数値シミュレーションによるせん断場下で

MR 流体中磁性粒子が形成する粒子構造に関する研究

日大生産工(院)○藤井 亮河 日大生産工 安藤 努 PIA 小池 修 PIA 辰巳 怜 NIMS 廣田 憲之

1. 緒言

MR流体は強磁性粒子と絶縁油との混合材料 で、磁場の影響を受けて粘性が変化する機能 性流体である¹⁾. この流体の特徴は応答速度が 3~5 msと速く、磁場印加によって連続的かつ 高精度に制御が可能なことである。この性質 を利用し,機構制御用デバイス,振動・衝撃 の緩和等の実用化実験や、精密加工、医療・ 福祉での補助器具などの応用研究が進められ ている²⁾.磁場印加による粘度の変化はMR流 体中の粒子構造に起因し, せん断場による粒 子の挙動や粒子が形成する構造と粘性変化に 相関があることは議論されてきた³⁾. また, せ ん断場中の粒子構造と粘性変化の関係を観察 した際、一定のせん断率を超えると静止壁に 向かい粒子が移動することを確認した⁴⁾. これ は外部磁場印加による配向が粒子の回転を抑 制したことに起因したものと考えられる.本 研究では1粒子での数値シミュレーションを 行い、粒子の回転の有無による上下壁面への 移動について調査した結果を報告する.

2. 数値シミュレーション

2.1 シミュレーションモデル

本研究では、粒子と流体の相互作用を考慮 した数値シミュレーションを用いる⁵⁾.まず、 構成する溶媒は非圧縮ニュートン流体として 扱い、連続の式(1)および粒子加速度項を加え たナビエストーク方程式(2)に従う.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{v} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{\nu}}{\partial t} + \boldsymbol{\nu} \cdot \boldsymbol{\nabla} \boldsymbol{\nu} = -\frac{1}{\rho_f} \boldsymbol{\nabla} \boldsymbol{p} + \frac{\eta_0}{\rho_f} \boldsymbol{\nabla}^2 \boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{\emptyset} \boldsymbol{\alpha} \qquad (2)$$

ここで、流体の速度ベクトルv [m/s],時間t [s], 溶媒密度 ρ_f [kg/m³], 圧力p[Pa],溶媒の粘性 係数 η_0 [Pa·s],粒子相関数 ϕ ,粒子による加速 度ベクトル a[m/s²]となる.次に、粒子の挙 動について、並進運動はニュートンの運動方 程式(3)を、回転運動はオイラーの運動方程式 (4)に従う.

$$m\frac{dv}{dt} = F^{c} + F^{h} + F^{m}$$
(3)
$$I\frac{d\omega}{dt} = T^{c} + T^{h} + T^{m} + T^{H}$$
(4)

ここで、粒子質量m[kg]、粒子速度V[m/s]、粒 子に働く接触力 $F^{c}[N]$ 、流体力 $F^{h}[N]$ 、磁気双 極子相互作用力 $F^{m}[N]$ 、粒子慣性モーメント $I[kg·m^{2}]$ 、粒子角速度 $\omega[rad/s]$ 、粒子に働く接 触トルク $T^{c}[N·m]$ 、流体トルク $T^{h}[N·m]$ 、磁気 双極子相互作用トルク $T^{m}[N·m]$ 、印加磁場に よる磁気トルク $T^{H}[N·m]$ である.

2.2 シミュレーション条件

Table 1 にシミュレーション条件を示す. 今 回使用する粒子と溶媒のパラメーターは純鉄 とケロシンを想定している. Fig. 1 に体積分率 30%の時の Mason 数 (MN) 50 の時の粒子構 造を示す. Mason 数はせん断流れ場中の二粒 子に作用する磁気力に対する流体力の比で定 義される無次元数である. MN=50 の時は粒子 が静止壁面に向い移動した.

Table 1 シミュレーション条件

	名称	数值
外部要因	Mason 数 MN[-]	50
	計算領域 x, y, z[m]	6d, 12d, 6d
	外部磁場 B [T]	0.1
粒子 (純鉄)	基準粒子直径 d[m]	1.5×10^{-6}
	密度 ρ_p [kg/m ³]	7.84×10^3
	ポアソン比 ν [-]	0.3
	ヤング率 <i>E</i> [GPa]	205
	磁化 M [A/m]	$7.96 imes 10^4$
	体積率 φ[-]	0.3
	粒子位置 x, y, z[m]	3d, 6d, 3d
溶媒 (ケロシン)	密度 $\rho_f[kg/m^3]$	8.09×10^{2}
	粘性係数 η_0 [Pa·s]	2.42×10^{-3}
	温度 T[K]	293.15

Numerical simulation study on the particle structure formed by magnetic particles in MR fluid under shear field. Ryoga FUJII , Tutomu ANDO, Osamu KOIKE, Rei TATUMI , Noriyuki HIROTA



MN=50 Fig.1印加磁場における粒子の構造

本研究では無磁場において粒子の回転を完 全に固定した時と完全に自由にした時の2つ の条件で静止壁面に向い凝集した現象が示さ れた Mason数(MN=50)でのせん断速度でシ ミュレーションを行った.また,実際の粒子 のモデルを Fig.2に示す.この時1粒子の位置 を領域中央に固定する.また,粒子の上下方 向の動きのみを確認するために x 軸方向の粒 子の速度は更新するが,粒子位置は固定した (粒子と並走している状態を想定).



Fig. 2 シミュレーション領域と粒子初期配置

3. シミュレーション結果および考察

Fig. 3はそれぞれの1粒子の同時刻における スナップショットを示す.図のように回転あ りでは移動壁面方向に回転なしでは静止壁面 方向に移動した.これにより粒子の移動壁面 と静止壁面に近づく条件として粒子の回転の 有無が関わっていると考えられる.



4. 結言

本研究では直接数値シミュレーションによ るMR流体中磁性粒子がせん断場下で形成す る粒子構造に関する検証を行った.今回,無 磁場における粒子でシミュレーションを行い, 移動壁面と静止壁面に近づく条件として粒子 の回転の有無が関わっていることが示された. また今後の研究として,磁場印加による粒子 配向の影響や,粒子周りの流体の流れ,粒子 同士の相互作用の関係について,引き続きシ ミュレーションを行い,粒子構造について考 察していく必要がある.

参考文献

- J.D. Carlson and M.R. Jolly, MR fluid, foam and elastomer devices, Mechatronics, vol.10, (2000), pp.555-569.
- (2) 菊池武士, MR 流体のロボティクス・メカトロニクスへの応用方法, 日本ロボット学会誌, vol.31, (2013), pp.469-472.
- 井門康司, 荒川和也, 住吉宏太伽, MR 流 体単純せん断流れにおける強磁性微粒子 挙動の数値解析, 日本 AEM 学会誌, vol.23, (2015), pp.16-22.
- (4) 藤井亮河,安藤努,小池修,辰巳怜,廣 田憲之,第17回日本磁気科学会年会プロ グラム要旨集, P-7 (2023).
- T. Ando, K. Akamatsu, S. I. Nakao, & M. Fujita, Simulation of fouling and backwash dynamics in dead end microfiltration: Effect of pore size, Journal of membrane science, vol.392-393 -(2012) pp.48-57.