

遠心力固相法による傾斜機能材料中の 粒子挙動に関する実験的研究

田中 智行* 鳥居 修一** 矢野 利明** 渡辺 義見***

Experimental Study on Particle Motions during Fabrication of Functionally Graded Materials by Centrifugal Solid-Particle Method

Satoyuki TANAKA, Shuichi TORII, Toshiaki YANO, Yoshimi WATANABE

The purpose of the present study is to investigate the transport phenomena in the casting mold during fabrication process of Functionally Graded Materials (FGMs) by centrifugal solid-particle method. Emphasis is placed on the particle motion in the casting mold by the use of a cold model centrifugal casting. An acrylic cylindrical drum is used as the casting mold, and spherical-glass-particles and linoleic acid are used as the particle-fluid mixture. Transport phenomena in the rotating drum are visualized, and the velocity profile in the drum is obtained by PTV method. The velocity profile near the wall is in good agreement with the theoretical one predicted by BBO (Basset-Boussinesq-Ossen) equation.

Keywords: Functionally Graded Materials, Centrifugal solid-particle Method, Flow Visualization

1. 緒論

傾斜機能材料^{(1)~(3)} (Functionally Graded Materials)とは材料の組成・組織を材料設計に応じて変化させることが可能な材料である。このような材料を製作することで、急激な温度勾配により発生する熱応力の緩和を可能にする材料を製作できるだけでなく、さまざまな機能を保持するコンパクトな材料設計が可能になる。従って、宇宙空間をはじめとした極限環境下、エネルギー分野、バイオマテリアルなどの広範囲の分野においての使用⁽⁴⁾が今後期待されている。

現在、この傾斜機能材料を製作する方法として、粒子配列法、電解析出法、プラズマ溶射法、燃焼合成法、放電プラズマ焼結法など、使用する材料、あるいは形状などからさまざまな製作方法が提案されている。それらの一つとして比較的大型の傾斜機能材料が廉価で製作できる遠心力法^{(5)~(6)}が注目されている。この遠心力法は、強化相粒子を含む金属を溶解炉で溶融し、高速回転する鋳型に流し込み、鋳型内部の溶融金属と強化相粒子との密度差による遠

心力の差を利用して組成を傾斜させて製作する。

この方法は、製作温度より高い融点を持つ強化相粒子を溶解することなしに固体のまま凝固させ傾斜させる遠心力固相法、また製作温度より低い融点を持つ強化相粒子を使用し、凝固と共に強化相粒子が晶出し傾斜分布する遠心力晶出法の2種類がある。本研究では比較的解析が容易な遠心力固相法に注目した。

遠心力固相法は、鋳型の温度、回転数、粒子の体積分率、粒子の大きさなどを適宜制御することで目的の傾斜を持つ傾斜機能材料を製作することが可能である。しかし、現段階ではこの制御方法が確立されていない。そこで、今回の研究の目的は、理想の傾斜を持つ傾斜機能材料を製作するための最適条件を決定する実験式を導出することである。そのためには傾斜機能材料の製作過程における鋳型内部の流動現象を把握することが必要不可欠になってくる。しかし、実際に使用されている鋳型は金属で作られている上に鋳型内部の温度を制御するために加熱炉で覆われている。そのため鋳型内部の流動現象を把握することは困難である。そこで、今回の実験ではコールドモデルによる遠心鋳造を行い鋳型内部の可視化を行った。さらに PTV (Particle Tracking Velocimetry) を使用することにより、定常状態における流動現象の速度分布を速度ベクトル図により求めた。さらに円筒壁面付近の粒子の速度を求め、粘

2002年8月31日受理

* 博士前期課程機械工学専攻

** 機械工学科

*** 信州大学繊維学部機能機械学科

性流体中の粒子の運動方程式として知られる BBO 方程式 (Basset-Boussinesq-Ossen) を使用し、導出した速度との比較、検討を行った。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

今回の実験装置を Fig. 1 に示す。長さ 400 (mm)、内径 200 (mm) のアクリル円筒を水平におき、厚さ 10 (mm) のアクリル円盤で中心部を仕切り、片方の空間で遠心鑄造を再現した。またもう片方の空間は可視化するための CCD カメラを設置した。そして、アクリル円筒軸中心を金属棒で貫通させ、片方にはベアリングのみを、またもう片方には、ベルト、プーリーを介しモーターに接続し、アクリル円筒全体を駆動させた。遠心鑄造再現部には、作動流体として高粘度のリノール酸を使用し、粒子として球状のガラスビーズを使用した。また、実際の遠心鑄造を再現するために、実験中は円筒中心を中空にした。そして、シリンドリカルレンズを使用し、イオンレーザーをシート状 (1mm) にして、円筒に対して垂直に照射し流動現象の可視化を行った。今回の実験では可視化に重点を置くために、リノール酸に対するガラスビーズの体積分率は、実際の条件とは異なり、ほぼゼロとした。使用した材料の物性値を次に示す。リノール酸の粘度はエングラール粘度計で計測され、286 (K) において $\mu_f=100$ (mm²/s) であり、またその密度は $\rho_f=0.87 \times 10^3$ (kg/m³) である。ガラスビーズの密度は $\rho_p=2.52 \times 10^3$ (kg/m³) であり、粒径が $d_p=75 \sim 105$ (μ m) (平均粒径 90 μ m) のものを使用した。

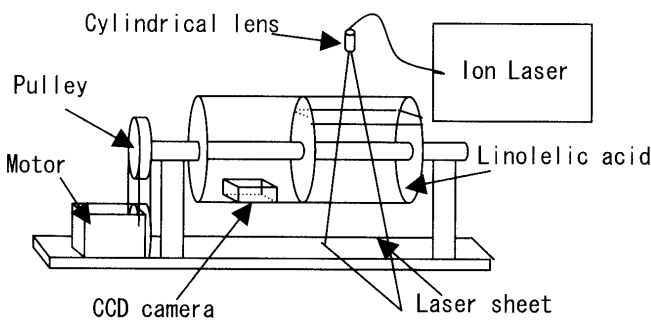


Fig. 1 Experimental apparatus

アクリル円筒の回転数については遠心鑄造を行う際に一般的に使用される重力倍数を用いた。重力倍数は遠心力による加速度を重力による加速度で除した値であり、その式を(1)に示す。

$$G = \frac{F}{g} = \frac{2\pi^2}{g} Dn^2 \quad (1)$$

一連の実験において、アクリル円筒の回転数を 950 (rpm) に設定したため、円筒壁面における重力倍数は $G=100$ になる。

2.2 理論解析

今回の実験においてアクリル円筒が回転開始後、流体と円筒壁面との間にせん断力が働かなくなった時、流体は円筒壁面と同速度を保ち、剛体的運動を行うと仮定する。この場合、流体より密度が大きいガラスビーズは円筒壁面に対して流体内部を同心円状に移動していく。今回はこの粒子を粘性流体における球状粒子の運動方程式、つまり BBO (Basset-Boussinesq-Ossen) (7)~(10) 方程式を適応し解析を行った。ここで、(1) 粒子は球状であり、流体に対しての相対速度はストークスの法則に従う、(2) 粒子の回転によるマグナス力、サフマン力は考慮しない、(3) リノール酸に対する粒子の体積分率が極めて小さいために粒子間の衝突を無視する。以上のことを考慮した場合の非圧縮粘性流体における BBO 方程式を以下に示す。

$$\begin{aligned} m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = & 3\pi\mu_f d_p (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p) \text{-----定常抵抗} \\ & + \frac{\rho_f}{\rho_p} m_p \frac{D\mathbf{u}_f}{Dt} \text{-----圧力勾配項} \\ & + \frac{1}{2} \frac{\rho_f}{\rho_p} m_p \left(\frac{d\mathbf{u}_f}{dt} - \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} \right) \text{----仮想質量項} \\ & + \frac{3}{2} d_p^3 \sqrt{\pi\mu_f \rho_f} \int_0^t \left(\frac{d\mathbf{u}_f}{d\tau} - \frac{d\mathbf{u}_p}{d\tau} \right) \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} \text{---バゼット項} \\ & + G (m_p - m_f) \mathbf{g} \text{---外力項} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)の右辺の第1項はストークスの抵抗であり、抗力係数が $C_D=24/Re$ で与えられる場合の球状粒子に働く抵抗力である。第2項目は球状粒子を取り巻く流体の圧力勾配項であり、第3項は粒子が外力を受けて加速する場合の仮想質量項である。また、第4項はバゼット項であり、流れの中に瞬間的に大きな速度勾配がある場合に発生する項である。最後の項は粒子に働く外力項である。今回の実験では、流体と粒子の密度差が比較的大きいこと、また流体内に急激に変化する要因がないことから、圧力勾配項、仮想質量項、バゼット項は無視することが可能である。また、外力項は遠心力と重力が挙げられるが、重力に比べて遠心力が非常に大きいことから重力による影響は無視した。以上のことを考慮して、式(2)を整理したものを式(3)に示す。

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = -3\pi\mu_f d_p \mathbf{u}_p + G(m_p - m_f)\mathbf{g} \quad (3)$$

ここで、式(3)に粒子質量 $m_p = \pi d_p^3 \rho_p / 6$ また、粒子の体積と等しい流体の質量を $m_f = \pi d_p^3 \rho_f / 6$ として代入した。それを式(4)に示す。

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} + \frac{18\mu_f}{d_p^2 \rho_p} \mathbf{u}_p - \frac{|\rho_p - \rho_f|}{\rho_p} G\mathbf{g} = 0 \quad (4)$$

式(4)は時間 t (s)に関する線形一階の微分方程式であり、 $t=0$ において、 $\mathbf{u}_p=0$ の初期条件を与えると、以下の式(5)になる。

$$\mathbf{u}_p = \frac{d_p^2 |\rho_p - \rho_f| G\mathbf{g}}{18\mu_f} \left[1 - \exp\left(\frac{-18\mu_f t}{d_p^2 \rho_p}\right) \right] \quad (5)$$

また式(5)の \exp の項は時間の経過と共に0に近づき、式(6)を導き出すことができる。

$$\mathbf{u}_p = \frac{d_p^2 |\rho_p - \rho_f| G\mathbf{g}}{18\mu_f} \quad (6)$$

上式の右辺には、時間 t (s)に独立しているため式(6)は終端速度に達していることが分かる。

3. 結果と考察

3.1 回転円筒内の可視化

今回の実験において回転円筒内の流動現象を、流体と円筒壁面との間にせん断力が働いている場合を非定常状態、もう一つは流体の速度と円筒壁面の相対速度がほぼ0になった場合を定常状態として解析を行った。回転開始約7(s)後における非定常状態の可視化図をFig.2に示す。

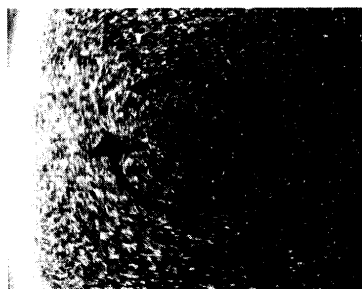


Fig.2 Photograph of unsteady liquid-particle mixture in rotating drum

図中心には、流体に対して時計周りに働くせん断力の影響による渦が発生していることが確認できる。この渦は、時間の経過と共に上昇し消えていく。次に定常状態の可視化画像をFig.3に示す。

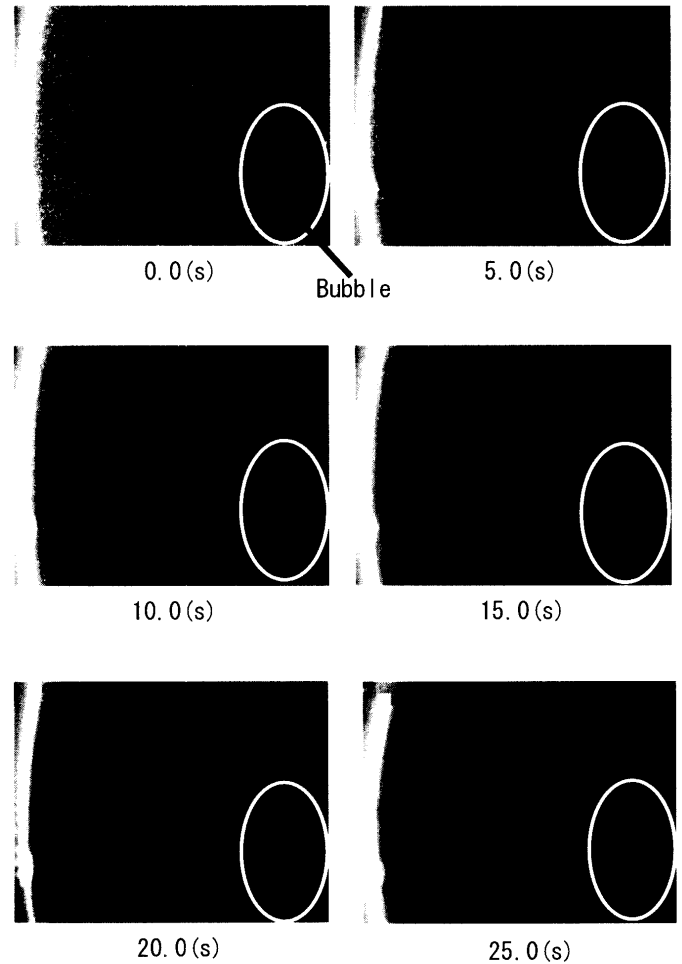


Fig.3 Time history of the particles in rotating drum

図は定常状態後の回転円筒内部の5.0(s)間隔の可視化画像であり、開始時間0.0(s)は定常状態開始からの時間である。粒子は円筒の中心から円筒壁面に対して時間の経過と共に移動している。また円筒中心部では時間の経過に関わらず、ほぼ移動することのない気泡の発生を確認することができる。この気泡は遠心铸造時に発生する鑄巢になるものと思われる。また、25.0(s)経過後は粒子は完全に壁面に付着している。

3.2 粒子の速度ベクトル図

次に、粒子の速度ベクトル図をPTVを使用し、時間間隔1/15(s)の2枚の画像を使用することにより粒子の速度を求めた。その図をFig.4に示す。この

速度ベクトル図(b)より粒子の移動にはほぼ乱れが無いことが確認できる。また、円筒壁面および、円筒中心部では、レーザーの影響、気泡の影響より過誤ベクトルが発生していることが確認できる。

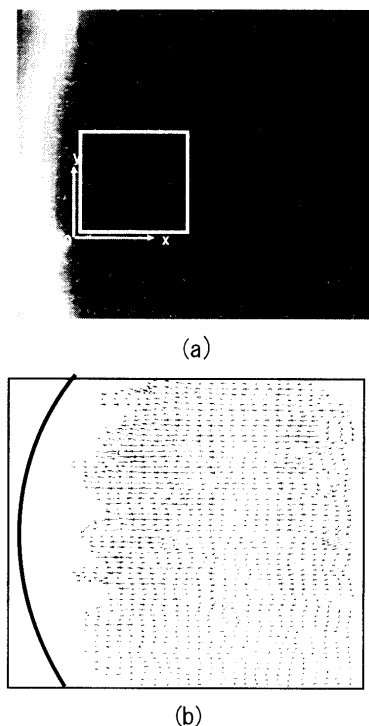


Fig. 4 Velocity profile of the particles

Fig. 4 において壁面付近の粒子の速度を測定するために、Fig. 4 (a)に示すような座標を設定した、そして式(6)から得られた終端速度の理論式を平均粒径 $90(\mu\text{m})$ に適応した場合の値との比較を行った。この座標軸内の粒子の速度を計測して得られた速度を Fig. 5 に示す。

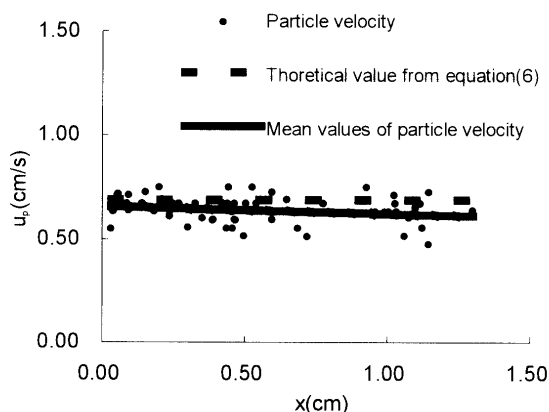


Fig. 6 Comparison of theoretical values obtained from Eq. (6) with experimental values

円筒壁面の粒子速度は BBO 方程式から導き出された理論式から与えられた終端速度とほぼ近い値を示すことから、今回の実験に BBO 方程式を適用することの有用性が証明された。しかし、グラフでも理解できるように完全な一致を示していない。この原因として二つの要因が挙げられる。一つ目は、重力倍数が粒子の移動に伴って変化していること、もう一つは、今回の実験において、非定常状態から定常状態までの遷移にある程度の時間が経過してしまうため、早い段階で大きな粒子は円筒壁面に付着してしまい、比較的粒径の小さい粒子を解析してしまったためと思われる。この問題を解決するために、重力倍数を時間の関数として考慮すること、また、使用する粒子の幅を狭めて実験を行う必要がある。

4. 結論

遠心力固相法を用いた傾斜機能材料の粒子挙動に関するコールドモデル実験を行い以下の結論を得た。

- (1) 採用した流動現象の可視化法は、回転円筒内部の流動現象および、粒子の移動を可視化するのに効果的である。
- (2) PTV の使用により回転円筒内部の粒子の速度分布を得ることができる。
- (3) 可視化画像の速度ベクトル図と、BBO 方程式から導き出された理論式(6)とを比較することにより、BBO 方程式の有用性をはかることが可能である。

おもな記号

- D : アクリル円筒の直径 (mm)
- d_p : 粒子直径 (m)
- G : 重力倍数
- g : 重力加速度 (m^2/s)
- m_f : 流体の質量 (kg)
- m_p : 粒子の質量 (kg)
- n : 回転数 (rpm)
- Re : レイノルズ数
- t : 時間 (s)
- u_f : 流体の速度 (m/s)
- u_p : 粒子速度 (m/s)
- x : 座標 (cm)
- ρ_f : 流体の密度 (kg/m^3)
- ρ_p : 粒子の密度 (kg/m^3)
- μ_f : 流体の動粘性係数 (m^2/s)

参考文献

1. Watanabe, Y., Yamanaka, N. and Fukui, Y.,

- Control of composition gradient in a metal-ceramic functionally graded material manufactured by the centrifugal method. *Composites Part A*, 1998, 29A, pp.595-601.
2. Watanabe, Y., Yamanaka, N. and Fukui, Y., Orientation of Al_3Ti platelets in *Z. Metallkd.*, 1997, 88, pp.717-721.
 3. Fukui, Y., Fundamental investigation of functionally gradient material manufacturing system using centrifugal force. *JSME Int. J. Series III*, 1991, 34, pp. 144-148.
 4. 工業調査会、傾斜機能材料、pp. 349-356.
 5. Watanabe, Y., Kawamoto, A., Matsuda, K.: Particle size distributions of functionally graded materials fabricated by the centrifugal solid-particle method, *Composites Science and Technology*.
 6. Yamanaka, N., Watanabe, Y., Fukui, Y. and Nunomura, S., Manufacturing process of Shirasu/Aluminium FGM and its thermal conductivity. *J. Jpn Inst. Light Metals*, 1994, 44, pp.330-335 (in Japanese).
 7. Basset, A. B. On the motion of a sphere in a viscous liquid. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 179, 43-63. (1888)
 8. C. Crowe, M. Sommerfeld, Y. Tsuji: *Multiphase Flows with Droplets and Particles*, Chap4, CRC Press(1997).
 9. S. L. Soo: *Fluid Dynamics of multiphase Systems* Chap2, Blaisbwill Publishing Company.
 10. 第2版 流体力学ハンドブック：日本流体力学会編、丸善株式会社