

強磁場材料プロセスにおける変調回転容器内に発生する非定常流の挙動

日大生産工(院) ○影山 正典 日大生産工 安藤 努
物・材機構 廣田 憲之 京大院エネ科 堀井 滋

1. 緒言

超伝導磁石の発展に伴い、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。この研究では結晶方向を揃えることにより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、一様磁場中で容器を回転させることで回転磁場と同様の効果を得ている。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、これらの方法では容器内の分散媒が高粘度であればあまり問題にはならないが、低粘度の場合には慣性の力や粘性流の影響により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。そのため、これまで間欠回転など^[1-2]の変調回転方法について容器回転に伴う流体挙動の検討が行われてきた。

そこで本研究では現在まだ検討されていない首振り式^[3]の回転方法についてシミュレーションを行い、実験と比較をしたので報告する。

2. シミュレーション

2.1 シミュレーションモデルおよび条件

本研究のシミュレーションでは容器内部の流速と壁面近傍の流速の差に着目して行う。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) ^[4] 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^* は時間であり、レイノルズ数 Re は(3)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。

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

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。液体は 25°Cの水を仮定した(Table 1)。計算領域を Fig. 1 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 を 20 mm とした。境界条件として容器壁面より速度を与えるものとした。

Table 1 Physical property of water.

Nomenclature	Value
Density, ρ [kg/m ³]	997.04
Viscosity, μ [Pa·s]	0.89×10^{-3}

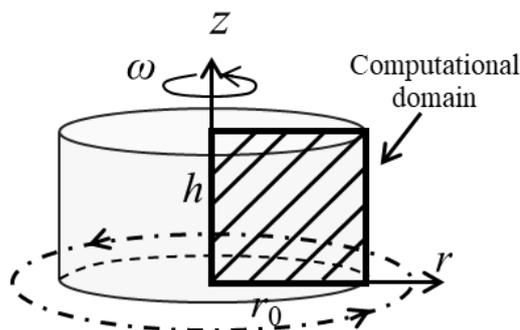


Fig. 1 Computational domain.

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

Masanori KAGEYAMA, Tsutomu ANDO, Noriyuki HIROTA, Shigeru HORII

本研究では Fig. 2(a)のような z 軸を回転軸とし角速度 ω で回転角度 θ ごとに回転の向きの変化する首振り回転とした。今回はシンプルな回転として回転角 $\theta = 180^\circ$ 、角速度 $\omega = 50$ rpm においてシミュレーションを行った。

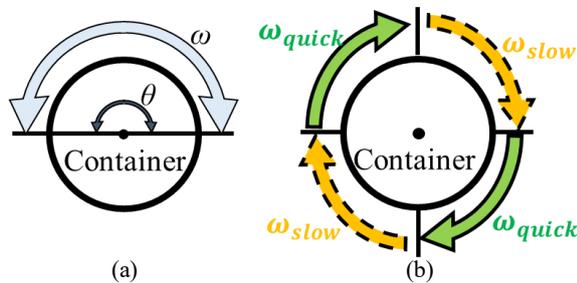


Fig. 2 Modulated rotational condition.

2. 2 シミュレーション結果

変調回転において最も流れが発生するときは回転が切り替わるときであり、上下壁面近傍において流速が増大する。回転移行するときの流れを首振り回転と先行研究^[2]の変調回転方法で Fig. 2(b)に示すような動的楕円回転と比較を行う。そこで首振り回転と動的楕円回転の回転移行後 0.1 s における結果を Fig. 3 に示す。動的楕円回転においては壁面中央に渦ができるのに対し、首振り回転においては渦が確認されなかった。このことより首振り回転の方が非定常な流れが発生しづらいことが言える。よって粒子の配向の障害が抑制される可能性がある。

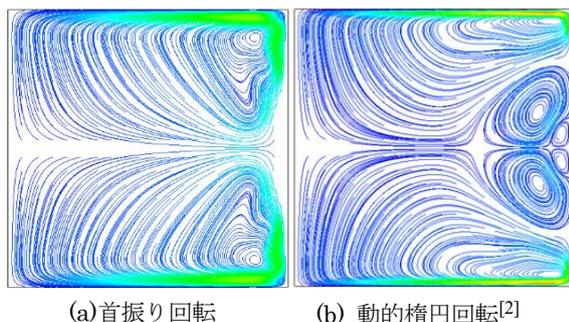


Fig. 3 The result of the simulation : 0.1 s after the switching to rotation.

3. 実験

3. 1 実験条件および方法

シミュレーションの妥当性を検証するために実験を行った。実験装置の概要を Fig. 4 に示す。変調回転はステッピングモーターに容器を固定して行った。容器内には溶媒として水を使用し、トレーサー粒子としてダイヤイオン粒子（比重：1.02，粒子径：250~700 μm ）を分散させた。容器にはレーザーシートを照

射し回転時の流れの可視化をした。また容器が円筒形であることから正面から撮影を行うと光の屈折が起こってしまうため、水で満たした水槽内で容器を回転させた。容器寸法および回転方法はシミュレーション条件と同等である。

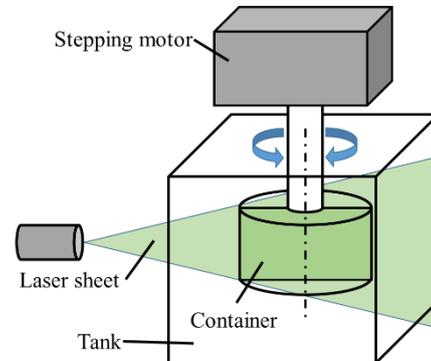


Fig. 4 Overview of experimental apparatus.

3. 2 実験結果

実験結果の一例として $\theta = 180^\circ$ 、 $\omega = 50$ rpm の結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 では回転開始から 10 s 後の状態である。容器の側面に大きな渦が 4 つ形成され、中央ではあまり流れができず停滞している様子が確認できた。

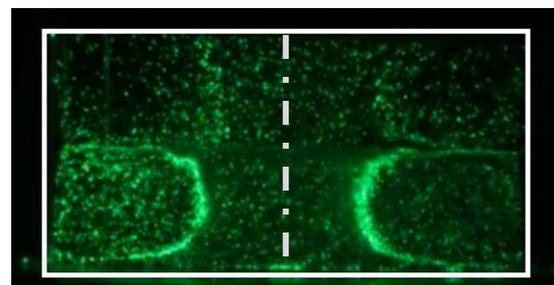


Fig. 5 After 10 s from start of rotation in the container.

4. 展望

本研究ではまだ流体挙動の検討されていない首振り式の回転方法について調査を行った。現在、粘度など種々のパラメーターを変更しながらシミュレーションを行っており、当日はそれによって得られた結果と可視化実験の結果を対比させながら、容器内の流体挙動について議論する。

「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]上西，日本大学，修士論文，(2017).
- [3]山木，高知工科大学，博士論文，(2014).
- [4]F. H. Harlow and J. E. Welch, The Physics of Fluids, 8, (1965)2182-2189.