

摩擦攪拌接合における熱/材料流動のための大規模過渡解析手法の開発

Development of Large-scale Transient Analysis Method for Thermal/Material Flow in Friction Stir Welding

○ 宮川悠咲¹⁾, 橋本学²⁾, 奥田洋司³⁾

東大新領域, 〒277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

1) ymiyakawa@s.h.k.u-tokyo.ac.jp, 2) ghashimoto@k.u-tokyo.ac.jp, 3) okuda@k.u-tokyo.ac.jp

Yusaku Miyakawa, Gaku Hashimoto, Hiroshi Okuda

GSFS, The Univ. of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8563

Friction Stir Welding (FSW) is a relatively new joining method which has the advantage of welded joint's strength in comparison with conventional welding methods. The tool geometry, rotational speed and welding speed have a great influence on the properties of welded area. Therefore, the optimal joining conditions are researched by experiments. To reduce the experimental costs, numerical simulation has frequently been used. But the computational cost is so high to simulate the three-dimensional material flow and heat transfer with the complex tool geometry, so the parallel finite element method is introduced by applying FrontISTR which is an open-source parallel FEM software. We develop the code of FrontISTR to simulate the thermal/material flow in FSW.

1. 緒言

摩擦攪拌接合⁽¹⁾ (Friction Stir Welding, FSW) は, 1991年にイギリスの溶接研究所 (The Welding Institute, TWI) で開発された比較的新しい接合方法である。他の溶融溶接よりも接合部の強度低下が抑制されることが特長で, 主にアルミニウム合金のような低融点金属の接合に適している。鉄道車両や船舶, 自動車などの分野で既に実用化されており, 今後適用範囲がさらに拡大することが期待されている。

FSWでは, Fig. 1に示すように高速で回転する棒状の工具を接合する材料の突合せ面に押し入れ, 接合方向に沿って移動させる。このとき材料は工具との摩擦熱によって軟化, 攪拌され, 温度低下の後に接合する。工具は径の大きいショルダと径の小さいプローブからなり, 接合中はプローブのみが材料に押し入れられ, ショルダは材料を上から押さえつけている。

工具の形状や回転速度, 接合速度が継手特性に大きな影響を及ぼすため, 接合条件の最適化に関する研究が実験とシミュレーションの双方から行われている^(2,4)。特に工具の形状は, 摩擦による発熱と材料の攪拌に大きく作用するため, Fig. 2に示すように様々な形状が検討されている⁽⁶⁾。Fig. 2はプローブの断面形状の例で, 丸や三角形をはじめ, さらに複雑な形状も開発されている。しかしながら, 従来のシミュレーション研究では, 簡略化した円柱や円錐台といった工具形状の解析メッシュが用いられているため, 工具形状に起因する3次元的な材料流動の変化を調査することが困難であった。シミュレーションによって工具の最適形状を調査することができれば, 工具を試作して実験を行うコストを抑えることが可能となる。

そこで, 本研究では, 高解像度のメッシュを用いた FSW の大規模並列シミュレーション手法を開発し, 工具形状に起因する3次元的な熱/材料流動の変化を検討することを目的とする。そのために, 本研究では著者らが開発している大規模並列 FEM 非線形構造解析プログラム FrontISTR をシーズコードとして使用することとする。そして, (1) 非定常熱伝導解析の機能・精度検証, (2) 熱流体解析の機能・精度検証, (3) 熱流体/構造連成による FSW 解析, (4) 工具の形状に起因する熱/材料流動変化の検討の順に進める。本稿では, (1) および(2) についての結果を示す。

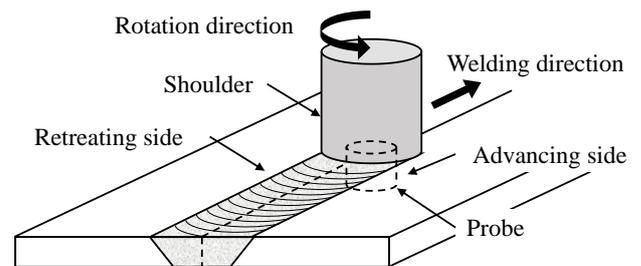


Fig. 1 Schematic view of FSW.

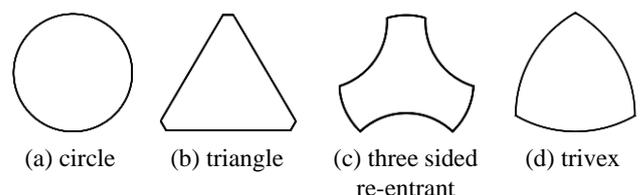


Fig. 2 Examples of probe shape.

2. FSW シミュレーションの支配方程式

低融点金属の接合材料は, 工具との摩擦熱によって軟化し攪拌される。そのため, 本解析では工具近傍の材料を高粘性の非ニュートン流体としてモデル化を行う⁽⁶⁾。支配方程式は, 質量保存則, 運動量保存則, エネルギー保存則より,

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (k\nabla T) + \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{D} \quad (3)$$

である。ここで, \mathbf{v} は速度ベクトル, ρ は密度, $D\mathbf{v}/Dt$ は物質微分, $\boldsymbol{\sigma}$ は応力テンソル, c_p は定圧比熱, T は温度, k は熱伝導率, \mathbf{D} は次式で定義される変形速度テンソルである。

$$D = \frac{1}{2} \left\{ \nabla \otimes \mathbf{v} + (\nabla \otimes \mathbf{v})^T \right\} \quad (4)$$

応力テンソル σ は、

$$\sigma = -pI + 2\mu D \quad (5)$$

である。ここで、 p は圧力、 μ は粘性係数である。粘性係数 μ は次式から求める。

$$\mu = \frac{K}{3\dot{\epsilon}} \quad (6)$$

ここで、 K は流動応力、 $\dot{\epsilon}$ は相当ひずみ速度である。流動応力 K は、

$$K = \left(1 - \sqrt{\frac{T - 273}{T_m - 273}} \right) K_1 + K_0 \quad (7)$$

$$K_1 = \frac{1}{\eta} \ln \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left\{ 1 + \left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} \right\}^{1/2} \right] \quad (8)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) \quad (9)$$

から求める⁶⁾。ここで、 T_m は融点、 K_0 は融点での降伏応力、 η, A, n は材料定数である。 Z は Zener-Hollomon パラメータで式(9)から求める。 Q は活性化エネルギー、 R は気体定数である。相当ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は、次式で定義される。

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} D : D} \quad (10)$$

3. 非定常熱伝導解析

FSW の解析を行うために、まず、非定常熱伝導解析を行った。非定常熱伝導解析では式(3)において物質微分の移流項と応力パワーの項を無視している。FSW の解析モデルを z 軸正方向から眺めた図を Fig. 3 に示す。Fig. 3 に境界面の名称および各寸法を示した。プローブは円錐台の形状をしている。解析モデルの境界面には、上面を Top、下面を Bottom、側面を Front, Back, AS, RS とそれぞれ名付けた。さらに、材料が工具と接する境界面には、ショルダの下面を SB、プローブの側面と下面を PS, PB とそれぞれ名付けた。材料の物性値を Table 1 に、境界条件および初期条件を Table 2 に示した。

Fig. 4 に $t = 1.0$ s のときの材料の温度分布を示す。Fig. 4 から工具と材料の境界面から流入する熱流束が材料中に伝わる様子が確認できる。解析によって得られた温度データから材料内の直線上の温度分布を求め、Su ら⁶⁾の結果と比較した図が Fig. 5 である。 $x = 0, 0 < y < 20$ mm かつ $z = -1$ mm, -3 mm, -5 mm の 3 本の直線上の温度分布を比較している。本解析では Su らの解析と異なり、移流項や応力パワーの項を無視しているので直接の比較はできないため、温度 T を最高温度 T_{max} で除した相対温度で示している。材料流動や接合速度といった移流の影響を考慮していないため、Su らの結果と比較すると、 y が増加するにつれて相対温度が急に低下していると考えられる。

Fig. 6 に MPI プロセス数を変化させたときのスピードアップを示した。Fig. 6 の青線は並列化効率が 100% のときのスピードアップである。使用した計算機は、東京大学情報基盤センターの Oakforest-PACS である。MPI プロセス数を増やしても正しく計算

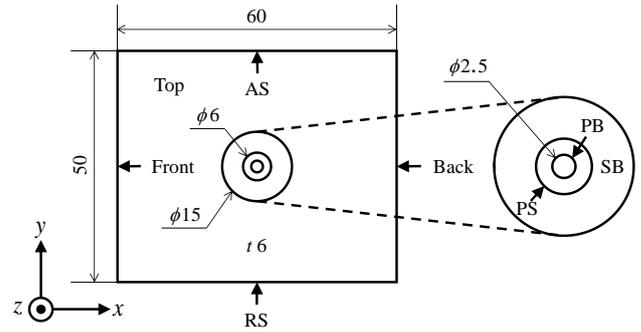


Fig. 3 Names and lengths of the parts of FSW analysis model.

Table 1 Material properties used in the heat conduction analysis.

Density ρ [kg/m ³]	2,770
Thermal conductivity k [W/(m·K)]	120
Specific heat at constant pressure c_p [J/(kg·K)]	875

Table 2 Boundary and initial conditions of the heat conduction analysis.

Heat transfer coefficient at Top surface h_{Top} [W/(m ² ·K)]	1,000
Emissivity at Top surface ϵ_{Top}	0.4
Heat transfer coefficient at Bottom surface h_{Bottom} [W/(m ² ·K)]	1,000
Heat transfer coefficient at Bottom surface under the shoulder h_{Bottom_SB} [W/(m ² ·K)]	2,000
Heat transfer coefficient at side surface h_{side} [W/(m ² ·K)]	500
Heat flux at Shoulder Bottom surface q_{SB} [kW/m ²]	4,784.7
Heat flux at Probe Side surface q_{PS} [kW/m ²]	1,936.7
Heat flux at Probe Bottom surface q_{PB} [kW/m ²]	818.9
Ambient temperature T_a [K]	300
Initial temperature T_0 [K]	300

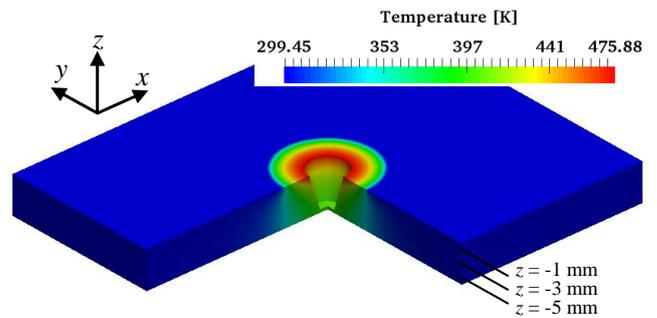


Fig. 4 Temperature distribution at $t = 1.0$ s.

されること、計算時間が短縮されることを確認した。

4. 熱流体解析

FrontISTR は、本来は、構造解析コードであるが、その FEM プログラミングスタイルの汎用性を利用することにより、流体要素を実装することで流体解析プログラムとして機能させることができる⁷⁾。FSW の熱流体解析を行う前段階として、自然対流問題の検証を行った。自然対流問題ではブシネ近似を用いて式(11)、式(12)、式(13)を解いている⁹⁾。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (11)$$

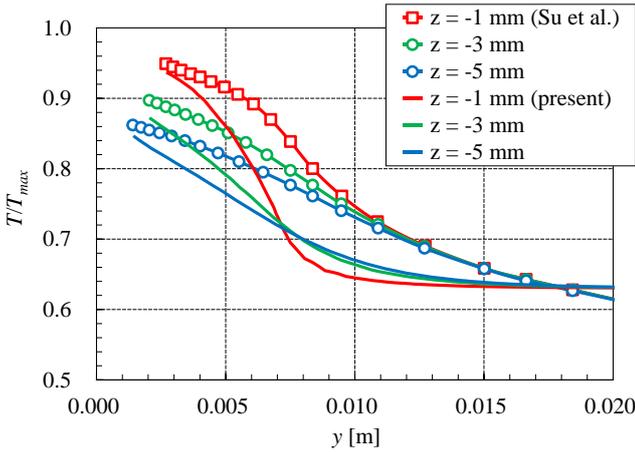


Fig. 5 Temperature distribution on different straight lines at $x = 0$.

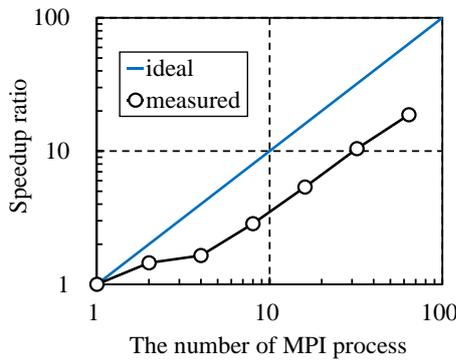


Fig. 6 Speedup performance of the parallel computing.

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \beta (T - T_0) \mathbf{g} \quad (12)$$

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T \quad (13)$$

ここで、 β は体膨張係数、 T_0 は基準温度、 \mathbf{g} は重力ベクトルである。

Fig. 7 に自然対流問題の解析モデルと各寸法を示す。また、本解析ではレイリー数およびプラントル数が Table 3 に示す値となるように問題設定を行った。材料の物性値を Table 3 に示す。さらに、境界条件および初期条件を Table 4 に示す。

Fig. 8 に立方体を $z = 0.5$ m の平面で切断した断面における速度の時間変化を示している。それぞれ $t = 1,000$ s, $5,000$ s, $10,000$ s のときの図である。Fig. 8 より $x = 0$ の高温面で熱せられた流体に浮力が生じて渦が発生する様子を確認した。非定常熱伝導解析と同様に MPI プロセス数を変化させ、正しく並列計算ができることを確認した。

5. 結言

本論文において FSW の熱材料流動のための大規模過渡解析に向けた非定常熱伝導解析と熱流体解析について述べた。非定常熱伝導解析では、工具と材料の境界面から流入する熱流束が材料内に伝わる様子を確認することができた。さらに、MPI プロセス数を変化させて正しく並列計算を行えること、計算時間が短縮されることを確認した。熱流体解析では、自然対流問題を解析し高温側の流体が浮力によって上昇し、渦が発生する様子を確認することができた。今後は、FSW の熱流体解析を行い接合時の熱材料流動について詳しく調査を行う予定である。

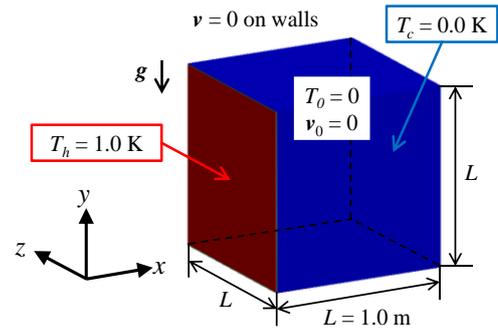


Fig. 7 Analysis model and boundary conditions of the natural convection problem.

Table 3 Dimensionless numbers and material properties used in the natural convection problem.

Rayleigh number Ra	1000
Prandtl number Pr	0.71
Viscosity μ [Pa·s]	0.001
Thermal conductivity k [W/(m·K)]	1
Specific heat at constant pressure c_p [J/(kg·K)]	710

Table 4 Boundary and initial conditions of the natural convection problem

Temperature at $x = 0$ surface T_h [K]	1
Temperature at $x = 1$ m surface T_c [K]	0
Heat flux at $y = 0$ and $y = 1$ m planes [W/m ²]	0
Heat flux at $z = 0$ and $z = 1$ m planes [W/m ²]	0
Initial temperature in the box T_0 [K]	0
Velocity at all the surfaces [m/s]	0
Initial velocity in the box [m/s]	0

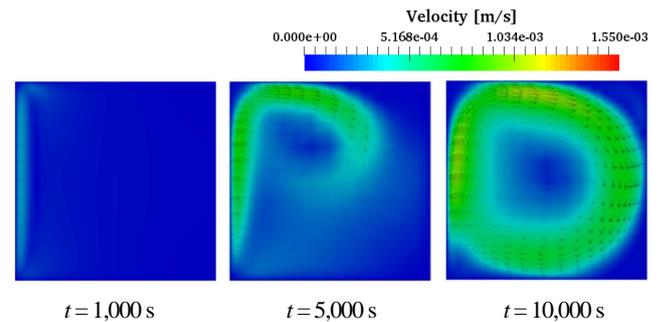


Fig. 8 Velocity magnitude of material flow on $z = 0.5$ m plane.

参考文献

- (1) 溶接学会, “摩擦攪拌接合—FSW のすべて—”, 産報出版, (2006), pp. 12-31.
- (2) 田中, 熊谷, 吉田, “Al-Cu-Mg-Si 系合金の摩擦攪拌接合部組織に及ぼす工具回転数の影響”, 軽金属, 55 (2005), pp. 63-67.
- (3) 田中, 熊谷, 吉田, “Al-Cu-Mg-Si 系合金の摩擦攪拌接合の継手強度に及ぼす接合速度の影響”, 軽金属, 55 (2005), pp.479-482.
- (4) Mehta, M., Arora, A., De, A. and Debroy, T., “Tool geometry for friction stir welding — Optimum shoulder diameter”, Metall. Mater. Trans. A, 42 (2011), pp. 2716–2722.
- (5) Zhang, Y.N., Cao, X., Larose, S. and Wanjara, P., “Review of tools

- for friction stir welding and processing”, *Can. Metall. Quart.*, 51 (2012), pp. 250-261.
- (6) Su, H., Wu, C.S., Pittner, A. and Rethmeier, M., “Thermal energy generation and distribution in friction stir welding of aluminum alloys”, *Energy*, 77 (2014), pp. 720-731.
- (7) 生野, 稲垣, 橋本, 奥田, “ウォームスタート付き内点法に基づく大変形接触解析手法”, *日本計算工学会論文集*, 2018 (2018), p. 20180009.
- (8) FrontISTR 研究会, <https://www.frontistr.com/>, 2018 年 10 月 22 日最終アクセス.
- (9) 棚橋, 灘口, “GSMAC 有限要素法による立方体内の 3 次元非定常自然対流の数値解析 (第二報)”, *ターボ機械*, 15 (1987), pp. 389-396.