となった。

なお、本研究の一部は社団法人日本造船研究協会第246研究部会『船殻ブロックのデジタル生産技術の基礎研究』で実施されたものであり、貴重なご意見を賜った関係委員の方々に深く謝意を表します。

参考文献

- 1)野本敏治, 大森拓也, 須藤拓, 榎沢誠, 青山和浩, 斉藤政男, 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), 529-538
- 2)上田幸雄, 村川英一: 計算機支援板曲げ方案自動作成システムの開発(第1報) — (第4報), 日本造船学会論文集, 第170号(1991), 577-586, 第171号(1991), 83-93, 第173号(1992), 409-419, 第174号(1992), 683-695
- 3)富田康光, 橋本聖史, 大沢直樹, 福田柳生, 上月義雄, 脇田尋樹, 線状加熱による作業工程のエキスパートシステムに関する研究, 関西造船協会誌, 第223号(1995), 89-94
- 4)石山隆庸, 丹後義彦, 中村祐介, FEMを応用した線状加熱自動化の実用化研究, 日本造船学会論文集, 第183号(1998), 335-342
- 5)橋本敏郎: 線状加熱加工法, 石川島技報, 17(1960), 56-68
- 6)栖原寿郎: 鋼材の熱塑性加工に関する研究(その一), (その二), 造船協会論文集, 第103号(1958), p.233-243, 第106号(1959), 249-264
- 7)佐藤邦彦, 松井繁朋, 寺井清, 岩村吉就: 線状加熱板曲げ加工における水冷の効果, 日本造船学会論文集, 第126号(1969), 445-458
- 8)荒木睦郎, 井上進夫, 堀岡正毅, 安藤政明: 線状加熱加工による鋼板の角変形量について, 日本造船学会論文集, 第133号(1973), 343-348
- 9)辻勇, 奥村耕之: 鋼材の線状加熱板曲げ加工に関する研究, 西部造船会会報, 第76号(1988), 149-160
- 10)矢村家利, 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, 143-156
- 11)谷和彦, 中谷光良, 大澤守彦, ガス加熱絞り加工の変形推定方法の検討, 溶接学会全国大会概要, 第71集(2002), 394-395
- 12)寺崎俊夫, 山川大祐, 藤内俊平, ビードオンプレート溶接で生じる残留応力・溶接変形の高精度数値解析手法に関する研究, 日本造船学会論文集, 第191号(2002), 249-255
- 13)Elevated Temperature Properties of Carbon Steel, ASTM-ASME Joint Committee, STP 180
- 14)渡辺正紀, 佐藤邦彦, 溶接力学とその応用, 朝倉書店(1965), 238-316
- 15)ASM, Metals Reference Book, A handbook of data about metals and metal working (1981)
- 16)村松篤良, 高温における弾性係数, 日本機械学会誌, Vol.68(1965), 1624-1628
- 17)寺崎俊夫, 山口寛一, 北村貴典, 野本敏治, 線状加熱加工で用いる横収縮と角変形に関する研究, 2003年春日本造船協会論文集で投稿予定
- 18)SR246平成13年度報告書(2001), 船殻ブロックのデジタル生産技術の基礎研究, 野本敏治部会長
- 19)寺崎俊夫, 北村信男, 中井雅之, 線状加熱加工における熱サイクルの予測式, 西部造船会会報, 第99号(2000), 321-329
- 20)松井繁朋, アーク溶接継手の収縮と拘束応力およびこれにともなう溶接割れの研究, 大阪大学学位論文(1967), 13-22
- 21)寺崎俊夫, 構造用材料の溶接残留応力・溶接変形におよぼす溶接諸条件の影響に関する研究, 大阪大学学位論文(1967), 43