重ね MAG 溶接のモデル開発*

－移動不等間隔メッシュモデルの提案－

若松 次男**, 松井 仁志***, 宮坂 史和****, 明石 晴人*****, 黄地 尚義*****

Numerical Modeling of Lap-Joint MAG Welding*

－A proposal of moving non-uniform mesh model－

by WAKAMATSU Tsugio**, MATSUI Hitoshi***, MIYASAKA Fumikazu****,
AKASHI Haruhito***** and OHJI Takayoshi*****

One of the important problems in the welding engineering is to construct a numerical model for the computer simulation of actual welding processes. Lap joints have been widely used for the welding of thin plates in the manufacturing processes in motor industry. In the present paper, a numerical model for lap-joint MAG (Metal Active Gas) welding has been developed to make clear the influence of various parameters on the welding phenomena. In the model, the transient temperature distribution in the base metal is numerically calculated, based on the heat flow equation, and the theoretical configuration of the molten pool is analyzed on the basis of the calculus of variations, where a finite difference model with non-uniform mesh is applied to reduce CPU time. As a result, the calculating time in numerical simulations with the present model is shorter than 1/10 of the one by the model with uniform mesh. To evaluate the validity of the present model, the numerical results are compared with the experimental ones and good agreement between calculations and experiments are demonstrated. Accordingly it is concluded that the model developed in the present work is useful in the welding engineering.

Key Words: MAG welding, Lap-joint welding, Thin plate, Simulation, Non-stationary model, Moving non-uniform mesh

1. 緒 言

MAG (Metal Active Gas) 溶接法は、広く使われている溶接法である。MAG 溶接で高能率な溶接を実現するには最適な溶接パラメータの設定が必要不可欠である。しかし、実験的に最適なパラメータを求めるには多大な時間とコストを要する。したがって、信頼できる溶接シミュレーションモデルの構築は、溶接工学における重要な課題の一つとなっている。

これに対し、これまでも TIG 溶接と MAG 溶接に関する数値計算モデルが構築されてきた。Pardo と Weckman¹⁾ は、メッシュに移動座標フレームを適用した有限要素法による溶融池形状予測モデルを構築した。また、Dilthey と

Roosen^{2, 3)} は、3次元熱伝導モデルを構築し、このモデルを利用した溶接のシミュレーションソフトウェア MAGSIM とその拡張版である MAGSIM2 を開発している。このソフトでは継手形式、溶接姿勢、シールドガスなど、各種溶接条件の影響がシミュレート可能である。

しかしながら、溶接は複雑な現象であるため、未解決の問題が残されている。たとえば、これまで述べてきた例では、準定常熱伝導モデルを用いている。しかし、実際の MAG 溶接プロセスは、極めて不規則である。このため、準定常モデルは、限られた条件の下でしか適用できない。例えば、溶接の始・終端部の予測や、多層溶接への適用、さらにはアンダーカット、ハンピングなど、典型的な溶接プロセスには適用できない。

このような観点から、我々は、非定常の MAG 溶接モデルに注目して検討をすすめている。すでに報告⁴⁻⁸⁾ したように、これまでに開発した、突合せと T 型継手に関するモデルは、製造環境での MAG 溶接プロセスをシミュレートする強力なツールとして期待されている。

これに次ぐものとして、本研究では、薄板の重ね継手の MAG 溶接モデルを構築することを目標としている。いうまでもなく、重ね溶接は、自動車の製造プロセスにおいて重要である。

なお、非定常の計算モデルにおいては、準定常の場合に比べ、演算に多大な時間を要するという欠点がある。したがって、本研究では、この欠点を克服するため、移動不等

*受付日	平成19年3月16日	受理日	平成19年7月18日
	平成18年11月	International Institute of Welding Congress	で発表
**正 員	(株)ダイフクソフトウェア開発 Member, Daifuku Software Development Co., Ltd.		
***正 員	(株)トヨタ自動車 Member, Fundamental Production Engineering Division, Toyota Motor Corporation		
****正 員	大阪大学工学研究科知能・機能創成工学専攻 Member, Department of Adaptive Machine Systems, Osaka University		
*****正 員	(株)アルベック Member, Alvec Co., Ltd.		
*****正 員	(株)バーチャルワールド Member, Virtual Weld Co., Ltd.		

間隔メッシュを用いた計算手法を提案・検討している。

2. 移動不等間隔メッシュを用いた重ね MAG 溶接モデル

MAG 溶接プロセスの数値計算モデルを単純にするため次の2点を仮定する。

- (1) 溶融池内においても熱の流れは、熱伝導方程式に従う。
- (2) 溶融池に作用する力は、重力、表面張力、アーク圧力のみである。

上記の仮定の基で次の支配方程式を解く。

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

$$\sigma \left(\frac{(1+\phi_x^2)\phi_{xx} - 2\phi_x\phi_y\phi_{xy} + (1+\phi_y^2)\phi_{yy}}{(1+\phi_x^2+\phi_y^2)^{\frac{3}{2}}} \right) = \rho \vec{g} \cdot \vec{p} + P_a - \lambda \quad (2)$$

ここで、 ρ ：密度 (kg/m³)、 H ：エンタルピー (J/kg)、 K ：熱伝導率 (J/m・s・K)、 T ：温度 (K)、 σ ：表面張力 (N/m)、 ϕ ：表面変位 (m)、 $\vec{g}$ ：重力ベクトル、 $\vec{p}$ ：位置ベクトル、 P_a ：アーク圧力 (N/m²)、 λ ：ラグランジュ乗数、etc.

構築したモデルでは、支配方程式 (1)、(2) を、有限差分法を用いて解いている。支配方程式 (1) を解くために各格子点はエンタルピーの値を保持している⁹⁾。上記の仮定に加え、入熱分布とアーク圧力分布は円状均一と仮定している (Fig. 1)。

入熱は、次の境界条件で表される。

$$q_{arc} = \frac{Q_{arc}}{S} = -K \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3)$$

ここで、 q_{arc} ：単位時間単位面積あたりの入熱量 (J/m²・s)、 Q_{arc} ：単位時間あたりの総入熱量 (J/s)、 S ：入熱面積 (m²)、 K ：熱伝導率 (J/m・s・K)、 T ：温度 (K)。

なお、入熱部以外の境界は、すべて断熱としている。

S. Kou¹⁰⁾は準定常熱伝導モデルに不等間隔メッシュを適用した。本論文では、非定常熱伝導モデルに不等間隔メシ

Fig. 1 Heat input and arc pressure on molten pool

Fig. 2 Moving non-uniform mesh

Fig. 3 Process of MAG arc welding

ュを適用している。不等間隔メッシュは次のように構成する。まず最小格子間隔を決定し、熱源近傍の一定の範囲を最小格子間隔で切る。その外で格子間隔を倍にして一定の間隔数で格子間隔を段階的に倍々にしていく。この不等間隔メッシュの構成は、熱源が移動する毎に行う。Fig. 2は不等間隔メッシュの構成例である。熱源の移動により新たに現れる格子の初期条件はエンタルピーを線形補間して与えている。実際の計算では最小格子間隔を0.4mmとし、熱源を中心に6mm以内の領域を最小格子間隔で格子を切り、その外で5つごとに格子間隔を倍々にしていった。

実際の計算に際しては、方程式 (1) を母材温度分布の推定に、方程式 (2) を溶融池表面形状の推定に用いている。具体的な計算の流れを Fig. 3^{4-7, 9)}に示す。図は、単位時間ステップにおける計算手順を示している。まず、トーチ位置を固定する (Fig. 3 (a))。この状態で母材への入熱を行う (b)。次いで、この時間ステップで溶けたワイヤを溶融池に追加 (c) し、表面形状を、方程式 (2) を用いて計算 (d) し、1ステップの計算が終了する。次に、トーチを移動させ、次のステップの計算を同じように繰り返す。

3. 解析結果と考察

3.1 解析結果

ここでは、計算例をもとに、不等間隔メッシュを用いた

モデルの計算精度と計算速度について検討する。

具体的には、Fig. 4 のようにサイズが $100\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ の軟鋼の薄板2枚を、重ね幅 10 mm で重ね溶接するものとして数値計算を行った。計算結果(温度)を評価する点として、Fig. 5 のように、溶接線上から 5 mm 離れた上板表面の3点と溶接線より上板側に 1 mm の1点を設定している。

なお、計算には Table 1⁹⁾の物性値を用いた。

Fig. 4 Work piece used in the experiment

Fig. 5 Check points of temperature

Table 1 Thermophysical properties used for calculation

	Mild Steel
Melting point T_m (K)	1808
Latent heat L (kJ kg ⁻¹)	2.72×10^2
Specific heat c (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	775
Density ρ (kg m ⁻³)	$273 \leq T \leq 1808$ $-0.36T + 7.95 \times 10^3$ $1808 \leq T$ 7300
Thermal conductivity K (J m ⁻¹ s ⁻¹ K ⁻¹)	$273 \leq T \leq 1173$ $2.19 \times 10^{-5} T^2 - 8.53 \times 10^{-2} T + 97.0$ $273 \leq T \leq 1850$ 27 $1850 \leq T \leq 3000$ $27.0 - 7.1018 \times 10^{-6} \times (T-1850) \times (T-1850) \times (T-3575)$ $3000 \leq T$ 81
Surface tension σ (N/m)	1.0

Fig. 6 Comparison of the temperature history at points ① - ③

Fig. 7 Comparison of the temperature history on welding line (point ④)

Fig. 6, Fig. 7 は等間隔メッシュと不等間隔メッシュを用いたモデルでのそれぞれの計算結果をグラフにして比較したものである。なお、グラフ中の①～④は、それぞれ Fig. 5 の①～④に対応しており、温度の比較位置を示している。図から、両者は、良い一致を示していると言える。実際、Fig. 5 の①～④における数値上の温度比較でも最大で $\pm 2.5\%$ の誤差で一致している。このことからアーク溶接を対象に筆者らが採用した不等間隔メッシュモデルは、従来の等間隔メッシュモデルと同程度に信頼できるといえる。

次に、不等間隔メッシュモデルの計算速度について検討するため、計算に要した時間を等間隔メッシュと不等間隔メッシュとの間で比較した。なお、計算に用いた母材は、板厚 2 mm の軟鋼の薄板とした。また、母材の長さを $l_p\text{ mm}$ とした場合、母材の幅をその半分 ($l_p/2\text{ mm}$) とし、この板二枚を、重ね幅 10 mm で重ね溶接するものとした。溶接条件は、溶接電流 $I=180\text{ A}$ 、溶接電圧 $V=25\text{ V}$ 、溶接速度 $v=80\text{ cm/min}$ 、入熱半径 $R_q=4\text{ mm}$ 、熱効率 $\eta=90\%$ とした。

計算時間に関して、Fig. 8 のように、不等間隔メッシュを用いたモデルでは、等間隔メッシュを用いたモデルに比べ、数倍から数十倍の高速化が可能である。当然のことながら、母材のサイズが大きくなるほど、このモデルは効果的に働く。たとえば、母材の長さが 500 mm の場合には、計算時間が、 $1/40$ に短縮されている。

Fig. 8 Comparison of calculation time between non-uniform mesh and uniform mesh models

Fig. 9 Comparison of mesh point number between non-uniform mesh and uniform mesh models

Fig. 10 Influence of arc pressure on weld bead profile in lap-joint welding ($I = 190\text{A}$, $V = 30\text{V}$, $v = 80\text{cm/min}$, $\eta = 90\%$, $R_q = 4\text{mm}$)

Fig. 9 は、参考までに示したもので、両モデルのメッシュ数を比較している。不等間隔メッシュモデルでは、母材が大きくなるにつれて、計算に要するメッシュ数が大幅に低減できるので、これまでメモリ容量の関係から計算できなかった大きな母材の計算も可能となる。

Fig. 10 は、モデルによる計算例で、ビードの形成に及ぼすアーク圧力の影響を示している。計算に用いたパラメータは、図中に記した通りであるが、各図の下に示すように、アーク圧力 P_a とその半径 R_p を変化させている。Fig. 10 (a), (b), (c) の比較により、溶接ビードの形成におけるアーク圧力の影響が、明瞭に観察される。(a) では、アーク圧力により溶融金属が溶融池後方に押し出される結果、アンダーカットが発生しているが、(b) では、アーク圧力がかかっていないためアンダーカットは見られず、また溶け込みも浅くなっている。(c) では (a) と比較してアーク圧力は等しいが、アーク圧力の影響範囲が大きくなっているため、アンダー

カットがより顕著なビードが形成されている。

3.2 実験結果と計算結果の比較

ここでは、モデルの妥当性を評価するため、実験結果と計算結果を比較した結果について述べる。

Fig. 11 は、実験で採用した母材とトーチ狙い位置を示し

Fig. 11 Electrode location

Table 2 Process parameters

No	Arc Position	Torch Angle (deg)	Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (cm/min)
1	Position1	60°	180	25	80
2	Position2	60°	170	25.5	80
3	Position3	60°	190	30	80
4	Position1	45°	185	25	80

No	Bead cross section	
	Experimental results	Calculated results
1		
2		
3		
4		

* $\eta = 90\%$, $R_q = 4\text{mm}$, $P_a=900\text{Pa}$, $R_p=4\text{mm}$

Fig. 12 Comparison between experiments and calculations

ている。Table 2 は実験に用いたプロセスパラメータである。Fig. 12 に実験と計算の比較結果を示す。なお、計算に用いたパラメータは、いずれの場合もアーク圧力 $P_a = 900 \text{ Pa}$ 、アーク圧力半径 $R_p = 4 \text{ mm}$ である。

図から、ビード形状に関する限り、計算結果と実験結果は、定性的には、よく一致していると言える。しかしながら、ルート位置での溶込みは、実験結果の方が計算結果より深くなっている。これは、計算に用いたアーク圧力分布に一因があるものと考えているが、今後、さらに検討を進める予定である。

4. 結 言

本研究では、重ね継手の MAG アーク溶接に関する 3 次元非定常数値計算モデルを構築した。このモデルでは、数値計算の高速化を目的とし、差分格子として移動不等間隔メッシュを採用した。

提案したモデルが、数値計算の高速化に有効であること、また、実験との比較において、モデルによる計算結果が、ほぼ満足すべきものであること、を示した。

謝 辞

本研究は、知的基盤創成・利用推進研究開発事業制度の一環として、NEDO から委託された「溶接設計支援システム用データベース構築の調査研究及び研究開発等」の成果です。

参 考 文 献

- 1) E. Pardo and D. C. Weckman, Prediction of Weld Pool and Reinforcement Dimensions of GMA Welds Using a Finite-Element Model, Metallurgical Transactions B, 1989, Vol.20B, pp.937-947.
- 2) U. Dilthey and S. Roosen: Proc. Int. Symp. on Theoretical prediction in joining and welding, Osaka, Japan, Joining and Welding Research Institute of Osaka University, 1996, pp.133-154.
- 3) U. Dilthey and W. Sudnik, O. Mokrow and G. Habedank: MAGSIM for Windows: GMA pulse welding of fillet welds, Computer Technology in Welding, Liverpool, UK, Abington Publishing, 1998, pp.203-215.
- 4) T. Ohji, Y. Tsuji, F. Miyasaka, et al.: Materials Science and Technology, 2001, Vol.17, pp.167-168.
- 5) T. Yamamoto, T. Ohji and F. Miyasaka: Mathematical modeling of metal active gas arc welding, Science and Technology of Welding and Joining, 2002, Vol.7, No.4, pp.260-264.
- 6) T. Yamamoto, T. Ohji, Y. Tsuji and F. Miyasaka: Mathematical Modeling of Weld Phenomena6, H. Cerjak and H.K.D.H Bhadashia eds, Institute of Materials, 2003, pp.193-201.
- 7) T. Ohji, F. Miyasaka, T. Yamamoto and Y. Tsuji: Mathematical Model for MAG Welding in a Manufacturing Environment, Proceedings of Second International Conference, 2004, pp.205-209.
- 8) F. Miyasaka, Y. Yamane and T. Ohji: Development of Circumferential TIG Welding Process Model- A Simulation Model for Welding of Pipe and Plate, Science and Technology of Welding and Joining, 2005, Vol.10, No.5, pp.521-527.
- 9) 山本剛史, MAG 溶接プロセスモデルの開発とそのソフトウェア化, 大阪大学学位論文, (2004).
- 10) S. Kou, T. Kanevsky and S. Fyfe: Welding Thin Plates of Aluminum Alloys - A Quantitative Heat-Flow Analysis, Welding Journal 1982, Vol.61, No.6, pp.175-181