

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04147

研究課題名（和文）非電磁式省動力界磁機構による磁気粘性流体の流動粘性制御システムの構築

研究課題名（英文）Study on viscosity control of magnetorheological fluid using power-saving non-electromagnetic magnetizing mechanism

研究代表者

佐藤 恭一（Sato, Yasukazu）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30262405

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：磁気粘性流体（Magnetorheological Fluid、以下MRFと略す）は、その粘性が外部から印加された磁界の強さに応じて変化する機能性流体である。本研究では、磁界の制御に電磁石のように電力を消費しない永久磁石を活用し、磁界制御用の動力を消費することなしにMRFの粘性を制御する技術基盤を確立し、MRFを用いたブレーキ、クラッチへの適用により、省動力な動力変換・制御システムの構築を目指す。永久磁石の移動または回転により、MRFにかかる磁界の強さを制御する省動力界磁機構を検討し、さらに、永久磁石の磁界で高粘性状態にあるMRFを介した二つの回転体間の動力伝達を実現する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

MRFに磁界を導くヨークに対して永久磁石が直線移動する非電磁省動力MRF界磁機構、および、ヨークに対して永久磁石が回転する非電磁省動力MRF界磁機構を提案し、その省動力成果を実機により検証した。従来の電磁石式MRF界磁に対して、電力消費や永久磁石の移動や保持の動力消費がほとんどない、新しい磁界制御方法を構築するもので、この成果は、MRFの界磁のみならず、電磁アクチュエータ制御への適用可能性を拡大するものであると考えられる。さらに、永久磁石界磁の高粘性のMRFを介した二つの回転体間での動力伝達の基礎研究を行い、無振動・無騒音の回転動力伝達方法の可能性を確認した。

研究成果の概要（英文）：Magnetorheological Fluid (MRF) is a functional fluid which viscosity changes according to the strength of a magnetic field applied from the outside. In this research, we utilize permanent magnets that do not consume electric power like electromagnets to control the magnetic field, establish a technical foundation to control the viscosity of MRF without consuming power for magnetic field control, and aim to build a power-saving power conversion system by applying it to the brake and clutch using MRF.

We study a power-saving field mechanism that controls the strength of the magnetic field applied to the MRF by moving or rotating the permanent magnet, and further achieve power transmission between two rotating bodies via the MRF in highly viscous state due to the magnetic field of the permanent magnet.

研究分野：機械要素およびトライボロジー関連

キーワード：機能性流体 磁気粘性流体 界磁機構 省動力 制御 動力伝達

1. 研究開始当初の背景

磁気粘性流体 (Magnetorheological Fluid、以下 MRF と略す) は、磁界の強さに応じて粘度が変化する機能性流体である。磁界の有無や磁界の強さに応じて、流動がある低粘度からすべりや流動がほとんどない高粘度の間で粘度を制御できるので、可変減衰力ダンパー、ブレーキ、クラッチなど、相対運動する二体間の制動、契合に応用されている。通常、MRF に印加する磁界の発生源には、電磁石が使用される。しかし、電磁石が MRF に磁界をかけている間は、電磁石通電による電力消費があり、また、通電中の電磁石の発熱問題もある。MRF にかける磁界の強さの制御を省動力で実現するとき、電力を消費する電磁石ではなく、永久磁石を用いようとするのは自然の発想である。ただし、MRF の周りに永久磁石を設置しただけでは、一定の強さの磁界を MRF にかけることはできるが、MRF にかかる磁界の強さを変化させることはできない。そのため、永久磁石を利用し省動力で MRF にかかる磁界の強さを変化させるメカニズムが求められている。

2. 研究の目的

本研究では、MRF を制御する磁界の発生源に電磁石を使用せずに永久磁石のみを使用して、非電磁で MRF にかかる磁界の強さと MRF の粘度を制御するメカニズムを構築することを目的とし、非電磁省動力 MRF 界磁機構を搭載した実機で、磁界の制御性や省動力効果を検証する。

3. 研究の方法

永久磁石の用いた MRF にかかる磁界の制御では、MRF と永久磁石、または、MRF に磁界を導くヨークと永久磁石の相対位置を変化させる必要がある。本研究では、次の (1)、(2) の二種類の非電磁省動力 MRF 界磁機構を検討する。さらに、提案する非電磁省動力界磁機構で従来の電磁石式界磁機構を置き換えができることを確認し、(3) で永久磁石界磁の MRF の高粘度を利用した二つの運動体間の動力伝達を実現する。

(1) 永久磁石がヨークに対して直線移動する非電磁省動力 MRF 界磁機構

図 1 に示す MRF の流路とヨークからなる磁気回路に、永久磁石を挿入する機構を検討する。MRF にかかる磁界の強さは、永久磁石とヨークの重なり量により制御される。Yoke A では、永久磁石には常に永久磁石をヨーク側に引き込もうとする吸引力が作用し、永久磁石の移動や位置保持に吸引力に打ち勝つ動力が必要となり、省動力とならない。そこで、Yoke A の機構内部に吸引力を相殺するばねを設けることにより、永久磁石の移動、位置保持に要する動力を低減する。

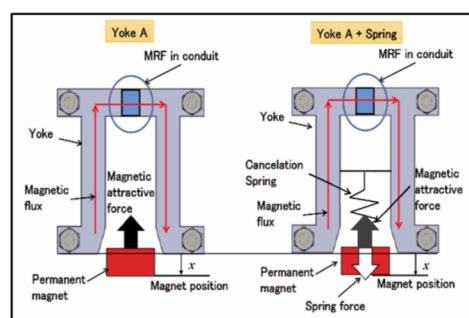


図 1 永久磁石がヨークに対して直線移動する非電磁省動力 MRF 界磁機構

(2) 永久磁石がヨークに対して回転する非電磁省動力 MRF 界磁機構

図 2 に示す MRF の流路とヨークからなる磁気回路で、永久磁石の回転により、永久磁石とヨークの重なり量を変化させる機構を検討する。Yoke C では、永久磁石には、常に磁気回路の磁気抵抗が最小となる位置に回転しようとするトルクが生じ、永久磁石の回転移動と角度保持に動力が必要となり、省動力とならない。そこで、永久磁石周りの磁気抵抗が変化しなければトルクは生じない特性を利用し、主ヨークの磁気回路磁気抵抗とほぼ等しい磁気抵抗の副ヨークを設けた機構を Yoke D とする。副ヨークの磁気回路は短絡しており、主ヨーク磁気回路とは独立している。永久磁石は、主ヨークとの重なりが変化しても副ヨークの効果により磁気抵抗が変化しないため、永久磁石に回転移動や角度保持にトルクが生じない。Yoke E は、主ヨークと副ヨークの間の空隙における局所的な磁気抵抗変化を低減するために副ヨークの磁極形状を工夫したもので、永久磁石にトルクを生じさせない原理は Yoke D と同じである。

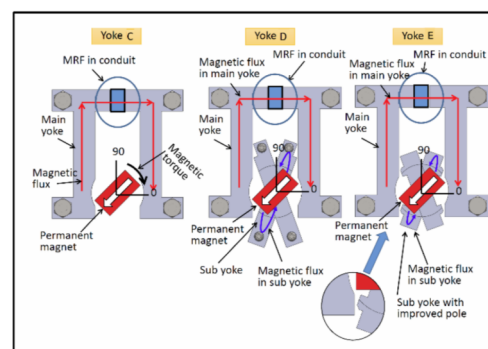


図 2 永久磁石がヨークに対して回転する非電磁省動力 MRF 界磁機構

(3) 永久磁石界磁の MRF の高粘度を利用した二つの運動体間の動力伝達

図 3 に MRF を用いたローラー型回転動力伝達機構の概略図を示す。永久磁石の磁界により二

つ円筒ローラー間に MRF が高粘度で保持されている状態にある。このローラー間に生じる MRF の局所的な高せん断力により回転動力を伝達する。磁界下の MRF の降伏せん断応力を超えるせん断力は伝達できないが、一般的な歯車伝動における振動騒音の低減や、無潤滑での運転、MRF の降伏せん断応力を超えるトルク入力に対するトルクリミッタ機能を有すると考えられる。

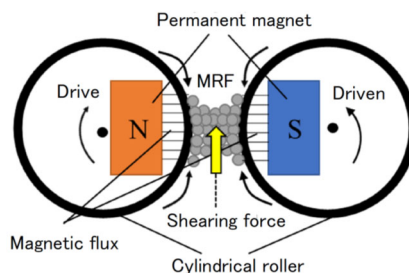


図3 永久磁石界磁の MRF の高粘度を利用した二つの運動体間の動力伝達

4. 研究成果

(1) 永久磁石がヨークに対して直線移動する非電磁省動力 MRF 界磁機構の研究成果

Yoke A において、永久磁石をヨーク側に引き込もうとする吸引力は、永久磁石位置により非線形に変化するため、図4に示す非線形ばねを設計し、Yoke A+Spring の実機に搭載した。具体的には、自然長とばね定数の異なる二つの圧縮コイルばねを組み合わせて非線形ばね特性を実現している。

図5において、①は Yoke A のみの場合の永久磁石に作用している吸引力の実測値を示している。永久磁石がヨーク内部に入り込むにしたがって吸引力は大きくなり、最大 2.5N (永久磁石位置 0mm) の吸引力が生じることが測定されている。②は設計した非線形ばねのばね特性である。③は Yoke A+Spring の永久磁石に作用する力を計測したもので、永久磁石の移動または保持に要する力は、永久磁石位置に関わらず $\pm 0.2N$ 以内であることがわかる。また、MRF にかかる磁界の強さの制御範囲は十分であることが確認されている。すなわち、永久磁石の移動または保持において、Yoke A では 2.5N 以上の吸引力に打ち勝つ何らかのアクチュエータを必要とするのに対して、Yoke A+Spring では、発生力がその 1/10 以下の 0.2N 程度のアクチュエータで十分であり、省動力化が実現されている。

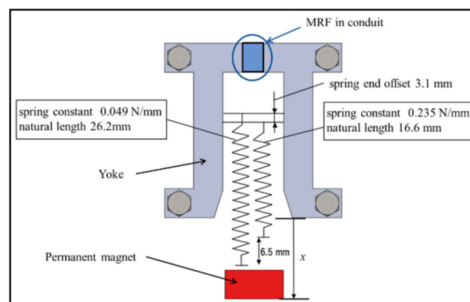


図4 永久磁石がヨークに対して直線移動する非電磁省動力 MRF 界磁機構 (非線形ばねによる永久磁石吸引力の相殺)

(2) 永久磁石がヨークに対して回転する非電磁省動力 MRF 界磁機構の研究成果

図6に永久磁石がヨークに対して回転する非電磁省動力 MRF 界磁機構の永久磁石に作用するトルクを示す。副ヨークの無い主ヨークのみの Yoke C では、永久磁石に作用するトルクが磁石角度により変化し、永久磁石端面がヨークと重なり始める角度 (60°) で最大 13Nmm となる。副ヨークを有する Yoke D では、主ヨークと副ヨークの間の空隙における磁気抵抗変化の影響を受けるものの、 $-3 \sim 5Nmm$ のトルク変動に抑えられている。副ヨークの磁極形状を工夫し、空隙におけるトルク変動低減を狙った Yoke D では、さらにトルク変動が $-1 \sim 2Nmm$ に抑えられており、Yoke D においても MRF にかかる磁界の強さの制御範囲は十分であることが確認されている。

以上をまとめると、永久磁石の直線移動による MRF 界磁機構、および、永久磁石の回転による MRF 界磁機構の両機構について、省動力で MRF にかかる磁界を制御できることが確認された。前者は、可変減衰力ダンパーのシリンダとピストンなどの直動運動するデバイスの省動力制動制御に適用可能であり、後者は永久磁石を回転軸と同軸配置したコンパクトなレイアウトで、ブレーキ、クラッチ等の回転体の省動力制動、契合制御に適用可能である。

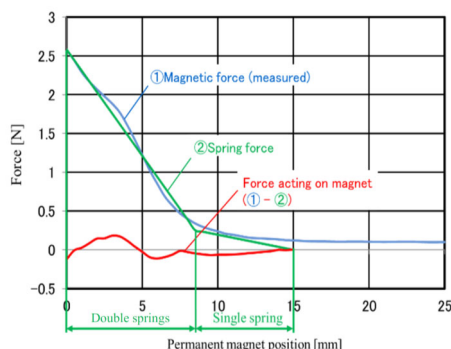


図5 永久磁石がヨークに対して直線移動する非電磁省動力 MRF 界磁機構の永久磁石の移動および位置保持に要する力

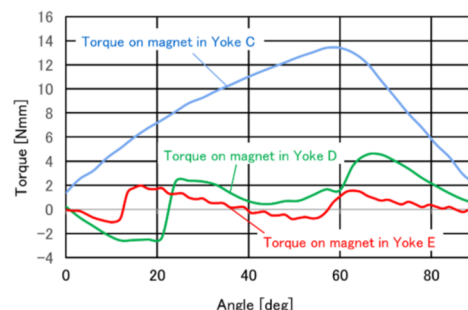


図6 永久磁石がヨークに対して回転する非電磁省動力 MRF 界磁機構の永久磁石に作用するトルク

(3) 永久磁石界磁の MRF の高粘度を利用した二つの運動体間の動力伝達の研究成果

前述の永久磁石界磁の MRF の高粘度を利用した二つの運動体間の動力伝達機構を、図 7 に示す装置で具体化した。円筒ローラー内部に配置された永久磁石でローラー間の空隙に保持された MRF に磁界をかける。円筒ローラーの材質は、非導電体のアクリル樹脂を用いている。円筒ローラーに導電体の金属を用いた場合、導体が固定永久磁石による磁界の中を運動するため、導体の渦電流による回転逆向きのトルクで動力損失が生じる。図 8 にローラー間の空隙に保持された MRF の様子を示す。ローラー間の最小空隙部と軸方向奥行からなる微小矩形面積に作用する MRF のせん断応力により、伝達トルクに寄与する接線力が伝達される。一方、最小空隙部以外は空隙間隔変化によりトルクに寄与しない MRF 鎖状クラスタの伸長、収縮が生じる。また、非磁性体のアクリル円筒表面と MRF には磁気的な接続がないため、円筒表面と MRF 界面のすべりも大きい。そのため、動力伝達効率は平均 10% と大変低い値となった。

動力伝達効率向上を目的に、伝達トルクに寄与する MRF 界面接触面積を確保するため、図 9 に示すディスク型の MRF 動力伝達機構も検討した。平行軸に取り付けられた二枚の駆動ディスクと一枚の被駆動ディスクを非接触で重なるように配置し、固定永久磁石により軸方向から重なり部に磁界をかけ、重なり部の空隙に MRF を保持する構造になっている。ディスクは、ローラー型 MRF 動力伝達機構と同様に、渦電流によるトルク損失回避の目的で非磁性体のアクリル樹脂製としている。ディスク型 MRF 動力伝達機構の動力伝達効率は平均 60% となり、ローラー型 MRF 回転動力伝達機構に比べて大幅に向上した。また、ディスク対における最大伝達トルクもローラー型に比べて増加し、ディスクの多層化によりさらに最大伝達トルクを増大させることが可能である。

ただし、一般的な歯車伝動や摩擦伝動では、その動力伝達効率は 90% 後半であるため、MRF 回転動力伝達の更なる動力伝達効率向上が今後の課題となる。

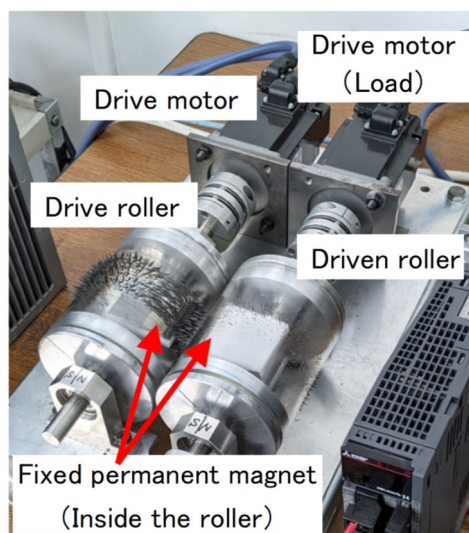


図 7 永久磁石界磁の MRF の高粘度を利用した二つの運動体間の動力伝達試験装置

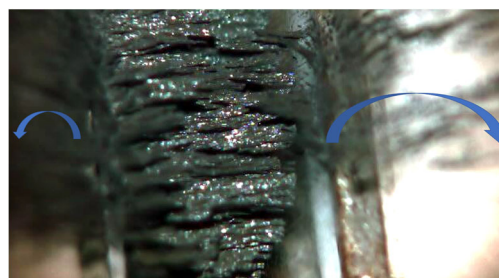


図 8 永久磁石の磁界によりローラー間の空隙に保持された MRF の様子 (トルク伝達に寄与しない MRF の伸長・収縮が発生)

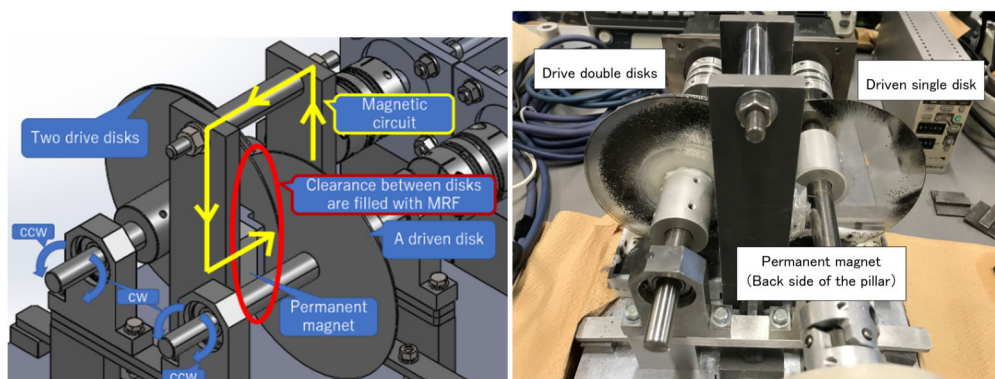


図 9 ディスク型 MRF 回転動力伝達装置

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kawasaki Jumpei, Nakamura Yuki, Sato Yasukazu	4. 巻 32
2. 論文標題 Viscosity Control of Magnetorheological Fluid by Power Saving Magnetizing Mechanism Using Movement of Permanent Magnet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 977 ~ 983
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2020.p0977	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 滑川裕生, 佐藤恭一
2. 発表標題 永久磁石界磁による磁気粘性流体を用いた二つの回転体間の動力伝達
3. 学会等名 日本機械学会 2022年度 年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川崎純平, 佐藤恭一
2. 発表標題 非電磁式界磁機構による磁気粘性流体の制御 - 効率的な界磁機構の検討 -
3. 学会等名 2019年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------