

数値シミュレーションによる MR 流体のせん断場における 粒子構造と見かけ粘度の相関

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オイルとの混合材料で、磁場の影響を受けて見かけ粘度が変化する機能性流体である¹⁾。この流体の特徴として応答速度が3~5 msと速く、磁場がなくなると元の粘度に戻る性質を持つため磁場印加によって連続的かつ高精度に制御が可能である。この性質を利用して、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する。また、せん断場による粒子の挙動や粒子が形成するマイクロ構造が見かけ粘度の変化に相関があることは、これまで多くの数値解析が行われ、議論されてきた³⁾が、まだ議論の余地があると我々は考えている。本報告では数値シミュレーションによりせん断場中の粒子構造を可視化し、粒子構造を詳しく観察することで見かけ粘度との関係を考察し、もう一步踏み込んだ議論を提起したい。

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⁴⁾。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ック方程式(2)に従う。

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

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla p + \frac{\eta_0}{\rho_f} \nabla^2 \mathbf{v} + \phi \boldsymbol{\alpha} \quad (2)$$

ここで、流体の速度ベクトル \mathbf{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 $\boldsymbol{\alpha}$ [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。

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}^c + \mathbf{F}^h + \mathbf{F}^m \quad (3)$$

$$I \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \mathbf{T}^c + \mathbf{T}^h + \mathbf{T}^m + \mathbf{T}^H \quad (4)$$

ここで、粒子質量 m [kg]、粒子速度 \mathbf{v} [m/s]、粒子に働く接触力 \mathbf{F}^c [N]、流体力 \mathbf{F}^h [N]、磁気双極子相互作用力 \mathbf{F}^m [N]、粒子慣性モーメント I [kg/m²]、粒子角速度 $\boldsymbol{\omega}$ [rad/s]、粒子に働く接触トルク \mathbf{T}^c [N·m]、流体トルク \mathbf{T}^h [N·m]、磁気双極子相互作用トルク \mathbf{T}^m [N·m]、印加磁場による磁気トルク \mathbf{T}^H [N·m]となる。

2.2 シミュレーション条件

表1にシミュレーション条件を示す。今回シミュレーションに使用する粒子と溶媒のパラメータは純鉄とケロシンを想定している。シミュレーションの評価方法として、粒子構造を用いてMason数(二粒子に作用する磁気力と流体力の比で定義される無次元数)を介して粒子構造と見かけ粘度の関係性を考察する。また、実際の粒子の流れをFig. 1に示す。この時上壁面のみ x 方向へ動く。

3. シミュレーション結果および考察

Fig. 2 に Mason 数による相対粘度と NBA (Nondimensional Boundary Area) (粒子の凝集状態を表す指標で、凝集体の表面積を粒子の表

表1 シミュレーション条件

	名称	数値
外部要因	Mason 数 MN [-]	0.01, 0.1 ~ 1.0
	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]	1.2×10^{-6}
	密度 ρ_p [kg/m ³]	7.84×10^3
	ポアソン比 ν [-]	0.27
	ヤング率 E [GPa]	2.05(205)
	磁化 M [A/m]	7.96×10^4
	体積率 ϕ [-]	0.32
溶媒 (ケロシン)	密度 ρ_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

Correlation between Particle Structure and Apparent Viscosity in Shear Field of MR Fluid by Numerical Simulation

Ryoga FUJII, Tutomu ANDO, Osamu KOIKE, Rei TATUMI, Noriyuki HIROTA

面積の和で除したものを示す。今回のシミュレーションの範囲では、Mason数が大きくなるにつれて相対粘度は反比例するように減少しているが、NBAは緩やかに上昇している。

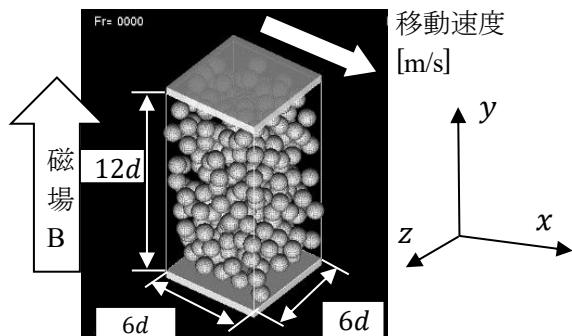


Fig. 1 シミュレーション領域と粒子初期配置

また、Fig. 3は、Mason数ごとの粒子構造をx方向から見たものであり粒子色は周囲粒子との接触数を表している。これらは、Fig. 2にある四角で囲われたMason数に対応する。この結果は流体力が大きくなる過程で流体力の影響を受けないように層状になり、層内粒子の隙間に入ったためと考えている。ただし、磁気力と流体力のトレードオフの結果であり、せん断による鎖状の傾きも影響している。層にならない場合は、その分の流体力を粒子が直接受けるためNM = 0.01の見かけ粘度が最大となったと考えられる。

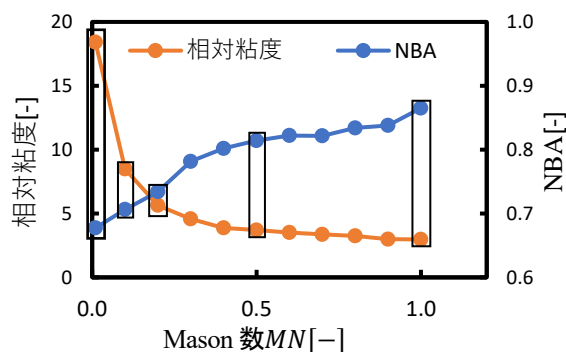


Fig. 2 Mason数ごとの相対粘度と粒子構造

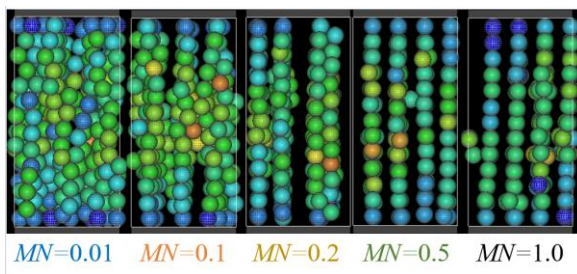


Fig. 3 x方向から見た粒子構造

次にFig. 4はx方向からy-z面内における粒子の存在確率である。この際に最大と最小の粒子存在確率の差がMN = 0.5の時に最大になった。このことからMN = 0.5に近づくまでは層になりさらに大きくなると層が崩れていくと考えられる。

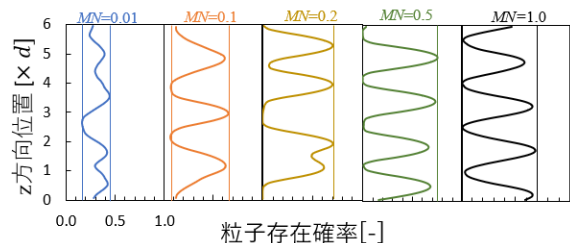


Fig. 4 y-z平面の粒子存在確率

3. 結言

本研究ではMR流体のせん断場における粒子構造と見かけ粘度の相関について数値シミュレーションにて観察した。今回の行ったシミュレーション範囲では、Mason数ごとの相対粘度とNBAを見た時、MN=0.01の時が見かけ粘度が最大で、粒子の構造は流体の進行方向を妨げるように粒子が上下方向に並んでいたが、MN = 0.1から少しずつ隙間が空いていきMN = 0.5の時、流体の進行方向に対し平行に粒子が並んだ。この時、相対粘度は低下した。また、Mason数が0.5より大きくなると層が崩れて始めた。本研究ではごく一部の条件のみでしかシミュレーションを行っていないため今後も引き続きシミュレーションを行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 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.
- 3) 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) T. Ando, K. Akamatsu, S. Nakao, I., & M. Fujita, Simulation of fouling and backwash dynamics in dead-end microfiltration: Effect of pore size, Journal of membrane science, vol.392, (2012), pp.48-57.