ISSN 2186-5647

3-19

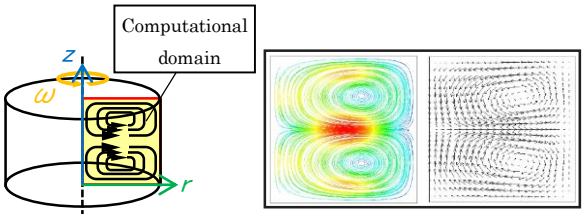
強磁場中回転容器内の非定常流れの可視化及び、配向粒子への影響

日大生産工(院)　○上西 陵太,　日大生産工(学部)尾方 茉莉佳
日大生産工　安藤 努,　物材機構　廣田 憲之

1. 緒言

近年、粒子の磁気異方性を利用して粒子の方位を制御し、材料の物理的特性を向上させる手法が注目されている。この際、粒子の磁化率が最も小さな軸を制御するために試料に回転磁場を印加することがある。回転磁場を印加する方法として、現在の研究では静磁場下で溶媒中に分散した粒子を容器ごと回転させる方法が採用されることが多い。これは磁場を発生させる超電導マグネットが大型であり装置を回転させることが困難であることに起因する。特に、変調磁場を印加し三軸配向を行う際は容器を変調回転させる必要があるため、容器内は常に非定常流れが生じている。この容器回転に伴う溶媒の流れが要因となり、作製材料中の粒子の配向度が低下する可能性がある。

そこで我々は、磁場配向過程において配向粒子が流れからうける影響を明らかにすることを目的とし、数値シミュレーションを用いて、r-z 断面内の回転容器内の流れについて報告してきた[1-2](Fig. 1)。本稿では 90 度毎に 2 つの角速度が切り替わる変調回転中の容器内で(Fig. 2)、粒子が配向する様子をシミュレーションした結果を報告する。加えて、当日は変調回転する容器内の流体の挙動を実験により可視化した結果を報告する。



(a)　(b)

Fig. 1 Simulation results[1)] (a) Flow in r-z section ; (b) One example of streamline and velocity vector line in r-z section

2. シミュレーションモデル及び条件

2.1 軸対称棒状粒子の回転運動

磁場配向過程の数値シミュレーションは、軸対称粒子を仮定し、直交座標系を用いて行った。このときの重心周りの回転運動の方程式を式(1)に示す。軸対称粒子のため、軸周りの回転運動は考慮から外した。

$$I\frac{d\boldsymbol{\Omega}_p}{dt}\times\boldsymbol{n}=(\boldsymbol{T}_M-\boldsymbol{T}_F)\times\boldsymbol{n}\ . \qquad (1)$$

ここで、I は慣性モーメント、$\boldsymbol{\Omega}_p$ は粒子の角速度、$\boldsymbol{n}$ は粒子の軸方向ベクトル、$\boldsymbol{T}_M$ は磁気トルク、$\boldsymbol{T}_F$ は粘性抵抗によるトルクである。正確には、粒子間の相互作用やブラウン運動などの影響を考慮する必要があるが、本研究では粒子が流体から受ける影響のみを考えた。$\boldsymbol{T}_F$ については摩擦係数ζ_r および流体計算の結果[1-2]から得られる渦度$\boldsymbol{\omega}$ を用いて式(2)より算出した。 流体計算は Marker-and-Cell 法により連続の式及び Navier-Stokes 方程式を円筒座標系で解いたが、それらの説明は本稿では参考文献[1)]を示すに留めるものとする。

$$\boldsymbol{T}_F=\zeta_r\left(\boldsymbol{\Omega}_p-\frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}\right),\qquad \zeta_r=\frac{\pi\eta l^3}{3\ln(l/2d)} \qquad (2)$$

ここで、摩擦係数ζ_r はシシケバブ状に球状粒子が並んでいると仮定したときストークスの抵抗法則より導出される[3)]。d は粒子直径、l は粒子長さ、η は溶媒の粘度である。

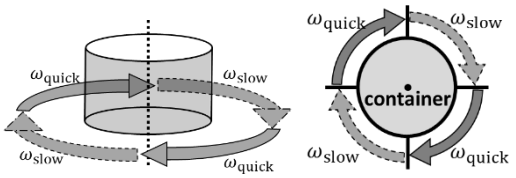


Fig. 2 Computational domain : The container rotates 90° at an angular velocity ω_{quick}, and then it rotates 90° at an angular velocity ω_{slow}. (ω_{quick} = 140 [rpm], ω_{slow} = 30 [rpm])

Visualization of unsteady flow and Effects on particles
in a modulated rotating container in the bore of a superconducting magnet

Ryota JONISHI, Marika OGATA, Tsutomu ANDO, Noriyuki HIROTA

2.2 シミュレーション条件

Table 1 に溶媒の物性値、Table 2 に粒子の形状を示す。変調回転の角速度は実際の実験で用いられている条件を元に決定した(Fig. 2)。計算領域は回転軸を一辺に持つ容器の r-z 断面とし、半径 r_0 および高さ h を 20 mm とした(Fig. 3 (a))。本稿では、計算領域内の 3 点に注目し考察を行った。配向粒子は磁化困難軸の配向が確認されたポリエチレン繊維 [4] を想定し、密度 ρ_p および異方性磁化率 $\Delta\chi$ の値を決定した。粒子の運動については、Fig. 3 (b) に示す直交座標系を考え、粒子軸が回転軸(z 軸)となす角度 Θ、x 軸となす角度 Φ を定義した。回転磁場の強度 $\boldsymbol{B}$ は5 Tとし、x 軸となす角度は β とした。初期角度を $\Theta_0 = 70°,\ \Phi_0 = 90°,\ \beta_0 = 0°$ と設定した。

Table 1 Physical property of solvent

Density ρ [kg/m^3]	997.04
Viscosity η [Pa・s]	890× 1000

Table 2 Shape of particles

Diameter d [m]	20 $\times 10^{-6}$
Length l [m]	200 $\times 10^{-6}$
Density ρ_p [kg/m^3]	935
Anisotropy $\Delta\chi$ [−]	-7.7 20 $\times 10^{-7}$

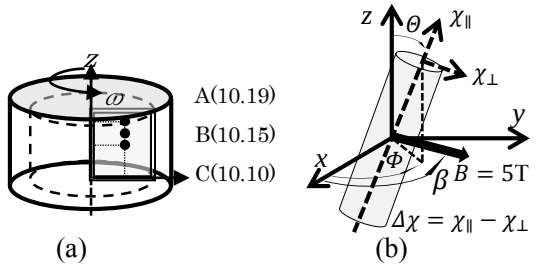


Fig. 3 Simulation conditions : (a) Computational domain ; (b) An axisymmetrical particle

3. 実験結果および検討

“時間 t ”と粒子軸が回転軸となす角度 Θ ”の関係をFig. 4 に示した。グラフには、容器の回転開始から、一回転するまでの時間分を示している。グラフから容器壁面近傍の点Aでもっとも配向が乱されていることが分かる。これはエクマン層の存在により、容器内の流れの速度勾配が大きいため、粒子にかかるトルクが大きくなることに起因する。また、グラフ内の印に示すように、低速回転から高速回転へ移行後、角度 Θ の急激な変化が見られ、粒子が溶媒内で揺さぶられていることが分かる。すなわち配向が阻害される恐れがあることが分かった。

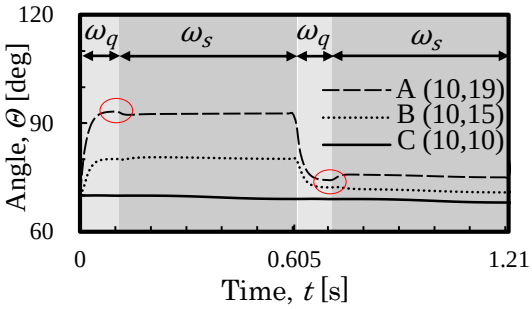


Fig. 4 Time dependence of the angle between the rotation axis of the container and the particle axis

4. 総括および展望

粒子の三軸の配向において必要不可欠である変調回転磁場であるが、最適となる回転方法は見出されておらず、実験者によって統一されていないのが現状である。そこで本研究ではこれまで検証されなかった変調回転において、容器内のいくつかの観測点で、容器回転に伴って発生する非定常流れが配向粒子へ及ぼす影響を調べた。これらの結果は、非定常流れが配向中の粒子へ及ぼす影響を解明する一助となることが期待できる。当日は、Fig. 5 に示す装置を用いて、実験によって変調回転中の容器内の非定常流れを可視化した結果も加え、シミュレーションとの比較を報告する予定である。

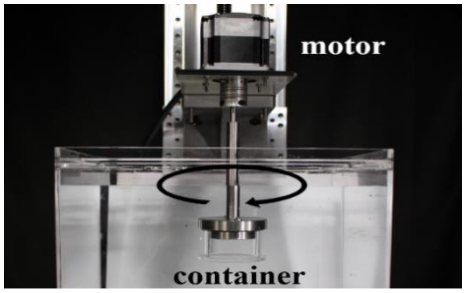


Fig. 5 Apparatus (motor and container)

「参考文献」

1) 上西, 安藤, 廣田, 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, 第 48 回日本大学生産工学部学術講演会, 2015, p-40.

2) 井上, 安藤, 廣田, 回転容器内に発生する対流の検討, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 2014, 20p-F4-5.

3) M. Doi and S. F. Edwards, The Theory of Polymer Dynamics, Clarendon press Oxford, 1986, pp.289-292.

4) T. Kimura, et al, Magnetic Orientation of Polymer Fibers in Suspension, Langmuir 16, 2000, pp.858.