B 2 0 5 磁気共鳴画像法を用いた粒子濃厚分散流体の速度分布計測

保田 和則 ○ (大阪大学), 小原 教弘 (大阪大学)
千葉 訓司 (滋賀大学), 森 教安 (大阪大学)

Velocity Profile Measurement of Concentrated Suspension using Magnetic Resonance Imaging Velocimetry

Kazunori YASUDA, Norihiro OHARA, Kunji CHIBA and Noriyasu MORI

Axial velocity distribution of a steady tube flow was measured using magnetic resonance imaging (MRI). Test fluids were aqueous solutions of carboxymethyl cellulose (CMC) containing solid particles (glass flake or glass bead) at high volume fractions. As a result, we observed a plug-like velocity distribution in the tube flow. This velocity distribution measured by MRI had a good agreement with that numerically calculated using the viscosity curve of the test fluid. Furthermore the effect of suspended particles on the velocity distribution in the tube flow with an abrupt contraction was also examined. We observed a plug flow for the CMC solution and the bead suspension, but a concave region in the velocity distribution near the centerline at upstream of the contraction for the concentrated flake suspension. This velocity distribution is caused by the shape of the glass flake particle.

Keywords: Magnetic resonance imaging, Non-Newtonian fluid, Velocity profile, Concentrated suspension flow, Abrupt contraction flow

1. はじめに

固体粒子を流体に分散させた粒子分散流体は、複合材料の成形加工産業や紙パルプ産業などのさまざまな工業分野で見られる。分散媒としての流体には、水のようなニュートン流体はもちろん、熔融プラスチックのような非ニュートン流体も多く使用されている。粒子分散流体では、粒子を分散媒に希薄に分散させただけでも、その流動が大きく変化することがすでに知られている¹⁾。しかし添加粒子は、複合材料において強化材として用いられている例からもわかるように、工業的にはその体積分率がたいへん大きい。そのため流体は不透明となり、流路内での速度分布はよく知られていない。そこで本研究では、樹脂系複合材料の強化材として最もよく用いられるガラス粒子を非ニュートン流体中に高い体積分率で分散させ、その流体の流路内速度分布を調べることを目的とする。本研究では固体粒子として板状粒子を用い、比較対象として球状粒子も用いた。

高濃度で粒子を分散させた粒子分散流体の流路内速度分布を計測するために、本研究では磁気共鳴画像法 (Magnetic Resonance Imaging, MRI) を用いた²⁾。これは、試料流体が不透明なためである。MRI を速度計測に利用した研究例としては、円管流路における紙パ

ルプとトマトパルプの粒子分散流体の流れ解析を行なった例³⁾や、球を充填した円管内の流れの流速分布を測定した例⁴⁾がある。しかし、本研究では、これらで用いられているような強い磁場強度を有する超伝導磁石を利用した MRI 装置ではなく、1 T という比較的弱い磁場強度を持つ永久磁石を用いた MRI 装置を用いた。さらに、MRI 計測で得た MR 画像から速度を計算するために、位相の変化から速度を計測する位相法⁵⁾を導入した。

流れ場については、従来の研究のほとんどが単純な流れ場しか扱っていないので、本研究では、複雑形状の流路として、非ニュートン流体の流れの特徴がよく現れる急縮小流路を取り上げた。

2. 試料流体と流路

2.1 試料流体

試料流体は、分散媒としてのカルボキシメチルセルロース (CMC) 2 wt% 水溶液に、粒子を高濃度で分散させた流体である。分散粒子として板状粒子であるガラスフレーク (厚み 5 μm) および球状粒子であるガラスビーズを用い、CMC 水溶液にそれぞれ最大 3 % の体積分率で混合した。さらに、MRI 撮像における

Table 1: Test fluids.

Test fluid	Suspending fluid	Particle (v/v%)
SF	CMC 2 wt%	None
FL-1		Glass flake, 1 %
FL-3		Glass flake, 3 %
BE-3		Glass bead, 3 %

Fig. 1: Shear viscosities of test fluids.

緩和時間を短くし、MR 信号を強くするために、緩和剤として塩化マンガン (MnCl_2) をすべての流体に 50 mmol/l の濃度で溶解させた。試料流体の一覧を表 1 に示す。本研究では、分散媒 (suspending fluid) のみの流体を流体 SF、ガラスフレーク分散流体を流体 FL、ガラスビーズ分散流体を流体 BE と呼ぶ。

これらの分散粒子は、大きさがいずれも均一ではないので、粒子の大きさの分布を測定した。その結果、フレークの平均面積は $18 \mu\text{m}^2$ 、ビーズの平均直径は $96 \mu\text{m}$ であった。ただし、ガラスフレークはその形状はさまざまである。

2.2 試料流体のせん断粘度特性

コーンプレート型レオメータを用いて各試料流体のせん断粘度を測定した。測定はすべて 25°C で行った。結果を図 1 に示す。ただし流体 BE-3 では粒子がコーンとプレートとの間隙で詰まりやすかったので、せん断粘度を測定できなかった。この図から、いずれの試料流体も、せん断速度が上昇するにつれせん断粘度が減少し (shear-thinning 性)、さらに流体 FL-3 では、流体 SF よりも粘度がかなり大きいことがわかる。

次に、流体 SF と流体 FL-3 について、次式で示す Carreau モデルで粘度曲線を近似し、その結果を図中の実線で示す。

$$\eta = \eta_0 \{1 + (\lambda \dot{\gamma})^2\}^{\frac{n-1}{2}} \quad (1)$$

ここで、 η は粘度、 η_0 はゼロ粘度、 λ は時定数、 $\dot{\gamma}$ はせん断速度、 n は無次元指数である。この実線から、試

Fig. 2: Schematic diagram of channel geometry.

料流体の粘度曲線は Carreau モデルで正確に表現できることがわかる。

2.3 流路

流路は、4:1 の急縮小部を有するアクリル製の軸対称円管流路 (内径 16 mm) である。流路の形状を図 2 に示す。比較のために、急縮小部を有さない流路 (内径 19 mm) も用いた。座標系は急縮小部の中心線上に原点をとり、流れ方向を z 軸、半径方向を r 軸とした。

3. 結果と考察

3.1 円管内における速度分布

MRI の位相法による流速測定の精度を確かめるため、流体 SF と流体 FL-3 を用い、急縮小部を有さない円管内の発達流れの流速測定を行った。計測はすべて 25°C で行った。流速は流れ方向成分 (z 成分) のみを測定した。測定した速度分布を数値積分して得られる流量と、実験中に流路出口で電子天秤を用いて計量した流量とを比較した結果、両者はよく一致し、高分子流体あるいは粒子分散流体の速度分布を MRI で正確に計測できることを確認した。

図 3 に、計測結果を示す。このときの MRI による撮像は、 z 軸方向に 10 mm の厚さの領域内で行った。図 3(a) と (b) はそれぞれ流体 SF と FL-3 の場合の結果である。横軸は流路半径 R で無次元化した半径方向の距離 r/R を、縦軸は平均流速 U で無次元化した流速 v/U を示す。ここで図中の $\dot{\gamma}^{(NW)}$ は、流体をニュートン流体と仮定したときの壁面上でのせん断速度を表す。図中の実線は、図 1 の粘度曲線を Carreau モデルで近似し、その結果を用いて数値計算した円管内流れの発達した速度分布である。また図中には、比較のためにニュートン流体の Poiseuille 流れの速度分布を破線で示す。

図 3(a) から、流体 SF では、ニュートン流体の場合よりも台形状の速度分布となっていることがわかる。これは、粘度の shear-thinning 性によるものである。また、実線で表示された速度分布が、MRI による測定値とよく合っていることがわかる。流体 FL-3 の速度分布

Fig. 3: Velocity distributions through a radial direction: (a) suspending fluid (SF) and (b) glass flake suspension at 3 wt% (FL-3).

を示す図 3(b) では、流体 SF の場合よりもさらに台形状が顕著となり、壁面付近でニュートン流体よりも流速が大きくなっていることがわかる。この結果は、流体 FL-3 の粘度が流体 SF よりも大きな shear-thinning 性を有していることから理解できる。またこの場合も、Carreau モデルによる速度分布（実線で表示）が MRI による測定値とよく一致している。

以上のことから、MRI の位相法を用いることにより、高分子流体とその粒子分散流体の円管内における流速分布を正確に測定できることがわかった。さらに、その速度分布は、Carreau モデルを用いて近似された粘度曲線を用いて計算した速度分布とよく一致した。

3.2 速度分布に対する急縮小部の影響

急縮小部における流速の半径方向 (r 方向) 分布を図 3 に示す。図中の z/R は流れ方向の測定位置を示す。図 4 の (a) は流体 SF の場合、(b) は流体 FL-1 の場合、(c) は流体 FL-3 の場合、(d) は流体 BE-3 の場合の結果をそれぞれ示す。比較のために、ニュートン流体の Poiseuille 流れの速度分布を各図中に実線で示した。

図 4(a) から、分散媒の流体 SF の場合は中心線付近の速度分布はフラットであることがわかるが、図 4(b)

Fig. 4: Velocity distributions in the radius direction for the test fluids.

から、板状粒子を 1 v/v% で分散させた流体 FL-1 の場合は、中心付近の速度分布がやや凹状になっていることがわかる。さらに板状粒子の体積分率を増加させたとき (図 4(c))、明瞭な凹状分布が中心線付近で見られることがわかる。いっぽう、粒子形状が球状の場合 (図 4(d))、板状粒子でみられたような凹みは観察できなかった。以上のことから、球状粒子分散流体では、粒子を濃厚に分散させても速度場には大きな影響がみられないものの、板状粒子分散流体では粒子の影響が速度分布に顕著に現れることが明らかとなった。

粘弾性流体の急縮小流れでは、曳糸性の強い流体を用いたときにこのような凹みが速度分布に生じることがある⁶⁾。本研究で用いたような流動性のある水溶液の伸長粘度は測定が困難であり、CMC 水溶液の曳糸性が定量的に評価された例はみあたらない。しかし、CMC 水溶液の曳糸性は明らかに弱く、このような流体においても、板状粒子を濃厚に分散させることで速度分布に同様の現象が見られたことは重要である。

4. 結論

本研究では、磁気共鳴画像法 (MRI) を用いて位相法により粒子分散流体の円管内流れの流速分布を測定した。流体は、板状または球状のガラス粒子を高濃度で非ニュートン流体に分散させたものを用いた。その結果、MRI 計測によって粒子濃厚分散流体の流速分布をうまく計測できた。またこのときの流速分布は、Carreau モデルで近似した流体の粘度特性を用いて数値計算した速度分布とよく一致した。さらに急縮小部では、板状粒子を分散させた流体の場合、凹状の速度分布が中心線付近で計測でき、この傾向は、粒子の体積分率が大きくなると顕著であった。しかし、同じ体積分率であっても球状粒子の場合はこのような現象が見られなかったため、この現象は板状粒子の形状の異方性によるものと考えられる。

参考文献

- 1) Chiba, K., Nakamura, K.: Numerical solution of fiber suspension flow through a complex channel, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol. 78 (1998) pp.167-185.
- 2) 巨瀬勝美: MRI (磁気共鳴イメージング) による流動計測, *日本機械学会誌*, Vol. 108, No. 1034 (2005) pp.67.
- 3) Seymour, J. D. et al.: NMR velocity phase encoded measurements of fibrous suspensions, *Phys. Fluids A*, Vol. 5, No. 11 (1993) pp.3010-3012.
- 4) Kutsovsky, Y. E. et al.: NMR imaging of velocity profiles and velocity distributions in bead packs, *Phys. Fluids*, Vol. 8, No. 4 (1996) pp.863-871.
- 5) Fukushima, E.: Nuclear magnetic resonance as a tool to study flow, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 31 (1999) pp.95-123.
- 6) Cable, P. J., Boger, D. V.: A comprehensive experimental investigation of tubular entry flow of viscoelastic fluids. Part II. The velocity field in stable flow, *AIChE J.*, Vol. 24, No. 6 (1978) pp.992-999.