

令和3年度卒業論文

カルボニル鉄/シリカ粒子混合 MR 流体のせん断応力の
シリカ粒子体積分率依存性

名古屋大学 工学部 物理工学科

増渕研究室

学籍番号 081820531

氏名 山脇悠矢

要旨

MR 流体は直径が数 μm の磁性粒子が液体中に分散した懸濁液で、外部磁場によってそのレオロジー特性が大きく変化するという特徴を持つ。MR 流体に非磁性のシリカ粒子を混合することによって、せん断応力が変化するという先行研究 [1][2] が幾つかあるが、それらの先行研究におけるせん断応力の非磁性粒子濃度依存性は整合性がない。本研究では、自作した MR 流体に混合するシリカ粒子の体積分率を系統的に変化させ、非磁性粒子添加が MR 流体のレオロジー特性に与える影響を調べた。磁場印加装置と回転式レオメーターを用いて、シリカ粒子の体積分率の異なる試料について定常せん断応力測定を磁場を印加しながら行った。測定の結果、全ての試料のフローカーブが一致し、せん断応力のシリカ粒子体積分率依存性は見られなかった。本研究では凝集の少ないとされている湿式法シリカ粒子を用いたことから、凝集の少ない非磁性粒子は MR 流体に添加されてもそのせん断応力にほとんど影響を与えないと思われる。

目次

要旨	1
第 1 章 序論	4
1.1 MR 流体	4
1.1.1 MR 流体とは	4
1.1.2 MR 流体のレオロジー特性における磁性粒子濃度および磁場強度の影響	5
1.1.3 MR 流体の問題点と解決策	6
1.1.4 磁性/非磁性粒子混合 MR 流体	7
1.2 本研究の目的	8
第 2 章 実験方法	9
2.1 試料	9
2.1.1 試薬	9
2.1.2 試料の作成	9
2.2 装置	11
2.3 実験手順	12
2.3.1 試料の攪拌	12
2.3.2 動的粘弾性測定	12
ひずみ振幅依存性測定	12
磁場印加からの時間依存性測定	12
周波数依存性測定	12
2.3.3 定常せん断応力測定	13
第 3 章 結果	14
3.1 動的粘弾性測定	14
ひずみ振幅依存性測定	14
磁場印加からの時間依存性測定	15
周波数依存性測定	15
3.2 定常せん断応力測定	16
第 4 章 考察	22
第 5 章 結論	23

目次	3
謝辞	24
付録 A 粒子の沈降	25
付録 B MR 流体の流動特性の評価	27
参考文献	29

第 1 章

序論

1.1 MR 流体

1.1.1 MR 流体とは

MR 流体（磁気粘性流体）は、水や油などの液体に、直径が数 μm の磁性粒子を分散させた懸濁液である。MR 流体は外部磁場の印加によって、そのレオロジー特性が急速かつ可逆的に変化する。端的に表現すると、無磁場下では液体のように振る舞い、磁場下では固体のように振る舞う [3]。1948 年に Rabinow[4] が、初めて MR 流体を作成し、クラッチへの応用を試みた。その後多くの研究によって、ブレーキやダンパーなど、大きな力を制御するためのデバイスへの応用が実現されている [5]。

ここで、MR 流体のレオロジー特性の変化の原理について、せん断に対する力学応答を例に述べる。磁場のない時、MR 流体内部の磁性粒子は図 1.1 左に示すように液体中に一様に分散している。この状態で、あるせん断速度でせん断をかけた場合、流体からの力学応答であるせん断応力は小さい。一方で、磁場下では図 1.1 右に示すように磁性粒子は磁場方向に配列し鎖状のクラスター構造を作る。この MR 流体を流動させるためには、内部のクラスター構造を切るための力、ないしは磁場方向へ配向しようとするクラスター構造を磁場に逆らって流動方向に配向させるための力が必要になる。そのため、無磁場のときに比べてせん断応力は飛躍的に大きくなる [3]。

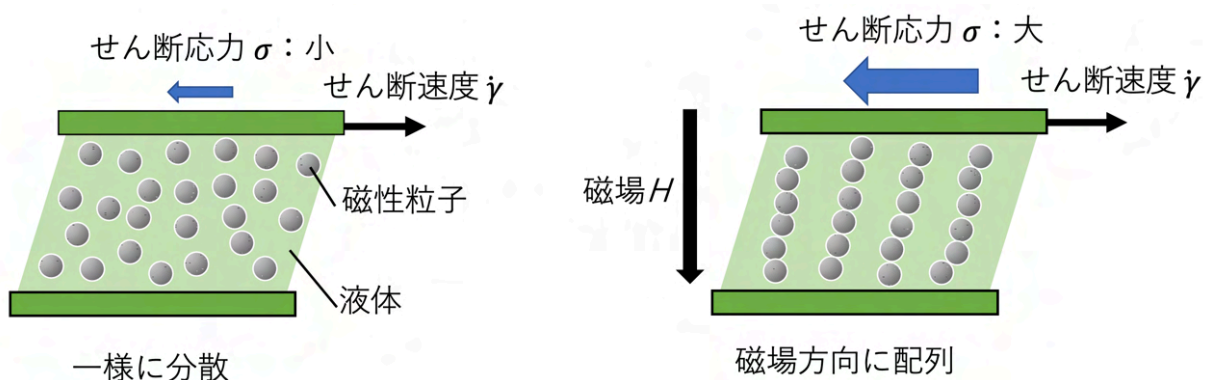


図 1.1 磁場による MR 流体の内部構造とせん断応力の変化の模式図（左：磁場なし/右：磁場あり）

1.1.2 MR 流体のレオロジー特性における磁性粒子濃度および磁場強度の影響

MR 流体のせん断応力は、磁場強度と磁性粒子の体積分率 ϕ_{CI} (vol%) に依存する。先行研究 [6] における磁束密度の異なる磁場下での MR 流体 ($\phi_{CI} = 15$ vol%) のフローカーブを図 1.2 に、磁性粒子の体積分率 ϕ_{CI} の異なる MR 流体のフローカーブを図 1.3 に示す。

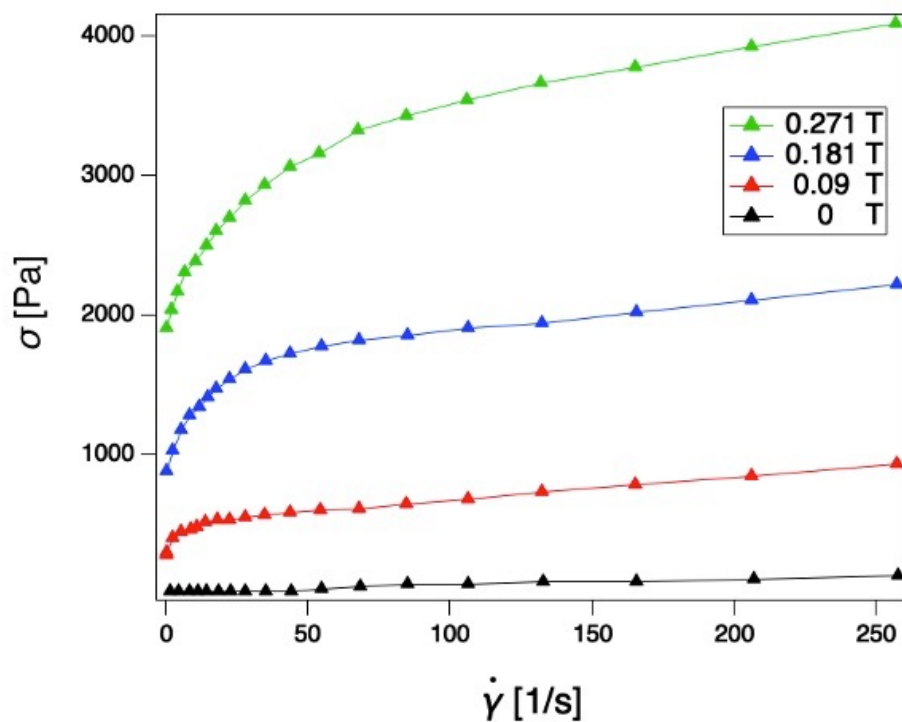


図 1.2 種々の磁束密度の磁場下での MR 流体 ($\phi_{CI} = 15$ vol%) のフローカーブ [6]

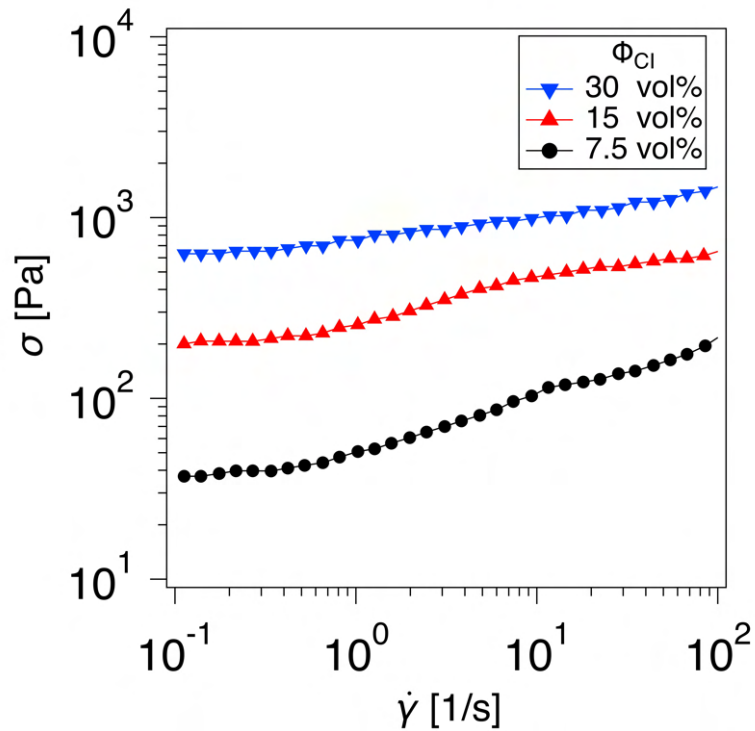


図 1.3 種々の ϕ_{CI} の MR 流体のフローカーブ ($B = 0.09$ T)[6]

図 1.2、図 1.3 を見ると、それぞれ磁束密度の増加、磁性粒子の体積分率の増加に伴ってフローカーブが上にシフトしており、せん断応力が大きく上昇していることが分かる。

1.1.3 MR 流体の問題点と解決策

MR 流体は瞬時に大きな力を制御できるため便利であるが、応用に当たってはいくつかの問題点がある。まず、磁性粒子の沈降による不安定性が挙げられる。沈降の要因は、磁性粒子の粒子径が大きいこと、磁性粒子と分散媒の密度差が大きいことである。詳細な説明は付録に記す。

この粒子の沈降を防ぐために様々な対策が研究されている。具体的には、大きさの異なる磁性粒子を混合すること、磁性粒子の表面を非磁性物質でコーティングすること、キャリア液に粘度の高いゲルを使用すること、非磁性粒子などの添加物を加えることなどが有効であると報告されている [5]。

1.1.4 磁性/非磁性粒子混合 MR 流体

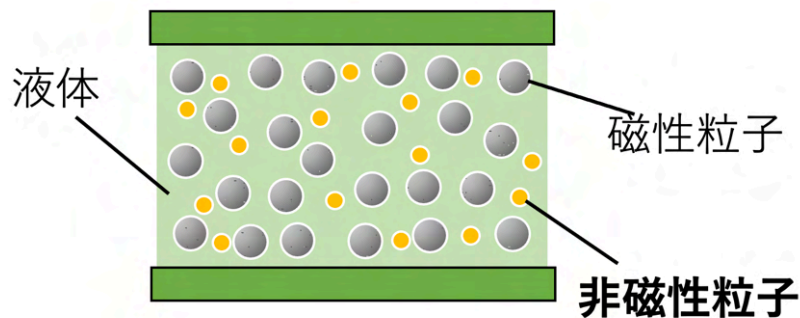
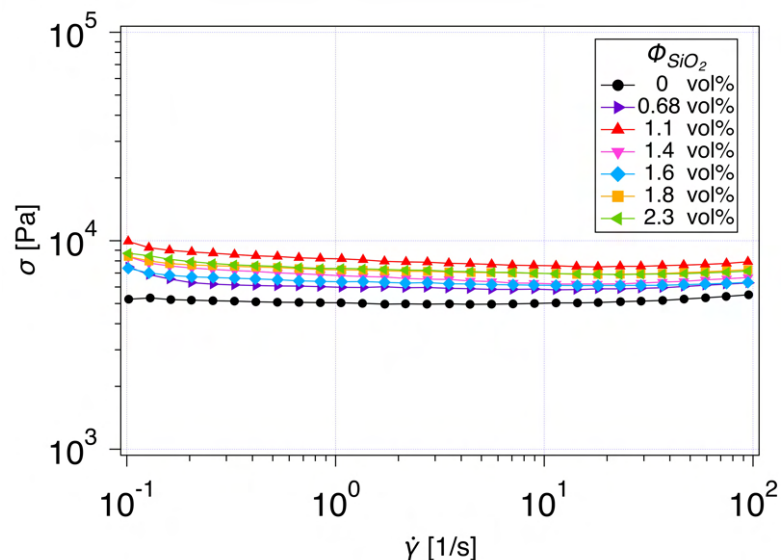


図 1.4 磁性/非磁性粒子混合 MR 流体

粒子の沈降を防止する一つの方法として、非磁性粒子の添加が挙げられる。シリカ粒子を添加することによって、MR 流体の安定性が改善するという報告 [7][8] がある。また、シリカ粒子の添加は MR 流体の安定性のみならず、そのレオロジー特性にも影響を与えるということが報告されている。Xu ら [1] は、脱イオン水中にカルボニル鉄粒子を分散させた MR 流体を作成し、ヒュームドシリカ粒子を添加したところ、図 1.5 のように添加前に比べてせん断応力が上昇すると報告している。一方で、シリコンオイルとカルボニル鉄粒子からなる MR 流体にシリカ粒子を添加した Aruna[2] らの研究では、図 1.6 に示すようにシリカ粒子の添加による MR 流体のせん断応力の低下が報告されている。 ϕ_{SiO_2} (vol%) はシリカ粒子の体積分率である。

図 1.5 $\phi_{CI} = 17 \text{ vol}\%$ の MR 流体に種々の ϕ_{SiO_2} のヒュームドシリカ粒子を添加したときのフローカーブ [1]

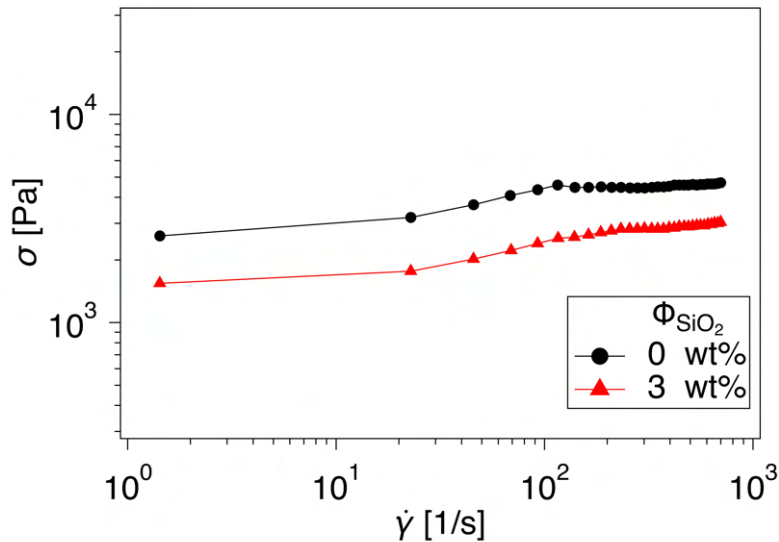


図 1.6 カルボニル鉄粉 80 wt% の MR 流体に 3 wt% のヒュームドシリカ 粒子を添加したときのフローカーブ [2]

1.2 本研究の目的

磁場の存在下では、MR 流体内部のクラスター構造を形成している磁性粒子間の結びつきは非常に強く、系のせん断応力に大きな寄与をもたらす。そのため磁性粒子に比べて弱い粒子間力しか持たない非磁性粒子が、系の力学応答に影響を与えるのであれば、それは非常に興味深い現象に思える。しかし、シリカ粒子添加による MR 流体のレオロジー特性の変化について、上で述べた先行研究間で結果の整合性は取れておらず、理解は不十分である。

以上の点を踏まえ本研究では、『MR 流体に添加された非磁性粒子が系のレオロジー特性へ与える影響を理解すること』を目的に設定した。先行研究では非磁性粒子として複雑な凝集体を組むヒュームドシリカが多く用いられているが、本研究では球状の非磁性粒子が系に与える影響を単純化して見るために比較的分散性が良いとされる湿式法シリカ粒子を用いた。MR 流体中のシリカ粒子の体積分率を系統的に変えて試料を作成し、それぞれについてせん断応力測定を行った。

第 2 章

実験方法

2.1 試料

2.1.1 試薬

試料の作成に用いた試薬について説明する。分散媒には動粘度 1000 cSt のシリコンオイル (信越化学 型番 KF96-1000 cSt) を用いた。分散させる粒子として、磁性粒子であるカルボニル鉄粉 RZ グレード (天一)、非磁性粒子であるシリカ粒子 シーホスター KE-P100(日本触媒) を用いた。カルボニル鉄粉は直径約 3 μm 、シリカ粒子は直径約 1 μm である。また、粒子の凝集を防ぐための分散剤としてオレイン酸 (ナカライテスク 型番 15745-55) を用いた。

2.1.2 試料の作成

上記の試薬を混合し、シリカ粒子濃度 ϕ_{SiO_2} が 0, 0.2, 0.5, 1, 3 vol% の 5 種類の試料を作成した。各試料の詳細な組成は表 2.1 に示す。

表 2.1 各試料の組成 (vol%)

シリカ粒子	磁性粒子	シリコンオイル	オレイン酸
0	6	89	5
0.2	6	88.8	5
0.5	6	88.5	5
1	6	88	5
3	6	86	5

試薬を試料瓶に入れた際には図 2.1 のように粒子が固まって沈殿している。攪拌の操作としては、まず図 2.2 に示すボルテックスミキサー VTX-3000L (アズワン) による振動を 1 分間加えた後、スパチュラーを用いて手動で十分にかき混ぜることで試料瓶の底や側面に付着している粒子を剥がし、最後またミキサーによる振動を 2 分間加えた。この作業を行った後の試料瓶の様子を、図 2.3 に示す。

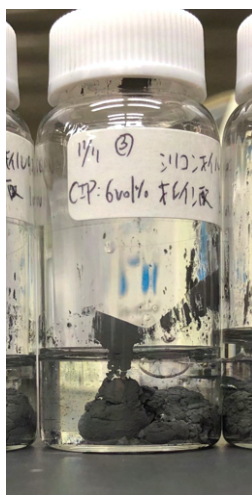


図 2.1 攪拌前の試料



図 2.2 ボルテックスミキサー

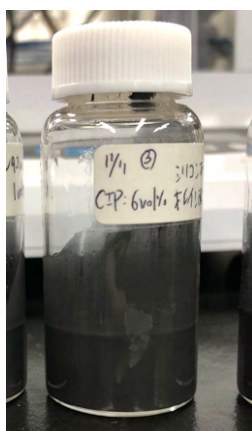


図 2.3 攪拌後の試料

2.2 装置

図 2.4 にあるように、測定装置を配置した。パワーサプライ PS-MRD(Anton Paar) と磁気粘弾性測定セル MRD 70/1T(Anton Paar) で試料に対して一様な磁場を印加し、テスラメーターで磁束密度の大きさを測定した。回転式レオメーター MCR301(Anton Paar) で試料のレオロジー特性を測定した。

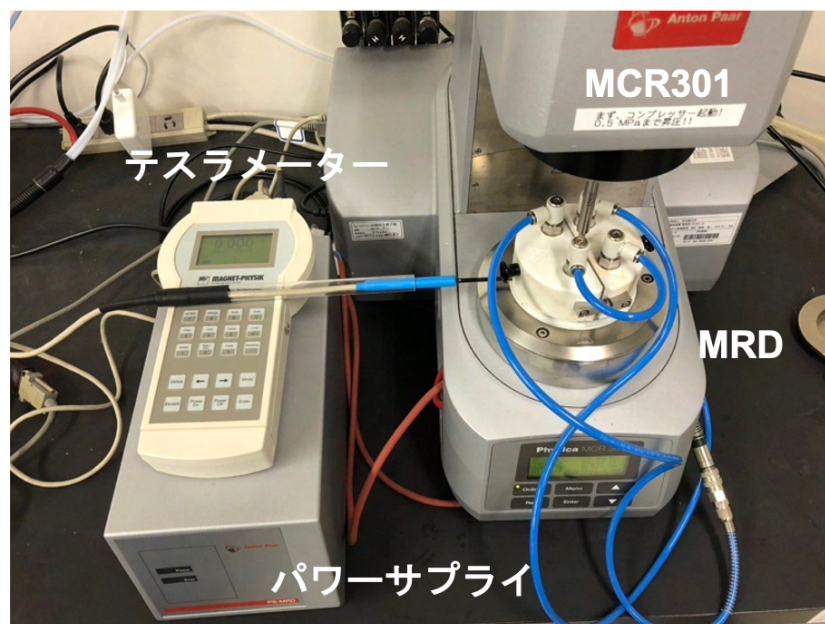


図 2.4 実験装置の配置

また、図 2.5 に、本実験で用いたレオメーターの測定部の模式図を示す。

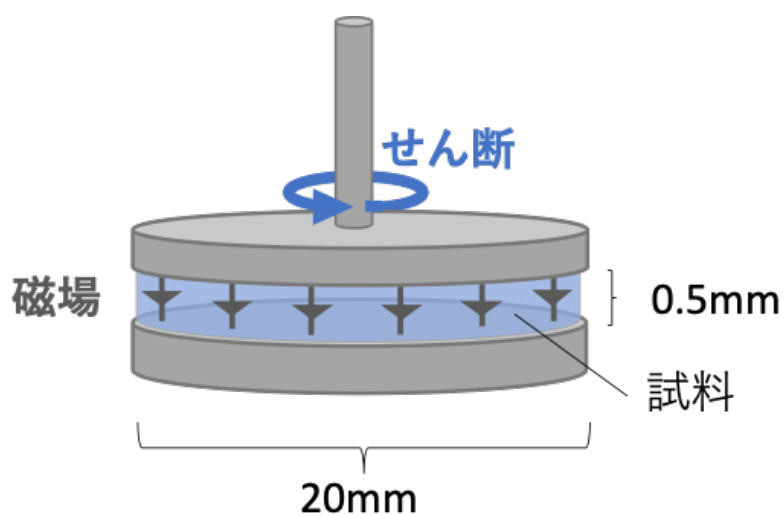


図 2.5 レオメーターの測定部の模式図

2.3 実験手順

2.3.1 試料の攪拌

磁場下でのせん断応力は、磁性粒子の体積分率に大きな影響を受ける。よって、シリカ粒子の量による影響を正確に見るには、各測定で用いる試料内の磁性粒子の体積分率が揃うように、試料は試料瓶内で均一でなければならない。しかし今回用いた試料は、時間の経過とともに内部の粒子が沈降し、不均一になる。この影響をできるだけ取り除くために各測定を行う前に必ず試料の作成時と同様の攪拌を行い、試料瓶内を均一な状態にしてからスパチュラーで適量の試料をすくって MRD のステージ上にロードした。

2.3.2 動的粘弾性測定

以下の測定をシリカ粒子の含まれていない試料 ($\phi_{SiO_2} = 0 \text{ vol\%}$) のみに対して行った。

ひずみ振幅依存性測定

まず磁場 (0.2 T) を印加し、十分に時間が経ってから周波数 $\omega = 10 \text{ rad/s}$, ひずみ $\gamma = 0.01 \sim 10 \%$ で動的粘弾性のひずみ振幅依存性の測定を行った。この測定で、貯蔵弾性率 G' と損失弾性率 G'' が一定となっているひずみの範囲を線形領域とみなした。

磁場印加からの時間依存性測定

MR 流体は、磁場に対して即座に応答して粘度が上昇すると言われている [3] が、内部の磁性粒子が配列して構造が定常化するまでの時間はゼロではない。内部構造が定常化していない状態でせん断をかけてせん断応力を測定することは再現性を失う要因になりうると考え、内部構造が定常化してからせん断応力測定を行うこととした。そのためには、磁場を印加してから内部構造が定常化するまでの時間を知る必要があるため、以下の測定を行った。ひずみ振幅依存性測定で求めた線形領域内のひずみと周波数 $\omega = 10 \text{ rad/s}$ での動的粘弾性測定を磁場 (0.2 T) を印加すると同時に開始して、貯蔵弾性率 G' と損失弾性率 G'' の時間変化を見た。線形領域のせん断では MR 流体内部の構造の破壊が起きないものと仮定し、 G' と G'' の変化していた場合はその変化が磁場による内部の磁性粒子の配列によるものとみなした。 G' と G'' が一定になった時間からは、内部の構造が定常状態になったとみなせるので、以降の定常せん断応力測定では、磁場印加をしてからその時間だけ待機して、測定を開始することとした。

周波数依存性測定

本研究で用いた MR 流体の粘弾性が磁場の有無でどのように変化をするのかを見るために、ひずみ振幅依存性測定で求めた線形領域のひずみで動的粘弾性の周波数分散測定 $\omega = 0.1 \sim 100 \text{ rad/s}$ を行った。磁束密度 0 T での測定の際は、試料をロードしてすぐにせん断を開始した。磁束密度 0.2 T での測定の際は、試料を装置にロードしてすぐに磁場を印加し、時間依存性測定で求めた定常化の時間だけ待機してから測定を開始した。

2.3.3 定常せん断応力測定

各試料について磁束密度 0 T と 0.2 T の二つの条件で定常せん断応力測定を行った。試料のロードが終わってから測定開始までの手順は、磁束密度 0 T と 0.2 T どちらの時も周波数依存性測定の時と同様である。せん断速度 $\dot{\gamma} = 0.1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ の 16 点で連続測定を行い、フローカーブを作成した。各せん断速度での測定時間は、低せん断速度から高せん断速度の間で 30~10 s と変化するようにした。磁束密度 0.2 T の場合のみ、再現性を確認するために各試料ごとに 4 回の測定を行った。

第3章

結果

3.1 動的粘弾性測定

ひずみ振幅依存性測定

磁束密度 $B = 0, 0.2$ T、周波数 $\omega = 10$ rad/s、ひずみ $\gamma = 0.01 \sim 10\%$ での動的粘弾性のひずみ振幅依存性を図 3.1 に示す。

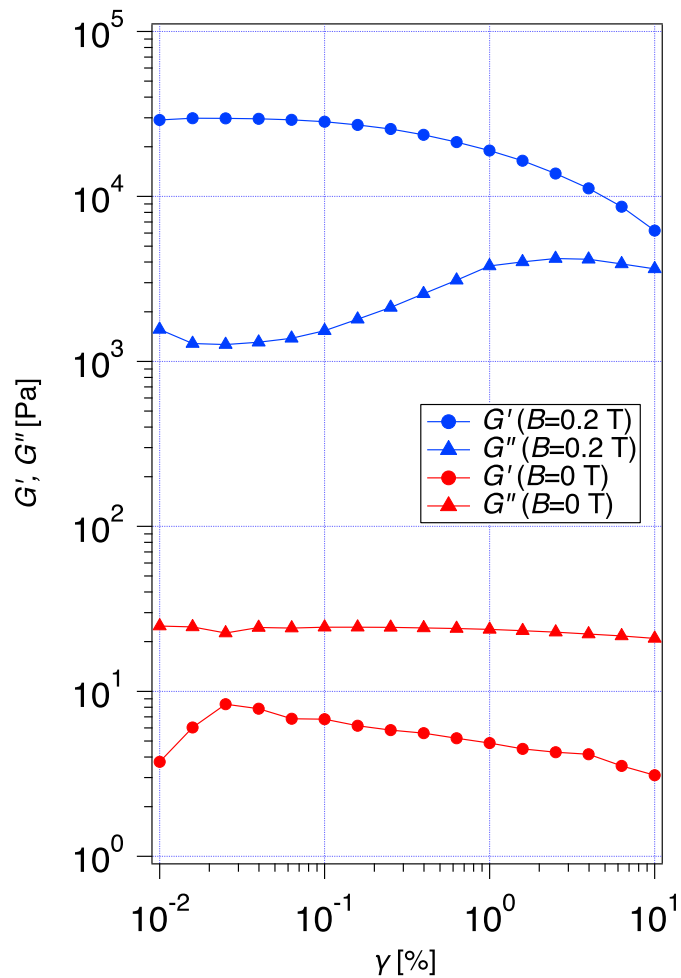


図 3.1 $B = 0, 0.2$ T での $\phi_{SiO_2} = 0$ vol% の試料の動的粘弾性のひずみ振幅依存性 ($\omega = 10$ rad/s)

貯蔵弾性率 G' と損失弾性率 G'' は共に、磁場の印加により大きく上昇した。 $B = 0.2 \text{ T}$ での G' と G'' に着目するとおおよそ $\gamma = 0.01 \sim 0.04 \%$ の範囲でほぼ一定の値を示している。これ以下のひずみの範囲を線形領域とみなすこととした。

磁場印加からの時間依存性測定

次に $\gamma = 0.04 \%$ で磁場印加時からの動的粘弾性の時間発展を測定した。その結果を図 3.2 に示す。

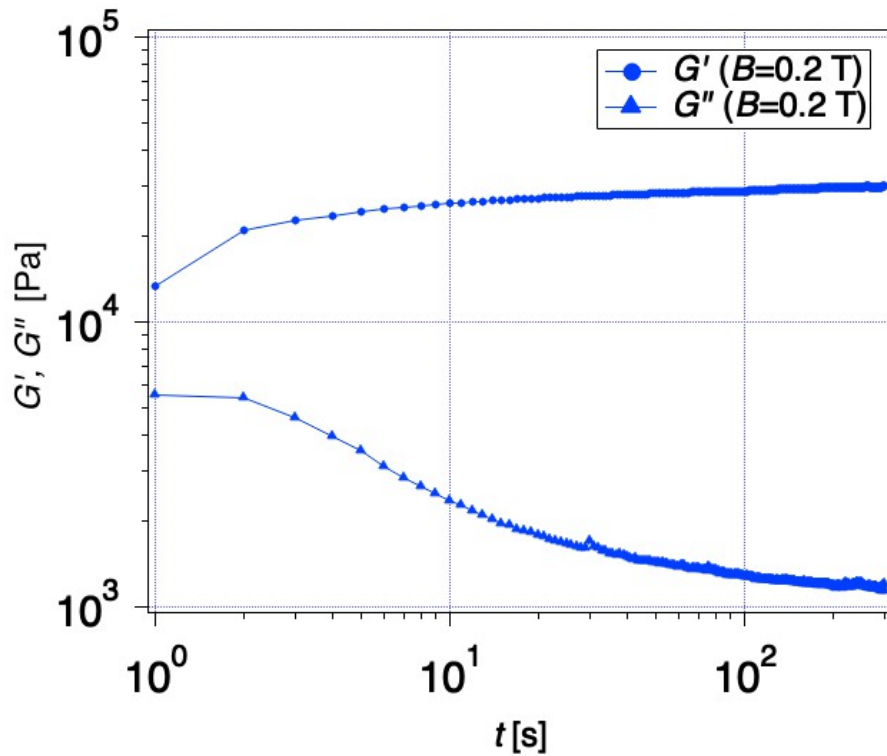


図 3.2 $B = 0.2 \text{ T}$ での $\phi_{SiO_2} = 0 \text{ vol\%}$ の試料の動的粘弾性の時間発展 ($\omega = 10 \text{ rad/s}$, $\gamma = 0.04 \%$)

図 3.2 より、磁場印加時から時間経過と共に G' が上昇、 G'' が低下している。これは内部の磁性粒子が磁場によって配列し構造が安定化する過程を表していると考えられる。約 100 s 後からは、それらの変化が十分小さくなっており MR 流体内部の構造が安定化したと推測できる。このことから、定常せん断応力の測定前の磁場印加時間を 100 s と設定することにした。

周波数依存性測定

次に磁束密度 $B = 0, 0.2 \text{ T}$ 、ひずみ $\gamma = 0.04 \%$ 、周波数 $\omega = 0.1 \sim 100 \text{ rad/s}$ での動的粘弾性の周波数依存性を図 3.3 に示す。

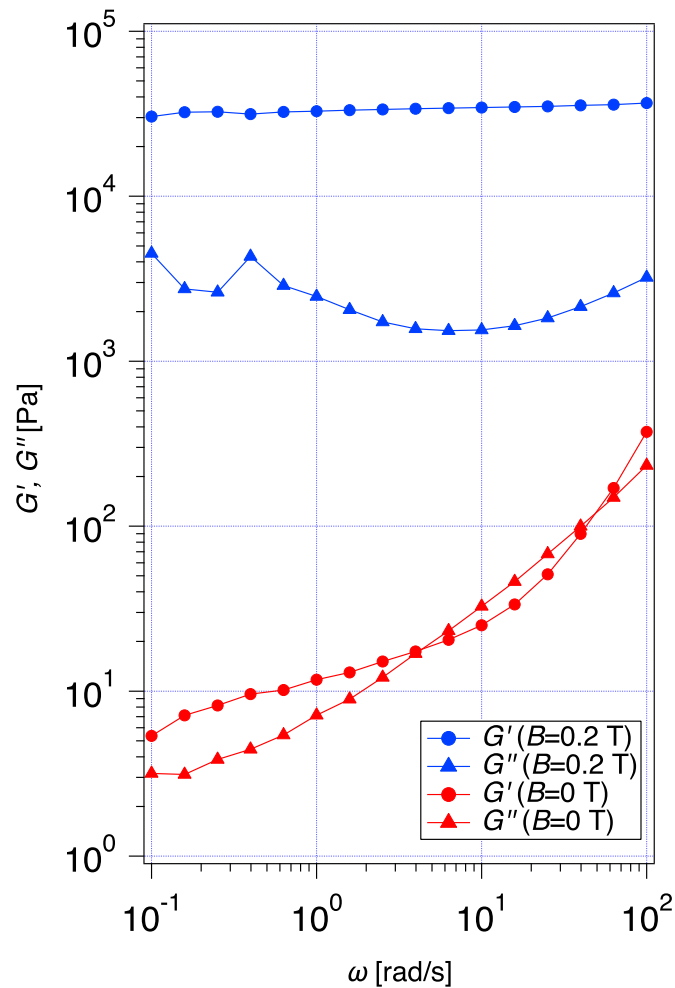
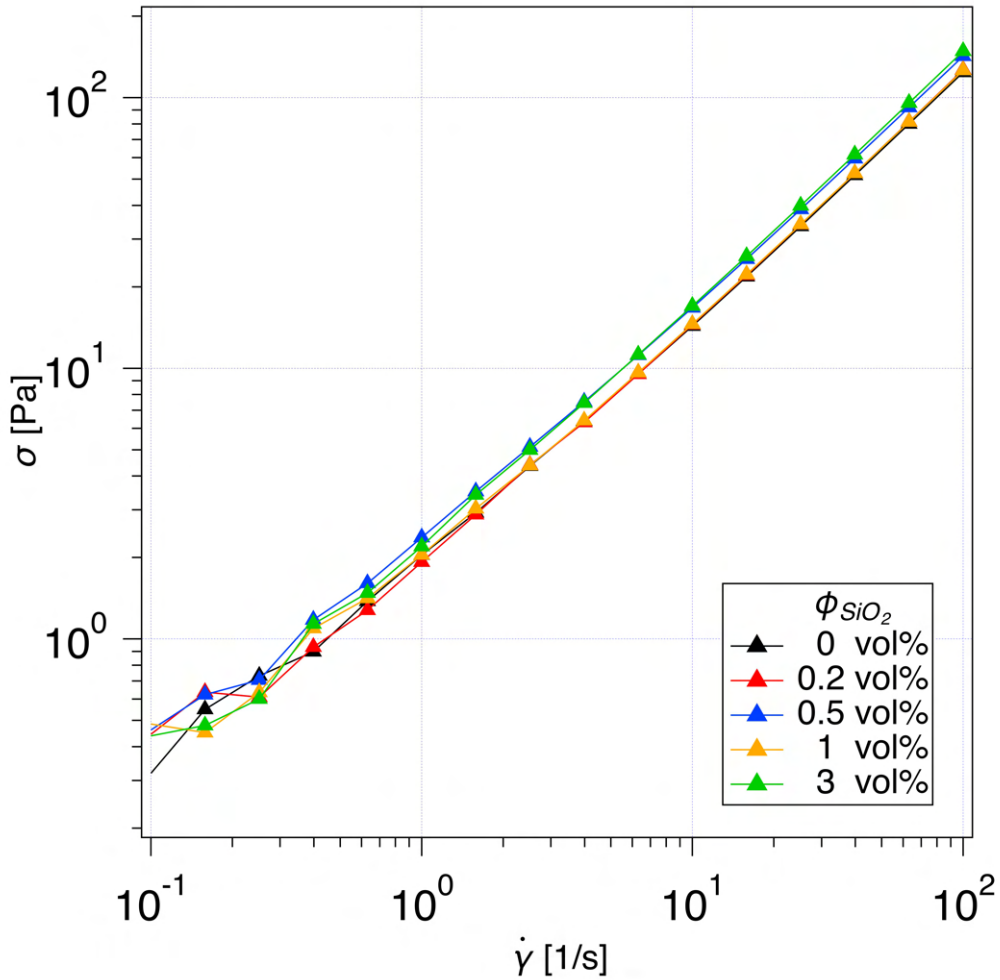


図 3.3 $B = 0, 0.2 \text{ T}$ での $\phi_{SiO_2} = 0 \text{ vol\%}$ の試料の動的粘弾性の周波数依存性 ($\gamma = 0.04 \%$)

図 3.3 より、 $B = 0 \text{ T}$ では G' と G'' が周波数の上昇に伴って共に上昇しており、 G' と G'' の大きさはどの周波数でも同程度である。一方で $B = 0.2 \text{ T}$ では、 G' と G'' が共に周波数に依存しないほぼ一定の値を保っており、それらの大きさには $G' \gg G''$ の関係がある。以上の結果より、本研究で用いた MR 流体の試料は、磁場印加によって固体的な性質を強く示すようになることが確認できた。

3.2 定常せん断応力測定

まず初めに、無磁場下での各試料のせん断応力測定の結果より作成したフローカーブを図 3.4 に示す。

図 3.4 $B = 0$ T での各試料のフローカーブ

無磁場下での各試料のフローカーブはほとんど一致しており、無磁場下では今回使用した MR 流体のせん断応力が添加されたシリカ粒子の体積分率に依存しないということが分かる。また、フローカーブの傾きは、低剪断速度領域では 1 より小さく、高せん断速度領域で 1 に近づいている。MR 流体は無磁場下で非ニュートン流体であるが、せん断速度の増加とともにニュートン流体的な流動特性を示すようになることが分かる。

次に、磁束密度 $B = 0.2$ T の磁場を印加した状態での各試料のフローカーブを図 3.5 に示す。

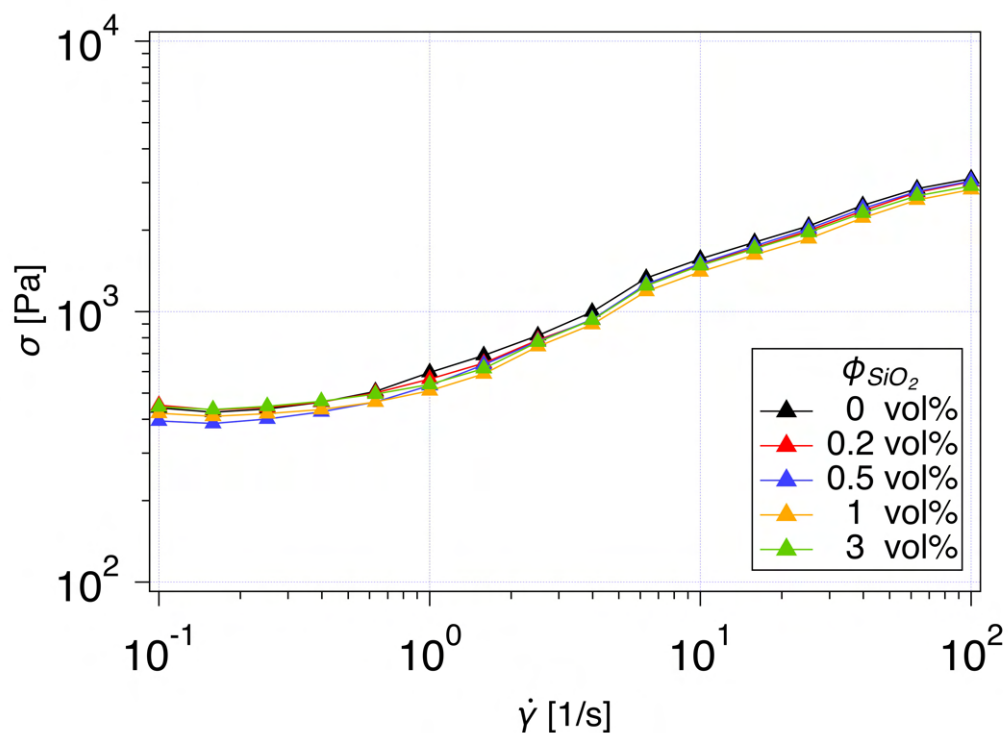
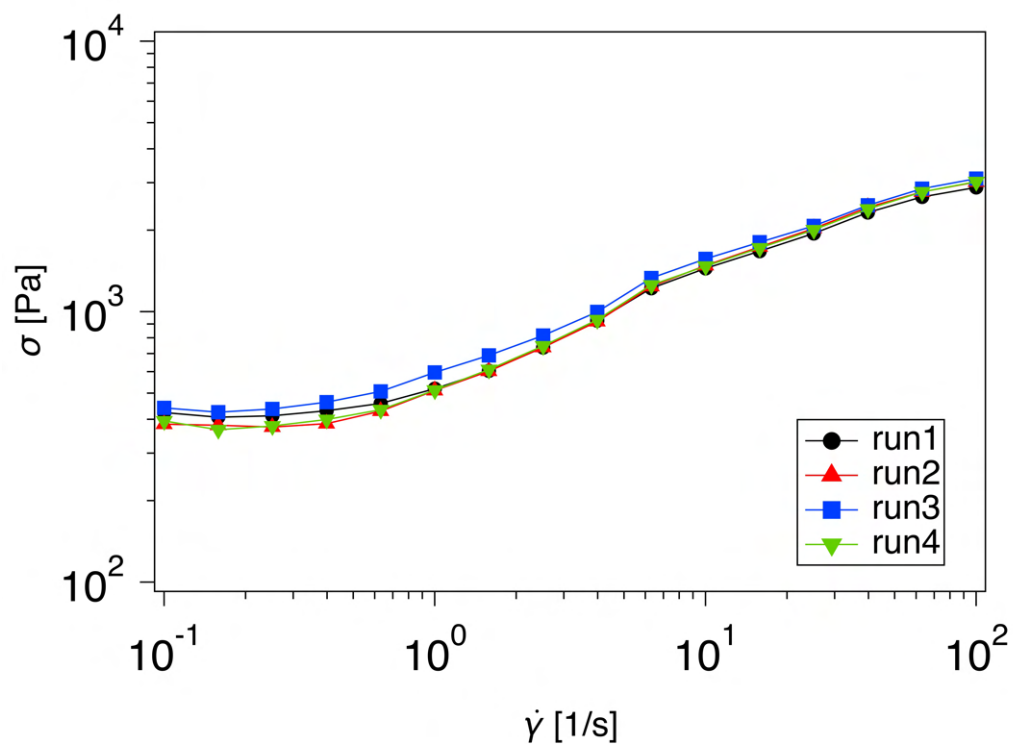
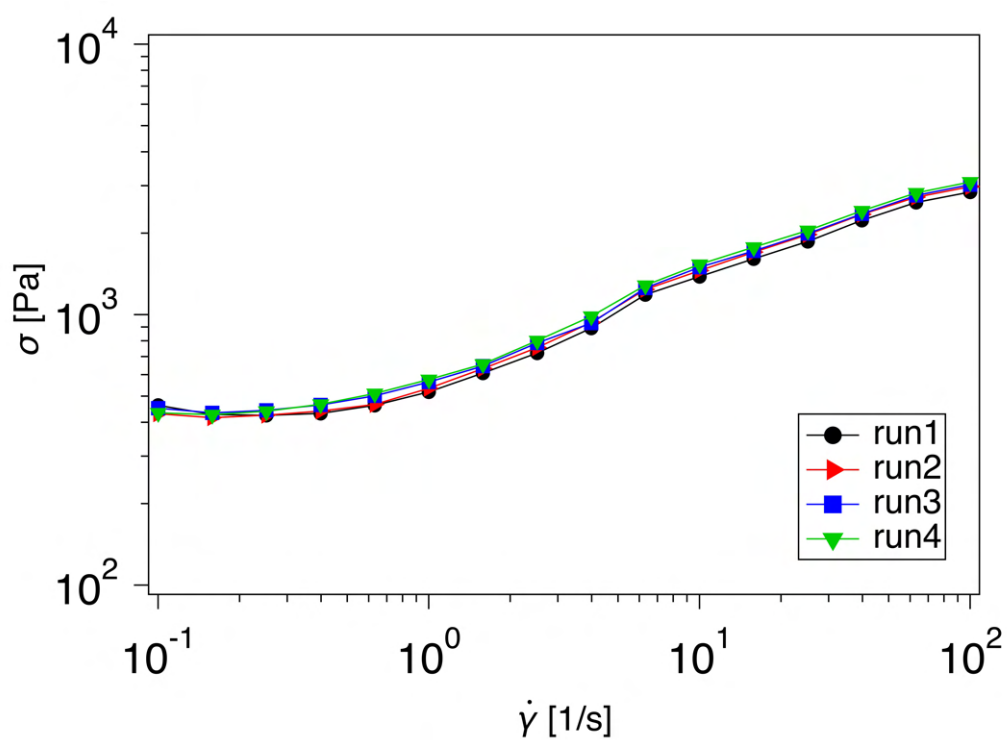
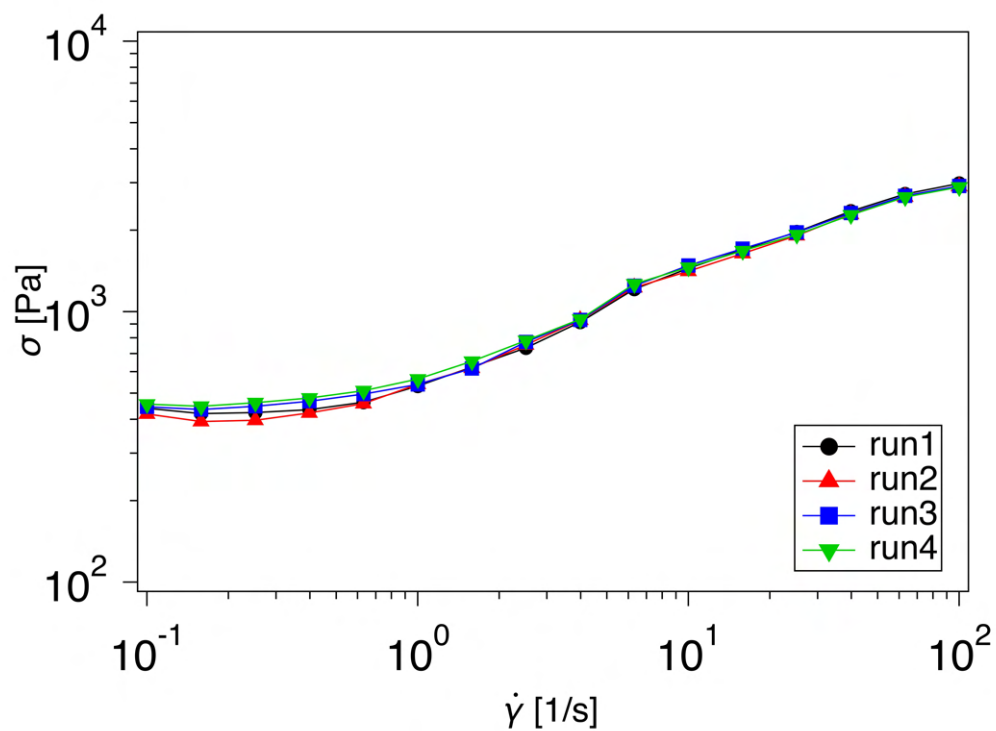
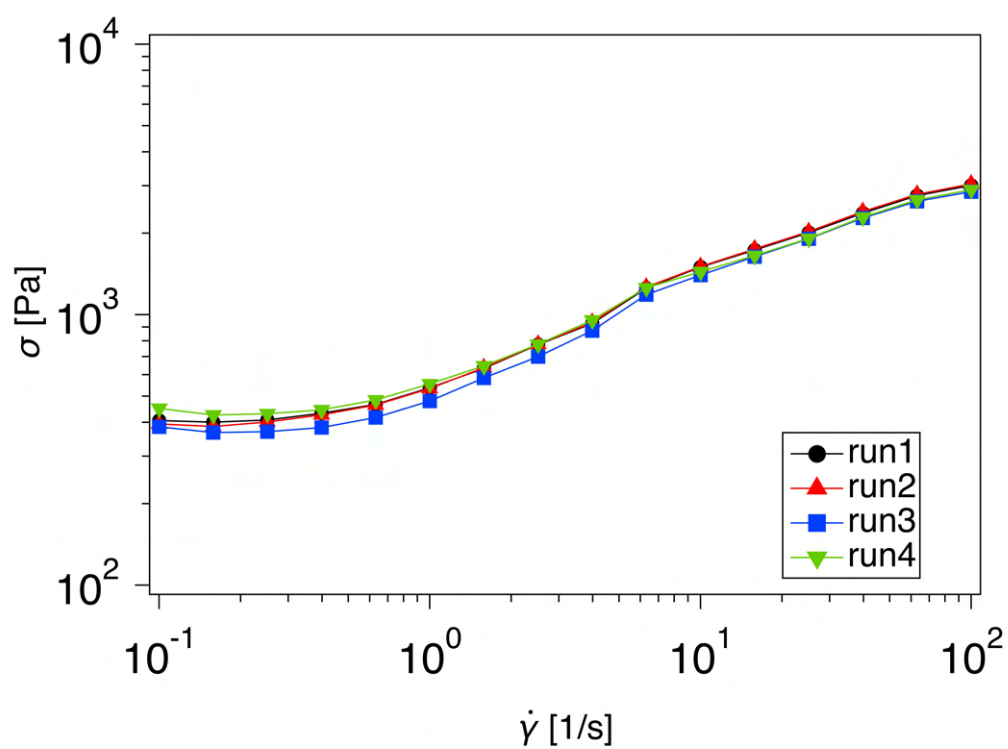
図 3.5 $B = 0.2$ T での各試料のフローカーブ

図 3.5 より、全ての試料のフローカーブが一致しており、せん断応力はシリカ粒子の体積分率に依存しないことが分かる。また、各フローカーブの傾きはどのせん断速度領域においても一定ではなく、磁場下での MR 流体が非ニュートン流体として複雑な流動特性を示していることが確認できる。図 3.5 は各試料の 1 回のみ測定によるフローカーブを示しており、再現性を確認するために各試料 4 回ずつ測定を行った。その結果を以下に示す。

図 3.6 $B = 0.2$ T での $\phi_{SiO_2} = 0$ vol% の試料のフローカーブ図 3.7 $B = 0.2$ T での $\phi_{SiO_2} = 0.2$ vol% の試料のフローカーブ

図 3.8 $B = 0.2$ T での $\phi_{SiO_2} = 0.5$ vol% の試料のフローカーブ図 3.9 $B = 0.2$ T での $\phi_{SiO_2} = 1$ vol% の試料のフローカーブ

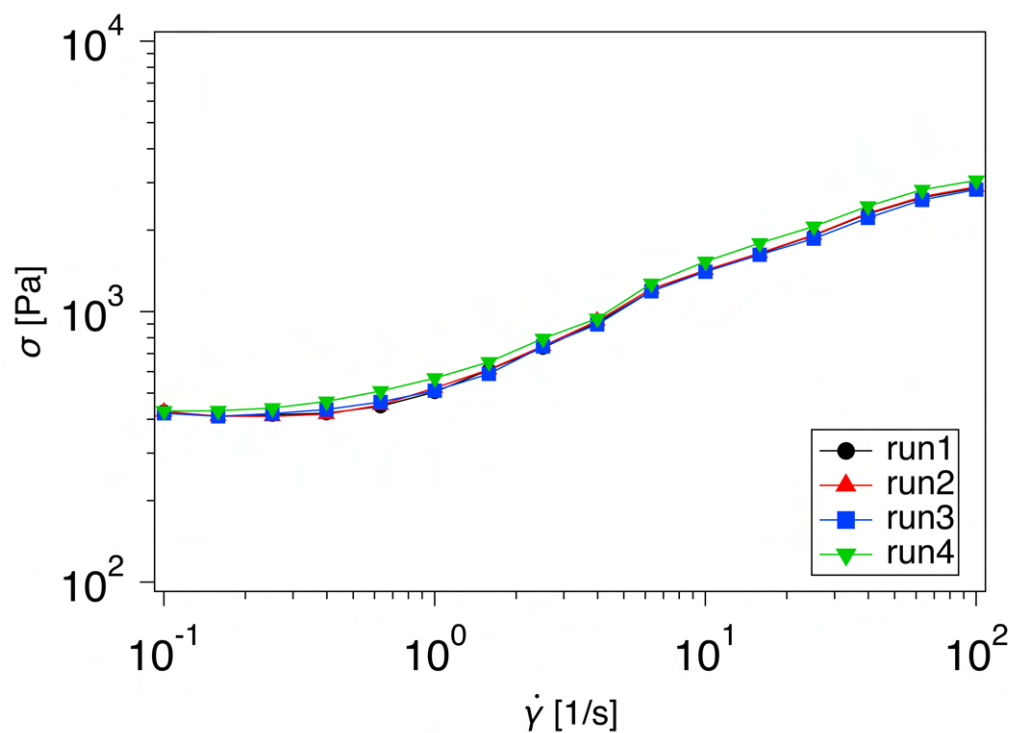


図 3.10 $B = 0.2$ T での $\phi_{SiO_2} = 3$ vol% の試料のフローカーブ

図 3.5、図 3.7、図 3.8、図 3.9、図 3.10 より、どの試料においても 4 回の同条件下での測定の誤差が ϕ_{SiO_2} の影響と同程度である。このことから、本実験で用いた系ではせん断応力のシリカ粒子体積分率依存性は見られないということが結論付けられる。

第4章

考察

MR 流体のせん断応力が添加されたシリカ粒子の体積分率に依存しなかったという本研究の結果より、本研究で用いたような分散性の良い非磁性粒子は MR 流体に添加されても、系のせん断応力に影響を与えないと思われる。

ここからは、本研究と同様にシリカ粒子の体積分率依存性を調査した先行研究 [1] と本研究の結果の比較を行う。本研究の実験結果は図 3.5 より、全ての試料のフローカーブが一致しており、せん断応力はシリカ粒子の体積分率に依存しない。一方で先行研究 [1] の結果は図 1.5 に示したとおり、シリカ粒子添加によるせん断応力上昇が見られている。さらにシリカ粒子の添加量に着目すると、シリカ粒子添加量に対してせん断応力は単調には増加していない。以上の結果は本研究の結果と異なっている。この先行研究 [1] の結果をもとに行った 2 つの考察を述べる。

先行研究 [1] において、せん断応力の変化がシリカ粒子の添加量に対して単調ではない。この原因の一つとして、試料の不均一性が考えられる。MR 流体は第 2 章の実験手順の項で述べたとおり、試料瓶内で粒子を均一に分散させておくことが難しく、磁性粒子の濃度分布が不均一であった場合はその影響が大きくせん断応力に現れてしまう。試料が均一に保たれていて、磁性粒子の体積分率が一定であることを確認するためには実験結果の再現性を得ることが必要である。しかし先行研究 [1] では再現性についての記述がない。

次に、先行研究 [1] では非磁性粒子として複雑な凝集構造を組むヒュームドシリカ粒子を使用している。よって非磁性粒子が複雑な凝集体を作り、応力に影響を与えている可能性がある。

上記のような事項を議論するには、本研究で用いたものとは異なる種類や大きさのシリカ粒子を用いた実験が必要である。また液体中での粒子の分散・凝集状態の直接観察によって、非磁性粒子が作る凝集構造を調べることも有用であろう。

第5章

結論

シリカ粒子の体積分率の異なる試料について、定常せん断応力測定を磁場を印加しながら行った。測定の結果、全ての試料のフローカーブが実験誤差の範囲内で一致し、せん断応力のシリカ粒子体積分率依存性は見られなかった。本研究では凝集の少ないとされている湿式法シリカ粒子を用いていたことから、比較的凝集の少ない非磁性粒子はMR流体に添加されてもそのせん断応力にほとんど影響を与えないと考えられる。この結果はヒュームドシリカ粒子を用いた先行研究 [1] と異なっており、シリカ粒子の凝集性の違い、および実験による試料調整条件の違いによるものと考えられる。

謝辞

本論文の執筆にあたり、多くの方々にご支援いただきました。感謝の意を申し上げます。

増淵雄一教授には、ご相談させていただくたびに的確なアドバイスと前向きなお言葉をかけていただきました。また日頃から、学生が研究する力を身に付けることを第一に考え、環境を整えてくださっています。畝山多加士准教授には、専門分野の多くの知識をご教示いただき、また研究を進めていく上で重要な目的設定の仕方や論理の進め方などについても非常に丁寧にご指導いただきました。土肥侑也助教授には、研究のすべての過程において本当に多くのアドバイスをいただきました。特に、現状を明確にした上で計画的に研究を進めていくことの重要性を教えてくださいました。増淵研究室の先輩方にも、数多くのアドバイスや前向きなお言葉をいただきました。日々向上心を持って研究に向き合う皆様の姿を見て多くの刺激をいただき、研究に取り組むことができました。同学年の市川千陽君、神谷恭太君、鈴木海渡君、山崎良平君。皆さんとはお互いに高め合いながら、非常に充実した一年間の研究室生活を送ることができました。ありがとうございます。そして、一番に私のことを気にかけて支援してくださった両親に感謝いたします。

付録 A

粒子の沈降

MR 流体の応用時の問題点として、磁性粒子の沈降による不安定性が挙げられる。ここでは、粘度 η 、密度 ρ_0 の液体中に半径 a 、密度 ρ の一つの粒子が存在している単純な状況を仮定し、この粒子の沈降の影響について見積もる。粒子は液体中でブラウン運動をするが、その影響は考えないこととする。液体中を運動する粒子には、重力と浮力、そして液体からの粘性抵抗力が働く。これらがつり合う条件を考えると、 t 秒間での沈降距離 X は以下のように求められる [9]。

$$X = \frac{2a^2(\rho - \rho_0)g}{9\eta}t \quad (\text{A.1})$$

実際には、粒子は熱運動している液体分子との衝突によって力を受けて不規則なブラウン運動をする。時刻 t におけるブラウン運動による変位の 2 乗平均にあたる MSD は以下の式で与えられる [10]。

$$\langle (X(t) - X(0))^2 \rangle = 2Dt \quad (\text{A.2})$$

ここで、 D は拡散係数で $D = \frac{k_B T}{\xi} = \frac{k_B T}{6\pi\eta a}$ と定義される (アインシュタイン・ストークスの式)。これらより、ブラウン運動による移動距離の平均値 d は、

$$d = \sqrt{\langle (X(t) - X(0))^2 \rangle} = \sqrt{2Dt} = \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi\eta a}t} \quad (\text{A.3})$$

X と d の大きさの程度を比較することによって、沈降とブラウン運動のどちらが優勢であるかが分かり、粒子が沈降するのかどうかを見積もることができる (図 A.1 参照)。(1.3)、(1.4) 式より、粒子径が 2 倍になると X が 2 倍、 d が $\sqrt{2}$ 倍になる。また、キャリア液の粘度 η が 2 倍になると、 X は $\frac{1}{2}$ 倍、 d は $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍になる。また粒子と液体の密度差は、 X のみを増加させる。則ち、粒子径と密度差を大きくすることは沈降を促進し、キャリア液の粘度を大きくすることは沈降を抑制することになる。MR 流体は粒子径と密度差が大きいため、ブラウン運動よりも沈降の方が優位になって、粒子の沈降が起りやすくなっている。

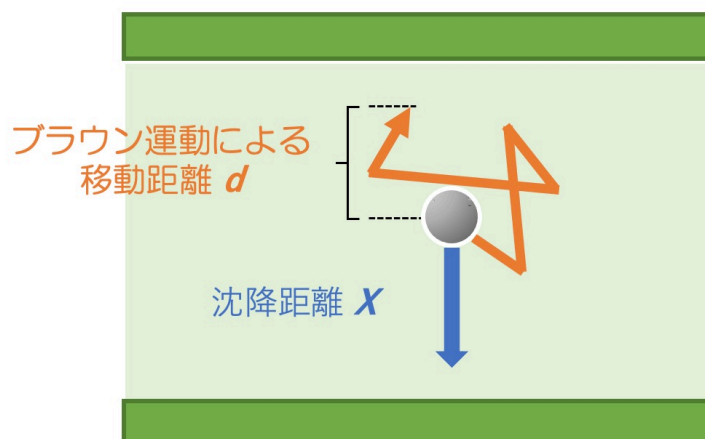


図 A.1 粒子のブラウン運動と沈降

付録 B

MR 流体の流動特性の評価

MR 流体の流動特性を評価するためには、一般にせん断応力のせん断速度依存性を表すフローカーブを作成することが多い。あるせん断速度でせん断を続け、せん断応力が定常値に達した時のその値をプロットし、この操作を連続して様々なせん断速度で行うことでフローカーブを作成できる。図は先行研究 [6] で報告された MR 流体のフローカーブである。

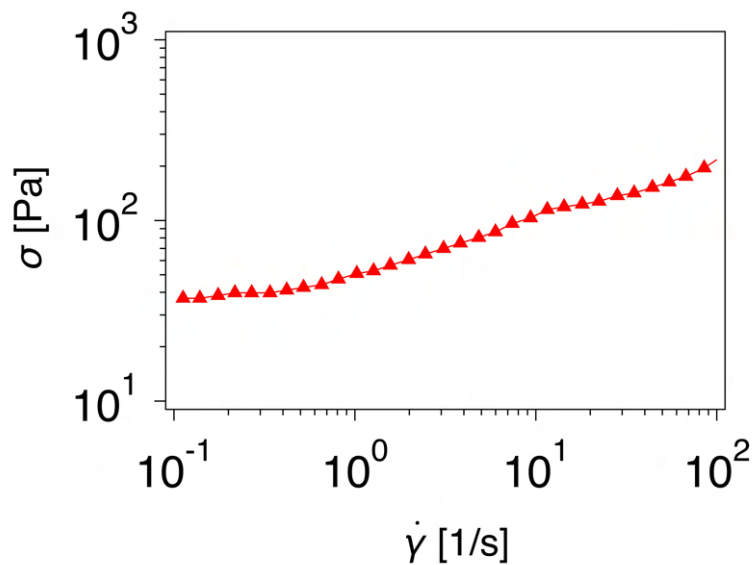


図 B.1 $\phi_{CI} = 7.5 \text{ vol\%}$ の MR 流体のフローカーブ ($B = 0.09 \text{ T}$)

フローカーブより、せん断速度の上昇に応じてせん断応力が上昇している。一方で非常に小さなせん断速度域においても大きなせん断応力を示しており、せん断速度 $\dot{\gamma} = 0 \text{ s}^{-1}$ においてもある程度の大きさの応力を持つことが予想される。ここで、フローカーブの $\dot{\gamma} = 0 \text{ s}^{-1}$ への外挿によって求めた応力を、見かけの降伏応力と定義する。見かけの降伏応力を求めるために現象論的な構成方程式に対するフィッティングがしばしば行われる。MR 流体の構成方程式として代表的なものに、以下に示す Bingham モデルや Herschel Bulkley モデルなどがある [11]。

$$\text{Bingham モデル } \sigma = \sigma_y + \eta\dot{\gamma} \quad (\text{B.1})$$

$$\text{Herschel Bulkley モデル } \sigma = \sigma_y + k\dot{\gamma}^n \quad (\text{B.2})$$

σ はせん断応力、 $\dot{\gamma}$ はせん断速度である。 σ_y は見かけの降伏応力、 η は塑性粘度、 k は整合性パラメーター、 n はせん断減粘指数と呼ばれる [1]。この二つのモデルのグラフの概形を図に示す。この見かけの降伏応力は、流体が静止状態から動き出すのに必要な応力である真の降伏応力とは本質的に一致しないものの、MR 流体の性能を評価するための代表的な物理量として用いられている。

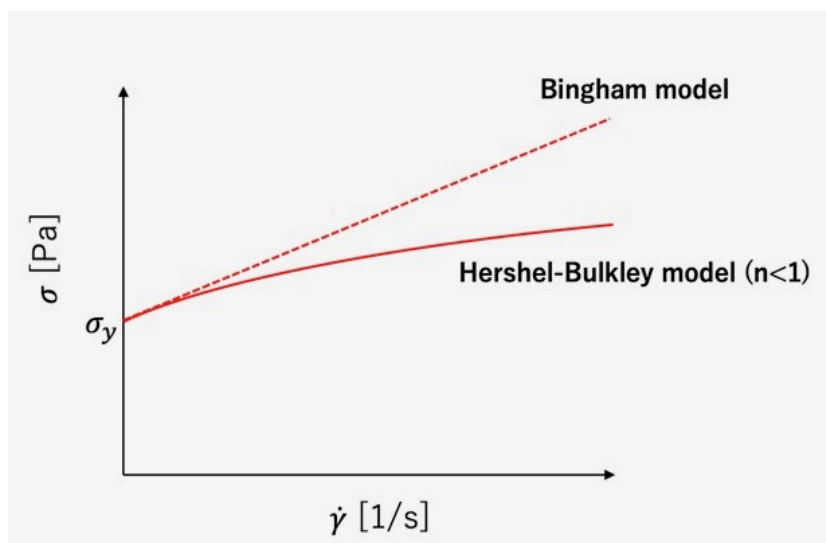


図 B.2 Bingham モデルと Herschel Bulkley モデル

参考文献

- [1] Jinhuan Xu, Jianyong Li, and Jianguo Cao. Effects of fumed silica weight fraction on rheological properties of magnetorheological polishing fluids. *Colloid and Polymer Science*, Vol. 296, No. 7, pp. 1145–1156, 2018.
- [2] MN Aruna, MR Rahman, Sharnappa Joladarashi, Hemantha Kumar, and P Devadas Bhat. Influence of different fumed silica as thixotropic additive on carbonyl particles magnetorheological fluids for sedimentation effects. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 529, p. 167910, 2021.
- [3] 中野政身. 初歩と実用シリーズ 機能性流体入門 基礎と応用. 日本工業出版株式会社. 2021.
- [4] Jacob Rabinow. The magnetic fluid clutch. *Electrical Engineering*, Vol. 67, No. 12, pp. 1167–1167, 1948.
- [5] M Ashtiani, SH Hashemabadi, and A Ghaffari. A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization. *Journal of magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 374, pp. 716–730, 2015.
- [6] Martin Cvek, Miroslav Mrlik, and Vladimir Pavlinek. A rheological evaluation of steady shear magnetorheological flow behavior using three-parameter viscoplastic models. *Journal of Rheology*, Vol. 60, No. 4, pp. 687–694, 2016.
- [7] Sung Taek Lim, Min Seong Cho, In Bae Jang, and Hyung Jin Choi. Magnetorheological characterization of carbonyl iron based suspension stabilized by fumed silica. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Vol. 282, pp. 170–173, 2004.
- [8] M Kciuk, S Kciuk, and R Turczyn. Magnetorheological characterisation of carbonyl iron based suspension. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, Vol. 33, No. 2, pp. 135–141, 2009.
- [9] 福井 寛小林 敏勝. きちんと知りたい 粒子表面と分散技術. 日刊工業新聞社. 2014.
- [10] 土井正男. ソフトマター物理学 入門. 岩波書店. 2010.
- [11] Ali Ghaffari, Seyed Hassan Hashemabadi, and Mahshid Ashtiani. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids. *Journal of intelligent material systems and structures*, Vol. 26, No. 8, pp. 881–904, 2015.