

磁性流体により分散制御された微小粒子を用いたマイクロフォーミング

東京都立科学技術大学 機械システム工学科

助教授 梅原徳次

(平成 12 年度研究開発助成 AF-2000002)

キーワード：マイクロフォーミング加工，トライボロジー，摩擦，摩耗

1. 研究の目的と背景

場の働きを援用して砥粒の運動を制御しようという新しい砥粒加工の試みが今中らにより始められた⁽¹⁾。その中で特に磁場を援用するために、黒部ら、谷ら、梅原らにより磁性流体の利用が試みられた⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。これらの研究において磁性流体の役割としては、磁性流体が強磁場側に引きつけられる事で生じる非磁性砥粒の反力に起因する物であった。一方、Skjeltorp⁽⁵⁾やFujita⁽⁶⁾らにより、磁性流体中の非磁性粒子同志には磁場方向には引力が、磁場と垂直方向には斥力が働くことが明らかにされている。この結果より、磁場を制御することで磁性流体中の微小粒子の分散の状態の制御(磁気分散制御)が可能と考えられる。そこで、梅原らは、磁性流体を用いることで研磨面中の数 μm の砥粒の分布及び個々の砥粒の配列方向が、磁場により制御可能であり、このような砥粒の配列の違いが表面粗さを大きく変化させる事を示した⁽⁷⁾。しかし、個々の粒子の分散の程度については検討してはいない。

一方、近年、コンピューターなどの磁気記憶装置であるハードディスク装置において、より高い磁気記憶密度が求められている。これを実現させるためには、ヘッドとディスクの間隔をより小さくすることが必要である。ヘッドとディスクの間隔を小さくするには、ディスクの表面がより滑らかである必要があるが、ヘッドとディスクの摺動

面が滑らかすぎる場合、2面間の付着(スティックション)が生じ、大きな摩擦・摩耗を伴う⁽⁸⁾。この問題を解決するために、研磨テープなどによって適度な粗さを表面に付与する方法が用いられている。従来、この工程は研磨テープにより行われているが、砥粒切刃の高さがある分布を有するため、ディスク表面に不規則な突起が生じ、表面の突起高さをnmオーダーで制御することは困難である。そのため、規則正しい表面突起を得るために、従来考えられなかった全く新しい手法によるハードディスクの表面形状の付与の方法が求められている。

このハードディスクへの微小突起等の表面形状の付与方法への磁性流体による微小粒子の磁気分散制御の応用が考えられる。すなわち、磁気分散制御によりハードディスク上に非磁性微小粒子を規則正しく配列し、その状態で平面加工具を押しつけ、かつ接線方向の力を与えることで、アルミニウム合金のハードディスク基板の上に規則正しい任意の形状及び高さの微小突起をいわゆるマイクロフォーミングにより創成する方法である。

本研究では、磁性流体を用いた微小粒子の磁気分散制御の基本特性を明らかにし、ハードディスクのマイクロフォーミング法の開発のための指針を与える基礎データを得ることを目的とする。そのため、接触面の光学顕微鏡による直接観察装置を用いて、接触面間の磁性流体中の微小粒子の数

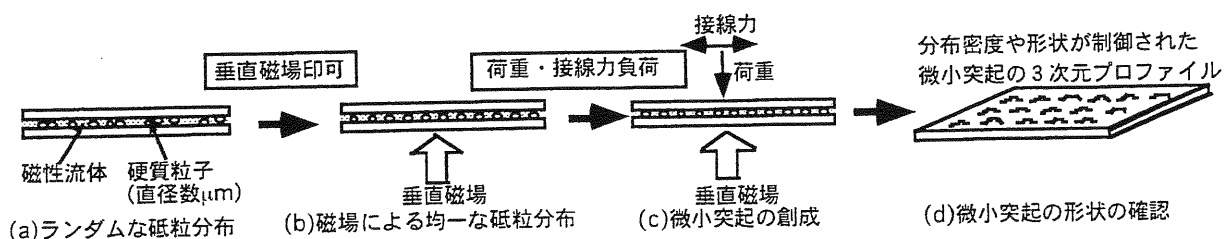


図1 磁性流体を用いたマイクロフォーミング法の原理

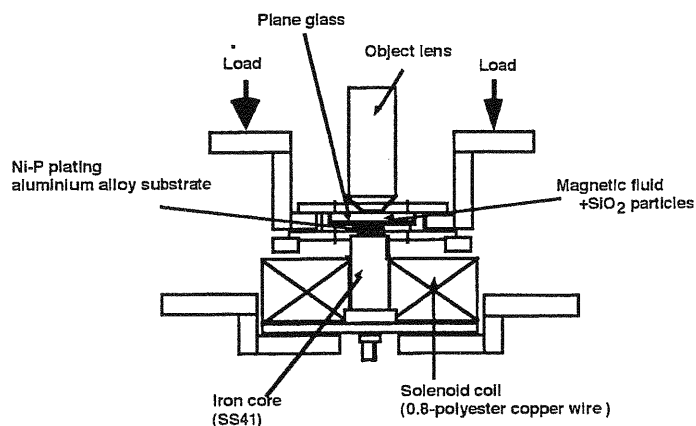


図2 実験装置概略図

密度と間隔に及ぼす電磁石のコイル電流と押しつけ荷重の影響を明らかにする。また、付けられた圧痕の数密度の間隔に及ぼす電磁石の電流と押しつけ荷重の影響も明らかにする。更に、ハードディスク装置のスライダー材として用いられているセラミックスとの付着力試験を行い、マイクロフォーミングによる付着力低減効果を実証する。

2. 磁性流体を用いた微小粒子の磁気分散制御とそれを用いたマイクロフォーミングの原理

図1に新しく提案するマイクロフォーミングの原理図を示す。図のように、2枚の平板間に SiO_2 微小球状粒子を適当量混ぜた磁性流体を挟み、そこに垂直磁場をかけると非磁性粒子は磁場方向と反対方向に見掛け上磁化され、そのため粒子相互に磁場強度と粒子間隔に応じた斥力が作用する⁽⁵⁾⁽⁶⁾。その結果、非磁性粒子は平板間に等間隔に分布する。ここで、平板間に力を加える事で、粒子が平板に押し込まれ平板上に等間隔の圧痕を形成する。

3. 実験装置及び実験方法

3.1 マイクロフォーミング法

図2に本研究で用いた実験装置の概略図を示す。本研究では、磁場は電磁石で与えられ、磁性流体中の粒子の挙動をその場観察するために光学顕微鏡上に実験装置を製作した。また、磁性流体中の粒子を上から押しつけるのに平面ガラスを用いた。平面ガラスとNi-Pメッキされたアルミニウム基板試験片の2面間には、装置の左右に同じ荷

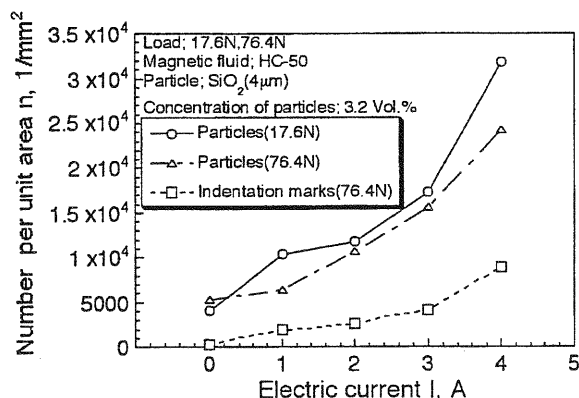


図3 粒子と圧痕の数密度に及ぼすコイル電流（磁場強度）の影響

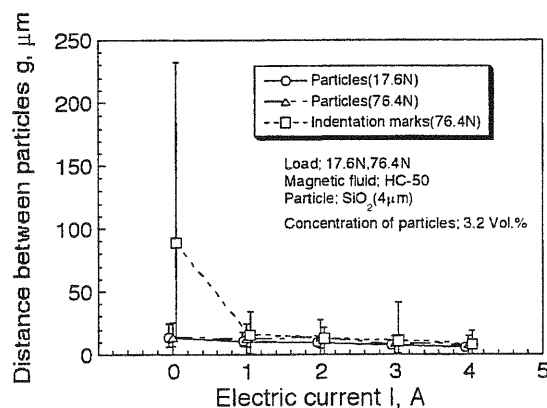


図4 粒子と圧痕の間隔に及ぼすコイル電流（磁場強度）の影響

重を負荷する死荷重によって力が加えられた。磁性流体(ケロシンベースHC-50)と粒子(SiO_2 , 平均粒径4μm, 粒径の標準偏差0.04μm)を一定の割合(3.2Vol%)で混合し、超音波により十分に攪拌した後、電磁石の鉄心上に固定された試験片上の中央部に注射筒を用いて、微量供給する。その後、所定の磁場をかけ、上方から平面レンズを水平にかつ静かに接触させ、所定の荷重(17.6~74.2N)を負荷し、試験片上に粒子の圧痕を付与する。各磁場強度および各荷重における磁性流体中の接触面の粒子の数密度及び間隔を光学顕微鏡により観察、測定する。また、荷重を負荷した後に、Ni-Pメッキされたアルミニウム基板に付けられた圧痕の数密度と圧痕間距離も測定する。

3.2 付着力の測定

所定の磁場下でマイクロフォーミングされたNi-Pメッキされたアルミニウム基板試験片の窒化ケイ

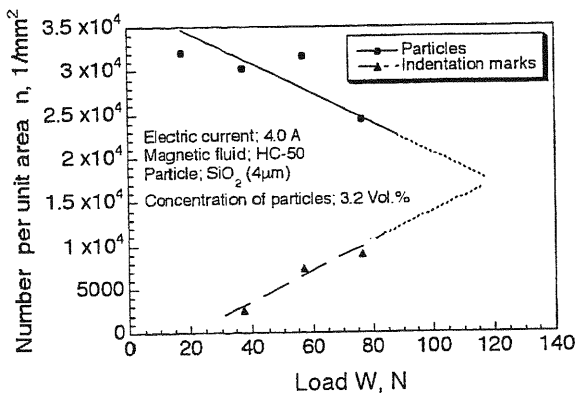


図5 粒子と圧痕の数密度に及ぼす荷重の影響

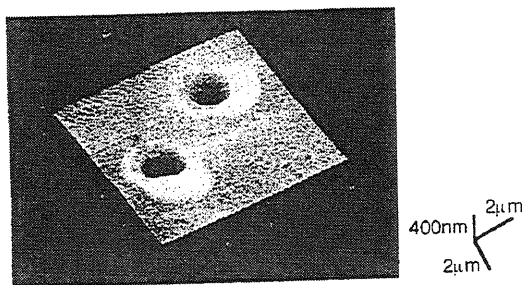


図7 圧痕のAFM像

素球に対する付着力が測定された。球は平行板バネにより支持され、最大引き離し力を付着力として定義した。88%RHで測定は行われた。

4. 結果及び考察

4.1 粒子と圧痕の数密度と間隔に及ぼすコイル電流（磁場強度）の影響 粒子と圧痕の数密度に及ぼすコイル電流（磁場強度）の影響を図3に示す。本研究では、初めに17.6Nの荷重を加えた後に磁場をかけ、その後、荷重を増加し圧痕を付けることを試みた。図から粒子の数密度は、コイル電流（磁場強度）の増加と共に増加することが分かる。この原因は電磁石の鉄心上には水平方向の磁場勾配があるため、磁性流体中の粒子が低磁場側に排出力を受け、磁場の比較的弱い中心付近に集まったためと考えられる。図より、荷重が17.6Nから76.4Nに増加すると粒子の数密度が減少する事が分かる。また、圧痕の数密度は粒子の数密度よりかなり減少する事が分かる。特に、コイル電流が0Aでは、ほとんどの粒子が逃げている事が分かる。図4に粒子と圧痕の間隔に及ぼすコイル電流（磁場強度）の影響を示す。この図からコイル電流（磁場強度）の増加と共に粒子の間隔は狭くなる事が分かる。特に、圧痕の間隔は、0Aに比べて1A以上の時に著しく狭くなり、間隔のばらつき

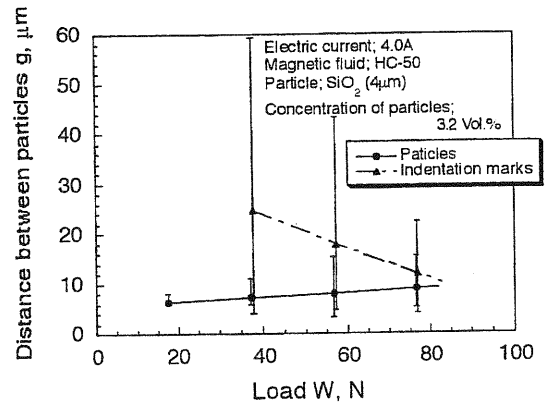


図6 粒子と圧痕の間隔に及ぼす荷重の影響

は0Aから4Aにすることで、218 μmから18.4 μmに著しく減少する。これらの事をまとめると、粒子はコイル電流（磁場強度）の増加とともに均等かつ密に並ぶことが分かる。

4.2 粒子と圧痕の数密度と間隔に及ぼす荷重の影響

粒子と圧痕の数密度に及ぼす荷重の影響を図5に示す。荷重の増加と共に接触面の粒子の数密度は減少するが、圧痕の数密度は増加していることが分かる。図6に粒子と圧痕の間隔に及ぼす荷重の影響を示す。接触面の粒子の間隔は荷重の増加と共に大きくなるのに対し、圧痕の間隔、ばらつきは小さくなる事が分かる。ここで荷重の増加とともに粒子の数密度が減少し、間隔が大きくなるのは、荷重の増加に伴い磁性流体が押し出され、外方向へ移動すると共に、粒子も一緒に逃げたためと考えられる。それに対して荷重の増加とともに圧痕の数密度は増加、間隔は減少しているが、これは、荷重の大きい場合には、試験片が粒子によって塑性変形を受け、圧痕として残るが、荷重の小さい場合には塑性変形させられずに弾性変形のみが生じ、圧痕を観察できたものが少なかったからではないかと考えられる。この事より、図5における粒子と圧痕の数密度のグラフの交点である荷重約120N付近で、全ての粒子が試験片に塑性変形を生じさせ、圧痕が生成すると思われる。

4.3 AFMによる観察 図7にAFMによる代表的な圧痕の像を示す。圧痕の周囲が盛り上がっている事が分かる。圧痕の直径は約2 μm程度、深さは約200nm程度であり、圧痕の周囲の盛り上がり高さは約100nm程度であった。

4.4 付着力に及ぼす磁場の影響 図8に異なる磁場強度下でマイクロフォーミングされた試験片における付着力に及ぼす保持時間の影響を示す。図よりテクスチャがない場合には初期より付着力

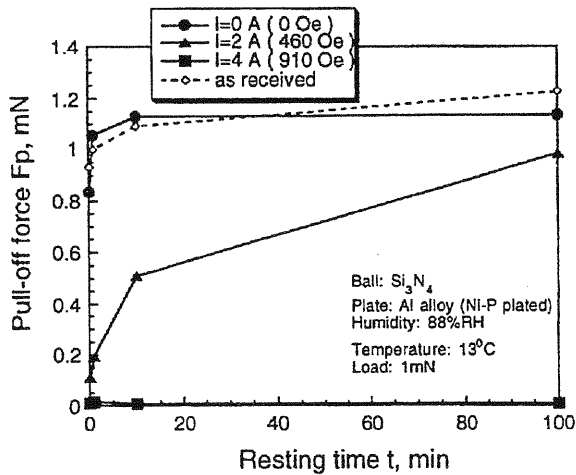


図8 異なる磁場強度下でマイクロフォーミングされた試験片における付着力に及ぼす保持時間の影響

は非常に大きな値を取ることがわかる。この時の飽和値は理論的なメニスカス力による付着力と一致する。また、この図よりテクスチャリング時の磁場強度が大きいほど付着力が小さくなることがわかる。この原因としては、磁場強度が大きいほど、テクスチャリングにおいて形成する微小突起の数が多くなり、その結果、接触時における個々の突起の塑性変形量が小さいため、メニスカスが飽和するための2面間における空間が広いと考えられる。図9にマイクロフォーミングで創成された微小突起先端半径の付着力に及ぼす影響を示す。図より、付着力は微小突起先端半径に比例していることが分かる。これはBowdenらのメニスカス力に起因する付着力の原理で説明可能である。⁽⁹⁾

5. 結言

磁性流体を用いた微小粒子の磁気分散制御の基本特性を明らかにし、ハードディスクのマイクロフォーミング法の開発のための指針を与える基礎データを得るために、モデル実験を行い、粒子及び圧痕の数密度と間隔に及ぼすコイル電流と押し付け荷重の影響を明らかにした。また、窒化ケイ素球との間の付着力試験を行い、マイクロフォーミングの付着力低減効果を実証した。得られた主な結果を以下に示す。

(1) 接触面の磁性流体中の粒子、及びアルミ合金基板上の圧痕はコイル電流の増加とともに数密度が増加し、間隔の平均値とばらつきは減少する。特に圧痕の間隔のばらつきは、電流を0Aから4Aにすることで218 μ mから18.4 μ mに著しく減少する。

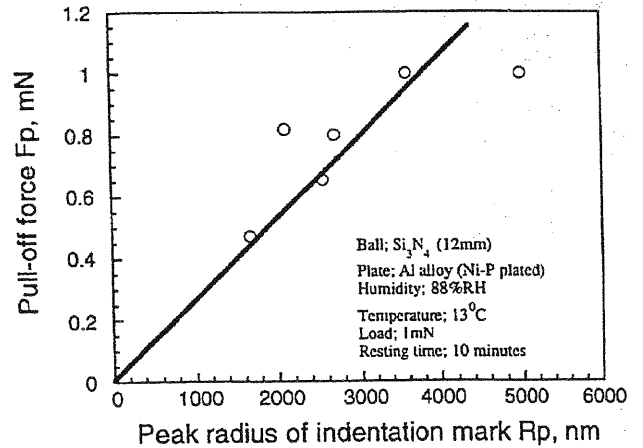


図9 マイクロフォーミングで形成した微小突起半径の付着力に及ぼす影響

(2) 接触面の磁性流体中の粒子は、荷重の増加とともに数密度が減少し、間隔の平均値とばらつきは増加するが、圧痕の数密度は増加し、間隔の平均値とばらつきは減少する。

(3) 圧痕の直径は約2 μ mであり、深さは約200nm、盛り上がり高さは約100nmである。

(4) マイクロフォーミング時の磁場強度を増加することで、湿度88%の雰囲気における窒化ケイ素球に対する付着力は著しく減少する。

参考文献

- (1) 今中・, 黒部・松島, 精機学会春期講演会講演論文集 (1981) 774-777.
- (2) Y. Kurobe and O. Imanaka, Precision Engineering, 6, 3 (1984) 119-124.
- (3) Y. Tani and K. Kawata, Annals of the CIRP, 33/1(1984), 217-220.
- (4) N. Umehara, Annals of the CIRP, 43/1 (1994) 185-188.
- (5) A. T. Skjeltorp, Physical Review Letters, 51 (1983) 2306-2316.
- (6) T. Fujita, M. Mamiya, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 65 (1987) 207-210.
- (7) N. Umehara, K. Kato, T. Hayashi, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 149 (1995) 181-184.
- (8) B. Bhushan, Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices, New York, Springer-Verlag, (1990) 231.
- (9) F. S. McFarlane and D. Tabor, Proc. Roy. Soc. London, A202, (1950), 224-243.