(昭和 56 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

薄い軟鋼板の突合せ溶接時の過渡応力と 開先の変位挙動に関する研究 (第 2 報)

正員 辻 勇* 正員 吉 村 洋**

Studies on Transient Stresses and Deformation Behavior of Groove due
to Butt-Welds of Thin Mild Steel Plates (2nd Report)

by Isamu Tsuji, Member Hiroshi Yoshimura, Member

Summary

This paper describes a further study on the problem of transient phenomena such as transverse forces acting on tack welds and deformation behavior of groove resulting from butt weld of thin mild steel plates.

A series of tests on the transient behavior of butt welded joints is performed and experimentally obtained results are compared with those of theoretical calculations in which unsteady heat conduction analysis and uncoupled thermal elastic-plastic analysis are carried out by use of the finite element method as described in the previous report. The calculated results are fairly in good agreements with the experimental results.

In the initial stage of butt welds, transverse forces acting on tack welds and deformation behavior of groove differ with presence of root gap significantly. However, as the weld progresses, the difference decreases gradually because influence of trailing stress field at the rear of the moving weld heat source becomes more predominant. Special attention is made to clear effect of welding speed closely relating with weld heat input on the transient behavior of butt welded joints.

It is shown that, as a weld heat source approaches to end of weld, in case of slow speed welding transverse compressive force is generated on the end tack weld and the groove of the welded joint closes, while in case of high speed welding tensile force is generated on the end tack weld and the groove of the welded joint opens, and that closing or opening behavior of groove of butt welded joints may be specified by a parameter β representing shapes of isothermal lines around a moving weld heat source.

1 緒 論

著者らはさきに、軟鋼板の突合せ溶接継手に生ずる過渡現象の特性を明らかにするために、小型試験片を対象として有限要素法による 2 次元非定常熱伝導解析と熱弾塑性応力解析を行い、仮付け溶接に働く力や開先の変位挙動などを明らかにし、理論解析結果がほぼ妥当なものであることを実験的に検証したり¹⁾。しかしながら、そこで得られた結論は、特定の試験片を特定の溶接条件で溶接した場合のものであり、溶接時の過渡現象の一般的特性を理解するためには、さらに溶接板の寸法、溶接条件、仮付け溶接の大きさやピッチなど多くの要因の影響について研究を行う必要があることはいうまでもない。

突合せ溶接継手の開先の変位挙動に関しては、開先が開く場合と閉じる場合があることが経験的に知られており、溶接板の寸法や溶接熱、溶接速度などの影響について多くの研究^{2)~7)}がなされてきたが、いまだこのような現象を明快に説明できるような研究は見当らない。前報では、開先の変位挙動に及ぼすルート間隔の影響について検討を行ったが、ここでは、比較的大きな溶接板を対象として、主として溶接速度の影響を理論解析と実験研究によって検討した結果について報告する。

2 実験方法

2.1 試験片形状および溶接条件

供試鋼材は、板厚がそれぞれ 9.0 mm, 6.0 mm, 3.2 mm の SS 41 材で、本実験に用いた試験片の寸法および形状を Fig. 1 に示す。A シリーズは、前報に引き続いて

* 九州大学工学部

** 九州大学大学院工学研究科

Table 1. Welding condition

specimen	welding method	welding current I (amp)	arc voltage V (volt)	welding speed v (cm/sec)	plate thickness h (cm)	nugget area A (cm ²)	mean breadth of nugget d (cm)	value of M
A-1	MIG	420	30	0.6	0.9	0.832	0.92	2.17
A-2	MIG	420	30	0.6	0.9	0.810	0.90	2.17
B-1	TIG	77	8	0.1	0.32	0.103	0.32	4.90
B-2	TIG	158	10	0.5	0.32	0.093	0.29	2.64
B-3	TIG	280	10	1.0	0.32	0.099	0.31	2.30
C-1	MIG	90	20	0.12	0.6	0.355	0.59	3.31
C-2	MIG	320	30	1.0	0.6	0.364	0.61	2.15

Fig. 1 Dimensions of test specimens

ルート間隔の有無による相違を調べることを目的としたもので、長さ 10mm の仮付け溶接 6 個を有する 1000×150×9mm の板を、Table 1 に示す溶接条件で溶接した。B シリーズおよび C シリーズは、溶接条件の影響を調べることを目的としたもので、長さ 5mm の仮付け溶接 3 個を有する 500×150×3.2mm および 500×150×6mm の板を、Table 1 に示す溶接条件で溶接した。

ルート間隔がない A-2 試験片は、2 枚の板のルート面を密着させ、仮付け部のみ全板厚にわたって仮付け溶接を行った。それ以外の試験片は、1 枚の板の長手方向中心線上に、仮付け溶接に相当する部分を除いて、Fig. 1 に示すような形状の開先を設けた。試験片は、いずれも実験前に応力除去熱処理を行った。B シリーズの TIG 溶接は、溶加金属を使用せず、また A シリーズおよび C シリーズの MIG 溶接には裏当材 KL-3 を使用した。溶接時の面外変形は、いずれの場合もボールベアリングを用いた治具で拘束した。

2.2 仮付け溶接に働く力と開先変位の計測方法

A シリーズでは、単軸ゲージを No. 2 から No. 6 まで

の仮付け溶接の表裏にそれぞれ 3 枚ずつ、B シリーズでは、中央仮付けと終端仮付けの表裏にそれぞれ 2 枚ずつ貼付し、溶接中溶接線に垂直方向に働くひずみの時間的変化を計測した。表裏のひずみ計測値を平均して、仮付け溶接に働く溶接線に垂直方向の応力分布を求め、これを積分して得られた値を仮付け溶接に働く力とした。溶接中心線をはさむ溶接線に垂直方向の変位は、4 ゲージ結線のクリップ型変位計を Fig. 1 に A, B, C, ...G で示したような位置に試験片の裏面から取付けて計測し、得られた値の半分をそれぞれの計測点における開先変位とした。

3 数値解析法

数値解析法は前報で述べたものと同様であり、2 次元非定常熱伝導解析と熱弾塑性応力解析を有限要素法により取扱った。計算の取扱いの詳細ならびに物性値や機械的性質の温度依存性については、既報の論文^{1),8),9)}を参照されたい。なお、熱伝導解析における潜熱の影響はここでは考慮していない。数値解析は、A シリーズと B シリーズについて行った。

Fig. 2 は、それぞれ A シリーズおよび B シリーズの板の要素分割を図示したものである。要素の最小寸法は、A シリーズでは、 x 方向 10mm、 y 方向 6mm、B シリーズでは、 x 方向 10mm、 y 方向 3mm であるが、B シリーズの仮付け溶接の近傍では、 x 方向を 5mm とした。

Fig. 2 Mesh sub-division

4 結果の考察

4.1 数値解析結果と実験計測値の比較

Fig. 3 は、A シリーズについて、それぞれの仮付け溶接に働く溶接線に垂直方向の力の時間的変化を、横軸に熱源移動距離をとって図示したものである。ルート間隔の有無によって、溶接始端に近い仮付け溶接に働く力には著しい相違がみられる。しかし、溶接長の増加にともなってその相違は徐々に減少し、終端の仮付け溶接に働く力は、ルート間隔がない場合の方が依然としてその値が大きいけれども、ほぼ同様の時間的変化を示すようになることがわかる。ルート間隔がない場合の仮付け溶接に働く力の実験値は、特に溶接初期において計算値よりかなり低い値を示している。これはY開先でルート面が板厚の約 60% しか存在しないために、熱源直前の開先面に働く溶接線に垂直方向の圧縮力が事実上計算値よりも低くなったこと、また開先加工の精度上ルート面が完全に密着していないこと¹⁾などによるものと考えられる。このようなことを考慮すれば、計算値と実験値はいずれもかなり良く一致しているといえる。

Fig. 4 は、A シリーズのそれぞれの計測位置における溶接線に垂直方向の変位の時間的変化を、横軸に熱源移動距離をとって図示したものである。始端および終端の計測変位は、他の計測点と標点距離が異なるけれども、この影響は無視できることを数値解析結果から確認している。仮付け溶接に働く力と同様に、溶接始端に近い点の変位挙動には、ルート間隔の有無により著しい相違が

Fig. 3 Comparison between calculated and measured results of transient transverse forces acting on tack welds in case with or without root gaps

Fig. 4 Comparison between calculated and measured results of transient transverse displacements of grooves in case with or without root gaps

みられるけれども、終端に近づくにつれてその相違は少なくなり、熱源が終端の仮付け溶接に到達すると同時に、終端部はいずれの場合も開先が開く方向に大きく変位することがわかる。過渡変位に関する計算値と実験値は、比較的良く一致している。

前報で、ルート間隔の有無により、熱源直前の領域の応力分布には著しい相違がみられるけれども、熱源後方のそれはほとんど差異がないことを明らかにした¹⁾。溶接初期の段階では、熱源後方の応力があまり大きく成長していないために、この熱源直前の応力分布の相違が、熱源前方の仮付け溶接に働く力や開先の変位挙動に著しい影響を及ぼす。しかし、溶接長が長くなるにつれて、熱源後方の応力場のこれらに及ぼす影響が支配的になり、ルート間隔の有無による影響が減少するものと考えられる。

以上の考察より、突合せ溶接時に生ずる過渡現象には熱源後方の応力場が重要な役割を果たすことが明らかになったので、以下では熱源後方の応力場に及ぼす溶接条件の影響について検討する。従来、溶接熱と溶接速度の影響はそれぞれ別個に取扱われている場合が少なくないが、一定の溶融断面積を得るためには、溶接熱と溶接速度を互に関連させて考える必要がある。A. A. Wells は、2次元準定常状態における温度分布の表示式にもとづいて

$$M = \frac{Q}{c\rho v d h T_M} \quad (1)$$

なる量を定義し, $0.1 < vd/4\kappa < \infty$ の範囲で近似的に

$$M = 2 \left\{ \frac{1}{5(vd/4\kappa)} + 1 \right\} \quad (2)$$

あるいは

$$\frac{Q}{h} = 8KT_M \left(\frac{1}{5} + \frac{vd}{4\kappa} \right) \quad (3)$$

なる関係が成立することを明らかにしている¹⁰⁾。ただし, Q : 単位時間当りの入熱量, v : 溶接速度, d : 溶接部の平均溶融幅, h : 板厚, c : 比熱, ρ : 密度, T_M : 溶融温度, K : 熱伝導率, κ : 温度伝導率である。(3)式は, 板厚と平均溶融幅が与えられた場合, Q と v の間に成り立つべき関係を示している。BシリーズとCシリーズの溶接条件は, それぞれ $d=0.30$ cm, $d=0.55$ cm と推定して(3)式を満足するように選定したものである。ただし, 諸定数値は $K=0.087$ cal/cm $\cdot$ sec $\cdot$ °C, $\kappa=0.058$ cm 2 /sec, $T_M=1500$ °C と仮定した。Photo. 1は, Bシリーズの溶接部の断面マクロ写真を示したもので, 溶融断面積 A を測定し, これを板厚 h で除して得られた平均溶融幅 d の値をTable 1に記してある。BシリーズとCシリーズのそれぞれにおいて, 溶接条件は著しく異なるにもかかわらず, 予期したようにほぼ同一の平均溶融幅が得られており, このことから(3)式が妥当な結果を与えるものであることがわかる。

Fig. 5とFig. 6は, それぞれBシリーズについて, 中央仮付けと終端仮付けに働く力および中央部A点と終端部B点の変位の時間的変化を, 横軸に熱源移動距離をとって図示したものである。いずれの場合も中央仮付けには圧縮力が働き, その値は溶接速度が遅い方が大きく, したがってA点の変位量も溶接速度が遅い方が大きい。この間において, 終端仮付けには引張力を生ずるが, そ

(a) $V=0.1$ cm/sec

(b) $V=0.5$ cm/sec

(c) $V=1.0$ cm/sec

Photo. 1 Macrographs of B-series specimens

Fig. 5 Comparison between calculated and measured results of transient forces acting on tack welds of B-series specimens

Fig. 6 Comparison between calculated and measured results of transient transverse displacements of B-series specimens

の値は溶接速度が遅い方が大きく、B点の変位量も溶接速度が遅い方がわずかに大きくなっている。Bシリーズの中央仮付けに働く力は、Aシリーズのルート間隔がある場合の溶接始端近傍にある仮付け溶接に働く力と類似の挙動を示している。 $v=0.1\text{ cm/sec}$ の場合、熱源が中央仮付けを溶融すると同時に終端仮付けに働く引張力は急速に減少し始め、終端仮付けには圧縮力が働くようになる。これにともなって、B点は開先が閉じる方向へ変位し始め、熱源の進行とともにその変位量が増大する。 $v=0.5\text{ cm/sec}$ と $v=1.0\text{ cm/sec}$ の場合、終端仮付けに働く力の大きさはほぼ同一の時間的経過をたどり、B点の開先が開く方向の変位量は熱源の進行とともに徐々に増加する。熱源が終端部に到達したときに、Aシリーズの場合のように変位の急増がみられないのは、終端仮付けが早い時期に降伏したことによるものであると考えられる。いずれの場合も、計算値と実験値はかなり良く一致している。なお、紙面の都合によりCシリーズの変位の計測結果は省略するが、C-1試験片では、熱源の進行とともに終端部は開先が閉じる方向へ変位し、C-2試験片では開先が開く方向に変位することを確認した。

4.2 開先変位に及ぼす溶接速度の影響

前節の検討結果から、溶接速度の相違によって終端部の開先が閉じる場合と開く場合があることが明らかになった。そこで、開先の変位挙動に及ぼす溶接速度の影響をさらに詳細に調べるために、Bシリーズの試験片を対象として、(3)式を満足するように溶接条件を種々変化させてシリーズ計算を行った。

Fig. 7とFig. 8は、それぞれ中央仮付けと終端仮付け

Fig. 7 Effect of welding speeds on transverse forces acting on tack welds during welding

Fig. 8 Effect of welding speeds on transverse displacements of grooves during welding

に働く力および中央部A点と終端部B点の変位の時間的变化に及ぼす溶接速度の影響を、横軸に熱源移動距離をとって図示したものである。これらの図から、 $v=0.3\text{ cm/sec}$ の場合には、熱源が終端仮付けに到達する直前に終端仮付けに働く力がほぼ零となり、終端仮付けが溶融しても、終端部の変位はほとんど変化しないことがわかる。すなわち、このような試験板の場合には、溶接速度がこれよりも遅くなると終端部は開先が閉じる方向へ変位し、速くなると開先が開く方向へ変位することがわかる。このように、溶接速度の相違によって、仮付け溶接に働く力や開先の変位挙動が著しく異なることが明らかになったので、次に数値解析結果にもとづいて、このような相違を生ずる理由を考察する。

Fig. 9は、Bシリーズのそれぞれの場合について、熱源が $x=15\text{ cm}$ 、 $x=31\text{ cm}$ 、 $x=45\text{ cm}$ の位置にあるときの 700°C 、 500°C 、 300°C の等温線ならびに溶接線上に働く溶接線に垂直方向の応力分布と仮付け溶接に働く平均応力を図示したものである。溶接速度が遅い場合は、溶接速度が速い場合に比べると、等温線の囲む領域の溶接線方向の長さが著しく短い。このために、熱源直後の狭い領域に熱膨張による圧縮応力が発生するものの、熱源通過後間もなく溶接金属の収縮が始まり、これにもとづく引張応力が広い範囲にわたって現われる。その結果、熱源前方の仮付け溶接には、熱源後方の収縮の影響が大きく作用し圧縮力が発生するのである。溶接速度が速くなるにつれて、等温線の囲む領域の溶接線方向の長さは

Fig. 9 Effect of welding speeds on temperature distributions and transient transverse stress distributions acting across the weld centerline

増大する。このために、溶接速度が遅い場合に比べると、熱源後方のかなり広い領域に熱膨張にもとづく圧縮応力が発生し、収縮による引張応力は熱源のはるか後方に現われるようになる。その結果、熱源前方の仮付け溶接には、熱源後方の熱膨張の影響が大きく作用し引張力が発生する。しかし、熱源が $x=15\text{cm}$ の位置にある比較的溶接初期の段階では、熱源後方の圧縮応力域はいまだ十分に成長しておらず、また熱源通過直後に溶接金属の収縮が始まるために、いずれの場合にも中央仮付けには圧縮力を、終端仮付けにはこれと釣り合うような引張力を生ずる。すなわち、熱源後方の圧縮応力域と引張応力域の相対関係によって熱源前方の仮付け溶接に働く力が決定されることがわかる。なお、 $v=0.5\text{cm/sec}$ と $v=1.0\text{cm/sec}$ の場合の熱源後方の圧縮応力域は、熱源の進行にともなって増大しており、この程度の溶接長では熱源後方の応力状態がいまだ定常状態になっていないことがわかる。

以上の解析結果により、仮付け溶接に働く力や開先の変位挙動は、熱源後方の温度分布すなわち等温線形状と密接な関連があることが推察される。そこで、Fig. 10 に示すように任意温度 θ_M なる等温線について x_M, y_M なる値を定義し、等温線の形状を表わすパラメータとして $\beta = (x_M/y_M)/(T_M/\theta_M)$ なる値を考え、これと開先の開閉挙動との関係について検討する。 x_M および y_M

Fig. 10 Definitions of x_M and y_M

は、2次元準定常状態の温度分布の表示式より、熱源近傍あるいは溶接速度が著しく小さい場合を除いて近似的に次のように表わすことができる¹¹⁾。

$$x_M = \frac{1}{4\pi c \rho K \theta_M^2} \left(\frac{Q}{h} \right)^2 \frac{1}{v} \quad (4)$$

$$y_M = \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \frac{1}{c \rho \theta_M} \left(\frac{Q}{h} \right) \frac{1}{v} \quad (5)$$

よって、(3)、(4)、(5) 式より次式を得る。

$$\beta = \frac{(x_M/y_M)}{(T_M/\theta_M)} = \sqrt{\frac{2e}{\pi}} \left(\frac{1}{5} + \frac{vd}{4\kappa} \right) \quad (6)$$

(6) 式より、 β は $vd/4\kappa$ に正比例することがわかる。

Fig. 11 は、本実験結果ならびに従来の多くの実験結果^{4), 12)~15)}を参照して、それぞれの場合の $vd/4\kappa$ なる値を用いて(2)式により M の値を計算し、その結果を(6)式の関係と併せて図示したものである。ここで、溶接熱源が終端部に近づいたとき開先が閉じるものは黒印で、開先が開くものは白印で表示した。ただし、Jacksonらの論文¹²⁾では、開先の開閉に関する情報が不明であるので、手溶接およびサブマージアーク溶接の結果をそれぞれ黒丸と白丸で図示した。なお d の値は、本実験なら

Fig. 11 Relation between $vd/4\kappa$ and M or β . White marks show groove opening behavior, and black marks show groove closing behavior.

びに Jackson らのものについては、溶融断面積を板厚で除いたものを、それ以外は計測値が不明であるため、開先形状より推定した値を用いた。Fig. 11より、 $vd/4\kappa$ が大きくなり β の値が増加すると開先が開き、 $vd/4\kappa$ が小さくなり β の値が減少すると開先が閉じることがわかる。また、 M の値と開先の開閉との間にも密接な関連があることがわかるが、図中には M の値のみでは説明が困難な境界領域が存在する。これは、熱源前方の開先の変位挙動が、熱源後方の温度分布からだけでは単純に決定できないことを意味するもので、溶接板の寸法や開先変位の拘束方法などの影響を今後さらに検討する必要がある。

4.3 溶接板の変形ならびに残留応力について

Fig. 12 は、それぞれ B シリーズの $v=0.1\text{ cm/sec}$ と $v=1.0\text{ cm/sec}$ の場合について、熱源が $x=15\text{ cm}$ および $x=45\text{ cm}$ の位置にあるときの板の過渡変形ならびに残留変形に関する数値解析結果を、変位を 30 倍に拡大して図示したものである。溶接中、板はいずれの場合も熱源より後方が上に凹になるような変形を示し、各格子点の変位量は溶接速度が遅い場合の方が大きい。熱源が $x=45\text{ cm}$ の位置にあるときの板の終端部は、溶接速度が遅い場合開先が閉じる方向に変位しているが、溶接速度が速い場合わずかに開先が開く方向に変位していることがわかる。なお、横収縮量は溶接速度が遅い場合の方が大きい。

Fig. 13 は、B シリーズの $v=0.1\text{ cm/sec}$ と $v=1.0\text{ cm/sec}$ の場合について、板の中央横断面上ならびに溶接線上における残留応力 σ_x 、 σ_y の計算値を図示したものである。溶接線近傍の引張応力域は溶接速度が遅い場合の方が広く、溶接線上の最大引張応力値も大きくなっている。これは Fig. 9 より明らかなように、溶接速度が遅い

Fig. 13 Residual stress distributions (a) on middle transverse section, (b) on weld centerline

場合の方が溶接線からの熱影響範囲が広いことによるものである。また、溶接線上における σ_y の値は、溶接速度が遅い場合の方が大きくなっているが、これは Fig. 9 に示したように、溶接速度が遅い場合の方が、熱源後方の収縮の影響が大きいためである。

5 結 論

薄い軟鋼板の突合せ溶接時に生ずる過渡応力場ならびに開先の変位挙動を明らかにすることを目的として、前報に引き続いて有限要素法による数値解析と実験研究を行った。ここで得られた結論を要約すると次のとおりである。

(1) 仮付け溶接に働く力と開先変位に関する計算値と実験値は、いずれの場合もかなり良い一致を示し、本論文の数値解析結果がほぼ妥当なものであることを確認した。

(2) 仮付け溶接に働く力や開先の変位挙動は、ルート間隔の有無により、溶接初期の段階では著しく異なるが、溶接長が増すにつれてそれによる相違は減少する。これは、溶接長が増すにつれて、ルート間隔の有無よりもむしろ熱源後方の応力場の影響が支配的になることによる。

(3) 溶接速度の相違により、仮付け溶接に働く力や開先の変位挙動が著

Fig. 12 Exaggerated distortions of weldments during and after welding (displacement $\times 30$)

しく異なることを示し、その理由を明らかにした。すなわち、溶接熱源が終端部に近づいたとき、溶接速度が遅い場合は、終端仮付けには圧縮力が働き終端部は開先が閉じる方向に変位するが、溶接速度が速い場合には、引張力が働き終端部は開先が開く方向に変位する。これは、熱源後方の温度分布とこれにもとづく熱源後方の応力場の相違によるものである。また、熱源が終端仮付けを溶融しても終端部の変位が変化しないような溶接条件が存在することを明らかにした。

(4) 本実験結果ならびにこれまでに得られている実験結果を整理して、A. A. Wells が定義した M あるいは等温線の形状を表わすパラメータ β と開先の開閉挙動との間に密接な関連があることを明らかにした。

(5) 本研究結果によれば、同一断面積の溶接金属を形成する場合、突合せ溶接継手に生ずる横収縮量ならびに残留応力の絶対値は、溶接速度が遅い方すなわち溶接入熱が大きい方が大となる。

この研究は、昭和55年度文部省科学研究費の援助により、九州大学大型計算機センター FACOM-M-200, OSN/F4 を使用して行われた。実験研究を行うにあたっては、九州大学工学部造船学教室 山口喜久次 助手の協力を得た。また、昭和54年度学士卒業論文として畠中俊、馬場嗣夫の両君が行った実験結果ならびに昭和55年度学士卒業論文として井手敏治、大林春彦、木戸敏弘の諸君が行った実験結果の一部を参照させていただいた。ここに記して厚く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 辻, 吉村: 薄い軟鋼板の突合せ溶接時の過渡応力と開先の変位挙動に関する研究(第1報), 日本造船学会論文集, 第146号(1979), pp.449~456.
- 2) R. A. Chihoski: The Character of Stress Fields Around a Weld Arc Moving on Aluminum Sheet, Welding Journal, Vol.51, No.1 (1972), pp.9s~18s.
- 3) 岩崎: 移動熱源による熱応力, 大阪大学大学院工学研究科修士論文(1972).
- 4) 前田, 矢田, 中村, 福沢: エレクトログラス溶接中の熱変形挙動と防止対策, 石川島播磨技報, 第13巻, 第6号(1973), pp.687~695.
- 5) 佐藤, 上田, 前田, 矢田, 神近, 金: 片面溶接における変形と割れに関する研究(第1報), 日本造船学会論文集, 第136号(1974), pp.441~458.
- 6) R. A. Chihoski: Expansion and Stress Around Aluminum Weld Puddles, Welding Journal, Vol.58, No.9 (1979), pp.263s~276s.
- 7) 佐藤, 寺崎, 野原: 平板の突合せ溶接進行中に拘束材・仮付け溶接に作用する引裂力について, 溶接学会誌, Vol.49, No.12 (1980), pp.822~827.
- 8) 辻, 吉村: 薄板のビード溶接時の温度分布と冷却速度, 西部造船会会報, 第58号(1979), pp.23~34.
- 9) 辻, 吉村: 有限要素法による移動熱源まわりの2次元準定常温度分布の解析, 西部造船会会報, 第61号(印刷中).
- 10) A. A. Wells: Heat Flow in Welding, Welding Journal, Vol.31, No.5 (1952), pp.263s~267s.
- 11) 渡辺, 佐藤: 溶接力学とその応用, 朝倉書店, 1965, pp.218~219.
- 12) C. E. Jackson, A. E. Shrubbsall: Energy Distribution in Electric Welding, Welding Journal, Vol.29, No.5 (1950), pp.231s~241s.
- 13) 前田: ユニオンメルト溶接時に発生する熱応力について, 造船協会電気溶接研究委員会第7分科会資料, 7-7'-65 (1965).
- 14) 藤田, 寺井, 山田, 須沢, 松村: 片面自動溶接における終端割れ防止に関する研究(第1報), 日本造船学会論文集, 第133号(1973), pp.267~275.
- 15) 藤田, 寺井, 松村, 野本: 片面自動溶接における終端割れ防止に関する研究(第2報), 日本造船学会論文集, 第135号(1974), pp.379~391.