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*

三 矢 保 永^{*1}, 富 田 謙 二^{*2}
竹 内 薫^{*3}, 松 永 茂 樹^{*4}Meniscus Shape and Splashing of Magnetic Fluid
in Magnetic Fluid SealYasunaga MITSUYA, Kenji TOMITA,
Kaoru TAKEUCHI and Shigeki MATSUNAGA

Magnetic fluid splashing due to high-speed rotation of a seal ring was experimentally investigated in relation to gap length and magnetic field strength around the gap to be sealed. Meniscus shape deformation owing to fluid rotation was accurately observed by means of its silhouette shading laser light illuminated behind the meniscus. The deformation was found to occur in three stages. In the first stage, meniscus static width shrank, while meniscus rotating height remained nearly unchanged. In the second stage, these relations were reversed. Finally, abrupt total shrinkage occurred accompanied with splashing. Splashing initiation was found to strongly depend on the magnetic field gradient at the top of the rotating fluid. This provided a simple and useful parameter to determine the splashing initiation.

Key Words: Magnetic Fluid, Seal, Magnetic Fluid Seal, Splashing, Meniscus, Magnetic Field Analysis, Burst Pressure, Spindle Seal

1. ま え が き

磁性流体シールは磁気力により磁性流体をギャップ部に保持してシールを行うもので、非接触で完全なシールが可能のため、磁気ディスク装置や半導体製造装置の軸シールとして広く普及している。これを高速の回転軸シールに使用する場合には、遠心力による磁性流体の飛散(スプラッシング)が問題となる。スプラッシングを防止するためには、磁性流体の充てん量は少ない方がよいが、一方充てん量を少なくすると蒸発に伴う寿命や耐圧性能が劣化する。したがってスプラッシング特性の解明は耐圧性能・信頼性、およびスピンドルの高速運転性能に関連した重要な課題となっている。

磁性流体シールについては、これまで耐圧性能を中心に研究が進められ、ヨーク先端形状⁽¹⁾、段数⁽²⁾、磁場強度⁽³⁾との関係が実験的に明らかにされ、具体的な設計法も示されている⁽⁴⁾。しかし、スプラッシングは遠心力・磁気力・表面張力などを考慮する必要がある複

雑な自由表面問題であり、また加工・組立精度や材料の表面特性など多く要因が関連するため、研究の対象とされた例は少ない。著者らはこれまで磁気ディスク装置用の磁性流体シールについて、ギャップ部に形成される磁性流体のメニスカス形状とスプラッシングの開始速度との関係を明らかにしてきた⁽⁵⁾。しかし、スプラッシングが供試シールのヨーク表面の加工に沿って発生するなど精度が不十分であったこと、また磁場強さについては固定した条件での結果のみであったことなどに課題を残した。

そこで、本報告では表面粗さの影響を最小にするため、ヨーク表面をすべて研磨仕上げするとともに、はめあい精度・同心度を厳密に管理して精度を高め、またパラメータとして永久磁石の強さを3種類とギャップ部のクリアランスを3種類の合計9種類に増加してスプラッシング実験を行い、磁場強さや充てん量によって決まるメニスカス形状とスプラッシング開始速度の関係を明らかにした。また、これに基づいてスプラッシング発生の指標となる簡易なパラメータを導入した。

シールの耐圧性能については、ガラス管を用いた理想的な実験条件により、理論の妥当性が確認されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾が、構造をもつ実際のシールについて磁場解析

* 原稿受付 1995 年 5 月 29 日。

^{*1} 正員、名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)。^{*2} 正員、(株)日立製作所機械研究所 (〒300 上浦市神立町 502)。^{*3} 名古屋大学大学院。^{*4} 日本精工(株)総合研究所 (〒251 藤沢市鶴沼神町 1 5 50)。

側でのシール破断は生じない。回転速度は 10 パルス/回転の精度でフォトセンサで検出する。ギャップ部に形成される磁性流体のメニスカス形状を計測する方法として陰影法を用いる。これは平行光をメニスカスに照射し、その断面形状をシルエットとして観測する方法である。光源としては光学系を必要とせず平行光の得られるレーザ光を用い、不要な干渉を消すために回転する拡散板を挿入する。メニスカスのシルエットはマイクロスコプで 5 倍に拡大して CCD カメラで撮影し、VTR に記録するとともに、パーソナルコンピュータにデジタル画像として採取し、2 値化処理・境界線検出処理により磁性流体の自由表面形状を曲線として求める。またスプラッシング発生を静止像として目視観察するために、ストロボ光源を使用する。

2.1 装置構成

実験装置の概要を図1に示す。2個の転がり軸受に支持された円筒状のシリンダを垂直に設置し、外周でベルト駆動する。円筒回転体の下端に高耐圧の磁性流体シールを、上端に供試磁性流体シールを配置し、内部の空間をシールする。供試シールリングは内周において、シャフトピースとの間にギャップ部を形成し、ここに磁性流体を充てんする。シールリングとシャフトピースは交換可能で、それぞれシリンダ、シャフトにはめあい固定される。リング側が回転しシャフトピース側が静止である点が、一般のシールと異なる。内部の空間は中空軸を介して加圧器・圧力計と連結し、加圧器により所定の圧力を負荷する。シールの段数としては高耐圧用は4段、供試用は2段であり、高耐圧

試験に用いたシール

ギャップ部の磁束密度を変えるために、磁石の外径 D_m をパラメータとして S 形 ($D_m=60$ mm), M 形 ($D_m=64.5$ mm), L 形 ($D_m=69.5$ mm) の 3 種のシーリングを用いた。いずれもヨーク内径 ($d_y=40.3$ mm) は一定とし、ギャップ部のクリアランスはシャフトピースを交換することによって変えた。シャフトピースは外径をパラメータとして $D_s=40.0, 39.6, 39.2$ mm の 3 種を用いた。それぞれシーリングとの間のクリアランスは、 $C=0.15, 0.35, 0.55$ mm となる。耐圧性

Fig. 2 Experimental magnetic fluid seal structure and dimensions

やスブラッシング特性の実験精度としては、クリアランスの大きさとその円周に沿った均一性が重要である。そこで、シールリング、シャフトピースの係合部の寸法公差を図中に示すように厳密に管理した。

使用した磁性流体は磁気ディスクピンドル用のもの (NSK 製 TO 81 B) で、粘度 $0.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (200 cP ; 20°C での値) である。なお、磁気回路の構成要素の磁気特性については、第3章にまとめて示す。

2.3 実験方法 シールリングとシャフトピースを組み立てた後に、注入器を用いてヨークの表側より片側のギャップ部のみに磁性流体を直接注入した。これは片側のギャップ部に充てんする方が、実際にメニスカスの形成に寄与した量を正確に定量できるからである。シールリングとシャフトピースのわずかの偏心などのため、メニスカスは円周方向に沿って必ずしも均一にはならない。再現性を向上するため、シールリングとシャフトピースが同じ位置関係になるように分解・組立を行った。

まず耐圧性能を確認するため充てん量をパラメータとして、シリンダ内部を加圧していき、シールが破壊する圧力 (バースト圧力) を実測した。次に所定の充てん量に対して 200 rpm ごとにメニスカス画像をパーソナルコンピュータに採取し、画像処理によりメニスカス形状の変化を観測した。さらに種々の充てん量に対して、回転速度を次第に上昇させながらメニスカス画像を VTR に記録し、スブラッシングを観測したときに、その直前のメニスカスの大きさを測定した。なお、スブラッシング発生はメニスカスの最大値に依存すると考えられたため、一周のうちで最大となる位置でその大きさを測定した。

メニスカスはヨーク内周の表側と裏側に形成される。後述するようにヨーク内周の磁場分布は非対称であり、裏側の方が漏洩磁束が多いため、裏側のメニスカスの方が大きくなり、裏側の方から先にスブラッシングが開始すると考えられる。しかし、これを確認することはむずかしいため、表側においてストロボにより回転同期の静止像を形成し、回転速度を上昇させていき、ギャップ部からの磁性流体の流出を観測したときをスブラッシング開始点とした。

これ以前に裏側においてスブラッシングが発生した場合には、その分メニスカスが小さくなり、この条件において表側のスブラッシングを観測することになる。したがって表側のスブラッシング開始点では、裏側のスブラッシングによる磁性流体の減耗分が差し引かれているため、裏側のスブラッシングの影響は表面のぬれ分を除いて相殺されることになる。

3. 磁 場 解 析

実験結果を評価するためには、ギャップ部の磁場の強さを定量化することが必要である。ここでは境界要素法を併用した有限要素法を用いて磁場解析を行った。ギャップ部を詳細に解析するため、ギャップ部を含む 0.25 mm (ヨーク半径方向) $\times 0.48 \text{ mm}$ (シャフト軸方向) の矩形領域を 0.1 mm ごとに細密に分割し (この領域内の節点数 1274)、他方、磁束密度の低い領域は粗に分割し、全節点数は 2599 とした。また座標系は円筒座標系で、磁石については非線形、磁性材については線形とした。磁気回路を構成する材料とその磁気特性を表 1 にまとめて示す。ギャップ部の磁束密度は最小でも 0.2 T (2000 G) 程度であるのに対し、磁性流体の飽和磁束密度は 0.019 T (190 G) と小さいので、

Table 1 Magnetic fluid seal materials and magnetic features

Permanent magnet	Plastic magnet [Kawatetsu Mag. UF20D]
Residual flux density, B_r	0.404 T (4.04 kG)
Coersive force, H_c	0.274 MA/m (3.44 kOe)
Max. energy product, $(BH)_{max}$	(3.9 MGOe)
Magnetic fluid	Computer grade [NSK T081B]
Saturated magnetization, M_s	0.019 T (190 G)
Yoke and shaft piece	SUS 430
Permiability, μ	0.251 mH/m (200)

(a) $C=0.15 \text{ mm}$

(b) $C=0.35 \text{ mm}$

(c) $C=0.55 \text{ mm}$

Fig. 3 Typical calculation results of magnetic field (Type M)

Table 2 Calculated results of maximum magnetic flux in gap

Type \ Clearance (mm)	0.15	0.35	0.55
	S	M	L
S	0.5001	0.2732	0.1888
	0.5598	0.3759	0.2976
M	0.7284	0.3978	0.2748
	0.8154	0.5474	0.4332
L	0.9880	0.5391	0.3724
	1.1061	0.7419	0.5869

Unit: Tesla Upper: Shaft side: B_{gs}
 Lower: Yoke side: B_{gy}

磁場解析においては磁性流体は考慮しないこととした。

解析結果の例として M 形でクリアランス $C=0.15, 0.35, 0.55$ mm の場合の等ポテンシャル線図を図 3 (a), (b), (c) に比較して示す。ギャップ部ではギャップの表側と裏側では分布が対称ではなく、裏側の方が傾斜が緩やかであることがわかる。これよりメニスカスは裏側の方がより膨らむことが予測される。メニスカスの測定対象となるギャップの表側の磁場は、クリアランスが小さい場合には円弧状であり、クリアランスの増加とともに長円弧状になる。

バーストはギャップ内のシャフトピースに接する表面に沿って生じ、バースト圧力はこの表面上の最強磁場によって決まる。この磁場をギャップ最大磁場 H_{gs} 、その位置の磁束密度をギャップ最大磁束密度 B_{gs} とよぶことにする。ギャップ内の磁場は非対称であり、最強磁場はギャップの表側に寄った位置に存在する。9 種の組合せについて、ギャップ最大磁束密度 B_{gs} を求めた結果を表 2 の上段にまとめて示す。なお、下段は後に使用するヨーク内周表面上の最大磁束密度 B_{gy} である。

4. 耐圧性能の確認

供試シールに対する磁場解析結果の妥当性を確認するために、磁場解析から求めた耐圧性能を実験結果と比較する。耐圧性能は充てん量とともに増加し、飽和することが知られている⁽⁸⁾。そこで、充てん量をパラメータにして、シリンダ内部を加圧しバースト圧力を測定した。図 4 は S, M, L 形についてバースト圧力をクリアランス別に分けて示したものである。なお、下向きの矢印の位置はギャップの容積を示す。

これより、飽和の始まる充てん量は磁石の大きさよりも、クリアランスの大きさによってほぼ決まること

(a) $C=0.15$ mm (b) $C=0.35$ mm (c) $C=0.55$ mm

Fig. 4 Burst pressure relating to amount of injected magnetic fluid

がわかる。なお、クリアランスが小さい場合に、バースト圧力のばらつきが大きくなるのは、クリアランスの円周方向の不均一性の影響をより大きく受けたためと思われる。実験した最大の充てん量におけるバースト圧力は、ほぼ飽和に達したとみなしてよいため、この値の平均値を以下の比較に用いた。

シールの内外の圧力差 Δp は以下の式で与えられることが知られている⁽⁴⁾。

Fig. 5 Burst pressure versus magnetic field strength relationship

$$\Delta p = \int_{H_0}^{H_i} M dH + \frac{1}{2\mu_0} (M_{ni}^2 - M_{no}^2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 H は磁場強さ、 M_n は磁性流体のメニスカス法線方向の磁化、 μ_0 は空気透過率、添字の o, i は磁性流体の表側の表面、裏側の表面上の値を意味する。バースト圧力の飽和は表側がギャップ部から十分に離れたことを意味しており ($H_0=0$, $M_{no}=0$)、またギャップ内の磁性流体の磁化は飽和しているとみなせる ($M_{ni}=M_s=0.019$ T) からバースト圧力 p_b は次のように近似できる。

$$p_b = \int_0^{H_{gs}} M dH + \frac{1}{2\mu_0} M_s^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(2)の右辺の第1項は磁性流体の磁化曲線を数値積分して求められる。第2項はおおよそ 142 Pa (14 mmAq) と計算される。 H_{gs} をパラメータにして式(2)を計算した結果を図5に示す。また、バースト圧力の実験値を、その実験条件における磁場解析から得られた H_{gs} に対してプロットした結果を図5に重ねて示す。実験結果は磁場強度に対して、ほぼ直線的に増加しており、よい線形関係にあることがわかる。計算結果と比較すると、低磁場領域ではやや下回っているが、高磁場領域ではその差は小さくなる。実験値の方が計算値より小さい理由としては、加工誤差によるクリアランスの不均一のため、局所的に磁場が弱くなっている箇所が存在していることが考えられる。

5. 回転によるメニスカス形状の変化

クリアランスの大きい場合と小さい場合について、メニスカスの断面形状の写真を比較して図6に示す。

Fig. 6 Image of meniscus shape

図6(a)はS形、図6(b)はL形の場合で、それぞれ静止時の結果である。クリアランスが小の場合 ($C=0.15$ mm) には、シルエットはほぼ円形、大の場合 ($C=0.55$ mm) には長円形となり、また磁場が強いL形の方が曲率の大きいことがわかる。これは図3に示した磁力線の分布とよく対応している。

回転上昇に伴う自由表面形状の変化について、クリアランスによる差異を比較して図7(a)、(b)、(c)に示す。ここでは、回転中の温度上昇による内部圧力変動の影響を除くため、シリンダ内部を大気圧に開放して実験を行った。図7中の曲線は磁性流体の自由表面形状で、シルエット画像をコンピュータ処理することにより求めたものである。なお曲線の微小な乱れは画像中に混入したノイズによるもので実形状の乱れではない。これらの図より回転上昇に伴う表面形状の変化の特性は次の3期に分類できることがわかる。

I期：[図7(a)の場合には0～1 000 rpm] シャフト側のメニスカス(図の縦軸に近い側)は減少するが、ヨーク側のメニスカス(図の横軸に近い側)はほとんど変化しない。

II期：[図7(a)の場合には1 000～1 800 rpm] シャフト側のメニスカスの変化は微小になり、ヨーク側のメニスカスが膨張する。

III期：[図7(a)では2 000 rpm以上] メニスカス全体が縮退する。

I期において磁性流体の体積が減少したように見え

Fig. 7 Deformation of meniscus shape owing to seal rotation (Type M, no pressure difference)

 Fig. 8 Deformation of meniscus shape owing to seal rotation (Type M, pressure difference; $p=100$ mmAq, clearance; $C=0.15$ mm)

る理由は、磁場こう配が緩やかで磁性流体を保持する力が弱いヨークの裏側のメニスカスの方へ磁性流体が回ったためと考えられる。また、I期ではヨーク表面上の磁性流体の先端においても、遠心力より保持力の方が大きいため、ヨーク表面上の磁性流体の流動はない。II期では遠心力が磁気力を上回り流動し始めるが、わずかの流動後に再び釣り合い状態になり、流動が停止することを示している。III期では遠心力が保持力を上回り、スプラッシングの発生により急激な体積の減少が生じる。

以上よりスプラッシングの前兆ともいえるII期における微小な流動の開始、およびスプラッシングの開始は、ヨーク表面のメニスカス先端位置(メニスカスの回転高さ)における磁場こう配に基づく保持力と遠心力の大小関係に依存することがわかる。

内圧として $p=0.98$ kPa(100 mmAq)を加えた場合の結果を図8に示す。内圧により磁性流体が押し出された分だけ、メニスカスが増大する。しかし、I期、II期、III期の3期の特性をもつて図7の場合と基本的には同じである。

6. スプラッシング開始速度

磁性流体の充てん量によってメニスカスの大きさを変え、スプラッシング開始直前におけるヨーク表面上のメニスカスの長さとシャフト表面上のメニスカスの長さを測定した。以下では前者を回転高さ： h 、後者を静止幅： w とよぶ。

S, M, L形について、それぞれクリアランス $C=$

(a) Meniscus rotating height

(b) Meniscus stationary width

Fig. 9 Splashing beginning speed (Comparison under the condition of fixed clearance)

Fig. 10 Splashing beginning speed versus modified meniscus rotating height (Comparison under the condition of fixed clearance)

0.15 mm におけるスプラッシング開始時の回転高さ h と静止幅 w を図 9 に示す。スプラッシング開始速度は、おおむね h, w に反比例する関係にあり、また h と w に対してほぼ同じ特性をもつこと、磁場が強い方がスプラッシング速度が高いことなどがわかる。

Fig. 11 Splashing beginning speed versus meniscus rotating height (Comparison under the condition of fixed magnet)

Fig. 12 Splashing beginning speed versus meniscus rotating height (Comparison under the condition of fixed magnet)

ここにおける 3 種の実験結果を、簡易な方法により統一的に論ずることを考える。スプラッシングの発生は 5 章において考察したように、メニスカスの回転高さ位置における磁場こう配に依存すると考えられる。この位置の磁場はヨーク内周表面上の磁場 H_{gy} と先端からの距離 $h-C$ に依存するため、メニスカスの回転高さを $(h-C)/H_{gy}$ で規準化することには意味がある。そこで H_{gy} と同じ意味をもち換算が簡単な B_{gy} を用いて変換を行って実験値をプロットし直した結果を図 10 に示す。この図より 3 種の結果が同一曲線上にほぼ重畳するようになることがわかる。これは変換式 $(h-C)/B_{gy}$ がスプラッシング開始を表す指標として有用であることを意味している。

図 11 は同一の磁石(S 形)を使用した場合について、クリアランスの影響を示したものである。クリアランスによって回転高さが平行移動するとともにヨーク表面の磁場分布も変化するため、図 9 のように統一的に論ずることはむずかしい。しかし、図 3 の磁場解析結

果からもわかるように、クリアランスの差によりギャップの磁場が大きく変わっても、磁石が同じであればギャップから離れた位置におけるヨーク内を流れる磁束密度は大きくは変化せず、したがって表面の漏洩磁束の変化はギャップ磁束密度ほどは変化しない。このため、図10のように B_{av} で直接規準化するとその効果を過大に見積ることになる。そこで、単純に回転高さからクリアランスを引いた値 $h-C$ として回転高さを修正すると図12の結果を得る。この場合にも3種の結果が互いに接近し、概略の統一的な評価が可能になる。しかし図10に比較すると分布の範囲は広い。これはヨーク表面上の磁場こう配の差を考慮していないためと考えられる。

図10、図12のような規準化により統一的にデータを整理できることは、スブラッシング開始がメニスカス先端部におけるヨーク表面の磁場分布によってほぼ決定されることを意味している。

7. ま と め

磁気ディスク装置のスピンドルシールに使用されるシールリング回転形の磁性流体シールについて、永久磁石の強さとクリアランスをパラメータとしてスブラッシング実験を行い、磁場強さや充てん量によって決まるメニスカス形状とスブラッシング開始速度の関係を明らかにした。また、スブラッシング発生の指標となる簡易なパラメータを導入した。さらに、耐圧性能について磁場解析結果と実験結果がよく一致することを確認した。得られた結果を要約すると以下のようになる。

(1) 磁性流体シールの形状パラメータとして、クリアランス3種、磁石3種(ギャップ部磁束密度0.19~1.10 T)を用い、動作パラメータとして充てん量、差圧、回転速度を可変にできる実験装置を構成するとともに、レーザ光を利用した陰影法によりメニ-

スカ画像を観測して、画像処理により磁性流体の自由表面形状を実測した。

(2) 回転上昇に伴うメニスカス形状の変化の様相は3期に区分できる。I期ではヨーク上のメニスカスの大きさ(回転高さ)はほとんど変化せず、シャフト上の大きさ(静止幅)が減少する。II期では、回転高さがわずかに増大して釣合う。III期では、スブラッシングの発生によりメニスカスが急激に縮退する。

(3) スブラッシング開始の指標としては、クリアランスが同一で、ギャップ部磁場が異なる場合には、[(メニスカスの回転高さ-クリアランス)/ギャップ部磁束密度]が推奨できる。また、磁石強度が同一で、クリアランスが異なる場合には「メニスカスの回転高さ-クリアランス」が推奨できる。

(4) (2)、(3)の結果は、スブラッシング開始が回転しているメニスカス先端部のヨーク表面における磁場こう配によって決まることを意味している。

(5) 耐圧性能について磁場解析に基づく計算結果と実験結果はよく一致する。詳細にみると実験結果の方がやや低い値となり、この傾向は低磁場領域の方が強い。

最後に実験を支援した元本学学生黒野洋行君〔現：豊田工機(株)〕に謝意を表する。

文 献

- (1) Mikhalev, Y. O., Orlov, D. V. and Stradomskii, Y. I., *Magnetohydrodynamics*, (1980), 285, Plenum Pub. Corp.
- (2) 武富荒, 機講論, No. 820 6(1982 3), 140.
- (3) 成宮宏・阪部茂一, 機講論, No. 830 11(1983 10), 41.
- (4) 武富荒, 磁性流体, (1988), 18, 日刊工業.
- (5) Mitsuya, Y., Tomita, K. and Hosoya, M., *Journal of Magnetic Materials*, **122**-1~3(1993), 420.
- (6) Jones, T. B. (B. Berkovsky, ed.), *Thermomechanics of Magnetic Fluids*, (1978), 255, Hemisphere.
- (7) Kamiyama, S., Oyama, T. and Htwe, J., *Proc. of JSLE Int. Trib. Conf.*, (1985), 985.
- (8) 関興一・吉田洋一・中里博, 工業材料, **31**-5(1983), 60.