

粒子法による摩擦攪拌接合現象のモデル化

宮坂史和*

1. はじめに

近年目覚ましく発展している、溶接・接合プロセスの一つにFSW(摩擦攪拌接合)が挙げられる。本プロセスは、ツールと呼ばれるピンを接合線上に回転させながら挿入し移動させることにより、ツール周辺の材料を塑性流動させることにより接合を完了する手法である。本プロセスの最大のメリットとして接合部の溶融を伴わないため、接合部への入熱を低く保つことができ、接合後の熱変形を小さく抑えることが可能であることが挙げられる。また、接合部の材料組成の変化も最小限にとどめられることもメリットの一つである。この様な特徴を有するFSWであるが、現在は主に軟化温度の低いアルミニウム合金を中心に利用されており、ロケットや新幹線を対象に実用展開が進み、近年は自動車への適用も進んでいる。さらに、鉄鋼材料への展開も進んでおり、今後も様々な分野への応用展開が期待されている。

本プロセスは、従来の接合プロセスと比較して多くのメリットを有しているものの、その接合メカニズムに関しては、未知の部分が多く残されており、実施工上で試行錯誤を繰り返して最適な接合条件を求めなければいけないといった課題も残されている。本プロセスの理解が困難な原因の一つに接合中の接合部の計測が困難であることが挙げられる。一部X線透過装置を用いて接合中の金属の流動を計測する技術も開発されているが、大掛かりな設備が必要であり実施工に手軽に応用するのは困難である。この様な問題を解決する手段の一つに、モデル解析がある。筆者らはこれまでにFSWに対して粒子法を用いたシミュレーションモデルの開発を進めてきており、定性的ではあるがシミュレーション結果から、その接合メカニズムに対する説明が可能になりつつある。本稿では、筆者らが開発を進めている粒子法によるFSWシミュレーションモデルの紹介と今後の展望に関して述べる。

2. MPS法

粒子法は、近年のコンピュータ技術の目覚ましい発展とともに様々な分野への適用が検討されている。従来から数値計

算手法としてよく用いられている有限要素法や有限差分法は格子法と呼ばれ、空間を格子によって分割し、その格子に物理量を変数として割り当て計算をする。一方非格子法に分類される粒子法は、それらとは違い格子を用いない。その代わりに計算点を物理量とともに移動する粒子として連続体を離散化する。粒子法にも様々な離散化手法があるが、主だった手法としては、MPS法(Moving Particle Semi-implicit Method)⁽¹⁾とSPH法(Smoothed Particle Hydrodynamics Method)⁽²⁾がある。今回紹介するFSWシミュレーションモデルについてはMPS法を適用したモデルとなっている。

粒子法の大きな特徴として計算格子を用いないことを述べたが、このことが支配方程式に大きな違いをもたらす。連続体の挙動を記述するときに、オイラー法(格子有:有限差分法,有限要素法等)とラグランジュ法(非格子:粒子法)があり、ラグランジュ法では計算点が物体の移動・変形とともに移動するため、移流項を考慮する必要がなくなる。式(1)、(2)にオイラー法とラグランジュ法によるナビエ-ストークス方程式を示す。

(オイラー法)

$$\frac{\partial \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + (\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \cdot \nabla) \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{\rho} \nabla P(\mathbf{x}, t) + \nu \nabla^2 \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{g}(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

(ラグランジュ法)

$$\frac{D \mathbf{u}(\mathbf{X}, t)}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P(\mathbf{X}, t) + \nu \nabla^2 \mathbf{u}(\mathbf{X}, t) + \mathbf{g}(\mathbf{X}, t) \quad (2)$$

\mathbf{u} : 速度, P : 圧力, \mathbf{g} : 外力, ρ : 密度, ν : 動粘性係数。

有限要素法や有限差分法では、式(1)左辺第二項の移流項の取り扱いに注意が必要であり、この項の取り扱い手法が解析結果に大きな影響を及ぼすことが知られている。特に自由表面や界面を有するような流体の表面(界面)挙動を記述する手法が色々と提案(VOF法, Level Set法等)されている。一方粒子法では、この様な問題がないため、大変形を伴うような自由表面を有する流体の解析に非常に向いた手法であるといえる。

次にMPS法の基本的な計算手順について説明する。MPS法では式(2)で示されるような支配方程式を離散化す

* 大阪大学准教授; 大学院工学研究科(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

Numerical Simulation of FSW Employing Particle Method; Fumikazu Miyasaka (Department of Adaptive Machine Systems, Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita)

Keywords: FSW(friction stir welding), particle method, mesh free, numerical simulation, onion ring

2015年5月3日受理[doi:10.2320/materia.54.444]

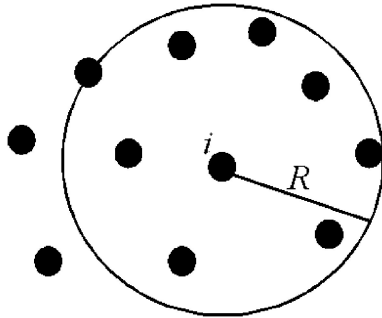


図1 粒子の影響半径.

る際に、各微分演算子(勾配・発散・ラプラシアン)に対し、それぞれ粒子間相互作用モデルを用意し、これらを適用する。具体的には重み関数式(3)を用いて、各粒子間相互作用モデルを記述する。式(3)の R は図1に示すように、相互作用を起こす粒子間距離であり、各粒子はそれぞれこの半径内の粒子からのみ影響を受けるとして計算する。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{R}{r} - 1 & (0 \leq r \leq R) \\ 0 & (R < r) \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (4)$$

続いて非圧縮性流体の計算アルゴリズムに関して簡単に説明する。非圧縮性流体に対する支配方程式は、式(2)のナビエ-ストークスの方程式と式(4)に示す連続の式である。まず初期の粒子位置・粒子速度・圧力分布から式(2)の粘性項及び外力項を陽的に解くことにより、仮の粒子位置・粒子速度を得る。ここで得られる粒子の分布は式(4)の連続の式を満たさない。そこで、ここで得られた粒子位置・粒子速度に対して式(4)を満足するように、圧力項を用いて修正を図る。この手順を順次繰り返すことによって計算が進んでいく。

3. FSW シミュレーションモデル

FSWは金属の塑性流動を取り扱う必要があり、そのモデル化の際に様々な仮定を設けることが必要となる。今回紹介するモデルでは母材金属を高粘性流体であると仮定してモデル化している。

またFSWプロセスにおいては熱伝導は非常に重要な因子であり、モデル解析上塑性流動域の決定に大きな影響を及ぼす。今回のモデルで使用する熱伝導方程式を式(5)に示す。

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{k}{\rho C_p} \nabla^2 T + \frac{Q_h}{\rho C_p} \quad (5)$$

C_p : 比熱, k : 熱伝導率, T : 温度, Q_h : 単位体積当たりの発熱量

この方程式にも式(2)と同様に移流項は入っていない。また、 Q_h に関しては後述する。

FSWプロセスにおける塑性流動を模擬するために、式

表1 材料物性.

Material	A1100
Density [kg/m ³]	2710
Thermal conductivity [W/m·K]	234
Specific heat [J/Kg·K]	900
α [MPa ⁻¹]	0.045
A	exp(24.67)
n	5.66
Q	158300

表2 計算条件.

Time interval [sec]	1e-4
Initial minimum particle distance [mm]	0.5
Number of particles	70759
Density of tool [kg/m ³]	7850
Specific heat of tool [J/Kg·K]	460
Thermal conductivity of tool [W/m·K]	24
Traverse speed of tool [mm/min]	500
Rotation speed of tool [rpm]	500
Tilt angle of tool [deg.]	3
Pitch of tread on probe [mm]	0.7

(2)の動粘性係数(ν)の分布を求める必要がある。一般に、この動粘性係数は材料の温度と相当ひずみ速度の関数として表現される。金属の動粘性係数は以下の式で表現される⁽³⁾。

$$\eta = \frac{\sigma(\dot{\epsilon}, T)}{3\dot{\epsilon}} \quad (6)$$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (7)$$

η : 粘性係数, $\dot{\epsilon}$ 相当ひずみ速度, σ : 相当流動応力, T : 温度

各計算点における相当ひずみ速度は、各時刻における流動速度から以下の式のように求めることができる。

$$\dot{\epsilon} = \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \right)^{1/2} \quad (8)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

ここで求められた相当ひずみ速度から式(6)を用いて粘性係数を求めることができる。ただし、相当流動応力は式(6)からもわかる通り相当ひずみ速度と温度の関数となっており、これは材料物性に依存する。本モデルでは、この関数を以下の様に近似する⁽³⁾。

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (10)$$

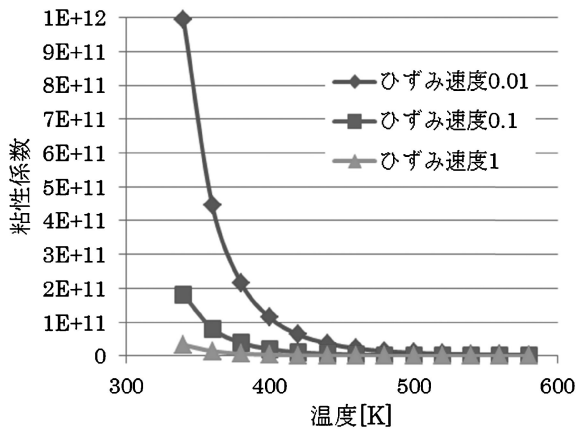


図2 粘性係数の温度・ひずみ速度依存性.

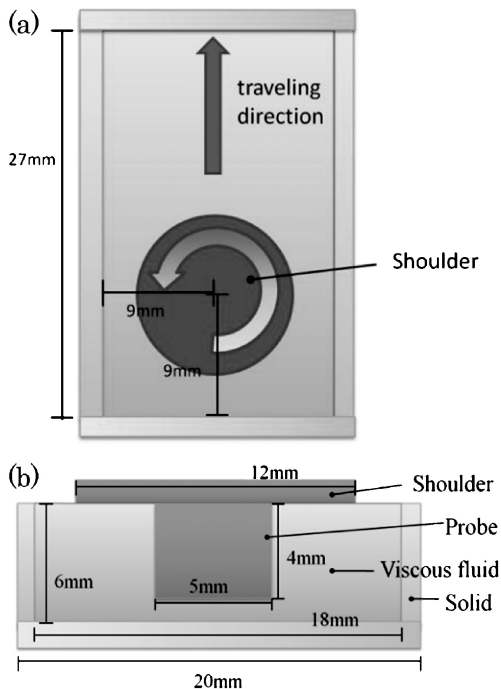


図3 計算モデル。(a)上面図 (b)断面図(正面方向).

$$Z = \varepsilon \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (11)$$

R : 気体定数, α, A, n, Q : 材料定数.

本モデルでは, 対象材料を A1100 を想定し, 使用した材料定数 α, A, n, Q を表 1 にまとめる. また表 2 には計算条件を示す. 図 2 に粘性係数の変化を示す. このグラフからわかる通り, 粘性係数は温度の上昇とともに急激に減少し, さらにひずみ速度の増加とともに減少する.

FSW プロセス中の発熱として今モデルでは, 摩擦による発熱ではなく塑性ひずみによる発熱モデルを考える. 本モデルでは式 (12) に示す通り, 塑性ひずみによる発生するエネルギーの 90% が発熱に使われると仮定した.

$$Q_h = \sigma \dot{\varepsilon} \times 0.9 \quad (12)$$

また, ツール-材料間の摩擦に関しては考慮に入っていない

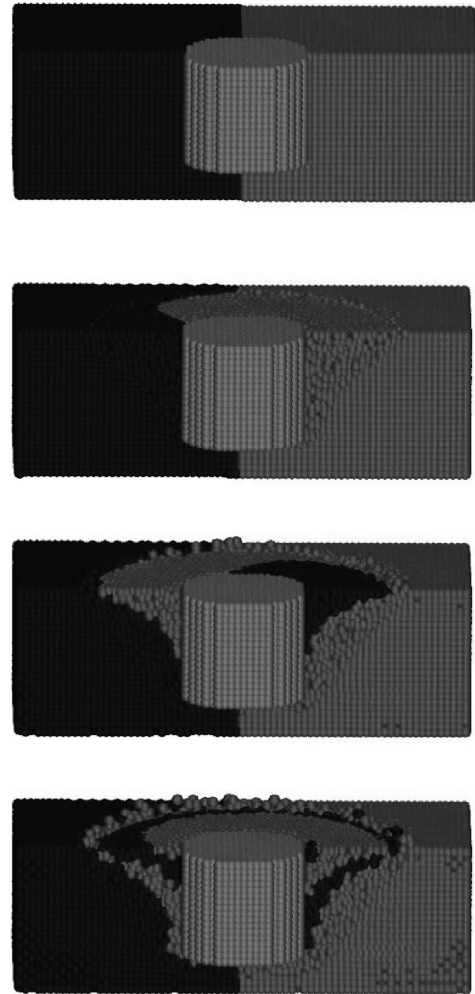
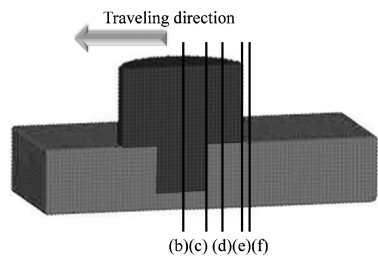


図4 スポット FSW 計算例.

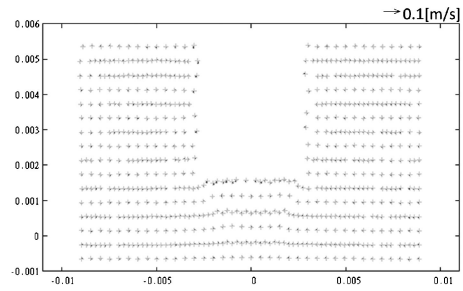
が, ツール表面の境界条件として, ツールに接触する粒子に強制的にツールと同じ回転速度を与えている. さらに, プロブの形状効果として M4 のねじのピッチ (0.7 mm) 分の下向きの流れも強制的に発生させている.

4. 計算結果

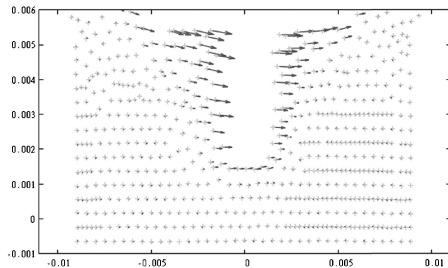
図 3 に計算モデルを示す. 前述した通り本シミュレーションモデルは, 金属を高粘性の流体であると仮定している. そこで計算モデルは, 固体容器の中に非常に粘性の高い流体を入れることにより材料を模擬している. 図 4 にスポット FSW の計算結果を示す. 本図はツール中心位置における横断面図であり, 母材は溶接線の左右の初期位置で色分けしている. ツールのショルダー部は非表示である. これを見てわかるようにツールの回転とともに母材温度が上昇し流動域が広がり, 左右の材料が層状に攪拌されていく様子がわかる. 特にショルダー直下では攪拌速度が速いため流動域が広がっているのに対して, プロブ先端では流動域が狭くなっていることがわかる. 今回の計算例では, 接合部材を左右とも同材にしているが, 左右部材の物性値を変更することは容易で



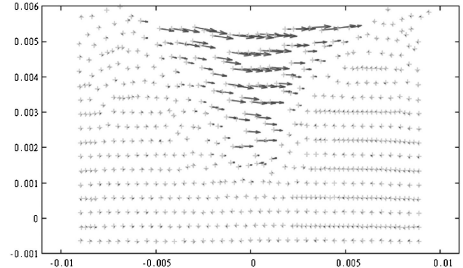
(a) Points of cross section



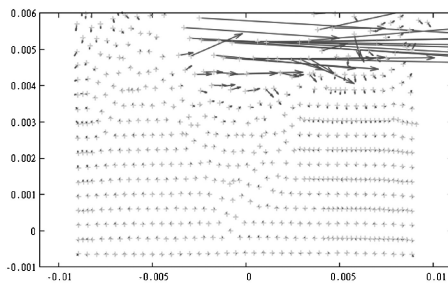
(b) Position (b)



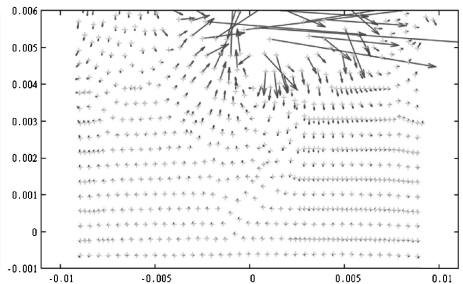
(c) Position (c)



(d) Position (d)



(e) Position (e)



(f) Position (f)

図5 ツール周辺の流れ分布.

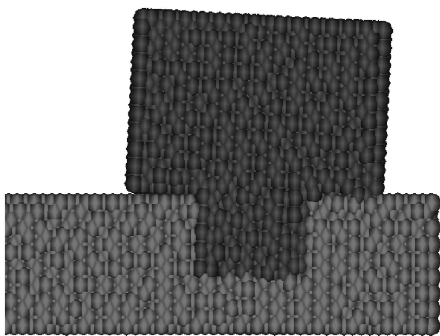


図6 ツールの傾斜.

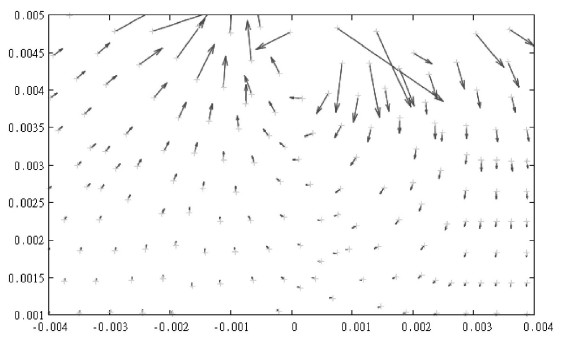


図7 ツール後方ショルダー直下の流速.

あり、異材接合への応用も可能である。図5にツール周りの材料の流動速度分布を示す。各断面は図5(a)に示す通りであり、主にツール進行方向後方の速度分布を示している。その際、ツールは図6に示すように後退角(3°)を取っている。この速度分布を見てまずわかることは、ツール中心断面(b)の位置では紙面垂直方向の流れが強く、紙面平行方向の流れはほとんど見られない。ツールの後方に行くにつれてツールの回転方向に平行な流れがみられるようになり、続いてツール回転方向に対して垂直な流れがみられるようになる。この

部分の流れは複雑であるため、図5(f)のショルダー直下を拡大した図を図7に示す。この図を見てわかる通り、ツール後方のショルダー直下では循環流が発生しており、これが、オニオンリング形成の主たる要因ではないかと考えられる。

5. ま と め

本稿では、粒子法の簡単な説明とそれを摩擦攪拌接合に適用した事例に関して述べた。粒子法を摩擦攪拌接合に適用す

るメリットとして特に挙げられるのが、支配方程式をラグランジュ系で解くため、計算点自身が各種物性値を保持しながら移動するため、オイラー系が必要となる移流項計算の必要がないことが挙げられる。この特徴は、大きく変動する自由表面を持つ流体の挙動や、多相混合流の解析に非常に適しているといえる。粒子法は、これまでに表現が困難であった現象解析を可能にする手法であり、複雑な溶接メカニズムを明らかにすることが可能であると考えられ、今後コンピュータ技術の向上とともに発展していくことが予想される。特に摩擦攪拌接合に対しては、従来のオイラー法によるシミュレーション比べて内部の流動現象を視覚的に捉えやすく、現象を理解する上で非常に有用なツールになり得ると考えられる。特に異材接合に対しても、二つの材料が混合・攪拌される様子がとらえやすく、ツール形状が攪拌現象に与える影響やオニオンリングの形成機構等、FSW特有の現象解明に役立つことが期待される。

本シミュレーションモデルの今後の展開として、現在材料を高粘性流体であると仮定してモデル化しているが、これを弾塑性体として取り扱うことが挙げられる。弾塑性体として取り扱うことにより、プロセス中に発生する欠陥や接合後に

母材内部に発生する応力等、接合品質を決定する重要な現象の予測が可能となり、本モデルを通してより深い現象の理解が期待される。

文 献

- (1) 越塚誠一：粒子法，計算力学レクチャーシリーズ，丸善，(2005)．
- (2) W. G. Hoover：粒子法による力学-連続体シミュレーションへの展開，森北出版，(2008)．
- (3) T. Sheppard and A. Jackson: Mater. Sci. Tech., **13**(1997), 203-209.



宮坂史和

★★

2006年 大阪大学大学院工学研究科 工学博士学位取得。

1995年4月-1998年5月 韓クボタ

1998年6月-2009年12月 大阪大学助手

2010年1月-2013年3月 大阪大学大学院 工学研究科 講師

2013年4月- 現職

専門分野：加工プロセスのモデル化、熱電磁流体シミュレーション

◎溶接・接合現象のモデル化および熱電磁流体現象を利用したデバイスの開発。

★★