T継手溶接における冷却サイクルの解析*

福岡 俊道** ・ 山崎 直樹***
福井 進治***

Analysis of Cooling Process of T-shaped Welded Joint

By Toshimichi FUKUOKA, Naoki YAMASAKI, Shinji FUKUI

It is well known that the strength of welded joint is largely influenced by the cooling cycle around the bond. Theoretical solutions in heat conduction are very useful to estimate the cooling cycle of the welded joint with simple configuration. However, numerical methods must be introduced when dealing with a complicated-shaped welded joint. In this paper, the cooling process of T-shaped welded joint is analyzed by means of 3-dimensional F.D.M. where irregular meshes are used in the plane which is perpendicular to the direction of welding. The governing equation here is for a quasi-static temperature field because heat input by arc can be treated as moving heat source. The effects of plate thickness and height on the cooling cycle are evaluated, and the accuracy of the numerical solutions are examined by the experiment of CO₂ arc welding.

1. 緒言

アーク溶接は、船用関連機器の製造、補修において最も広く用いられている接合技術である。その場合に問題となる溶接継手の強度は、溶接部がどのような熱サイクルを受けたかに影響される。稲垣ら¹⁾は、被覆アーク溶接とサブマージアーク溶接の熱サイクルについて、また蓮井ら²⁾は水中溶接との対比も含めて、それぞれ実験的に検討している。溶接部の冷却サイクルの解明に熱伝導の解析解を用いた研究としては、Rosenthalの移動点熱源の式がよく知られている。しかしながら、点熱源に対する式であるために、実際の溶接作業における様々な溶接条件および継手形状を想定した場合、その適用範囲はかなり制限されると考えられる。そのような問題点の一つの解決方法が数値解析であり、有限要素法による小川³⁾の研究、差分法による村松⁴⁾の報告などがある。著者らは、解析対象が規則的な形状である場合には、差分法が非常に有効な手法であることに着目し、母材が平板である場合について冷却過程に対する板厚、溶接速度の影響

を三次元的に解析した。またそれに対応した炭酸ガスアーク溶接による実験も行ない、解法の妥当性を確認している⁵⁾。ところで、溶接継手としては平板以外にもパイプ、T型の継手など様々な形状のものがあり、重要な箇所の接合に使用されている。

そこで本研究では、T継手を対象としてその熱サイクルを解析する。T継手の場合隅肉溶接となるので、継手全体として非対称な温度場を形成する。したがって、溶接する2枚の母材の板厚や幅の比率が熱サイクルに大きく影響すると考えられる。解析方法としては前報と同様、3次元非定常温度場の問題である溶接部の熱サイクルを、運動座標系を導入することにより3次元準定常問題に置き換えて差分法によって解く。なお、ここでは2枚の板から形成されるモデルを対象としているので、不等間隔差分格子を導入して、両者の板厚および熱源の大きさの差に対応している。また、炭酸ガスアーク溶接により同一条件のもとで実験を行ない、解析結果の精度を検討する。

2. 解析方法

2.1 運動座標系における熱伝導方程式⁶⁾

溶接部の熱サイクルは、母材の板厚が薄い場合は2次元温度場になると仮定できるようであるが、一般的には3次元非定常温度場の問題となる。その結果、数値解析法を用

*原稿受付日 平成3年5月29日

平成3年春季学術講演(平成3年5月16日)

**正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

***神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

いる場合でも, 大きな計算機容量と計算時間が必要となることが多い。平板を解析の対象とした前報においては, 上記の問題点を解決するために運動座標系を導入し, 非定常温度場を準定常温度場に帰着させて解析を行った。本研究においても同様に運動座標系を導入して定式化を進める。材料定数の温度依存性を無視すると, 熱伝導方程式は以下のように表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots(1)$$

ここで, T , t , K はそれぞれ温度, 時間, 温度伝導率である。図1に運動座標系の考え方を示している。溶接線に沿って z 軸をとり, 溶接速度 V_z で z 軸方向に動く運動座標系(x , y , w)を考えると, 以下の関係が成り立つ。

$$w = z - V_z t \quad \dots\dots(2)$$

上式を用いて, 式(1)を変形し, 若干の計算ののち次式を得る⁵⁾。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{V_z}{K} \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots(3)$$

この式は, 材料定数の温度依存性を無視した3次元準定常温度場における熱伝導方程式であり, 本解析の基礎式である。

図1 運動座標系

2.2 問題の設定および境界条件 運動座標系を導入して準定常温度場の問題を解く場合, 厳密には熱源(アーク)の移動方向に無限に長い板(母材)を対象としなければならないが, 実際にはアーク発生位置から少し離れると温度が急激に低下することを考慮して, 母材のモデルの大きさは有限であるとする。母材の端部の熱サイクルを問題とするのでなければ, この仮定に基づいて実用上十分な解が得られることは前報⁵⁾ですでに確認している。図2に解析モデルを示す。横板は x - z 平面, たて板は y - z 平面に沿っておかれているとする。p-q-r-sで示した部分はアークからの受熱面積を表しており, z 軸方向に V_z の速度で動く。境界条件は以下の

図2 解析モデル

通りである。溶接方向の前面に位置するT型の表面では, アーク熱による温度上昇はないと仮定する。その他の表面はすべて熱伝達境界として扱う。この境界条件は h , k をそれぞれ表面熱伝達率, 母材の熱伝導率, T_∞ を周囲温度とすると, 一般形で以下のように表される。

$$\pm k \frac{\partial T}{\partial \nu} = h(T - T_\infty) \quad \dots\dots(4)$$

ただし, k の前の符号は考えている面の外向き法線 ν と熱の流れの方向によって変わる。図2に示したモデルの面と面の交線上, あるいは交点上においては, 各面の境界条件を組み合わせる。

2.3 差分表示⁷⁾ 図3に, 差分格子番号の付け方とモデル全体の差分格子の一例を示す。(a)はアークが発生する側から見たもので, 上半分がたて板, 下半分が横板である。(b)はアークの進行方向に垂直な断面を示している。モデル全体の差分格子から明らかなようにアークの進行方向に垂直な面, すなわち x - y 平面において不等間隔差分格子を用いている。その理由は以下の通りである。アークの進行方向である z 軸方向の格子間隔 Δz については, 溶接速度, 温度伝導率などから決まる最大許容値が存在するが, その値以下にしておけば等間隔差分格子を用いて何ら問題はない。 x - y 平面における格子間隔は, 横板とたて板の厚さ, および各板上に存在する熱源の大きさによって決定する。たとえば横板について考えると, x 方向に関してたて板から正の方向に存在する部分の格子間隔は, 横板上に存在する熱源の大きさにより決定する。また, その反対方向の部分の格子間隔はたて板の厚さによって決まる。すなわち, 格子間隔は熱源の幅およびたて板の厚さの整数分の1として決定される。たて板についても全く同様である。その結果, 溶接線に沿って存在する格子点を点0とすると, 図3に示した差分格子番号において, 1, 2, 3, 4で表示した4つの格子点までの間隔はすべて異なることになる。図3に示した記号を添字として温度 T の座標に対する1次導関数, 2次導関数を表すと以下のようなになる。

図3 差分格子番号と差分モデルの一例

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{1}{\Delta x_1 + \Delta x_2} \left\{ \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} (T_0 - T_3) + \frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} (T_1 - T_0) \right\} \\ \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{1}{\Delta y_1 + \Delta y_2} \left\{ \frac{\Delta y_1}{\Delta y_2} (T_0 - T_4) + \frac{\Delta y_2}{\Delta y_1} (T_2 - T_0) \right\} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= \frac{2}{\Delta x_1 + \Delta x_2} \left(\frac{T_1 - T_0}{\Delta x_1} - \frac{T_0 - T_3}{\Delta x_2} \right) \\ \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} &= \frac{2}{\Delta y_1 + \Delta y_2} \left(\frac{T_2 - T_0}{\Delta y_1} - \frac{T_0 - T_4}{\Delta y_2} \right) \\ \frac{\partial T}{\partial z} &= \frac{T_a - T_b}{2\Delta z}, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_a + T_b - 2T_0}{(\Delta z)^2} \quad \dots\dots(5)\end{aligned}$$

ここで x, y 方向に関しては、すべて不等間隔差分で表示しているが、等間隔になっている部分では、 $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x$, $\Delta y_1 = \Delta y_2 = \Delta y$ と置きかえればよい。式(5)を式(3)に代入すると、基礎式の差分表示が得られる。

$$\begin{aligned}& \frac{2}{\Delta x_1 + \Delta x_2} \left(\frac{T_1 - T_0}{\Delta x_1} - \frac{T_0 - T_3}{\Delta x_2} \right) + \frac{2}{\Delta y_1 + \Delta y_2} \left(\frac{T_2 - T_0}{\Delta y_1} - \frac{T_0 - T_4}{\Delta y_2} \right) + \frac{T_a + T_b - 2T_0}{(\Delta z)^2} + \frac{V_z T_a - T_b}{K 2\Delta z} \\ &= 0 \quad \dots\dots(6)\end{aligned}$$

境界上の格子点については、式(4)で示されている境界条件を、対象としている部分に応じて適用し、仮想格子点における温度を消去する。

2.4 面熱源の扱い方 アークにより発生した熱は、母材の表面にある熱流束分布で与えられ、その分布形状は一樣ではない⁸⁾。溶接部、とくにポンド部の冷却曲線を求めることを主たる目的とした場合、アークの受熱面を矩形の一樣強さの面熱源と仮定しても差しつかえないようである⁵⁾。溶接アークによって母材に与えられる熱量 Q_{net} は、アーク電圧 V とアーク電流 I の積に熱効率 η を乗じて得られる。ここで熱効率は一般的な値である $\eta = 0.8$ を採用する。 Q_{net} を面熱源を構成する格子点に均等に配分するので、ひとつの格子点から流入する熱

図4 受熱面積の考え方

量 q_{in} は、面熱源上に存在する格子点数を n として、

$$q_{in} = \frac{Q_{net}}{n} = \frac{\eta VI}{n} \quad \dots\dots(7)$$

と表される。図4は、式(7)を、差分表示式に組み込む場合の考え方を示したものである。ひとつの格子点あたりの流入熱量 q_{in} を、その対象となる面積で除して、単位時間、単位面積あたりの熱量として扱う。ビードの幅は実測から求め、2.3で述べたように、その結果から Δx_1 と Δy_1 を決定する。 Δz に関しては前報と同様、ビードの1秒間あたりの移動距離の半分の値であると仮定する。図5は面熱源全体を示したものであり、本解析では $n=25$ とする。

以上示したように、 x - y 平面の格子間隔は熱源の大きさと板厚、 z 方向の格子間隔は溶接速度から決定したが、各方向の分割の大きさは基本的にはいずれも前報⁵⁾と同様の考え方で決定したものである。前報では種々格子間隔を変えて解の精度と収束の安定性を確認しており、母材の形状が異なるものの、本研究で用いた分割は実用上十分な解を与えるものと考えられる。

2.5 連立一次方程式の解法 差分法は連立一次方程式を解く問題に帰着されるが、その場合の解法としては代表的な反復解法である Gauss-Seidel法を用いる。一般に反復法は、有限要素法などで広く用いられている直接法と比較して計算速度の点では劣るが、ill-

図5 面熱源

conditionの問題に強く、プログラムが簡潔になるという利点を有している。本研究では不等間隔差分格子を用いるので、ill-conditionになる可能性はかなり高いといえる。また、連立一次方程式に関する変数領域の大きさが、格子点数のおよそ2倍の変数をストアする領域のみであり、計算機の容量が小さくてすむという利点も有している。したがって、本解析は格子点数がかなり多いモデルを使用したにもかかわらず、16ビットマイクロコンピュータにより実行が可能である。さらに解の収束をはやくするために δ^2 外挿法⁹⁾を併用する。この方法は、解を収束させる過程における変数の変化量がほぼ等比級数になるという性質を利用したものである。

3. 解析結果

3.1 解析条件 T継手の溶接部の熱サイクルに対する母材の板厚 d と高さ H の影響を検討するために、表1に示した条件に対して解析を行なう。表中 d , H はそれぞれたて板の板厚と板幅、すなわち高さである。また横板の寸法は一定で、板厚は9mm、板幅、長さはそれぞれ100mm, 200mmとする。表に示すように8通り

表1 解析モデルの諸元

No	d(mm)	H(mm)	Node
1	6	50	27702
2	9	50	26730
3	12	50	23814
4	15	50	21384
5	19	50	19926
6	9	30	25758
7	9	40	26730
8	9	80	29646

の解析条件を設定しており、たて板の厚さは6から19mm、高さは30から80mmまで変化させる。たて板の板厚が9mm、高さが50mmのNo. 2を標準条件とする。溶接速度は300mm/min、電流、電圧はそれぞれ270A, 32Vとする。解析に使用した熱定数は、熱伝導率 $k=39.77$ W/mK、温度伝導率 $K=15.02$ mm²/s¹⁰⁾、母材の表面熱伝達率 $h=11.63$ W/m²Kである。表1の最後の欄には、各モデルの総格子点数を示している。

3.2 温度分布 標準条件における温度分布を図6に示す。(a)はアークが発生する側から見たもので、アークの進行方向は左向きである。(b)はアーク発生位置の断面における温度分布を表している。たて板と横板の板厚が同じであるために、溶接線に対してほぼ対称な温度分布となっている。図7は板厚 d の変化が温度分布に及ぼす影響を示している。(a), (b)は、それぞれたて板の板厚が6mm, 19mmに対する解析結果である。 $d=6$ mmの場合、標準条件に対応する9mmの場合と比較して著しい違いは見られないが、 $d=19$ mmの場合は、たて板の厚さ方向、すなわち x 軸の負の方向の熱の流れが顕著になっているのが認められる。図8は、たて板の高さ H を変化させた場合の結果である。 $H=30$ mmと高さ

図6 温度分布(標準条件)

図7 温度分布(板厚の影響)

が低いと、溶接線に対して温度は非対称に分布しており、たて板の頂部まで熱が伝わっている。また $H=80$ mm の場合には、たて板の頂部にはほとんど熱が伝わっておらず、溶接部まわりの温度分布に影響する、ある限界の高さが存在すると考えられる。

3.3 ボンド部の冷却曲線 冷却曲線は、 z 方向の一つの格子間隔が $\Delta t = \Delta z / V_z$ の時間間隔に対応していることにより求める。詳細は前報⁵⁾に述べているので省略する。以下に示す冷却曲線はボンド部における値であり、その位置についてはあらかじめ実験により求める。図9は、冷却曲線を求める対象としたボンドの位置を示している。このようにT継手の場合ボンドが不規則な形状となるので、たて板と横板の境界面とボンドの交点を冷却曲線を評価する点とする。また、その位置は必ずしも差分格子と一致しないので、表面の格子点を含んでたて板の厚さ方向に存在する3点における温度から温度分布を2次曲線で近似して求める。図10は、板厚 d と板の高さ H の影響を示したものである。 d が大きくなるほど、冷却曲線の勾配が大きくなり急冷されている。また、 H については d ほどではないが、その値の増加に伴ってわずかながら勾配が大きくなっている。

3.4 冷却速度 炭素鋼の A_1 変態点温度である 723°C における冷却曲線の勾配を冷却速度と定義して、板厚 d と板の高さ H の影響を検討する。図10に示した冷却曲線から、5点の解析データを用いて部分的に4次曲線で近似して 723°C における勾配を求める。図11は、冷却速度に対する板厚と板の高さの影響を示したものである。 d, H が大きくなると冷却速度が大きくなっているが、両者ともその増加に伴って次第に飽和する傾向を示す。グラフはいずれも対数曲線のような形状を呈している。その形状は、平板の溶接の場合に板厚を大きくすると示した飽和傾向とは異なっている⁵⁾。図より、 d, H ともに冷却速度が飽和する値が存在すると考えられる。ここで示した解析例では、 d については15 mm 以上ではほぼ飽和している。 H に関しては80 mm 以上で飽和傾向が顕著である。さらに前報の平板の場合と比較すると、入熱量の大きさ、2枚の母材の板厚が異なっているなど溶接条件がかなり違っているので単純には比較できないが、板厚の変化が冷却速度に及ぼす影響はT継手の場合の方が小さいようである。

図8 温度分布 (板の高さの影響)

図9 ボンド部の冷却曲線評価位置

4. 炭酸ガスアーク溶接実験による検討

4.1 実験方法 実験は炭酸ガスアーク溶接により行なう。溶接装置の概要は以下の通りである。トーチは固定台に固定されており、試験片をのせる溶接台は台車に取付けられている。その台車を一定速度で動かすことにより自動溶接する。溶接ワイヤとしては直径1.2 mmの軟鋼および50キロ級高張力鋼用のものを用いて、直流の逆極性で行なう。なおシールドガスは炭酸ガスを使用し、流量は毎分30リットルとする。試験片材料はSS 41で、横板の寸法は長さ200 mm、幅100 mm、厚さ9 mmである。また、たて板は長さ200 mm一定で高さや厚さを变化させる。たて板の高さと厚さに関しては、解析で設定した条件と同じにする。図12は温度測定法の概要を示している。直径0.3 mmのクロメル-アルメル熱電対を用いて、熱起電力をバーチカルペンレコーダで記録する。熱電対は絶縁被覆したタイプのものである。測定は図に示した4箇所で行ない、測定点は3.3節に述べたように、たて板と横板の境界面とボンドの交点である。ボンド部の位置は予備実験により求めておき、その位置に熱電対の先端がくるようにする。その際熱電対の装着

(a)

(b)

図10 冷却曲線（板厚と板の高さの影響）

(a)

(b)

図11 冷却速度（板厚と板の高さの影響）

を容易にするために、たて板側の横板と接触する面に溝を削り、そこに熱電対をスポット溶接する。

4.2 解析結果との比較 冷却速度について解析結果と実験値を比較することにより、解析結果の妥当性を検討する。冷却速度としては、3.4節で定義した冷却曲線の723℃における勾配を用いる。図13は、解析結果を実験値と比較したものである。たて板の厚さ d が変化した場合に両者の値の差がやや大きいものの、比較的良く一致しているといえる。このことは平板の解析においても見られたことであり、板厚が変化するとボンドの深さがかなり変化し、またそのばらつきも大きいことが主たる原因の一つであると推察される。

5. 考 察

前節までは、たて板の寸法のみを変化させた場合について冷却過程の解析を行なったが、ここではたて板と横板の板厚を等しくって変化させた場合について解析する。なお、たて板の高さ H は50mmとする。図14は、冷却速度に対する板厚 d の影響を示した物である。冷却速

度の大きさを図11、13に示した結果と比較すると、板厚が12mmのときはわずかに大きい程度であるが、15mm以上ではその差はかなり大きくなっている。その結果、冷却速度が飽和傾向を示しはじめる板厚はかなり大きくなっているといえる。またグラフの形状も異なっており、両方の板厚をともに大きくすると母材が平板の場合と類似した形状を呈している。

6. 結 言

T継手溶接における冷却過程に対する一数值解析法を提案し、また同時に炭酸ガスアーク溶接実験を行なった結果、以下に示す結論を得た。

- (1) 種々の条件下におけるT継手溶接の冷却過程を、移動熱源の問題として運動座標系を導入して解析した。解析手法としては、不等間隔格子による3次元差分法を用いた。
- (2) 母材の板厚および高さを変えて解析を実施し、そ

図12 熱電対によるボンド部の温度測定

図14 冷却速度（たて板と横板の板厚が等しい場合）

(a)

(b)

図13 冷却速度（解析結果と実験値の比較）

の場合の温度分布を示した。

(3) 冷却速度は、母材の板厚あるいはたて板の高さを大きくすると増加し、その寸法の増加に伴って飽和する傾向を示した。板厚を大きくした場合、冷却速度はたて板の板厚のみを変化させた場合と、両方の板厚を変化させた場合で異なった増加傾向を示した。後者においては母材が平板である前報⁵⁾と同様の傾向を示した。

(4) 炭酸ガスアーク溶接実験により解析精度を検討した結果、たて板の厚さが変化した場合に解析結果と実験値の差がやや大きいものの、比較的良く一致した。

本研究を進めるにあたり有益な助言を賜った(株)名村造船所のスタッフの方々に深く感謝いたします。また、本研究を特別研究のテーマとして遂行された機関学料北坂恭万君に謝意を表します。

文 献

- 1) 稲垣・ほか2名, 溶接学会誌, 34-10, (1985), 1064
- 2) 蓮井・菅, 溶接学会誌, 48-12, (1979), 1077.
- 3) 小川, 舶機誌, 21-4, (1986-4), 267.
- 4) 村松・岡田, 溶接学会誌, 50-10, (1981), 982.
- 5) 福岡・福井, 舶機誌, 23-5, (1988-5), 295.
- 6) 渡辺・佐藤, 溶接力学とその応用, (1965), 162, 朝倉書店.
- 7) 例えば福田, 差分法 (1977), 生産技術センター.
- 8) 例えば牛尾, 溶接学会論文集, 4-1 (1986). 231.
- 9) Benham, P.P. and Hoyle, R., Thermal Stress (1964), 77, Pitman.
- 10) 一宮, 精密機械, 30-10 (1964), 816.