

## 強磁場中回転容器内で非定常時に生じる対流が配向粒子に及ぼす影響

日大生産工 (院) ○上西 陵太 日大生産工 安藤 努  
 物材機構 廣田 憲之

## 1 まえがき

近年、超電導技術の発展によって 10 T 程度の強磁場を容易に発生させることが可能となり、今まで非磁性と呼ばれていた弱磁性物質粒子を配向させる試みがなされるようになった。そのなかに、磁気異方性を利用して粒子の方位を制御し、物理的特性を向上させる材料の作製方法がある。この際、粒子の磁化率が最も小さい軸を制御するために試料に回転磁場を印加する必要がある。しかし磁場を発生させる超電導磁石装置は大型であり、装置を回転させることが困難であるため、代わりに溶媒中に分散した粒子を容器ごと回転し、回転磁場を印加する方法が採用される。この容器回転に伴う溶媒の流れが粒子の配向を妨げ、作製材料の欠陥に繋がる可能性がある。

そこで我々は、パラメータの変更が容易であり、かつ詳細な流体挙動の可視化が可能な数値シミュレーションを用いて、回転容器内の流れを調べている[1]。本稿では複数の回転方法における回転容器内の流体の挙動を推定した。また、回転方法の違いによる流体の挙動を考察する。

## 2 シミュレーションモデル

本稿の流体解析は、非圧縮性ニュートン流体を扱うものとし、円柱座標系を用いて軸対称流の流れ場を仮定した。また、式(1)に示す連続の式、および式(2)に示す Navier-Stokes 方程式を MAC 法 (Marker and Cell Method) [2] で三次の風上差分法により解いた[1]。

$$\nabla \cdot \mathbf{u}^* = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial t^*} + (\mathbf{u}^* \cdot \nabla) \mathbf{u}^* = -\nabla p^* + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u}^*, \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}^* = (u_r^*, u_\theta^*, u_z^*)$  は速度ベクトル、 $p^*$  は圧力、 $t^*$  は時間、容器半径  $r_0$ 、容器高さ  $h$ 、角速度  $\omega$ 、粘度  $\eta$ 、密度  $\rho$  を用いて定義した。また、流れ場については式(3)に示すような軸対称流を仮定する。

$$\frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial \theta} = \mathbf{0}, \quad \frac{\partial p^*}{\partial \theta} = 0. \quad (3)$$

本稿は、無磁場下において液体の入った密閉容器を回転させる系を想定する。溶媒の粘度は水の100倍を仮定した (Table 1)。計算領域は回転軸を一边に持つ容器の  $r$ - $z$  断面とし、半径  $r_0$  および高さ  $h$  を 20 mm とした (Fig. 1)。

Table 1 Physical property of solvent

Density: $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	997.04
Viscosity: $\eta$ [Pa·s]	$(0.89 \times 10^{-3}) \times 100$

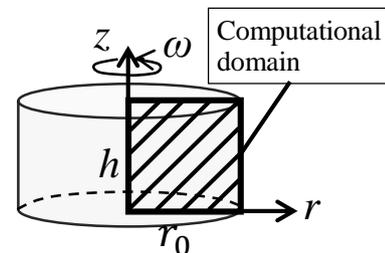


Fig. 1 Computational domain

変調回転方法は実際の実験で用いられている条件を元に以下の 2 つの方法 (Fig. 2) でシミュレーションを行った。

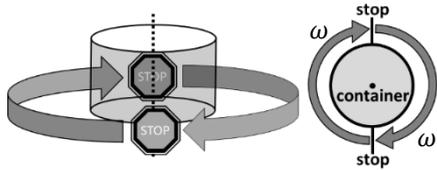
1.  $z$  軸を回転軸とし角速度  $\omega$  で 180° の回転ごとに一定時間  $t$  の静止を繰り返す [変調回転 A] (Fig. 2 (a)) [3].
2.  $z$  軸を回転軸とし角速度  $\omega_{quick}$  で 90° 回転した後、角速度  $\omega_{slow}$  で 90° 回転させる。以上を繰り返す [変調回転 B] (Fig. 2 (b)) [4].

## 3 シミュレーション結果

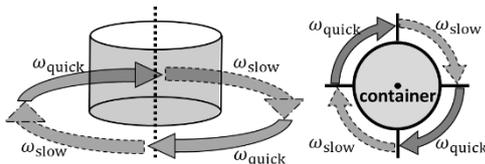
現在の研究では、容器回転に伴う周方向の流れの考慮はなされているものの、半径方向の流れは無視される場合がある。周方向速度の流れに対して半径方向速度が 1桁程度小さいオーダーであるが  $r$ - $z$  断面内の回転流は無視できない可能性がある。本研究では、半径方向の流れに注目し考察を行った。

Unsteady convection induced in a modulated rotating container in the bore of a superconducting magnet

Ryota JONISHI, Tsutomu ANDO, Noriyuki HIROTA



(a) 変調回転A [3]  
 角速度 $\omega=2\pi$  [rad/s] (=60 [rpm])  
 停止 2 [s]  
 (1回転の所要時間: 5 [s])



(b) 変調回転B [4]  
 角速度 $\omega_{quick}=4.67\pi$  [rad/s] (=140 [rpm])  
 角速度 $\omega_{slow}=\pi$  [rad/s] (=30 [rpm])  
 (1回転の所要時間: 1.21 [s])

Fig. 2 Examples of rotating container in the bore of superconducting magnet

### 3. 1 周方向の流れ

先行研究より, 例として角速度 $\omega = 2\pi$  [rad/s]で回転する容器内の半径 $r$ と容器高さ半分 $h/2$ における周方向速度 $u_\theta$ の関係を挙げ, Fig. 3に示す [5]. 壁面に近い流体から徐々に容器の回転に追従し, 20 [s]で全体が剛体回転へと移行しており, すなわち粒子への影響はゼロとなる

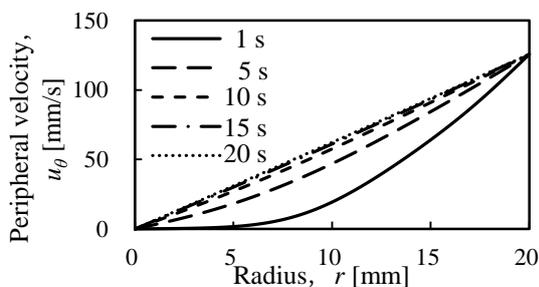
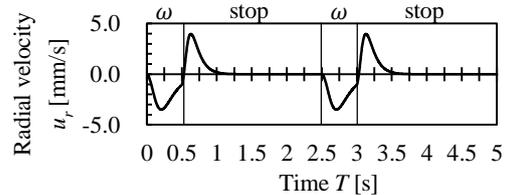


Fig. 3 Peripheral velocity of unsteady convection

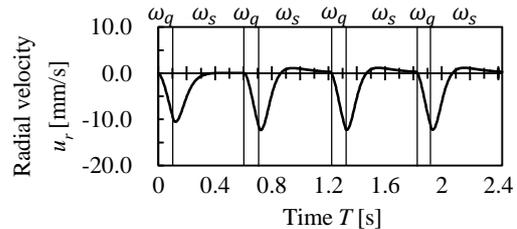
### 3. 2 半径方向の流れ

変調回転A,Bにおける容器r-z断面中心の点の半径方向速度と時間のグラフをFig. 4に示す. 変調回転A,Bにおいて半径方向速度の最大値は周方向速度よりも1桁小さいオーダー程度である. Fig. 5に, 変調回転Aにおける流速が最大となる時間でのr-z断面内の半径方向の流線と流速ベクトルを示す. Fig. 4(a), Fig. 5から, 変調回転Aにおいて容器中心近傍では流線が密集しており, 渦度が最も大きいことが言える. 壁面近傍でも流線は密集しており, 同様に配向粒子への影響は大きい. 変調回転Bにおいて $\omega_q$ は

$\omega_{quick}$ を,  $\omega_s$ は $\omega_{slow}$ をそれぞれ略記したものである. Fig. 4(b)から, 変調回転Bでは $\omega_q$ から $\omega_s$ へ移り変わった直後に最大の流速となった.

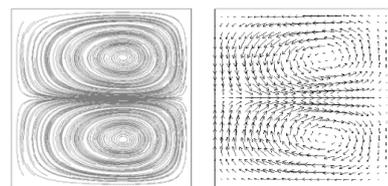


(a) 半径方向速度(変調回転A)



(b) 半径方向速度(変調回転B)

Fig. 4 Radial velocity of flow



(a)Streamline (b) Velocity vector line  
 [変調回転A] T=0.632 [s]

Fig. 5 Stream line and velocity vector line

### 4 まとめ

本研究では, 磁場を用いた材料プロセスの実用化へ向けた基礎研究として, 角速度などが異なる2つの変調回転の条件を想定した流体のシミュレーションを行った. 変調回転A,Bどちらのシミュレーションにおいても角速度が高速から低速へと移り変わるときr-z断面内における流れは最大の流速となっており, 粒子の配向を阻害する要因となり得ることが分かった.

#### 「参考文献」

- [1] 井上, 安藤, 廣田, 第61回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 (2014) 20p-F4-5.
- [2] F. H. Harlow, J. E. Welch, Physics of Fluids 8, (1965) 2182-2189
- [3] R. Nagai, S. Horii, T. Maeda, M. Haruta, J.Shimoyama. Physica, C 494 (2013) 50-53
- [4] R. Kusumi, F. Kimura, G. Song, T. Kimura. Journal of Magnetic Resonance 223 (2012) 68-72
- [5] 井上 真生, 日本大学生産工学部研究科機械工学専攻 修士論文概要集 (2015) 37-40