

ER 流体を用いたインテリジェント制振システム

Intelligent Vibration Control System with ER Fluid

森下 信*・浦 環*

Shin MORISHITA and Tamaki URA

ER 流体は電場を加えることにより粘度を変化させることのできるコロイド溶液である。これを用いた各種アクチュエータについて解説する。また、開発した ER 動吸振器を自己生成形ニューラルネットワーク制御システムにより制御し、インテリジェント制振システムを実現した例を示す。

1. はじめに

現在さまざまな形式の制振システムが考案されている。制振システムの構成要素は、他の運動制御システムと同様に、センサーとアクチュエータ、および制御系である。この制御システムにインテリジェントを与えるにはどうすればよいか、というのが最初の命題であった。

制振システムをインテリジェント化するという意味は、ここでは、制振対象の動特性が不明でも、またそれが変動しても制御系が学習してアクチュエータに送る信号を生成でき、さらに、アクチュエータは即時に反応して制御信号を実現できることと解釈する。その方法には多くの選択枝があるが、著者らの研究においては、アクチュエータには ER 流体を適用した可変減衰器を、また制御系にニューラルネットワークを採用している。

ER 流体とは Electro-rheological Fluid の和訳で、我国では他に、電気粘性流体、電気レオロジー流体、エレクトロレオロジー流体、Winslow 流体等と呼ばれているが、本解説では ER 流体という呼称を用いる。ER 流体とは、電場を加えることによって、見かけ上粘度を変化させることのできるコロイド溶液の総称で、絶縁性流体中に、ある性質を持つ微粉末を分散させたものである。その特徴は、電場で粘度の大きさを見かけ上制御できること、粘度を変化できる範囲が広いこと、および応答性が良好なことにある。

本解説では、ER 流体、および ER 流体を適用した各種のアクチュエータに関して著者らの行った研究を中心に解説する。さらにインテリジェント制振システムを実現した例として、ER 流体を適用した可変減衰形動吸振器を用いて、これをニューラルネットワーク適応制御系により制御し、はりの制振実験を行った結果を紹介する。

2. ER 流体

2-1 ER 流体の歴史

流体が電場の下で粘度を変化させる現象は、一般に電気粘性効果と呼ばれ、1800年代の終わりに一様流体に対して報告された¹⁾。1932年になって Bjornstahl²⁾によりコロイド溶液に対する電気粘性効果 (ER 効果) に関する報告が初めて行われ、さらに 1947年に米国で Winslow³⁾が ER 流体の製造に関する特許申請をし、機械工学への応用法を提案した。1967年に Klass と Matinek⁴⁾が ER 効果に関する系統的検討を行った論文を発表した後、世界各国で ER 効果が注目されるようになった。

日本では、1970年代に、大学で加藤⁵⁾、犬石⁶⁾、笹田⁷⁾らにより独自に研究が進められ、また複数の企業がその応用研究に着手したが実用化には至らなかった。しかし、現在に至るまで開発の努力が続けられ、現在、学会では日本レオロジー学会の下に「エレクトロレオロジー研究会 (主査: 土井正男・名古屋大学教授)」、日本機械学会の下に「電気粘性流体およびその応用に関する研究分科会 (主査: 木村好次・東京大学教授)」がつけられ、情報交換が行われている。企業も開発を試みているようすが特許情報からわかるが、いまだに研究段階である。

海外ではイギリスをはじめにアメリカ、旧ソ連でも研究が進められ、イギリスではいくつかの大学を中心に研究グループが形成され、研究が進められている。アメリカでは複数の企業が大学との共同研究を軸に、イギリスと同様に活発に流体の開発を進めている。

ER 流体は、いわゆる機能性材料のひとつであるが、最近では知的材料の候補に挙げられている。

2-2 ER 流体の特性

ER 流体はコロイド溶液の一種であり、一様流体に微

*東京大学生産技術研究所 第2部

粒子を分散させたものである。粒子としては、シリカゲル、セルロース、澱粉、酸化アルミニウムなどが使用されてきたが、半導体の性質を有する物質の多くは ER 効果を示すことが知られている⁸⁾。どのような粒子を用いれば ER 効果が得られるかという問題に関しては、Block と Kelly により書かれたレビュー⁹⁾が参考になる。1988年までの段階で開発が公表された数多くの ER 流体の組成が一覧表になっている。その一覧表から抜けているものの中で重要と思われる技術は、杉本によるイオン交換樹脂を用いた ER 流体の開発¹⁰⁾、および井上等の人工的な粒子を用いた研究¹¹⁾である。

現在開発されている流体の問題点に関しては、なかなか公表される性質のものではないが、分散粒子の沈澱、経年変化、熱による劣化等が挙げられ、これらの問題点を解決すべく研究開発が進められている。

ER 流体の一般的特性を明らかにするために、ここでは Klass と Matinek 等⁴⁾により示された特性のいくつかを示す。

(1) 電場の強さ、せん断速度の影響

Fig. 1 にせん断速度を変化させたときの電場の強さと見かけの粘度の関係を示す。電場の強さに応じて粘度は指数関数的に増大し、図では100倍近い増粘効果が現れている。また、せん断速度を大きくするに従い、ER 効果は減少している。

(2) 粒子の含有率の影響

Fig. 2 に粒子としてシリカゲルの粉末を用いた場合の、体積含有率が ER 効果に及ぼす影響を示す。含有率を大きくするほど ER 効果は大きくなっているようすがわかる。

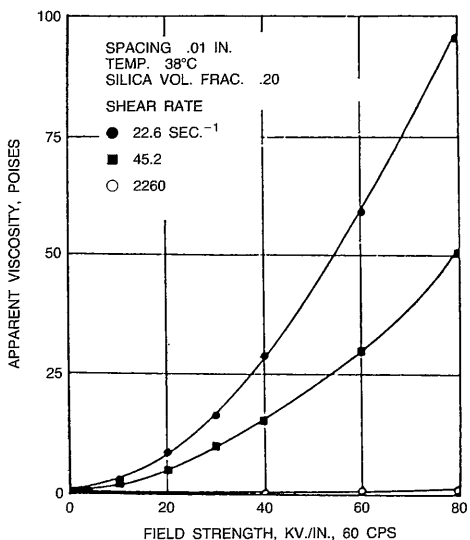


Fig. 1 ER 効果 (せん断速度影響)⁴⁾

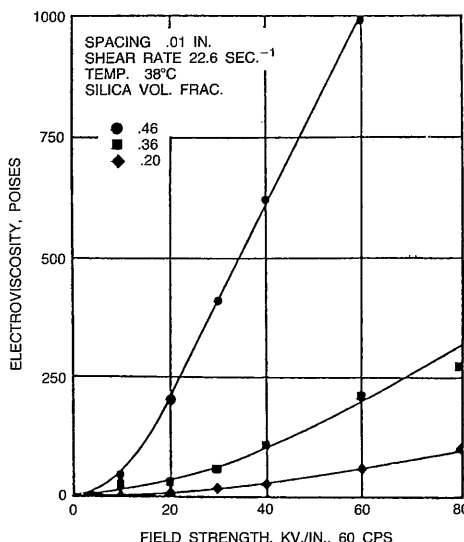


Fig. 2 ER 効果 (粒子含有率影響)⁴⁾

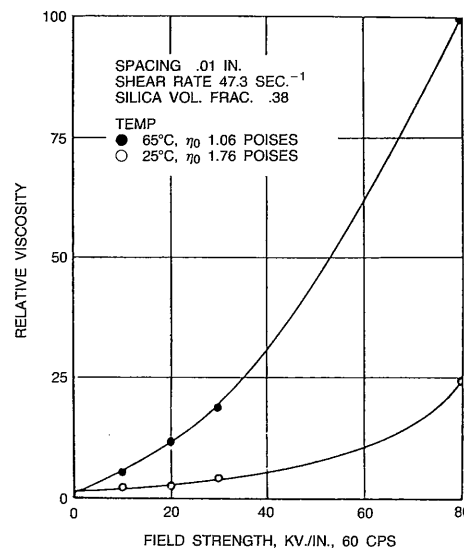


Fig. 3 ER 効果 (温度影響)⁴⁾

(3) 温度の影響

ER 流体の実用化するにあたり、問題点のひとつとして挙げられるのが温度に対する安定性である。一般的な傾向として、温度がある程度高くなると Fig. 3 に示すように ER 効果は大きくなる。しかし、ER 流体には一般に水分が含まれており、100°C を越えると流体の組成が変化してしまうことになる。その対策として、非水系の流体の開発が現在盛んである。

現在までに考えられている ER 効果のメカニズムとして有力なものに、Fig. 4 に示すような考え方があ。すなわち、電極間に電圧を加えたときに、分散粒子の鎖が

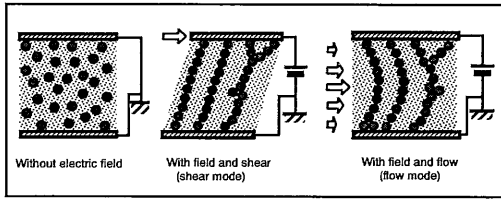


Fig. 4 ER 効果のメカニズム

多数形成され、この粒子の鎖が電極のせん断的挙動に抵抗を示したり、電極間の流れに対する抵抗を増加させるとするものである。事実、顕微鏡の下で観察をすると、このような鎖が多数形成されているようすが、いくつかの論文で明らかにされている。その意味で、磁性流体のメカニズムとは全く異なる。この ER 効果のメカニズムに対する理論的裏付けが、現在活発に進められているが、現段階では十分に解明されたとはいえない^{12)~19)}。

3. ER 流体を適用したアクチュエータ

ER 流体の応用は多岐にわたると思われるが、現在最も精力的に進められているのが振動制御機器への応用である。ER 流体を可変減衰器に適用することの利点は先に述べた利点に加えて、基本的に粘度を有しているため設計法によりバックアップ用装置が不要になること、つまり制御が不能になった場合でも基本的な機能を維持できることにある。

ここでは著者の研究を中心に、現在までに世界中で開発されている試作品の例をいくつか挙げる。

3-1 車両用ショックアブソーバへの応用

車両のショックアブソーバの特性を制御しようとする試みは従来から行われており、いくつかの形式が提案され、すでに実用化されている。その目的は縦向き安定性の向上と乗り心地の改善にある。従来使用されている形式は機械的な操作を必要とするものが多く、応答性という面で不十分である。Fig. 5 は著者が試作したショックアブソーバの模式図である²⁰⁾。ピストン部に電極が取り付けられており、ER 流体に満たされたシリンダ内をロッドの動きに応じて電極が往復運動する。その最中に電極に加えた電圧を変化させることで減衰力を制御しようとするものである。Petek 等は ER 流体を用いたショックアブソーバを開発し、実車に搭載して実験を行っており、形状は従来のものほとんど変わらず、性能は従来のものを凌ぐとされている²¹⁾。

3-2 回転機械用スクイズフィルムダンパへの応用

ターボ機器に代表される回転部を有する機械では、回転軸を安定化するために外部減衰を与えることが望ましい。与えるべき減衰の大きさは回転軸の振動モードに依

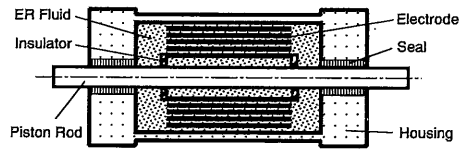


Fig. 5 ER 流体を用いた可変ショックアブソーバ

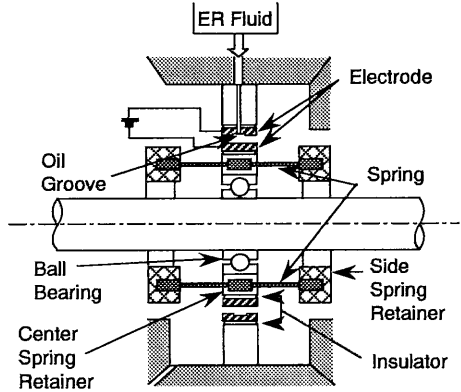


Fig. 6 可制御形スクイズフィルムダンパ

存するため、回転中に減衰の大きさを制御することにより広範囲な回転状態で安定化がはかられる。転がり軸受で支持される回転体にはわずかな外部減衰しか作用しないため、通常スクイズフィルムダンパが併用される。スクイズフィルムダンパの諸特性は潤滑油の粘度と隙間の大きさで決定されるので、運転中に減衰特性を変化させるという発想がなかったが、ER 流体を適用することで可能となる。Fig. 6 にスクイズフィルムダンパの概略図を示す。軸系の支持部の最適減衰を与えることができ、支持減衰を制御することで複数の危険速度を安定に通過することが可能となる。

3-3 可変減衰形動吸振器への応用²³⁾

動吸振器は一般に質量とバネと減衰器からなり、構造物に取り付けることで質量の逆共振作用と減衰器のエネルギー散逸作用で構造物の振動を抑えるものである。ER 流体を減衰器に適用することで、可変減衰形動吸振器を試作した。Fig. 7 に動吸振器の模式図を示す。動吸振器は二重円筒型で外側が質量に対応し、上下にバネが取り付けられている。二重円筒のすき間に ER 流体を流入させ、加える電圧を変化させることで減衰力の制御を行う。

3-4 エンジンマウントへの応用

現在、応用分野として注目を集めているのが、減衰力を制御できる自動車用エンジンマウントである。構造の概略は Fig. 8 のように、従来用いられている流体封入

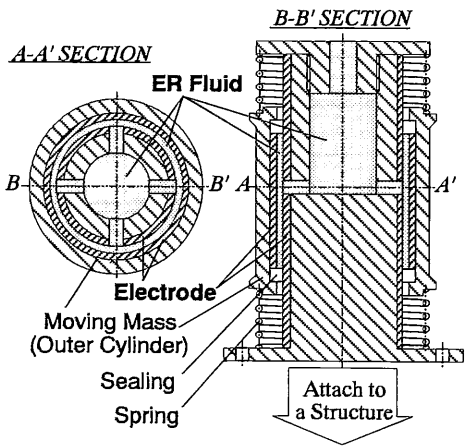


Fig. 7 可制御形動吸振器

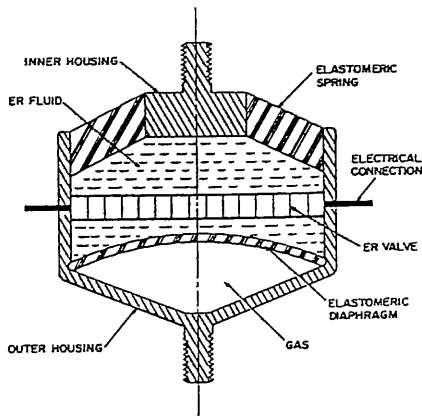


Fig. 8 ER エンジンマウント²⁴⁾

型エンジンマウントの一部を改造したものである²⁴⁾。通常はオリフィスの抵抗を利用して減衰力を生じさせるが、これを電極に置き換えて、電圧を制御することで電極間を流れる ER 流体の抵抗を制御し、減衰力を可変にしている。これによりエンジンの回転数に応じて、また加速・減速に応じて減衰力を制御でき、運動性能および静粛性が大幅に向上するとされている。参考に著者が開発したエンジンマウントの概略を Fig. 9 に示す²⁵⁾。

3-5 クラッチへの応用

日本で最初に応用例が一般に示されたのが、ここに述べる杉本により開発されたクラッチである²⁶⁾。Fig. 10 にその概略を示す。これはロープ巻き取り型の多重無段階制御方式クラッチで、人工指の制御に応用したものである。軸に固定した円盤と軸回転に拘束されない可動円盤の間に ER 流体を流入させ、軸を回転させることにより可動円盤を追従させる。その際、円盤間に加える電圧を制御することにより、可動円盤の追従力を変化させ、それともない巻き取り力を制御することができる。この巻き取りで指に加えることのできる力を変化させることができ、人間の指の動きに近い人工指を実現したとされている。

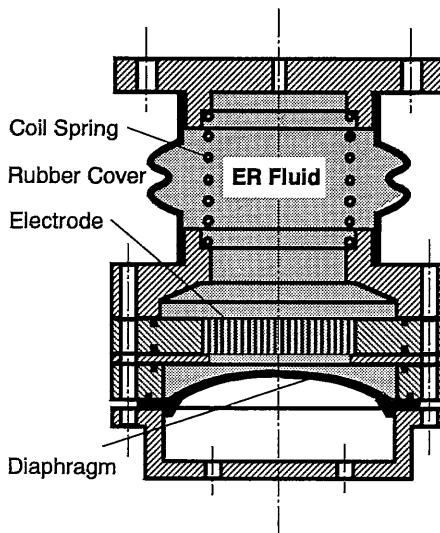


Fig. 9 ER エンジンマウント

4. 自己生成形ニューラルネット適応制御系^{27), 28)}

制御系にニューラルネットワークを採用するという考え方は、現時点では制御系をインテリジェント化するという目的においては、最適な選択のひとつである。また、ER 流体のように非線形性が強く、時間と共に変化する物質を含む系の制御に適していると考えられる。本研究で用いた制御系は、著者の一人によって海中ロボットの制御系のために開発された自己生成形ニューラルネット適応制御系 (Self-Organizing Neural-net Control System: SONCS) である。

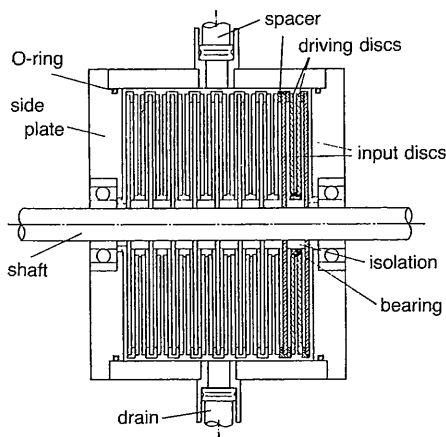


Fig. 10 ER クラッチ²⁶⁾

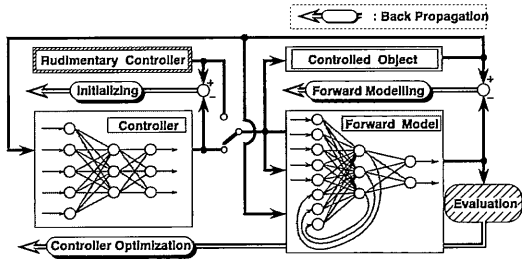


Fig. 11 自己生成形ニューラルネット制御系

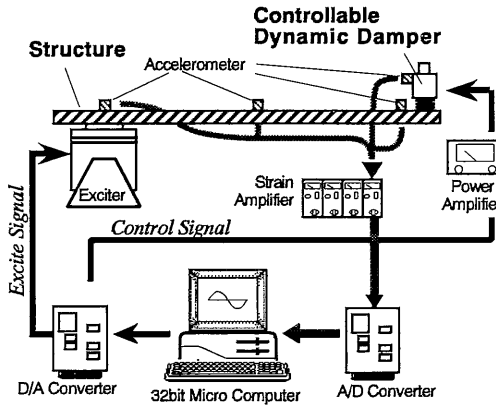


Fig. 12 はりの制振実験装置

その概要を Fig. 11 に示す。本システムは、基本的にはコントローラとフォワードモデルの二つのニューラルネットワーク、およびその調節機構から成っている。コントローラネットワークは制御対象への制御信号を生成するネットワークであり、またフォワードモデルネットワークは制御対象の動特性を模擬するために用意されている。このシステムの特徴は、まずフォワードモデルで制御対象の入出力関係を学習して模擬した後に、フォワードモデルとコントローラのネットワークをあたかもひとつのネットワークとして、コントローラの学習を行うことにある。この手順により、たとえ制御対象の動特性が把握されていない場合でも、またその動特性が時間とともに変化する場合でも、ネットワークがそれらを学習して、所要の制御信号をオンラインで生成することが可能となる。

二つのネットワークは共に階層形であり、学習則は逆伝播学習（バックプロパゲーション）によっている。ニューラルネットワークを採用する際の問題点は、学習に時間がかかること、および学習の初期状態によって局所的最適値に解が落ち込み、学習の精度が保証できないことであるが、現在その問題点を解決すべく、学習の高速化・高精度化を図っている。

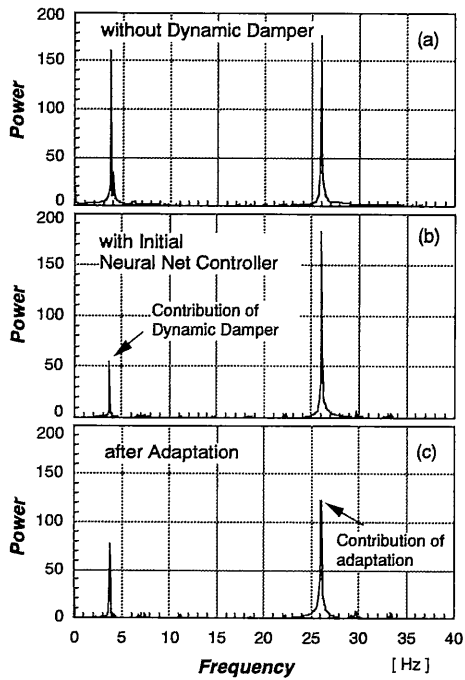


Fig. 13 適応制振結果

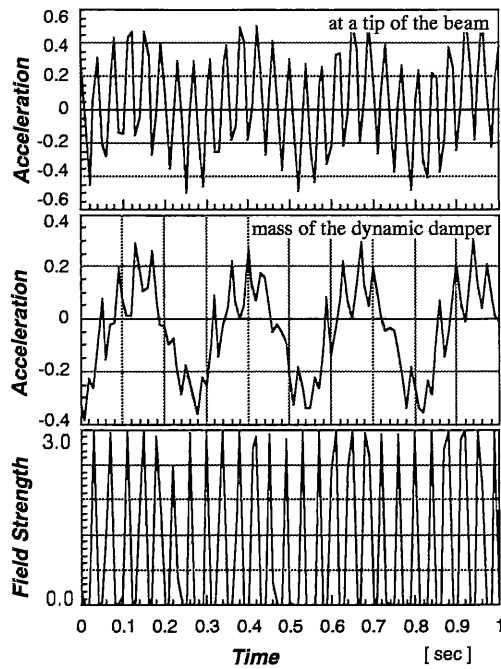


Fig. 14 制御信号および応答

5. インテリジェント制振システムの具体例²³⁾

制振システムをインテリジェント化した具体例として、先に述べた可変減衰形動吸振器と自己生成形ニューラル

ネット適応制御系を用いて、はりの振動制御実験を行った結果について述べる。

実験装置の概略を Fig. 12 に示す。一様なはりの一端に動吸振器を取り付け、はりの他端を電磁加振器により加振する。本実験の特徴は、単一の動吸振器により、はりの振動に含まれる複数の固有振動を低減することにある。本来、動吸振器は単一成分の振動低減効果しかない。基本的考え方として、最低次の固有振動数に合わせて動吸振器を調整しておき、それより高次の振動成分に関しては減衰力を高次の振動成分に同期させて変化させ、位相を逆にして振動低減を図ろうとするものである。はりの最低次の固有振動数はあらかじめ知っておく必要があるが、高次の振動数は予備知識無しでニューラルネットに学習させる試みである。

結果を Fig. 13 に示す。(a)に示すように、動吸振器無しの状態では、はりの振動には 1 次と 2 次の固有振動成分が含まれているが、(b)動吸振器を取り付けた段階で、1 次の振動成分の低減がみられる。さらにニューラルネット適応制御系により振動の学習を行い制御すると、(c)に示すように双方の成分が減少していることがわかる。その時の動吸振器の質量部の加速度、制御信号は Fig. 14 に示すようになっていく。

6. おわりに

本解説では、インテリジェント制振システムとして、ER 流体を用いた制振用アクチュエータ、およびニューラルネットワークを用いた制御系について、著者らの研究を中心に概略を述べた。最近、知的材料なる概念がよく話にされるが、本論にも記したように、ER 流体は機能性材料の候補のひとつに挙げられるようになった。しかし、あるシステムに“知性”を与えることはきわめて複雑な手順を踏まなければならない。“知性”とは何ぞやという基本的議論を繰り返さないことには、ややもすると“痴性”に陥ることになる。(1992年9月29日受理)

参考文献

1) Duff, A. W.: Phys. Review, 4 (1986) 32

- 2) Bjonstahl, Y. and Snellman, K. O.: Kolloid Zeitschrift, 78, 3 (1937) 256
- 3) Winslow, W. M.: J. Appl. Phys., 20 (1949) 1137
- 4) Klass, D. L. and Matinek, T. W.: J. Appl. Phys., 38, 1 (1967) 67
- 5) 加藤, 宮本, 広田, 宮地: 電気学会東京支部大会, (1968) 175
- 6) 林, 犬石: 応用物理, 42, 11 (1973)
- 7) 笹田, 岸, 上条: 日本機械学会論文集, 41, 342 (1975) 891
- 8) Jordan, T. C. and Shaw, M. T.: IEEE Trans. Electrical Insulation, 24, 5 (1989) 849
- 9) Block, H. and Kelly, J.: J. Phys. D, Appl. Phys., 21, 12 (1988) 1661
- 10) 杉本, 近藤: 産業安全研究所報告書, RIIS-RR-24-8 (1976)
- 11) Inoue, A.: Proc. 2nd Int. Conf. on ER Fluid (1989) 176
- 12) 山本, 松本, 高橋, 倉内: 日本レオロジー学会誌, 20 (1992), 56
- 13) ハワード, 土井: 日本レオロジー学会誌, 20(1992), 78
- 14) 滝本: 日本レオロジー学会誌, 20(1992), 95
- 15) Brooks, D. et al.: Colloids Surface, 18 (1986) 293
- 16) Adrami, P. M. and Gast, A. P.: Phys. Fluids, 31 (1988) 2757
- 17) Klingenberg, D. J., Frank von Swol, and Zukoski, C. F.: J. Chem. Phys., 91 (1989) 7888
- 18) Chen, Y., Sprecher, A. F. and Conrad, H.: J. Appl. Phys., 70 (1991) 6796
- 19) Davis, L.: Appl. Phys. Lett., 60 (1992) 319
- 20) 森下, 三井, 黒田: 日本機械学会論文集, 56, 524 (1990) 928
- 21) Petek, N. K.: SAE Tech. Paper # 881785 (1992)
- 22) 森下, 三井, : 日本機械学会論文集, 56, 529 (1990) 2367
- 23) 森下, 黒田, 浦: 日本機械学会論文集, 58, 550 (1992) 1748
- 24) Petek, N. K.: Goudie, J., and Boyle, F. P.: SAE Tech. Paper # 881785 (1988)
- 25) 森下, 三井, 榎場, 桜田: 日本機械学会論文集, 58, 551 (1992) 2045
- 26) 杉本, 近藤, 深谷: 産業安全研究所報告書, RIIS-RR-28-6 (1980)
- 27) 藤井, 浦: 日本造船学会論文集, 166 (1989) 503
- 28) Fujii, T. and Ura, T.: Proc. IEEE, Symp. Auto. Underwater Vehicle Tech. (1990) 81