

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13898

研究課題名(和文)磁気粘性コンパウンドの開発と動力伝達装置への応用

研究課題名(英文)Development of magnetorheological compound and its application to power transmission devices

研究代表者

小松崎 俊彦 (Komatsuzaki, Toshihiko)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：80293372

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、外部磁場に応答して粘性変化が期待される新しい材料として磁気粘性コンパウンドを開発し、その基礎物性を評価した。また、提案材料を流体ブレーキに応用し、磁場に応じたブレーキトルク特性や応答性等の評価を行った。さらに、提案材料を用いた可変減衰防振マウントの作製及び防振性能評価を行った。磁気粘性コンパウンドの生成については、磁性粒子の沈殿回避のための材料組成を見出すことができた。流体ブレーキの応用については、従来と同程度もしくはそれ以上のトルクを伝達可能な装置を構成できる可能性が示された。防振マウントについては、既存材料と同等の減衰力可変性に加え、支持剛性の可変性を新たに見出すことができた。

研究成果の概要(英文)：In the present study, magnetorheological compounds (MRCs) were developed and their typical properties were investigated experimentally by using a rotational viscometer specially designed for high-viscous materials. While keeping similar viscosity change property as the magnetorheological fluid due to the externally applied magnetic field, sedimentation problem of the dispersed magnetic particles could be avoided in MRCs. In order to investigate the feasibility of the proposed material for engineering applications, MRCs were further applied to a magnetorheological fluid brake and a vibration isolator. In the case of fluid brake, the brake torque changeability was provided at a level comparable to the conventional devices. For a vibration isolator, unlike the isolator in which magnetorheological fluid is used, MRC could provide the stiffness change property depending on the magnetic field strength in addition to the damping changeability.

研究分野：振動工学

キーワード：機械力学・制御 制振 機能性材料

1. 研究開始当初の背景

外部磁場の印加に応じて見かけの粘性が変化する機能性材料の一つとして磁気粘性流体が広く知られており、物性の変化幅が大きく応答性も良好であることからショックアブソーバやクラッチなど、様々な工学的応用が検討されているが、流体中に分散させた磁性微粒子の沈殿を回避することが大きな課題となっている。申請者はこれまでに、主に沈殿の問題を解決する観点から磁性微粒子をシリコーンゲルなどのエラストマ内に分散固定し、磁場の印加によって粘弾性の変化する磁気粘弾性エラストマの提案と防振・制振装置への応用を検討してきた。本材料は磁場印加に伴う弾性率の変化を特徴とするが、固体のため分散粒子の拘束が大きく特性変化幅は流体と比べて小さい。ただし、エラストマ原液と磁性粒子を混合後、添加剤を加えて成形する過程においてポリマーの架橋の度合いを調整し、エラストマの基礎剛性を低く保てば、磁場に対する特性変化幅は大きく確保できることがわかっている。添加剤を加える前の混合物を磁気粘性コンパウンドと称する。物性としては液体と固体をつなぐ領域に位置し、特に応用面において従来着目されてこなかった領域のため学術的にも興味深い。

本研究課題が提案する新しい機能性材料としての「磁気粘性コンパウンド」は、流体と固体との間をつなぐ領域にその物性が位置する材料であり、磁気応答性材料に関わる過去の研究においてあまり着目されなかった領域を検討の対象としているという点において新規性がある。ただし、既存の機械装置類に組み込まれている流体または弾性体との置き換えが比較的容易であり、簡易な方法で機能性・適用性を付与できる磁気粘性流体や磁気粘弾性エラストマとは異なり、実用上の有効な利用方法、適用可能なアプリケーションを開拓する必要がある意味においてチャレンジ性のある課題と言える。また、比較技術として磁気粘性グリースがすでに国内の研究者によって提案されており、本課題の提案材料とターゲットとする物性領域を共有している。磁気粘性グリースは磁気粘性流体における分散粒子の沈殿の問題を解決することが開発の動機となっている点においても本課題と重複するが、一種の強粘性流体と捉えることができ、長期間静置することによって固層と液層とが分離することが報告されていることから、物理的な特性は流体寄りと考えられる。一方、本課題が提案する磁気粘性コンパウンドは半固体の性質を保有させることを狙いとしている。その意味で、両者は互いに基礎物性及び応用アプリケーションにおいて差別化が図れるものと思われる。さらに、磁性粒子の沈殿を防止、もしくは時間的に遅延させることは逆に、粘稠な分散媒中に粒子を均一分散させるための特殊技術を必要とすることを意味するので、そ

の技術開発の面においてもチャレンジ性がある。磁気粘性グリースの場合、基油、増ちょう剤、添加剤からなる混合物に磁性粒子を含有させるが、沈殿を防ぐための基本的なアイデアは増ちょう剤が有する分子の網目構造の中に粒子を保持させるものである。その技術については専門性が高く、一般の研究者・技術者への普及は難しい。一方、磁気粘性コンパウンドのベース材料としてのシリコーンコンパウンドは、基本的にはベース油としてのシリコーン油にシリカや金属微粉末等を混合させたものであり、添加剤を加えなくてもシリコーンポリマー自身が持つ分子鎖が互いに絡まり合うことで、ある程度の網目構造を持っている。つまり、磁性粒子を充填する以前のプロセスは比較的簡略であり、粒子の充填方法にフォーカスした検討が行えること、およびコンパウンド自体も市場に流通しているものを利用できるため材料の入手がしやすいこと、なども検討を進める上でメリットがある。

2. 研究の目的

前記の研究背景をもとに、本研究では、外部磁場に反応して粘性変化が期待される新しい材料として「磁気粘性コンパウンド」を開発する。その基礎物性として、無磁場時を基準とした磁気粘性コンパウンドの磁場印加時の粘度変化特性を評価する。主な比較対象として、市販品として入手可能な磁気粘性流体を選び、歪み速度、磁場強度、磁性粒子含有量が流体の粘度変化特性に及ぼす影響について、主に実験的なアプローチから検証する。また、磁場の印加タイミングに対する材料物性変化の応答性についても評価を行う。

これらの基礎的な性質を明らかにしたうえで、磁気粘性コンパウンドの工学的応用としてクラッチ・ブレーキへの適用を検討し、磁場に応じたトルク伝達特性の可変性、磁場印加タイミングに対するデバイスの応答性に関して基礎的な検証を実施することを目的とする。さらに、もう一つの応用事例として、機器や構造物を支持する防振マウントに着目し、提案材料を適用した場合の振動絶縁特性について評価した。

3. 研究の方法

(1)磁気粘性コンパウンドの作成と物性評価

基本的には非固体のため、外部磁場に応じた粘性変化特性の評価を主眼に置き、流体の粘度を評価する原理及び測定方法に倣って装置の構成、コンパウンドの評価を実施する。その際、粘性変化に加え、磁場印加タイミングに対する応答性、フィラー充填割合の影響等についても検討する。本研究では、5種類のMRCのサンプルおよび比較のための市販のMR流体(Lord社, MRF-122EG Magneto-Rheological Fluid)を用意し、基本特性の測定を行った。6つの試料それぞれの磁性微粒子

の種類および重量パーセント含有量を表1に示す。サンプル A, B は分散粒子にマグネタイト粒子を、サンプル C, D, E についてはカルボニル鉄粉を採用した。同種の磁性粒子を用いたサンプルは、相互に重量割合が異なっている。なお、MR 流体には重量割合で約 70% のカルボニル鉄が用いられている。

次に、磁気粘性コンパウンドの粘度評価方法について述べる。本課題の比較技術として、磁気粘性グリースに関する先行研究結果を踏まえ、当該研究で用いられている磁場作用下での粘性評価装置を参考にしながら、図1に模式的に示した回転型の粘性評価装置を製作した。本装置は、一定速度で流体層にひずみを与える入力側円筒と、流体に生じるせん断力を介して回転トルクが伝えられる出力側円筒からなり、出力軸側の円盤に設けられた溝に、入力側円筒の円周に沿って設けた凸部が微小隙間を隔てて食い込む形となっている。溝部には、計6種類のコンパウンド及びMR流体をそれぞれ満たす。モータによって入力軸を駆動し、コンパウンドの粘性力を介して出力側に伝達されるトルクを、出力側円盤外周位置に設けたロードセルによって計測する。溝を直交する磁束が閉ループを形成するように、出力側円盤の内部にコイルを配置する。相対運動する平行平板間の粘性力に関する理論より、ロードセルで検出した荷重値をもとにコンパウンドのせん断応力、および見かけの粘性係数を算出する。測定にあたり、コイルへの印加電流は 0~2.0A、モータの回転速度は 5~80rpm の範囲で変化させて伝達トルクを測定し、せん断応力を算出した。

同様の回転式粘度計を利用し、せん断応力の評価と併せて、供試材料の磁場印加指令に対する粘度変化の応答性評価を実施した。磁場印加前後の伝達トルク(デジタル指示器に表示される電圧値)の変化の様子を、サンプリング周波数 1 kHz の条件にて 20 秒間、時間波形として記録した。測定開始から約 5 秒後に磁場を印加し、10 秒間印加し続けた後、磁場印加を止めるという測定を、回転速度と印加電流を変化させて行った。トルク値が定常値の 10% から 90% に達するまでの時間を立ち上がり時間と定義し、データから算出した。

Table 1 Specification of samples

	磁性粒子	重量比(%)
Sample A	Magnetite	50
Sample B	Magnetite	67
Sample C	Carbonyl iron	64
Sample D	Carbonyl iron	67
Sample E	Carbonyl iron	71
MRF	Carbonyl iron	70

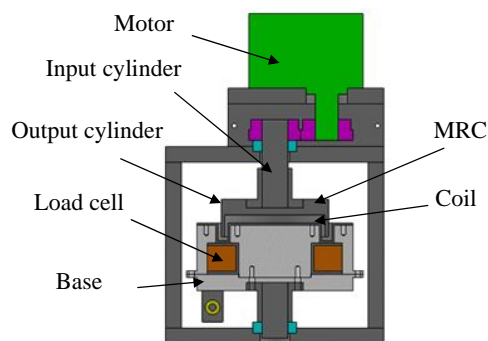


Fig.1 Cross-sectional view of rotational viscometer

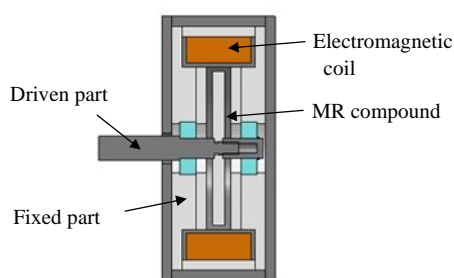


Fig.2 Cross-sectional view of MRC brake

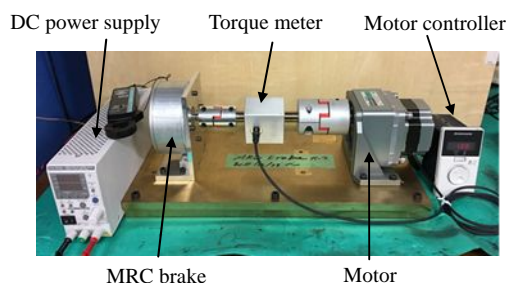


Fig.3 Experimental setup of MRC brake

さらに、試験サンプルすべてに対して、基質分散粒子の沈殿性に関する調査を行った。サンプルをピーカーに入れて最長 60 日間静置し、沈殿により発生する上澄みの厚さを測定し、比較検討した。

(2)MRC ブレーキの製作と性能評価

磁気粘性コンパウンドの基礎粘性の高さや、他の磁気応答性材料による比較事例の多さを考慮して、本課題が提案する材料の実用性を評価するアプリケーションとしては動力伝達用の流体クラッチもしくはブレーキが適切であると考えた。そこで、両者のうち構造がやや簡易な流体ブレーキに着目し、磁場の印加によって制動トルクを無段階に調整可能なブレーキ装置の設計と製作、及び性能評価を実施した。

3次元 CAD システムを用いて設計したブレーキ装置の断面カット図を図2に示す。ブレーキは主に駆動部(ロータ)と固定部(ス

データ)からなっており、2つの部分の隙間に満たされた磁気粘性コンパウンドの粘度もしくは降伏せん断応力が印加磁場強さに応じて変化することで、任意の大きさの動力を伝達する。駆動部ロータシャフトは、ステータに埋め込まれたベアリングに支持されている。ベアリングはシールベアリングであり、コンパウンドの液漏れを防止している。ステータにはコイルが埋め込まれており、ブレーキに磁気回路を発生させ、コンパウンドの見かけの粘度を変化させることでブレーキのパワーを制御可能である。

ブレーキトルク評価実験装置の構成を図3に示す。ブレーキのステータハウジングを基礎に固定し、トルクメータを介してブレーキシャフトとモータをつなぐ。モータによって供給されるトルクと、ブレーキが発生するブレーキトルクとの差に相当する軸トルクを検出する。回転速度は200~2000rpm、電流値は0.5~2.5Aの範囲で変化させて計測を行った。

(3) 磁気粘性コンパウンドの防振マウントへの応用検討

もう1つの工学的応用例として、機器や構造物の制振・衝撃吸収のための減衰力可変型防振マウントに磁気粘性コンパウンドを適用し、その振動絶縁性について評価を行った。

本研究で作成した防振マウントを図4に示す。内部に配置されたコイルに電流を印加することで、鉄で構成された磁気的閉回路に磁場のループが発生し、内部に満たされている磁気粘性コンパウンドの粘性が変化する仕組みになっている。

また、図5に示す装置を用いて、6種類のコンパウンドを適用した場合の防振マウントの振動絶縁性能を評価した。マウント上部に約5kgのおもりを結合することで構成した1自由度振動系を加振器に載せ、0~160Hzのスweep加振を与える。加振器及び防振装置を介した質量それぞれに取り付けた加速度計で加速度を測定し、得られた二つの加速度から振動伝達率を算出する。0~2.0Aの電流を0.2A刻みに変えながら実験を行った。

4. 研究成果

(1) 磁気粘性コンパウンドの物性評価

図6(a)にコンパウンドの一例としてサンプルE、及び同図(b)にMR流体のせん断応力の変化の様子を示す。これを見ると、得られるせん断応力の大きさに差はあるものの、磁気粘性コンパウンドとMR流体はほぼ同様の特性を有していることが確認できる。コンパウンドのせん断応力の変化がほぼ線形的であることが観察できる。これは、コンパウンドの磁性微粒子が沈殿や遠心力の影響を受けにくく、良好な分散状態を保っているためと考えられる。一方、せん断応力の変化倍率はその基礎粘性の低さからMR流体のほうが大きく、変化幅の観点ではMR流体が優れる。



Fig.4 Vibration isolator incorporating MRC

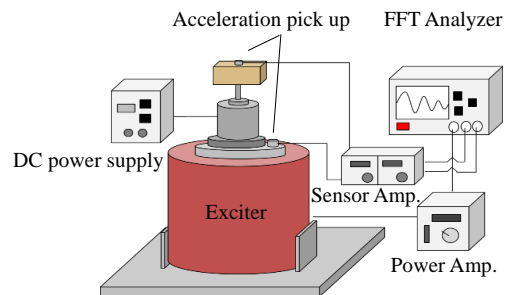
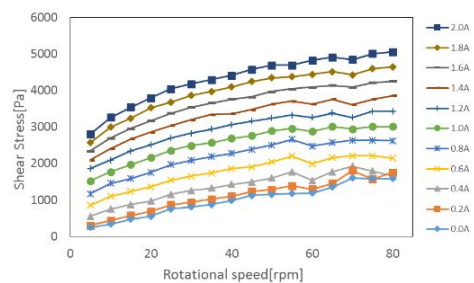
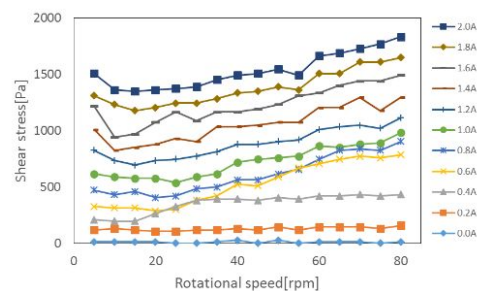


Fig.5 Transmissibility test system for MRC mount



(a) Sample E



(b) MRF

Fig.6 Shear stress variation due to magnetic field strength and rotational speed

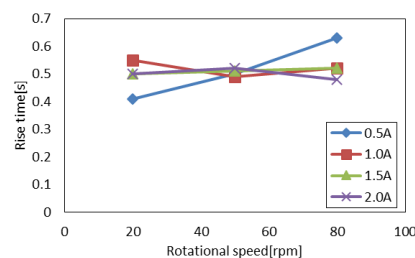
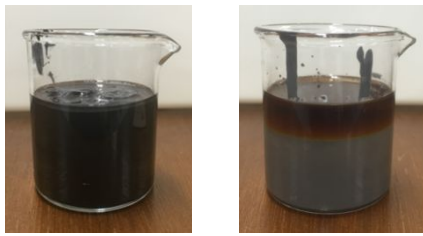


Fig.7 Relationship between response time and rotational speed



(a)Sample B (b)MRF

Fig.8 Photographs of MRC and MRF kept in a static state for 60 days

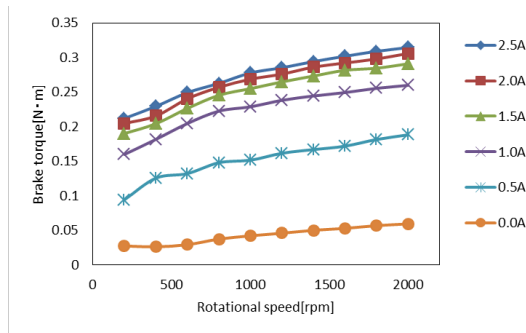


Fig.9 Relationship between brake torque and rotational speed

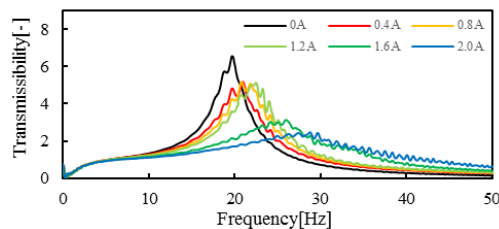


Fig.10 Measured transmissibility result using sample B

次に、磁場印加指令に対して、コンパウンドのせん断抵抗力が一定値に立ち上がるまでの時間を応答性の指標として評価した結果を、サンプルBを例として図7に示す。これを見ると、立ち上がり時間は約0.5秒であることがわかる。これは、MR流体の実験結果とほぼ同じ値であり、応答特性はほぼ同等であると考えられる。また、ほとんどの条件において立ち上がり時間は0.7秒以内であり、安定した応答特性が得られた。なお、磁場生成には直流安定化電源を用いており、本結果は電源自体の応答性に大きく依存することに注意が必要である。

さらに、分散磁性粒子の沈殿性に関する評価を実施した。最長で60日間静置したサンプルBとMR流体の画像をそれぞれ図8(a), (b)に示す。これを見ると、ともにベースオイルの上澄みが発生しているものの、明らかにMR流体の上澄み量が多い。上澄みの厚さはサンプルBが約1mm, MR流体が約10mmであり、他のサンプルでは上澄みが発生しないか、サンプルBよりもごくわずかであったことから、コンパウンドは沈殿性が改善されているといえる。

(2) 磁気粘性コンパウンドによるブレーキトルク評価結果 図9にサンプルBの回転速度とブレーキトルクの関係を示す。これを見ると、回転速度が上昇するとブレーキトルクも大きくなるのがわかる。これは流速に比例して大きくなる粘性抵抗が要因と考えられる。また、印加電流値が大きくなるとブレーキトルクも大きくなっていることがわかる。したがって、印加電流値を変化させることでブレーキトルクを制御できるといえる。しかし、印加電流の増加に伴い、トルク値の変化量が小さくなる要因として、内包するコンパウンドに磁束飽和が生じており、それに依存してブレーキトルク値にも限界があると考えられる。なお、比較対象としてMR流体を封入した場合のブレーキトルク計測も行ったが、サンプルBと比較してトルク値は全体的に約10倍、また同程度の電流値に対して磁束飽和傾向は顕著ではなかった。

(3) 防振マウントの振動絶縁性評価結果

サンプルBを封入した防振マウントについて得られた振動伝達率の測定結果を図10に示す。印加電流に対して応答曲線のピーク値、固有振動数が変化しており、後者については0~2.0Aの間で約20~30Hzの変化が確認できた。磁場印加に伴い、マウントの減衰特性のみならず、弾性率変化も固有振動数の変化として現れ、広い周波数帯域にわたり振動の伝達を抑制できる可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計2件)

井上幹登, 中西裕昭, 小松崎俊彦, 井上敏郎, 磁気粘性コンパウンドを用いた防振装置の開発, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2017, 2017年8月29日~2017年9月1日, 愛知大学(愛知県豊橋市)

能達哉, 貝賀悠太郎, 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 浅沼春彦, 磁気粘性コンパウンドの磁場応答特性に関する基礎的検討, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2016, 2016年8月23日~2016年8月26日, 山口大学工学部(山口県宇部市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

小松崎 俊彦 (KOMATSUZAKI, Toshihiko)
金沢大学・機械工学系・教授
研究者番号: 8023372

(2)研究分担者

岩田 佳雄 (IWATA, Yoshio)
金沢大学・機械工学系・教授
研究者番号: 90115212