

コンタクトヘッドの摩耗低減

Reduction of Contact Recording Head Wear

川久保洋一・小葉竹伸一 信州大学工学部

Y. Kawakubo and S. Kobatake, Mechanical Systems Engineering Department, Shinshu University

Head-disk spacing has been reduced to increase the recording density of hard disk drives. The magnetic spacing must be reduced to about 6 nm to realize 1 Tb/in² recording density. Contact recording systems have been studied for this purpose. This system requires the head wear is within the tolerable limit. To achieve this goal, reduction of head wear has been a research subject.

This paper first reviews the history of studies on contact recording head wear. Target wear characteristics are then be forecast using an extended wear equation. Finally, we present results on the reduction of contact recording head wear on thin film magnetic disks.

Key words: head wear, thin-film magnetic disk, contact recording, tribology

1. はじめに

磁気ディスク記憶装置では、記録密度 100 Gb/in² を実用化の域に収め、現在では 1 Tb/in² の密度を実現するための開発が進められている。これまでの記録密度向上は、Fig. 1 に示すようにヘッド・ディスク間隔（浮上スペーシング）の低減に支えられている。1 Tb/in² の記録密度を実現するためには、磁気記録媒体と磁気ヘッド素子との間の磁気スペーシングを 6 nm 程度に短縮する必要があると予測されている¹⁾。この磁気スペーシング中には、摩耗/腐食防止のためのヘッドおよびディスクの保護膜が存在するため、機械的スペーシングは 3.5 nm 程度に低下する。さらにこの機械的スペーシングには摩耗防止のため潤滑膜が必

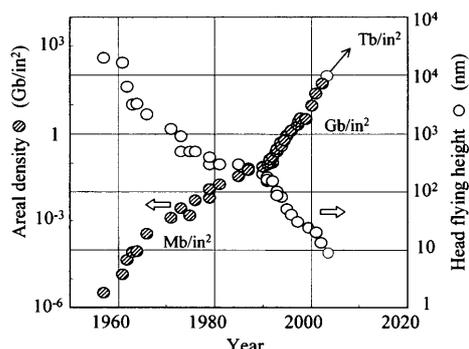


Fig. 1 HDD technology trends.

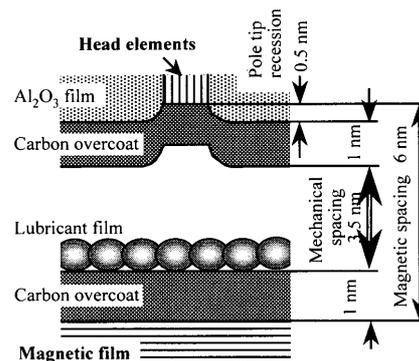


Fig. 2 Estimated head-disk interface for 1 Tb/in².

要である。この状態を模式的に Fig. 2 に示す。このようなヘッド・ディスク間隔の低減を実現するための方法として、コンタクト記録方式が提案されている。コンタクト記録方式実現のための最大の課題は接触振動の低減と目されているが、磁気ヘッドの摩耗防止も大きな問題である。磁気ヘッドの摩耗は、現状の 10 nm 程度の機械的スペーシングの磁気ディスク装置でも大きな問題となっている。これは、接触摺動するヘッド・ディスクともに類似のカーボン保護膜が形成されており両者の耐摩耗性には大きな差はないが、ヘッドとディスクの摩擦面積には 4 桁以上の差があることから、機能上問題となる摩耗深さは接触面積が小さい磁気ヘッドがはるかに大きくなるためである。

以下では、最初にコンタクト記録に関する実際のコンタクトヘッドの摩耗についての報告を概説し、次に 5 年の稼働寿命を得るために必要な摩耗特性について筆者らの提案している拡張摩耗方程式からの予測を行い、終わりにピン・オン・ディスク型摩耗試験による各種条件による摩耗低減の解析結果についてまとめる。

2. これまでのコンタクト・レコーディング方式 磁気ヘッドの摩耗研究

1990 年代のコンタクト・レコーディング方式提案とともにヘッド摩耗の研究も進められている。1991 年には Hamilton らにより、ビーム型垂直記録ヘッドを用いたコンタクト記録方式が提案された²⁾。この方式では Fig. 3 に

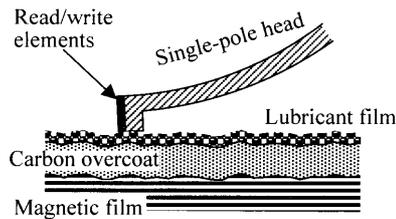


Fig. 3 Beam type contact head.

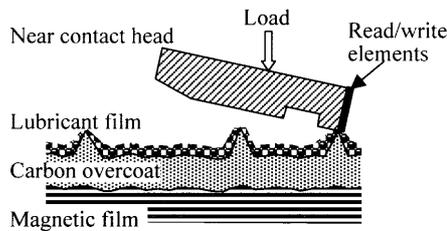


Fig. 4 Proximity recording head.

示すような空気浮上力を極力排除した幅 $50\ \mu\text{m}$ の一体成形された磁気ヘッドをそのビームの変形により $1\ \text{mN}$ 台の荷重でディスクに接触させた。このヘッドでは、14 週間の同一トラック連続摩耗試験で、2 週間の初期摩耗期間の後には $13\ \text{nm}/\text{週}$ の摩耗があったと報告されている。これは単純に外挿すると 5 年連続動作で $3\ \mu\text{m}$ を超える摩耗深さであり、シーク動作がある場合には 2 倍程度に増加することから実際に稼働した場合には $7\ \mu\text{m}$ 以上の摩耗量が予測される。そのため、この方式では摩耗許容量の大きい、単磁極型の垂直磁気記録ヘッドが採用されている。この方式に対し、従来からの浮上ヘッドを用いる面内記録方式も、MR/GMR ヘッドの採用などにより記録密度を向上させており、主役を交代することなく研究は下火となっている。

このような摩耗システムの摩耗量は、荷重、摩擦距離などの条件により変化し、異なるシステムの比較が難しい。そこで、摩耗量 V を荷重 W 、摩擦距離 L で規格化した、比摩耗量 $[k = V/(WL)]$ が比較のために用いられることが多い。上で述べた、ビーム方式コンタクト記録方式の磁気ヘッドの比摩耗量は、ヘッド後端部接触長さが不明な点があるが、発表されている条件からは、 $1 \times 10^{-12}\ \text{mm}^3/\text{Nm}$ 程度ではないかと推定している。

同時期には、インダクティブ磁気ヘッドを用い、MR ヘッドと同程度の再生特性を得るために、ニアコンタクト（プロキシミティ）記録方式と呼ばれる、狭スペーシングを得るための方式が実用化された。この方式では、装置製造時の浮上スペーシングをディスクの突起高さ以下に設計し、両者の接触を許容することで狭スペーシング化を実現した。この方式では、Fig. 4 に示すように製造直後にはヘッドとディスクは接触するが、稼働とともに両者がともに摩耗することで徐々に接触荷重が減少し、最終的にはほとんど非接触での動作となることから、耐久性と記録再

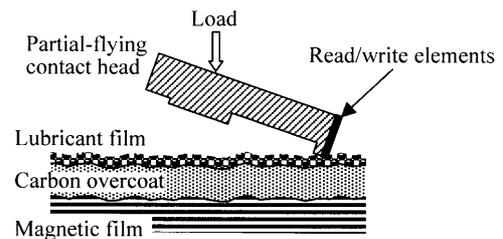


Fig. 5 Front-flying type contact head.

生特性を両立していた^{3), 4)}。この方式と、MR/GMR ヘッドはヘッド保護膜の摩耗による絶縁破壊、熱雑音 (TA) の発生のため両立できず、それらの一般化とともに採用されなくなっている。

1997 年には、伊藤らにより、Fig. 5 のように空気浮上力でヘッド荷重の大部分を支えて先端を浮上させ、後端のみを接触させるコンタクト記録方式が提案されている^{5), 6)}。この方式では、磁気ヘッドと磁気ディスクの間に働く接触力は、磁気ヘッドの印加荷重と発生する浮上力の差となる。ビーム型コンタクト記録ヘッドでは装置の寸法誤差が直接ビーム変形量の変化につながりヘッド接触荷重が変化するため高精度の部品が必要とされたが、この方式では寸法誤差は先端側の浮上パッドに吸収され後端の接触力は一定に近くできるとされている。一方で、プロキシミティ記録方式とは異なり、この方式では常に接触力が働く設計である。このヘッドには $6\ \text{nm}$ のカーボン保護膜が形成され、接触力 $0.7\ \text{mN}$ で 50 日試験後の摩耗量 $0.5 \sim 1.5\ \text{nm}$ から、20000 時間後の摩耗深さは $3 \sim 8\ \text{nm}$ と予測されている。発表された値から比摩耗量は $1 \times 10^{-13}\ \text{mm}^3/\text{Nm}$ 程度ではないかと推定している。

3. 許容比摩耗量の予測

以上のように、これまでに提案されているコンタクト記録方式では、 $2\ \text{nm}$ 以下を要求されるヘッド保護膜は稼働期間中に摩耗してしまう。そのため、各種のヘッド稼働条件、保護膜、潤滑膜を変えて摩耗を許容値以下に収めるようにする必要がある。そのためには、短時間の摩耗試験で、実稼働期間の摩耗を予測し、動作保証できる摩耗予測方式を確立する必要がある。

このような摩耗予測に、最も一般的に用いられているアーチャードの摩耗方程式では、比摩耗量 k を一定として、摩耗量 V は次式で計算される。

$$V = k \cdot L \cdot W \quad (1)$$

しかし、現在の HDD では、磁気ヘッドと磁気ディスクの組合せは固定されており、両者の表面が摩耗するため比摩耗量がしだいに低下し「なじみ特性」を示すことになる。これは、ヘッドを半径方向に移動させると摩耗が増加することが報告されていること、ピン・オン・ディスク型の摩耗試験でも同様の結果が得られていることから、確認さ

れる。なじみ特性をもつシステムで、摩耗量を(1)式を用いて数週間程度の短期間の試験結果から長期間稼働後の摩耗量を予測すると、実際の値より大きく見積もることとなり過大な耐摩耗性が要求されてしまう。そこで、筆者らはなじみ特性をもつシステムの摩耗量予測のために、(2)式の拡張摩耗方程式を提案した^{7)~10)}。

$$V = k_s \cdot L_s \cdot W \cdot (L/L_s)^{(1-m)} \cdot (B/b)^m \quad (2)$$

ここで、 k_s は基準距離 L_s における比摩耗量、 m はなじみ指数($0 \leq m \leq 1$)、 B は摩擦幅(シーク幅)、 b はヘッド摩擦パッド幅である。 m が大きいほどなじみ効果が大きく、 $m=0$ の場合には(2)式は(1)式と一致する。(1)式ではシーク幅の影響を受けないが、(2)式にはシーク幅 B が入っており、これまでの研究でシーク動作により摩耗量が増す点を説明している。なじみ効果のある面で比摩耗量 k を摩擦距離から単純に計算すると摩擦距離 L が増加するにつれて減少するため比較が困難となるので、基準摩擦距離 L_s の場合を基準比摩耗量 k_s と定義した。

コンタクト記録方式を設計する場合には、稼働期間中の摩耗量を、許容摩耗量 V_0 以下に抑える必要がある。稼働条件から、稼働期間の摩擦距離、摩擦荷重、ヘッド幅、シーク幅が決まると、許容比摩耗量 k_{sp} は次式から求められる。

$$k_{sp} \leq V_0 / (L_s \cdot W \cdot (L/L_s)^{(1-m)} \cdot (B/b)^m) \quad (3)$$

摩耗試験によりなじみ係数 m と k_s を求めたとき、 k_s が

Table 1 コンタクト記録ヘッド摩耗寿命計算条件

シーク幅 B	15 mm	荷重 W	0.5 mN
ヘッド幅 b	0.1 mm	平均摩擦半径	30 mm
ヘッド面積	0.001 mm ²	回転速度	5400 rpm
保護膜厚	2 nm	平均摩擦速度	17 m/s

(3)式から求められる k_{sp} 以下であれば良いことになる。

実際の装置設計では、ヘッド・ディスク表面材料の改良による k_s の低減と、接触荷重の低減による k_{sp} の増加を測りながら進められる。そのため、両者を同時に考えられることが求められる。(3)式にはなじみ係数 m が指数で含まれており、荷重と k_{sp} の関係は直感的に理解できない。そこで、 m の値を決めて、荷重を横軸と比摩耗量を縦軸としたチャートで比較することを考えた。Fig. 6に、Table 1のシステムを仮定した場合の、 $m=0$ と $m=0.5$ の場合の連続運転時間との比較チャートを示す。

このときの保護膜許容摩耗体積は 2×10^{-9} mm³であり、(3)式から許容比摩耗量 k_{sp} は L_s を1 kmとして、 $m=0, 0.5$ のときそれぞれ、 $1.5 \times 10^{-15}, 2 \times 10^{-13}$ mm²/Nmとなる。 m が大きいと、許容できる k_s が大きくなることがわかる。(3)式からわかるように、 k_{sp} は荷重に反比例する。そこで、チャート上では許容比摩耗量は右下がりの直線となり、この線以下の比摩耗量が実験的に得られれば、実稼働で摩耗が許容量を下回ることが期待できる。

4. ヘッド摩耗低減法の研究

摩耗量比較チャートで目標とする摩耗特性(なじみ係数と基準比摩耗量)を実現するためには、ヘッド・ディスクの改良による摩耗(k_{sp})低減が必要である。ヘッド摩耗低減法についての具体的方法についての報告は少ないので、筆者らのピン・オン・ディスク型摩耗試験機(Fig. 7¹¹⁾)による解析結果を中心にまとめる。

4.1 ヘッド保護膜の影響

ヘッド表面には金属磁性膜の酸化防止のためにカーボン

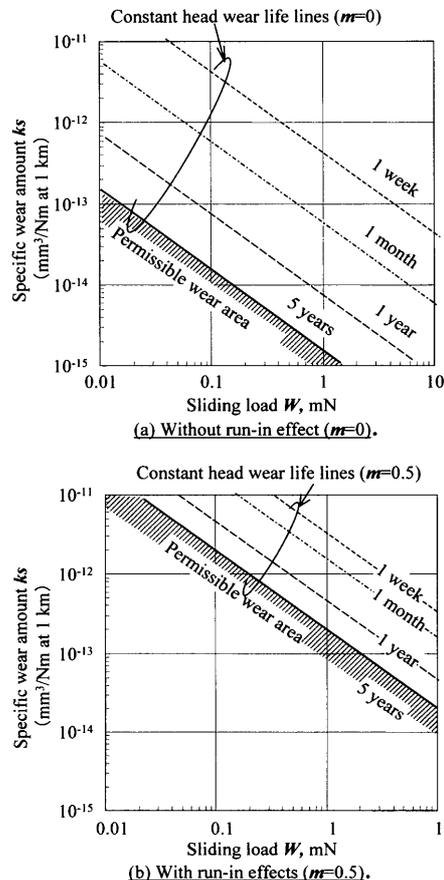


Fig. 6 Head wear life prediction charts.¹⁰⁾

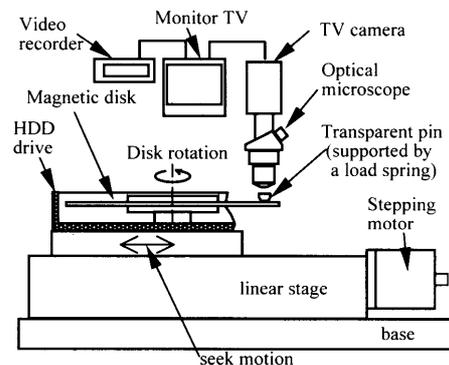


Fig. 7 Transparent pin-on-disk seek-wear test apparatus.¹¹⁾

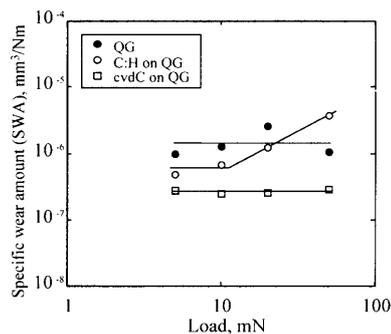


Fig. 8 Effects of overcoat film on pin wear.¹²⁾

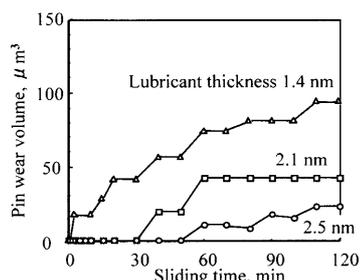


Fig. 9 Effects of lubricant thickness on pin wear.¹⁴⁾

保護膜が形成されている。したがって、ヘッド摩耗はこの保護膜の摩耗となり、これを測定する必要がある。

スパッタ水素化カーボン膜 (C:H) および CVD カーボン膜 (cvdC) を形成した石英摺動子の摩耗特性を Fig. 8 に示す¹²⁾。石英摺動子単体 (QG) および cvdC 膜は荷重の影響は小さく、cvdC 膜の摩耗が小さいこと、C:H 膜は高荷重では摩耗が大きく、荷重が小さくなると、両者の中間にすることがわかる。cvdC 膜はディスク保護膜としても C:H 膜より摩耗が小さいと報告されており¹³⁾、ヘッド保護膜でもディスク保護膜としての耐摺動性が高いものが耐摩耗性が高いと考えられる。

4.2 ディスク潤滑剤の影響

マクロシステムにおける潤滑剤の役割は摩擦低減と摩耗低減の二つとされている。しかし、HDD ではヘッド・ディスク表面は nm レベルで平滑でありさらに両面の間隔も nm 台のため、潤滑剤の表面張力によるメニスカス力が大きく、潤滑剤塗布により摩擦係数はかえって上昇する。そのため、潤滑剤の使用目的は摩耗、損傷低減となる。

これまでの潤滑剤の影響は、ディスク損傷発生挙動についてはいろいろと報告されているが、ヘッド摩耗についての報告は少ないので、ピン・オン・ディスク試験における効果を比較した。Fig. 9 には潤滑剤膜厚と、摩耗量の関係を示す¹⁴⁾。この例では高粘度の潤滑剤を用いており、潤滑剤膜厚が大きいほど摩耗開始摩擦距離が増加し、摩耗は低減されている。これは、ディスク表面に固定されていない潤滑膜 (フリー潤滑膜) が増加し低摩耗となったと考えている¹⁵⁾。

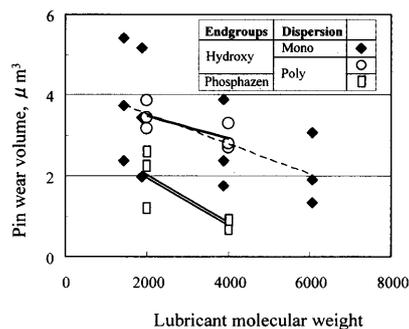


Fig. 10 Effects of lubricant molecular-weight/dispersion on pin wear.^{16), 17)}

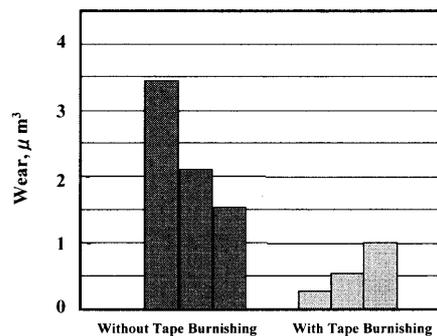


Fig. 11 Effects of tape burnishing (TB) on pin wear.¹⁶⁾

潤滑剤としてアウジモント社 Fomblin Z-dol を用いたときの分子量とその分散と摺動子摩耗量の関係を Fig. 10 にまとめる¹⁶⁾。潤滑剤分子量が大きい場合に摺動子摩耗が低いこと、同じ平均分子量であれば分画により単分散とした潤滑剤と分散の大きい潤滑剤とは摺動子摩耗は同程度であることがわかる。

以上の同一潤滑剤中の比較に加えて、最近ではフォスファゼン系の潤滑剤が、メカノケミカル作用の面から注目されている。松村石油(株)製 Moresco Fospharol A20H の結果を Fig. 10 に併せて示す。後者を塗布したディスク上での摺動子摩耗が少ないことがわかる¹⁷⁾。

4.3 ディスク表面形状の影響

Suk らは 1994 年に磁気ヘッドを用いた検討により、磁気ディスク表面形状と摩耗の関係について報告している¹⁸⁾。その中で、最大粗さは 5~13 nm の範囲で小さいほど摩耗が少ないこと、摩耗最小のディスクの平均粗さはサンプル中で最小ではなく、摩耗低減のためには最大粗さを小さくすることが有効であるとまとめている。

最近のディスクを用い、無潤滑状態でカーボン保護膜を研磨テープで軽くバニッシュした場合 (テープバニッシュ: TB) の摩耗の変化とディスク表面粗さの関係を Fig. 11 に示す¹⁶⁾。摺動子摩耗量は TB により減少している。このディスクの粗さは、TB なしのディスクと比較し、 R_{max} は減少しているが、 R_a は増加している。nm レベルの表面粗さにおいても、最大粗さを小さくすることが、摺動子摩

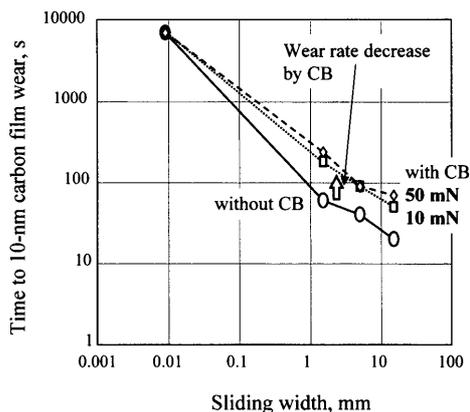


Fig. 12 Effects of disk contact burnishing on pin wear.¹⁹⁾

耗の低減に有効であることが確認できる。

4.4 コンタクトバニッシングによるヘッド摩耗低減

前節のように、TBは摺動子摩耗低減に効果的であるが、平均粗さの増加を来すことから、高密度記録用ディスク加工方法としてはさらなる改良が必要と考えられる。そこで、さらに他の方法について考えた。前章で示したように、薄膜磁気ディスク上での摩耗はなじみ特性を示す。このことは、磁気ヘッド浮上前に別のヘッドなどで表面を摩擦することにより、実ヘッドの摩耗を低減することが可能であることを示す。この点については、Hamiltonも、試験初期の摩耗が多く、シークによりさらに増加することから contact burnish として言及しているが、具体的な方法については提案していない²⁾。そこで筆者らは、平均粗さの増加を伴わないディスク最大粗さ低減法として、コンタクトバニッシュ（以下CB）方法を採用上げた¹⁹⁾。その方法として、鋭角な摩擦面をもたないダイヤモンド球面スライダを用いた。曲率半径34mmのダイヤモンド球面スライダを用いたコンタクトバニッシュの効果をも、CBの有無による摺動子上のカーボン保護膜摩耗時間の変化としてFig. 12に示す。CBにより10nmのカーボン膜が摩耗するまでの時間が増加しており、摺動子保護膜の摩耗が低減されていることがわかる。このときの、Table 1の条件でヘッド摩耗寿命である許容ディスク回転時間は163時間、約1週間と推定される。この寿命は目標の5年間連続稼働と比較し約1/250であり、寿命を3桁増加させる必要があることを示している。

4.5 今後の課題

以上の改良効果はほとんどピン・オン・ディスク試験の結果である。ディスク粗さの効果については磁気ヘッドの結果と同じ傾向を示しており、両者に大きな違いはないと予想されるが間接的な結果であり、同一ディスク上で実際の磁気ヘッドで確認する必要がある。

また、摩耗低減方法として、ヘッド、ディスクについてを重点的にまとめた。さらに装置や磁気ヘッドの機構の検

討により接触荷重を低減することも有効である。これについては多数の選択肢があり、別の報告もあるのでここでは触れなかった。

前節の結果では、現状に対して摩耗を250分の1にする必要があることが予測されている。これに対し、以上で概説した粗さ低減で1/3、フォスファゼン潤滑剤で1/4が見込まれ、摩耗低減効果がすべて独立で積で考えられるとすると、その積で1/12になる。さらに約1/20の摩耗低減が必要である。

最終的な目標は5年で1nmの保護膜が残ることであり、0.1nmの摩耗量測定精度が必要となる。このような測定法の導入も必要となる。

5. まとめ

以上、コンタクト記録ヘッドの摩耗低減に関連して、磁気ヘッドを用いた研究の状況、寿命低減効果の予測法、ピン・オン・ディスク試験を用いた各種条件の影響解析結果についてまとめた。

今後さらに改良された磁気ヘッド構造の提案と、地道な保護膜の耐摩耗性の向上、潤滑剤摩耗防止効果の向上などにより、高密度磁気記録に向けたヘッド・ディスクスペーシング低減を進めるに当たり、本報がその一助になれば幸せである。

参考文献

- 1) S. Batia: Proc. JSME-IIP/ASME-ISPS Joint MIPE'03 (2003), p. 225.
- 2) H. Hamilton, R. Anderson, and K. Goodson: *IEEE Trans. Magn.*, **27**, 4921 (1991).
- 3) Y. Li and A. K. Menon: *Trans. ASME, J. Trib.*, **118**, 813 (1996).
- 4) M. Tokuyama and Y. Kawakubo: *JAST, Tribologists*, **43**, 363 (1998) (in Japanese).
- 5) J. Itoh, K. Tanimoto, and Y. Ohtsubo: *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 3139 (1997).
- 6) J. Itoh, Y. Sasaki, K. Higashi, H. Takami, and T. Shikanai: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 1806 (2001).
- 7) Y. Kawakubo, M. Ishii, T. Higashijima, and S. Nagaike: *JAST, Tribologists*, **42**, 807 (1997).
- 8) Y. Kawakubo: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **21**, 1224 (1997).
- 9) Y. Kawakubo, S. Miyazawa, K. Nagata, and S. Kobatake: Digests of APMRC 2002 Singapore (2002), CA-01.
- 10) Y. Kawakubo, S. Miyazawa, K. Nagata, and S. Kobatake: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 898 (2003).
- 11) Y. Kawakubo and Y. Yahisa: *Trans. ASME, J. Trib.*, **117**, 297 (1995).
- 12) Y. Kawakubo, M. Ishii, Y. Kokaku, Y. Yahisa, and T. Yamamoto: *JAST, Tribologists*, **44**, 281 (1999) (in Japanese).
- 13) Y. Kokaku, H. Matsumoto, H. Inaba, S. Fujimaki, and K. Abe: *IEEE Trans. Magn.*, **29**, 3942 (1993).
- 14) M. Ishii, M. Y. Kawakubo, and N. Sasaki: *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 2341 (1999).
- 15) Y. Kawakubo: *JAST, Tribologists*, **47**, 145 (2002) (in Japanese).

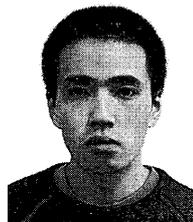
- 16) S. Kobatake, S. Miyazawa, K. Nagata, and Y. Kawakubo: Proc. JSME-ASME, MIPE 2003 (2003), p. 351.
- 17) S. Kobatake, Y. Kawakubo, K. Nagata, and S. Miyazawa: Proc. JAST Tribology Conf. (Niigata) (2003), pp. 347-348 (in Japanese).
- 18) M. Suk: *Trans. ASME, J. Trib.*, **118**, 794 (1996).
- 19) S. Miyazawa, S. Kobatake, Y. Kawakubo, and S. Hirono: Proc. JSME-ASME, MIPE 2003 Yokohama (2003), pp. 357-358.

(2003年11月12日受理)



川久保洋一 かわくぼ よういち

昭44 東京大学大学院精密機械工学専攻修士課程修了, 同年 (株)日立製作所入社, 同社中央研究所, 機械研究所を経て, 平11 信州大学工学部に移る. 磁気ディスク装置のトライボロジー, 各種精密加工などの研究に従事, 現在に至る.
専門 トライボロジー, 精密機械 (工博)



小葉竹伸一 こばたけ しんいち

平14 信州大学大学院生産システム工学専攻修士課程修了, 現在 同システム開発工学専攻博士後期課程在学中.
専門 トライボロジー, 機械工学