

強磁場材料プロセスにおける首振り回転容器内の非定常流の挙動

日大生産工 (院) ○影山 正典 日大生産工 安藤 努
物質・材料研究機構 廣田 憲之 京大院エネ科 堀井 滋

1. 緒言

超伝導技術の発展に伴い、磁場を用いた材料プロセスが盛んに研究されるようになった。その中の一つとして磁場を印加し、非接触で磁気異方性粒子の結晶方向を制御する磁場配向があげられる。Fig. 1(a)のような3方向で磁化率の異なる磁気異方性粒子を仮定したとき、静磁場中では Fig. 1(b)のように磁化容易軸が配向される。また、Fig. 1(c)に示すようにxy平面上で磁場を回転させると磁場の存在しないz軸方向に磁化困難軸が配向する。Fig. 1(d)に示す間欠回転磁場では回転行程の中に180°おきに静止点を設けることで、静止時に磁化容易軸、回転時に磁化困難軸が配向する。つまり、静磁場と回転磁場の両方の効果を期待でき、すべての軸をそろえた三軸配向が可能となる [1]。研究では前述の操作を溶媒中に粒子を分散させた状態で行い、配向したまま固めることで材料の物性の向上が期待されている。

現状、磁化困難軸を制御するためには回転磁場が不可欠であるが、超伝導磁石は常時冷却が必要で装置自体が大型であることから回転させることが困難である。そこで Fig. 2 のように一様磁場中で容器自体を回転させる方法で回転磁場と同様の効果が得ている。さらに三軸配向を行うためには回転変調磁場が必要となるため、容器を変調回転させた実験を行っている。しかし、これらの方法では溶媒が低粘度の場合に容器回転に伴う非定常流れが発生し、粒子の配向の阻害要因となり得る可能性がある。また低粘度では容器に対して溶媒が追随せず、粒子に適切な回転制御が行われないことが問題の一つとされている[2]。

そこで本研究では首振り式の回転方法について粘性を変化させた場合の流体解析を行い、容器回転に対する溶媒の追随性と非定常流が粒子に及ぼす影響を調査したので報告する。

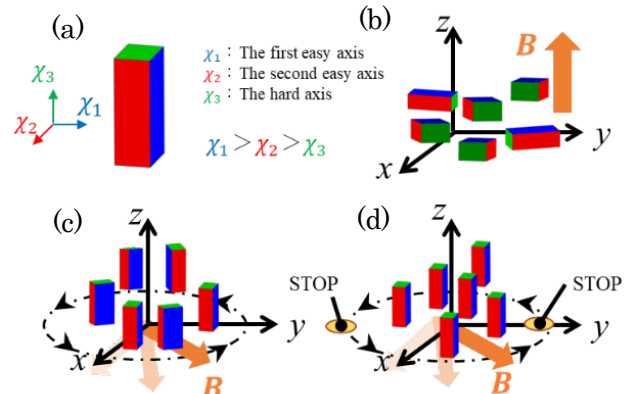


Fig. 1 (a)Particle having a magnetic anisotropy. (b)Orientation of the easy axis in static field. (c)Orientation of the hard axis in rotating field. (d)Tri-axis orientation in modulated rotating magnetic field.

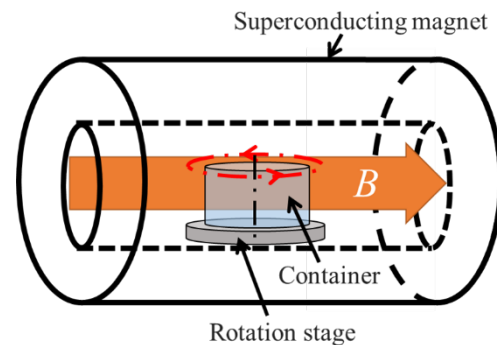


Fig. 2 Schematic of magnetic orientation experiment.

2. シミュレーションおよび条件

本研究のシミュレーションでは溶媒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) [3]で三次の風上差分法により解いた。

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

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

ここで、 $\mathbf{u}^* = (u_r^*, u_\theta^*, u_z^*)$ は速度ベクトル、 p^* は圧力、 t^* は時間であり、レイノルズ数 Re は(3)

Behavior of unsteady flow in oscillation rotating container on materials processing under high magnetic fields

Masanori KAGEYAMA, Tsutomu ANDO, Noriyuki HIROTA, Shigeru HORII

で示すように容器半径 r_0 、容器高さ h 、角速度 Ω 、粘度 η 、密度 ρ を用い、代表長さを h 、代表速度を $r_0\Omega$ とした。

$$Re = \frac{r_0\Omega h}{\eta/\rho} \quad (3)$$

また、流れ場については式(4)に示すような軸対称流を仮定とした。

$$\frac{\partial u^*}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial p^*}{\partial \theta} = 0 \quad (4)$$

本研究の流体解析においては、粒子を考慮せず、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。計算領域をFig. 3(a)に示す。計算領域は回転軸を一辺に持つ容器の断面とし、半径 r_0 および高さ h とした。回転条件はFig. 3(b)で示すように角速度 Ω で回転角度 ϕ ごとに回転の向きが変わる首振り回転とした[4]。溶媒としては25℃の水を基準とし、この水の粘度 η_w のみを $\alpha\eta_w$ (α :任意定数)のように変化させ、粘度が与える影響を調べた。各種パラメータをTable 1に示す。また、今回は代表的な点としてFig. 3(a)の $(r, z)=(10,10)$ における周方向の流速 u_θ より容器の回転に対する溶媒の角速度を算出した。

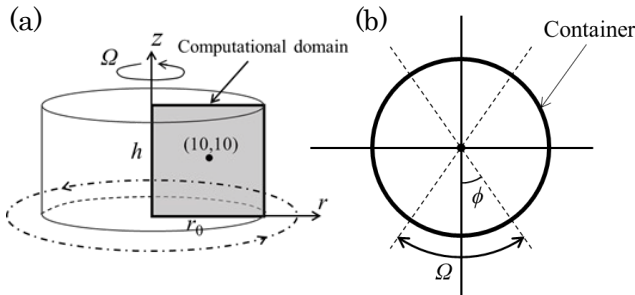


Fig. 3 (a) Computational domains. (b)Rotational condition.

Table 1 Simulation conditions	
Nomenclature	Value
Radius, r_0 [m]	20×10^{-3}
Hight, h_0 [m]	20×10^{-3}
Density, ρ [kg/m ³]	997.04
Viscoity, η [Pa·s]	$\alpha\eta_w$
Viscoity of water, η_w [Pa·s]	0.89×10^{-3}
Angular velocity, Ω [1/s]	$0.666\pi(20 \text{ rpm})$
Angular in Fig.3, ϕ [°]	20
α [-]	1,10,100,1000

3. シミュレーション結果

Fig. 4 に各粘度の $(r, z)=(10,10)$ における流体の角速度 ω_θ と比較として容器の角速度も示す。グラフからわかるように水の1000倍の粘度においては容器に対して溶媒が追従している。

100倍では $t=0.8$ [s]あたりから定常的な波形となり、角速度は容器よりも減少している。そして10倍以下では明らかに追従していない。このことから10倍以下の粘度では(10,10)の点において全く回転磁場が印加されず、単なる静磁場となってしまう磁化困難軸の制御ができないことが予想された。また、実際には流体と粒子の動きは完全に追従しないことから粒子に対する回転磁場は低いことが予想される。この結果より低粘性の場合では本来、意図した回転磁場とは大きな差があることがわかった。これは磁場配向における磁化困難軸の制御に大きな影響があることを示唆している。

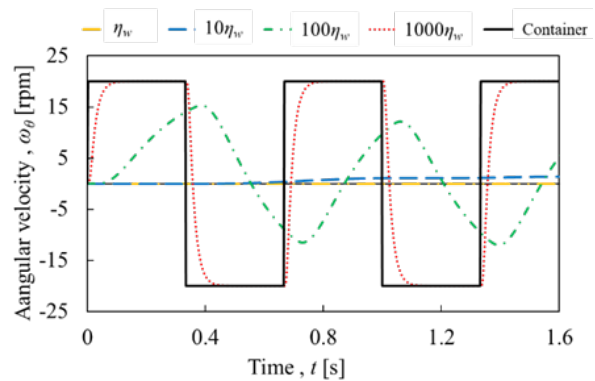


Fig. 4 Angular velocity of fluid in (10, 10).

4. 今後の展望

本研究では首振り式の回転方法におけるシミュレーションを行い、容器内の周方向の流動、それも回転方向の1点について着目した。今回の結果から粘度が変化するだけで容器内の流体の角速度変化により粒子にかかる回転磁場の効果に大きく影響することが予想された。当日は粘度を変更した場合の粒子に対する流体トルクに関して議論する。

5. 謝辞

本研究の一部はJST・研究成果最適展開プログラム(A-STEP, ステージI)の助成を受けて実施した。

参考文献

- [1] R. Nagai, S. Horii, T. Maeda, M. Haruta, J. Shimoyama, Physica C 494 (2013) 50-53.
- [2] 堀井, 山木, 下山, 土井, 低温工学 49巻1号 (2014) 3-10.
- [3] F. H. Harlow and J. E. Welch, The Physics of Fluids, 8, (1965)2182-2189.
- [4] 山木, 高知工科大学 博士論文, (2014).