



機械的な作動部を持たない 次世代機器デバイス

ER から MR へと進む機能性流体の研究

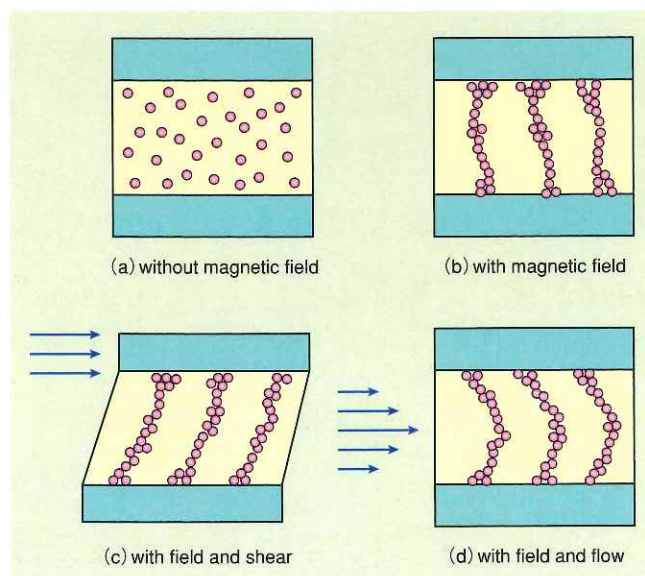
MR 流体は、マグネット・レオロジカル・フルード (Magneto Rheological Fluid) の略称である。レオロジカルは液体の流動特性を研究する学問であるレオロジー (Rheology : 流動学) に由来するが、MR は磁界によって流動特性が変化する性質を表している。MR 流体と類似の性質を示す流体として、電界によって流動特性が変化する ER 流体 (エレクトロ・レオロジカル・フルード : Electro Rheological Fluid) が知られている。最近では、MR 流体や ER 流体を様々な技術分野に応用するための研究が進められている。本稿では、その現状について紹介する。

磁界や電界によって粘性の変化する流体の発見

ここに、先端部分を互いに連結したプラスチック製の注射器があり、その中にはダークグレーの液体が充填されている。どちらか一方のピストンを押し込むと他方のピストンが押し出され、液体は双方の注射器のシリンダー内を移動する。押し込む際の手応えからすると、シリンダー内の液体にはかなり高い粘性があるようだ。しかし、注射器のシリンダーの上に小さな磁石を置いたとたん、液体が固化したかのようにピストンはいくら押ししても全く動かなくなってしまった……。

MR 流体の特異な性質は、上記の簡単な実験によって体感

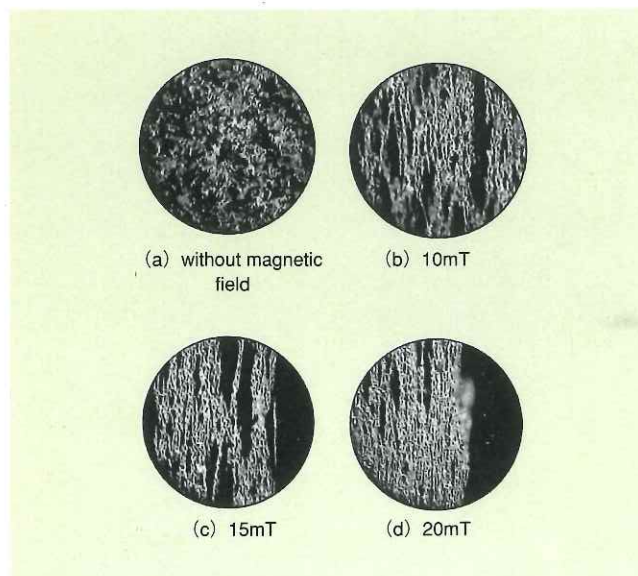
することができる。MR 流体の研究の歴史は意外に古く、1948 年にアメリカのラビノー (J. Rabinow) がその特性と実用化の可能性に関する最初の論文を発表している。この論文によると、ラビノーは「MR 流体はクラッチなどに利用可能である」と主張し、数種類の試作品を実際に作製している。一方、ウインズロー (W. M. Winslow) は 1949 年に ER 流体に関する論文を発表している。しかし、ER 流体がもつ特殊な性質が最初に発見されたのは 1800 年代であり、MR 流体よりもさらに起源が古い。ウインズローは、100 年以上前に発見された ER 流体



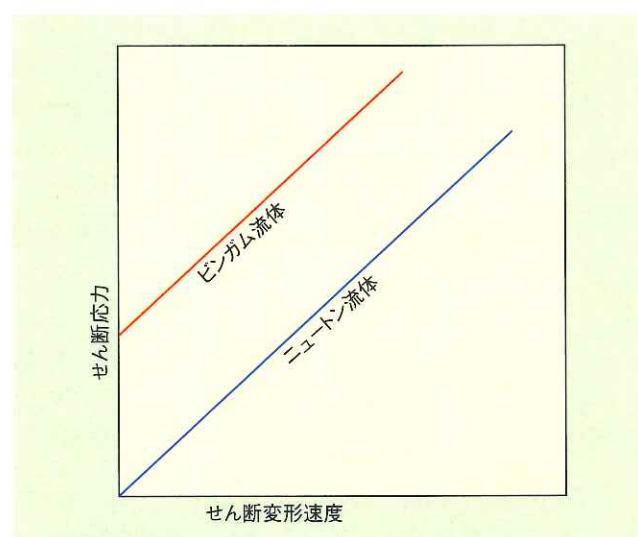
MR流体の挙動の模式図。(a)は磁界を加えない状態で強磁性の微粒子（分散質）が溶媒中にランダムに存在している。(b)は磁界を加えた状態で、磁力線の方に鎖状のクラスタが形成される。(c)は磁界を加えた状態で、二枚の平板の内片方を動かしてせん断を与えた場合でクラスタが移動抵抗となっている。(d)は磁界を加えた状態で、流れがある場合でクラスタが流動抵抗となる。このとき降伏せん断応力の大きさは、形成されるクラスタの張力と数に依存するため、一般に磁界の磁束密度と分散質の重量濃度が高いほど大きくなる。

の再評価に大きく貢献した。磁界や電界によって流動特性（見かけ上は粘性）を自由に制御できるMR流体やER流体は、ラビノーの提唱したクラッチ（粘性変化を利用し動力の伝達および切断を行う）のほか、ブレーキ（粘性抵抗の増加を利用し制動する）や各種ダンパー（粘性変化を利用し減衰力を制御する）など、多くの分野に応用可能である。これらいずれの応用例においても、純粋に機械的な機構は不要であり、電気的に磁界や電界の強度を変化させるだけで目的とする機能を制御できるという特徴がある。このような特殊な性質をもつ流体を総称して「機能性流体」と呼ぶこともある。

MR流体は、溶媒となる絶縁性の流体に粒径が $10\ \mu\text{m}$ 程度のFeなどの強磁性微細粒子（分散質）を均一に分散させることにより作製することができる。このような微細粒子分散流体に磁界を印加すると、磁力線の方に分散粒子が配向し鎖状のクラスタを形成するようになる。その結果、分散流体の降伏せん断応力が増加する。その際、印加磁界に反応してクラスタが形成されるまでに、 $10^{-3}\sim 10^{-2}\text{s}$ 程度の応答時間が必要である。このような応答時間を短くするために、残留磁界の比較的小さな分散質が通常用いられる。また、溶媒の種類としてはシリコンオイルやミネラルオイル（鉱油）などが用いられ、これに対応して分散剤（界面活性剤：分散質の表面を被覆することにより均一な分散を促進する）も使い分けられる。流体中における分散質の濃度は一般に $10\sim 30\text{wt}\%$ であるが、 $70\text{wt}\%$ 程度の高濃度流体を作製することも可能である。分散



MR流体中でクラスタが形成される様子。観察は光学顕微鏡で行われ、試料には観察を容易にするために希釈したMR流体を使用している。(a)は磁界を加えない状態。以後、(b)(c)(d)の順に磁束密度を増加させている。磁束密度が上がるにつれてクラスタが長くなり、間隔も詰まっていることがわかる。また、クラスタ形成された後の状態から磁束密度をゼロにしても、形成されたクラスタはすぐには分解せず、(a)の状態に再び戻すには、液体をかき混ぜるなど、外部からの力を加えなければならない。



降伏せん断応力は横軸にせん断速度をとり、縦軸にせん断応力をもってせん断型粘度計で測定したときの、せん断速度のゼロへの極限値として定義される。またこの両者の関係は直線で表現でき、この直線の傾きはニュートン粘度（粘度あるいは粘性係数）と定義される。

機能性流体の多くは、粘度そのものが変化するわけではなく、降伏せん断応力の値がY軸上を移動する。図に見られるビンガム流体のようなラインを描くのである。

質の濃度が高くなると、磁界印加時における降伏せん断応力が大きくなる。

ここで注意すべきことは、溶媒の粘度が変化するのはなくクラスタの形成に起因して流体のマクロな流動抵抗が増加するという点である。磁界の印加を停止し外部から何らかの力を加

えると、クラスタが崩壊し流動抵抗は元に戻る。MR流体の特性を「見かけ上の粘性が増加する」などと表現するのはこのためである。

ER流体では、MR流体と同様に絶縁性流体を溶媒として用いているものの、粒径が $1\mu\text{m}$ 程度の半導体微細粒子を分散質として使用する点がMR流体と異なっているという。このような微細粒子分散流体では、電界を印加すると電気力線の方角に沿って半導体粒子が配向し鎖状のクラスタが形成される。その際、「見かけ上の粘性」は初期状態の $10\sim 10^2$ 倍程度に増加するが、降伏せん断応力はMR流体の 10^{-2} 倍程度の大きさである。

このように、ほぼ同時期に注目され始めたMR流体とER流体であるが、その特性には一長一短がある。MR流体は、初期状態の $10^5\sim 10^6$ 倍という非常に大きな流動抵抗の増加率を有する（約6kPaのせん断応力の実測例がある）が、比重の大きなFe（7.85）などの微細粒子を分散質に用いているため、長期間放置すると分散質が沈殿し十分な性能を発揮できなくなってしまう。また、磁界を印加し、その強さを制御するためには電磁石が必要となる。従って電磁石を設置するスペースが必須で、それにともなう重量増も避けられないという短所がある。

これに対してER流体は、分散質の選択に対する制限がMR流体よりも小さく、溶媒と比重の近い分散質を選定すれば長期間放置の際の沈殿をかなり防止することができる。

C O L U M N

磁性流体の特性について

MR流体と同様に、磁界によって「見かけ上の粘性」が変化するものに磁性流体がある。これは分散質として $10\sim 40\text{nm}$ の強磁性超微粒子を使用した流体である。MR流体とは分散質の大きさが異なり、かなり強い磁場を必要とする。1999年6月に東北大学流体科学研究所と秋田大学工学資源学部の共同開発により、磁性流体の10倍の減衰効果を持つMR流体の開発が発表されたが、このMR流体の磁場感度は最大で磁性流体の100倍を記録した。さらに、磁性流体の流動抵抗は10倍程度しか変化せず、しかもせん断変形速度により粘度が変化する特性を持っている。一方、MR流体で最大のネックとなる分散質の沈殿に関しては、磁性流体ではほとんど起こらない。その理由は磁性流体の分散質となる粒子が非常に微小なことにあり、粒子内の磁区がひとつしかない単磁区構造となり、お互いの粒子に斥力が働き液体中で安定な分散状態を保てることにあると考えられている。こうしたMR流体と磁性流体の違いがどの程度の粒子の大きさを境として起こるのか、あるいは粘度変化が起こるメカニズムがMR流体とは異なるのか、などについては諸説あり、研究課題のひとつとなっている。

ちなみにウィンズローは、サラダ油を溶媒とし小麦粉を分散質とした流体を用いて実験を行っている。また、電磁石を設置しなければならないMR流体に対してER流体では、電極を挿入するだけで電界を印加できるので、制御装置の構造が単純であり小型化および軽量化が容易となる。しかしER流体では、上述のように流動抵抗が高々 $10\sim 10^2$ 倍程度増加するのみであり（せん断応力の実測値は最大でも60Pa程度）、印加電圧が臨界値を超えると放電が起こり流動抵抗の急激な減少が起こるという欠点がある。なお、放電後に流動抵抗は再び増加するが、再度放電が起こると減少し、同様のサイクルを繰り返すことになる。

これら種々の性質の中で、分散質の沈殿が不可避であるという点がMR流体の致命的な欠点である。このため、機能性流体に関する以降の主要な研究は、ER流体を中心に進められることになる。

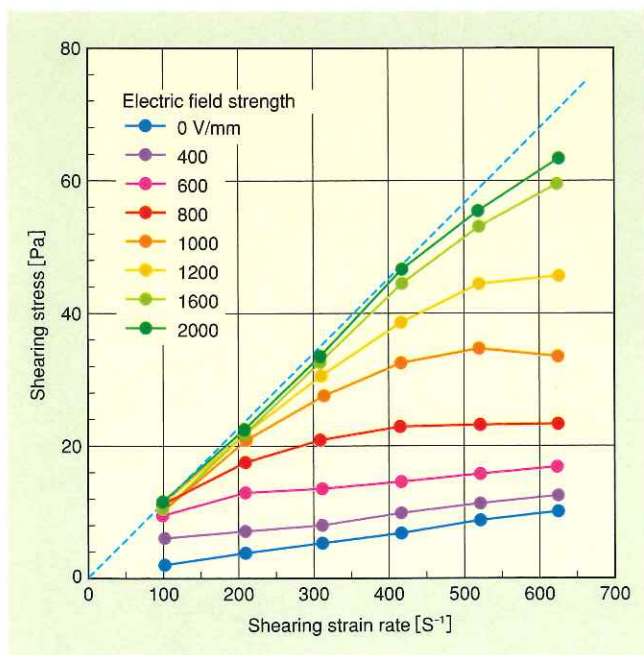
MR流体に先んじて研究が進められたER流体

ウィンズローによる1949年の論文発表以来、ER流体の研究はほぼ20年周期で活発に続けられてきた。日本でも、'60年代後半～'70年代において東京工業大学、早稲田大学、大阪大学などで同様の研究が行われたが、'88年に「ER流体の実用化によって1兆円規模の市場が形成される」とする報告書がアメリカで発表されたことを契機とし、多くの企業が研究に参加した。

ER流体を実用化するための重要な要因は、「分散質を均一に分散させるために必要な微粒子化技術」と「一定電圧を安定に供給するための安定電源を安価に製造する技術」の実現であった。これらの要因に対する問題の多くは、時代が進み周辺技術が進歩することによって、ほぼ解決されたと考えられる。すなわち、セラミックス技術の進歩によって微粒子化技術が確立し、透過型電子顕微鏡の開発にともない安価な高電圧安定電源の供給が可能となった。

しかし、ER流体の実用化を阻害する問題の全てが解決されたわけではない。流動抵抗を十分に大きくするためには、数MV/m程度の電界が必要である。研究室規模の実験では、通常4～5MV/m程度の印加電界強度が用いられる。これは、1mmの間隔の電極に4～5kVの電圧を加えることに対応している。電極間隔1mm程度のER流体の流路に実用的な流動抵抗を付与するためには、数～数十kVの高電圧を印加しなければならない。これでは、安全性の面から広く商業的に利用することは難しいであろう。実用化に向けた次の段階として「低い電圧でも十分に流動抵抗が大きくなる新しいER流体」を開発する必要性が出てきたのである。

この課題に対し「液晶をER流体として利用する」独創的な回答を'96年に示したのが、横浜国立大学の森下信教授で



“均一性ER流体”としての液晶の特性

液晶はER流体の一種で、その分子が20 Åと非常に小さいことから、わずかな隙間でも十分な粘度変化を得ることができ、かつ加える電圧も低くてすむ、などの長所がある。これはその液晶を利用したダンパーによる実験結果。実験は電圧をまったく加えない状態から、1mmあたり400V、以下200V刻みで2000Vまで電圧を上げ、それぞれの状態でせん断速度を変化させ、各速度におけるせん断応力の変化を測定した。液晶の粘度はせん断変形速度により変化し、せん断応力は山なりの曲線を描き、最大で60Pa程度（2000V/mm時）を記録している。

あった。「液晶は、実質的な粘度が10倍程度変化するER流体であるが、分子が液体として存在しているため、分散質の沈殿現象が全く起こらない。このため、従来のER流体を“分散系ER流体”と呼び、液晶を“均一系ER流体”と呼ぶことが現在では一般的である。」と述べている。

コンピュータ用モニターなどに使われる液晶ディスプレイは、二枚のガラス板の間に10 μ mの隙間（液晶セル）を作り、そこに低分子液晶を挟み込んでいる。ガラス板の内側には透明電極が張りつけてあり、電極に加える電圧で液晶セル内の分子配向を変化させ、光の反射や透過を制御している。このような制御が可能であるのは、分子の大きさが20 Å程度と非常に小さいため、10 μ mの隙間でも数多くの分子を詰め込むことができるからである。「ER流体の流動抵抗を十分に大きくするためには、1mmあたり数kVの高電圧を加える必要がある」ことをすでに述べた。これに対して液晶では、10 μ mの隙間でもER流体として十分機能するのに必要な数の分子が存在しているため、高々数十Vの電圧で流動抵抗を制御することが可能となる。

森下教授らは、液晶を利用したダンパーを用いて実験を行い、せん断応力が最大で約60Paに達することを観察している（左図）。しかし、実用化の際にネックとなるのは、価格の高

さである。森下教授によると「液晶は、通常価格が1000～2000円/gでありAuと同じくらい高価である。大量生産品に利用する場合でも価格を100～200円/g以下には下げられないという試算が出た。これでは、現実的な価格の実用品を製造することは不可能である。」とのことである。’88年にブーム的な盛り上がりを見せたER流体を活用した機械デバイスの開発は、現在暗礁に乗り上げている。

MR流体実用化の鍵を握るのは「沈殿抑制技術」

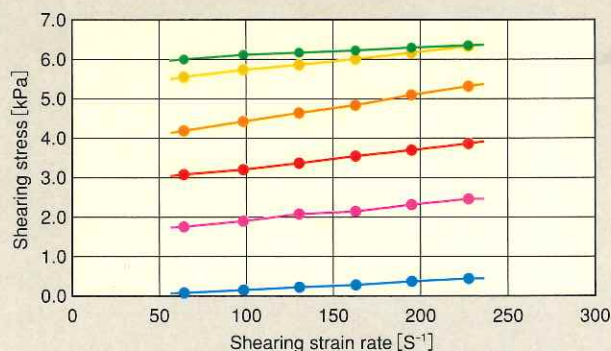
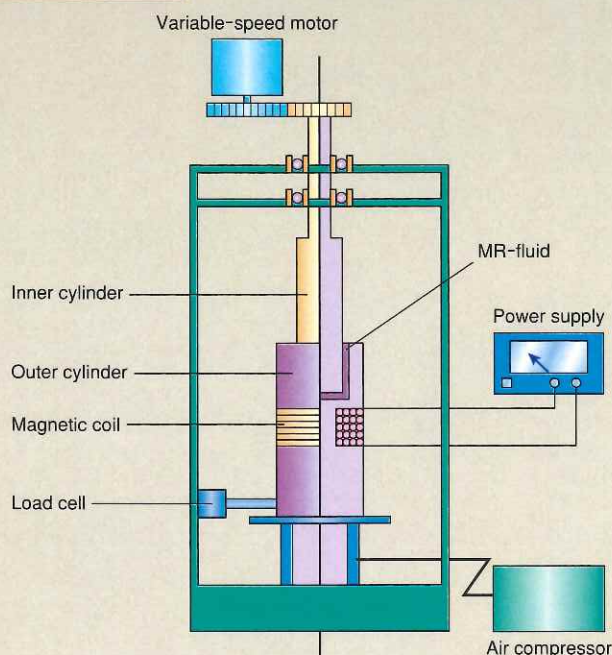
このような経緯によりER流体の実用化に対する限界が見え始めたため、今改めてMR流体への関心が高まりつつある。森下教授らは自動車用バンパーの支持部材としてMR流体を利用するための研究を行っている。

ところで、従来の自動車ではクラッシュアブソブゾーンを潰すことによって衝突エネルギーを吸収している。これに対し、森下教授らの研究はMR流体の流動抵抗変化を利用して衝突エネルギーを効率的に吸収しようという独創的なものである。その際、衝突速度に応じて流動抵抗の大きさを変化させる制御機構を加えれば、速度の大きな衝突初期では流動抵抗を小さく抑えることにより衝撃を小さくし、速度の減衰した衝突後期では流動抵抗を大きくしてエネルギーの吸収効率を高めることができる。上記の研究が進めば、このような可変ダンパーを実用化できるかもしれない。

汎用の可変ダンパーを実現する制御機構の開発には、磁界の印加や除去の際の応答時間を考慮することが重要である。すでに述べたように、磁界印加時における応答時間は10⁻³～10⁻²s程度である。しかし、磁界の除去時には、外部から力を加えないかぎり分散質のクラスタは破壊されず流体の流動抵抗は低下しない。このため、衝突エネルギーを完全に吸収してしまう前に磁界を除去し残存衝撃力を利用して分散質のクラスタを破壊する、という機能を実現するプログラムソフトが開発されている。

また、1998年からの5年計画で、スマート・ストラクチャー（知的構造物）を作るためのプロジェクトも進行中である。これは正式名称を日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」といい、日本側からは小谷教授（東京大学）ら、アメリカ側からはソーゼン（Sozen）教授（パデュー大学）らが参加している。具体的には、MR流体を用いたダンパーを構造物の各部に配置し、コンピュータによる制御機構と連動させるという試みである。この計画が実現すれば、「地震の揺れをセンサーで感知し磁界の強度を動的に制御することにより構造物に免震機能を持たせる」ことが原理的に可能となる。「機能性流体」をさらに進化させた「知性流体」としての利用の第一歩である。知的構造物の開発は次世代技術として非常に興味深い分野であるが、MR流体に関していえば「分散質

COLUMN MR 流体豆知識 < MR 流体のせん断応力上昇の限界 >



MR 流体の「見かけ上の粘性」は磁界の強さによって制御することができる。上図のように磁界がある一定レベル以上の強さになると、それ以上せん断応力が上昇しないことが実験で確認されている。実際の実験に使われたのは図のような装置で、直径25mmの円筒（インナーシリンダー）を、穴直径27mmの外筒（アウトターシリンダー）に差し込み、このときできる1mmの隙間にMR流体を注入。インナーシリンダーの差込み深さは40mmで、アウトターシリンダーにはイミド系樹脂の被膜銅線（0.3mm径）が約800回巻いてあり、ここに電流を流すことで磁界を発生させる。材質は透磁性が良いものほど磁気損失が少ないこと、入手のしやすさを考慮してS45Cを使用。このときモーターによる駆動軸の回転は1分間に40回転から20回転刻みで140回転まで上げていき、電流は0.0A（グラフ中記号＝●）から0.25（●）、0.5（●）、0.75（●）、1.0（●）、2.0A（●）の順に大きくしていく。このとき1.0Aと2.0Aのグラフから、その最大値がほぼ同一であることがわかる。これは分散質である強磁性粒子が飽和状態まで磁化され、それ以上電界を強めてもクラスターの結合力が高まらないためだと考えられている。

の沈殿」という根本的な問題が大きな壁として立ち塞がっている。

MR流体に関する国際特許を取得している米ロード社は、現状でも「振動が非常に多い長距離トラックの座席用ダンパーなどにMR流体を利用することが可能である」と述べている。すなわち、「ロード社が製作しているMR流体の分散質は、上記の使用環境下ではほとんど沈殿しない」との主張である。これは、「常時振動している部分にMR流体を用いれば沈殿が起りにくいだろうと予想される」という提案とも考えられる。

しかし実際には、容器に入れたMR流体の分散質は数十時間で沈殿してしまう。また、一度沈殿した分散質を初期の分散状態に戻すためには、何時間も攪拌しなければならない。このように攪拌したMR流体を数時間放置すると、分散質は再び沈殿する。分散質の沈殿時間は、このような手順を繰り返すたびに徐々に短くなっていく。

分散質と比重の等しい溶媒を用いれば、分散質の沈殿しないMR流体を作製することも可能であると思われる。しかし、

比重の温度依存性が分散質と溶媒とで大きく異なる場合には、温度変化にともない分散質が溶媒に浮いたり沈んだりすることになる。

MR流体の研究は、現在「分散質粒子の粒径をどこまで均一化できるか」や「粒子の分散性をどこまで安定化できるか」といった主に品質向上に関する研究と、「いかにして分散質の沈殿を抑えるか」や「流動抵抗の制御をどのような手法を用いて行うか」といった応用分野に関する研究の2本柱で進められている。また、溶媒中で網目状組織を形成する高分子物質が分散安定剤として注目されているが、この物質を利用して分散質の沈殿を抑制する研究も始まっている。今後は、このような分子レベルでの沈殿抑制物質の開発が、MR流体の未来を握る大きな鍵となるであろう。

■取材協力、資料提供

横浜国立大学、東北大学流体科学研究所、(株)シグマハイケミカル

■使用図版提供

横浜国立大学工学部生産工学科 森下 信教授