

特集 **インテリジェント材料の新展開****機能性流体の現状と将来****Functional Fluids: Present Status and Future**

森下 信 (横浜国立大学) 正員

Shin MORISHITA

Yokohama National University

Member

This article describes the outline of functional fluids, especially including ferrofluid, Magnetorheological fluid, Electrorheological fluid and liquid crystal. Though these functional fluids are also classified as the intelligent fluids or smart fluids, it is very hard to give some kind of intelligence to the fluids directly. The intelligence can be performed just in the form of system including the functional fluids and some intelligent controller for the fluids. Almost all the functional fluids can be controlled by the applied electric or magnetic field, and Newtonian viscosity or yield shear stress of the fluid can be varied according to the applied field strength. The history, typical characteristics and application examples are shown for each functional fluid.

Keywords Functional Fluids, Ferrofluid, MR Fluid, ER Fluid, Liquid Crystal.

1 はじめに

「機能性流体」という言葉が一般的に使われるようになって久しい。最近ではインテリジェント流体、知能流体という表現も使われる。要は普通に流れて自由に変形するという流体ではなく、何らかの機能性を有する流体をいう。流体自体は使われ方によって様々な機能を発揮するので、特に機能性流体とは外部環境に応答して流体の特性が変化する流体とでも定義するとよいのだろうか。機能性流体の特性を探るだけでも研究的には十分面白いが、その応用を考えると一気に機能性流体に携わる人口が増える。本稿では、この十数年ほどの間に機能性流体として扱われてきた磁性流体、磁気粘性流体、電気粘性流体、液晶を主にとりあげ、それらの基本的特性と応用方法、さらには今後の展開について著者の主観を交えて概略を説明したい。

2 流体に知性を与える？

章の題名として「知性を与える？」というように疑問符をつけたが、インテリジェント流体とか知能流体という名称は将来を見据えた開発目標を表現する名称であり、現在の技術段階で流体に知性が与えられた訳ではない。単なる機能性流体をさらに概念的に進めて知能を目指した理由は、流体に知性を与えることによ

り、流体自身が周囲の環境を認知し、流れるべき道筋を自己判断し、判断通りに流動場を創るというプロセスを流体に求めているに他ならない。そのようなことが本当にできるか、という疑問はついてまわるが、概念を創らなければ目標は生まれない。

流体に限定されず、インテリジェント材料という名称自体が目標とする概念である。これらは人工知能の開発可能性に端を発しているように思う。ご承知のように、人工知能は多くの研究者により活発な研究が進められているが、「知能」という言葉には多くの分野が関係するためもあり、単にコンピュータ上で動く学習機能のあるプログラムを作成すればよいというものではない。また知能の大元である我々の脳の働きに関する十分な知識が得られている訳でもない。これらの研究は停滞しているとは思わないが、かといってすぐに実用化できるほど研究対象は簡単なものではないようである。

最近、この系統のモノで少し身近なものとして感じられるようになったのがロボットである。2足歩行ロボット、ペットロボット、掃除用ロボット、さらにはレスキューロボットに至るまで、見かけ上は実用段階にある。これらは各種センサーを数多く備え、そこから得た情報を基に装備されたプログラムにより「判断」を行い、アクチュエータを駆動して応答するという知的システムである。現代のロボットに知能があつて自律的に判断するかどうかという点では大いに疑問があるが、それらしくみえるという表現には肯定的になら

連絡先・森下 信, 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-7, 横浜国立大学 大学院環境情報研究院 人工環境と情報部門,
e-mail: mshin@ynu.ac.jp

ざるを得ない。このように考えると、インテリジェント流体に現状で望めるのは外部信号により応答する部分であり、センシングおよび判断（制御）は流体とは別のところで用意して、システムとしてインテリジェント流体の概念に一步でも近づこうか、というところかもしれない。

3 機能性流体各論

本章では機能性流体としての磁性流体、磁気粘性流体、電気粘性流体および液晶について取り上げ、歴史、特性、応用例について解説したい。

3.1 磁性流体

磁性流体は、磁石に引き寄せられる流体として知られている。磁性流体については神山による解説書が出版されているので、さらなる詳細は解説書を参照されたい[1]。

【歴史】磁性流体に限らず、最初の研究成果を特定することは困難であるが、1930年代から磁性コロイド溶液の研究が行われていたようである。また後述する磁気粘性流体の研究は1948年にラビノー（Rabinow）により公表されている。しかし、磁性流体としては1965年のパペル（S.S.Pappel）によって特許取得が行われたことが最初の研究成果の公表であるとされている。その後、様々な応用分野を目指して研究が進められている。我が国では東北大学流体科学研究所の研究グループが多くの研究を行っている。

【組成】基本的には、一様な溶媒中に強磁性を有する超微小粒子を強力な界面活性剤により分散させたものである。溶媒としては初期には飽和炭化水素やケロシンなどが用いられたが、粘性、耐熱性、蒸気圧、耐腐食性などを考慮して、水、エステル系、アルキルナフタリン系などを用いた磁性流体が作られるようになってきている。また、導電性を持たせるために液体金属などを溶媒に用いる場合もある。

分散質である粒子は粒子径が高々数十ナノメートル程度で、機械工学的な意味で極めて小さい。実用化されている磁性流体では、粒子としてはマグネタイト（ Fe_3O_4 ）を用いることが多い。このくらい粒子径が小さいと、流体中のブラウン運動により粒子の沈降がある程度押さえられるが、いくら小さくても分散質と分散媒で比重が異なるので、通常は粒子が沈殿することになる。そのために強力な界面活性剤を粒子表面に吸

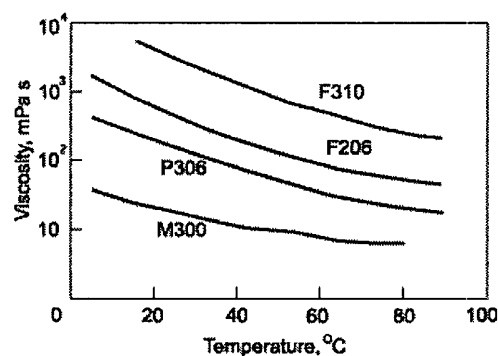


Fig. 1 Temperature-viscosity characteristics[4].

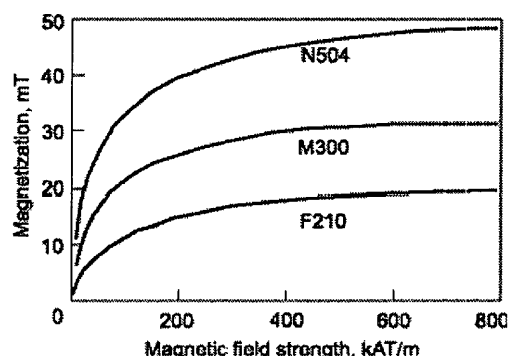


Fig. 2 Magnetization characteristics[4].

着させて粒子の沈降を防いでいる。界面活性剤は数多くの種類があるが、分散媒との関連で選択される[1,2]。

【特性】流体の粘度特性は、一般にせん断速度とせん断応力の比としてのニュートン粘度で表現される。原点を通る直線で表すことができればニュートン流体と呼ばれるが、磁性流体は直線関係を保つとは限らず、非ニュートン流体である。

市販されている流体の粘度・温度特性の一例を Fig. 1 に示す[4]。流体の種類により粘度範囲は大きく選択できる。また、磁化特性は一般的には Fig. 2 に示すようになっている[4]。

【応用例】流体の動きを外部磁場により拘束するのが応用目的の基本である。実用化されているものとしては、磁性流体シールが知られている。他に、軸受、研磨剤、ダンパなどのアクチュエータ、冷却装置などに応用された例がある。

【将来性】現在、さらに磁化率を上げる研究が進められており、金属系磁性流体の開発が盛んである。

3.2 磁気粘性流体

磁気粘性流体は英語で Magnetorheological Fluid と称

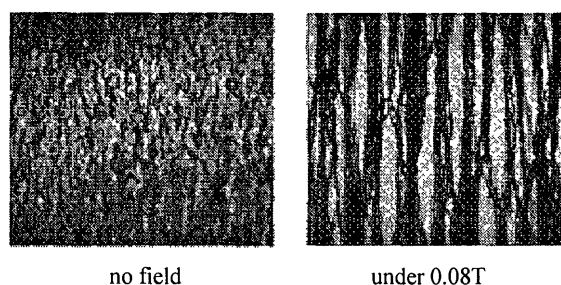


Fig. 3 Cluster formation in MR fluid.

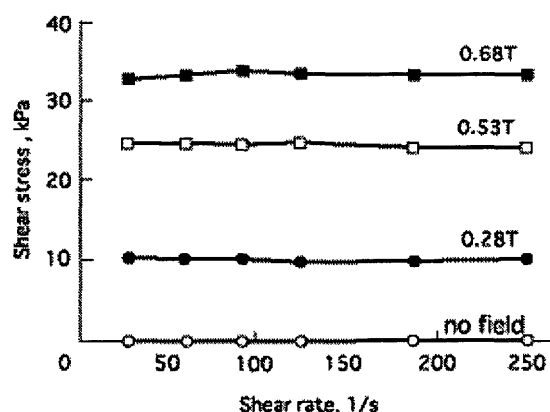


Fig. 4 Viscosity characteristics of MR fluid under magnetic field.

し、MR 流体と呼ばれる。磁場に応答して特性が変化するという意味では前節の磁性流体と同じであるが、流動特性は大きく異なっている。しかし、特許関連ではMR 流体と磁性流体の区別は行っていないようである。

【歴史】1948年にラビノーにより報告されたものが最初であるとされている[3]。論文中には後述の電気粘性流体に関する特許出願をした Winslow の名前がみられるので、電場を利用するか磁場を利用するかという2つの異なる立場の研究が当時あったようである。その後、電気粘性流体に研究者の興味が集まり、MR 流体に関しては旧ソ連で地道に研究が進められた。電気粘性流体に関する研究に目処がたった1990年代後半に、MR 流体の応用研究が一気に開始されて今日に至っており、自動車部品への実用化が推進されている。

【組成】一様な溶媒に強磁性体微粒子を分散させたものである。溶媒としては炭化水素系の作動油もしくはシリコン油が使用されることが多い。粒子としてはカルボニル鉄が一般的である。粒子径は1~10ミクロン程度であるが、当然ながら粒子径は分布しており、

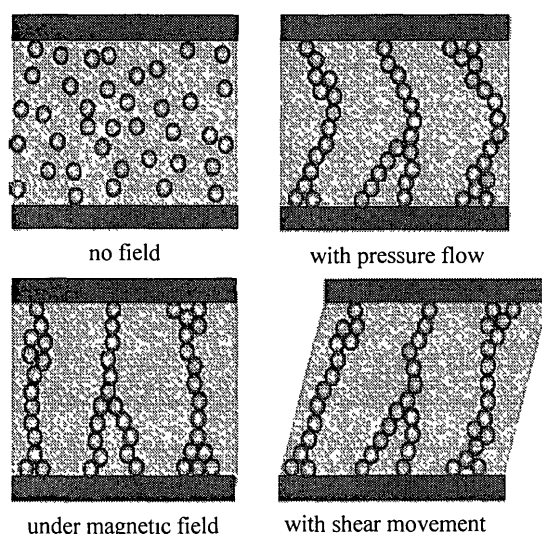


Fig. 5 Cluster formation model.

現在は分布幅を狭くする努力が続けられている。流体と粒子の比重が大きく異なっているので、分散安定性を確保するために強力な分散剤が添加されている。磁場を加えることにより分散粒子が鎖状に凝集し、そのために流体としての特性が変化するとされている。凝集の様子をFig. 3に示す。

【特性】Fig. 4に示すように、外部磁場の強度を高めることにより、流体の降伏応力が変化する。ニュートン粘度はほとんど変化しない。降伏応力が変化するメカニズムとしては、せん断流れと圧力流れの場合にFig. 5に示すようなモデルが考えられている。降伏応力の変化は大きく、外部磁場の強度が0.5Tで降伏応力は25kPa程度の大きさとなる。

【応用例】MR 流体は流体の降伏応力の大きさを外部磁場で制御できることから、摩擦減衰を変化させる応用分野の開拓を目指している。可変摩擦ダンパ、ブレーキ、バルブなどが考案されているが、近年自動車のサスペンションとして実用化されたことが報告されている。

3.3 電気粘性流体

電気粘性流体 (Magnetorheological Fluid, MR 流体) とは外部電場により流体の粘度が変化する流体の総称である。応用を目指している機械工学分野というより、本質的な現象解明を目的とした電気化学分野で電気粘性効果に関する研究が先行した。電場を作ることは一対の電極と電源があれば可能であるので、応用分野は基本的に広い。

【歴史】1800年代の終わりに、高電圧の下で流体の粘度が変化する電気粘性効果に関する研究報告が電気化学の分野で複数なされている[5]。1900年代の前半にも精力的に研究が進められた様子が研究報告から推察できるが、1948年にウインスロー（W.Winslow）が粒子を分散したER流体の特許申請をしたことで機械分野の研究者に知られることになった[6]。その後1967年にクラス（Klass）とマーティネク（Martinek）が流体の特性を詳細に調べた研究を公表したことから世界中で注目を集め、我が国でも複数の研究者がほぼ同時に研究を開始したようである[7-9]。さらに1980年代に自動車関連雑誌にER流体の実用化が近いと報告されてから産業界が注目した[10]。1987年から国際会議が2年ごとに開催されるようになり、本年には北京で第9回が開催された。

【組成】ER流体は粒子分散系と均一系に分類されている。粒子分散系の流体は、一様な溶媒に半導体微粒子を分散させている。溶媒としてはシリコン油、炭化水素系作動油が用いられることが多い。含水系と非含水系にさらに細分化されるが、粒子としてはシリカゲル、イオン交換樹脂、カーボン、セルロースなどが用いられる。さらに特殊な粒子を開発している例も数多くみられる。最近では酸化チタンのナノオーダーの微粒子を用いている例も報告されている。

均一系としては電場に応答するいわゆる極性流体であればER流体の範疇に含まれる。その中で最も有望なものが液晶である。低分子液晶に関しては次節で述べるが、高分子液晶をER流体として利用している例がある。

【特性】基本的には、MR流体のように流体の降伏応力が外部電場により可逆的に変化する。MR流体との相違は電場を使うか磁場を使うかという点にある。電場の方が一對の電極を流体流路に組み込むだけなので機械構造を簡素化できる場合が多い。分散系流体の粘度特性をFig. 6に示す。縦軸をみてわかるように、MR流体のように降伏応力が大きくない。加えた電場に対する応答時間は数ミリ秒といわれているが、流体を含む機械システムとしては数十ミリ秒の応答速度になることが多い。

【応用例】MR流体と同様に降伏応力の変化は摩擦力の変化として機械的にとりだすことができる。その意味ではMR流体の用途と完全に一致する。すなわち、可変摩擦ダンパ、ブレーキ、バルブなどに利用が見込まれている。

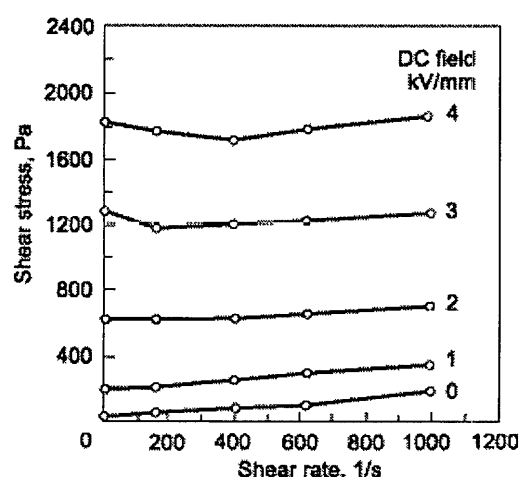


Fig. 6 Viscosity characteristics of ER fluid.

【将来性】現在、ER流体の開発を手がけている企業は著者の知る限り（株）ERテックの1社である。一時期は100社を超える企業が我が国でも開発を手がけたが、ほとんどの企業は開発を中止し、流体の提供もほとんど行われていない。

3.4 液晶

液晶は、液体でありながら結晶構造を有する特徴をもっており、一種の構造型流体といえる[11-13]。温度転移型のサーモトロピック液晶と濃度転移型のリオトロピック液晶に区別され、また一方で、分子量に応じて低分子液晶と高分子液晶という分類がなされている。工業的にはサーモトロピック液晶に対する関心が高い。機能性流体という意味では、低分子サーモトロピック液晶に焦点をあてて解説したい。サーモトロピック液晶では結晶から液晶状態への転移温度と液晶状態から等方性液体への転移温度がある。この2つの転移温度の間で液晶性を示すことになる。液晶は後述するように、外部から加えた電場により等価粘度が変化するので、電気粘性流体の一種として捉えることができる。

【歴史】液晶は主にヨーロッパで研究が開始されたようである。1888年にオーストリアの植物学者であるF.Reinitzerが植物から単離・精製したコレステロールに液晶性を見だし、1889年にはドイツの物理学者O.Lehmannが偏光顕微鏡を用いて、液体でありながら異方性結晶に特有の複屈折性を認めた。さらに、1922年にはフランスのG.Friedelにより、偏光顕微鏡による光学パターンの分類からネマティック、スメクティック、コレステリックという3種類の分類がなされ今日に至っている。その後もヨーロッパで多くの研究が行われたが、1960年代になってアメリカで液晶による表

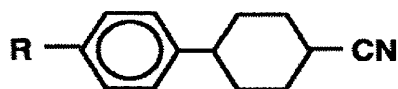


Fig. 7 Example of molecular structure.

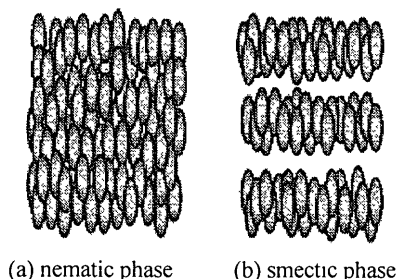


Fig. 8 Molecular models of liquid crystal.

示装置の提案がなされ、さらに日本の企業により表示装置が実用化された。その後の開発競争を経て、現在ではテレビ受像機の少なからぬ割合が液晶表示で占められているのは承知の通りである。

【液晶相】液晶は多くの種類があり様々な分類がなされているが、ここでは多くの研究報告がある棒状の低分子液晶について説明する。棒状の液晶分子は Fig. 7 に示すような芳香属に属する環状の分子が直列に2個以上結合し、その両端にアルキル基などの分子鎖が結合されている。液晶性にとっては立体的要因である直線性と剛直性、静電的要因である分極率の異方性が重要であるとされる。棒状で、しかも分極率の異方性により外部電場の下で棒状の軸が統計的な意味で方向をそろえ、マクロな意味で粘度が変化することになる。

棒状の液晶分子は、液晶状態では Fig. 8 に示すようなモデル化された並び方により「相」分類されている。これらはネマティック相およびスメクティック相と呼ばれている。スメクティック相は層内分子の並び方により、さらに細かく分類されている。同様な棒状分子の相としてコレステリック相が知られている。

【力学物性】液晶の物性に関連しては、液晶の応用分野により様々な表現方法があるものと推察される。光学的に利用するならば、液晶分子の配向に関する外部電場に対する応答性、熱依存性、光の屈折率、透過率などが重要な物性となる。液晶を作動流体として用いる場合には流体の弾性特性や粘性特性も重要である。

液晶の粘性に関してはレスリー (Leslie) の粘性係数とミエソヴィッツ (Miesowicz) の粘性係数が液晶の分野では主に利用されるようである。それぞれは独立で

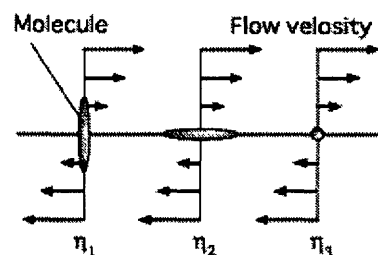


Fig. 9 Miesowicz viscosity.

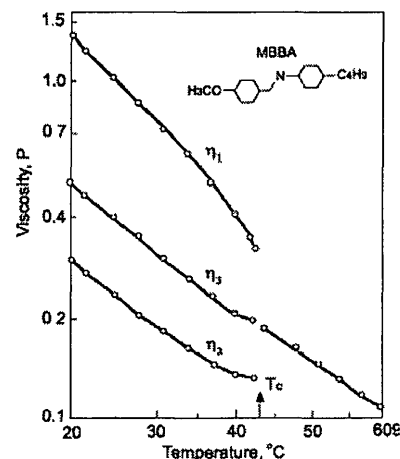


Fig. 10 Viscosity coefficient of MBBA[13].

はないので、ここでは Fig. 9 に示すような、流体のせん断方向と分子の配向方向に関連して定義される3種類の粘性係数からなるミエソヴィッツの粘性係数を紹介する。いわゆる回転式粘度計で計測した値は η_2 に相当することが理解される。粘性係数の一例を Fig. 10 に示す[13]。Fig. 9 および Fig. 10 から、ある一定の温度において外部電場もしくは磁場により液晶分子の長軸方向を変化させることで、 η_1 から η_2 の範囲で流体の等価粘度を変化させることができる。回転粘度計を用いて測定した例を Fig. 11 に示す。

さらに力学物性に関係して注意すべき点は、液晶は固体境界近傍で自律的に配向することである。現在生産されている液晶セルはこの自律配向を利用して液晶分子の配向角度調節を行っている。液晶セルは高分子膜を布などで擦るラビング処理により、界面近傍では高分子の延伸方向に液晶の分子方向を自律的にそろえ、外部電場によってセル内部の液晶分子の統計的方向を制御していることになる。

分野によっては自律的配向を self-assembled という表現を用いて、我が国では「自己組織化」と翻訳している。確かに和訳しづらい用語であるが、いわゆる自

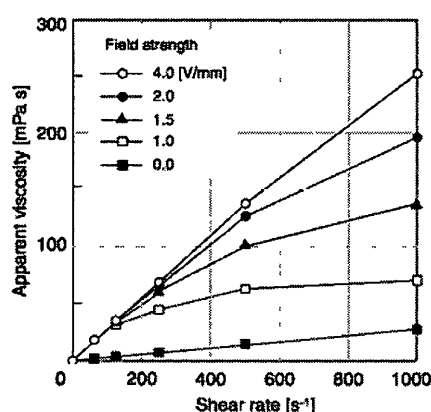


Fig. 11 Electroviscosity of liquid crystal.

己組織化 (self-organized) とは本質的に異なっているようで、「自己集積化」に近い意味を有しているように筆者は思う。

【応用例】応用分野としては、液晶ディスプレイ、空間光変調器、調光材料、高強度材料、電気粘性流体などへの応用がなされている。特に液晶ディスプレイは直視型と投写型があり、さらに直視型は主に透過型と反射型に分類される。透過型はディスプレイとしての性能を向上させるために多くの種類が開発されており、今後もさらに性能が向上することが期待されている。基本的には1対の微小なガラス板の間に液晶を封入し、透明電極により液晶分子に電圧を加えて、液晶分子の配向を制御することでディスプレイとして利用する。15インチ程度のコンピュータディスプレイに用いられる液晶は高々0.5g程度であるとされる。

高強度材料に液晶が用いられていることは一般的にあまり知られていない。利用されているものは液晶性高分子材料であり、伝導ベルトや防弾チョッキなど強度を求められる素材に使われる。強度で6GPa、縦弾性係数で300GPaに達するものも実用化されている。

4 おわりに

本稿では、機能性流体もしくはインテリジェント流体として知られるいくつかの流体を取り上げ、基本的特性および現在考えられている応用分野の一例を紹介した。それぞれの機能は研究上はまだ不明な面も多く、大変興味深い部分を残している。しかし、工学的研究を進めるためには社会からの要請も無視することはできない。そのためには機能性材料の多くの用途を開拓する必要がある。それぞれが歴史的背景を有する特殊な機能性流体であり、それぞれの流体の特性を把握し

て「この材料しか利用できない」というような応用分野を開拓することが重要であると筆者は思う。

参考文献

- [1] 神山, 磁性流体入門, 産業図書, 1989.
- [2] 内野, 精密制御用ニューアクチュエータ便覧, フジ・テクノシステム, 1994.
- [3] Rabinow, J., The Magnetic Fluid Clutch, *AIEE Transactions*, Vol.67, pp 1308-1315, 1948.
- [4] (株) シグマハイケミカル・ホームページ
http://www.sigma-hc.co.jp/magnetic_fluid.html
- [5] Duff, A.W., The Viscosity of Polarized Dielectrics, *Physical Review*, Vol.4, No.1, pp.23-38, 1896.
- [6] Winslow, W.M., Induced Fabrication of Suspensions, *Journal of Applied Physics*, Vol.20, No.12, pp.1137-1140, 1949.
- [7] Klass, D.L. and Martinek, T.W., Electroviscous Fluids, *Journal of Applied Physics*, Vol.38, No.1, pp.67-74, 1967.
- [8] Block, H. and Kelly, J.P., Electro-rheology, *Journal of Physics D Applied Physics*, Vol.21, No.12, pp.1661-1677, 1988.
- [9] Jordan, T.C. and Shaw, M.T., Electrorheology, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol.24, NO.5, pp.849-879, 1989.
- [10] Scott, D. and Yamaguchi, J., ER Fluid devices near Commercial Stage, *Automotive Engineers*, Vol.93, No.11, pp.75-79, 1985.
- [11] 液晶便覧編集委員会, 液晶便覧, 丸善, 2000.
- [12] 岡野, 小林, 液晶 (基礎編), 培風館, 1985.
- [13] 松本, 角田, 液晶の基礎と応用, 工業調査会, 1991.
- [14] Benicewicz, B.C., Johnson, J.F., and Shaw, M.T., Viscosity Behavior of Liquid Crystals, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, Vol.65, pp.111-132, 1981.