軟鋼／アルミニウム合金異材抵抗スポット溶接におけるナゲット形成過程の 3次元粒子法シミュレーションおよび金属間化合物の厚さの推定*

築地慎乃輔**, 茂田 正哉***, 古免 久弥****, 田中 学****

Particle simulation of nugget formation process during steel/aluminum alloy dissimilar resistance spot welding
and thickness estimation of intermetallic compounds*

by CHIKUCHI Shinnosuke**, SHIGETA Masaya***, KOMEN Hisaya****, TANAKA Manabu****

A steel/aluminum alloy dissimilar resistance spot welding process was simulated by a three-dimensional smoothed particle hydrodynamics method. Furthermore, the time dependent increase of the intermetallic compound thickness on the joining interface was estimated using the numerical data of the temperature history obtained by the simulation. As a result, the steel sheet started to melt from the center of the sheet in the thickness direction and formed a nugget, while the aluminum alloy sheet started to melt from the joining interface and formed a nugget. The convection in the molten aluminum alloy caused by the electromagnetic force promoted the heat transfer at the solid-liquid interface because the temperature gradient become steeper due to the conduction, whereas the temperature near the nugget center decreased. Moreover, the numerical estimation indicated that the intermetallic compound layer was thicker near the center of the joining interface and thinner toward its edge. The maximum thickness was estimated to be approximately 1 μm , which was the same order of magnitude as the experimentally obtained value. These results support the validity of the computational model developed in this study for simulating the nugget formation process during dissimilar resistance spot welding and estimating the intermetallic compound thickness.

Key Words: Resistance spot welding, Dissimilar materials, Particle method, Simulation, Intermetallic compound

1. 緒 言

抵抗スポット溶接は重ねた被溶接材料を電極で挟み込み、加圧しながら通電することで、Joule 発熱によって被溶接材料間に熔融部（ナゲット）を形成して材料の接合を行う溶接法である。抵抗スポット溶接は他の溶接手法に比べて溶接時間が短く、自動化が容易であることから、自動車や鉄道車両、電化製品などの大量生産技術に広く用いられている。特に自動車車体の組立てには3,000 から6,000 箇所の接合部分に対して抵抗スポット溶接が用いられている¹⁾。また、近年では環境対策や自動車の電動化に伴って車体の軽量化の要求が高まっていることから、鋼と軽量金属材料であるアルミニウム合金との異材抵抗スポット溶接技術の確立が急務とされている^{2,3)}。しかしながら、鋼とアルミニウム合金を溶接すると、接合界面に脆弱な金属間化合物（IMC: Intermetallic compound）の層が形成されて継手強度が低下することが知られている³⁾。これを防ぐため、鋼とアルミニウ

ム合金の異材抵抗スポット溶接において接合界面に形成される金属間化合物層の制御に関する研究が進められている。

武田ら⁴⁾は電極の先端形状やアルミニウム合金の板厚を変更したいくつかの条件で異材抵抗スポット溶接を行い、それぞれの条件における接合界面反応層と継手強度の関係を調査した。その結果、電極径が大きく、アルミニウム合金の板厚が大きい溶接条件では約1 μm のFe-Al系金属間化合物が広範囲に形成されることを明らかにした。また、このように約1 μm の金属間化合物が形成されるときに、他の溶接条件に比べて継手強度が高くなることを示した。宮本ら⁵⁾は亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金を抵抗スポット溶接した際に生じるAl-Zn共晶反応に着目して実験を行った。その結果、Al-Znの共晶反応によってアルミニウム合金表面の酸化皮膜が共晶融液に包まれて接合部周囲に排出され、薄く均一なFe-Al金属間化合物の形成が可能であることを接合界面観察から明らかにした。Wanら⁶⁾は鋼とアルミニウム合金を抵抗スポット溶接で接合した後の継手断面の観察結果から、鋼に隣接した Fe_2Al_3 とアルミニウム合金に隣接した FeAl_3 からなる金属間化合物が接合界面の中央部に形成されており、アルミニウム合金が溶融していない中央部から離れた位置においては FeAl_3 とAlの混合物からなる層が形成されていることを明らかにした。またシミュレーションによる界面の温度履歴に基づき、異なる溶接条件を設定した際に形成される金属間化合物層の厚さ分布を予測した。その

*受付日 2021年6月25日 受理日 2021年11月22日

**学生員 大阪大学接合科学研究所 Student member, Joining and Welding Research Institute, Osaka Univ.

***正 員 大阪大学接合科学研究所（現在 東北大学大学院工学研究科） Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka Univ. (Present Address: Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.)

****正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka Univ.

結果、溶接時間が長い場合、金属間化合物の厚さ分布に二峰性が見られることを示した。

一方で、数値計算を用いた抵抗スポット溶接中のナゲット形成過程や異材抵抗スポット溶接中の金属間化合物成長の予測に関する研究も行われている。二保ら⁷⁾は抵抗スポット溶接時に生じる弾塑性接触－電流－熱伝導3連成現象の解析方法を総合的に評価した数値解析モデルを開発した。このモデルの解析結果から得られたナゲット径は、実験から得られた溶接部切断面のナゲット径とよく一致した。Wangら²⁾は有限要素法を用いて、鋼とアルミニウム合金との抵抗スポット溶接中の電流－温度－応力解析を行う連成解析モデルを開発した。このモデルを用いることで接界面の熱履歴から金属間化合物の厚さを予測しており、得られた計算結果は同条件における実験結果とよく一致した。

このように異材抵抗スポット溶接における金属間化合物の制御については、適切な溶接条件の報告や、数値シミュレーションから得られた温度履歴から金属間化合物の厚さを推定した報告がなされている。しかしながらこれらの研究では、溶融金属の流動に伴う対流熱輸送による温度場の変化が考慮されていない。抵抗スポット溶接に用いられる溶接電流は数 kA 以上の大電流であることから、溶融金属には強い電磁気力が作用する。そのため、溶接時間が短いとはいえずナゲット内部で強制対流が生じると考えられる。対流はそれ自身が保有する熱エネルギーを輸送する。伝導によってのみ熱エネルギーが輸送される場合と比べて、対流と伝導によって同時に熱エネルギーが輸送される場合には、溶融界面に伝達される熱量が大きくなり、溶融が促進される。異材接触界面においても同様で、プロセス中の温度が異なる履歴をたどることが予想される。したがって、より正確に金属間化合物の厚さを予測するためには、従来の連成解析に加えて被溶接材料内の溶融金属の流れも同時に解くことができる計算モデルを構築し、対流熱輸送を考慮したナゲット形成過程をシミュレートする必要がある。

そこで本研究では、軟鋼とアルミニウム合金の異材抵抗スポット溶接を対象とし、対流熱輸送を考慮した溶融・凝固過程のモデル化を粒子法の一つである非圧縮性 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法^{8,9)}を用いて行う。そしてこのモデルを用いたシミュレーションによって接界面の温度履歴を取得し、その結果から金属間化合物層の厚さの推定を行うことを目的とする。

2. 計算モデル

2.1 支配方程式

本研究で計算手法として用いる粒子法は、レーザ溶接やティグ溶接やミグ溶接の溶融池対流現象¹⁰⁻¹³⁾、ミグ溶接やフラックスコールドアーク溶接の溶滴移行現象^{14,15)}、サブマージアーク溶接現象¹⁶⁾などの溶接・接合分野においても応用されており¹⁷⁻²¹⁾、抵抗スポット溶接時のナゲット内部の溶融

金属の流れをシミュレートする上で有効な手段であると考えられる。非圧縮性流れに対する Lagrange 形式の運動方程式は SPH 法の離散化手法に基づいて離散化された場合、式 (1) のように表すことができる。

$$\frac{D\vec{u}_a}{Dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{p_a}{\rho_a^2} + \frac{p_b}{\rho_b^2} \right) \nabla_a W_{ab} + \frac{2d}{\rho_a \sum_b |\vec{r}_{ab}|^2 W_{ab}} \sum_b \frac{\eta_a + \eta_b}{2} (\vec{u}_b - \vec{u}_a) W_{ab} + \frac{\vec{j}_a \times \vec{B}_a}{\rho_a} \quad (1)$$

a, b は粒子を表し、 $\vec{u}$ は速度ベクトル、 t は時間、 m は質量、 p は圧力、 ρ は密度、 W はカーネル関数、 d は次元数、 $\vec{r}$ は相対位置ベクトル、 η は粘性係数、 $\vec{j}$ は電流密度ベクトル、 $\vec{B}$ は磁束密度ベクトルである。式 (1) において、右辺の各項は圧力勾配、粘性力、電磁気力を表している。本研究では非圧縮性流れである溶融金属の挙動を大きな時間刻みで解くため、非圧縮性近似手法⁹⁾を採用している。

粒子の温度は式 (2) に示すエネルギー輸送方程式から求めることができる。

$$\frac{DT_a}{Dt} = \frac{2d}{\rho_a C_a \sum_b |\vec{r}_{ab}|^2 W_{ab}} \sum_b \frac{\kappa_a + \kappa_b}{2} (T_b - T_a) W_{ab} + \frac{|\vec{j}_a|^2}{\rho_a C_a \sigma_a} + \frac{R_c |\vec{j}_a|^2 S_a}{\rho_a C_a V_a} \quad (2)$$

T は粒子の温度、 C は比熱、 κ は熱伝導率、 σ は電気伝導度、 R_c は接触電気抵抗であり、 S_a, V_a は粒子の断面積および体積を表している。式 (2) の右辺の各項は熱伝導、Joule 発熱および接触抵抗による発熱を示している。電流密度は次式の電流保存則と Ohm の法則から求められる。

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0 \quad (3)$$

$$\vec{j} = -\sigma \nabla \phi \quad (4)$$

ここで ϕ は電位である。この式 (4) を式 (3) に代入し、MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法²²⁾の離散化手法で離散化すると次式のように書き表せる。

$$\frac{2d}{\sum_b |\vec{r}_{ab}|^2 W_{ab}} \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} \frac{2\sigma_a \sigma_b}{\sigma_a + \sigma_b} (\phi_b - \phi_a) W_{ab} = 0 \quad (5)$$

この式 (5) の残差の全粒子の合計が被溶接材料全体を流れる電流値の 1% 以下となるまで、式 (6) を用いて粒子の電位を繰り返し更新する。

$$\phi_a^{n+1} = \frac{\sum_b \sigma_b \phi_b^n W_{ab}}{\sum_b \sigma_b W_{ab}} \quad (6)$$

n は繰返し回数である。この収束計算から求めた電位と式 (4) を用いることで、各粒子の位置における電流密度を求めることができる。また磁束密度は式 (7) および式 (8) から求められる。

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (7)$$

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 \vec{j} \quad (8)$$

ここで A はベクトルポテンシャル, μ_0 は真空の透磁率である. MPS 法の離散化手法を適用することで, 式 (8) は次式のように離散化される.

$$\frac{2d}{\sum_b |\vec{r}_{ab}|^2 W_{ab}} \sum_b (\vec{A}_b - \vec{A}_a) W_{ab} = -\mu_0 \vec{j}(\vec{r}=\vec{r}_a) \quad (9)$$

この式 (9) を変形した式 (10) を用いて, 位置 $\vec{r} = \vec{r}_a$ に存在する粒子 a のベクトルポテンシャルを繰り返し更新する.

$$\vec{A}_a^{n+1} = \frac{\sum_b \vec{A}_b^n W_{ab} + \frac{\sum_b |\vec{r}_{ab}|^2 W_{ab}}{2d} \mu_0 \vec{j}(\vec{r}=\vec{r}_a)}{\sum_b W_{ab}} \quad (10)$$

本研究ではアルミニウム合金の融点 (880 K) より高い温度域で形成される Fe_2Al_3 が金属間化合物層として成長すると仮定し, その厚さ方向の形成は式 (11) と式 (12) に示す放物線則に従うものとする²⁾.

$$Z_{\vec{r}_i} = \sqrt{2k_{\vec{r}_i} t_s} \quad (11)$$

$$k_{\vec{r}_i} = k_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT_{\vec{r}_i}}\right) \quad (12)$$

$Z_{\vec{r}_i}$ は接合界面における位置 $\vec{r}_i$ の金属間化合物層の厚さ, k は反応速度定数, t_s は反応時間であり, k_0 は頻度因子, Q は活性化エネルギー, R は気体定数, $T_{\vec{r}_i}$ は接合界面における位置 $\vec{r}_i$ の温度である. 頻度因子 k_0 は $3.79 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 活性化エネルギー Q は 120 kJ/mol を与える²⁾. 金属間化合物の厚みの増加量は, 式 (12) を代入した式 (11) を微分することで得られる式 (13) によって求められる.

$$dZ_{\vec{r}_i} = \sqrt{\frac{k_0}{2t_s} \exp\left(-\frac{Q}{RT_{\vec{r}_i}}\right)} dt \quad (13)$$

$dZ_{\vec{r}_i}$ は微小時間 dt における位置 $\vec{r}_i$ の金属間化合物層の厚みの増加量である. この $dZ_{\vec{r}_i}$ を計算開始から任意の時刻まで積分することで, その時刻の位置 $\vec{r}$ における金属間化合物層の厚みが得られる.

2.2 計算領域および計算条件

Fig. 1 は計算領域であり, 黒色の領域は電極, 濃灰色の領域は軟鋼, 淡灰色の領域はアルミニウム合金を示している. 計算領域は 3 次元とし, デカルト座標系を設定する. 軟鋼とアルミニウム合金の接触面は $z = 1.9 \text{ mm}$ に位置する. 電極および被溶接材料は直径 0.1 mm の計算粒子 119,496 個によって構成されている. Table 1 は本計算における計算条件である. 密度, 比熱, 熱伝導率は軟鋼と 5000 系アルミニウ

Table 1 Material properties

	Mild steel	Aluminum alloy
Density	7860 kg/m ³	2700 kg/m ³
Specific heat	523 J/(kg·K)	900 J/(kg·K)
Thermal conductivity	57.8 W/(m·K)	138 W/(m·K)
Viscosity	$7.8 \times 10^{-3} \text{ kg/m/s}$	$2.7 \times 10^{-3} \text{ kg/m/s}$
Latent heat	250 kJ/kg	400 kJ/kg
Melting point	1700 K	880 K
Electrical conductivity	$1.0 \times 10^6 \text{ S/m}$	$2.0 \times 10^6 \text{ S/m}$

Fig. 1 Computational domain

ム合金を想定し, 共に 300 K での値を与える^{23,24)}. 軟鋼の溶融潜熱は 250 kJ/kg , アルミニウム合金の溶融潜熱は 400 kJ/kg を与え, 融点に達した粒子は, 溶融潜熱の半分のエネルギーを受け取った時点で相変化が起こるものとする²⁵⁾. また軟鋼の電気伝導率は $1.0 \times 10^6 \text{ S/m}$ とし, アルミニウム合金の電気伝導率は $2.0 \times 10^6 \text{ S/m}$ とする. 簡単のため, 電極の温度は水冷されているとして 300 K に固定し, 電極が被溶接材料に接触する面は平面形状とする. 実際は電極の温度上昇が存在すると考えられるが, 本計算は物性値の温度依存性を考慮していないため, 電流経路等に与える影響は小さいとする. 各電極の持つ電位は, z 軸方向に見て被溶接材料の上にある上部電極の電位を 1.5 V , 下にある下部電極の電位を 0 V と固定する. 本研究では計算の時間刻みを 0.05 ms と設定して 100 ms 間計算を行い, 通電は計算開始と共に行う. 計算時間の内訳は通電時間が 40 ms , 実施工における加圧保持時間と冷却時間を想定した無通電時間が 60 ms である.

本研究における計算の仮定を以下に示す. 本研究では簡単のため, 電極による被溶接材料の加圧は考慮せず, 固体の領域は変形しないものと仮定する. 電極間を電流が流れることによって発生する Joule 発熱は被溶接材料全体で考慮する. 接触電気抵抗は Babu ら²⁶⁾ のモデルを用いて値を算出し, 固体の被溶接材料同士が接触している領域のみで発熱が生じるとする. また被溶接材料と電極の接触面における発熱は考慮しないものとする.

3. 計算結果および考察

3.1 異材抵抗スポット溶接中のナゲット形成過程

Fig.2は通電開始からナゲットが形成される過程と通電終了後のナゲットの冷却過程であり、電極中心軸を通るxz断面での各時刻の(i)粒子状態分布、(ii)温度分布を示している。ここで粒子状態分布中の各粒子の色は、黒色が電極、濃灰色が固体の軟鋼、淡灰色が固体のアルミニウム合金、赤色が溶融した軟鋼、青色が溶融したアルミニウム合金を表している。他方、温度分布では粒子はその温度に応じて青か

ら赤に色づけられている。

通電開始後、Joule発熱や接触抵抗による発熱が生じることで接合界面では温度が上昇し、アルミニウム合金が先行して溶融する。一方軟鋼は、板厚方向中央部付近で溶融が開始する (Fig.2(a))。その後、時間経過に伴ってアルミニウム合金は接合界面で溶融領域が大きくなり、ナゲットは板厚方向に成長する。これに対し軟鋼のナゲットは板厚方向中央部から楕円球状に拡大していく (Fig.2(b))。これは、軟鋼側の接合界面では、発生した熱エネルギーが熱伝導によってアルミニウム合金側へ輸送されるためである。また温度分布に注目すると、軟鋼の板厚方向中央部付近では

Fig.2 Computational results of nugget formation

Fig.3 Velocity distribution of xz cross-section

Joule 発熱によって 1,700 K を超える高温となっている。通電開始から 40.0 ms 経過した後の無通電期間では、Joule 発熱や接触抵抗による発熱が生じないため、冷却に伴う凝固が開始する。軟鋼のナゲットは固液界面から凝固が開始し、電極は水冷されているとして温度を 300 K に固定しているため、軟鋼のナゲットでは電極に近いナゲット上部の凝固の方がナゲット下部よりも速い。アルミニウム合金のナゲットも同様に、電極に近いナゲットの下部から凝固が進んでいる。

Fig.3 に通電期間における、ナゲットを構成する粒子の速度分布を示す。図は電極中心軸を通る xz 断面であり、色は速度成分の大きさを、矢印の向きは速度ベクトルの向きを示している。また、この図は粒子が存在する計算領域上に粒子直径に等しい間隔を持つ格子を作成し、任意の格子点においてカーネル平均処理¹⁰⁾を行った後、時間刻み 5 ステップ分で時間平均を取ることで空間的、時間的に溶融金属の

速度場を平均化した結果である。図中の白線はナゲット領域の境界を示している。軟鋼のナゲットにおいては流動的な速度分布は見られないが、アルミニウム合金のナゲットにおいて、ナゲットの下部では周囲から中央に向かって溶融金属が流れ、中央部でナゲット下部から上部に流動した後、接合界面付近では中央部から周囲に向かって流動するような速度分布が形成されていることがわかる (Fig.3(b))。これは、被溶接材料内にはたらく電磁気力によるものである。Fig.4 に通電期間における、ナゲットを構成する粒子にはたらく電磁気力の分布を示す。Fig.4(a) と Fig.4(b) はそれぞれ Fig.3(a) と Fig.3(b) に対応しており、Fig.3 と同様に、この図も電極中心軸を通る xz 断面を示している。色は電磁気力の大きさを、矢印の向きは電磁気力のはたらく向きを示している。図より、電磁気力はナゲットの中心部に向かってはたらくことがわかる。また、ナゲットの中心部では電磁気力が小さく、ナゲット端部で電磁気力が大きい。これは、

Fig. 4 Electromagnetic force distribution of xz cross-section

Fig. 5 Heat conduction distribution of xz cross-section

磁束密度がナゲットの中心部において小さく、ナゲット端部で大きいのである。またナゲットが大きく成長した Fig.4(b) では、電極に近くなるほど接合界面側に比べてナゲット端部の電磁気力が平均的にやや大きいことがわかる。これにより、アルミニウム合金側のナゲット内部においてはナゲット下部から上部に向かう速度分布が形成されていたと考えられる。一方で、軟鋼側のナゲット内部ではナゲット径が小さく、軟鋼の密度が大きいので、同じ体積力がはたらいたとしても、軟鋼側のナゲット内部に生じる加速度は、アルミニウム合金側のナゲット内部に生じる加速度より小さくなり、流動的な速度分布を示すほどの駆動力とならなかったと考えられる。

Fig.5に通電期間における熱伝導による熱量分布を示す。Fig.5(a)とFig.5(b)はそれぞれFig.3(a)とFig.3(b)に対応しており、Fig.3と同様に電極中心軸を通る xz 断面を示している。また粒子の色はその粒子の熱伝導の大きさを示している。どちらの図も、アルミニウム合金の溶融部において熱伝導による熱輸送が大きくなっていることがわかる。これはFig.3およびFig.4で述べたような電磁気力に起因する溶融金属対流によって、ナゲット下部の比較的低温の溶融金属がナゲット上部に輸送され、周囲の高温の溶融金属との間で熱輸送が生じるためである。

Fig. 6 Temperature acquisition positions at steel/aluminum interface

3.2 異材抵抗スポット溶接中の接合界面での温度履歴と金属間化合物層の成長

Fig.6に通電終了時 ($t = 40.0$ ms) におけるアルミニウム合金のナゲット形状を示す。ここで、図中に示すAからEの各点 ($x = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ mm, $y = 3.0$ mm, $z = 1.9$ mm) は温度の取得位置である。Fig.7はAからEの各点における、軟鋼と溶融アルミニウム合金の接触界面の温度履歴を示している。計算開始から $t = 40$ ms までの通電期間では Joule 発熱や接触抵抗による発熱が生じるため、各点の温度は上昇し、その後 100 ms までの無通電期間では温度が低下している。Fig.8はこの温度履歴と式(13)から得られた、AからEの各点における(a)時間経過に伴う金属間化合物の厚さの変化と(b) $t = 100$ msでの金属間化合物の厚さの分布である。Fig.8(a)より、各測定点の温度が順次アルミニウム合金の融点を超える $t = 20$ ms から 60 ms の区間で金属間化合物が厚くなっていることがわかる。またFig.8(b)から、金属間化合物はアルミニウム合金の界面中央付近で厚く、界面端部で薄くなる傾向になることが示唆される。さらに、厚さについても実験から得られているような $1\mu\text{m}$ 程度^{2,3)} であり、妥当な値が得られている。したがって本研究で構築した、非圧縮性 SPH 法を用いた異材抵抗スポット溶接における対流熱輸送を考慮した溶融・凝固過程の計算モデルは、溶融金

Fig. 7 Temperature histories at steel/aluminum interface

(a) Growth of IMC thickness

(b) IMC thickness distribution at $t = 100$ ms

Fig. 8 Steel/aluminum interfacial IMC layer thickness

属の対流を考慮しつつナゲットの形成過程をシミュレートすることができた。また、得られた温度履歴から妥当な金属間化合物層の厚さの推定をすることが可能であることが示された。

4. 結 言

本研究では軟鋼とアルミニウム合金の異材抵抗スポット溶接を対象とし、粒子法の1種である非圧縮性SPH法を用いて対流熱輸送を考慮した溶融・凝固過程のモデル化および数値シミュレーションを行った。さらに、シミュレーション結果より接合界面の温度履歴を取得し、金属間化合物層の厚さの推定を行った。以下に得られた主な知見を示す。

- (1) アルミニウム合金は接合界面から溶融し始め、その溶融域は板厚方向に拡大した。その一方で、軟鋼は板厚方向の中央部付近から溶融し、その溶融域は楕円球状になった。
- (2) 通電期間では、アルミニウム合金の溶融部において熱伝導による熱輸送が大きくなっていた。これは電磁気力に起因する溶融金属の対流によって、ナゲット下部の比較的低温の溶融金属がナゲット上部に輸送され、周囲の高温の溶融金属との間の熱輸送が向上したためであると考えられた。
- (3) 計算によって得られた温度分布から金属間化合物層の厚さを推定したところ、接合界面中央部においては金属間化合物層が厚くなり、一方で端部においては金属間化合物層が薄くなる傾向が得られた。
- (4) 本計算によって得られた金属間化合物層の厚さは実験から得られているような1 μm 程度であり、妥当な値が得られた。したがって本研究で構築した計算モデルによって、異材抵抗スポット溶接におけるナゲットの形成過程および金属間化合物層の厚さを推定することが可能であるといえる。

謝 辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものである。

参 考 文 献

- 1) R. Ikeda, Y. Okita, M. Ono, K. Yasuda and T. Terasaki: Development of Advanced Resistance Spot Welding Process Using Control of Electrode Force and Welding Current during Welding, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 28-1 (2010), 141-148. (in Japanese)
- 2) J. Wang, H. P. Wang, F. Lu, B. E. Carlson and D. R. Sigler: Analysis of Al-steel resistance spot welding process by developing a fully coupled multi-physics simulation model, International Journal of Heat and Mass Transfer, 89 (2015), 1061-1072.
- 3) M. Yasuyama, K. Ogawa and T. Taka: Spot Welding of Aluminum and Steel Sheet with insert of Aluminum Clad Steel Sheet -Spot Welding of Aluminum and Steel Sheet (I)-, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 14-2 (1996), 314-320. (in Japanese)
- 4) M. Takeda, W. Urushihara, K. Matsumoto and J. Katoh: Joining Aluminum Alloys and Steels Together with Resistance Spot Welding, KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS, 57-2 (2007), 69-73. (in Japanese)
- 5) K. Miyamoto, S. Nakagawa, C. Sugi, H. Sakurai and A. Hirose: Dissimilar Joining of Aluminum Alloy and Steel by Resistance Spot Welding, Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan, 40-3 (2009), 867-872. (in Japanese)
- 6) Z. Wan, H. P. Wang, N. Chen, M. Wang and B. E. Carlson: Characterization of intermetallic compound at the interfaces of Al-steel resistance spot welds, Journal of Materials Processing Technology, 242 (2017), 12-23.
- 7) T. Niho, T. Horie, Y. Morita, D. Ishihara, D. Yamakawa and S. Momii: Elasto-Plastic Contact, Electric Current and Thermal Conduction Triply Coupled Analysis Model for Resistance Spot Welding, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 33-3 (2015), 271-282. (in Japanese)
- 8) 岡地範明, 伊澤精一郎, Xiong A-K, 福西祐: SPH法をベースにした非圧縮流れの計算手法の提案, 第16回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (2002), 23.
- 9) M. Shigeta, T. Watanabe, S. Izawa and Y. Fukunishi: Incompressible SPH Simulation of Double-Diffusive Convection Phenomena, International Journal of Emerging Multidisciplinary Fluid Sciences, 1-1 (2009), 1-18.
- 10) M. Tong and D. J. Browne: Smoothed particle hydrodynamics modelling of the fluid flow and heat transfer in the weld pool during laser spot welding, Institute Of Physics Conference Series: Materials Science and Engineering, 27 (2011), 012080 (6 pages)
- 11) M. Ito, S. Izawa, Y. Fukunishi and M. Shigeta: SPH Simulation of Gas Arc Welding Process, Seventh International Conference on Computational Fluid Dynamics, ICFD7, (2012), 3706.
- 12) M. Ito, Y. Nishio, S. Izawa, Y. Fukunishi and M. Shigeta: Numerical Simulation of Joining Process in a TIG Welding System Using Incompressible SPH Method, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 33-2 (2015), 34s-38s.
- 13) H. Komen, M. Shigeta, M. Tanaka and Y. Fukunishi: Incompressible SPH Simulation of Weld Pool Convection with Molten Metal Droplets in a GMA Welding, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 33-4 (2015), 332-340. (in Japanese)
- 14) H. Komen, M. Shigeta and M. Tanaka: Numerical simulation of molten metal droplet transfer and weld pool convection during gas metal arc welding using incompressible smoothed particle hydrodynamics method, International Journal of Heat and Mass Transfer, 121 (2018), 978-985.
- 15) R. Ueno, H. Komen, M. Shigeta and M. Tanaka: Numerical Simulation of Droplet Transfer with TiO_2 Flux Column During Flux Cored Arc Welding by 3D Smoothed Particle Hydrodynamics Method, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 38-2 (2020), 84s-88s.
- 16) H. Komen, M. Shigeta, M. Tanaka, Y. Abe, T. Fujimoto, M. Nakatani and A. B. Murphy: Numerical Investigation of Heat Transfer During Submerged Arc Welding Phenomena by Coupled DEM-ISPH Simulation, International Journal of Heat and Mass Transfer, 171 (2021), 121062 (15 pages).
- 17) Y. Hirata, M. Tanaka, M. Shigeta, K. Nomura and Y. Ogino: Measurements and Numerical Simulations in Arc Welding Processes, Journal of the Japan Welding Society, 84-1 (2015), 19-24. (in Japanese)
- 18) M. Shigeta: Particle Simulations of Molten Metal Flows in Arc Welding Processes, Journal of the Japan Welding Society, 86-6 (2017), 14-20. (in Japanese)
- 19) M. Shigeta: Particle Simulations of Molten Metal Flows during Arc Welding Processes, Journal of Society of Automotive Engineers of

- Japan, 72-10 (2018), 42-46. (in Japanese)
- 20) M. Shigeta and M. Tanaka: Diagnostics and Numerical Thermo-fluid Analysis for Elucidation of Arc Welding Phenomena, The Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan, 140-6 (2020), 350-353. (in Japanese)
- 21) S. Asai, F. Miyasaka, K. Nomura, Y. Ogino, M. Tanaka, M. Shigeta and S. Yamane: Recent Progress of Welding and Joining Engineering, Journal of the Japan Welding Society, 89-5 (2020), 38-51. (in Japanese)
- 22) 後藤仁志: 粒子法 - 連続体・混相流・粒状体のための計算科学 -, 森北出版, (2018).
- 23) Y. Tomita, K. Hashimoto, N. Osawa, M. Yoshikawa, M. Yorozu, N. Shinkai and A. Kanda: Study on Approximate Analysis of Convective Heat Transfer during Line-Heating Process, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 184 (1998), 465-472. (in Japanese)
- 24) R. Borrisutthekul, Y. Miyashita and Y. Mutoh: Dissimilar material laser welding between magnesium alloy AZ31B and aluminum alloy A5052-O, Science and Technology of Advanced Materials, 6 (2005), 199-204. (in Japanese)
- 25) M. Ito, S. Izawa, Y. Fukunishi and M. Shigeta: Numerical Simulation of Weld Pool Formation in a TIG Welding Using an Incompressible SPH Method, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 32-4 (2014), 213-222. (in Japanese)
- 26) S.S. Babu, M.L. Santella, Z.Feng, B.W. Riemer and J.W. Cohron: Empirical model of effects of pressure and temperature on electrical contact resistance of metals, Science and Technology of Welding and Joining, 6 (2001), 126-132.
- ~~~~~