The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

学術論文

MR流体シールの開発

Seals for MR Fluid

高橋 則昭 (群馬大学院) Tjahjo PRANOTO(群馬大学院)
長屋 幸助 (群馬大学) 戸上 和幸 (群馬大学)
久米原 宏之 (群馬大学) 荻原 治夫 (ビスコドライブジャパン)

Noriaki TAKAHASHI
Tjahjo PRANOTO
Kosuke NAGAYA Member
Kazuyuki TOGAMI
Hiroyuki KUMEHARA
Haruo OGIHARA

This paper provides a MR fluid seal for a rotating shaft. The seal consists of permanent magnet and stainless steel shaft., in which the shaft is inserted in ring magnets with an appropriate air gap. In this seal, when an air gap is large, seal pressure is small, but when the air gap is small, frozen MR fluid due to the magnets damages the shaft. The seal pressure, torque loss, and surface roughness for the shaft under the seal is investigated, and the appropriate air gap is presented.

Key Words: Magnetic seal, MR fluid, Rotating shaft, Seal pressure, Torque loss, Surface roughness.

1 緒言

MR流体は磁気の作用下で固まる性質があるので，この性質を利用してアクティブダンパ [1] への応用が考えられている．また，近年著者らはスリットのある板を多数積層し，その中にMR流体を充填してスリット間のせんだん力を得るリニアダンパ [3] およびスリットを多数有する円板を積層して抵抗トルクを得るビスカスカップリング [4]，[5] を開発した．これらの装置では，軸の間からのMR流体の漏れを無くしなければならなので，シールが必要である．MR流体には，数 μ m サイズの比較的大きな鉄粉が油のなかに分散されたもので，通常のシールを用いた場合は，MR流体がシール内に入り込み，シール内面を鉄粉が研磨するため，シールが破壊される．このため，通常のシールをMR流体のシールとして使用することはできない．著者らはMR流体を用いたビスカスカップリングを開発したが，回転数50rpm程度で数十時間用いただけで通常のシールが破れた．このようにMR流体を用いた機器には，MR流体をシールする技術が必要である．磁性流体を用いたシールに関しては，数多くの研究がなされている [6]-[27]．しかし，MR流体についてのシール技術は，MR流体を用いる機器に必須であるにもかかわらずまったく研究がなされていない．
本研究では，MR流体シールとして，永久磁石を用いてMR流体をシールすることを考え，その基礎的研究を行ったものである．

2 磁石によるMR流体シールの原理と実験装置

MR流体は磁場作用下で固まる性質があるので，軸のシールを考えた場合，軸より若干大きなリング状の

連絡先: 長屋 幸助, 〒376-8515, 桐生市天神町 1-5-1, email : nagaya@me.gunma-u.ac.jp

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

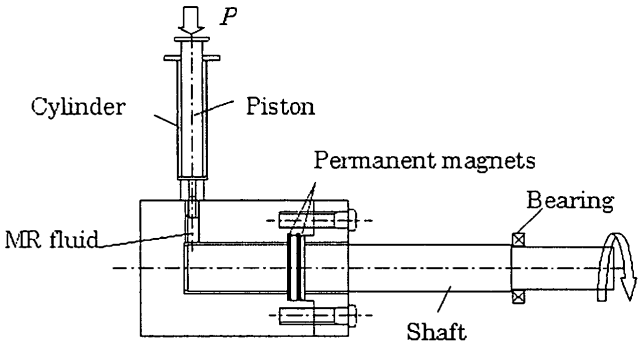


Fig. 1 Experimental apparatus.

磁石を軸にはめ込めば，磁石の部分でMR流体がシールされる．このとき，軸を鋼製にすれば，磁石からの磁束は軸に向かうので，磁石部分とその外側で大きな磁束勾配が得られるので，シール圧も大きくなる．しかし，軸が回転すると，MR流体の鉄粉が軸に吸引された状態で回転させられるため，軸が鉄粉でこすられ摩耗する．このため，鋼製の軸を用いることはできない．本研究では，軸材として，ステンレス(SUS304)を考え，それにリング状の磁石をはめ込むことを提案する．このような構成とすると，MR流体は磁石側に吸着され，軸には直接吸着されないので，軸に摩耗を与えずにシールを行うことができると考えられる．ただ，このときも環状磁石と軸の間のギャップが小さいとシール圧は大きくなるが軸が摩耗し，ギャップが大きいとシール圧が小さくなる．また，軸に回転を与えた場合，軸に付着したMR流体が軸と一緒に回転するため，MR流体の鉄粉同士の付着を壊すことになるので，シール圧は減少するものと思われる．本研究では，これらの観点から，回転数も考慮した軸と磁石の最適な間隙を実験的に検討する．

Fig.1は本実験に用いた実験装置の概要を示したもので，ジュラコン製(非磁性高分子材料)の円柱に直径30mmのめくら穴を堀り，端部に直径34mmの段をつけた軸支持円筒を作った．この段の部分に永久磁石2枚を挿入する．2枚の永久磁石はN極とS極が向き合うように配置され，その間に外径38mm，内径30mm，厚さが1mmあるいは3mmの鉄製円環が挿入されている．鉄製円環を入れたのは，磁気シールの部分を長くし，シール効果を同じ磁石であげることができるかどうか検討するためである．上記円筒の端にねじを切り，段の付いたジュラコン製の蓋で磁石をボルトで固定した．この中にアルミニウム製の軸を挿入し，他端を軸受で支え，モータをつけて回転できるようにした．ジュラコン製の円筒の穴の端部にねじ穴をあけ，MR流体の入れられた注射器の先端から軸とジュラコン円柱の穴の隙間にMR流体を注入できるようにしてある．この装置で注射器のピストンに荷重をかけて動かすと，MR流体が軸とジュラコン円筒の穴の隙間に充填され，環状永久磁石のところでMR流体が固められてシールされる．しかし，磁石によるシール圧より，MR流体の圧力が大きくなると，流体が漏れ出す．したがって，流体の漏れ始めたときの圧力がシール圧となる．

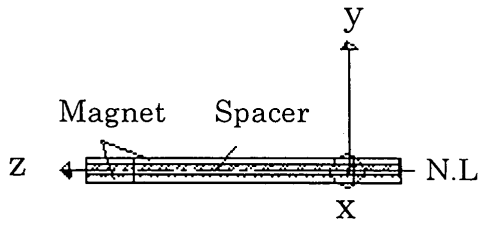


Fig. 2 Coordinate for the magnetic flux densities.

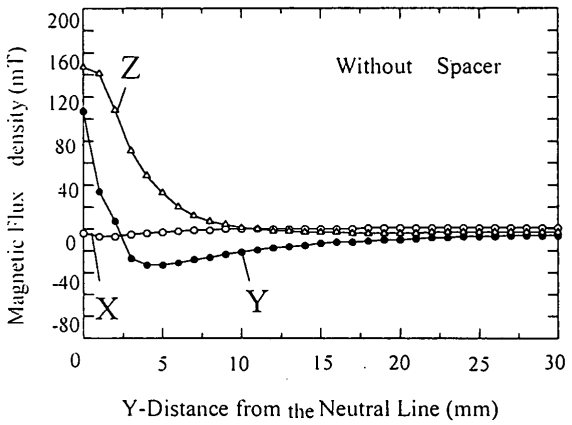


Fig. 3 Magnetic flux density distribution when two magnets are pasted (without spacer).

3 磁気シール圧

3.1 磁束密度

Fig.1のように取り付けられた永久磁石による磁束密度分布をまず計測した．座標は環状磁石の内壁に原点をとり，Fig.2のような座標系に対して，軸方向(y方向)にセンサーを移動して磁束密度を計測した．得られた結果をFig.3およびFig.4に示す．

Fig.3は永久磁石2個をスペーサーを介さずに貼り付けたもので，この場合の磁束密度は軸方向に一様に

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

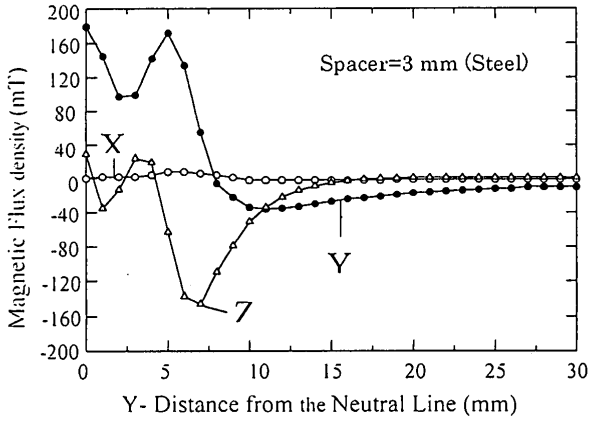


Fig. 4 Magnetic flux density distribution when the spacer thickness is 3mm.

減少している．一方，3mm の鉄環のスペーサーをふたつの磁石の間に挟んだ場合は，y および z 方向磁束密度が軸方向に激しく変動していることがわかる．

3.2 実験装置の諸言

用いた MR 流体は，ポリアルファオレフィンをベースとし，それに粒径約 3 μ m の純鉄を分散させたものである．上記実験装置を用い，軸径 28mm(磁石内面と軸表面とのギャップ= 1mm)，29mm(ギャップ= 0.5mm)，29.5mm(ギャップ= 0.25mm) の三つのアルミニウム製の軸を作り，シール圧の実験を行う．このときの諸元を Table1 に示す．実験は Table1 のように，3 種類の軸径 (A，B，C) と 3 種類のスペーサー長 ((1)，(2)，(3)) の合計九つの組み合わせに対してなされた．

3.3 シール圧

まず，Table1 の A(1)，(2)，(3)(上記 2 枚の磁石を吸着させ，鉄環を挟まない場合) の実験を行った結果を Fig.5 に示す．図中縦軸がシール圧であり，横軸が軸の回転数である．図より，軸径が大きいと，磁石と軸の隙間が小さくなるので，空隙磁束密度も大きくなり，シール圧は当然のことながら大きくなる．また，軸回転数が大きくなると，シール圧も減少し，軸の回転が無いとき，0.9MPa～1.3MPa もあったシール圧が 250～500rpm でほぼ零になっている．このことから，磁気力を用いた本シールは高速でのシールには向かないことがわかる．ただ，MR 流体のビスカスカップリングの差動回転数は，定常的な使用では，0～50rpm であり，50rpm では，0.5～1MPa のシール圧を有するので，このカップリングのシールとして使用できる領域にある．

Table 1 Dimensions of shaft and magnet.

	A	B	C
Inner radius of cylinder [mm]	30	30	30
Shaft radius[mm]	28	29	29.5
Air gap [mm]	1	0.5	0.25
Inner radius of magnet [mm]	30	30	30
Outer radius of magnet [mm]	38	38	38
Magnetization strength [T]	0.8	0.8	0.8
(1) Spacer [mm]	0	0	0
(2) Spacer [mm]	1	1	1
(3)Spacer [mm]	3	3	3

次に同じ磁石を用いて，2 枚の磁石の間に鉄環を挿入し，磁気シールの部分を長くした実験を行ってみた．軸径が 28mm のときの実験結果を Fig.6 に示す (Table1 の A-(1)，(2)，(3) の場合)．図から，スペーサーが 1mm のときは，スペーサーが無いときよりシール圧が小さくなっている．しかし，スペーサーが 3mm と大きくなったときは 1.3MPa と大きなシール圧となる．しかし，回転数が 100rpm でシール圧はほぼ零になる．

4 シールによるトルク損失

MR 流体を磁気でシールしたとき，シール部分を MR 流体で固めてしまうので，軸と固められた MR 流体との間で摩擦が発生し，トルク損失が起こる．上記実験装置でモータと軸の間にトルク計を取り付け，トルク損失を計測した．その結果を Fig.7 および Fig.8 に示す．Fig.7 はスペーサーが無いときの実験結果 (Table1 の A(1)，B(1)，C(1)) であるが，このときの摩擦損失トルクは，0～0.7 N・m であり，回転数とともにトルクが増大し，250rpm 程度の軸回転数でほぼ一定の値に飽和する．当然のことであるが，軸径が小さいほど，すなわち磁石と軸のギャップが小さいほど損失トルクは大きい．とくに，軸径が 28mm の A の場合 (磁石と軸のギャップが 1mm) は，50rpm までは，ほと

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

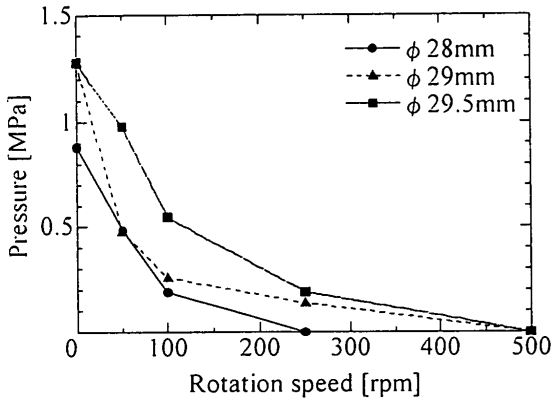


Fig. 5 Seal pressure for the magnetic seal.

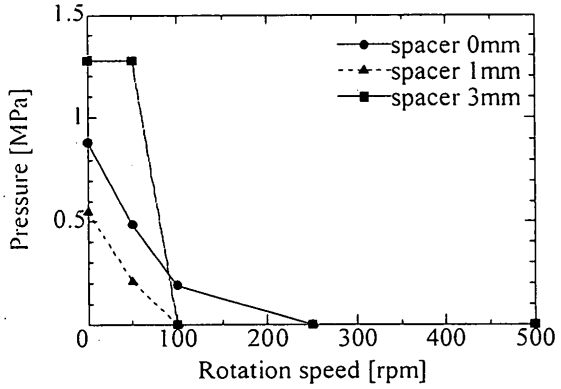


Fig. 6 Seal pressure for the seal with the iron spacer.

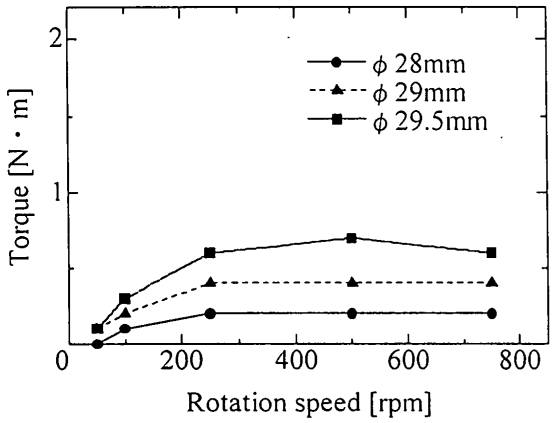


Fig. 7 Torque loss due to the seal without spacer.

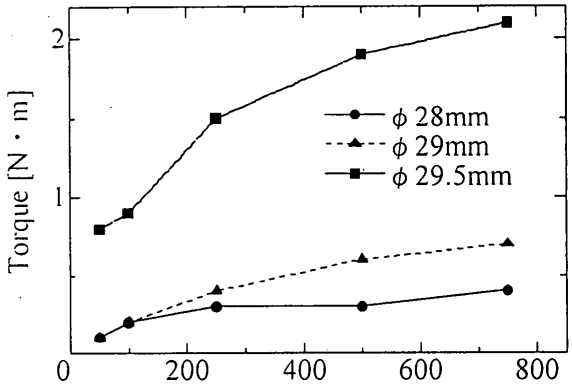


Fig. 8 Torque loss due to the seal with the iron spacer.

んどトルク損失が無いと言うことが特徴的である．トルク損失が小さいと言うことは，とりもなおさずMR流体シール部の熱損失が小さいことを示しており，この場合の軸の温度は50 ℃以内に抑えられる．

Fig.8は3mmの鉄環のスペーサを磁石間に挿入したとき ((3) の場合) のトルク損失を示す．図から鉄のスペーサーを挿入したときの損失トルクは，スペーサーが挿入されていないときに比べかなり大きくなることがわかる．

鉄環の挿入により磁気を帯びた部分が4mmから7mm(磁石厚＝2mm×2 ＋ 3mm) と長くなった訳であるから，1.7倍程度のトルク損失があるのは当然であるが，本実験結果は必ずしもそうはなっていない．例えば，軸径が29.5mmのとき (Bの場合)，スペーサーがないときの最大トルク損失は0.7 N・mに対し，スペーサーを挿入したときのそれは2 N・mに達しており (約3倍)，その傾向も異なる．このことは，上記で考察したように，永久磁石を直接並べたときは，磁気シール部の軸表面上でMR流体を通るほぼ一様な磁束が得られるのに対し，鉄環を使用したときは，磁束が一様ではなく，MR流体の固まり具合が一様とならず，また，軸表面で固まったMR流体が軸に押しつけられて摩擦が大きくなるためと考えられる．また，このときのシール部の熱発生は70 ℃以上となる．したがって，MR流体のシールに鉄環を用いてシール長を増加する方法は必ずしも適当でないといえる．

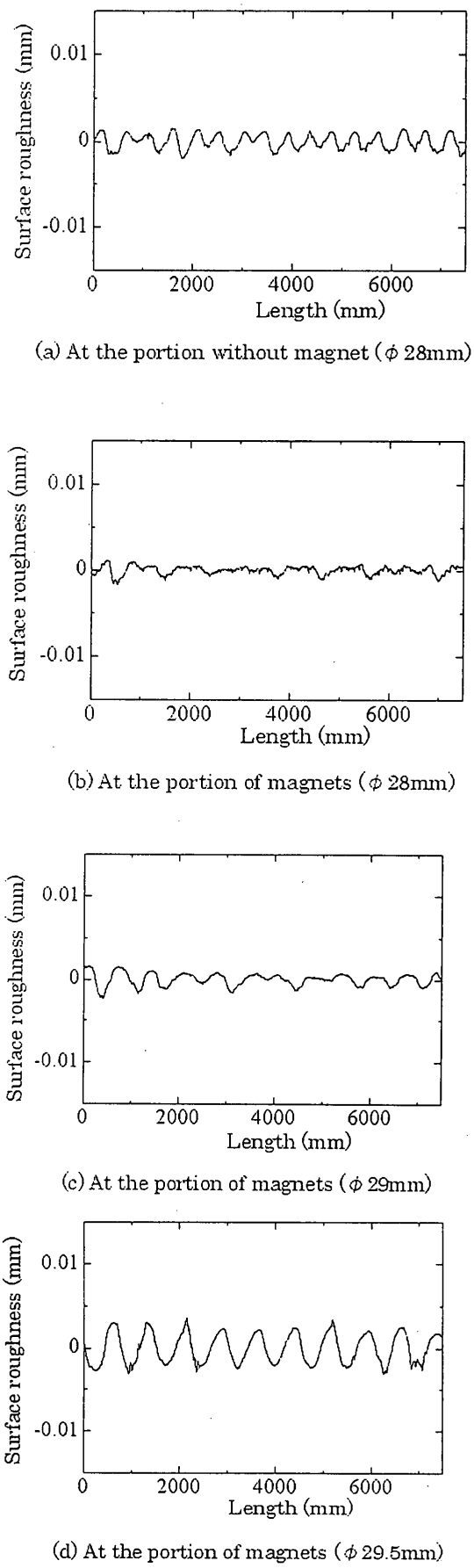
NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

5 軸表面の損傷と摩耗

MR 流体のシールを磁気によって行うと，そこで MR 流体が固まるので，固まった MR 流体と軸とが摩擦し，軸を損傷させたり，摩耗を促進し，その結果軸の寿命を短くする恐れがある．そこで，磁気シールによる損傷の度合いを検討し，最適なギャップ等を検討する．本実験では，3 種類の軸 (Table1 の A，B，C) を Fig.1 に示される実験装置に組み込んで上記の実験を完了した軸を取り出し，3 次元表面粗さ測定装置でその表面を観察した．このとき，ひとつの軸に対して与えた回転時間は，各軸により若干異なるが，約 1 時間程度である．Fig.9 は種々の条件における軸の長手方向の表面粗さを測定したものである．Fig.9(a) はシールの実験を行う前の軸の表面粗さを，Fig.9(b) は軸径が 28mm(A) の場合の磁気シール部の表面粗さを，Fig.9(c) は軸径が 29mm(B) のときの磁気シール部の粗さを，Fig.9(d) は軸径が 29.5mm(C) のときの磁気シール部の表面粗さをそれぞれ示したものである．この図で実験に用いた軸は旋削により仕上げられているので，もともと 2 μ m 程度の振幅の粗さが存在する．それが直径 28mm の軸の場合は，磁気シール部で軸表面が研磨され，粗さが 1 μ m 程度まで一様な表面にならされている．しかし，軸径が大となると，磁石と軸の間隙が減少するため，MR 流体の鉄粉と軸の摩擦が大となり逆に粗さが大きくなり，軸径が 29.5mm のときは，粗さの振幅が 4 μ m 程度まで大きくなっている．これらの図から軸にダメージを与えないという観点からは，磁石と軸のギャップは 1mm 程度が最適といえる．ついで，軸表面の損傷を観察するため，3 次元表面粗さ測定装置で得られたデータを基に，微分濃淡法を用いて丸軸の表面を平面的に表した図を Fig.10 に示す．図から，磁気シール部の損傷がもっとも小さいのは軸直径が 28mm(A) のときであることがこの図からも分かる．なお，軸先端の磁気の無いところの図も示しているが，このときの軸の損傷はかなり激しい．軸先端は特に支持されていないためにふれ回りが大きく，MR 流体の鉄粉と軸が摩擦し，大きな損傷が生じたものと思われる．すなわち，軸を非磁性とし，その周りに適当なギャップ (本実験では 1mm) を作って環状磁石をはめ込むと，シール効果が得られるとともに，MR 流体と軸の摩耗もほとんど無くなる．

以上のシール圧，摩擦トルク，軸表面粗さ，軸表面



(a) At the portion without magnet (ϕ 28mm)

(b) At the portion of magnets (ϕ 28mm)

(c) At the portion of magnets (ϕ 29mm)

(d) At the portion of magnets (ϕ 29.5mm)

Fig. 9 Surface roughness for the shaft.

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

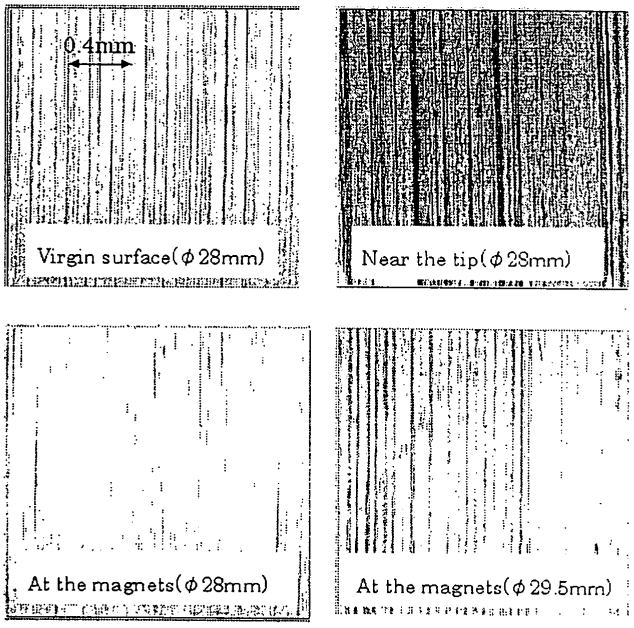


Fig. 10 Photo of the surfaces along the shaft.

観察等の検討より本磁気シールの最適な条件は，磁石と軸のギャップが1mmであり，かつ，一様な磁場を軸の長手方向に作ることでシール圧を大きくするのが良い．すなわち，環状磁石の厚みを増すことでシール圧を大きくする設計が良いといえる．

6 結 言

本研究はMR流体カップリングに用いられるMR流体の磁気シールに関する基礎的検討を行ったものである．その結論を要約すると次のようである．

(1) 軸を非磁性とし，その周りに適当なギャップを作って環状永久磁石をはめ込む構造のMR流体の磁気シールを開発した．

(2) 軸と磁石の間隙が小さすぎると，損失トルクが大きくなり，また軸を損傷させる．逆にこのギャップが大きすぎると，磁気シールの効果が薄れる．本実験では，1mm程度のギャップが最適であることが分かった

(3) 軸の回転数が大きくなると，磁気シールの効果が薄れる．しかし，ビスカスカップリング等で用いられる定常的差動回転数の範囲では必要なシール圧を有し，本シールが適用できることが分かった．

(2002年5月20日受付)

参考文献

[1] 古川，山田，中川，MR流体セミアクティブダンパの加振実験とその制振効果，電気学会リニアドライブ研究会資料，VOL.LD-98, NO.78-82.84-85, (1998)，pp.13-17.

[2] PAN.G, MATSUHISA.H, HONDA.Y，The Investigation on・magnetorheological Fluid and Its Damper，日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集，No.B，(1999), pp.407-410.

[3] Tjahjo.P, 長屋，細田，MR流体を用いたせんだん型リニアダンパの開発とそれによる平板構造物の制振，機論C編，68-667, (2002), pp.761-767.

[4] 長屋，田井，董風迎，村上，MR流体を用いた差動制限継手の開発，機論C編，67-658, (2001), pp.1973-1979.

[5] 長屋，須田，吉田，大橋，荻原，若松，MR流体を用いた4輪駆動車のトルク制御カップリングの開発，機論C編，68, (2002), 掲載予定.

[6] 神山，シールの理論と特徴，(7) 磁性流体シール，機械設計，42-3, (1998), pp.45-47.

[7] 菅野，磁性流体真空シール（特集1 過酷な使用環境に挑むシーリング材—各種耐久性を高めたシーリング材），工業材料，45-9, (1997), pp.54-57.

[8] 幸田，菅野，磁性流体真空シール，トライボロジスト，42-6, (1997), pp.442-447.

[9] 佐藤，磁性流体シール（特集・機能性流体とトライボロジー），トライボロジスト，41-6, (1996), pp.458-463.

[10] 三矢，富田，竹内，他，磁性流体シールのメニスカス形状とスプラッシング特性，機論，C編，62-593, (1996), pp.256-263.

[11] 北洞，磁性流体シールの耐圧特性とポンプへの適用，機論，B編，60-577, (1994), pp.3086-3092.

[12] 新居，磁性流体を用いた潤滑とシール技術の最新動向，トライボロジスト，38-3, (1993), pp.201-206.

[13] 長屋，大沼，佐藤，回転荷重を受ける磁性流体シールの粘性ポンピング作用の解析とそのシール設計，機論，C編，56-524, (1990), pp.963-970.

[14] 尾崎，磁性流体シール（機械要素の潤滑技術シリーズ），潤滑，33-12, (1988), pp.895-899.

[15] 鈴木，磁性流体シールとその応用，油圧と空気圧，18-5, (1987), pp.401-406.

[16] 吉村，磁性流体シールの特性と応用—完全ミストシールを中心に，工業材料，33-14, (1985), pp.89-93.

[17] 神山，磁性流体シール（メカトロニクスにおけるトライボロジー特集），潤滑，30-8, (1985), pp.619-622.

[18] 三宅，磁性流体シールの真空への応用，真空，28-6, (1985), pp.483-493.

[19] 佐藤，磁性流体シールとその応用，機械の研究，37-2, (1985), pp.253-259.

[20] 曽我，磁性流体軸シール（油圧と空圧緑陰特集号），油圧と空気圧，15-5, (1984), pp.395-398.

[21] 神山，磁性流体シールの基礎理論と実験（シールの理論と実際特集），潤滑，29-5, (1984), pp.379-382.

[22] 武富，磁性流体シールの原理と応用1，機械の研究，36-1, (1984), pp.18-22.

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

[23] 武富，磁性流体シールの原理と応用 2，機械の研究，36-2, (1984), pp.264-268.
[24] 佐藤，磁性流体シール，潤滑，28-6, (1983), pp.431-434.
[25] 関，吉田，中里，磁性流体シール（新素材にみるシール特性とその実際特集），工業材料，31-4, (1983), pp.60-64.
[26] 阪部，成宮，磁性流体の回転軸シールへの応用（実用期をむかえた磁性流体—その応用技術を探る）工業材料，30-7, (1982), pp.54-56.
[27] 尾崎，磁性流体のフライホイール用真空軸シールへの応用（実用期をむかえた磁性流体—その応用技術を探る），工業材料，30-7, (1982).

NII-Electronic Library Service