

ナノ粒子分散MR流体を用いたトルク制御MRFデバイスの開発

Development of the Torque Control MRF Device Using Nanoparticle-Dispersed MRF

上嶋優矢* 野間淳一* 赤岩修一* 永山敏郎* 山室成樹*

Yuya Ueshima, Junichi Noma, Shuichi Akaiwa, Toshiro Nagayama, Shigeki Yamamuro

従来の MR 流体の課題である粒子沈降やデバイスの摩耗などを軽減するため、著者らは 100nm 程度の鉄ナノ粒子を用いたナノ粒子分散 MR 流体 (SoftMRF¹⁾) の開発を進めてきた。今回、その SoftMRF を応用し、5Nm および 50Nm のトルクを発現する MRF ブレーキ (SoftMRF ブレーキ) をそれぞれ開発した。開発した SoftMRF ブレーキの性能を評価した結果、各ブレーキともトルク制御が可能であり、また、応答性を評価したところ、10ms 以下の応答速度を確認した。

Conventional MR fluid had problems such as particle sedimentation and wear of device, etc. We have developed about 100 nm diameter iron nanoparticle dispersed MR fluid (SoftMRF) in order to solve these problems. Recently, the MRF brake (SoftMRF brake) utilized SoftMRF, having 5Nm and 50Nm normal torque, were designed. Calculated values were well accorded with the result of torque test. Moreover, the transient response time was 10 milliseconds or less.

1. はじめに

磁気粘性流体 (以下、MR 流体) とは外部磁場に応じて粘性が変化する機能性流体の一つであり、クラッチやブレーキといったトルク伝達機構、ダンパなどのショックアブソーバおよび力覚提示デバイスなど、様々な応用が検討されている¹⁾。MR 流体は強磁性粒子をオイル中に分散させたものであり、一般的に強磁性粒子としてカルボニル鉄が用いられている。しかしながら、カルボニル鉄はミクロンサイズの粒子であるため、溶媒中で容易に沈降し、再分散性が悪いことが課題である。このような課題に対し、著者らは大阪大学との共同研究によって、ナノサイズの強磁性粒子を用いたナノ粒子分散 MR 流体の開発を行ってきた。開発したナノ粒子分散 MR 流体は、粒子径 100nm 程度の鉄ナノ粒子を用いているため、粒子の沈降特性や再分散性に優れている²⁾。また、極微小な隙間に MR 流体を充填することができるため、デバイスの小型化が可能であり、省エネルギー化にもつながる。

MR 流体を製造するためには飽和磁化の高い強磁性粒子が必要であり、かつ、高い生産効率が求められる。強磁性材料の中でも、単体金属では鉄の飽和磁化が最も大きいことから、鉄粒子は MR 流体に適した材料と考えられる。

ナノ粒子の合成方法は化学的方法と物理的方法に大別される。化学的方法による鉄ナノ粒子の製作も多く検討されているが、鉄は酸化しやすいため、現時点において飽和磁化の高い、結晶性に優れた鉄ナノ粒子を工業的に量産することは難しいと考えられる。一方、アークプラズマ法は物理的方法の一つであり、アークプラズマを熱源として金属の加熱蒸発と凝縮過程を利用した金属ナノ粒子合成法である³⁾。アークプラズマ法は比較的生産効

率が高く、得られる粒子は結晶性に優れている。そこでアークプラズマ法によって生成した鉄ナノ粒子を用い、粒子分散濃度 15vol% のナノ粒子分散 MR 流体 (以下、SoftMRF) を開発した。

今回、SoftMRF を利用したデバイスの性能を確認することを目的とし、回転型トルク制御ブレーキ (SoftMRF ブレーキ) を開発した。本報では、定格トルク 5Nm および 50Nm の SoftMRF ブレーキの性能について報告する。

2. SoftMRFの製作とその特性

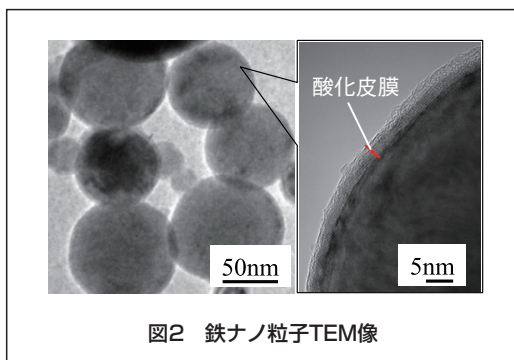
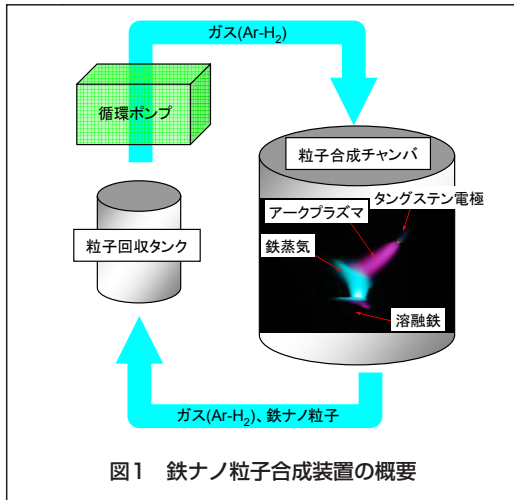
2.1 鉄ナノ粒子の生成

図 1 に、アークプラズマ法による金属ナノ粒子合成装置の概要を示す。合成装置は、粒子合成チャンバ、粒子回収タンク、真空ポンプおよびガス循環ポンプによって構成される。粒子合成チャンバにはプラズマトーチと水冷銅ハースが設けられており、水冷銅ハース上に設置した金属バルク (原料) とプラズマトーチ間にアークプラズマを生成させ、金属バルクを溶融、蒸発させる。蒸発した金属蒸気から金属ナノ粒子が生成される。生成したナノ粒子は、粒子回収タンクにあるバグフィルタにより回収される。

図 2 に、アークプラズマ法で得られる鉄ナノ粒子の TEM 像を示す。生成した鉄ナノ粒子をそのまま大気に暴露すれば、大気中の酸素および水との間で酸化反応を起こしてしまう。そのため、粒子合成後にわずかに酸素を含む雰囲気中に放置し、粒子表面に極薄い酸化皮膜を形成させる (徐酸化処理)。図に示すように、徐酸化処理によって鉄ナノ粒子の表面に 2~5nm 程度の酸化皮膜を生成させた。粒子表面が酸化皮膜に覆われることによって鉄ナノ粒子表面は安定となり、大気へ暴露することができる。なお、鉄ナノ粒子の平均粒子径 (BET 比表面積換算径) は 100~120 nm であった。

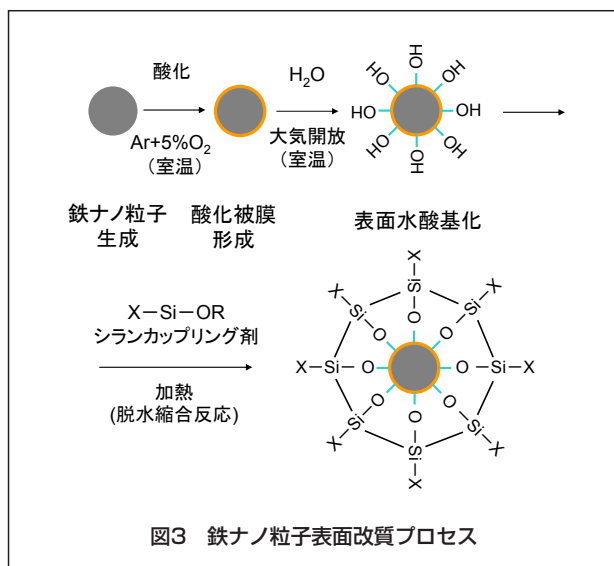
* 技術開発本部 MR プロジェクト

i) SoftMRF: 当社登録商標



2.2 SoftMRF の調製

徐酸化処理後の鉄ナノ粒子の表面は酸化膜に覆われており、オイルのような油性溶媒に分散させることは難しい。したがって、シランカップリング剤によって鉄ナノ粒子表面を疎水性へと改質した後、オイル中へ分散させた。図3に、本研究で用いたシランカップリング剤による表面改質プロセスを示す。徐酸化処理後の鉄ナノ粒子酸化膜表面に水酸基を導入し、さらに、導入した水酸基とシランカップリング剤との間で脱水縮合反応を生じさせることによって鉄ナノ粒子表面を疎水化した。表面改質処理を行った鉄ナノ粒子をオイルに分散させ、粒子分散濃度 15vol% の SoftMRF を調製した。



2.3 SoftMRF の特性

図4に、SoftMRFの粘性評価に用いた装置外観を示す。粘性評価には、回転粘度計 (RheoStress 6000、HAAKE 製) に、磁場を印加するためのMRデバイス (MR-101N、英弘精機株式会社製) を組込んだ評価装置を用いた。なお、センサには直径20mmの平行プレートを用い、流体を充填するすき間は0.5mmとした。

本装置を用いて0~0.5Tの磁場を印加し、各磁場下におけるせん断速度とせん断応力の関係を求めた。さらに、得られたせん断速度とせん断応力の関係を Casson の式を用いて近似することによって、降伏せん断応力を求めた。図5に、印加磁場と降伏せん断応力との関係を示す。磁場を印加していない時の降伏せん断応力は0.03 kPaであり、0.5 Tの磁場を印加した場合に15.34 kPaの降伏せん断応力を示した。磁場を印加することによって、降伏せん断応力は500倍程度の変化を示した。

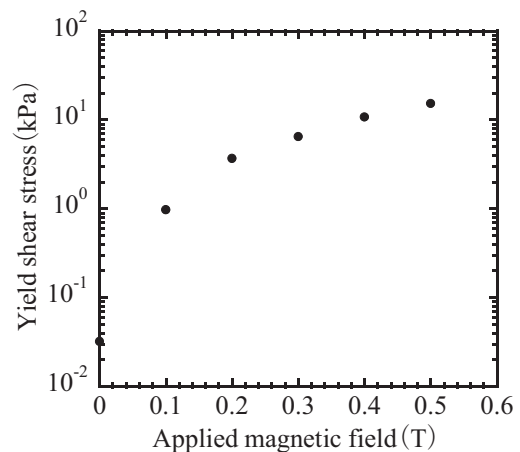
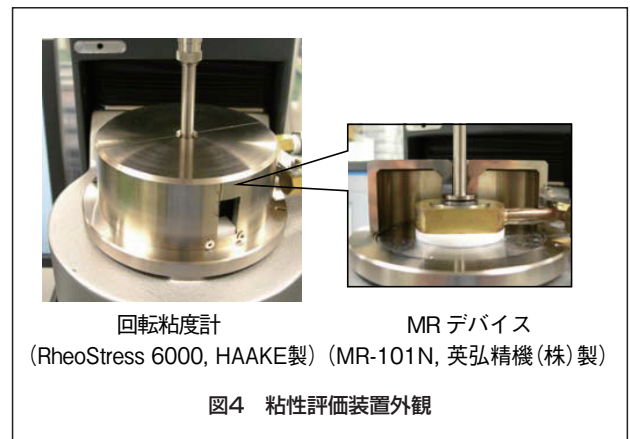


図5 印加磁場と降伏せん断応力との関係

図6にSoftMRFの沈降試験結果を示す。沈降率は式(1)を用いて計算した。図に示すように4000時間近く経過した場合でも、SoftMRFの沈降率は93%と高い値を示した。また、沈降した粒子は強固なケーキ層を形成することなく、容易に再分散させることができた。

$$\text{沈降率 (\%)} = \frac{\text{上澄みを除いた流体高さ}}{\text{元の流体高さ}} \times 100 \dots\dots(1)$$

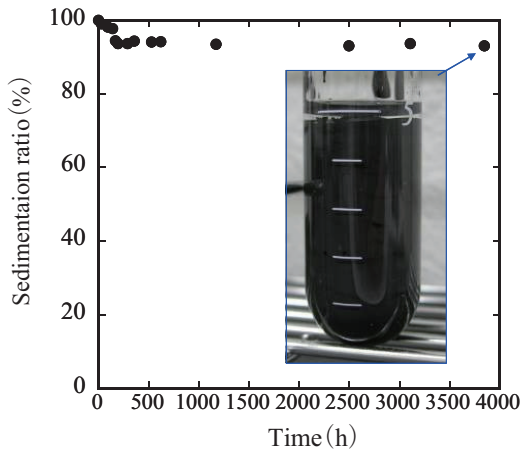


図6 SoftMRF沈降試験結果

3. SoftMRFブレーキの製作

図7に、SoftMRF ブレーキの一例を示す。円盤状のディスクを積層することによって、流体層を6層としたSoftMRF ブレーキを模式的に示したものである。図に示すように、コイルを用いてディスク間に充填した流体層に磁場を印加することによってSoftMRFの粘性を変化させ、トルクを伝達させる。さらに、印加する磁場を変化させて伝達するトルクを自在に制御することができる⁴⁾。

SoftMRF ブレーキでは、MR 流体の積層数、ブレーキ径（ディスク径）が大きいほど、大きなトルクを発生させることができる。しかしながら、流体積層数が大きいほど磁気抵抗は増加する。また、コイルの線径は細いほど、同じ大きさと巻数を多くすることができるが、電気抵抗が増加し、発熱する。デバイス径、流体積層数、流体層の厚さ、コイル巻数およびコイル線径などを総括して設計を行う必要がある。

本研究では、定格トルク 5Nm のSoftMRF ブレーキ（以下、5Nm ブレーキ）および定格トルク 50Nm のSoftMRF ブレーキ（以下、50Nm ブレーキ）を試作し、その評価を行った。以下に、それぞれのブレーキの設計方法および構造を示す。なお、試作ブレーキは、磁場を印加しない場合のトルクを考慮し、流体層の厚さは 0.5 mm（5Nm ブレーキ）、または、0.25 mm（50Nm ブレーキ）とした。また、コイル発熱を抑えるため、コイル線径を 0.5 mm（5Nm ブレーキ）、または、1.0 mm（50Nm ブレーキ）とした。

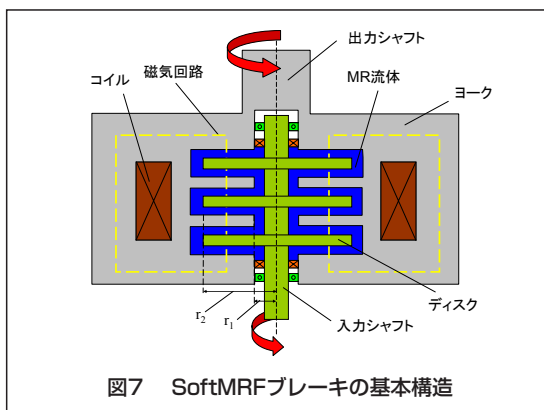


図7 SoftMRFブレーキの基本構造

3.1 SoftMRF ブレーキの設計

SoftMRF ブレーキが発現するトルクは、MR 流体の粘性評価結果に基づいて設計することができる。

式 (2) により導き出された式 (3) を用いてブレーキが発現するトルク (5Nm または 50Nm)、ディスク径、流体積層数を設計した。

$$T = \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} (r \times d\theta \times dr) \times r \times \tau_B \dots (2)$$

$$T_d = \frac{2}{3} \pi (r_2^3 - r_1^3) \times \tau_B \times N \dots (3)$$

- T : MR流体一層あたりのトルク(Nm)
- T_d : 回転デバイスの発生トルク(Nm)
- r₁ : ディスク内径(m)
- r₂ : ディスク外径(m)
- τ_B : 印加磁束密度B(T)に対するMR流体のせん断応力(kPa)
- N : MR流体層数(-)

また、SoftMRF ブレーキのMR 流体に印加される磁束密度は、式 (4) ~ (7) によって算出される。

下式によってMR 流体を充填する面積、コイル巻数などを設計した。

$$R_r = (\ln \frac{d_1}{d_2}) / (2 \pi \cdot \mu \cdot h) \dots (4)$$

$$R_a = 4h / \{ \pi \cdot \mu (d_2^2 - d_1^2) \} \dots (5)$$

$$R_p = R_r + R_a \dots (6)$$

- R_p : 磁気回路モデルの磁気抵抗(AT/Wb)
- R_r : 磁気抵抗(半径方向)(AT/Wb)
- R_a : 磁気抵抗(軸方向)(AT/Wb)
- d₁ : 磁気回路モデル内径(m)
- d₂ : 磁気回路モデル外径(m)
- h : 磁気回路モデル高さ(m)
- μ : 透磁率(H/m)

$$B = \frac{T_u \cdot A}{R_p \cdot S} \dots (7)$$

- B : MR流体部分の磁束密度(Wb/m²=T)
- T_u : コイルの巻数 (-)
- A : 電流値(A)
- S : MR流体の有効面積(m²)

図8に、5Nm ブレーキの構造を示す。本ブレーキのMR 流体積層数は6層とした。

図中の黄色の点線で示したのは、コイルに通電することによって形成される磁気回路である。磁束が積層ディスクとナノMR 流体層を横切るように磁気回路が形成される。流体層に磁場を印加することによって流体の粘性が変化し、その結果シャフトにトルクが伝達され、ブレーキとして動作する。

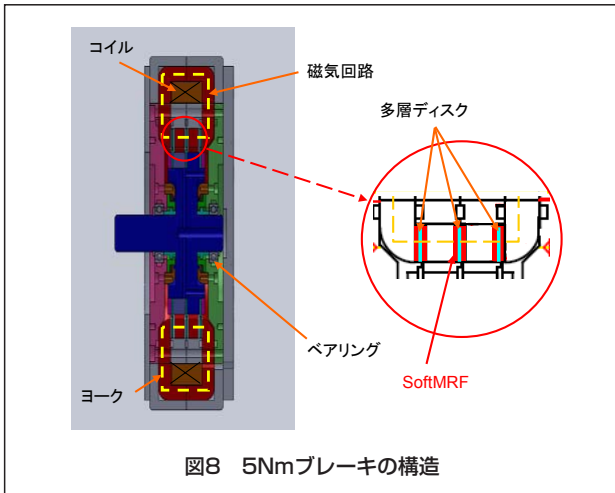


図8 5Nmブレーキの構造

図9に、50Nm ブレーキの構造を示す。本ブレーキの流体積層数は14層とした。コイルに通電することによって、図中、黒色の点線で示す磁気回路が形成される。

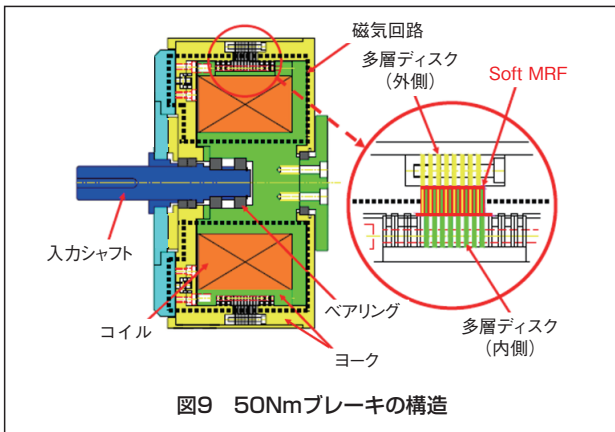


図9 50Nmブレーキの構造

SoftMRF ブレーキの設計を行う場合、機械的な設計に加え、磁気回路の設計が重要になる。まず、磁気回路

設計を行い、MR 流体部に印加される磁気回路の最適化を行った。SoftMRF ブレーキの磁気回路設計を行った後、数値解析ソフト (ANSYS) を用いた静磁場解析によって、コイルに通電した場合の磁路、磁束密度を確認した。

図10に各ブレーキの解析結果をそれぞれ示す。いずれのブレーキにおいても、流体層に所定の磁束密度が均一に印加される結果が得られた。

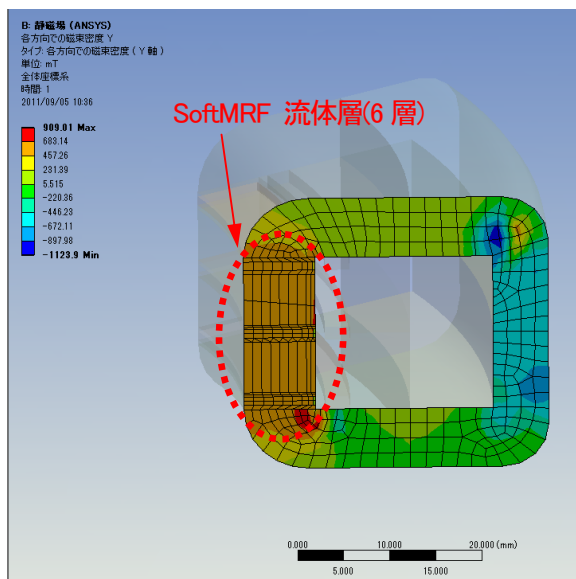
4. SoftMRFブレーキの評価方法

図11に5Nm ブレーキ評価装置の構造及び外観を示す。評価装置は、サーボモータ、SoftMRF ブレーキ用直流電源、デバイス固定ジグ、トルクを測定するためのアームおよび力センサによって構成される。サーボモータによって所定の回転とトルクを与えながら、磁場を印加させた。発現したトルクは、測定アームから力センサに伝達される。

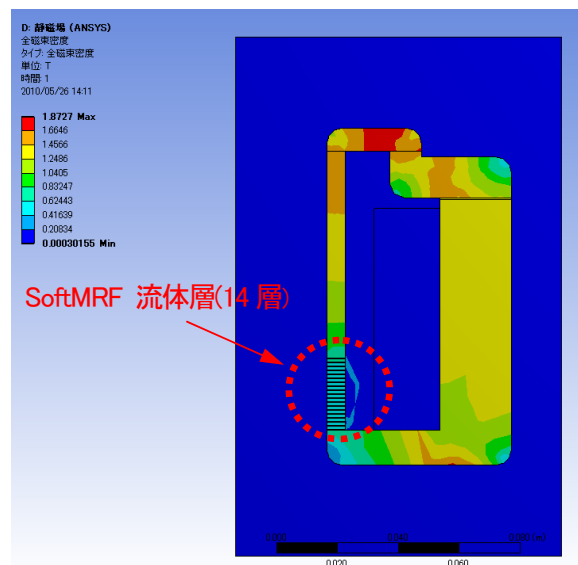
5Nm ブレーキでは、サーボモータトルクを10Nm、回転速度100 rpm として、コイル電流を0~2.8 A まで変化させ、発現するトルクとコイル電流との関係を求めた。また、応答性を観察するため、サーボモータをトルク5 Nm、90 rpm で回転させながら、コイルに0.5 A の電流を5秒間、引続き1.0 A の電流を5秒間通電し、ブレーキのトルク変化を観察した。

図12に、50Nm ブレーキ評価装置を示す。サーボモータによって所定の回転数とトルクを与えながら、磁場を印加し、発現したトルクを力センサによって測定した。

50Nm ブレーキの運転条件は、サーボモータのトルクを80 Nm、回転速度50 rpm として、コイル電流を0~0.95 A まで変化させながら、発現するトルクとコイル電流との関係を求めた。



(a) 5Nmブレーキ



(b) 50Nmブレーキ

図10 SoftMRFブレーキ磁場解析結果

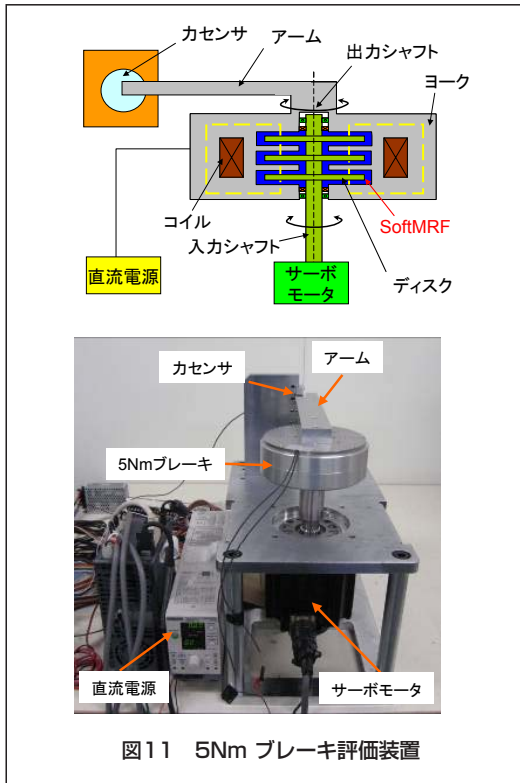


図11 5Nm ブレーキ評価装置

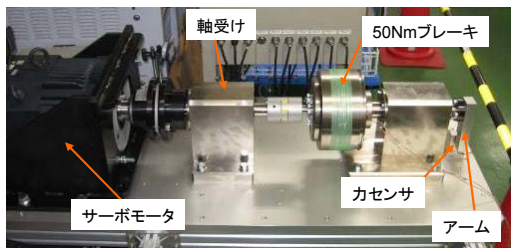


図12 50Nm ブレーキ評価装置

また、50Nm ブレーキの応答性を評価するため、コイル電流印加時に 100 V 以上の高い電圧を印加し、コイル電流を瞬時に立上げることによって、50Nm ブレーキの応答性を評価した。

5. SoftMRFブレーキの評価結果

図 13 に、5Nm ブレーキのトルクとコイル電流との関係を示す。コイルに通電していない場合のトルク（磁場を印加していない場合のトルク、以下、基底トルク）は約 0.16 Nm であったのに対し、コイル電流 2.8 A において約 6.6 Nm のトルクを発現した。磁場を印加することによって、約 30 倍のトルク変化を示した。なお、基底トルクは SoftMRF だけでなく、ベアリング、シール材などから発生する抵抗成分の和であり、低く抑えるように設計した。

図 14 に、5Nm ブレーキのコイルに 0.5 A または 1.0 A の電流を 5 秒間通電した場合のトルク変化を示す。コイル電流 0.5 A において 1 Nm、1.0 A において 3 Nm のトルクを示し、印加した磁場の変化にしたがって、トルクは速やかに変化した。

図 15 に、50Nm ブレーキが発現するトルクとコイル

電流との関係を示す。コイルに通電しない場合の基底トルクは約 0.27 Nm であり、コイル電流 0.95 A において約 69.5 Nm のトルクを発現した。磁場を印加することによって、190 倍を超えるトルク変化を示した。なお、ここでは詳細を示さないが、50Nm ブレーキの基底トルクは、特殊構造を採用することによって、低く抑えている。

図 16 に、50Nm ブレーキのステップ応答の測定結果を示す。図から求められるデバイスの応答速度（到達トルク値の 63%）は約 6 ms であった。一般に、MR 流体の応答性は数 ms といわれており、SoftMRF ブレーキにおいても一般の MR ブレーキと同等の応答速度を示した。

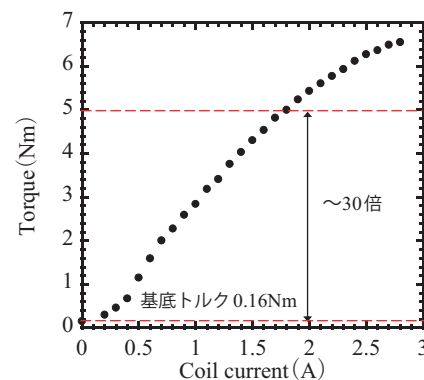


図13 トルクとコイル電流との関係 (5Nm ブレーキ)

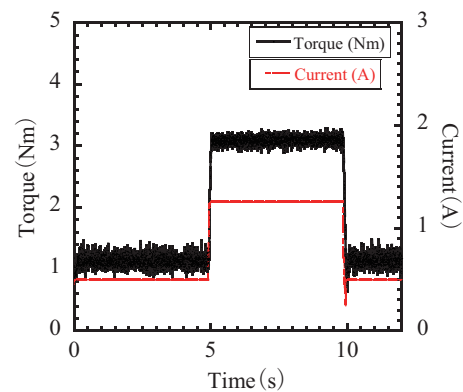


図14 トルク変化 (5Nm ブレーキ)

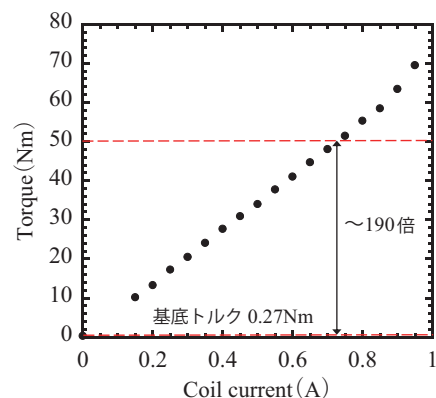


図15 トルクとコイル電流との関係 (50Nm ブレーキ)

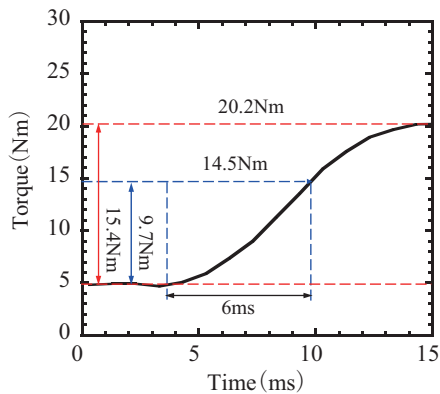


図16 ステップ応答 (50Nmブレーキ)

6. まとめ

SoftMRF を用いて回転型トルク制御 MR ブレーキを開発し、その性能を評価した。結果、SoftMRF ブレーキは、SoftMRF の粘性から算出されたトルクを発現し、計算式、数値解析結果ともよく一致した。また、その特性は、電流とトルクが比較的にリニアな関係を示しており、トルク制御性の良さが明らかとなった。さらに、応答性についても数 ms の応答速度が得られることも確認できた。

7. 今後の展開

SoftMRF を用いた回転型デバイスはデバイスの摩耗や粒子の沈降特性が軽減されるだけでなく、デバイスの小型化も可能であり、幅広い利用が期待される。

今後は、SoftMRF の粒子分散濃度を向上させて性能向上を図ると同時に、SoftMRF および SoftMRF ブレーキの耐久性を確認し、製品化を目指したい。

謝辞

本研究開発は、2010 年度 NEDO 次世代戦略技術実用化開発助成事業イノベーション実用化開発に採択され、大阪大学との共同研究によって遂行されました。大阪大学接合科学研究所 内藤牧男教授、阿部浩也准教授、大阪大学大学院 古荘純次教授 (現 福井工業大学)、菊池武士助教 (現 山形大学)、株式会社 ER テック井上昭夫様に貴重なご教示を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中野政身 :MR 流体とその工学的応用, 伝熱 Vol43, No179 (2004) ,pp.26-31
- 2) Junichi Noma, Hiroya Abe, Takehito Kikuchi, Junji Furusho, Makio Naito : Magnetorheology of colloidal dispersion containing Fe nanoparticles synthesized by the arc-plasma method, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 322 (2010) , pp.1868-1871
- 3) 宇田雅廣 : 超微粒子, 溶接学会誌, 第 54 巻, 第 6 号 (1985) , pp.318-329
- 4) Mark R. Jolly, Jonathan W. Bender, and J. David Carlson : Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids, Journal of Intelligent Material System and Structures, Vol.10 (1999) ,pp.5-13

執筆者

上嶋優矢

Yuya Ueshima

2009 年入社

ナノ粒子を用いた MR 流体の研究開発に従事



野間淳一

Junichi Noma

1993 年入社

ナノ粒子合成および MR 流体の研究開発に従事

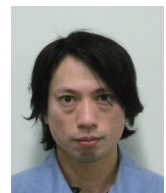


赤岩修一

Shuichi Akaiwa

2009 年入社

MR 流体を使ったデバイス開発業務に従事



永山敏郎

Toshiro Nagayama

1973 年入社

MR 流体評価業務に従事



山室成樹

Shigeki Yamamuro

1988 年入社

基礎技術研究開発に従事

