

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2014

課題番号：26630020

研究課題名(和文)リアルタイム顕微鏡観察に基づく磁性流体を用いた力伝達デバイスの性能向上設計

研究課題名(英文) Enhancement of force-transfer devices with magnetorheological fluid using real-time microscopic observation

研究代表者

長藤 圭介(Nagato, Keisuke)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：50546231

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)：磁性粒子が溶媒に含まれる流体(以下、磁性流体)を用いたトルク伝達デバイスは、小形化・高性能化が求められている。本研究の目的は、磁性流体のせん断応力を向上するために、クラスタ形成・破断・すべり現象を、リアルタイム顕微鏡観察および個別要素法解析で現象を把握することである。

2枚の円板磁極を回転させながら磁場をかけ、隙間でクラスタを形成・破断・すべり現象を起こす磁性粒子を側面から高速度カメラを用いて観察が可能で、同時に磁極間にかかるトルクを測定可能な装置を設計・製作した。磁極表面に凹凸を施すことで、対向する凸部間で磁場が集中し、最大トルクが、平板磁極のその約2.5倍に向上することがわかった。

研究成果の概要(英文)：The torque-transfer devices using magnetorheological fluid are required their miniaturization and higher torque transfer. The purpose of this study is clarification of phenomena such as forming, deforming, and slipping of the clusters by using real-time observation and simultaneous torque measurement and a distinct element method, in order to support the design of enhanced shear stress of the devices.

We designed and assembled a system, in which the two magnetic-pole disks are rotated and vertically applied magnetic field. In the clearance of the poles, magnetic particles form cluster, deformed among them, and slipped on the pole surface. The high-speed microscope observes the particles from the side of the poles, simultaneously, the torque between the poles is also measured. Furthermore, concavo-convexes on the pole surface enhanced maximum torque 2.5 times from the flat surface. This is because the magnetic fields were concentrated at the concaves, which was confirmed by simulation.

研究分野：ナノ成形加工学、ナノ材料加工学

キーワード：磁性 自己組織化 機械要素 機械工作・生産工学 流体工学

### 1. 研究開始当初の背景

磁性粒子が溶媒に含まれる流体（磁性流体、MRF: Magnetorheological Fluid）を用いたトルク伝達デバイスは、トルク伝達量を電子制御できるという長所から、電子制御が進む自動車用途に大きく期待され、小形化・高性能化が求められている。一方で固液混相流は、非ニュートン流体で従来の流体解析法を流用できないこと、粒子同士の相互作用は、粒子のマイクロ形状や表面張力、磁化量、摩擦力に大きく依存し、磁場中の磁性粒子のふるまいを解析することは難しい。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、クラスタ形成・破断・すべり現象を、リアルタイム顕微鏡観察と同時に伝達トルクを測定することで、MRFのせん断応力向上のための設計指針を明らかにすることと、それと整合する個別要素法解析モデルを構築することである。ただし、MRFは本来、液体等の溶媒に磁性粒子が浮遊したものであるが、最初のステップとして、乾いた粒子を用い、準静的な現象を対象にする。また、具体的な伝達トルク向上のための磁極構造、粒度分布や粒子形状などのパラメータも実験ベースで模索する。

### 3. 研究の方法

前述した、リアルタイム顕微鏡観察および伝達トルク測定を同時に行える装置として、2枚の円板磁極を回転させながら磁場をかけ、隙間でクラスタを形成・破断・すべり現象を起こす磁極粒子を側面外側から高速度カメラを用いて観察が可能で、同時に磁極間にかかるトルクを測定可能な装置を設計・製作した。この装置を用いて、平坦な磁極、凹凸磁極での磁性粒子のふるまいおよびトルク伝達を測定した。凹凸磁極については、溝ピッチ、溝深さをパラメータとした。

個別要素法を用いて、粒子一つ一つを、粒子間の磁化による相互作用、摩擦によるせん断相互作用を考慮しつつモデルする。

### 4. 研究成果

図1に設計・製作したリアルタイム測定装置の概要を示す。パーマロイで作製した中空円筒型ヨークを対向させ、その隙間に磁性粒子を架橋させる。磁極上部を固定し、下部を回転ステージで8 rpmで回転させ、磁極間のせん断を起こす。磁極間距離は1.8 mmとし、平坦な磁極に加えて、ピッチ 22.5° と 45° の凹凸を施した磁極を用いて、凸部の磁場集中およびクラスタ集中が期待できる。また、

ピッチ 45° について、溝深さを 0.1~3 mm で振った。中空円筒磁極の中心部での直径は 9 mm であり、その部分での凸部の幅、溝の幅、溝深さはいずれも約 1.8 mm である。この磁性粒子を側面外側から高速度カメラを用いて、磁性粒子のクラスタ形成・破断・すべり現象を観察する。中空ヨークを用いた理由は、手前の磁性粒子のみを観察するためである。それと同時に、回転ステージに取り付けられたトルクメータを用いて、トルクをリアルタイムで測定する。

図2は、平坦な磁極を用いた、観察結果である。上下磁極表面から 200~300 μm の距離の領域に、固定された幅約 50 μm のクラスタの集まりでブラシ状の磁性粒子が観察され、その間を埋めるように架橋クラスタが存在する。磁極面からの角度が 70 度になるまでは、クラスタが倒れ、それ以降は、磁極表面ですべるものと、表面に固定されたブラシ状クラスタとの間で破断が起きる現象が確認された。

図3は、磁極表面にピッチ 22.5° および 45° で、深さ 0.1 mm の溝を施した磁極の観察結果と、磁性粒子なしの磁場解析結果である。各キャプチャ像は、図4のトルク変動の極小値および極大値に相当する位相での像である。いずれも約 11.25° に相当する位相差で極小から極大に変化した。観察結果から、いずれも磁極表面となす角度 60° 程度でクラスタ破壊または磁極表面におけるすべりが発生している。図4において、トルク変動の周期は、凹凸のピッチに相当しており、それぞれ最大トルクは、現状のものに比べて 1.3 倍に向上した。

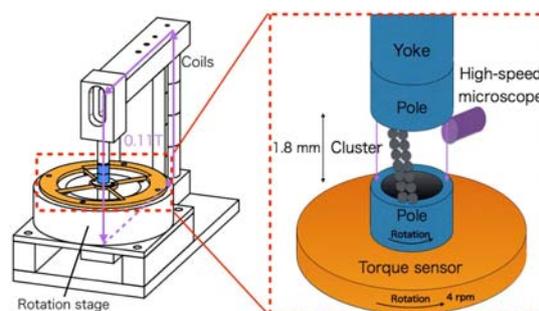


図1. リアルタイム測定装置の概要

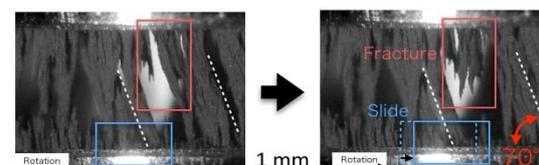


図2. 平坦磁極表面を用いた可視化結果

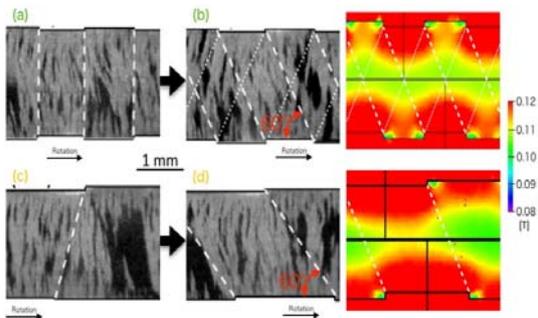


図 3. 22.5° ピッチおよび 45° ピッチの磁極での可視化結果および磁性粒子なしでの磁場解析結果

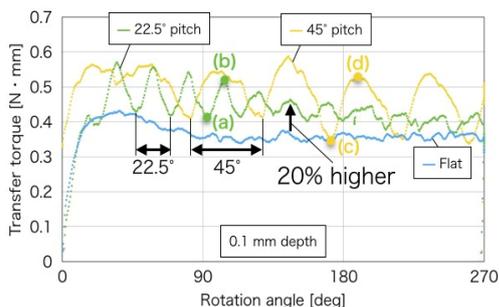


図 4. 22.5° ピッチおよび 45° ピッチの磁極でのトルク測定結果

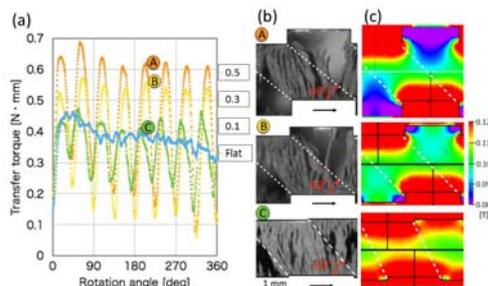


図 5. 深さ 0.1, 0.3, 0.5 mm (45° ピッチ) 磁極でのトルク測定結果と可視化結果および磁性粒子なしでの磁場解析結果

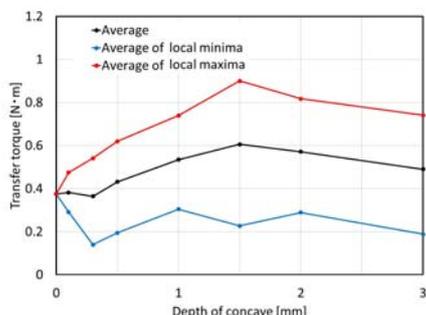


図 6. 極大／平均／極小トルクの溝深さ依存性

次に、磁極表面凹凸の 45° ピッチを固定し、溝深さを 0.1, 0.3, 0.5 mm と深くしていった。深くするほど、最大トルクは上昇した、深さ 0.3 および 0.5 mm の磁極における磁場および

磁性粒子の、トルク極大時の最大倒れ角は磁極表面との角度 40° と、より倒れた結果となった。さらに、深さ 0.1 mm では、磁極凹部にも磁性粒子が存在しているのに対し、深さ 0.3 および 0.5 mm の磁極では、対抗する凸部同士に漏れる磁場の領域においてのみ、磁性粒子が配置するという結果になった。図 6 は、極大／平均／極大伝達トルクの磁極の溝深さ依存性である。深さ 1.5 mm すなわち、溝のアスペクト比（深さ・幅比）1 程度の磁極構造において、極大トルクおよび平均トルクが、平坦磁極のそれに対して 2 倍以上となった。溝アスペクト比 1 までは、溝が深いほど凸部間の磁場の集中の影響で、クラスタ形成が促進される。一方で、アスペクト比 1 以上になると、溝の側面からの漏れ磁束が大きくなり、クラスタ形成時のせん断力が小さくなると考えられる。

上述の実験と並行して、個別要素法 (Discrete Element Method, DEM) による磁性粉体の数値解析手法の開発を行った。磁性粒子間の相互作用モデルとしては、一般に広く用いられている dipole 近似モデルを用いた。境界条件としては、前述の中空円筒型のせん断装置を模擬して、左右に周期境界を導入し (図 7 参照)、上下の磁極に挟まれた空間 (幅 200 $\mu$ m, 高さ 100 $\mu$ m, 奥行き 50 $\mu$ m) に直径 5 $\mu$ m の球粒子を所定の濃度でランダム配置した。その後、鉛直方向に外部磁場 (0.2 T) を与えてクラスタ構造を形成させた後、磁極を水平に移動させることによってせん断を加えた。図 8 は、粒子濃度 5% および 10% の試験体に繰り返しせん断を与えた場合の、磁極に作用する水平方向力  $f_x$  とせん断ひずみ (上下磁極の相対変位／磁極間距離) の関係を表したものである。一定のせん断力が得られている部分での平均値を比較すると濃度の線形倍以上の差異が見られ、高い濃度でのクラスタ化の効果が認められた。一方、濃度を 10% に固定し、図 9 に示すように 2 種類の深さの異なる凹凸磁極を用いた場合には、溝深さが深いほど大きなせん断抵抗が得られた (図 10)。粒子クラスタのせん断時の振る舞いを観察すると、クラスタが磁極に引きずられるようにして生じる水平移動が、磁極の凹凸によって阻害され、これによりクラスタが集積する現象が見られた (図 9)。したがって、このようなクラスタ構造の違いがせん断強度に影響を及ぼしている可能性がある。一方で、実験で見られたクラスタ角度の違いについては、接触点の方向分布からは顕著な違いは見られなかった。このようなマイクロ構造の違いを適切に表現する指標の開発は今後の課題である。

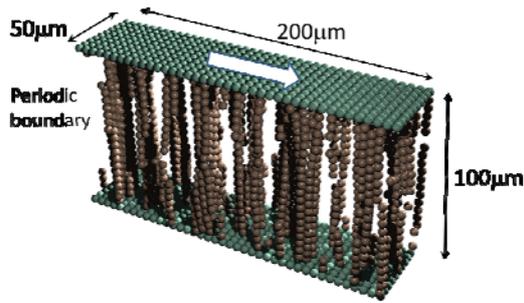


図 7. 解析モデルの概要(平板磁極)

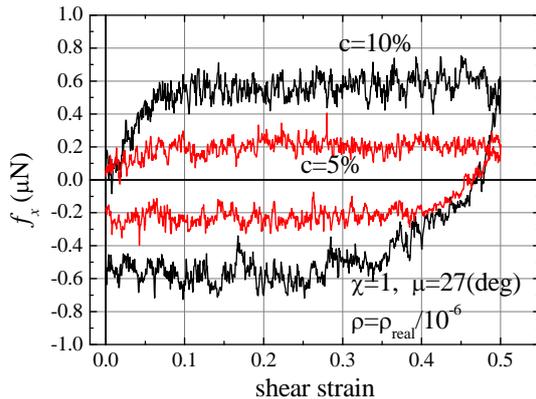


図 8. 粒子濃度の影響



図 9. 凹凸磁極を用いたせん断試験(左から平板磁極、浅い凹凸磁極(溝深さ 5 μm)、深い凹凸磁極(溝深さ 15 μm))

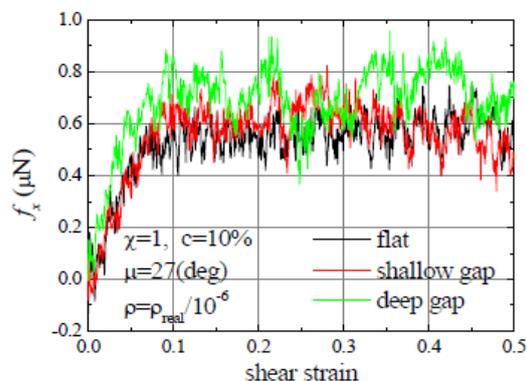


図 10. 凹凸磁極によるせん断抵抗の違い

## 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)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① K. Nagato, T. Oshima, A. Kuwayama, H. Okada, T. Matsushima, S. Takagi, M. Nakao, T. Hamaguchi, Microscopic observation of behavior of magnetic particle clusters during torque transfer between magnetic poles, J. Appl. Phys., 査読有, 117, 2015, 17C729-1 - 17C729-3  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4916113>

〔学会発表〕(計 1 件)

- ① Takuya Oshima, Keisuke Nagato, Akinori Kuwayama, Hiroshi Okada, Takashi Matsushima, Shu Takagi, Masayuki Nakao, Tetsuya Hamaguchi, Microscopic observation of behavior of magnetic particle clusters during torque transfer between magnetic poles, 59<sup>th</sup> Annual Magnetism & Magnetic Materials Conference, 2014.11.7, Hawaii, USA

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称: 動力伝達装置

発明者: 鷺野誠一郎, 井上哲, 岡田弘, 桑山明規, 濱口哲也, 高木周, 長藤圭介, 大島拓也, 松島亘志

権利者: 株式会社 デンソー

種類: 特許

番号: 特願 2014-213386、特願 2014-213389

出願年月日: 2014/10/20、2014/10/20

国内外の別: 国内

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.hnl.t.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

長藤 圭介 (NAGATO, Keisuke)

東京大学・大学院工学系研究科・講師

研究者番号: 50546231

(2) 研究分担者

松島 亘志 (MATSUSHIMA, Takashi)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号: 60251625