

粒子法を用いた FSW 力学解析手法の構築

大阪府立大学大学院 ○李 志浩, 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

by Zhihao LI, Kazuki IKUSHIMA, Fumikazu MIYASAKA and Masakazu SHIBAHARA

1. 緒 言

FSW では回転するツールと材料の間の摩擦熱によって材料を軟化し、さらに回転によって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材料を接合する。従来の溶接法と比較すると、最高到達温度が融点以下で、被接合材が固相状態のまま接合するため、入熱量が小さく、溶接残留応力や溶接変形を小さく抑えることができる。また、ツールの攪拌作用により接合部の結晶粒が微細化されるため、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¹⁻³⁾。一方、トンネル状の欠陥や溝状の欠陥など、FSW 特有の欠陥が発生することが報告されている。これらは、入熱過多や入熱不足が主な欠陥発生原因とされている³⁾。また、入熱量が原因となっている欠陥以外にも、塑性流動の不良による欠陥も存在していると言われている。代表的な欠陥の例³⁾を Fig. 1 に示す。Type A は、キッシングボンドと言われる欠陥で、接合部の品質・信頼性で最も問題となる欠陥であり、ツール先端部の攪拌量が極めて少ない時に生じる。Type B は、切断欠陥と呼ばれ、ショルダーと被接合材の接触状態が不適切な場合やツール荷重が少ないときに生じる。Type C は、裏面空洞欠陥と言われ、入熱不足によって裏面に生じる欠陥である。Type D は、表面空洞欠陥と呼ばれ、入熱過剰の際に表面近傍から内部にかけて生じる。これらの欠陥に対する防止策の検討に、シミュレーション手法を活用することで試行回数が削減され、設計段階において迅速に検討を行えるようになり、時間的コストを短縮することができると考えられる。また、シミュレーション手法を用いることで、任意の条件での接合状態を確認できるようになることから、接合条件の選定もより簡便に行えることが期待できる。

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、接触や塑性流動、攪拌といったさまざまな物理現象の力学的挙動を再現できる FSW の力学シミュレーション手法の構築を行う。また、損傷評価指標を導入することで欠陥発生箇所の予測や、FSW に適した材料の選定などを可能とするシステムの構築を目指す。

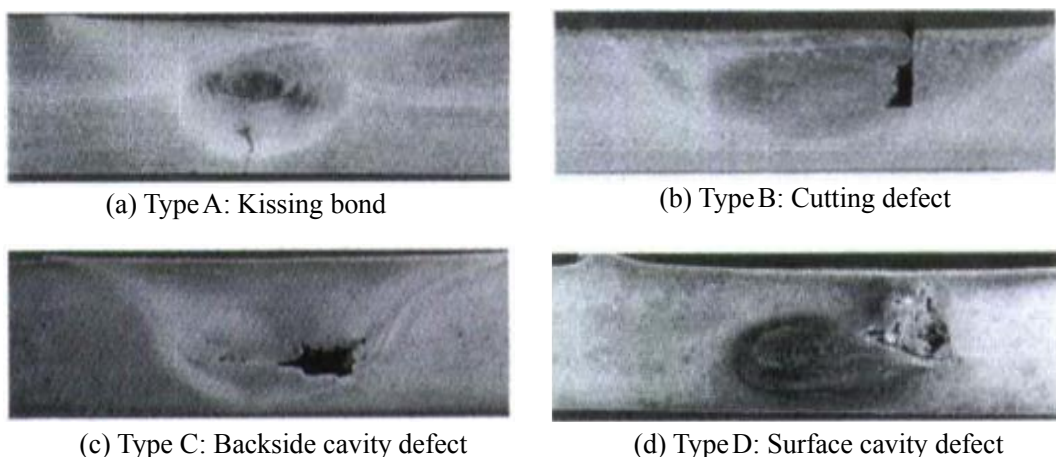


Fig. 1 Cross sectional photograph of joining defects in FSW³⁾.

2. FSW 解析のための解析手法

2. 1 粒子法による FSW プロセスのモデル化

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⁴⁾、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⁵⁾や Smoothed Particle Hydrodynamics(SPH)法⁶⁾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、流体や剛体および流体構造連成解⁷⁾や溶接プロセスの解析⁸⁾に使用された実績のある MPS 法を用いて FSW の接合プロセスの解析を行う。

連続体の挙動を表すときに用いられる支配方程式には、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に現れない。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。

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

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

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (2)$$

有限要素法や差分法では、移流項を離散化する際に数値拡散や数値振動といった、計算上の問題が生じ、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により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適した手法であるといえる。

次に MPS 法で用いられる勾配、発散、ラプラシアンの数値モデルを式(3)-(5)に示す。MPS 法では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。

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{d}{n_0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{(P_j - P_i)(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right] \quad (3)$$

$$\langle \nabla \cdot \mathbf{a} \rangle_i = \frac{d}{n_0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{(\mathbf{a}_j - \mathbf{a}_i)(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right] \quad (4)$$

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

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、 $\mathbf{r}$ 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)を適用することで粒子により離散化された運動方程式が得られる。

非圧縮性流れの粒子法の計算は、陽解法の部分と陰解法の部分がともに存在する半陰的アルゴリズムが用いられている。まず初期の粒子位置、粒子速度、圧力分布から式(1)の圧力勾配項以外を陽的に計算し、仮の粒子位置 $\mathbf{r}^*$ 、粒子速度 $\mathbf{u}^*$ を得る。このとき、時刻 k のときの粒子位置 $\mathbf{r}^k$ 、速度 $\mathbf{u}^k$ 、圧力 P^k はわかっているものとする。これによる式(6)圧力のポアソン方程式が得られる。この手順を繰り返すことで、計算をすすめる。

Fig. 2 に計算のフローチャートを示す。

$$\nabla^2 P^{k+1} = -\frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n^* - n_0}{n_0} \quad (6)$$

2. 2 温度変化のモデル化

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。本研究では温度場の支配方程式として式(7)に示す熱伝導方程式を用いる。

$$\frac{Dh}{Dt} = k\nabla^2 T + Q \quad (7)$$

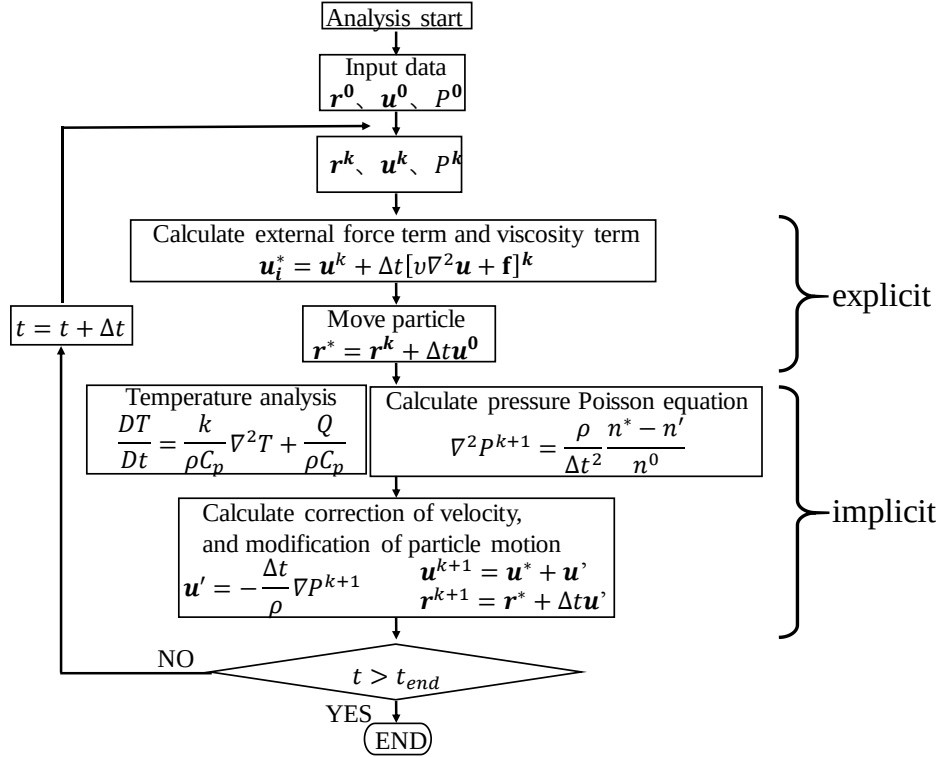


Fig. 2. Flowchart of Particle Method.

FSW のモデル化にあたって、塑性流動の取り扱いが重要となる。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(8)にて表される関数を用いて決定する⁹⁾。

$$\eta = \frac{\sigma(\dot{\epsilon}, T)}{3\dot{\epsilon}}, \nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (8)$$

ここで、 σ 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(9)に示すように塑性ひずみではにより発生すると仮定し、その発熱効率を 90%とする¹⁰⁾。ここでは、ツールと材料間の摩擦熱に関しては考慮に入れていないが、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。

$$Q = \sigma \dot{\epsilon} \times 0.9 \quad (9)$$

2. 3 流動応力

FSW では、塑性流動により生じる流動応力が重要な指標のひとつとして用いられる。また、流動応力は、材料の流動の挙動を正確に予測する上で非常に重要となる。粘塑性状態での材料は、ひずみ速度や温度などが場所によって大きく異なる。ひずみ速度域はおおよそ $10^{-3} \sim 10^2 \text{s}^{-1}$ 程度、温度域は室温～固相線温度程度にまでわたる。本研究では、広い範囲な温度域及びひずみ速度域を取り扱うために、材料の構成則として式(10)に示す Sheppard-Wright 則を使用した。

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

ここで、 Z は Zener-Hollomon パラメータ、使用した材料定数 a , A , n を Table 1 に示す。Zener-Hollomon パラメータ¹¹⁾とは、温度と相当ひずみ速度の互換性を表す温度補償ひずみ速度であり、これは材料物性に依存する。式(11)に示す。

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (11)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 Q は活性化エネルギー、 R はガス定数、 T は温度である。

2. 4 被接合材の欠陥評価指標に関する検討

FSW 時の被接合材に生じる欠陥を評価する指標は明確になっていない。そこで本研究では、以下の 3 つについて検討する。

- ・ 負圧モデル
- ・ 延性き裂進展簡易手法モデル
- ・ Cockcroft-Latham モデル

2. 4.1 負圧モデル

功刀ら¹²⁾によると、FSW の内部欠陥のメカニズムは、以下のように推定される。

1. 低入熱条件下では、材料の攪拌が弱くプローブ下への流入量が減少
2. 材料の攪拌による発熱も小さく、プローブ直下および前方の温度が低下
3. プローブ直下および前方の材料の流動性が低下
4. 流動性の悪い材料が、ツールによりプローブ下に流入
5. プローブ後方への材料排出が悪く、高い引張り応力状態となり欠陥が発生

このとき、高い引張り応力状態であるところは圧力分布が負の状態となっている。これより、負圧であるときに欠陥が生じると判定することが可能であると考えられることから、本研究では、負圧が生じた領域において欠陥が発生したものとする判定を行う。

2. 4.2 深堀、大畑らによる延性き裂進展簡易手法モデル¹³⁾

延性き裂進展においては、金属材料中の微小空孔、すなわち、ボイドが塑性変形の発生とともに成長し、ボイドが十分に成長した段階においてはボイド同士が融合することで急速に材料の破壊が進行するモデルが提案されている。

本モデルではボイド同士の融合が起こるまでは、材料の強度に及ぼす損傷の影響が小さいと仮定すると、 $D < D_c$ の時、すなわち損傷が小さい時は、ボイド率はごく小さいことから、 $\sigma_0 = q$ すなわち損傷を含む場合の応力状態と損傷を含まない場合の応力状態が等しいと考えられる。本研究では、 D が D_c に達すると、ボイドが合体するため、損傷度は急激に増加し、 D_{cr} に達した瞬間に破断が生じると仮定する。ここで、 p は静水圧応力。材料損傷度 D を示し、 D_0 及び D_c は損傷を含まない母材部分とほぼ等しい降伏強度となるようなごく小さな値である。 a_1 、 a_2 は材料定数であり、 $a_1=1.54$ 、 $a_2=1.28$ とされている¹³⁾。本研究では、式(12)を破壊の基準として採用する。

$$\bar{\varepsilon}^p \geq A \exp(B \frac{p}{q}) \quad (12)$$

$$A = \frac{2}{a_1 a_2} \ln \frac{(1 - D_0) D_c}{(1 - D_c) D_0} \quad (13)$$

$$B = -a_2 \quad (14)$$

2. 4.3 Cockcroft-Latham モデル

Cockcroft-Latham の式を式(15)に示す¹⁴⁾。同式は、塑性変形中の最大垂直応力 σ_{max} を負荷の履歴に沿って相当塑性ひずみを用いて積分した値が一定値に達した時点で材料が破壊したものとする。

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \sigma_{max} d\bar{\varepsilon} = C \quad (15)$$

ここで、 $\bar{\varepsilon}_f$ は破断時の相当塑性ひずみ、 $\bar{\varepsilon}$ は相当塑性ひずみ、 σ_{max} は最大垂直応力、 C は材料定数である。なお、本研究では、 σ_{max} を最大圧力としている。

式(15)を変形して、式(16)のように積分値 I を定義する。この積分値 I が一定の値に達することをもって延性破壊条件としている。

$$I = \frac{1}{C} \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \sigma_{max} d\bar{\varepsilon} \quad (16)$$

3. MPS 解析手法による FSW 解析

3. 1 ツールの速度に関する検討

MPS 法を用いた FSW 解析のツールの速度に関する検討に用いた解析モデルを Fig. 3, Fig. 4 に示す. 母材の大きさは, 100mm×48mm×6mm であり, ツールのショルダー部の直径は 12mm, 高さが 4mm である. 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. なお, MPS 法に用いた粒子数は 493173 である. A1100 の材料定数は Table 1 に示す.

接合速度 v を $v=60\text{mm/min}$ で一定とし, 回転速度 N を $N=500, 750, 1000\text{rpm}$ としたときの断面温度分布を Fig.5 に示す. また, 被接合材の表面温度をグラフ化したものを Fig.6 に示す. 同図より, 回転速度が大きくなると, 最高到達温度大きくなるという傾向が確認できた. これは, 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, その結果, 発熱量が大きくなるためと考えられる.

回転速度 N を $N=1000\text{rpm}$ で一定とし, 接合速度 v を $v=100, 200, 300\text{mm/min}$ としたときの断面温度分布を Fig. 7 に示す. また, 被接合材の表面温度をグラフ化したものを Fig. 8 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. 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と考えられる.

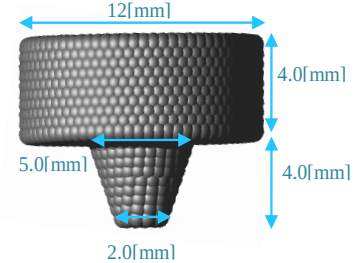


Fig. 3 Analysis model of tool.

Table1 Material properties of A1100

Density[kg/mm ³]	2.7×10^{-6}
Thermal conductivity[W/mm · K]	2.34×10^5
Specific heat[J(kg·K)]	900
Melting point[K]	933
Q[kJ/mol]	158300
n	5.66
A[Pa ⁻¹]	0.045×10^{-6}
A	Exp(24.67)

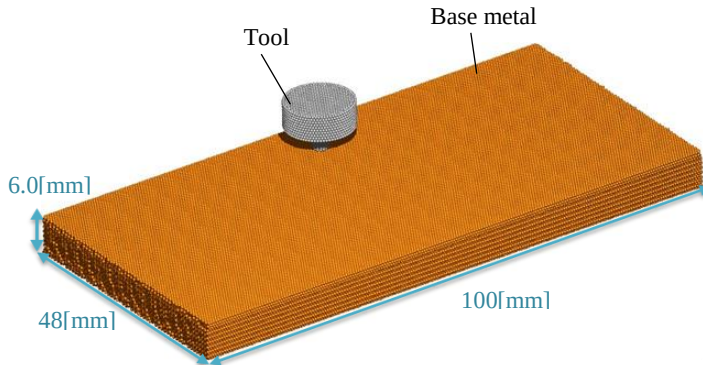


Fig. 4 MPS analysis model

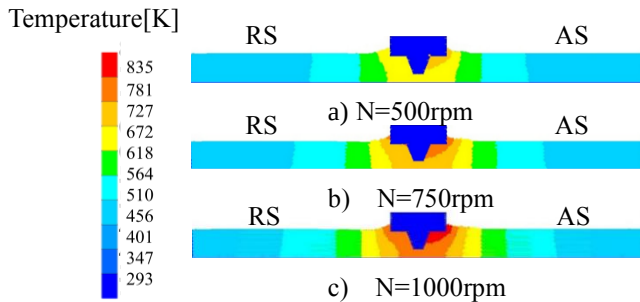


Fig. 5 Distribution of temperature in x-y plate on traveling speed $v=60\text{mm/min}$.

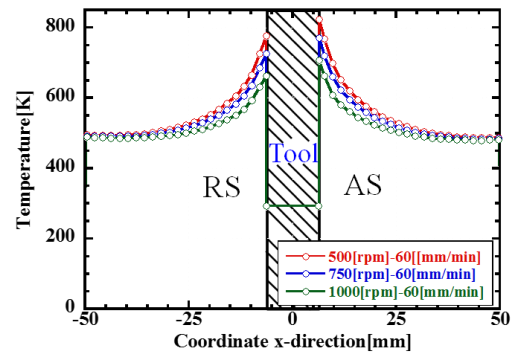


Fig.6 Surface temperature in x-y plane on traveling speed $v= 60\text{mm/min}$.

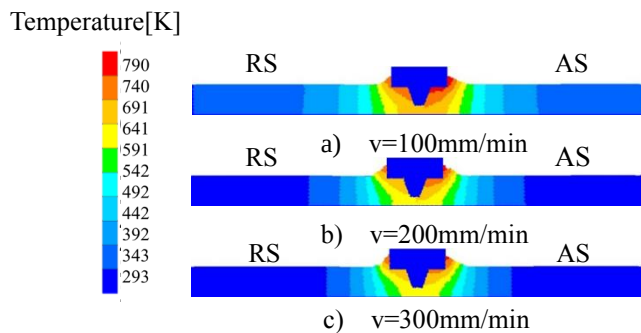


Fig. 7 Distribution of temperature in x-y plate on rotational speed $N=1000\text{rpm}$.

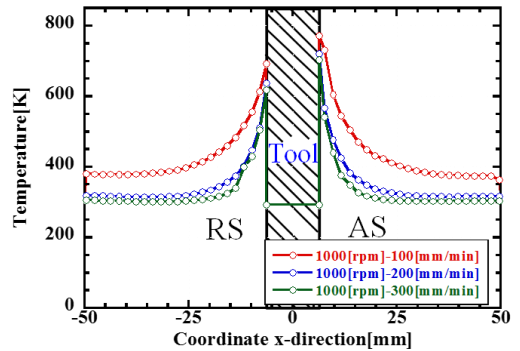


Fig.8 Surface temperature in x-y plane on rotational speed $N=1000\text{rpm}$.

3. 2 破壊モデル解析結果

前項で述べた欠陥評価指標を導入して解析を実施した際の解析モデルを Fig. 9 に示し、結果を Fig. 10 から Fig. 15 に示す。なお、解析モデルは、指標の導入について検討するために簡便なサイズとした。母材の大きさが、36mm×18mm×6mm、また材料は、SUS304 であり、材料定数は Table 2 および Table 3 に示す。粒子数は 83097 である。Fig. 10 から Fig. 12 は、入熱不足となる接合条件である接合速度 $v=60\text{mm/min}$ 、回転速度 $N=100\text{rpm}$ とし解析を実施したものである。Fig. 10 より、負圧モデルでは、表面近傍において高い評価値となっている。また、ツールの左右で損傷度分布に大きな差はなく、ショルダー直下で大きく負圧が生じていることが確認できる。続いて、Fig. 11 より、延性き裂進展簡易手法モデルでは、内部から裏面にかけて評価値となっている。また、接合開始点から接合終端部まで高い評価値が続いていることが分かる。そして、Fig. 12 より Cockcroft-Latham モデルでは、攪拌域全てにおいて高い評価値となった。

また、Fig. 13 から Fig. 15 では、接合速度 $v=60\text{mm/min}$ 、回転速度 $N=600\text{rpm}$ とし入熱過剰となる接合条件で解析を実施したものである。Fig. 13 より、負圧モデルでは、表面近傍およびツール近傍において高い評価値が多くとなっている。また、ツール近傍では、RS に負圧が多く発生していることが確認できる。続いて、Fig. 14 より延性き裂進展簡易手法モデルでは、内部側で高い評価値となっている。また、接合開始点から接合終端部まで高い評価値が続いている。そして、Fig. 15 より Cockcroft-Latham モデルでは、ツール近傍の攪

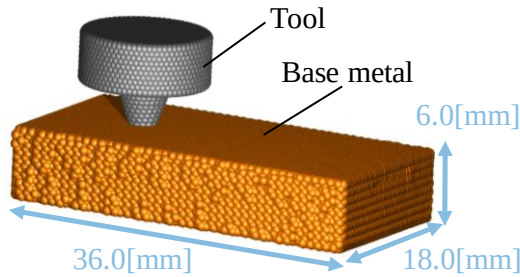


Fig. 9 Analysis model.

Table2 Material properties of SUS304.

Density[kg/mm ³]	7.8×10^{-6}
Thermal conductivity[W/mm · K]	1.67×10^4
Specific heat[J(kg*K)]	590
Melting point[K]	1750
Q[kJ/mol]	401000
n	4.32
A[Pa ⁻¹]	1.2×10^{-8}
A	Exp(33.9)

Table3 Damage model parameter of SUS304.

D ₀	0.0001
D _C	0.01
a ₁	1.54
a ₂	1.28
C	500

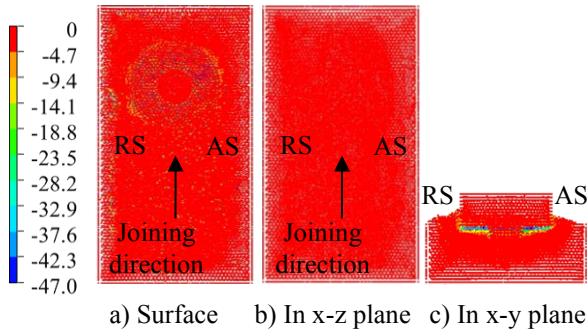


Fig.10 Distribution of damage index by negative pressure model in smaller heat input.

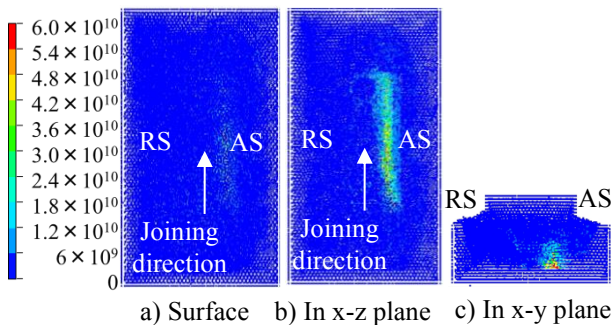


Fig.11 Distribution of damage index by simplified model in smaller heat input.

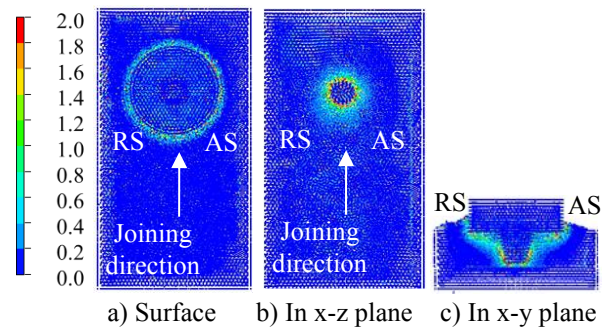


Fig.12 Distribution of damage index by Cockcroft-Latham model in smaller heat input.

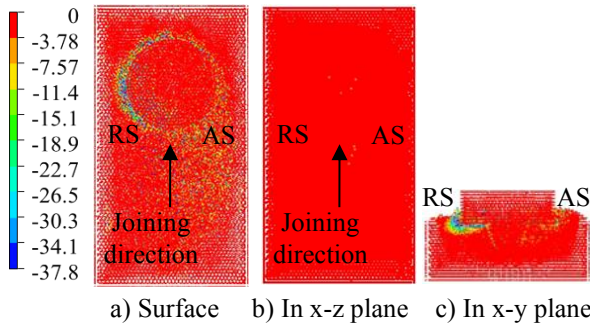


Fig.13 Distribution of damage index by negative pressure model in larger heat input.

拌域全てにおいて高い評価値となっている。その中では、表面付近で大きな値を示しており、同式の推定によると表面付近にて欠陥が発生しやすいと考えられる。FSW 時の被接合材に生じる欠陥は、AS に接合開始点から接合終端部にかけて連続して発生することが報告されている¹⁵⁾。入熱不足の場合の FSW における欠陥は、内部から裏面にかけて多く生じており、入熱過剰時は、表面近傍もしくは内部に多く生じている¹⁶⁾。

以上の結果より、入熱不足時において、負圧モデルでは、ショルダー直下での表面近傍において損傷度が大きく評価され、延性き裂進展簡易手法モデルでは、内部から裏面にかけて損傷度が大きく評価されると同時に、接合開始点から接合終端部まで大きな損傷度が発生する結果となった。Cockcroft-Latham モデルでは、攪拌域全てにおいて損傷度が大きく評価されている。入熱過剰時においては、負圧モデルでは、RS の表面付近での高い損傷が内部では損傷が生じていない。延性き裂進展簡易手法モデルでは、接合開始点から接合終端部にかけて内部に大きな損傷度が生じた。Cockcroft-Latham モデルでは、攪拌域全てにおいて損傷度が大きく評価される結果となった。

以上のことから、負圧モデル評価指標と Cockcroft-Latham モデルでは、損傷箇所を適切に評価できていると言えないことから、評価指標としては不適切であると考えられる。また、深堀、大畑らによる損傷モデルでは、実験と同様の傾向を示している。これは、深堀、大畑らによる延性き裂進展簡易手法モデルを導入することで、FSW の被接合材に生じる表面および内部の欠陥評価が可能であることを示唆するものである。

4. 結 言

本研究では、粒子法による FSW に関する力学シミュレーション手法を提案し、力学的検討を行った。また、FSW 時の被接合材に生じる欠陥を解析的に検討するため、欠陥評価指標を導入し、評価手法を提案するために、負圧モデル、延性き裂進展簡易手法モデル、Cockcroft-Latham モデルの 3 つの欠陥評価指標について比較検討した。以上の検討より得た知見を以下にまとめる。

- 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り、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) 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ことを確認した。
- 3) FSW 時に生じる表面もしくは内部の代表的な欠陥を評価するために、入熱不足条件および入熱過剰条件において、3 つの損傷評価指標を用いて比較検討した。その結果として、延性き裂進展簡易手法モデルを用いることで、入熱不足条件および入熱過剰条件の両条件において被接合材に生じる欠陥の評価が可能であることが示唆された。

参考文献

- 1) H.Okamura, K.Aota, H.Takai, M.Ezumi: Problems for Application and Situation of Development in Friction Stir

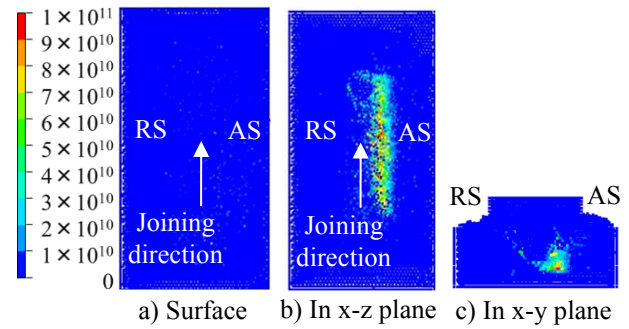


Fig.14 Distribution of damage index by simplified model in larger heat input.

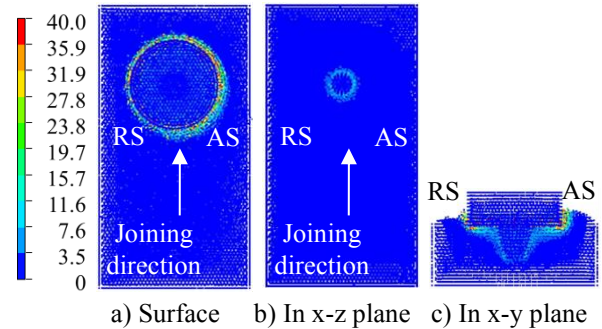


Fig.15 Distribution of damage index by Cockcroft-Latham model in larger heat input.

- Welding, Journal of The Japan Welding Society Vol.72 (2003) No.5 p.436-444
- 2) Welding Society of Japan edition: Friction stir welding - All of FSW -, Production Publication 2006
 - 3) 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
 - 4) G.Yagawa, Y.Sakai: Particle method foundation and application, Iwanami Shoten 2016
 - 5) S.Koshizuka: Particle method (Computational mechanics lecture series 5), the Japan Computational Engineering Society edition, Maruzen Co., Ltd. 2005
 - 6) J.J.Monaghan: An introduction to SPH, Computer Physics Communications Vol.48 (1988) p.89-96
 - 7) 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
 - 8) 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
 - 9) T.Sheppard, D.S.Wright: Determination of flow stress: Part1 constitutive equation for aluminium alloys at elevated temperatures, Metals Tecchnology Vol.6 (1979) p.215-223
 - 10) 宮坂 史和: 粒子法による摩擦攪拌接合現象のモデル化, 金属製造プロセスへの粒子法の応用, Vol. 54 (2015) p. 444-448
 - 11) T.Sheppard, D.S.Wright: Determination of flow stress:Part 1 constitutive equation for aluminium alloys at elevated temperatures, Metals Technology Vol.6 (1979) No.1 p.215-223
 - 12) 麻 寧緒, 功刀 厚志: 摩擦点接合 (FSJ) プロセスのシミュレーション, 軽金属溶接, Vol. 46 (2008) No.4 p. 151-156
 - 13) 深堀 拓也, 大畑 充, 南 二三吉, 萱森 陽一, 井上 健裕: 延性き裂発生・進展抵抗の材料依存性評価のための数値損傷モデルの提案—延性き裂進展シミュレーション手法の構築—, 鉄と鋼, Vol. 94 (2008) No. 6, p.34-42
 - 14) M.G.Cockcroft, D.J.Latham: Ductility and the Workability of Metals, Journal of The Institute of Metals, Vol. 96(1968) p. 33-39
 - 15) K.Aota, H.Okamura, M.Sakamoto, M.Ezumi, S.Noguchi, H.Takai: Prevention and Causes of Joining Defects in Friction Stir Welding, Abstract of The Japan Welding Society, 2002. p.184-185
 - 16) Y.Shimoda, M.Tsubaki, T.Yasui, M.Fukumoto: Simulated welding for clarification of welding defect formation by FSW, Abstract of The Japan Welding Society, 2011. p.66-67