アーク溶接における冷却過程の解析*

—はめ込み継手溶接の場合—

福岡 俊道** 中西 彩***

Analysis of Cooling Process in Arc Welding — Patch Welding with Circular Plate —

By Toshimichi Fukuoka and Aya Nakanishi

Arc welding is usually used for bonding structural members and machine parts. When some defects or cracks are detected, however, it sometimes provides practical and effective means for compensating the strength of welded joint as a so-called repair welding. In normal practice, the regions containing defects are removed as a circular hole whose diameter is larger than 8cm. A circular plate with the same diameter is placed to plug the hole; then the repair welding with curved beads is conducted to bring the structure into the original shape.

In this paper, a numerical approach using three-dimensional Finite Difference Method (FDM) in the transient temperature field is presented for evaluating the fundamental characteristics of cooling process of patch welding with curved beads. Arc welding is performed to verify the validity of the proposed numerical method by measuring the cooling process at the welding junction. In addition, the numerical results of temperature distributions on plate surface are also compared with those obtained by infrared thermography.

1. はじめに

アーク溶接は、構造物や機械部品の接合に広く用いられるが、欠陥やき裂の補修を目的として、溶接部の強度を補償するための実用的かつ有効な手段として用いられることがある。一般に欠陥を含む部分は、円形に取り除かれる。その後、穴を埋めるために同じ直径の板をはめ込み、構造物をもとの形に復旧するために溶接ビードの軌跡が曲線となる溶接が実施される。

そこで本研究では、曲線ビードにより施工されるはめ込み継手溶接の冷却過程を評価するために、非定常温度場における三次元差分法を用いた数値解析手法を提案する。さらに長丸形のはめ込み継手溶接についても、その冷却過程を評価することにより、

直線ビードと曲線ビードの冷却特性を比較検討する。数値解析手法の妥当性については、アーク溶接実験を実施して溶接ボンド部の冷却過程を測定することにより確認する。また、母材表面の温度分布については、赤外線熱画像装置により得られた結果と比較する。

2. はめ込み継手溶接について^{1)~4)}

はめ込み継手溶接は、図1に示すように欠陥が生じた部分を円形に除去し、その部分に同じ直径を有する円板を挿入して溶接する作業を指す。その際円板の直径は、作業性など種々の観点から通常8cm以上とされている。またはめ込み継手溶接は、工事用孔の塞ぎや配管孔の位置変更に伴う塞ぎ作業にも使われる。実際の作業では、円周に沿って1パスで溶接する方法と、円周を4あるいは6分割して溶接する対称法があるが、ここではもっとも基本的な施工形態である前者を解析の対象とした。

* 原稿受付 平成11年4月7日

** 正会員 神戸商船大学教授(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

*** 学生会員 神戸商船大学大学院(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

図1 はめ込み継手溶接について

3. 三次元差分法による解析

3.1 熱伝導関係式と解析モデル アーク溶接の溶接部の熱サイクルは、ビードの始末端部を除くと、アークの進行方向に溶接速度で移動する運動座標系を導入することにより、準定常温度場の問題として実用的な解が得られることはすでに示している⁵⁾。また、ビード始末端部の影響、あるいは溶着順序を変化させた場合の冷却過程については、三次元非定常温度場の問題として評価する手法を提案している⁶⁾。本研究で対象とするはめ込み継手溶接の熱サイクルは、三次元非定常温度場の問題となるので、以下の熱伝導方程式を基礎式として解析する。

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

さらに円形ビードを対象とする場合は、 r - θ - z の円筒座標系における基礎式を用いる。

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

式(1)、(2)において、 K は温度伝導率であり、母材の温度にかかわらず一定と仮定している。

$$K = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (3)$$

ここで λ は熱伝導率、 ρ は密度、 c は比熱である。この仮定は、溶接部の強度評価上もっとも重要であるボンド部の冷却過程については、熱定数の温度依存性を考慮せずに解析しても実用的な解が得られる

(a) 円形

図2 解析モデル

という従来の結果に基づいている⁵⁾。

図2は解析モデルの概略を示している。それぞれ円形、長丸形のはめ込み継手溶接を示している。解析を容易にするために、円形では円筒座標系、長丸形では円筒座標系と直角座標系を組み合わせモデル化する。また、母材の表面はすべて熱伝達境界であると仮定すると、 h 、 λ 、 T_∞ 、 ν をそれぞれ表面熱伝達率、母材の熱伝導率、周囲温度、対象とする面の外向き法線として、境界条件は一般形で以下のように表される。

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

λ の前の符号は対象とする表面における熱の流れ方向によって変化する。母材表面からの放熱効果については放射の影響も考えられるが、ここでは簡単のためにすべて式(4)で表されると仮定する。

3.2 差分表示⁸⁾ 本研究では、数値解析手法としては三次元差分法を用いる。差分法には前進差分、後進差分、中央差分などがあるが、熱伝導基礎式において温度の時間に関する微係数は前進差分

図3 差分格子番号

で表示し、温度の空間に関する微係数には中央差分を適用する。図3(a), (b)は、それぞれ直角座標系と円筒座標系における差分格子番号の付け方を示している。ここでは、中心となる格子点を0とし、図のように格子番号をつける。また各格子点での温度は T_0 , T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_a , T_b とし、添字により区別される。以上の定義にしたがって、直角座標系における基礎式である式(1)を差分表示すると以下ようになる。

$$T_0^{t+\Delta t} = \left[1 - 2\Delta t K \left(\frac{1}{\Delta x_1 \Delta x_2} + \frac{1}{\Delta y_1 \Delta y_2} + \frac{1}{\Delta z_1 \Delta z_2} \right) \right] T_0 + \frac{2K\Delta t}{(\Delta x_1 + \Delta x_2)\Delta x_1 \Delta x_2} (\Delta x_1 T_1 \Delta x_2 T_3) + \frac{2K\Delta t}{(\Delta y_1 + \Delta y_2)\Delta y_1 \Delta y_2} (\Delta y_1 T_2 \Delta y_2 T_4) + \frac{2K\Delta t}{(\Delta z_1 + \Delta z_2)\Delta z_1 \Delta z_2} (\Delta z_1 T_a \Delta z_2 T_b) \quad (5)$$

ここで Δt は時間増分を表しており、 T_0^* は $(t + \Delta t)$ 秒における中心点0での温度を示している。つぎに図3(b)に示した番号付けに従うと、円筒座標系における熱伝導基礎式は以下のように表される。

$$T_0^* = \left[1 - 2K\Delta t \left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{r_0^2 (\Delta \theta)^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \right] T_0 + \frac{K\Delta t}{\Delta r^2} (T_2 + T_4) + \frac{K\Delta t}{2r_0 \Delta r} (T_2 - T_4) + \frac{K\Delta t}{r_0^2 (\Delta \theta)^2} (T_1 + T_3) + \frac{K\Delta t}{\Delta z^2} (T_a + T_b) \quad (6)$$

また母材表面に対する計算式は、式(4)で表される境界条件を対象とする部分に応じて差分表示して、式(5)あるいは式(6)に組み込むことにより得られる。以上示した式より各格子点の温度を計算する場合、格子間隔の大きさと時間増分 Δt の間に、ある安定条件が存在する。すなわちこれらの値は、すべての差分表示式において各格子点の温度を表す T_0 , T_1 などの係数が正であるように選ばなければならない。その結果、もっとも厳しい制限は円筒座標系でモデル化した場合に現われ、次式で与えられる。

$$\Delta t \leq \frac{1}{2K \left[\left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{r_0^2 (\Delta \theta)^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) + \frac{h}{\lambda} \left(\frac{1}{\Delta z} + \frac{1}{\Delta r} + \frac{1}{2\Delta r_0} \right) \right]} \quad (7)$$

図4は、解析に用いた円形および長丸形に対する差分格子モデルである。

3.3 アーク熱による熱源の扱い方 アーク溶接において、アークを移動熱源と考えると母材に与えられる単位時間当たりの発熱量すなわち、溶接入熱は次のようになる。

$$Q_{net} = \eta \cdot V \cdot I \quad (8)$$

(a) 円形

(b) 長丸形

図4 差分格子モデル

表1 格子寸法について

	Δz	Δr	$\Delta \theta$	Δx	Δy
円形	1.5mm	2mm	0.0826rad	-	-
長丸形	1.5mm	2mm	0.0826rad	3.125mm	2mm

ただし、 Q は溶接総熱量[J/sec]、 V はアーク電圧[V]、 I はアーク電流[A]である。また η は溶接効率で、アーク溶接法の種類及びアーク長に依存するが、溶接電流にはあまり影響されない。一般に被覆アーク溶接の場合、溶接効率は約0.6～0.8位の値である。今回の実験では溶接ロボットを用いるので、溶接効率は0.8とする。さらに実際の解析では、母材に与えられる溶接入熱 Q_{net} を熱源を構成する格子点に均等に分配して与えた。したがって、ひとつの格子点に与えられる溶接入熱 q_{in} は、

$$\begin{aligned} q_{in} &= Q_{net} / n \\ &= \eta \cdot V \cdot I / n \end{aligned} \quad (9)$$

となる。ここで n は面熱源を構成する全格子点数であり25である。熱源は、ひとつの格子点に流入する熱量の対象となる面積 A で除して単位時間、単位面積あたりの熱量 q_{in}/A として扱う。面積 A は、直角座標系では $\Delta x \Delta y$ 、円筒座標系では $r_0 \Delta r \Delta \theta$ となる。本解析では、アークによる面熱源が母材上を溶接速度で移動する。この場合に熱源の下に存在する格子点に対する熱の与え方は、文献6に詳述しているので省略する。

解析は、以下の節の溶接実験と同じ条件で実施する。また、円形、長丸形のいずれのはめ込み継手溶接についても同じ溶接条件を設定した。すなわち、溶接電圧および溶接電流は、それぞれ24.4V、220A、溶接速度は40cm/minとし、冷却過程の評価の対象となるボンド部の深さは、予備実験による測定結果から2mmとした。また、円形および長丸形モデルの格子寸法を表1にまとめている。表1に示した格子寸法に対応して、式(7)に示した安定条件を満足する時間増分として $\Delta t=0.0008\text{sec}$ を用いた。

4 アーク溶接実験

実験は、一定溶接速度での曲線ビードに対応するために、溶接ロボットにより実施する。用いた溶接ロボットの仕様を表2に示す。図5は実験装置の概要を示している。溶接条件は、溶接電圧24.4V、溶接電流220A、炭酸ガス流量15ℓ/min、溶接速度40cm/min

である。試験片は厚さ9mm、一辺が125mmの正方形の軟鋼板を用いた。本研究では、はめ込み継手溶接を評価の対象としているが、実際のはめ込み部にはほとんどクリアランスがない点を考慮して、平板の上に円形のビード溶接を行った。なお、わずかなクリアランスが存在しても溶接部の熱サイクルに対してほとんど影響しないことは、薄板の突き合わせ溶接を扱った過去の研究⁹⁾で明らかにしている。また冷却サイクルの評価は、図6に示したボンド部の温度を測定することにより評価する。各溶接条件に対する溶け込み深さは、あらかじめ予備実験により測定し、その部分に熱電対をスポット溶接する。熱電対にはアルメル-クロメルを使用する。測定された熱起電力は、図5に示したオシログラフィクスレコーダーで記録し、その結果得られたボンド部の温度履歴を冷却曲線とした。さらに母材表面温度分布については、赤外線放射温度計を用いて測定した。表3に赤外線放射温度計の仕様を示している。温度分布は溶接終了2秒後に撮影した熱画像から評価する。

表2 溶接ロボットの仕様

項目	仕様
名称	アルメガム
形式	IRB-571
構造	垂直多関節形
軸数	6軸
位置繰返し精度	±0.1mm
駆動方式	ACサーボモータ
駆動容量	390W
溶接条件	溶接電流0.0～500A (1A単位)

図5 実験装置概要

図6 ボンド部温度の測定

表3 赤外線放射温度計の仕様

温度測定範囲	-20~2000℃ (3段階)
測定精度	読みとり値の±2% or ±2℃
温度に対する感度	0.1℃ (30℃にて)
検出波長帯	2~5μm (単素子)
赤外線検出器	MCT電子冷却方式, SRRITE
放射率補正	0.1~1.0 / 0.01ステップ
使用温度範囲	-15~55℃
画像出力	10, 128, 256色定量化表示
製品名 設備診断用携帯型熱画像計測装置 Model CPA-470PRO (株式会社 チノー)	

5 解析および実験結果

5.1 冷却サイクルの評価点について 図7は、冷却曲線および冷却速度の評価点を示している。円形ビードの場合は45度おきとし、溶接終了点については開始点の少し手前となる350度の位置で評価する。さらにビードの軌跡の中心点の表面温度も含めて、合計10箇所で冷却過程を評価する。長丸形ビードの場合、円形部分は円形ビードと同じ45度きざみで、さらに直線部分の中点と2つの円の中心点を加えて、合計14点で評価する。円形、長丸形とも開始点から1.2.3・・・と反時計回りに評価点の番号をつける。

5.2 温度分布図 図8, 9は、それぞれ円形、長丸形における母材表面温度分布の解析結果の一例を示している。いずれも溶接終了2秒後の温度分布を示している。また図10は、熱画像解析装置を用いて撮影した温度分布である。図8と図10より、解析結果と実験結果は定性的に一致しており、定量的にもかなり一致しているといえる。また、図9に示した長丸形では、円形ビードの場合ほど母材中心部の温度上昇が見られない。モデルの大きさの影響もあると考えられるが、長丸形ビードの冷却サイクルについては、円形ビードの場合ほど各部に与えたアーク熱が

図7 冷却サイクルの評価点

図8 母材表面温度分布 (円形ビード)

相互に影響しあうことはないと思われる。また溶接アークによる熱源が溶接終了点に近づく頃には、最初に溶接開始点に与えられた熱はかなり拡散しており、その影響による温度上昇は小さいと考えられる。

5.3 冷却曲線 本研究においては、溶接継手の強度に支配的な影響を持つボンド部の温度履歴を冷却曲線として、解析および実験の両面から評価する。図11は、円形ビードにおける実験結果と解析結果を比較したものである。溶接開始点の反対側であ

図9 母材表面温度分布（長丸形ビード）

図10 円形ビード熱画像

る $\theta = 180$ 度の位置におけるボンド部、および円の中心の表面温度の時間変化を示している。前者については、最高到達温度に関して両者の値に差が見られるが、継手強度に大きく影響する 1000°C 以下の冷却過程については、比較的よく一致している。またビードの中心点温度の解析および実験値はかなり近い値となっており、ここで提案した解析手法は妥当であると考えられる。また長丸形ビードについても、各部の冷却曲線に関して同様の傾向が得られている。

5.4 冷却速度 溶接部の冷却速度は、溶接部の材質変化を支配する重要な因子である。すなわち、冷却速度が高いほど溶接部が局部的に硬化するので、溶接部全体の強度は低くなる。したがって、冷却速度は一般に小さいほうが望ましい。そこで本研究では、ボンド部の冷却曲線について、鉄の A_1 変態点

図11 冷却曲線（円形ビード）

温度である 723°C における温度勾配を、冷却速度として定義して評価した。図12は、円形ビードについて解析結果と実験結果を比較したものである。横軸は、評価点の位置を角度で表示している。解析値と実験値を比較すると、溶接開始および終了点で実験値が少し高めで比較的隔たりが大きいのが、角度に対する冷却速度の変化の傾向はよく一致しているといえる。ここで、溶接開始点に近いはじめの2点は、ビード始端部であるので冷却速度が高いと思われる⁶⁾。また3点目から7点目までは、すでにアークが通過した部分からの熱を受ける影響により冷却速度が小さくなっていると推察される。これらの部分では、ビードの軌跡が円形であるためほぼ同じ冷却速度を示しているが、角度が大きくなるにしたがって、前の評価点に与えられた熱の影響が大きく現れるので、解析値、実験値とも冷却速度が少しずつ小さくなっている。8点目の冷却速度が低くなった原因としては、溶接開始点において与えた熱の影響が考えられる。

図12 冷却速度（円形ビード）

参 考 文 献

- 1) 中村：溶接技術, (1994-4), 170-175
- 2) 中村：溶接技術, (1996-2), 149
- 3) 中村：溶接技術, (1996-3), 107-108
- 4) Masubuchi, K.: Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, (1980), 201-208
- 5) 福岡, 福井：舶機誌, 23-5, (1988), 295-305
- 6) 福岡：舶機誌, 27-8, (1992), 563-569
- 7) 福岡, 中西：舶機誌, 33-10, (1998), 731-737
- 8) Croft, D.R and Lilley, D.G.: Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equations, (1977), Applied Science Publishers, 26-31
- 9) 福岡：舶機誌, 30-1, (1995), 49-55

図13 冷却速度（長丸形ビード）

図13は、長丸形の冷却速度の解析結果を示している。図より溶接開始点以外はほぼ40°C/sec程度の値を示しており、これは直線ビードの場合の冷却速度と似かよった値である。すなわち長丸形では、円形ビードと異なって、ある位置で与えた熱が他の位置のボンド部の熱サイクルにほとんど影響しないと考えられる。図8, 9に示した円形と長丸形の温度分布パターンは、このことを裏付けているといえる。

6. 結 言

補修溶接の代表的な手法であるはめ込み継手溶接の冷却過程について、数値解析ならびにアーク溶接実験により検討した結果、以下に示す結論を得た。

1. はめ込み継手溶接におけるボンド部の冷却特性を、三次元差分法を用いて非定常温度場の問題として解析する手法を提案した。
2. はめ込み継手溶接として、ビードの軌跡が円形と長丸形の場合を対象とし、ボンド部の冷却曲線および冷却速度を評価した。
3. 数値解析およびアーク溶接実験から、曲線ビードにおける特徴的な温度分布パターンと冷却特性を明らかにした。
4. ボンド部の冷却速度について解析値と実験値を比較した結果、両者の値はビード始末端部を除いて実用的な範囲で一致した。

おわりに、本研究を遂行するにあたり、アーク溶接実験でご協力いただいた本学海洋電子機械工学課程4年長尾幸弘君に謝意を表します。

~~~~~ メッセージ ~~~~~

福岡 俊道

中西 彩

アーク溶接の主要な目的は構造物の接合ですが、欠陥部の補修を目的として使用される場合もあります。そのひとつの方法として、欠陥部分を円形に取り除いて同じ直径の円板をはめ込むという作業が実施されています。その場合、ビードの形状は円形となり、通常の直線ビードと異なって溶接アークから与えられた熱が相互に影響しあう可能性があります。本研究では、そのようなはめ込み溶接継手の熱サイクルに着目し、その特徴的な冷却特性を明らかにすることを目的としております。冷却過程の測定実験では、従来から用いている熱電対に加えて、サーモグラフィーを使用し、比較的満足のいく結果が得られました。

最近炭素鋼を対象としたアーク溶接に関する研究は少ないようですが、実際の施工レベルで考えるとまだまだ問題点が多いようです。今後とも実際の溶接加工に少しでも役立つような研究を積み上げていきたいと考えております。