

MR 流体の特性とその応用

Characteristics and Applications of Magnetorheological Fluids

藤田豊久・島田邦雄* 秋田大学工学資源学部（東京大学大学院工学系研究科）・*秋田県立大学システム科学技術部

T. Fujita and K. Shimada*, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University (Graduate School of Engineering, the University of Tokyo) and *Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University

A typical magnetorheological (MR) fluid consists of a suspension of solid magnetic particles of micrometer size in a liquid with surfactants added to decrease the settling rate. The particles align in the magnetic field direction to form chains under the magnetic field. When a magnetic field is applied, MR fluid shows Bingham flow, and the yield stress of the fluid increases dramatically to approximately 100 kPa as the field strength rises. This process is reversible, and the response time is in the order of milliseconds. Currently many kinds of applications for MR fluids have been developed, including damping devices, clutches, actuators, polishing devices and seals.

Key words: magnetorheological fluid, MR fluid, MRF, magnetorheological suspension, MRS, applications of MR fluid, characteristics of MR fluid

1. はじめに

MR 流体は Magnetorheological Fluid (Suspension, MRF, MRS) とも記述し、磁気に応答する機能性流体の一つである。機能性（インテリジェント）流体^{1), 2)}は正式な定義が明確ではないが、流体に電磁場、光、熱、力などの物理量を作作用させることによって、流体の微視的構成要素の構造、物性を変化させ、各種機能を発揮する流体である。磁気に応答する流体としての代表例は 50 年以上にわたって研究されている磁性流体であり磁気シールを中心として各種応用が実用化されている。一方、ここ 10 年で研究が盛んになってきた磁気に応答する流体に MR 流体があり、磁界印加により粘性が変化する流体であるが、MR 流体は磁性流体に比較して磁界印加による粘度増加がはるかに著しく、それぞれの特徴を活かして両者は応用されている。MR 流体関係が発表される代表的な国際会議である ERMRF 国際会議で発表された MR 流体の性質、応用の論文数の変化を Fig. 1 に示す。MR 流体の特性の研究は応用研究より多くここ数年での論文数の増加が著しい。

電磁気的駆動力を用いた機能性流体の種類といくつかの応用を Table 1 に示す。各種流体のほかに、粉流体 (Magnetic powder dispersion in gas), ゴム状のもの (MR Elastomers) などとも考案されている。MR 流体は粘度増加を利用したダンパ、クラッチへの応用と、磁気粒子の性質を利

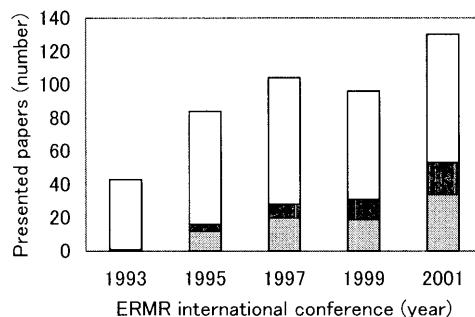


Fig. 1 Numbers of papers on MRF at ERMRF (ER fluid and MRF) international conferences. ■ characteristics of MRF, ■ applications of MRF, □ others.

Table 1 Classification of intelligent (smart) fluids

Name of fluid	Driving force (fields)	Applications
Magnetorheological fluid (suspension) MER fluid	Magnetic	Damper, clutch, polishing, etc.
Magnetic powder dispersed in gas	Magnetic & electronic	
MR elastomers (sponge)	Magnetic	
Magnetic fluid (MF or ferrofluid)	Magnetic	Seal, speaker, bearing, accelerometer sink & float separation etc.
Nonmagnetic fluid emulsion	Magnetic	
Nonmagnetic particles in MF	Magnetic	
ER magnetic fluid	Magnetic & electronic	
Electrorheological (ER) fluid	Electronic	Damper etc.

用した研磨に実用化されている。また、機能性流体には電界の強さに応答して粘度が変化する電気粘性流体 (ER 流体) があり、電気と磁気の両方に応答する流体も MR 流体および磁性流体の特性に加えて製造されている。さらにこれらの機能性を有する流体に自動修復機能などの新たな特性を与えて、環境に能動的に応答する高機能性流体である知能（スマート）流体化への発展が期待されている。ほかに、プラズマ流体、各種混相流体、バイオ流体も知能流体化されうる¹⁾。

Table 2 に各種機能性流体の磁界あるいは電界の強さによる粘度変化を示す。磁性流体は磁界中での粘度変化、すなわちせん断応力の増加は少なく、固化することなく流体としての性質を有し、また、数 μm の非磁性粒子を混合するとさらに粘度は増加するがせん断応力の変化はせいぜい

Table 2 Viscosity changes in intelligent fluids resulting from application of magnetic or electric fields

Fluid name	Shear stress change at 100 s ⁻¹ of shear rate when a magnetic or electric field is applied
Magnetic fluid	1-10 Pa at 0.3 T
Magnetic fluid with nonmagnetic particles	10-50 Pa at 0.3 T
MR fluid	10,000-100,000 Pa at 0.3 T
ER fluid	1,000-5,000 Pa at 3 kV/mm

Table 3 Qualities of intelligent (smart) fluids

Electromagnetic field	Magnetization Dielectric constant Conductivity Temperature dependence of quality Response
Fluid	Viscosity Stability Density Surface tension Expansion coefficient Compressibility
Thermal	Thermal conductivity Heat capacity Specific heat Melting point and boiling point Vapor pressure Flash point and ignition point
Optical	Color Reflective index
Acoustic	Velocity
Chemical	pH Hydrophobic or hydrophilic Solubility Phase separation Reaction Toxicity
Economic	Cost

10 Pa 程度である。一方、MR 流体は 0.3 T の磁界の印加で磁性流体より千倍も高い数十 kPa のせん断応力の増加を示し、流体からほぼ固体のように変化する。また、ER 流体は MR 流体ほど粘度増加が大きくはないが、3 kV/mm の電界で数 kPa の高いせん断応力の増加を示し、見かけ上固体のように相変化する。

Table 3 に機能性流体のもつ特性を示す。それぞれの特徴を活かして機能性流体の応用が考案されている。本文では MR 流体の特性を応用した例を関連流体とも比較しながら解説し、今後を展望する。

2. 磁性流体と MR 流体の特性の概要

・磁性流体

磁性流体は液体中に 10 nm サイズの強磁性超微粒子を界面活性剤などで極めて安定に分散させたコロイド溶液で、通常の遠心力あるいは磁界により凝集、沈降が起こらず、見かけ上、液体が強い磁性をもつ流体である。製法は、10 nm サイズのマグネタイトなどのフェライト粒子を共沈法で製造後、界面活性剤を吸着させて、水や油に分散させて磁性流体とする方法が広く行われてきた。最近では、フェライトよりも飽和磁化の大きい金属鉄超微粒子を分散させた磁性流体、界面活性剤の代わりに水中に径の大きい正あるいは負イオンを添加して強磁性超微粒子を分散させるイオン性磁性流体も製造されている。磁性流体中に分散

させる強磁性粒子は現在のところ約 10 nm に限られるが、分散質の強磁性粒子および分散媒の溶媒の性質により磁性流体を用いた各種応用が考案されている。例えば、強磁性粒子に感温フェライトを使用すれば、磁性流体ポンプ、ヒートポンプとして使用でき、また、溶媒に液体金属を使用すれば導電性磁性流体、溶媒が弾性のあるゴムであれば磁性を有するゴム、気体であれば極低温の酸素のような磁性気体にもなる。磁性流体に関して Table 1 に実用例を示したが、ほかに 100 件以上の応用例が考案されている。広く応用されている代表例は磁性流体シールで、強磁性体の回転軸とリング状の磁石の間に磁性流体を満たして液状リングを形成し、リングの左右の空気流れを遮断する防塵用あるいは真空シールである。軸の回転摩擦損失が少なく固体相互の摩擦による損傷がない高気密性のシールである。また、磁性流体使用潤滑軸受は非磁性体の玉軸受を磁界中の磁性流体中に配置し、センタリングを保持させ同時に液体で潤滑させるものである。磁性流体使用スピーカはボイスコイル部分に磁性流体を満たし、非磁性体のコイルを磁性流体による磁気圧力でセンタリングさせ粘性により共振を低下させている。磁性流体による比重選別では、例えばダイヤモンドを含む非磁性の混合粒子を磁界勾配のある磁性流体中に入れ、比重で浮沈分離させて回収している。ほかに加速度計なども実用化されている。以上の応用においては、磁性流体の粘性は磁界を作用させない場合、水の粘度から水の数十倍程度で、磁界を作用させても著しく増大せず（粘度として 1 ポアズ程度の増大）、流体として流動する性質を維持しながら特徴ある磁氣的圧力作用を利用して応用されているものである。

磁性流体が通常の流体と異なる点の一つは外部から磁界を作用させると磁性流体重力のほかに体積力として磁氣的なエネルギーが蓄えられる点である。この場合、磁性流体の単位体積当たりの磁氣的なエネルギー U は次式で表される。

$$U = \mu_0 \int M dH \quad (1)$$

この結果、磁界勾配のもとでは流体の体積要素には、次式で表される力が作用する。

$$F_m/V = \mu_0 (M \cdot \nabla) H \quad (2)$$

ここに F_m : 磁氣的な力, M : 磁性流体の磁化, V : 磁性流体の体積, H : 磁界, μ_0 : 真空の透磁率である。磁性流体は磁界の方向に磁化され、流体は電氣的に絶縁体であり電流の流れがない場合、 $\nabla \times H = 0$ で (1) 式は $F_m/V = \mu_0 M \nabla H$ となり、磁性流体の粘度および圧縮性がない理想流体の場合における Bernoulli の式は下記のようになる。

$$P + 1/2 \rho v^2 + \rho g Z - \mu_0 \int M dH = \text{一定} \quad (3)$$

ただし、 v : 流体の速度, P : 流体圧力, ρ : 磁性流体の密度, g : 重力加速度, Z : 重力場における高さである。この拡張

された Bernoulli の式は、磁性流体の応用を考察する場合、基本的に重要な式である。微視的観点からみると、分散している磁性粒子は単磁区粒子からなり、磁界のもとでの磁性流体の磁化が平衡状態に達するには二つの機構が考えられる。一つは溶媒中の粒子の回転であり、もう一つは粒子内の磁気モーメントの回転（ネール回転）である。粒子が十分小さいと粒子の磁気モーメントは熱エネルギーによりいつも揺動して容易に飽和磁化に達しない超常磁性と呼ばれる性質が現れる。この性質は、粒子径とその物質の磁化の強さ、および磁気異方性に依存するが、超常磁性を示す粒子では常に粒子内の磁気モーメントの回転が磁気応答の基本的なメカニズムとなる。

・MR 流体

数百 μm の強磁性鉄粒子を空気中で層にした流動層の流動特性は Rosensweig により 1979 年に報告³⁾され、空気中で鉄粒子を電磁石でコントロールするパウダークラッチ

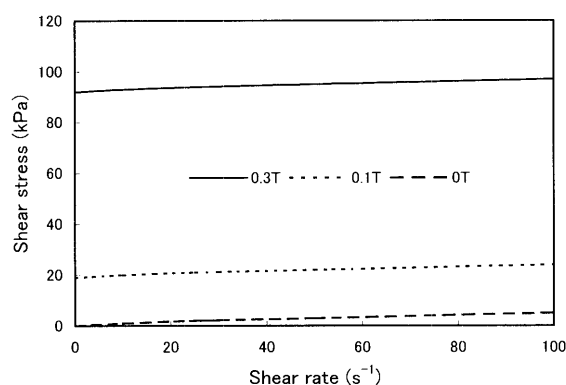


Fig. 2 Shear stress vs. shear rate for a typical MR fluid (for example, Lord Co.).

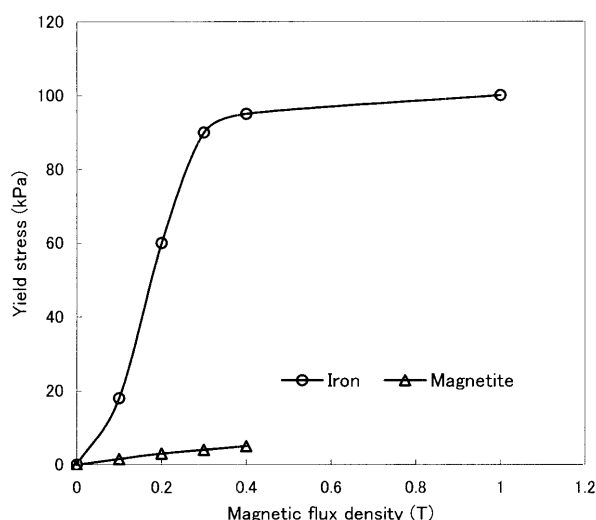


Fig. 3 Effect of magnetic field strength on the yield stress of MR fluids (iron particle size μm order, 40–50 vol%; magnetite particle size 30 nm, 50 vol%).

は各種装置に実用化されている。MR 流体は空気の代わりに液体を用いたもので、磁性流体と比べて液中に分散させる強磁性粒子は数 μm のオーダーと磁性流体中の粒子に比べて百倍以上大きく、粒子が液中に沈降あるいは懸濁液として使用する。製造方法は例えばカルボニル法で得られた数 μm 粒度をそろえた球状金属鉄粒子を界面活性剤で被覆後あるいは界面活性剤を添加した脂肪油あるいはシリコン油液中に 20～40 体積%で分散させて安定な懸濁液になるようにして製造する。磁界を作用させない場合の粘度は磁性流体よりもはるかに大きく数ポアズであり、流動性はあるが、磁界を作用させると Fig. 2 に示すように⁴⁾、せん断速度とせん断応力の関係は、せん断速度 0 を推定したせん断応力（降伏値）が生じるビンガム流動となる。MR 流体は数十 kPa と大きい降伏値を示し、流動性がない場合、見かけ上固体ようになる。すなわち磁界の印加で流動特性はビンガム流体となり、せん断応力の変化は磁界のオンとオフで数十 kPa にも達する。この現象を利用して米国では MR 流体をトラックの座席のダンパとして実用化しているほか、運動器具のダンパやクラッチにも使用されている。

外部磁界を印加することによる MR 流体の応答速度は数 ms で、見かけ粘度は $10^5 \sim 10^6$ 倍変化し、磁界の印加によるせん断応力変化は百 kPa に達する場合がある。製造方法が容易で安価な利点もある。強磁性粒子の磁化を M_p 、降伏応力を τ とすれば強磁性粒子の体積分率 ε の関数を f として次式が成り立つ。

$$\tau/(\mu_0 M_p^2) = f(\varepsilon) \quad (4)$$

MR 流体への磁界印加と降伏応力の関係について金属鉄あるいはマグネタイトを用いた場合を Fig. 3 に示す。懸濁させる粒子の磁化が大きいほど降伏応力は大きくなる。

3. MR 流体の特性

3.1 製造方法

MR 流体 MR 流体は一般に数 μm の球状強磁性粒子を蒸気圧の低い油中に界面活性剤などで分散させて作成し、高濃度の懸濁液状である。球状粒子の使用は、不規則形状粒子を使用した場合よりも磁界を作用した場合の粘度増加、降伏値が大きい。数 μm の球状の金属鉄粒子は、金属カルボニルであるペンタカルボニル鉄 $\text{Fe}(\text{CO})_5$ を加熱して得られ主としてカルボニル鉄である。例えば、BASF 社は 1～10 μm の各種粒子径のカルボニル鉄を製造しており、商品名 HQ は球状の金属鉄粒子で平均粒径は 2 μm で単分散に近く飽和磁化は 1710 kA/m である。数 μm の Fe, Co, Ni などの強磁性粒子を液体中に 25 vol% 混合した場合、500 kA/m の磁界を作用させるとビンガム流動を示し、20～80 kPa の降伏値が得られる⁵⁾。ほかに Fe 48%, Co 50%, V 2% の合金を分散粒子としたもの、数 μm の Fe と $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ を混合したものなどがある⁶⁾。また、粒子径

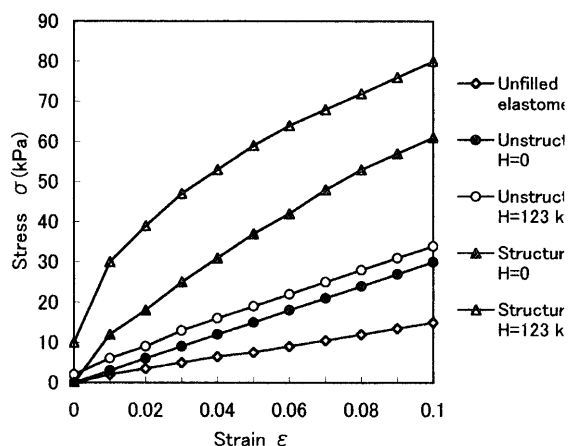


Fig. 4 Stress *versus* strain for MR elastomers containing 15 vol% of 2 μm sized iron particles. (Unstructured: cured without a magnetic field; structured: cured in the presence of a magnetic fluid)

の大きい粒子を使用して 15~25 nm の鉄粒子をマイクロ波プラズマ合成 (MPS) を用いて $\text{Fe}(\text{CO})_5$ より製造して油中に分散させた MR 流体および数 μm の鉄粒子と混合した MR 流体も製造されている⁷⁾。同じ体積で分散させた場合、一般に鉄の粒子径が小さくなるほど降伏値は減少するが分散安定性は増加する。実用的に粒子をできるだけ液体中で沈降させないように分散させることが重要であり、界面活性剤やタンパク質⁸⁾を鉄粒子表面に被覆して沈降しにくいように処理して MR 流体を製造している。粒子の体積濃度は約 30~50 vol% として使用される場合が多い。

MR ゴム 数 μm の強磁性の金属鉄粒子をゴムに入れて磁場を作用させながら固めて製造する。例えば常温の硬化剤を添加したシリコンオイルに金属鉄粉を 15~25 vol% 程度混合し、円筒や板状容器に入れて真空で空気を除去後、電磁石内に入れ、沈降を防ぐために回転させながら固めた後、MR シリコンゴムを得る。ゴム中の鉄粒子の配置は磁界の方向に鎖構造を形成している。Fig. 4 に示すように、磁界の ON と OFF でひずみを増大させるためには、鉄粒子を磁場中で配向させながら固めたゴムを用いることが重要である⁹⁾。また、分散させる粒子が最大 60 μm という大きな金属鉄粒子を分散させたゴムも作られているが、30 vol% のときが最も硬くなり、数 μm の鉄粒子を分散させた場合よりも磁界による変形が大きい¹⁰⁾。

3.2 クラスターの構造

一般に、磁場を印加すると、鉄粒子が磁力線方向にチェーンを形成するという観察報告がある¹¹⁾が、これは、あくまで、鉄粉濃度が小さい場合である。数 vol% と希薄な磁気粒子間の磁界方向の相互作用ポテンシャルエネルギーは磁気モーメントの相互作用の合成で計算される。MR 流体を薄膜にして磁界を作用させて顕微鏡観察すると、磁界が増加するに従い、粒子の鎖上構造は細長くなる

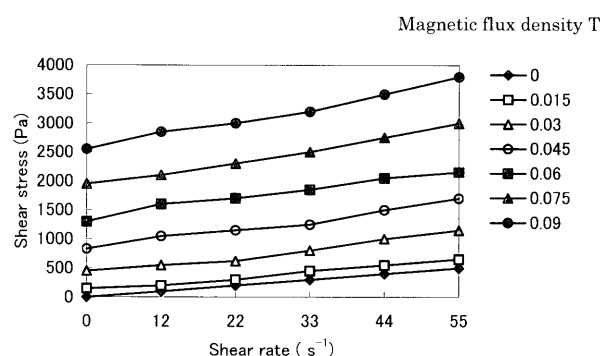


Fig. 5 Shear stress *vs.* shear rate of an MR fluid containing dispersed iron particles (spherical iron particle size, 4–5 μm , 35 vol%).

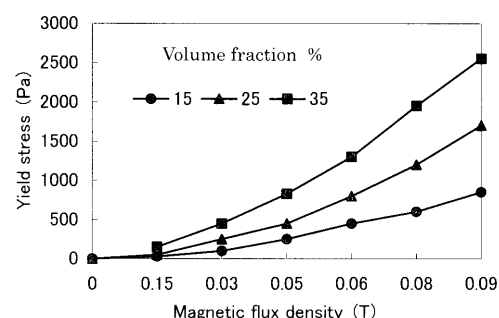


Fig. 6 Yield stress of MR fluid *versus* applied magnetic flux density (spherical iron particles 4–5 μm).

が、磁界方向に無限に続く長いクラスターは形成せず、有限であり粒子が数個重なる鎖構造を示す¹²⁾。15 vol% 程度の濃度では、粒子の鎖状構造ではなく粒子間のわずかな空隙が磁界方向に伸びた状態が観察される¹³⁾。一方、ダンパなどの応用機器に使用される MR 流体の場合には、30~40 vol% と鉄粉濃度が大きいので、流体というよりは、固体に近い状態で扱うのがふさわしいと思われる。すなわち、MR 流体の場合の粒子配向状態は、鉄粉濃度が大きい場合、粉体、あるいは、流動層として扱う場合に近い状態となる。

3.3 磁界印加と粘度変化

MR 流体に磁界を作用させた場合の流動曲線を Fig. 5 に示す¹⁴⁾。直径約 5 μm の球状金属鉄粒子を 35 vol% でシリコン油に分散させた流体について、円錐平板粘度計にて流動方向と垂直に比較的弱い磁界を作用させた場合の磁界強度を変化させたときの流動曲線である。ビンガム流動となり、せん断速度ゼロで降伏値 (降伏応力) が観測された。次に、同じ金属粒子を用いて体積濃度を変化させた場合の降伏値と磁界との関係を Fig. 6 に示す。体積濃度が大きい方が降伏値は大となり、また、磁界が増大するにつれて降伏値の増加量は粒子の磁気モーメントの相互作用で増大し、Fig. 3 に示すように飽和磁化になるまで増大すると考えられる。一方、ダンパで重要な MR 流体を強制振動させ

ることによる動的粘弾性¹⁵⁾は磁界に大きく依存するが、ほかに、分散させる粒子の濃度、粒度に影響し、振幅が大きくなると動的弾性率は低下し、損失角も変化する。

4. MR 流体の応用

MR 流体の開発に伴い、ダンパ以外の応用機器が提案されてくると予想されるが、MR 流体を用いた応用機器の大半は、ダンパが占めているというのが現状である。その理由は、ER 流体の場合と同じように、磁界印加による見かけ粘度の増加や、降伏応力の増加を利用することに焦点がおかれているからである。それに対して、磁性流体の場合には、磁界印加による見掛け粘度の増加を利用する以外に、磁界印加により発生する磁気圧力を利用した応用例もある。そこで、MR 流体には、そもそも、磁気圧力が存在するのか、また、もしあるとしたら、それを利用する手立てはないのか、という疑問がわいてくる。これについては、次項で解説する。

MR 流体は、前述したように、機能性流体 (Intelligent fluid) やスマート流体 (Smart fluid) の一つである。材料の分野において、スマート材料は、センサとアクチュエータ、制御機、物質の特性を兼ね備えたものとして位置づけられている¹⁶⁾。このことからすると、MR 流体も、これらの特性を兼ね備えた流体とみることができる。したがって、センサやアクチュエータ、制御機、物質としての応用が期待できる。

4.1 ダンパ

MR ダンパに関する研究は、非常に多岐にわたっているのが現状である。

まず、用途別で見えてみると、最近の研究では、回転体におけるダンパ^{17)~19)}、衝撃吸収のためのショックアブソーバ^{20), 21)}、MR 流体マウント²²⁾、車体におけるダンパ^{23)~25)}、建築構造物におけるダンパ^{26), 27)}などが挙げられる。また、比較的コンパクトなダッシュポットも考案され²⁸⁾、一部商業化されている。

次に、形態で見えてみると、最近の研究では、ダッシュポットが円筒型^{29)~35)}であるか、平板型³⁶⁾であるか、どちらかに帰着することができる。

また、制御の立場からみると、一般的に、ダンパは、パッシブダンパ (受動型ダンパ)、アクティブダンパ (能動型ダンパ)、セミアクティブダンパ (準能動型ダンパ) の三つに分けることができる。パッシブダンパは、例えば、MR 流体中に浸される物体が、永久磁石であるようなダンパの場合³¹⁾に相当し、外部から磁界を印加することにより、振動を制御しないダンパである。したがって、Fig. 7 に示すように、共振時において、磁界印加により、無磁界下のときの振幅比が減少し、その磁界下の共振周波数は、無磁界下のときに比べて変化する。しかし、全体の周波数領域にわたって、振幅比が減衰するので、無磁界下での共振周波数より大き

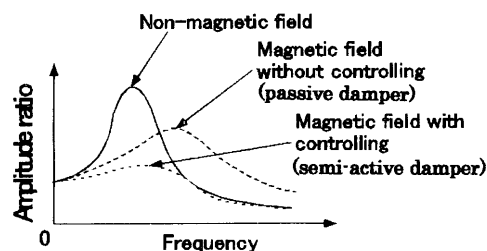


Fig. 7 Comparison of the frequency characteristics of passive and semi-active dampers.

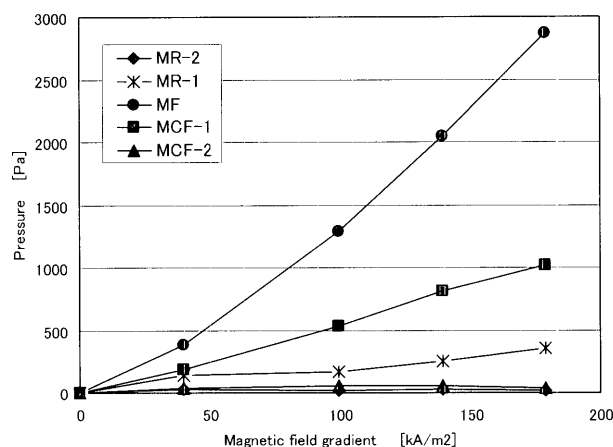


Fig. 8 Static pressure of MR fluid, magnetic fluid, and MCF.

な周波数においては、一般に、磁界印加することにより、無磁界下より振幅比が増加することになる。これが、フィードバック制御がダンパにおいて必要とされるゆえんである。そこで、アクティブダンパは、外部から磁界を印加することにより、振動をフィードバック制御するほかに、振動する物体に力を作用させてアクチュエータとしての機能も兼ね備えたダンパである。また、セミアクティブダンパは、外部から磁界を印加することにより、振動をフィードバック制御するダンパである。したがって、Fig. 7 に示すように、セミアクティブダンパの場合は、フィードバック制御により、全体の周波数領域にわたって、振幅比が無磁界下より減衰できるようになる。

MR 流体ダンパの場合にも、最近の研究では、振動をフィードバック制御するセミアクティブダンパがある^{37)~39)}。

いずれの MR 流体ダンパにしても、磁界印加による見かけ粘度の増加や降伏応力を利用して、ダンパの粘性減衰係数を変化させるという原理をとっている。これに対して、磁性流体ダンパの場合には、磁界印加による見かけ粘度の増加を利用してダンピング効果を得る方法以外に、磁界印加により発生する磁気圧力を使って、ダンピング効果を得る方法がある⁴⁰⁾。

それでは、MR 流体の場合には、磁気圧力なるものが存在するのであろうか？ Fig. 8 に、MR 流体、磁性流体、MCF の磁界勾配中に置かれた密閉容器の表面における圧

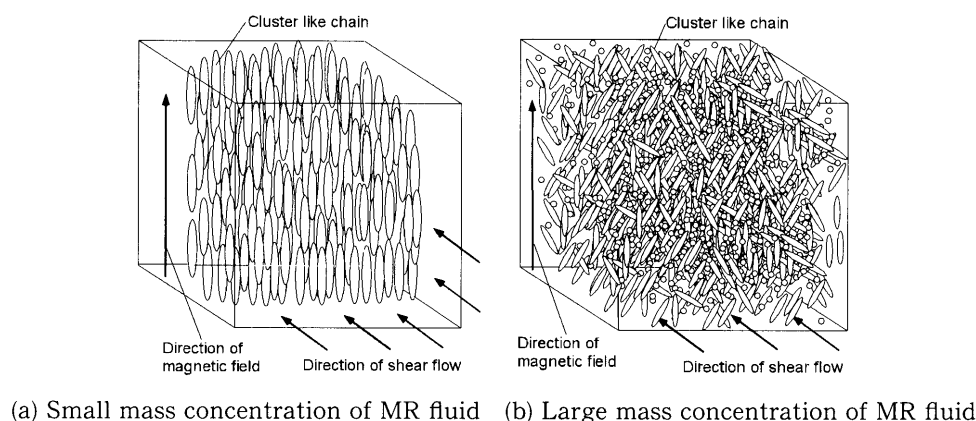


Fig. 9 Schematic diagram of the formation of particles in MR fluid.

力の測定結果を示す。ここで、MR-1: 前述した HQ (カーボニル鉄粉) 60 g + ケロシン 30 cc, MR-2: HQ105 g + ケロシン 30 cc は MR 流体であり, MF はケロシンベース磁性流体 HC-50 (20 wt%), また, MCF-1: HQ60 g + HC-50 (20 wt%) 30 cc, MCF-2: HQ105 g + HC-50 (20 wt%) 30 cc は MCF 流体である。MCF については後述する。磁性流体に混ぜる鉄粉の量が多い MCF ほど, 測定圧力が小さくなるが, 磁性流体を含まない MR 流体の場合の方が, さらに小さくなる。このとき, 鉄粉の含まれる割合が多い MR 流体ほど, 測定圧力が小さくなる。MR 流体の場合の粒子配向状態は, 鉄粉濃度が大きい場合, 粉体, あるいは, 流動層として扱う場合に近い状態となる。一般に, 磁界を印加すると, 鉄粒子が磁力線方向にチェーンを形成するという観察報告がある¹¹⁾が, これは, あくまで, 鉄粒子の濃度が小さい場合である。この場合, Fig. 9(a) に示すように, 鉄粒子が鎖状構造を作り, 印加磁界の磁力線方向に並ぶ。しかしながら, 通常, ダンパなどの応用機器に使用される MR 流体の場合には, 鉄粉濃度が大きいので, 流体というよりは, 固体に近い状態で扱うのがふさわしいと思われる。したがって, MR 流体の場合には, 磁性流体の場合と違って, 固体化を呈するので, 磁気圧力は非常に小さいことになる。この状態は, 流体力学的圧力というものではなく, むしろ, 固体材料における内部応力に相当するものである。この場合, Fig. 9(b) に示すように, 中には印加磁界の磁力線方向に並び, 鎖状構造をとるものもあるが, 多くの鉄粒子は, 固体における分子構造の並びのように全体が集合している状態になっている。このとき, 結晶のような配列をすることも考えられるが, 全体がきれいな鎖状構造をとる (a) の場合とは異なる。

このように, 鉄粉の含まれる割合が多い MR 流体ほど, 測定圧力が小さくなるが, MR 流体自身のもつ磁化は, 含まれる鉄粉の量によって決まるので, 磁性流体より MR 流体の方が, 磁界に吸引される力は大きい。

これらのことを踏まえると, 磁性流体の場合と違って, MR 流体の場合には, 磁界印加により発生する磁気圧力を

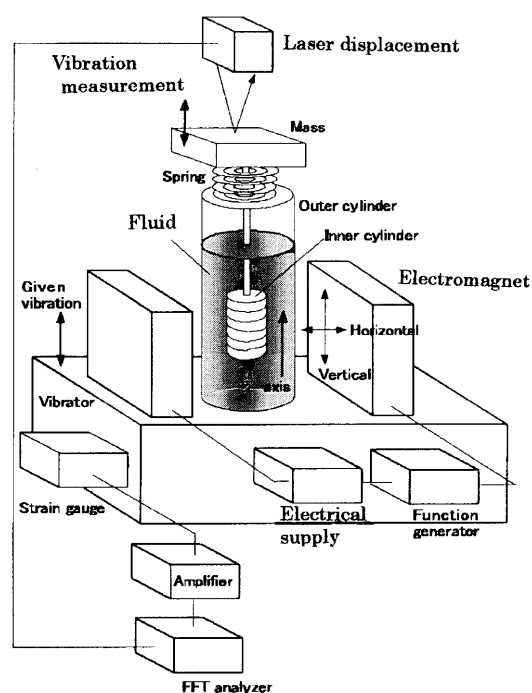


Fig. 10 Schematic diagram of a non-sedimentation magnetic viscous damper.

使ったダンパの製作は期待できない。一方, 磁性流体より MR 流体の方が, 磁化が大きく, 磁界に吸引される力は大きいので, MR 流体の場合には, 磁化特性を利用した新しいダンパが考案できると予想される。これは, むしろ, アクチュエータとして利用の方が望ましい。

ところで, MR 流体の場合には, 粒子分散の安定性に問題があり, 長時間経過後でも粒子沈降がない MR 流体も開発されつつある。これについては, ER 流体として使用できるスメクタイト粒子を混合させた MR 流体がある⁴¹⁾。これは, スメクタイト粒子が, ちょうどクッションのような役割を果たして鉄粒子を支えているものと考えられている。また, この粒子分散安定性の問題と, 磁性流体の磁化を高めるという問題を解決するために, MR 流体と磁性流体を混合した MCF (Magnetic compound fluid, 磁気混

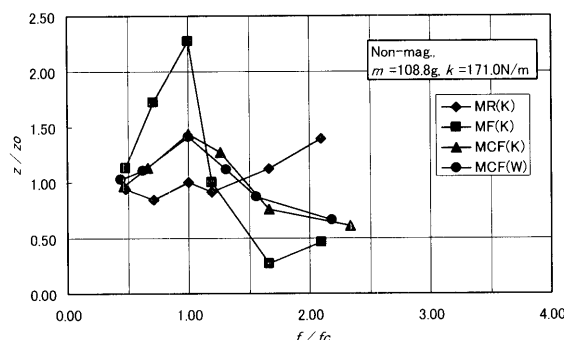


Fig. 11 Frequency characteristics of a non-sedimentation magnetic viscous damper.

合流体)が, 島田らにより開発され^{(42), (43)}, その応用として, MCF ダンパも考案されており, 新しい機能性流体として注目されている⁽⁴⁴⁾. また, MR 流体を含め, あらゆる磁界に反応する粒子を含むコロイド系流体に対して, どんなに大きな粒子であっても粒子が沈降しない, 画期的なダンパを考案した. そのダンパの一例を Fig. 10 に示す. これは, 一自由度のバネ-マス系の円筒型ダンパであるが, 液体中にある内筒に永久磁石を用いることにより, あらかじめ流体中の磁性粒子を吸引しておくことによって, 粒子の沈降を抑えるという原理である. これのみであれば, 磁性流体ダンパの場合にすでにセルフセンタリング効果を狙ったパッシブダンパが除振台において提案されている. ところが, これに外部から磁界を印加することにより, セミアクティブダンパとしての機能をもたせた, 新しいタイプのダンパが考案された. Fig. 11 に, 無磁界下と変動磁界を印加したときの周波数応答特性を示す. ここで, z_0 : 与える振動の振幅, z : 得る内筒の振動の振幅, f : 振動の周波数, f_c : 実験値による共振周波数, m : マスの質量, k : バネ定数である. また, MCF (K), MCF (W) は, それぞれケロシンベース, 水ベースの MCF, MR (K) は, MR 流体, MF (K) は磁性流体で, それぞれ比較できるように, 含まれる粒子の濃度を一定にして調整している. MCF を用いることにより, 磁性流体や MR 流体に比べて, 共振時において, 最大 23% の減衰を得ることができる.

このように, MCF は磁性流体や MR 流体よりもダンパには最適であるが, この粒子無沈降型ダンパのように, MR 流体ダンパの場合にも, 内筒に永久磁石を使用し, 外部から磁界を印加するという手法は, かなり有効であり, ダンパ以外の応用機器においても活用できる可能性を有している.

4.2 アクチュエータ

現在, MR 流体を用いたアクチュエータとして考案されているのは, クラッチとしてのトルク伝達の役割をもつ回転型デバイス⁽⁴⁵⁾や, MR 流体が流動する流路の途中に磁界を印加して, MR 流体の流れを制御することにより, 圧力の伝達を変化させる⁽⁴⁶⁾というものである. いずれの場合にも, 磁界印加による見かけ粘度の増加や, 降伏応力の増加

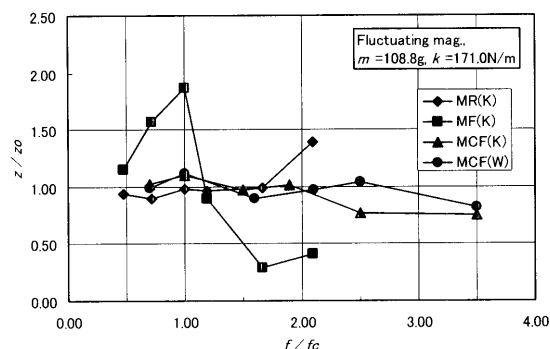


Fig. 12 Coordinates of the Bernoulli equation.

を利用したものである. ここで, MR 流体に対して, 磁性流体の場合には, 磁界印加による見かけ粘度の増加を利用する以外に, 磁界印加により発生する磁気圧力を利用したアクチュエータ^{(47), (48)}がある. アクチュエータの場合, 一次元の簡単な流れに近似して計算することがよくある. そこで, 登場するのが Bernoulli の式である. (3) 式で示した Bernoulli の式は, 磁性流体の粘度および圧縮性がない理想流体の場合である. これに対して, MR 流体の場合には, 前述したように, 一般的には, 降伏応力があるビンガム流体としての非ニュートン流体となる. この場合には, Fig. 12 に示すように, 流線に沿う位置 1~2 間における流管の壁面に働くせん断応力 τ を用いて (5) 式のように表すことができる. この式は, 磁性流体の粘度を考慮した場合についても使用できる Bernoulli の式であり, 磁性流体の場合, 磁気圧力差 $P_m = \mu_0 \int_1^2 M dH$ である. しかしながら, 前述したように, MR 流体の場合には, 磁気圧力が薄れてくるので, この P_m については磁性流体のように簡単に表示することができない.

$$(P_2 - P_1) + \frac{1}{2} \rho (\nu_2^2 - \nu_1^2) + \rho g (Z_2 - Z_1) - P_m + \int_1^2 \tau \frac{dl}{dA} ds = 0 \quad (5)$$

4.3 研磨

MR 流体を用いた研磨は, 磁性流体を用いた研磨と比べて, 研磨時間が短い. これは, 流体中に含まれる粒子の大きさが, MR 流体の方が磁性流体に比べてはるかに大きい

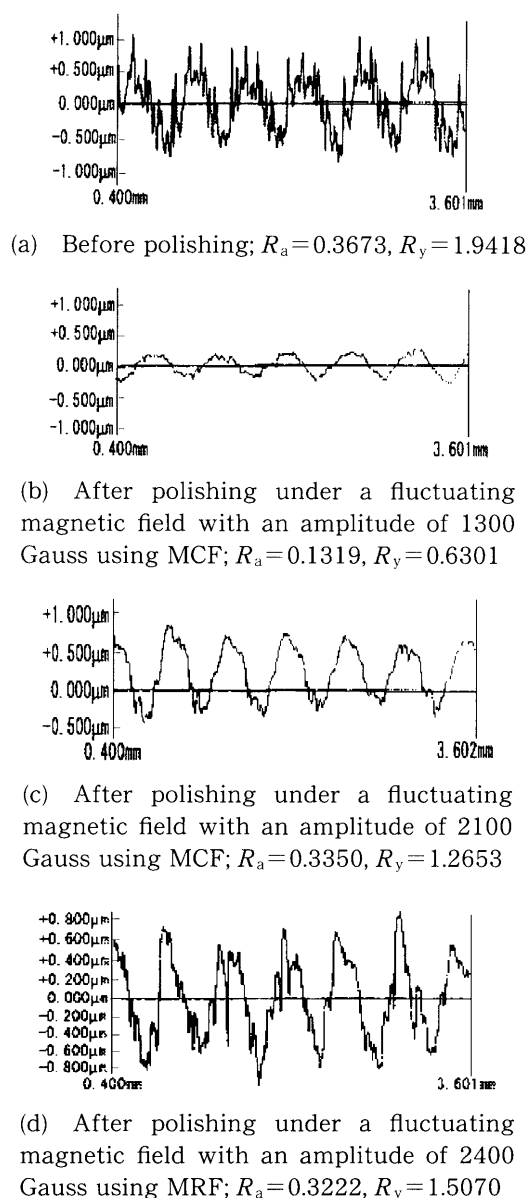


Fig. 13 Measured surface roughness of the plate.

ということによっている。MR 流体研磨には、小さな孔の研磨⁴⁹⁾や回転球面研磨⁵⁰⁾などがある。また、MCF についても研磨に成功しており^{51), 52)}、MR 流体研磨より効果があるという結果を得ている。Fig. 13 に、平面回転研磨の一例を示す。これは、被研磨物の材質をチタンとする平面研磨について、室温下において、 $3\mu\text{m}$ のアルミナ粒子を研磨剤、潤滑液としてケロシンを使用し、280 rpm の一定回転数をもつ平面を対向して加工圧 5 kg で押さえつけ、研磨時間を 5 分としたときの、ランク・テイラー・ホブソン社製の粗さ計測器による研磨試験結果である。ここで、磁界は、変動磁界を用いている。

Fig. 13(c) と (d) について、磁界強度にあまり有意差がないので、MCF と MR 流体が比較できる。また、Fig. 12(c) と (b) から、磁界強度により研磨効果が変わってくるが、

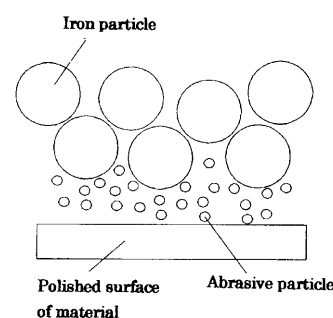


Fig. 14 Schematic diagram of polishing near the material surface.

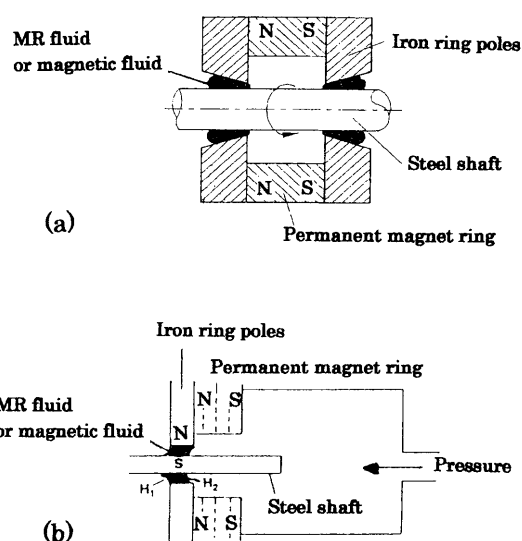


Fig. 15 (a) MR fluid or magnetic fluid seal structure and (b) experimental apparatus to measure the burst pressure and torque.

MR 流体より MCF の方がより大きな研磨効果が得られる。この研磨効果についての原理は、MR 流体の場合、Fig. 14 に示すように、鉄粒子が砥粒を押さえつけ、それが材料の表面に押さえつけられて研磨されることによる。

このとき、砥粒が材料表面に衝突する場合と、材料表面上を回転する場合の二つの研磨効果が考えられる。前者の場合には、主に、研磨液を材料に押さえつける加工圧に依存し、後者は、主に、研磨液の流動に依存する。この二つの研磨効果を有効に利用する必要がある。また、MCF を使用した場合には、粒子がチェーン構造をとるクラスタを形成するので、このクラスタの運動による砥粒への寄与が大きいので、後者の研磨効果が大きい。したがって、変動磁場を印加する方が、クラスタの運動が大きくなるので、より大きな研磨効果を得ることができる。

4.4 シール

MR 流体は磁性流体よりも単位体積当たりの強磁性粒子濃度が高く、かつ磁化の強い金属鉄粒子も使用できるので、磁化は磁界 150 kA/m で MR 流体が 500 kA/m $\cdot\mu_0$ と、マグネタイトを分散させた磁性流体よりも 4 倍磁化を

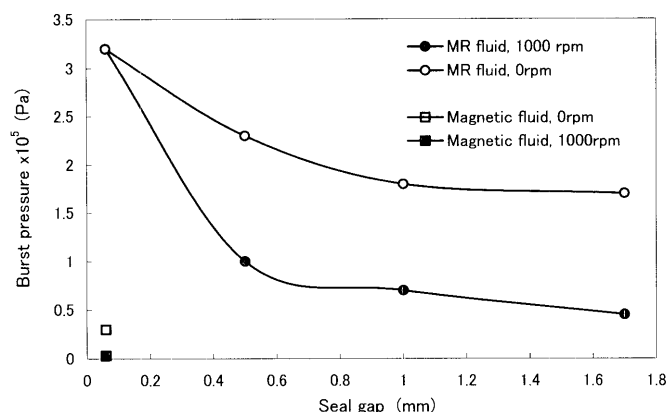


Fig. 16 Burst pressure of MR fluid and magnetic fluid vs. seal gap between 0.1 MA/m (H_1) and 0.2 MA/m (H_2).

大きくすることができる。磁性流体と異なり磁界中の流動特性はビンガム流動で降伏値 τ_0 を生じ、 τ_0 は磁界の強さの2乗 H^2 に比例する。MR 流体および磁性流体のシールの構造の1例を Fig. 15(a) に示し、実験で用いたシール圧とトルクを測定する装置を Fig. 15(b) に示す。シール1段の静的圧力 P_m は h をシールリングの高さ、 b をリールリングの厚さとして磁性流体と同様に次式で示される⁵³⁾。

$$P_m = \mu_0 M H h / b \quad (6)$$

流動するときは降伏値をもつので次式の圧力 P_p も生じる。

$$P_p = 2\tau_0 h / b \quad (7)$$

よって MR 流体のシールの耐圧は $P_m + P_p$ となり、例えば $b = 1 \text{ mm}$, $h = 10 \text{ mm}$ で $3 \times 10^5 \text{ Pa}$ ($\tau_0 = 0.5 \times 10^4 \text{ Pa}$) となり、通常の磁性流体の耐圧が 10^5 Pa のオーダーであることと比較すると MR 流体は3倍大きい圧力をシールできる。しかし、磨耗トルクが大きい欠点を有する。実際にシールリング（ギャップ）の厚さ b を変化させたときの MR 流体のシールで静止した状態の耐圧、および軸を 1000 rpm で回転させた場合の1段シールでの耐圧を Fig. 16 に示す¹⁴⁾。シールギャップが $b = 0.06 \text{ mm}$ と小さい場合は金属鉄粒子の構造により静止および回転させた場合の耐圧はほぼ同じであるが、シールギャップが大きくなるほど(7)式で示されるように回転させた場合の耐圧は減少した。また、 $b = 0.06 \text{ mm}$ の場合、磁性流体に比べて6倍以上のシール耐圧を実現できたが、回転させるためのトルクは 0.1 Nm と大きな値を示した。

4.5 その他

クラッチとして MR 流体を利用したデバイスが Rabinow により提案されている⁵⁴⁾。Rabinow は、MR 流体の特性やその応用について初めて紹介した人物として有名であるが、このときはまだ、磁性流体 (Magnetic fluid) と MR 流体 (Magnetorheological fluid あるいは Magneto-rheological suspension) の用語は、混同して使われていた。また、前項 4.2 で述べたアクチュエータ⁴⁵⁾もクラッチの一つとみることができる。クラッチの構造は、ER 流体

クラッチと同じ形態をとっており、電極板を用いているか、電磁石を用いているかの違いである。

5. おわりに

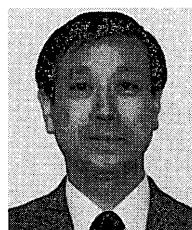
近年、MR 流体の基礎および応用研究は Fig. 1 に示したように盛んになり、さらなる現象の解明が必要である。応用には各種の場により流体がより安定な性質を保持することが重要で、磁性流体ほどではないが、沈降性の低い安定な強磁性粒子を分散させた MR 流体の製造が望まれる。磁場のオンとオフでの著しい粘度特性変化を示す MR 流体のさらなる応用のほかに、研磨、シールなど別の観点からみた応用も考案されている。また、Table 1 に示すような電磁場を利用したハイブリッド型の知能流体、Table 3 に掲げるような特性を研究、応用、磁性流体とも組み合わせるなどして、今後各種のアイデアで応用が生まれることを期待したい。

参考文献

- 1) 日本機械学会編、機能性流体・知能流体（コロナ社、2000）。
- 2) 谷 順二編著、インテリジェント材料・流体システム（コロナ社、1999）。
- 3) R. E. Rosensweig: *Science*, **204** (6 April), 57 (1979).
- 4) J. D. Carlson, D. M. Catanzarite, and K. A. Sy. Clair: Proc. 5th Int. Conf. ER, MRS and Associated Technology, Sheffield, UK, p. 20 (1995).
- 5) A. J. Margida, K. D. Weis, and J. D. Carlson: *J. Mod. Phys. B*, **10**, 544 (1996).
- 6) W. I. Kordonskii and S. A. Demchuk: *Int. J. Mod. Phys. B*, **10**, 613 (1966).
- 7) N. Rosenfeld and N. M. Wereley: Proc. 8th Int. Conf. ER Fluids and MRS, Nice, France, p. 452 (2001).
- 8) H. Lin, C. Shaohong, and Z. Chaoping: Proc. 8th Int. Conf. ER Fluids and MRS, Nice, France, p. 459 (2001).
- 9) C. Bellan and G. Bossis: Proc. 8th Int. Conf. ER Fluids and MRS, Nice, France, p. 507 (2001).
- 10) M. Lokander and B. Stenberg: Proc. 8th Int. Conf. ER Fluids and MRS, Nice, France, p. 514 (2001).
- 11) J. Liu: *JSME Int. J.*, **45**(1), Ser. B, 55 (2002).
- 12) T. Fujita, B. Jeyadevan, E. Kuzuno, and Z. Nakagawa:

- Proc. 6th Int. Conf. ER Fluid, MRS and Their Applications, Yonezawa, Japan, p. 587 (1997).
- 13) A. Shibayama, T. Miyazaki, T. Otomo, and T. Fujita: Proc. 8th Int. Conf. ER Fluids and MRS, Nice, France, p. 422 (2001).
 - 14) T. Fujita, K. Yoshimura, Y. Seki, G. Doddiba, and T. Miyazaki: *J. Intell. Mater. Sys. Struc.*, **10**, 770 (1999).
 - 15) H. Nishiyama, S. Fushimi, and M. Nakano: Proc. 8th Int. Conf. ER Fluids and MRS, Nice, France, p. 263 (2001).
 - 16) J. Tani, T. Takagi, and J. Qiu: *ASME, Appl. Mech. Rev.*, **51**(8), 505 (1998).
 - 17) C. Chu, J. Jiang, D. A. Robb, and D. J. Ewins: *Proc. SPIE*, **4331**, 121 (2001).
 - 18) C. Zhu, D. A. Robb, and D. J. Ewins: *AIAA*, **3**, 2121 (2001).
 - 19) C. Zhu: *Chim. J. Aeronautics*, **14**(1), 6 (2001).
 - 20) M. Ahmadian, J. C. Poynor, and J. M. Gooch: Proc. ASME, Dyn. Sys. Cont. Division, DSC-67 731 (1999).
 - 21) D. G. Breese, F. Gordaninejad, and E. O. Ericksen: *Proc. SPIE*, **3988**, 450 (2000).
 - 22) Y. K. Ahn, M. Ahmadian, and S. Morishita: *Vehicle Sys. Dyn.*, **32**, 199 (1999).
 - 23) D. J. Peel, R. Stanway, and W. A. Bullough: *ASME, Active Control Vib. Noise*, **DE-93**, 205 (1996).
 - 24) H. S. Lee and S. B. Choi: *J. Intell. Mater. Sys. Struc.*, **11**, 80 (2000).
 - 25) S. B. Choi, B. K. Lee, M. H. Nam, and C. C. Cheong, *Proc. SPIE*, **3985**, 491 (2000).
 - 26) K. Sunakoda, H. Sodeyama, N. Iwata, H. Fujitani, and S. Soda: *Proc. SPIE*, **3989**, 194 (2000).
 - 27) 砂子田勝昭: MR 流体ダンパ, 未来材料, **1**(4), 36 (2001).
 - 28) J. D. Carlson: Proc. 7th Int. Conf. ERF & MRS, p. 621 (1999).
 - 29) J. K. Lee, W. W. Clark, and S. H. Kim: *ASME, Active/Passive Vib. Cont.*, **DE-95/AMD-223**, 55 (1997).
 - 30) N. D. Sims, R. Stanway, A. R. Johnson, and J. S. Yang: *Proc. SPIE*, **3668**, 520 (1999).
 - 31) T. Fujita, B. Jeyadevan, K. Yamaguchi, and H. Nishiyama: *Powder Tech.*, **101**, 279 (1999).
 - 32) J. D. Carlson and M. R. Jolly: *MR Fluid, Mechatro.*, **10**, 555 (2000).
 - 33) C. Y. Lai and W. H. Liao: *Proc. SPIE*, **4073**, 240 (2000).
 - 34) S. Soda, N. Iwata, K. Sunakoda, H. Sodeyama, and H. Fujita: *Proc. SPIE*, **4330**, 201 (2001).
 - 35) H. Gavin and M. Dobossy: *Proc. SPIE*, **4330**, 273 (2001).
 - 36) T. Pranoto, 長屋幸助, 細田敦史: 日本機械学会論文集, **68** (667C), 761 (2002).
 - 37) T. Nakagawa and A. Yamada: *IEEE Trans. Magn.*, **35**(5), 3604 (1999).
 - 38) N. D. Sims, R. Stanway, A. R. Johnson, D. J. Peel, and W. A. Bullough: *Proc. SPIE*, **3985**, 470 (2000).
 - 39) H. F. Lam and W. H. Liao: *Proc. SPIE*, **4327**, 125 (2001).
 - 40) S. Kamiyama, K. Okamoto, and T. Oyama: Proc. 4th Int. Pamir Conf. MHD DTM, p. 451 (2000).
 - 41) A. Shibayama, T. Miyazaki, T. Otomo, T. Fujita, and K. Shimada: Proc. 8th Int. Conf. ERF & MRS, p. 422 (2001).
 - 42) 島田邦雄, 藤田豊久, 岡 英夫, 赤上陽一, 神山新一: 日本機械学会論文集, **67**(664B), 3034 (2001).
 - 43) K. Shimada, Y. Akagami, T. Fujita, T. Miyazaki, S. Kamiyama, and A. Shibayama: *J. Magn. Magn. Mat.* (2002), to be printed.
 - 44) K. Shimada, H. Kanno, J. Ogawa, S. Syuchi, and S. Kamiyama: *Proc. SPIE* (2002), to be printed.
 - 45) N. Takesue, H. Asaoka, J. Lin, M. Sakaguchi, G. Zhang, and J. Furusho: *IECON Proceedings*, **3**, 1838 (2000).
 - 46) L. Zipser, L. Richter, and U. Lange: *Sensor and Actuators A*, **92**, 318 (2001).
 - 47) K. Koike and A. Satoh: *J. Magn. Magn. Mat.*, **122**, 217 (1993).
 - 48) K. Shimada, M. Iwabuchi, K. Okui, and S. Kamiyama: *Appl. Mech. Eng.*, **1**(4), 519 (1996).
 - 49) S. R. Arrasmith, I. A. Kozhinova, L. L. Gregg, A. B. Shorey, H. J. Romanofsky, S. D. Jacobs, D. Goline, W. I. Kordonski, S. Hogan, and P. Dumas: *Proc. SPIE*, **3782**, 92 (1999).
 - 50) W. I. Kordonski and D. Golini: *J. Intell. Mater. Sys. Struc.*, **10**, 683 (1999).
 - 51) 島田邦雄, 藤田豊久, 神山新一, 赤上陽一: 日本 AEM 学会誌, **10**(1), 67 (2002).
 - 52) K. Shimada, Y. Akagami, S. Kamiyama, T. Fujita, T. Miyazaki, and A. Shibayama: *J. Intell. Mater. Sys. Struc.* (2002), to be printed.
 - 53) W. I. Kordonsky and S. R. Gorodkin: Proc. 5th Int. Conf. ERF MRS and Associated Technology, Sheffield, UK, p. 704 (1995).
 - 54) J. Rabinow: *AIEE Trans.*, **67**, 1308 (1948).

(2002 年 11 月 14 日受理)



藤田豊久 ふじた とよひさ

1978 年 3 月 東北大学大学院工学研究科修士課程修了, 1978 年 4 月 同大学工学部助手, 1986~1988 年 ミネソタ大学客員研究員, 1995 年 4 月 秋田大学鉱山学部教授, 1998 年 4 月 秋田大学工学資源学部教授, 1998~1999 年 米国セントクラウド大学客員教授, 2002 年 10 月 東京大学大学院工学系研究科教授 (併任), 現在に至る。

専門 資源処理工学

(工博)



島田邦雄 しまだ くにお

1987 年 3 月 東北大学工学部機械工学科卒業, 1992 年 3 月 東北大学大学院工学研究科博士後期課程機械工学専攻修了, 1992 年 4 月~1993 年 3 月 東北大学流体科学研究所日本学術振興会特別研究員, 1993 年 4 月~1999 年 3 月 富山大学工学部機械システム工学科文部教官助手, 1995 年 4 月~1996 年 3 月 富山工業高等専門学校非常勤, 1999 年 4 月 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科助教授, 現在に至る。

専門 流体工学

(工博)