高速応答 MR 流体アクチュエータに関する研究*

武居 直行^{*1}, 古 莊 純 次^{*1}, 清 田 友 礎^{*2}

Study on Fast Response MR-Fluid Actuator

Naoyuki TAKESUE^{*3}, Junji FURUSHO and Yuuki KIYOTA^{*3} Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

Magnetorheological (MR) fluids are materials that change their rheological behavior by an applied magnetic field. They have been attracted as functional fluids that can improve properties of mechanical systems. We have developed an actuator using MR fluid. In the previous paper, a design method of MR-fluid actuator was proposed by using magnetic circuit theory. The basic experiments were carried out and the static properties that agreed well with the design were obtained. However, the transient response that wasn't considered in the design phase was not so fast. In this paper, we investigate the dynamics of the MR-fluid actuator and aim to improve the response. The transient magnetic analysis is examined in consideration of the eddy current. Two approaches are proposed to improve the response. Finally, we realize a much faster MR-fluid actuator.

Key Words: MR Fluid, Actuator, Magnetic Field, FEM, Eddy Current, Response

1. は じ め に

機能性流体の一種である MR 流体^{(1)~(4)} は印加される磁場によって、レオロジ特性が変化する流体である。MR 流体は発生せん断応力が数十から 100 [kPa] に及び、また数 [ms] で応答するという優れた特性をもっているため、機械システムに利用する新素材として注目を集め、多くの研究^{(5)~(14)} が行われている。

筆者らは MR 流体を用いて、磁場で伝達トルクが制御可能なクラッチを開発し、入力駆動部、クラッチ部および出力部からなる MR 流体アクチュエータを提案した^{(15)~(18)}。MR 流体アクチュエータは低慣性で高出力を実現できる。入力速度を機構的に制限しており、また出力軸から見た慣性も小さいため、人間が接しても安全性が高いといえる。すなわち、人間とロボットシステムが直接接する力覚提示システムのような装置

に用いるアクチュエータとして適しているといえる。

前論文⁽¹⁸⁾では、磁気回路法を利用した MR 流体アクチュエータの設計法を提案し、その設計に基づいて実際に開発した MR 流体アクチュエータにおいて基礎実験を行った。その結果、静特性においてはほぼ設計どおりの特性が実現された。しかし、設計時に考慮していなかった動特性については十分な速応性が得られなかった。そこで、トルクフィードバック制御により応答の改善を行った。

MR 流体そのものの応答速度は数 [ms] といわれている^{(4) (8) (10)}。しかしその一方、従来の研究^{(8) (9)}で指摘されているように、MR 流体を用いた装置の応答性はそれほど速いものではなかった。そこで本論文では、MR 流体アクチュエータの応答性に影響を与える要因について検討し、さらにその応答性を改善することを目指す。

以下に本論文の構成を示す。2 章では、前論文⁽¹⁸⁾で開発した MR 流体アクチュエータにおいて、コイル電流、磁束密度および出力トルクを実測し、その動特性について検討する。つぎに 3 章では、有限要素法による磁場解析を行う。まず静的磁場解析により磁束線図

* 原稿受付 2002 年 6 月 6 日。

^{*1} 正員, 大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)。^{*2} (株)安川電機 (〒806-0004 北九州市八幡西区黒崎城石 2-1)。
E-mail: furusho@mech.eng.osaka-u.ac.jp

を確認する。つぎに渦電流を考慮した動的磁場解析を行い、磁場応答および渦電流分布の解析結果を示す。4章および5章では、応答の改善方法として、材料変更により渦電流を低減する方法および形状寸法変更により反作用磁束を低減する方法の2つを示す。解析および実験を行い、これらの方法により応答速度が大幅に改善されることを示す。最後に6章において、改善後のMR流体アクチュエータの基本実験を行い、7章で本論文のまとめを示す。

2. 開発したMR流体アクチュエータの動特性

2.1 MR流体アクチュエータの構造

図1に前報で開発したMR流体アクチュエータの断面図を示す。ただし、入力軸回転用のモータはモータ軸以外を省略した。また、ハウジング、入力回転部、出力回転部およびMR流体に対応する箇所は濃淡を分けて表した。

入力部は歯車を介してモータにより回転させ、入力円盤間のMR流体に磁場を印加することによって、入力軸から出力軸へ動力を伝達する。印加する磁場の強さに応じてMR流体の降伏応力が変化するため、コイルへの電流を調整することにより出力トルクを制御することができる。その他詳細については前報⁽¹⁸⁾を参照されたい。

Fig. 1 Cross-section of developed actuator

2.2 MR流体アクチュエータにおけるトルク発生機構 MR流体アクチュエータでは、以下のようにトルクが出力されていると考えられる。

- (1) 電流アンプへの指令値により、コイルへ電流が供給される。

- (2) そのコイル電流により磁気回路に起磁力が印加され、磁場が発生する。
- (3) その磁場の強さに応じてMR流体のせん断応力が変化し、トルクとして出力軸から出力される。

これをブロック線図で表すと図2となる。図では磁気回路とMR流体を分けて書いているが、磁気回路はMR流体も含めたヨーク周りの部位すべてに関係していることに注意されたい。

Fig. 2 Block diagram of MR-fluid actuator

2.3 実測による応答速度の比較 前報では、コイル電流と出力トルクを実測した。その結果、コイル電流は1 [ms]以下の瞬時に応答しているが、出力トルクの時定数は約45 [ms]と非常に遅くなっていることがわかった。

この遅い応答の原因を調べるため、アクチュエータのトルク発生過程における磁場を実測することにした。入出力円盤間にホール素子を挟み、磁束密度の応答を計測した。ただし、このとき入力部および出力部は停止した状態である。また、今回のホール素子では、ホール素子に流れる磁束は測定できるが、MR流体自体に流れる磁束は測定できない。しかし、磁気回路の磁場応答波形は測定できると考えられる。

実測した磁束密度の結果をコイル電流および出力トルクとともに図3に示す。これらの実験結果からわかるように、磁束密度の応答時定数は約36 [ms]であり、電流の応答から比しても決して速いものとはいえない。トルクの応答を改善するには、まず磁場の応答を改善しなければならないといえる。

3. 磁場解析

3.1 静的磁場解析 まず有限要素法により、MR流体アクチュエータの静的磁場解析を行う。解析領域は図1中に太実線で示した部分である。また、各部位の材質を図4に示す。主に磁路となるヨーク部分には一般構造用圧延鋼SS400を用いており、磁路となすべきでない部分には非磁性体としてアルミニウム合金を用いている。

解析にあたり、領域を分割する要素の幅を2 [mm]以下とした。領域を分割した結果、節点数は940、要素数は1752となった。領域を要素分割したメッシュモデルを図5に示す。

これらの要素それぞれに対して、材料特性（磁気抵抗率）を与えて、計算を行う。MR流体およびSS400

Fig. 3 Step responses of nominal MR-fluid actuator

Fig. 4 Used materials in nominal MR-fluid actuator

Fig. 5 Mesh model of MR-fluid actuator

は非線形要素として、図 6 に示す B-H 曲線⁽¹⁹⁾ ⁽²⁰⁾を用いることにした。また、アルミニウム合金および空隙の比透磁率は 1 の線形要素とした。

以上により静的磁場解析を行った結果、図 7 に示す磁束線図が得られた。使用した材料特性を前報から変更したため、若干違いが見られるが、磁束は磁路とし

Fig. 6 B-H curves of MR fluid⁽¹⁹⁾ and SS400⁽²⁰⁾

Fig. 7 Magnetic flux lines in nominal MR-fluid actuator

て想定した MR 流体および SS400 の部分を通っていることが確認できる。

3.2 渦電流を考慮した動的磁場解析 導体中を通る磁束密度が変化すると、起電力が生じ渦電流が流れる。この渦電流により、磁束密度の変化を妨げる方向に反作用磁界が発生し応答が遅くなる。この渦電流を考慮して解析を行うことにより、磁場の時間応答を知ることができる。そこでつぎに、渦電流を考慮した動的磁場解析を行う。

3.2.1 渦電流を含む軸対称三次元場の方程式
(21) 導電率 σ の導体中で磁束が変化すると起電力が生じ、渦電流が流れる。この渦電流密度 J_e は次式で与えられる。

$$J_e = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \text{grad } \phi \quad (1)$$

ここで、 A は磁気ベクトルポテンシャル、 ϕ は電位である。

渦電流場の電流密度 J は、強制電流密度 J_0 と渦電流密度 J_e を用いて $J = J_0 + J_e$ と表される。軸対称三次元場では $\text{grad } \phi$ を 0 とすることができる⁽²⁰⁾ ので、渦電流を含む軸対称三次元場の方程式は次式で表される⁽²¹⁾。

$$\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{\nu_z}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_r \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) = -J_{0\theta} + \sigma \frac{\partial A_\theta}{\partial t} \quad (2)$$

軸対称三次元静磁界の方程式と比較すると、渦電流に対応する右辺第 2 項が加わった形になっている。この上式をもとに有限要素解析プログラムを構築し、磁場解析を行う。

3.2.2 材料特性 静的磁場解析では、材料特性として磁気抵抗率 ν (透磁率 μ の逆数) が必要であったが、動的磁場解析ではさらに導電率 σ が必要となる。今回使用する材料の導電率を表 1 に示す。導電率は、抵抗率 (比抵抗) $[\Omega\text{m}]$ の逆数である。

Table 1 Conductivities used in analysis

Material	Conductivity [$\times 10^7$ 1/ Ωm]
SS400	0.648 ⁽²⁰⁾
MR fluid	0
Aluminium alloy	1.972 (34 IACS%)
Air	0

表中の IACS% (International annealed copper standard) は標準軟銅 (比抵抗 $17.241 \times 10^{-9} [\Omega\text{m}]$) の導電率を 100% とした時の値である。コイル周辺や磁路部分の材料の導電率は、計算される磁束密度応答結果に大きく影響するので、使用する導電率の値は注意しなければならない。

3.2.3 動的磁場解析と実験の比較 前節の動的磁場解析により得られた磁束密度応答の解析結果とそれに対応する実験結果を図 8 に示す。ただし、応答波形の比較のため、縦軸は定常値が 1 となるように正規化した。

解析モデルと実際の材料特性や部材形状との間にモデル化誤差があるはずだが、応答はよく一致しており、渦電流を考慮した動的磁場解析により、磁場の応答を十分検討することができるといえる。

Fig. 8 Analyzed and experimental magnetic flux density of nominal MR-fluid actuator

3.2.4 渦電流密度 この解析により、各部位における渦電流の発生状況も知ることができる。10 [ms] における渦電流密度分布を図 9 に示す。

MR 流体に磁束を集中させるために入力部ヨークには磁性体の SS400 を、入力部結合部材およびコイルボビンには非磁性体の構造部材としてアルミニウム合金を用いていた。また、図 7 に示した静的磁場解析から、確かに SS400 のヨークに磁束が通り、MR 流体部分に磁束を集中できていることが確認できた。しかし、こ

Fig. 9 Distribution of eddy-current density of nominal MR-fluid actuator

の渦電流密度分布図により、入力部結合部材およびコイルボビンとして用いているアルミニウムに大きな渦電流が生じていることが確認できる。これにより、磁場の応答が遅くなっていると考えられる。

4. 材料変更による応答の高速化

4.1 渦電流の低減 図 9 に示した渦電流分布図から、応答性を改善する方法として、アルミニウム部分の渦電流を小さくすることが考えられる。アルミニウム部分の渦電流を小さくするために、導電率の小さな材料を使用する必要がある。使用しているアルミニウム合金の導電率は 1.972×10^7 [1/ Ωm] であり、標準軟銅の 1/3 程度と金属材料の中でも大きい部類に属する。いまの場合、入力部結合部材やボビンは非磁性体であればアルミニウムである必要はないので、渦電流が流れないように、非磁性体かつ絶縁材料のものに変更することにする。以後、材料を変更したものを改良型アクチュエータ (1) と呼ぶ。

4.2 解析磁場応答 入力部結合部材およびボビンを非磁性体かつ絶縁体 (比透磁率を 1、導電率を 0) として動的磁場解析を行ってみた。10 [ms] における渦電流密度分布図を図 10 に示す。絶縁体に変えた当然の結果として、入力部結合部材およびボビンには渦電流は発生しなくなったことが確認できる。また、磁束密度応答の結果を変更前の応答とともに図 11 に示す。この解析結果から、入力部結合部材とボビンを

Fig. 10 Distribution of eddy-current density of advanced actuator(1)

Fig. 11 Analyzed magnetic flux density of advanced actuator(1)

Fig. 12 Experimental magnetic flux density of advanced actuator(1)

Fig. 13 Experimental torque of advanced actuator(1)

非磁性体かつ絶縁体に変更した改良型アクチュエータ (1) では、磁場の応答速度が大幅に改善されることが期待できる。

4.3 実験磁場応答 つぎに実際に、入力部結合部材をキャストナイロンに、コイルボbinをベークライトにそれぞれ変更して、実験により磁束密度応答を計測した。実験結果を変更前の応答とともに図 12 に示す。図 11 に示した解析結果から期待されたように、実験においても磁場応答の大幅な改善が見られた。このときの時定数は約 7 [ms] であった。

4.4 実験トルク応答 さらに電流から出力トルクまでのステップ応答実験を行った。その結果を変更前の応答とともに図 13 に示す。この結果から、トルクの応答も改善前に比べて格段に向上した。このときの時定数は約 12 [ms] となり、変更前に比べて約 1/4 となった。

従来から行われている MR 流体を用いた装置の研

究では、磁束を通したくない箇所に非磁性体材料として、アルミニウムや真鍮などが使われている。静特性においては、これらは本来の役割を果たしているといえる。しかし、本結果からわかるように、装置の構造によっては、非磁性体かつ絶縁体である材料を用いることにより、大幅な高速応答を実現することが可能となる。

5. 形状寸法変更による応答の高速化

5.1 反作用磁束の低減 前章では、材料を変更することにより渦電流を減らし、その結果として反作用磁界および反作用磁束を減少させ、応答の高速化を実現することができた。これとは別の視点として、反作用磁束そのものを小さくするような対策によっても応答を高速化できると考えられる。そこで本章では、材料変更後のアクチュエータにおいて、さらに形状寸法を変更することで、磁気的な抵抗を大きくし、反作用磁束を低減することを検討する。以後、形状寸法を変更したものを改良型アクチュエータ (2) と呼ぶ。

5.2 形状寸法の変更 磁気回路法において磁気抵抗は、次式のように表される。

$$R = \frac{l}{\mu S} \quad (3)$$

ここで、 l [m] は磁路長、 S [m²] は断面積、 μ [H/m] は透磁率である。

つまり、磁束が通る断面積を小さくすることにより、磁気抵抗が増加し、反作用磁束が低減できると考えられる。これにより応答の改善が期待できる。そこで、図 14 のように入力部ヨーク (SS400) の形状寸法を変更する。MR 流体に接する内側幅は 4 [mm] 縮小し、空隙に接する上下幅は 4.5 [mm] 縮小した。

Fig. 14 Change of size of input part

これらの部分はそれぞれ MR 流体と空気に接するため、このような寸法変更により、磁気抵抗が最も増加しやすい箇所である。今回の場合、全磁気抵抗が約 2 倍に増加した。これによりコイル電流によって発生する磁束も減少することになるが、MR 流体に磁場を印加する面積も減っているため、流体部分の磁束密度

はあまり変わらなかった。しかし、せん断面積が減少しているため、出力トルクは減少することになる。

また、この変更により、渦電流が通過すると考えられる部材の断面積も減少していることとなり、電気抵抗も増加していると考えられる。そのため、これらの形状寸法の変更は単に磁気抵抗の増加による反作用磁束の低減だけでなく、電気抵抗の増加に伴う渦電流の低減による効果も含まれていると考えられる。

5.3 静的磁場解析 形状を変更したため、有限要素モデルを変更して静的磁場解析を行った。磁束線図を図 15 に示す。この図から、入出力円盤間に磁束が十分に印加されていることが確認できる。

Fig. 15 Magnetic flux lines in advanced actuator(2)

5.4 解析磁場応答 入力部の寸法を縮小したモデルで動的磁場解析を行った。その結果を今までの解析結果とともに図 16 に示す。形状寸法を変更した改良型アクチュエータ (2) では、応答速度がさらに改善されているのが確認できる。

Fig. 16 Analyzed magnetic flux density of advanced actuator(2)

5.5 実験磁場応答 実機において実際に入力部の形状寸法を変更した。実験による磁場応答の測定結果を今までの実験結果とともに図 17 に示す。実験においても解析結果とよく似た結果が得られ、寸法を変更させることで磁場応答を改善できることを確認できた。結果として、時定数は約 2 [ms] となった。

5.6 実験トルク応答 最後に、コイル電流から出力トルクまでのステップ応答実験を行った。実験結果をこれまでのトルク応答の実験結果とともに図 18 に示す。図からわかるように、トルク応答においても

Fig. 17 Experimental magnetic flux density of advanced actuator(2)

Fig. 18 Experimental torque of advanced actuator(2)

高速化が実現でき、最終的なトルク応答の時定数はもとのおよそ 1/9 の 5 [ms] となった。

以上、本研究で得られた磁束密度および出力トルクの応答時定数を表 2 にまとめる。磁場応答とトルク応答の因果関係は、より詳細な検討が必要だと考えられる。

Table 2 Time constants of experimental responses

	Nominal	Advanced(1)	Advanced(2)
Current	< 1 [ms]	< 1 [ms]	< 1 [ms]
Magnetic flux density	36 [ms]	7 [ms]	2 [ms]
Torque	45 [ms]	12 [ms]	5 [ms]

6. 改良型アクチュエータ (2) の基本特性

最後に実験により得られた、改良型アクチュエータ (2) の基本特性についてまとめる。コイル電流に対するステップ応答、トルクコイル電流応答、トルク入力速度応答および周波数応答について実験した。

6.1 微小振幅のコイル電流ステップ応答 コイル電流をステップ状に変化させたときの出力トルクの応答を調べる。0.5, 1.0 および 1.5 [A] のコイル電流を、2.0 [s] において ± 0.2 [A] だけステップ状に変化させた。このときのトルク測定結果を図 19 に示す。いずれもほぼ同様の応答波形で高速な応答が得られていることが確認できる。

6.2 トルクコイル電流線図 コイル電流を 0 [A] $\rightarrow$ 2 [A] $\rightarrow$ 0 [A] と変化させたときのトルクを計測した。1 ループ当たり 6.0 [s] で 2 ループ変化させ

Fig. 19 Step responses of advanced actuator(2)

Fig. 20 Torque-current diagram of advanced actuator(2)

たときのトルク応答を図 20 に示す。電流を増加させるときと減少させるときの間には若干ヒステリシスループが見られる。2 [A] のコイル電流に対して、約 3 [N·m] のトルク出力が得られている。

6.3 トルーク入力速度線図 入力部の回転速度に対する出力トルクへの影響を調べる。入力部を 0 [rpm] → 50 [rpm] → 0 [rpm] と 2 回変化させたときのトルク応答を図 21 に示す。コイル電流は 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 [A] とした。これらの実験結果から、出力トルクには若干の入力速度依存性があるといえるが、10 [rpm] 以上の速度ではほとんど依存性は見られない。

6.4 コイル電流からトルクまでの周波数応答

最後にコイル電流から出力トルクまでの周波数応答実験を行った。入力電流として $0.75 + 0.25 \sin(\omega t)$ [A] の正弦波を与えた。FFT 解析により得られたボード線図を図 22 に示す。200 [rad/s] 以上の高周波まで帯域を伸ばしていることが確認できる。

Fig. 21 Torque-speed diagram of advanced actuator(2)

Fig. 22 Frequency response of advanced actuator(2)

7. ま と め

- (1) MR 流体アクチュエータのトルク発生機構について考えた。コイル電流、磁束密度および出力トルクまでの応答を実測し、それぞれの応答速度を比較した。
- (2) 有限要素法により磁場解析を行った。静的解析では、MR 流体および SS400 の部分が磁路として機能していることを確認した。渦電流を考慮した動的磁場解析では、実験結果とよく似た磁束密度応答を得ることができた。また、渦電流密度分布図により、磁路を避けるために用いていた非磁性体のアルミニウムの部分に多くの渦電流が発生していることがわかった。
- (3) 渦電流による反作用磁界を低減するために、アル

ミニウムを用いていた入力部結合部材およびボビンを非磁性体かつ絶縁体のエンジニアリングプラスチックに変更した。解析および実験により磁場応答が大幅に改善されることを確認した。また、トルク応答においても、改善前に比べて格段に向上した。

- (4) 反作用磁束を低減するため、磁気抵抗が大きくなるように形状寸法を変更した。解析および実験により、磁場応答のさらなる高速化が確認でき、高速なトルク応答が実現された。
- (5) 最後に改善後の改良型アクチュエータ (2) の基本特性を示した。

最後に、本研究の一部は、科学研究費 (基盤研究 (B) No.12555073) によって遂行された。ここに謝意を表する。

文 献

- (1) Rabinow, J., The Magnetic Fluid Clutch, *AIEE Transactions*, Vol.67, (1948), 1308-1315.
- (2) Carlson, J. D., Catanzarite, D. M. and Clair, K. A. St., Commercial Magneto-Rheological Fluid Devices, *Proceedings of 5th International Conference on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Associated Technology*, World Scientific, (1995), 20-28.
- (3) Jolly, M. R., Bender, J. W. and Carlson, J. D., Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **10**-1, (1999), 5-13.
- (4) Carlson, J. D. and Jolly, M. R., MR fluid, foam and elastomer devices, *Mechatronics*, **10**, (2000), 555-569.
- (5) Ashour, O., Rogers, C. A. and Kordonsky, W., Magnetorheological fluids: materials, characterization, and devices, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **7**-2, (1996), 123-130.
- (6) Kordonsky, W. I., Demchuk, S. A., Additional magnetic dispersed phase improves the MR-fluid properties, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **7**-5, (1996), 522-525.
- (7) Bölter, R. and Janocha, H., Design rules for MR fluid actuators in different working modes, *Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering*, **3045** (1997), 148-159.
- (8) Jeon, D., Park, C., Park, K., Vibration suppression by controlling an MR damper, *Proceedings of the 6th international conference on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and their applications*, (1997), 853-860.
- (9) Choi, S. B., Hong, S. R., Cheong, C. C., Comparison of Field-Controlled Characteristics Between ER and MR Clutches, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **10**-8, (1999), 615-619.
- (10) Muriuki, M. and Clark, W. W., Design issues in magnetorheological fluid actuators, *Proceedings of the SPIE Conference on Passive Damping and Isolation*, **3672** (1999), 55-64.
- (11) Yalcintas, M., Magnetorheological Fluid Based Torque Transmission Clutches, *Proceedings of The International Offshore and Polar Engineering Conference*, **4** (1999), 563-569.
- (12) 横田真一, 吉田和弘, 近藤豊, MR 流体を作動流体とした圧力制御弁 (提案と基礎実験), 日本機械学会第 76 期全国大会講演論文集 (IV), (1998), 190-191.
- (13) 齋藤剛, 池田博康: MR アクチュエータの制御系設計用モデル, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集, (2001), 1A1-D9.
- (14) 横田雅行, 白石俊彦, 土屋高志, 森下信: MR 流体を用いたクラッチの特性, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集, (2001), 1A1-D10.
- (15) 浅岡裕泰, 林晶, 坂口正道, 章国光, 古荘純次, MR アクチュエータの開発に関する基礎研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集 (CD-ROM), (1999), 2P1-48-068.
- (16) Lin, J., Asaoka, H., Sakaguchi, M., Zhang, G. and Furusho, J., Applying Study Connected with Development of New Actuator Using MR Fluid, *Proceedings of the 2000 Japan-USA Flexible Automation Conference*, **1**, (2000), 413-416.
- (17) Takesue, N., Sakaguchi, M. and Furusho, J., Improvement of Response Properties of MR-Fluid Actuator by Torque Feedback Control, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **4**, (2001), 3825-3830.
- (18) 武居直行, 古荘純次, 坂口正道, 清田友雄, MR 流体アクチュエータの開発とその制御実験, *機論*, **67**-663, C(2001), 3525-3532.
- (19) Magneto Rheological Fluid MRF132-LD Product Bulletin, (1999), Lord Corporation.
- (20) 高橋則雄, 磁界系有限要素法を用いた最適化, (2001), 森北出版.
- (21) 中田高義, 高橋則雄, 電気工学の有限要素法, (1982), 森北出版.
- (22) 大川光吉, 永久磁石磁気回路入門, (1994), 総合電子出版社.
- (23) 近角聰信, 強磁性体の物理 (上), (1978), 裳華房.
- (24) 小沼稔, 磁性材料, (1996), 工学図書株式会社.
- (25) 内山晋, 増田守男, 磁性体材料, (1980), コロナ社.