# 粒子法と有限要素法を用いた FSW 力学解析手法の構築

大阪府立大学大学院	○家下	輝也
	生島	一樹
大阪大学大学院	宮坂	史和
大阪府立大学大学院	柴原	正和

### Development of Friction Stir Welding simulation method based on Particle method and FEM

by Teruya IESHITA, Kazuki IKUSHIMA, Fumikazu MIYASAKA and Masakazu SHIBAHARA

# 1. 緒言

船舶や橋梁や輸送機器,各種プラントなど,あらゆるものの製造過程において,材料同士の接合工程は不可 欠なものであり,中でも溶接はその汎用性の高さから広く用いられている.しかし,溶接時には局部に多量 の熱を投与するため溶接変形や残留応力が必然的に生じ,場合によっては溶接割れなどの重大な欠陥が発生 することがある.また,溶接部の金属の溶融に伴い,その機械的特性が損なわれるといった問題も存在する. そこで現在注目を集めているのが,非溶融接合法の一つの摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding:以下 FSW)である <sup>1)</sup>.

FSW は 1991 年にイギリスの TWI(The Welding Institute)によって開発された接合法である.ショルダーとプ ローブから成るツールと呼ばれる棒状の工具を高速で回転させながら被接合材にプローブを圧入し,ツール の回転により接合材との間に摩擦熱を生じさせる.摩擦熱によって材料の温度が上昇するため,材料が軟化 し,さらに接合界面付近を塑性流動させることで,攪拌と混合作用によって接合する.以上のプロセスによ り接合を行うことから,FSW は従来の溶接法と比較すると,最高到達温度が融点以下で,固相状態のまま接 合するため,溶融接合に比べて高強度であり,接合継手に母材性能が保たれる等といった様々な利点が存在 する<sup>1-3)</sup>.

近年,非溶融・低入熱接合として FSW の利用が拡大しており、日本国内では鉄道車両に、欧米では船舶や 航空機に適用されている<sup>2-4)</sup>. これまで FSW に関する種々のプロセスの開発や接合部の機械的特性, 組織的 変化に関する多くの研究が行われ、さまざまなアルミニウムにおける接合性が明らかにされてきた. さらに、 近年では FSW に関する研究者の数も増え,研究が盛んに行われることにより,急速に種々の現象の解明が行 われてきており、アルミニウム合金だけでなく、銅合金などでも実用化され始めている 3. しかし、それら の研究は実験に基づいたものが多い.アルミニウムや銅に関しては研究が進み、実用化されているが、鉄鋼 材料に関しては、様々な研究が行われて 5.0、徐々に実用化されてきているものの、接合に用いるツールがい まだに問題となっている.そのため,鉄鋼材料の FSW を商業的に可能にするためのツール開発が必要不可欠 であり、研究が行われている.また、厚鋼板の FSW にいたっては研究例自体少ないものとなっている.この ように, FSW の適用範囲は広がってきてはいるものの, いまだ限られているというのが現状である. また, 実際の接合に適用する際には、各種条件の選定に経験によるものや試行錯誤が必要であることが多く、多く の時間やコストを要するのが現状である.このような課題に対して、シミュレーション手法を活用すること で試作回数が削減され、設計段階では迅速に検討を行えるようになると考えられるので、時間的コストを短 縮することができる.また、試作にかかるコストを抑えてツール開発を行うことができたり、任意の条件で の接合状態を確認できたりするため、接合条件の選定もしやすくなる.よってシミュレーション手法は非常 に有用なツールとなる.

そこで、本研究では、数値シミュレーション手法の一つである粒子法を用いて FSW の接合過程をモデル化 し、FSW の力学シミュレーション手法の構築する.また、粒子法は一般的に粒子数の 1.5 乗で計算時間が増 加すると言われており、実サイズのような大規模モデルでは解析時間が非常にかかることが問題となる.そ こで本研究においては、openMP による並列化を導入することで、実サイズをモデル化した大規模な解析につ いて検討する.また、粒子法により得られたツール表面の応力分布より、接合中にツールに作用する荷重を 算出し、FEM を適用することで、ツールの強度についても検討する.

# 2. FSW 解析のための解析手法

## 2.1 粒子法

粒子法は、きわめて大きな運動をする流体挙動をわかりやすく表現する数値シミュレーション手法として 開発された解析手法の一つであり<sup>7)</sup>,現在では構造解析や熱伝導解析にも用いられている.粒子法には離散 化の方法が異なる Moving Particle Semi-implicit(MPS)法<sup>8,9)</sup>や Smoothed Particle Hydrodynamics(SPH)法<sup>7,10)</sup>等が あるが、本研究では非圧縮流れのための粒子法として開発され、流体-剛体および流体-構造連成解析<sup>11)</sup>や溶 接プロセスの解析<sup>12,13</sup>に使用された実績のある MPS 法を用いて解析を行う.

連続体の挙動を表すときに用いられる支配方程式は、オイラー法とラグランジュ法があるが、粒子法では ラグランジュ法が用いられる.ラグランジュ法は計算点が物体の移動・変形とともに移動するため、オイラ ー法には存在する移流項が支配方程式からなくなる.式(1)にラグランジュ法によるナビエ・ストークス方程 式を示す.

$$\frac{Du(X,t)}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P(X,t) + \upsilon \nabla^2 u(X,t) + f(X,t)$$
(1)

ここで、 $\mathbf{u}$ は速度、 $\mathbf{P}$ は圧力、 $\mathbf{f}$ は外力、 $\rho$ は密度、 $\boldsymbol{v}$ は動粘性係数である.また、式(2)に連続の式を示す.

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \tag{2}$$

有限要素法や差分法では、移流項を離散化すると生じる数値拡散や数値振動といった、移流項を取り扱う ときに計算上大きな問題が生じ、解析結果に大きな影響を及ぼす.また、解析格子をラグランジュ法を用い て移動させることもできるが、その場合は、格子のゆがみが大きな問題となる.一方粒子法では、移流項を 取り扱う必要がないため、このような問題は生じず、大変形を伴うような自由表面を有する流体の解析に向 いた手法であるといえる.

次に MPS 法で用いられる勾配,発散,ラプラシアンの数学モデルを式(3)-(5)に示す.これらの式を用いて微分方程式の離散化を行い,計算を行う.

$$\left\langle \nabla P \right\rangle_{i} = \frac{d}{n_{0}} \sum_{j \neq i} \left[ \frac{(P_{j} - P_{i}) \left( \mathbf{r}_{j} - \mathbf{r}_{i} \right)}{\left| \mathbf{r}_{j} - \mathbf{r}_{i} \right|^{2}} w \left( \mathbf{r}_{j} - \mathbf{r}_{i} \right) \right]$$
(3)

$$\left\langle \nabla \bullet \mathbf{a} \right\rangle_{i} = \frac{d}{n_{0}} \sum_{j \neq i} \left[ \frac{(\mathbf{a}_{j} - \mathbf{a}_{i})(\mathbf{r}_{j} - \mathbf{r}_{i})}{\left| \mathbf{r}_{j} - \mathbf{r}_{i} \right|^{2}} w(\left| \mathbf{r}_{j} - \mathbf{r}_{i} \right|) \right]$$
(4)

$$\left\langle \nabla^2 u \right\rangle_i = \frac{2d}{\lambda n_0} \sum_{j \neq i} \left[ \left( u_j - u_i \right) w \left( |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i| \right) \right]$$
(5)

ここで、d は空間次元数、 $n_0$  は粒子数密度、i、j は粒子番号、r は粒子の位置ベクトルを表す.

解くべき微分方程式が与えられたとき、その微分方程式に含まれる微分演算子に対して、式(3)-(5)を適用することで、元の微分方程式に従う粒子の運動方程式が得られる.

#### 2. 2 FSW シミュレーション

FSWの接合プロセスにおいて熱伝導は非常に重要な因子であり,解析上の塑性流動域の決定に大きな影響 を及ぼす.本研究で使用する温度場の支配方程式は式(6)に示す熱伝導方程式を用いる.

$$\frac{Dh}{Dt} = k\nabla^2 T + Q \tag{6}$$

FSW のモデル化にあたって、塑性流動の取り扱いは重要となる.本モデルでは、母材を高粘性流体とする ことで塑性流動の挙動を表現する.また、塑性流動を表現する際に、動粘性係数分布を求める必要があるが、 固体金属の粘度を測定することは困難であるため、式(7)にて表される関数を用いて決定する<sup>14)</sup>.

$$\eta = \frac{\sigma(\dot{\varepsilon}, T)}{3\dot{\varepsilon}}, \nu = \frac{\eta}{\rho}$$
(7)

ここで、 $\sigma$ は相当流動応力、 $\dot{\epsilon}$ は相当塑性ひずみ速度である.

また、本モデルでは、FSW 中の発熱源は式(8)に示すように塑性ひずみにより発生すると仮定し、発熱効率は 90%とする.

$$Q = \sigma \dot{\varepsilon} \times 0.9 \tag{8}$$

#### 2. 3 MPS-FEM 連成解析

粒子法は自由表面の移動や大変形を伴う流動の取り扱いに適した解析手法であるが,応力場の解析には計 算コストや精度の問題から適しているとは言いがたい.そこで,粒子法解析により得られた速度場やひずみ を用いて,従来から応力場解析に広く用いられている有限要素法と連成解析を実施することで応力計算を行 う.

各粒子における応力を求めるために, MPS 法により算出した速度場を MLS(Moving Least Square)法により 線形近似し,速度勾配を算出する.求めた速度勾配より大ひずみ弾塑性状態を仮定した応力計算を式(9)のよ うに各粒子に関して行う.

$$\sigma \} = [D] \{\varepsilon\} \tag{9}$$

続いて, Fig. 1 に示す互換モデルより粒子の応力を FEM 節点上に補間し,得られた応力を式(10)のように 表面積分することで,表面荷重を算出する.

$$F_i = \int_A \sigma_{ij} n_j dA \tag{10}$$

本研究では以上の MPS-FEM 連成解析を Fig. 2 に示す解析手順で実施した.

# 3. FSW 解析

## 3.1 解析モデル及び解析条件

MPS 法を用いた FSW 解析の基礎的検討に用いた解析モデルを Fig. 3, Fig. 4 に示す. モデルは A1100 材と し,母材の大きさが,18mm×36mm×6mm,ツールがショルダー部の直径が 12mm,高さが 4.0mm であり,プ ローブ上部の直径が 5mm,プローブ下部の直径が 2mm,高さが 4mm である.粒子数は 83097 である.解析 に用いた材料定数は Table 1 に示す.





# 3.2 ツールの速度に関する基礎的検討

FSW 解析の基礎的検討として回転速度,接合速度が及ぼす影響についてそれぞれ調べる.接合速度 v を v=60mm/min で一定にし,回転速度 N を N=250~1000rpm の間で変化させた際に生じる最高到達温度をグラフにしたもの Fig.5 に示す.グラフより,回転速度が大きくなるにつれてほぼ線形的に上昇していくことがわかる.FSW は、ツールの回転による摩擦熱で母材の変形抵抗が低下し、さらにその回転作用で塑性流動現象が生じる結果,攪拌によって接合される.ツールの回転速度が大きくなるにつれて塑性流動現象も大きくなるので、変形が大きくなる.その結果、塑性仕事が大きくなるため、発熱量が大きくなり,温度上昇が大きくなると考えられる.また、回転速度 N を N=1000rpm で一定にし、接合速度 v を v=70~300mm/min の間で変化させた際に発生する最高到達温度をグラフにしたもの Fig.6 に示す.同図より,接合速度が 150mm/min までは大きく上昇する傾向にあるが、175mm/min からは緩やかに上昇し、250mm/min からはほぼ横ばいになることがわかる.これは、接合速度が速くなると、1回転あたりのツールの接合距離が大きくなるのに従い、回転による塑性流動が小さくなるため、発熱が生じづらくなり、最高到達温度が上昇しなくなると考えられる.

## 4. FSW の大規模解析に関する検討

基礎的検討で用いたモデルは、非常に小さいサイズとなっており、FSW 特有の物理現象を把握するため にも大規模モデルは必要であると考えられる.しかし、粒子法は一般的に粒子数の 1.5 乗で計算時間が増 えていくため、モデルサイズを大きくすることは、計算時間の問題で困難であると言える.そこで、 汎用 的な並列化技術である openMP を導入することで、MPS 法解析の高速化を図り、FSW の大規模解析につい て検討する.

#### 4.1 解析モデル及び解析条件

MPS 法を用いた FSW 大規模解析に用いた解析モデルを Fig. 7 に示す. なお, ツールの大きさや材料定数は 第3章で示した Fig. 4 および Table.1 と同じものである. 母材の大きさは, 100mm×48mm×6mm, 粒子数は 493173 である.

### 4.2 ツールの速度に関する検討

接合速度 v を 60mm/min で一定とし、回転速度 N を N=500, 750, 1000rpm としたときの温度分布を Fig. 8 に示し、最高到達温度をグラフ化したものを Fig. 9 に示す. 同図より、回転速度が大きくなると発熱量が大きくなり、最高到達温度がほぼ線形的に大きくなるという傾向が確認できた. また、回転速度 N を 1000rpm

で一定とし,接合速度 v を v=100,200,300mm/min としたときの温度分布を Fig. 10 に示し,最高到達温度をグラフ化したものを Fig. 11 に示す.同図より接合速度を大きくした場合,温度上昇は生じづらくなることがわかった.また,FSW の特徴である表面温度の左右非対称性が現れていることが確認できる.よって FSW 特有の物理現象を追うためにも大規模モデルでの解析が必要であると考えられる.

続いて、回転速度が N=1000rpm, 接合速度が v=60mm/min のときの発熱量分布, 発熱量分布の y-z 平面図, をそれぞれ Fig. 12, 13 に示す. これらの図より, FSW 中の発熱はショルダー部での発熱が支配的になってお り、ツール先端部での発熱はショルダー部に比べて小さくなっていることがわかる. また, Fig. 12 より発熱 部はショルダー部で生じており, その中でもツールの前方部で大きな発熱が生じていることがわかる.



## 4.3 ツールに作用する表面応力に関する検討

前節の結果より、粒子法による FSW 解析が可能であることを確認した.以上の MPS 法による解析結果を 用いて先述した手順に従い、FEM 解析を実施し、その結果を示す.接合速度 v を 60mm/min で一定とし、回 転速度 N を N=500、750、1000rpm としたときの表面応力分布を Fig. 14 に示す.同図より回転速度を大きく した場合、表面応力は減少することがわかった.これは、回転速度が大きくなることで温度が上昇し、母材 が軟化するため、ツールにかかる表面応力が小さくなると考えられる.同様に Fig. 15 回転速度 N を 1000rpm で一定とし、接合速度 v を v=100、200、300mm/min とした場合のツールの表面応力分布を示す.これらの結 果から、接合速度を大きくした場合の表面応力は、上昇することを確認した. また、表面応力が大きくなっ ているプローブ部について、表面応力を比較したものを Fig.16 および Fig.17 に示す.これらの図からも、回 転速度を大きくしたときは表面応力が減少し、接合速度を大きくしたときは、表面応力も大きくなることが 確認できる.よって本提案手法を用いることで、ツール強度に及ぼす諸因子の影響を検討することができる ことがわかった.



Fig. 12 Distribution of heat generation at v=60mm/min, N=1000rpm







Equivalent stress[MPa]





次に接合速度 v を 60mm/min, 回転速度 N=500rpm とした場合の, ツールの進行方向前方側, Advancing side, Retreating side,進行方向後方側それぞれのツールにかかる表面応力分布 Fig. 18 に示し, y=4.00 の位置での周 方向の表面応力をグラフ化したものを Fig. 19 に示す.これらの図より,進行方向前方側および Advancing side において高い応力値を示していることが確認できた.この結果,ツールは進行方向前方側および Advancing side において大きな損傷を受けている可能性があると推測できる.

# 5. 結言

本研究では、MPS-FEM 連成による FSW に関する力学シミュレーション手法を提案し、基礎的検討を行なった.また、MPS 法解析の高速化に関する検討を行い、ツールの強度について解析するために、FSW の大規 模解析に関する検討を行った.以下に本研究において得られた知見を示す.

1) ツールの接合速度を一定にし、回転速度を変化させた場合、回転速度が大きくなるにつれて温度上昇し

ていくことがわかった.また、ツールの回転速度を一定にし、接合速度を変化させた場合、接合速度が 大きくなるにつれて温度は上昇しづらくなることがわかった.

- 2) MPS 法解析による温度解析の結果, FSW 特有の物理現象である左右非対称性を表現することができ,温度分布の傾向が定性的に一致した.
- 3) ツールの接合速度を一定にし、回転速度を変化させた場合、回転速度が大きくなるにつれて、ツールにかかる表面応力は減少することがわかった.また、ツールの回転速度を一定にし、接合速度を変化させた場合、接合速度が大きくなるにつれて温度が上昇しづらくなることがわかった.
- 4) FSW 中の発熱はショルダー部での発熱が支配的になっており、ツール先端部での発熱はショルダー部に 比べて小さくなっていることがわかった.また、その中でもツールの前方部で大きな発熱が生じている ことがわかった.
- 5) 接合速度による影響と回転速度による影響を比較したとき、ツールにかかる表面応力は、接合速度を大きくした場合の応力の変化のほうが大きいため、ツールに作用する応力に対しては、接合速度による影響が大きいことが確認できた。
- 6) ツールの前方方向正面側, Advancing side, Retreating side, 進行方向後方側それぞれのツールにかかる表 面応力分布を比較したとき,進行方向前方側および Advancing side において高い応力値を示していること が確認できた.

## 参考文献

- H.Fujii: Chapter 1: Welding processes and equipment (1-5) FSW, Journal of The Japan Welding Society Vol.78 (2009) No.4 p.274-282
- H.Okamura, K.Aota, H.Takai, M.Ezumi: Problems for Application and Situation of Development in Friction Stir Welding, Journal of The Japan Welding Society Vol.72 (2003) No.5 p.436-444
- 3) Welding Society of Japan edition: Friction stir welding All of FSW -, Production Publication 2006
- K.Ohishi, H.Fujii: Technical Topics and Automobile Applications of Friction Stir Welding, Materia Japan Vol.53 (2014) NO.12 p.603-607
- 5) A.P.Reynolds, W.Tang, T.Gnaupel-Herold, H.Prask: Structure, properties, and residual stress of 304L stainless steel friction stir welds, Scripta Materialia Vol.48 (2003) p.1289-1294
- 6) S.H.C.Park, Y.S.Sato, H.Kokawa, K.Okamoto, S.Hirano, N.Inagaki: Rapid formation of the sigma phase in 304 stainless steel during friction stir weldeing, Scripta Materialia Vol.49 (2003) p.1175-1180
- 7) G.Yagawa, Y.Sakai: Particle method foundation and application, Iwanami Shoten 2016
- 8) S.Koshizuka: Particle method (Computational mechanics lecture series 5), the Japan Computational Engineering Society edition, Maruzen Co., Ltd. 2005
- 9) S.Koshizuka, Y.Oka: Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, Nucler Science and Engineering Vol.123 (1996) p.421-434
- 10) J.J.Monaghan: An introduction to SPH, Computer Physics Communications Vol.48 (1988) p.89-96
- 11) S.Koshizuka: Coupled Analysis of Fluid Rigid Bodies and Fluid Structures Using Particle Method, Kanrin: Journal of The Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 25 (2009) p. 12-15
- 12) N.OCHI, S.Okano, M.Mochizuki: Welding Process Simulation using Hybrid Explicit MPS and Grid Method, The Japan Society for Computational Engineering and Science Vol.2013 (2013) p.20130005
- H.Miyasaka: Particle Method and the Application –Case Examples and Modeling of Weld Process-, Journal of The Japan Welding Society Vol.80 (2011) No.6 p.534-537
- 14) T.Sheppard, D.S.Wright: Determination of flow stress: Part1 constitutive wquation for aluminium alloys at elevated temperatures, Metals Tecchnology Vol.6 (1979) p.215-223
- M.Maeda, H.J.Liu, H.Fujii and T.Shibayanagi: Temperature Field in the Vicinity of FSW-Tool during Friction Stir Welding of Aluminum Alloys, Welding in the World, 49 (2005) ,No.3, 69-75