F34

SPH 法を用いた傾斜機能材料の半溶融加工のシミュレーション

SPH (smoothed particle hydrodynamics) simulation for the semi-solid forming of functionally graded material (FGM)

山下 裕也 (鹿児島大院) 〇正 岡田 裕 (鹿児島大)
正 酒井 謙 (横浜国大) 正 福井 泰好 (鹿児島大)

Yuya YAMASHITA, Kagoshima University, 1-21-40, Korimoto, Kagoshima, 890-0065, Japan

Hiroshi OKADA, Kagoshima University, 1-21-40, Korimoto, Kagoshima, 890-0065, Japan

Yuzuru SAKAI, Yokohama National University, 79-5, Tokiwadai Hodogaya-ku, Yokohama, 240-8501, Japan

Yasuyoshi FUKUI, Kagoshima University, 1-21-40, Korimoto, Kagoshima, 890-0065, Japan

Key Words: Smoothed Particle Hydrodynamics, Functionally Graded Material, Semi-Solid Forming

1. 緒言

傾斜機能材料 (Functionally Graded Material, FGM) は、材料を構成する要素 (金属, セラミックス, 繊維など) を連続的または段階的に制御することで, 希望とする複数の機能を自在に変化させることができる。これにより, 使用環境に合わせて熱応力の緩和, 耐摩耗性の向上, 材料剛性の制御などを考慮した材料の作製が可能である。しかしながら, 加工に伴い材料欠陥を発生しやすく, 材料の塑性加工性に問題がある。また, 分散粒子が粗大である場合において, 実用材料としては延性や破壊靱性に欠けるという欠点があり, それを克服することが重要な課題となっている。

そこで, 本研究ではこのような FGM を加工する方法として半溶融加工⁽¹⁾を用いている。半溶融加工とは, 母相金属が半溶融状態, 分散粒子は固体という固液混合状態において加圧変形させる方法である。分散粒子の破断に伴う欠陥は溶融母材で補修され, 欠陥のない FGM 製品に加工することができる。また, 最終的な製品形状に近い形に作製可能である。よって, 半溶融加工時の母相金属/分散粒子の流動状態を知ることが, FGM 製品の成形において組成傾斜の自在な制御を可能とするために重要である。

一方, SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法⁽²⁾は連続体を粒子 (計算点) の集合で表し, 粒子運動によって流体運動をシミュレーションする方法である。ラグランジュ的に計算を行うため, 解析領域が大変形し, 境界が複雑に移動する問題の解析も可能である。したがって, 自由表面を持つ流体や混相流等の非圧縮性粘性流体の流動解析に有力な手法である。そのため, SPH 法は半溶融加工に対する解析手法として, Okada ら⁽³⁾のような有限要素法に基づく手法よりも原理的に優れていると言える。

本報では, SPH 法を用いた FGM 半溶融加工時の二次元流動解析結果について述べる。

2. 半溶融加工実験

溶湯後方押し出し法による FGM 容器作製の概略図を図 1 に示す。コンテナの寸法は, 幅 39mm, 高さ 39mm であり, この中に幅 39mm, 高さ 8mm の FGM ビレットが挿入されている。この FGM ビレットには, アルカン・アルミニウム・リミテッド社の Duralcan F3D.20S (Al-20vol%SiC 合金) を母材として遠心鑄造法により作製した Al-20vol%SiC FGM を用いた。半溶融加工において, 母相金属は半溶融状態, 分散粒子は固体という固液混合状態になるように設定温度まで加熱し保持され, その後, ポンチに荷重を与え FGM 容器を成形する。

このとき, FGM との流動の様相の違いを見るために, 均一供資材である Duralcan に関しても実験を行った。また, ポ

Fig.1 Schematic illustration for the Container; Punch and FGM Billet.

ンチには, ポンチ幅と押し込み深さがそれぞれ異なる 3 種類 (ポンチ 1 (幅 33mm, 押し込み深さ 4mm), ポンチ 2 (幅 26.4mm, 押し込み深さ 5mm), ポンチ 3 (幅 22mm, 押し込み深さ 6mm)) が用いられ, この形状は, 溶湯の押し込み流量が同じになるように設計してある。

3. 解析モデル

分散粒子の融点は, 母相金属の融点よりも高いので, ビレットを母相金属の融点まで加熱しても分散粒子は固体のままである。このとき, 溶湯後方押し出し法を用いて成形加工を行うと, ポンチとコンテナの間で FGM ビレットは混相流のような状態で流れる。したがって, 本研究では, 母相金属を非圧縮性流体, 分散粒子を剛体粒子として扱い, 多数の剛体粒子が分散している流体のモデル化を行う。ビレット上側領域は母相金属 (Al) だけ存在し (Al リッチ), 下側領域に分散粒子 (SiC) が多く含まれる (SiC リッチ) ように剛体粒子を配置する。このモデルの剛体粒子の体積分率は, 実験で測定したビレットにおける分散粒子の体積分率により決定される。図 2 に本研究で用いた解析モデルの概略図を示す。剛体粒子は円形 (球形: 三次元解析の場合) であるとし, 粒子径は一定であると仮定する。1 個の剛体は 12 個の粒子 (計算点) で表現し, その相対位置は不変である。

Fig.2 Schematic illustration for Analysis model.

4. 解析手法

4.1 支配方程式 溶湯金属の半溶融加工時の材料流れは、非圧縮粘性流体として取り扱う。

デカルト座標系での支配方程式として Navier-Stokes 方程式が次式のように与えられる⁽²⁾。

$$\frac{Dv_{\alpha}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_{\alpha}} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\alpha\beta}}{\partial x_{\beta}} + f_{\alpha} \quad (1)$$

$$\tau_{\alpha\beta} = \mu \left(\frac{\partial v_{\alpha}}{\partial x_{\beta}} + \frac{\partial v_{\beta}}{\partial x_{\alpha}} - \frac{2}{3} \delta_{\alpha\beta} \frac{\partial v_{\gamma}}{\partial x_{\gamma}} \right) \quad (2)$$

ここで、 t は時間、 v は速度、 p は圧力、 μ は粘性係数、 f は単位質量あたりに働く体積力、 τ は粘性応力テンソル、 α, β, γ はデカルト座標成分である。

4.2 SPH 法 SPH 法⁽²⁾では、物理量 $f(x)$ をカーネル関数 W を用いて補間すると、以下に示すような式となる。

$$f(x) \approx \int f(x') W(x - x', h) dx' \quad (3)$$

W はカーネル関数、 x は評価中心の位置ベクトル、 x' は任意粒子の位置ベクトル、 h はカーネルの広がりを表すパラメータである。

4.3 SiC 粒子のモデル化 剛体は複数の粒子（計算点）の集合とし、その相対位置が不変であるとする⁽⁴⁾。まず、各タイムステップにおいて、流体と剛体を区別せずに両方とも流体粒子として計算を行い、速度と位置を求める。このままだと剛体の相対位置がずれたままなので、そのずれを修正するための計算を剛体粒子に対してのみ行う。このとき、剛体の重心の並進運動と回転運動による運動量が修正の前後で保持されるように速度と位置を修正する。粒子の速度は、

$$v_i = T + (x_i - x_g) \times \omega \quad (4)$$

で与えられ、これを用いて剛体粒子間の相対位置も修正する。ここで、 T は剛体重心の並進速度ベクトル、 ω は剛体重心の角速度ベクトル、 x_g は剛体の重心座標である。

5. 数値解析例

解析対象は、母相金属 Al 中に微小粒子 SiC が分散する Al-20vol%SiC FGM と Duralcan であり、図 3 にその解析モデルを示す。このモデルの粒子間距離は 0.02mm、総粒子数は 817712 であり、そのうち、コンテナは 23448、ポンチは 11913、ビレットは 782351 (Al ; 625883, SiC ; 156468) である。時間増分は 0.00001s とし、10000 ステップ解析を行った。SiC と Al の密度は、それぞれ 3200kg/m³ と 2370kg/m³ である。材料の加工温度は 590℃ であり、このときの Al の粘性係数は 4.5×10⁻³Pa・s である。また、ポンチの降下速度はポンチ 1 が 40mm/s、ポンチ 2 が 50mm/s、ポンチ 3 が 60mm/s とする。

図 4 に FGM と Duralcan の解析結果、図 5 にポンチ 1 を用いて半溶融加工したときの体積分率の分布を解析と実験の場合に関して示す。これらの図より、すべてのポンチにおいて FGM ビレットは、Al が SiC よりも上側に流れ、Duralcan ビレットに関しては、ほぼ均一に SiC 粒子が流れているのが分かった。

(a) FGM Billet

(b) Duralcan Billet.

Fig.3 Analysis model (Punch 1).

(1) Punch 1

(2) Punch 2

(3) Punch 3

(1) Punch 1

(2) Punch 2

(3) Punch 3

Fig.4 Numerical results of semi-solid forming, for the case of (a) FGM and (b) Duralcan Billet.

(a) Analysis

(b) Experiment

Fig.5 Volume fraction of SiC particles for FGM Billet (Punch 1)

6. 結言

現在まで、二次元 SPH 法解析と実験の比較を行ってきた。比較的簡単な U 字形製品加工では解析と実験結果に良好な一致をみた。今後は三次元解析を行い、複雑な三次元形状を持つ機械部品に対する傾斜機能材料のニアネットシェイプ加工の予測に挑戦していく予定である。

参考文献

- (1) Fukui, Y. et al., *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol.31A, (2000), pp.2627-2636.
- (2) Sakai, Y. et al., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.70, No.696, (2004), pp.1949-1956.
- (3) Okada, H. et al., *Composites, Part A*, Vol.34, (2003), pp.371-382.
- (4) Koshizuka, S. et al., *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.26, (1998), pp.751-769.