磁気機能性流体と
精密加工への応用について

西田　均
富山高等専門学校

日本技術士会北陸本部富山県支部講演会
平成24年7月21日・富山県民会館

Ⅰ　磁気機能性流体の基礎

機能性流体とは,
外部から電場や磁場，光などの場を流体に印加することによって固有な機能的な性質が発現される流体の総称である.

磁気機能性流体とは,
磁場に応答する機能性流体である. 磁場は永久磁石や電磁石によって容易に印加することができる.

磁気機能性流体の種類
1. 磁性流体(Magnetic fluid, MF)
2. 磁気粘性流体(Magneto-rheological fluid, MRF)
3. 磁気混合流体(Magnetic compound fluid, MCF)

磁気機能性流体を用いた精密研磨加工を行うためには,
1. 流体の特性と応用について理解する必要がある.
2. 加工の原理とメカニズムを知ることが重要である.

磁気機能性流体の種類と主な特徴

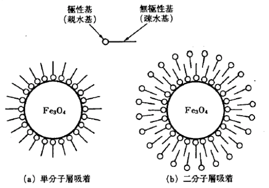
	磁性流体（MF）	磁気粘性流体(MRF)	磁気混合流体(MCF)
母 液	水，ケロシン	水，ケロシン，シリコーンオイル	水，ケロシン
分散粒子	マグネタイト（粒子径nmオーダー）	鉄粒子（粒子径μmオーダー）	マグネタイト+鉄粒子
磁場中での流動性	あり	乏しい	あり
長 所	分散粒子が沈降しない	磁場を加えたときのみかけの粘度の上昇が大きい	2つの流体の混合割合によって機能を調整できる
短 所	磁場を加えたときのみかけの粘度の上昇が小さい	分散粒子が沈降しやすい	
スパイクの形状と特性	規則正しい形状	不規則な形状	細長く弾力性を有する

Ⅰ.1　磁性流体(MF)の特性

1965年にDr.S.S.Papell (NASA)によって開発された(1).

特性
1. 10nmオーダの強磁性微超粒子が一様分散しているコロイド溶液.
2. 超微粒子が界面活性剤(オレイン酸)で被覆されているため分散安定性に優れている.
3. 超常磁性を持つ.
4. 電気伝導度小さい.
5. 流体本来の機能を持つ.

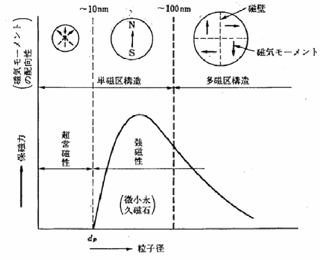
MFのスパイク



(a)オレイン酸分子の親水基がマグネタイト粒子に化学的に吸着(ケロシンベースMF).

(b)オレイン酸の層が2層のとき，2層目のオレイン酸分子の親水基が溶媒に溶け込んでいる(水ベースMF).

微粒子の磁気的性質(2)
1. 100nmより大きい場合：多磁区構造
2. 10nm～100nmの場合：単磁区構造．外部磁場を取り除いても磁化したままとなる(永久磁石).
3. 10nmより小さい場合：磁気モーメントが熱運動により自由に回転して，安定な磁化の志向性を持たない(保磁力が零の超常磁性).



粒子径による磁気的性質の変化

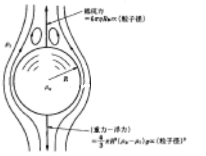
MFの種類
1. 酸化物磁性流体
   (分散質Fe_3O_4など，ケロシンベースMF, 水ベースMF)
2. イオン性磁性流体(正あるいは負イオンを添加して強磁性微粒子を分散させたもの．界面活性剤なし．電気二重層による反発力を利用)
3. 金属磁性流体(分散質Feなどで飽和磁化が大きい．空気中で金属微粒子が酸化するため，窒素ガス中などで使用する)

粒子の沈降について
1. 分散粒子は沈降しない．沈降時間は，ストークス抵抗を用いて計算できる．沈降時間は粒子径の2乗に反比例する.
2. 超微粒子は，回転ブラウン運動，溶媒の粘性の影響が大きい.

ストークスの抵抗則を用いた計算による粒子の沈降速度(2)

粒子径 (m)	沈降速度 (m/s)	所要時間†
10^{-5} (=10μ)	2×10^{-4}	50 秒
10^{-6} (=1μ)	2×10^{-6}	1 時間 23 分
10^{-7} (=0.1μ)	2×10^{-8}	5.8 日
10^{-8} (=0.01μ)	2×10^{-10}	580 日

† 所要時間は 1 cm の区間を沈降するのに要する時間である.

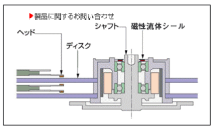


応用[4, 5]

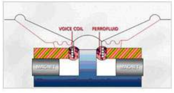
1. 見かけの粘度の増加を利用
2. 磁気圧力の利用→研磨に利用[MF研磨のところで説明]

回転軸のシール	真空，ガス，ダスト，ミストシールなどにおいて使用
ダンパー	磁性流体が磁場中で粘度増加を示す現象を利用
スピーカー	ボイスコイルのダンピングと流体による放熱効果を利用
センサー	変形自在性と磁気特性を利用
比重差分離	磁性流体が磁場中で見かけの比重を増加させる現象を利用

ハードディスクへの応用
　磁性流体をシールに用いて防塵対策，静電気対策に効果を発揮している．



スピーカへの応用
　磁性流体をエアーギャップ(磁気空隙)に注入して，センタリング効果，放熱効果、ダンピング効果を発生している．



Ⅰ.1の参考文献
(1)S.S.papell U.S.Patent, No.3215572(1965)
(2)神山進一，磁性流体入門，1989，産業図書．
(3)武富荒，近角聡信，磁性流体−基礎と応用−，1985，日刊工業新聞．
(3)株式会社フェローテック，製品情報．
(4)株式会社シグマハイケミカル，技術情報．

Ⅰ.2　磁気機能性流体(MRF)の特性

1940年に J.Rabinow によって開発された[1]．

特性[2]

1. 数μmオーダの強磁性粒子のけん濁液．
2. カンボニール法で得られた数μmに粒度をそろえた球状金属鉄粒子を界面活性剤で被覆して，あるいは，界面活性剤を添加したシリコーン輸液中に分散している．
3. 磁場の印加により，降伏応力を持ち，流動性がなりなり，見かけ上，固体のように なる．
4. 応答速度は，数msである．
5. 見かけの粘度は，105〜106倍になる．
6. せん断応力の変化は，100kPaになる．
7. 体積濃度は，30〜50 vol.%で使用．

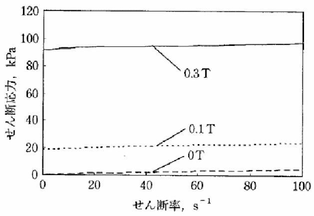
流動曲線(粘度特性)

•ビンガム流動となり降伏値を持つ．

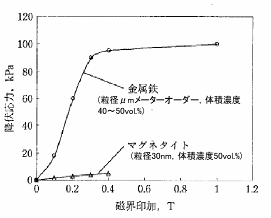
•流動性がほとんどない．

降伏応力

•分散粒子の磁化が大きいほど降伏応力が大きい．

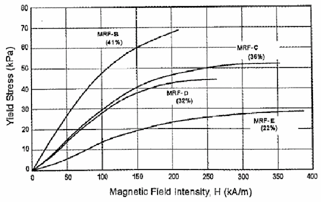


MRFの流動曲線(Load Co.)[3]



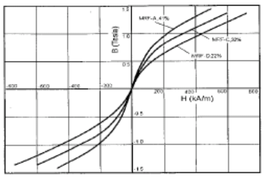
MRFの流動曲線[3]

ロード社のMRFデータ[4]



磁束密度と降伏応力の関係

•濃度が大きいほど降伏応力は大きくなる．



磁化特性

•濃度が大きいほど飽和磁化は大きくなる．

MRFの降伏応力

$$\frac{\tau}{\mu_0 M_p^2} = f(\alpha)$$

τ：降伏応力，M_p：強磁性粒子の磁化，α：強磁性粒子の体積分率

同じ体積濃度で分散させた場合，
粒子径小さいと降伏応力は減少する．しかし，分散安定性は増加する．

MRFの磁気クラスタ

体積濃度　15vol.%では有限の長さの鎖構造となり，30〜40 vol.%では粒子配向状態は，粉体，流動層に近くなる．

応用

1. 降伏応力の増加を利用→研磨に利用[MRF研磨のところで説明]
2. 見かけの粘度の増加を利用

ダンパ，ショックアブソーバ，ブレーキ，クラッチ，研磨に応用

•ダンパは車両や土木・建築分野に採用されている．
•自動車の1次サスペンション用ショックアブソーバに採用されている．
GM社キャデラック Seville，Corvette
ビュイック Lucerne
フェラーリ 599GTB
アウディ Coupe TT
HSB(オーストラリア)
北米ホンダ アキュラブランド(SUV)

Ⅰ.2の参考文献
(1)J.Rabinow, AIEE Trans.，67(1948),1308
(2)谷順二，インテリジェント材料・流体システム，コロナ社，1999.
(3)島田邦雄，機能性流体力学，機械の研究，2008.
(4)出頭茂，MR流体とその応用，日本フルードパワーシステム学会誌，Vol.32，No.2，2007，96-100.

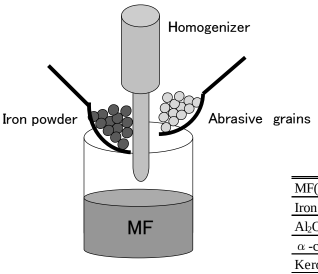
Ⅰ.3 磁気混合流体(MF)の特性

2001年に島田邦雄によって開発された[1].

特性

1. MFとMRFを混合した流体(MFに鉄粒子を分散した流体).
2. 磁性粒子とマグネタイト粒子からなるけん濁液．
3. 分散粒子の沈降速度が遅い.
4. 磁気クラスタは細長く，弾力性を持つ.
5. 磁場印加時においても流体の機能を持つ.

MCFの製法



MCFの成分例

MF(EXP.01052)	39.2 wt.%
Iron powder(1.2μm, HQ)	30.4 wt.%
Al_2O_3 abrasive(3μm)	20.0 wt.%
α -cellulose	6.4 wt.%
Kerosene	4.0 wt.%

･磁気クラスタの補強が必要であれば，α-セルロースを追加する.
･流動性を増加する必要がある場合には，ケロシンを追加する.

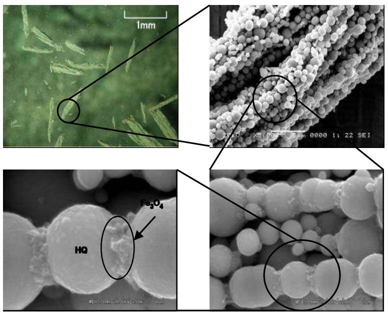
磁化特性

･飽和磁化は鉄粒子が含まれるので，MFより大きい.
･MRFと比べるとマグネタイト粒子が混在した分だけ飽和磁化は小さい.
･残留磁化はMFより大きい.

粘度特性

･MFの種類，磁性粒子の種類，濃度，直径，磁場強度，磁場方向により異なる.
･磁気クラスタと流れの方向によって異なる.
･応用機器に合わせた粘度特性を持つ流体が作成できる.

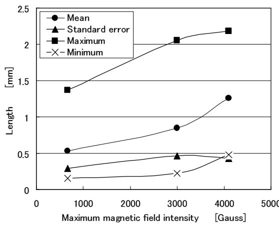
磁気クラスタ[3]

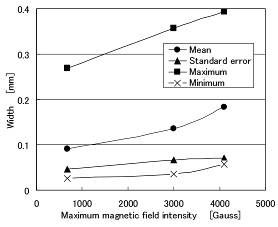


カーボニル鉄粉：20g，水ベースMF(35wt%)：10cc，オレイン酸Na：1g，水：14.6g から成るMCFから抽出された磁気クラスタ（左上図は60倍の実体顕微鏡，右上図は5000倍のSEM，下左図は50000倍のFESEM，下右図は20000倍のFESEMによる）

•マグネタイト粒子が鉄粉同士を結合させる役目を果たしている.

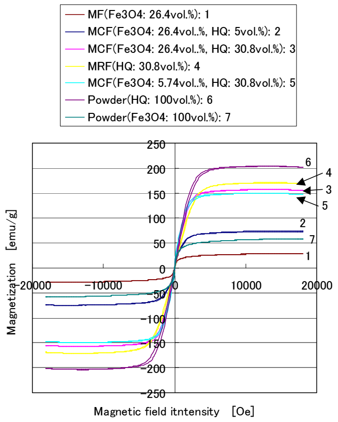
MCF磁気クラスタの長さと太さの特性





･MCF磁気クラスタは磁場を取り除いても一定時間形状を保持している.
･崩壊しても同じ磁場強度を印加すると再び同じ大きさの磁気クラスタを形成する.
･磁気クラスタの大きさは磁場強度によって決定される.

磁化特性におけるMF，MRFとの比較



応用

1. 磁気圧力の利用→研磨に利用[MCF研磨のところで説明]
2. 降伏応力の利用→研磨に利用[MCF研磨のところで説明]
3. 見かけの粘度の増加を利用

研磨やダンパーに応用

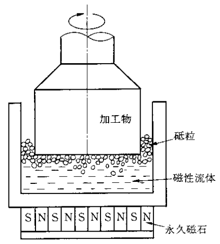
FDK㈱が研磨キットを開発・販売

Ⅰ.3の参考文献
(1)島田邦雄，他4名，MCF(磁気混合流体)の流体力学的特性と磁化特性，日本機械学会論文集(B編)，Vol.67, No.664 (2001), 3034-3040.
(2)BASFジャパン，技術資料.
(3)島田邦雄，機能性流体力学，機械の研究，2008.

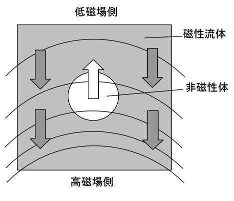
Ⅱ 磁気機能性流体を用いた研磨の基礎

Ⅱ.1 MFを用いた研磨

a. 研磨方法と原理[1]



研磨の原理



磁気圧による砥粒に働く力(浮力)

磁気圧力[2]

磁場作用下におけるベルヌーイの式(磁気圧エネルギーの付加)

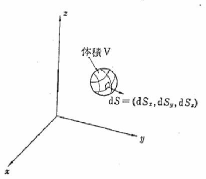
$$\frac{1}{2}\rho u^2 + \rho g z + p - \mu_0 \int_0^H M dH = const.$$

u:流体の速度，g:重力加速度，z:基準面からの高さ

物体に働くz方向の力(浮力)は以下のようになる.

$$F_z = -V\frac{\partial p}{\partial z}$$

この式にベルヌーイの式を代入すると，浮力が求まる.



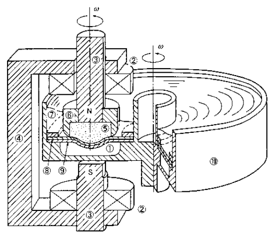
MF中の体積Vの物体

$$F_z = \rho g V - \mu_0 M \frac{\partial H}{\partial z} V \quad = \left(\rho - \frac{\mu_0 M}{g}\frac{\partial H}{\partial z}\right) g V$$

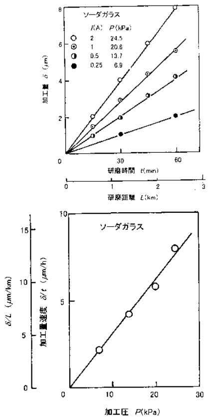
$$= \rho' g V$$

磁場勾配によってみかけの密度が変化する. 銅でもMFの表面に浮くようになる.

b. 研磨特性[3]



①磁性流体，②コイル，③磁極，④支柱，⑤加工物，⑥ジグ，⑦研磨剤，⑧ポリシャ，⑨ゴムシート，⑩研磨盤

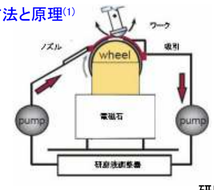


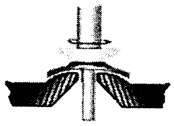
•加工量は，研磨時間，研磨加工圧に比例しており，加工特性が安定している.

Ⅱ.1の参考文献
(1)神山進一，磁性流体入門，1989，産業図書.
(2)武富荒，近角聡信，磁性流体-基礎と応用-，1985，日刊工業新聞.
(3)庄司克雄監修，超精密加工と非球面加工，NTS，2004.

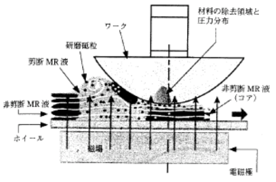
Ⅱ.2　MRFを用いた研磨

a. 研磨方法と原理(1)

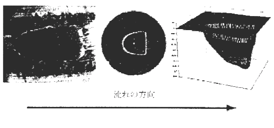




研磨装置



研磨モデル



Spot(単位時間当たりの研磨率)形状

MRF研磨量の予測(2)

Binghamの潤滑理論を用いた接触面のせん断応力分布は以下のようになる．

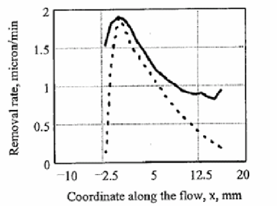
$$\tau_{xy} = \frac{dP}{dx}\frac{y-h(x)}{2} - \frac{\eta_0 U}{h(x)} - \tau_0(H)$$

Prestonの研磨物質の除去速度は以下のようになる．

$$R = kPU = k\frac{L}{S}U = k\frac{F}{\mu S}U = k\frac{\tau U}{\mu} = k\frac{\dot{W}}{\mu}$$

ここで，dP/dxは圧力勾配，$h(x)$はギャップの間隔，Uは壁の速度，$\tau_0(H)$は磁場印加による降伏応力，kはPreston定数，$\dot{W}$は仕事速度，μは摩擦係数，τは表面せん断応力．

2つの式を用いて，研磨位置における研磨物質の除去が推定できる．



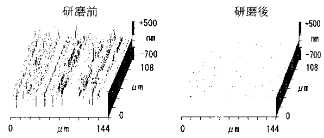
除去量の予測結果

---

b. 研磨特性

非球面創生研磨と非球面の修正研磨が可能．表面粗さは，ほとんどの材料に対して5Å rmsを達成(1)．

微細研削痕の除去にMR流体研磨法を適用して有効性が確認されている(3)．

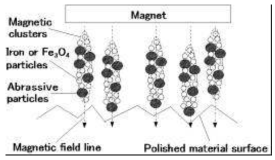


#1200砥石による研削面と研磨後の表面状態(98%以上除去された)

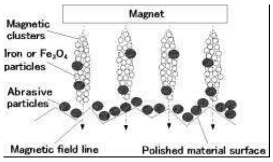
Ⅱ.2の参考文献
(1)久米保，磁気粘性(MR)流体を用いた研磨装置，精密工学会誌，Vol.72，No.7(2006)，pp.830-833.
(2)W. Kordonsky and D. Golini: Progress Update in Magnetorheological Finishing, *Proc. 6th Int. Conf. on ERF, MRF and their applications*, (1997), 837-844.
(3)郭泰洙，ほか，ELID研削法と磁気研磨法を組み合わせたナノレベルの鏡面加工法の開発(第一報：超鋼合金の鏡面仕上げにおける加工能率と表面品位の向上)，砥粒加工学会誌，49, 2(2005)，pp95-98

Ⅱ.3　MCF研磨

a. 研磨方法と原理(1)(2)



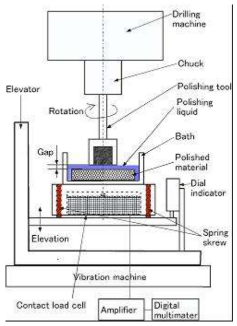
弾力性のある磁気クラスタ内に保持された砥粒が加工面に接触することによる研磨モデル．



磁気クラスタの外に多くの砥粒が存在し，磁気クラスタによって加工面に砥粒が押し付けられることによる研磨モデル．

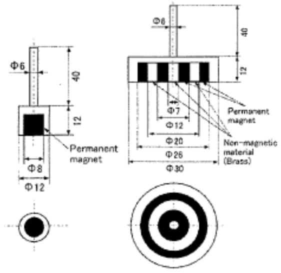
・MCF研磨は2つの研磨モデルの組み合わせと考えられる．
・砥粒は磁気クラスタに緩やかに保持されると考えられ，埋め込まれたような状態である．
・磁気クラスタは弾力性のある工具と考えられるので，ポリシング加工に近いと考えられる．

MCF研磨装置の概要(3)

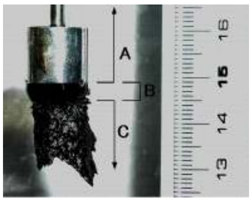


研磨装置3D-MNPS1(FDK製)の構造と概観

MCF研磨工具の概要

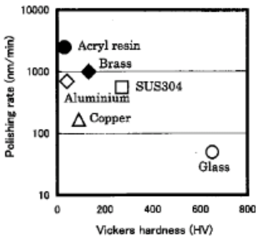


永久磁石が埋め込まれた研磨工具



MCFが付着した研磨工具の概観

b. 研磨特性[4]



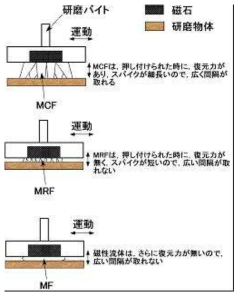
材料硬さと研磨スピード

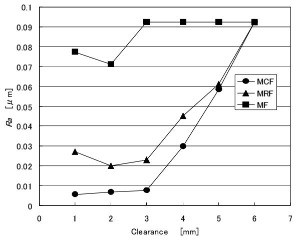
Material	Before polishing (Ra／nm)	After polishing (Ra／nm)
Acryl resin	210	10
Brass	74	8
Copper	21	7
Aluminium	95	11
SUS304	320	3
Glass	780	14

研磨前後の表面粗さ

·微小切削除去作用の特性を示す.
·加工の表面粗さは，ほとんどの材料に対して10nmを達成.

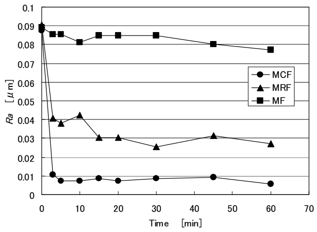
b. MF研磨，MRF研磨，MCF研磨の違い





各種磁気機能性流体研磨における間隔に対する表面粗さの変化

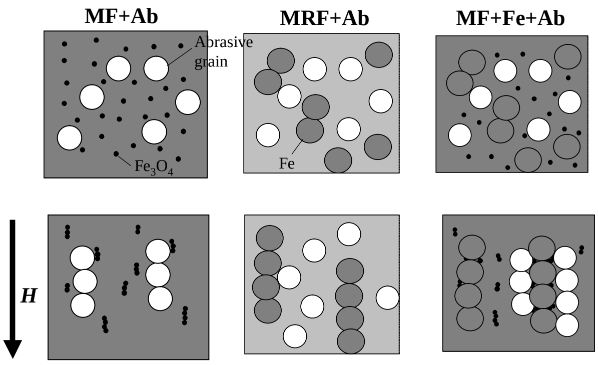
·MCF研磨は他の研磨法より間隔を広く取ることができ，表面粗さも優れている.



各種磁気機能性流体研磨における表面粗さの比較

·MCF研磨の表面粗さは他の流体研磨より優れており，レベルはナノメータオーダーである.

各種磁気機能性流体中の砥粒の分散状態



砥粒がクラスタを形成する　鉄粉がクラスタを形成する　鉄粉がクラスタを形成し，それに砥粒のクラスタが付着する

各種磁気機能性流体の研磨に関わる要素の比較(まとめ)

	MF	MCF	MRF	
磁気圧力	大	中	なし	鉄粒子が多いほど低下する
磁気吸引力	小	中	大	磁性粒子の量に依存する
せん断応力	小	中	大	
磁気クラスタ	極小	長い	中	

Ⅱ.3の参考文献
(1)島田邦雄，機能性流体力学，機械の研究，2008.
(2)赤上陽一，島田邦雄，粒子分散型混合機能性流体及びそれを用いた加工法，特許第4141634号.
(3)FDK株式会社，技術資料.
(4)松尾良夫，ほか，MCFを用いた3次元ナノレベル研磨，Journal of the Magnetic Society of Japan，Vol.31，No.1，2007，12-16.