

## MR 流体のせん断流れ場における磁場印加角度と溶液粘度に関する研究

日大生産工(院) ○田中 亜宗 日大生産工 安藤 努  
PIA 小池 修, 東大環安セ 辰巳 怜, NIMS 廣田 憲之

## 1. 緒言

本研究で対象とする磁気粘性流体(MR 流体)は磁性材料から成る粒子とベースオイルで構成される溶液で, 磁場印加によって MR 流体の見かけ粘度 $\eta$ を上昇させ, 変化させることができる. この性質を利用してロボットの稼働部やダンパなどの衝撃吸収系への応用が期待されている<sup>1)</sup>. 応用環境におけるせん断流れ場中の粒子挙動をシミュレーションで観察し, 磁場強度とせん断場をパラメータとした研究<sup>2)</sup>や磁場印加方向をパラメータとした研究<sup>3)</sup>が行われている. 参考文献<sup>3)</sup>では磁場印加方向を変えたとき発現するせん断応力がピークとなる点があることが示されている.

先行研究<sup>3)</sup>では多粒子系を対象としているが, せん断場の流体抵抗を Stokes 抵抗で近似しており直接計算は行われていない. このことから本研究では多粒子系による直接数値シミュレーションを行い, 磁場の印加角度を変えた時のせん断場と見かけ粘度の相関とその時の粒子構造について議論する.

## 2. シミュレーションの支配方程式

計算対象とする MR 流体は微粒子分散溶液である. その溶媒を Newton 流体として扱い, 連続の式(1)および揺動 Navier-Stokes 方程式(2)に従う.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\eta_0}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{S} + \Phi \alpha \quad (2)$$

ここで,  $t$ : 時間 [s],  $\mathbf{v}$ : 流体の速度 [m/s],  $\rho$ : 溶媒の密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $p$ : 圧力 [Pa],  $\eta_0$ : 溶媒の粘度 [Pa·s],  $\mathbf{S}$ : 揺動ストレス [N/m<sup>2</sup>],  $\Phi$ : 粒子相関数である.  $\alpha$ : 粒子の加速度 [m/s<sup>2</sup>]は,  $v^p$ : 粒子の速度 [m/s]を使用して, 下式 (3)で表される.

$$\alpha = \frac{v^p - v}{\Delta t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \frac{\eta_0}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{S} \quad (3)$$

微粒子分散液中の粒子の並進運動は Newton の運動方程式に従う. 並進運動の方程式を式(4)に示す.

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}^c + \mathbf{F}^h + \mathbf{F}^m \quad (4)$$

ここで,  $m$ : 質量 [kg],  $\mathbf{v}$ : 速度 [m/s],  $\mathbf{F}^c$ : 接触力 [N],  $\mathbf{F}^h$ : 流体力 [N],  $\mathbf{F}^m$ : 磁気双極子相互作用力[N]である. 粒子の回転運動は Euler の運動方程式 (5) に従う.

$$I \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \mathbf{T}^c + \mathbf{T}^h + \mathbf{T}^m + \mathbf{T}^H \quad (5)$$

ここで,  $I$ : 慣性モーメント [kg·m<sup>2</sup>],  $\boldsymbol{\omega}$ : 角速度 [rad/s],  $\mathbf{T}^c$ : 接触トルク [N·m],  $\mathbf{T}^h$ : 流体トルク [N·m],  $\mathbf{T}^m$ : 磁気双極子相互作用トルク [N·m],  $\mathbf{T}^H$ : 印加磁場による磁気トルク [N·m]である. 磁場に関する力とトルクについては参考文献<sup>4)</sup>を参考にして, 数値モデルに組み入れた.

## 3. シミュレーション条件

本研究ではニッケル粒子を含有する MR 流体を想定し, 粒子と溶媒の物性値を Table 1 に, 計算領域と印加磁場方向を Fig. 1 に示す. 計算領域は粒子直径  $d=2.5\mu\text{m}$  を基準に  $(x, y) = (15d, 10d)$  の流路として, 領域の上壁を一定速度  $u_{wall}$  で  $x$  軸正方向に移動させることでクエット流れを発生させた. また流体計算は三次元だが, 粒子計算は  $xy$  方向のみを考慮した擬二次元とした. 印加磁場の強度はニッケルが飽和磁化となる  $B_{\theta_B} = 0.6 \text{ T}$  とし, 上下壁面に対して垂直方向を  $\theta_B = 0$  として一様に印加した. また磁場印加によって形成される構造体の粘度変化への影響を観察するために,  $\theta_B = \pm \pi/4$  方向にも磁場を同様に印加した. 粒子間の磁気双極子相互

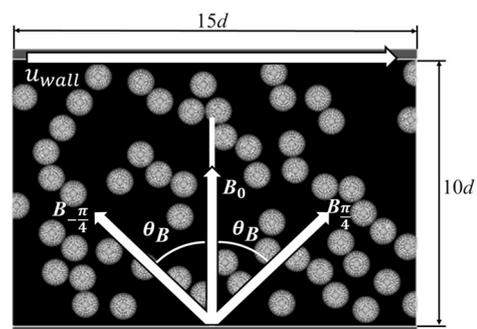


Fig. 1 計算領域と磁場印加方向 $\theta_B$

Relationship between titled magnetic field and viscosity in MR fluid under shear flow

Aso TANAKA, Tsutomu ANDO, Osamu KOIKE, Rei TATSUMI and Noriyuki HIROTA

作用のカットオフ距離は  $3d$  とした。

Table 1 粒子および溶媒の物性値

Particle		Solvent	
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	$8.90 \times 10^3$	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	$8.26 \times 10^2$
Young's modulus[GPa]	200.0	Viscosity [Pa·s]	$2.5 \times 10^{-2}$
Poisson ratio [-]	0.34	Temperature [K]	293.15
Magnetic sus. [A/m]	$4.90 \times 10^5$	Particle volume concentration [vol %]	20

#### 4. シミュレーション結果

本研究では、式(6),(7)で表される二粒子に作用する磁気力に対するせん断応力の比である Mason 数  $MN$  と溶媒の粘度  $\eta_0$  に対する見かけ粘度  $\eta$  の比として相対粘度  $\eta^* = \eta/\eta_0$  を用いて結果を整理した。

$$MN = 48\eta_0\dot{\gamma}/\mu_0|M|^2 \quad (6)$$

$$\dot{\gamma} = u_{wall}/h \quad (7)$$

ここで、 $\eta_0$  : 溶媒の粘度[Pa·s],  $\mu_0$  : 真空の透磁率[H/m],  $M$  : 磁化率 [A/m],  $h$ : 計算領域  $y$  方向長さ [m] である。

Fig. 2に無次元時間 $\dot{\gamma}t=1.0\sim 6.0$ における $\theta_B=0, \pm\pi/4$ での $\eta^*$ の平均を示す。エラーバーは標準偏差を示している。 $MN$ の上昇に伴い $\eta^*$ は低下しており、全ての $\theta_B$ で同様の傾向を示している。また $MN=0.2$ 以下において、 $\theta_B=\pi/4$ ではその他の $\theta_B$ に比べ $\eta^*$ が小さいことが確認できた。

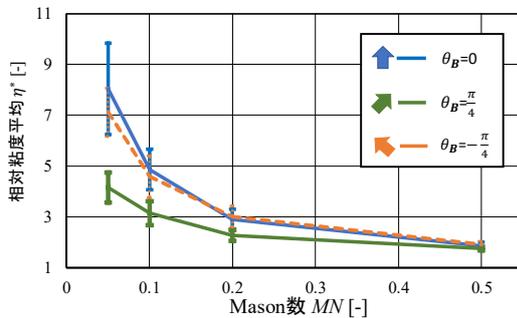
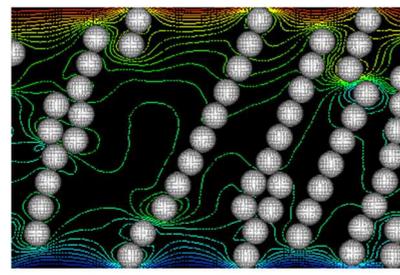


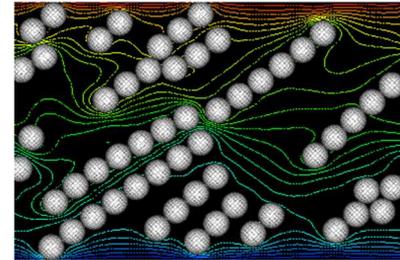
Fig. 2 各  $MN$  における  $\eta^*$  の変化

各 $\theta_B$ での $MN=0.1$ における $\eta^*$ が最大の時の粒子構造をFig. 3に示す。各 $\theta_B$ において形成された構造体は長さ方向に大きく成長していることが確認できる。また $\theta_B=\pi/4$ での粒子構造は成長した構造がせん断場によって分裂し流されており、他では構造体が成長した状態で流れていく様子が確認できる。

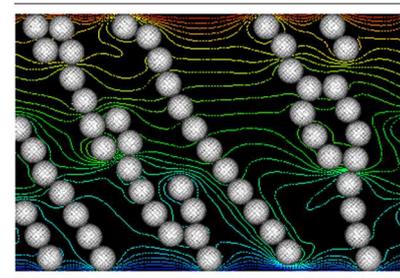
先行研究<sup>3)</sup>では実験においてせん断応力が $\theta_B=-\pi/4$ 近傍で最大になることが報告されている。今後はこの現象を確認すべく解析を行い、せん断場と $\eta^*$ との相関、その時の粒子構造について議論する。



(a)  $\theta_B=0$



(b)  $\theta_B=\pi/4$



(c)  $\theta_B=-\pi/4$

Fig. 3  $MN=0.1$  での各 $\theta_B$ の粒子構造 :  $\eta^*$  が最大

#### 参考文献

- 1) 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, 31, 5 (2013) pp.469-472.
- 2) 渡邊孝宏, 酒井幹夫: DEM-DNS法を用いた磁気粘性流体シミュレーション, 粉体工学会誌, 55 (2018) pp.426-432.
- 3) J. Takkimoto, H. Takeda, Y. Masubuchi, K. Koyama: STRESS RECTIFICATION IN MR FLUIDS UNDER TITLED MAGNETIC FIELD: International Journal of Modern Physics B, 13 (1999) 2028-2035.
- 4) T. Ando, D. Katayama, N. Hirota, O. Koike, R. Tatsumi, M. Yamato: Structure Formation of Magnetic Particles under Magnetic Fields toward Anisotropic Materials. IO P Conf. Series: Materials Science and Engineering, 424 (2018) 012076.