

第7章 潤滑条件と潤滑膜設計手法の提案・検証

7-1 本章の目的

本章では、3章に示した潤滑状態の検証結果、および3章～6章に示した修復・摺動・スピノフにおける潤滑剤分子の挙動に基づき、磁気ディスク潤滑膜が潤滑状態を維持するための条件（潤滑条件）を提案する。

次に、潤滑条件を満足する潤滑膜を設計するための手法（潤滑膜設計手法）を提案する。さらに、潤滑条件と潤滑膜設計手法の妥当性を検証する。

7-2 潤滑条件の提案

第4～6章において提案した修復モデル、摩擦移動モデル、スピノフモデルが潤滑膜厚の変化を予測可能であることを確認した。そこで、モバイル潤滑剤の吸着エネルギーを変数として各モデルで潤滑膜厚の変化を計算した。図7-1に計算結果を示す。潤滑膜厚は2.0nm、固定潤滑剤の吸着エネルギーを75kJ/mol、固定膜厚比率を0.5とした。下段は、修復部の潤滑膜厚が0nmから1.0nmへ修復する修復時間と吸着エネルギーの関係を示す。計算に用いた環境温度は25℃である。中段は、摺動により潤滑膜厚が1.0nmに減少するまでに要する時間（摩擦移動時間）と吸着エネルギーの関係を示す。計算に用いた環境温度は25℃、磁気ディスク面の突起高さは5nmである。上段は、スピノフにより潤滑膜厚が1.0nmに減少するまでに要する時間（スピノフ時間）と吸着エネルギーの関係を示す。計算に用いた環境温度は60℃、回転数は10000min⁻¹である。その他の計算条件は各章に示した値を用いた。

吸着エネルギーの増加にともない、修復時間・摩擦移動時間・スピノフ時間ともに増加する。潤滑膜厚の減少を少なくするためには、修復速度が大きく、摺動およびスピノフによる潤滑膜厚の減少速度が小さくなることが好ましい。しかし、このような潤滑膜を設計することが困難であることを、この計算結果は、示唆している。したがって、修復速度と摺動およびスピノフによる潤滑膜厚の減少速度が吸着エネルギーに対して同一の傾向を示すことを前提として潤滑膜を設計することが必要である。

図7-2に、修復・摺動・スピノフにおける潤滑剤分子の挙動から考えられる潤滑膜の被覆状態変化と潤滑状態との関係を示す。

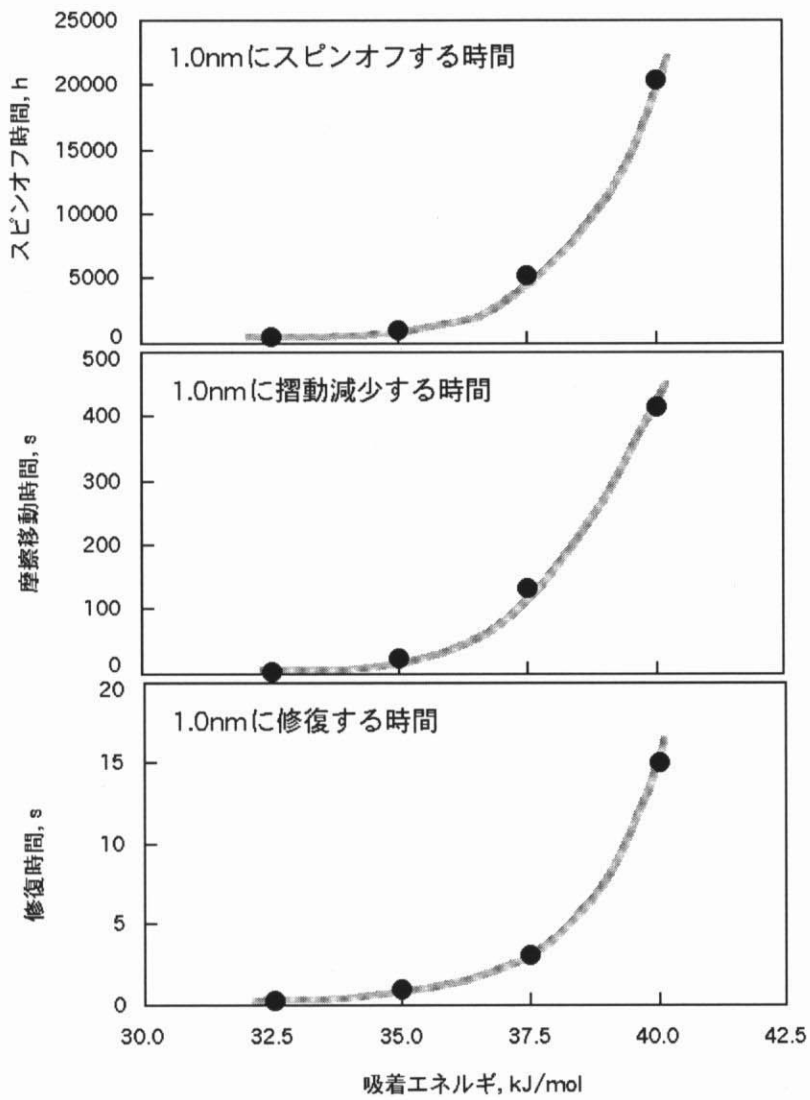


図 7-1. 修復時間・摺動膜厚減少時間・スピノフ減少時間の吸着エネルギー依存性

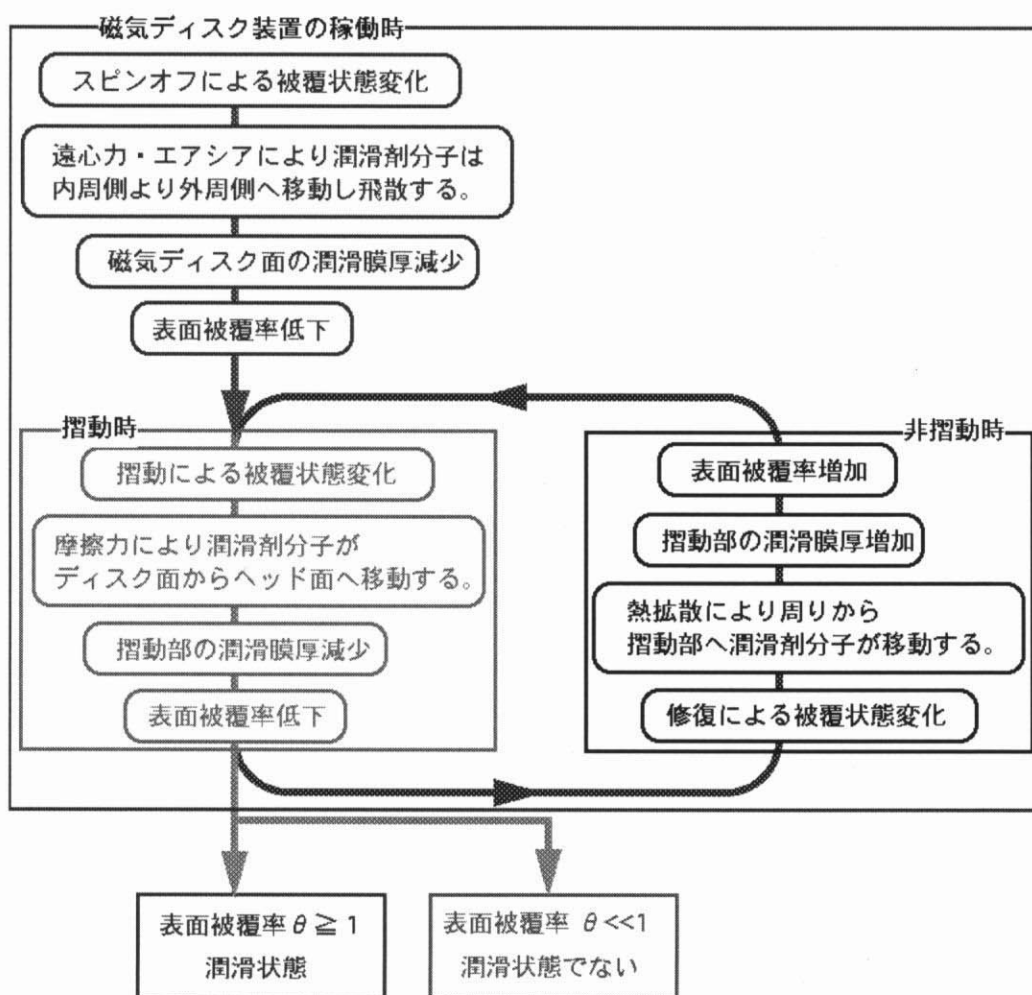


図 7-2. 潤滑膜の被覆状態変化と潤滑状態との関係

磁気ディスク装置の稼働中、スピノフにより潤滑膜の被覆状態は変化する。それは、遠心力・エアシアにより、潤滑剤分子が内周側から外周側へ移動し飛散するからである。その結果、磁気ディスク面の潤滑膜厚が減少し、表面被覆率は低下する。次に、磁気ヘッドと磁気ディスクとが摺動すると摩擦移動により、潤滑膜の被覆状態は変化する。それは、摩擦力により潤滑剤分子がディスク面からヘッド面へ移動するからである。その結果、摺動部の潤滑膜厚が減少し、表面被覆率は低下する。一方、磁気ヘッドと磁気ディスクとが摺動していない時、摺動部は、修復により潤滑膜の被覆状態が変化する。熱拡散により周りの潤滑剤分子が摺動部へ移動するからである。その結果、摺動部の潤滑膜厚が増加し、表面被覆率は増加する。これらの要因により潤滑膜の被覆状態が変化した結果として、表面被覆率 θ が1以上の場合は潤滑状態にあり、表面被覆率 θ が著しく1より小さい場合は保証されない。

潤滑膜が潤滑状態を維持するための条件、すなわち潤滑条件は、スピノフ・摺動・修復によって潤滑膜の被覆状態が変化しても、表面被覆率 θ が常に1以上を維持することである。以下、図 7-3

に従い、スピノフ・摺動・修復による潤滑膜厚変化から、潤滑条件を導く。摺動時に摺動部の表面被覆率 θ が 1 になる膜厚を許容膜厚と定義する。磁気ディスク装置の稼働中、スピノフにより潤滑膜厚は減少する。潤滑条件を満たすためには動作保証期間経過後の潤滑膜厚が許容膜厚以上であることが必要である。時間 t 後のスピノフ後の潤滑膜厚を $h_{spin}(t)$ 、潤滑膜厚 h のときの表面被覆率を $\theta(h)$ 、磁気ディスク装置の動作保証期間中に磁気ディスクが回転する時間を t_{rot} とし、許容膜厚を h_c とすると、次の関係が成立していることが必要条件となる。

$$\theta[h_{spin}(t_{rot})] \geq \theta(h_c) = 1 \quad (7-1)$$

$$h_{spin}(t_{rot}) = h_{spin}(0) - \int_0^{t_{rot}} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_{spin} dt \quad (7-2)$$

ここで、 $(\partial h / \partial t)_{spin}$ はスピノフによる単位時間あたりの潤滑膜厚変化量を示す量である。

一方、磁気ヘッドが磁気ディスクと摺動すると、摩擦移動モデルに従って潤滑膜厚は減少する。1 回の摺動で（すなわち、1 回の摺動時間内で）減少した潤滑膜は、次に同じ場所で磁気ヘッドが摺動するまでの間、つまり、非摺動時間内に修復する。そのため、表面被覆率を 1 以上に維持できるのは、(1) 摺動時間内の潤滑膜厚減少量が非摺動時間内の修復量よりも小さい場合、すなわち潤滑膜が完全に修復する場合と、(2) 摺動時間内に減少した潤滑膜が完全には修復しないが、修復後の潤滑膜厚が許容膜厚 h_c よりも大きい場合である。

(1) の場合は、1 回の摺動時間を t_{cont} 、次回の摺動までの時間（非摺動時間）を t_{uncont} 、摺動で摩擦する潤滑膜厚の摩擦速度を $(\partial h / \partial t)_s$ 、非摺動時間に潤滑膜が修復する速度を $(\partial h / \partial t)_r$ とすると、以下の関係が成立している。

$$- \int_0^{t_{cont}} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt \leq \int_0^{t_{uncont}} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \quad (7-3)$$

(2) の場合は、時間 t 後に次式の関係が成立している。

$$h_{spin}(t) + \int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt + \int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \geq h_c \quad (7-4)$$

時間 t が磁気ディスク装置の動作保証期間経過時にも、(7-4) 式が成立すれば潤滑膜の表面被覆率は 1 以上となる。すなわち、(7-3) 式または (7-4) 式が定式化された潤滑条件である。

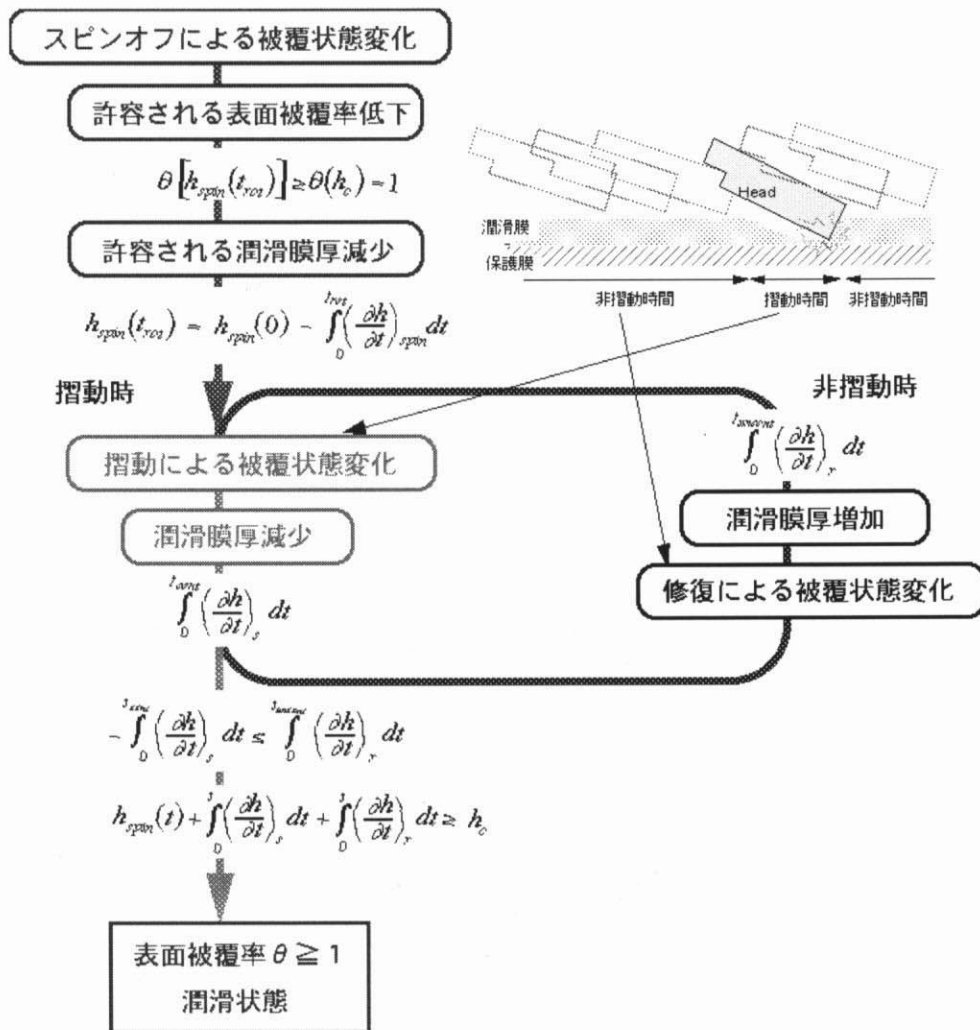


図 7-3. スピノフ・摺動・修復による潤滑膜厚変化から導出する潤滑条件

7-3 潤滑膜設計手法の提案

本節では、潤滑条件を満たす潤滑膜を設計するための設計手法、潤滑膜設計手法を提案する。7-2節において、潤滑条件を(7-3)(7-4)式で示した。

しかし、実際の磁気ディスクの設計では、(7-3)、(7-4)式が成立するパラメータの値(例えば、吸着エネルギー、潤滑膜厚)を導き出すことは困難である。なぜなら、磁気ヘッド浮上量や磁気ディスク面の面粗さのばらつき、あるいはHDA内のコンタミガスの影響で磁気ヘッドの浮上安定性が阻害される、などの理由から、摺動時間や非摺動時間を直接的に求めることが困難だからである。したがって、潤滑膜設計手法は、(7-3)、(7-4)式を満たす潤滑膜を設計するための実際的な手法である。

潤滑膜設計手法の概念を図7-4に示す。磁気ヘッドとの摺動の有無に関係なく潤滑膜はスピノフするので、スピノフ後の潤滑膜厚を実験で再現性良く求めることは可能である。そこで第1ステップとしてスピノフ量の測定と計算とを行い、磁気ディスク装置の保証期間経過後の潤滑膜厚がいくらになるかを求める。6ヶ月から1年程度の設計期間内で、数年後の潤滑膜厚を測定することは出来ないので、計算値を実験値で検証しつつ、保証期間経過時(数年~5年後)のスピノフ後の潤滑膜厚 $h_{spin}(t_{rot})$ を求める。このとき、(7-1)式で示した表面被覆率が1以上でなければならないという条件から、潤滑膜が潤滑性を維持するためには、次式を満たす必要がある。

$$h_{spin}(t_{rot}) \geq h_c \quad (7-5)$$

許容膜厚 h_c は、潤滑膜厚を変数として磁気ディスクの摩耗試験を行い、保護膜が摩耗しない最低の潤滑膜厚から求める。ここでの摩耗試験は実際のHDIにおける磁気ヘッドと磁気ディスクの摺動状態を十分に模擬したものでなければならない。通常は、数10秒サイクルでCSS動作を繰り返すCSS試験、あるいは、減圧環境で磁気ヘッドと磁気ディスクを常時摺動させた状態でシーク動作を行う減圧シーク試験などを行う。

次に第2ステップとして、磁気ヘッドを搭載した磁気ディスク装置で、潤滑膜設計の対象とする動作(例えばCSS動作やシーク動作など)をスピノフが影響しない時間 t の間行う。このときの試験環境は、装置仕様環境温度・湿度とする。試験後の潤滑膜厚を $h(t)$ とすると、潤滑膜厚 $h(t)$ は(7-6)式と表される。

$$h(t) = h_{spin}(t) + \int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt + \int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \quad (7-6)$$

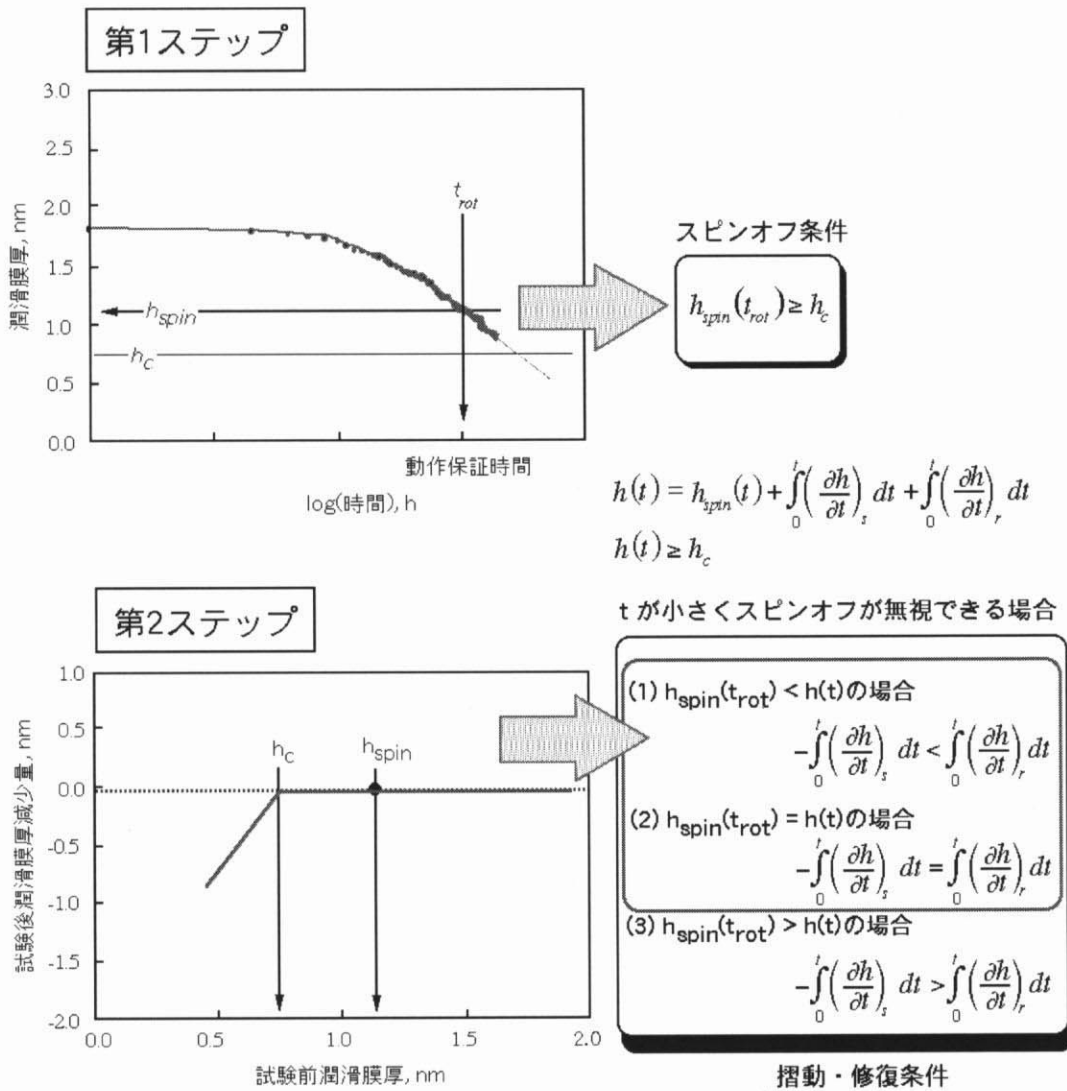


図 7-4. 潤滑膜設計手法を表す概念図

さらに、潤滑膜の表面被覆率が 1 以上という潤滑条件から、(7-7) 式が成立しなければならない。

$$h(t) \geq h_c \tag{7-7}$$

ここで、試験する磁気ディスクの潤滑膜厚を保証期間経過時の潤滑膜厚 $h_{spin}(t_{rot})$ に調整し、スピノフが無視できる程度に時刻 t が短い試験を行った場合、 $h_{spin}(t_{rot})$ と $h(t)$ との大小関係から、摺動による潤滑膜厚減少量と修復による潤滑膜厚変化量の大小関係は次の 3 つに分類できる。

$$(1) h_{spin}(t_{rot}) < h(t) \text{ の場合 : } -\int_0^i \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt < \int_0^i \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \quad (7-8)$$

$$(2) h_{spin}(t_{rot}) = h(t) \text{ の場合 : } -\int_0^i \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt = \int_0^i \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \quad (7-9)$$

$$(3) h_{spin}(t_{rot}) > h(t) \text{ の場合 : } -\int_0^i \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt > \int_0^i \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \quad (7-10)$$

すなわち、試験後の潤滑膜厚 $h(t)$ を測定し、結果を上記 (1) ~ (3) の場合にあてはめれば、保証期間経過時の潤滑膜厚が $h_{spin}(t_{rot})$ となった磁気ディスクの摺動による潤滑膜厚減少と修復による潤滑膜厚変化のバランス状態を確認することが可能となる。潤滑膜厚が $h_{spin}(t_{rot})$ が許容膜厚 h_c より大きいことを前提として、試験結果が (1)、(2) の場合にあてはまるなら、つまり試験後の潤滑膜厚減少量が 0 以下ならば、(7-7) 式が成り立つ。試験結果が (3) の場合にあてはまるなら、磁気ディスク装置の稼働初期は (7-7) 式が成り立っていたとしても、稼働中に潤滑膜厚が減少する過程で (7-7) 式が成り立たなくなる。つまり、潤滑条件を満足しない。このように各ステップごとに潤滑膜の良否を判断し、(7-5) 式で示したスピンオフ条件と (7-8) (7-9) 式で示した摺動・修復条件を満足しない場合は各モデルにおける設計パラメータの値を見直す必要がある。このような設計手法を、潤滑膜設計手法と定義した。潤滑膜設計手法における設計手順を図 7-5 にまとめとして示す。

各モデルにおける設計パラメータとそれに関連する具体的な設計内容は表 7-1 に示したように考えられる。まず、磁気ディスク装置に関する設計項目として、①HDA 内温度、②摺動時間・非摺動時間、③接触面形状・接触面圧、④エアシアがある。これらは、①スピンドルや記録再生用 IC の発熱量、②ヘッド浮上量、③ヘッド荷重・材料・形状、④HAD 内の空気流れの設計項目にそれぞれ対応する。しかし、これらは磁気ディスク装置の設計項目であるため、記録再生特性、コスト、環境仕様などに関連して決定されるため、制約条件となる場合が多い。そこで、磁気ディスクに関する設計項目である、⑤接触面形状・接触面圧、⑥吸着エネルギー、⑦平均分子回転直径を設計パラメータとして最適化することが必要である。これらは、⑤面粗さ・保護膜ヤング率、⑥潤滑剤の末端官能基構造・吸着エネルギーに関係する保護膜質、⑦潤滑剤の分子量の設計項目にそれぞれ対応する。表 7-2 に各モデルから導かれる修復速度・摩擦移動速度・スピンオフ速度の設計パラメータに対する依存性を示すとともに、それぞれの設計項目について依存性の例を以下に示す。

- ⑤面粗さを粗くすると、接触面積が小さくなり接触面圧は大きくなるため、修復速度は小さくなり摩擦移動速度は大きくなる。保護膜のヤング率を小さくすると、接触面積が大きくなり接触面圧は小さくなるため、修復速度は大きくなり摩擦移動速度は小さくなる。

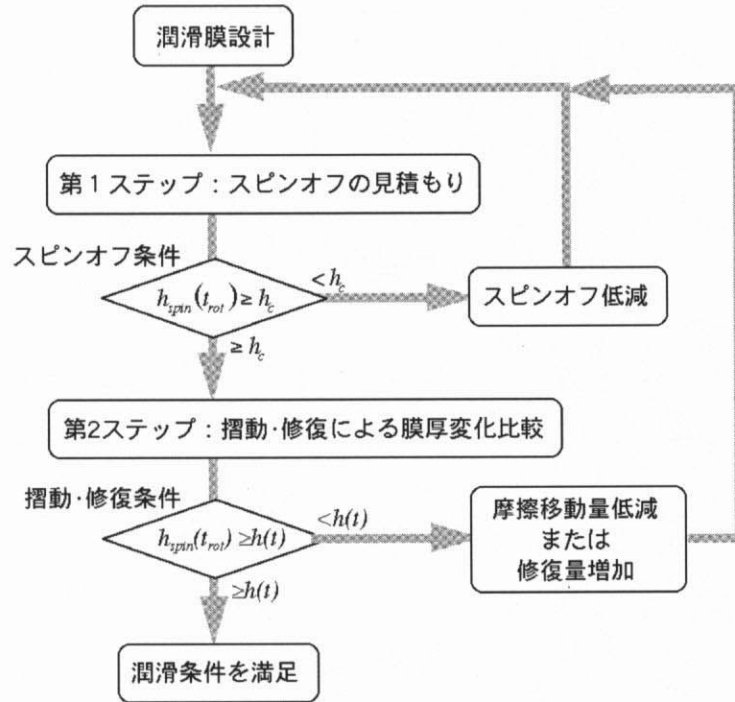


図 7-5. 潤滑膜設計手法における設計手順

表 7-1. 各モデルにおける設計パラメータと具体的設計内容のまとめ

モデル	修復モデル	摩擦移動モデル	スピノフモデル	具体的設計内容
磁気ディスク装置 設計項目	① HDA内温度	HDA内温度	HDA内温度	発熱量 (スピンドル・ICなど)
	② 非摺動時間	摺動時間	——	ヘッド浮上量
	③ ——	接触面形状 接触面圧	——	ヘッド荷重・材料 形状
	④ ——	——	エアシア	HDA内空気流れ
磁気ディスク 設計項目	⑤ 接触面形状	接触面形状 接触面圧		面粗さ(突起径・ 突起高さ・曲率半径) ヤング率
	⑥ 吸着エネルギー	吸着エネルギー	吸着エネルギー	潤滑剤末端官能基 保護膜質
	⑦ 平均分子回転直径	平均分子回転直径	平均分子回転直径	潤滑剤分子量

⑥潤滑剤の末端官能基の構造を吸着性の高いものにする（例えば Fomblin Z-DOL から Fomblin Z-Tetraol にする）、あるいは保護膜表面を吸着性の高い表面とする（例えば保護膜に窒素を添加する）とすると吸着エネルギーが増加するため、修復速度・摩擦移動速度・スピノフ速度はともに小さくなる。

⑦潤滑剤の分子量を大きくすると、平均分子回転直径が増加するため、摩擦移動速度は増加する。図 7-5 に示したように、磁気ディスクに関する設計パラメータを変えて潤滑膜設計手法のステップを繰り返すことにより、適切な潤滑膜の設計が可能となる。磁気ディスクに関する設計パラメータの適正化が不可能な場合は、磁気ディスク装置に関する設計パラメータを適正化することが必要となる。

このような潤滑膜設計手法の意義は、(1) 経時変化も含めた潤滑膜の設計が可能なこと、(2) 潤滑剤の選択に際し、基準が明確なため、短時間で明確な結論を出すことが可能なことと考えられる。

表 7-2. 修復・摩擦移動・スピノフ速度の各設計項目に対する依存性

	修復速度		摩擦移動速度		スピノフ速度	
	低減	増加	低減	増加	低減	増加
面粗さ 突起径 曲率半径	大	小	大	小	影響なし	
	突起高さ		影響なし	小	大	影響なし
保護膜ヤング率	影響なし		小	大	影響なし	
吸着エネルギー (末端官能基) (保護膜質)	大	小	大	小	大	小
潤滑剤分子量	影響小(*)		小	大	影響小(*)	

(*)は各モデルに基づく依存性であり、従来の研究では分子量が大きい方が修復・スピノフ速度ともに小さいという報告がある。

また、潤滑条件を満足させるための設計指針として、次の 2 つの設計項目よりなる潤滑膜設計指針が得られた。

- (1) 磁気ディスク装置の動作保証期間経過時の潤滑膜厚 $h_{spin}(t_{rot})$ が許容膜厚 h_c 以上であること。
((7-5) 式)
- (2) 前項で示されたスピノフ後の潤滑膜厚に調整した磁気ディスクで潤滑膜設計の対象となる動作試験を行い、試験後の潤滑膜厚減少量が 0 以下であること。((7-8) (7-9) 式を満足すること)

7-4 潤滑条件および潤滑膜設計手法提案の妥当性検証

ここでは、前節で提案した潤滑膜設計手法の妥当性を検証するとともに、設計手法の適用範囲を明らかにする。まず、潤滑膜設計手法を適用して設計し、実際に試験を行い検証する。磁気ヘッドは常に安定浮上しているのではなく、HDA内のアウトガスなどで磁気ディスクと間欠的に接触するため、長時間のシーク動作で磁気ディスクは摩耗する。そこで、本検証では、このシーク動作に対する潤滑膜の設計に潤滑膜設計手法を適用した場合を取り上げた。こうして設計した磁気ディスクを製品として磁気ディスク装置に組み込み、市場へ出荷してシーク動作に対する磁気ディスクの故障発生率を調査した。そして、潤滑膜の潤滑性に問題がないことを確認し、潤滑条件および潤滑膜設計手法の提案が妥当であることを検証する。

まず、潤滑剤 Fomblin AM2001 を膜厚 2.0nm となるように調整した磁気ディスクを HDA に組み込み、ヘッドを搭載せずに回転したときのスピノフによる潤滑膜厚減少を測定した。通常、磁気ディスク装置はハイエンドユーザのもとでは長時間連続稼働するので、保証時間を 5 年とすると、磁気ディスクは 60℃ で約 20000 時間に相当する連続シーク動作状態に置かれる。スピノフモデルに基づくモンテカルロ計算から 60℃、約 20000 時間後の潤滑膜厚 $h_{spin}(t_{rot})$ は約 1.1nm と算出される。計算結果を上記実験結果とともに図 7-6 に示す。計算条件は表 7-3 に示す。

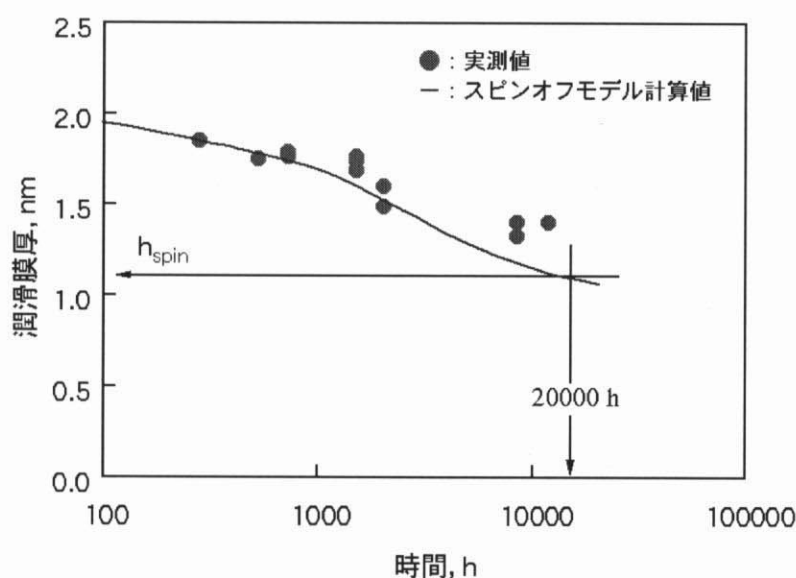


図 7-6. 潤滑膜設計手法の検証

(第 1 ステップ : スピノフによる潤滑膜厚減少量の見積もり)

表7-3. スピンオフ計算パラメータ

回転数	6300 min ⁻¹
動粘度 ν_{air}	$1.59 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
粘性係数 η_{air}	$1.66 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$
潤滑剤分子直径 d	1.2 nm
飽和潤滑膜厚 t_s	1.5 nm
潤滑剤分子量	3.0kg/mol
吸着エネルギー	
モバイル潤滑膜 E_m	35 kJ/mol
固定潤滑膜 E_b	75kJ/mol
固定潤滑膜厚比率 BR	0.7
内周端半径 R_{in}	12.5 mm
外周端半径 R_{out}	47.5 mm
分割点数	30
分割点間の距離 ΔL	1.17mm
温度 T	60°C

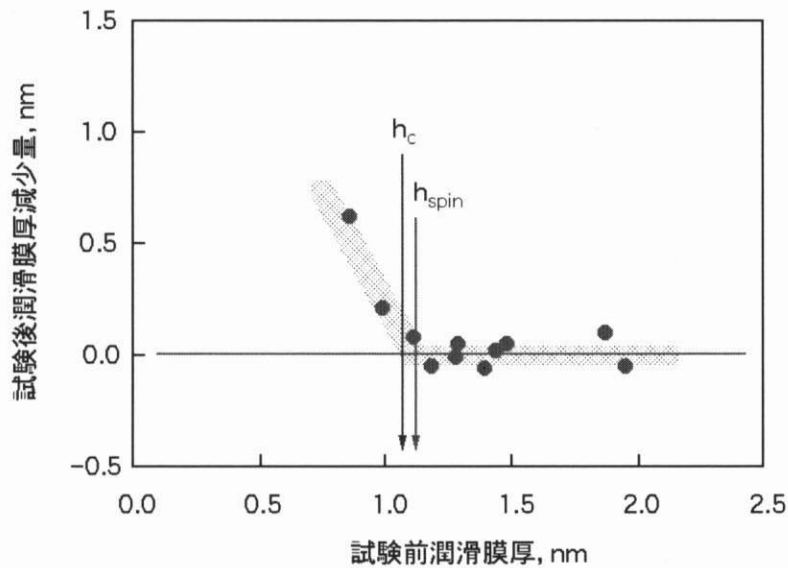


図 7-7. 試験前後の潤滑膜厚の比較結果

(第 2 ステップ : 摺動による潤滑膜厚減少量と修復による潤滑膜厚変化量の比較)

図でわかるように、計算結果と実験結果は定量的に一致している。次に、潤滑膜厚を変化させた数種類の磁気ディスクを作成して、磁気ディスク装置でシーク試験を、温度 60°C 環境で 100 時間行った。この条件で試験した理由は、高温にすることでアウトガスの影響により磁気ヘッドと磁気ディスクの間欠的な接触が加速されることと、あまり長時間行くと潤滑膜がスピンオフし、修復と摺動による膜厚変化のみを評価できないからである。そして、試験後の磁気ディスクの潤滑膜厚を測

定して試験前の潤滑膜厚と比較した。結果を図 7-7 に示す。

試験前の潤滑膜厚が 1.1nm 未満では、試験後の潤滑膜厚は大きく減少している。試験前の潤滑膜厚が 1.1nm 以上ではその減少はほとんどない。潤滑膜厚が 1.1nm 未満で、試験後の潤滑膜厚減少量が大きくなるので許容膜厚 h_c は 1.1nm である。

図 7-6 より、潤滑膜設計手法の第 1 項の、「スピノフ後の潤滑膜厚 $h_{spin}(t_{rot})$ (=1.1nm) が許容膜厚 h_c (=1.1nm) 以上である」は、満たされる。次に、図 7-7 より、潤滑膜厚が 1.1nm の時、試験後の潤滑膜厚減少量は測定誤差の範囲で 0nm であるため、潤滑膜設計手法の第 2 項の、「スピノフ後の潤滑膜厚 $h_{spin}(t_{rot})$ に調整した磁気ディスクで潤滑膜設計の対象となる動作試験を行い、試験後の潤滑膜厚減少量が 0 以下である」は、満たされる。この結果から、潤滑膜厚が 2.0nm になるように製造した磁気ディスクは、潤滑条件を満たしているため、動作保証期間内は常に潤滑膜厚が許容膜厚以上であり、シーク動作に対して十分な潤滑性をもつと考えられる。

次に、潤滑膜設計手法提案の妥当性検証として、上記の磁気ディスクを磁気ディスク装置に製品として組み込み、磁気ディスクのクラッシュ・摩耗など潤滑性が乏しいことが原因となる故障発生状況を市場モニタした。その結果、この磁気ディスク装置は 4 年以上稼働しているが磁気ディスクの摩耗による障害や故障は発生していなかった。これにより、潤滑膜設計手法に基づいて設計した磁気ディスクの潤滑膜では潤滑条件を満たしていることが確認された。すなわち、潤滑条件と潤滑膜設計手法提案の妥当性が検証された。

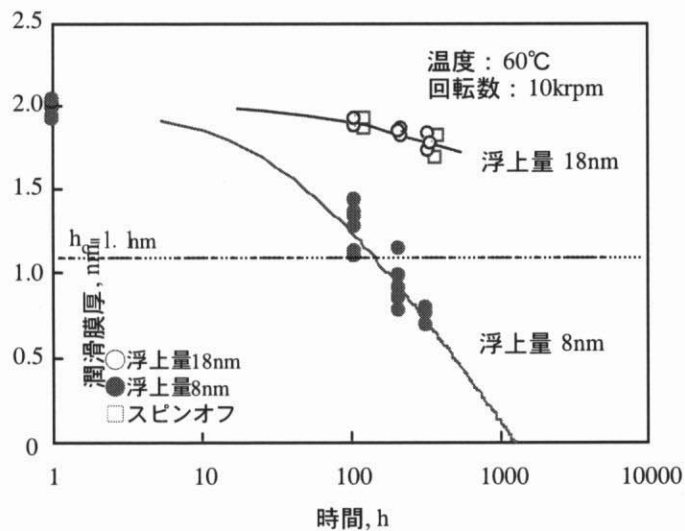


図 7-8. 低浮上ヘッドでシークした場合の潤滑膜厚の経時変化

さらに、7-2節で提案した潤滑条件が成立しない場合について検討する。図7-8はFomblin Z-DOLを塗布した磁気ディスクを浮上量8nmのヘッドと18nmのヘッドでシークした時の潤滑膜厚の時間推移を示したものである。浮上量18nmのヘッドでシークした場合に比べて、浮上量8nmのヘッドでシークした場合、潤滑膜厚の減少は著しく大きい。前述のAM2001の場合と同様に潤滑剤Fomblin Z-DOLの許容膜厚 h_c を1.1nmと仮定すると、数100時間で許容膜厚を下回る。つまり、ヘッド浮上量が8nmの場合、試験後の潤滑膜厚減少量が極めて大きいため、潤滑条件は成立しない。すなわち、短時間での潤滑膜厚減少量が極めて大きい場合は、潤滑膜設計手法の第2項の(7-7)式を満足できないということである。このような場合には、潤滑剤の種類の見直し、摺動の頻度の低減、摺動における接触面圧の低減などを行うことが必要となる。

7-5 本章のまとめ

潤滑膜が潤滑性を維持するための条件として潤滑条件を提案した。潤滑条件は、スピノフ・摺動・修復によって潤滑膜の被覆状態が変化しても、表面被覆率 θ が1以上となる条件である。潤滑条件は下記の式で表される。

$$-\int_0^{t_{cont}} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt \leq \int_0^{t_{uncant}} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \quad (7-3)$$

$$h_{spin}(t) + \int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt + \int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \geq h_c \quad (7-4)$$

次に、潤滑条件を満たす潤滑膜を設計するための手法として、潤滑膜設計手法を提案した。潤滑膜設計手法は、以下の通りである。

- (1)保証時間経過時の潤滑膜厚 $h_{spin}(t_{rot})$ を求める。
- (2)潤滑膜厚を変数として磁気ディスクの摩耗試験を行い、保護膜が摩耗しない最低の潤滑膜厚を求め、これを許容膜厚 h_c とする。そして、次式を満たすことを確認する。

$$h_{spin}(t_{rot}) \geq h_c \quad (7-5)$$

- (3)潤滑膜設計の対象とする動作(CSS動作やシーク動作)を潤滑膜がスピノフしない時間 t の間行う。
- (4)試験後の潤滑膜厚 $h(t)$ を測定し、結果を次の3つの場合に当てはめ、修復と摺動による潤滑膜厚変化のバランス状態を確認する。

$$\textcircled{1} h_{spin}(t_{rot}) < h(t) \text{ の場合 : } -\int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt < \int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \quad (7-8)$$

$$\textcircled{2} h_{spin}(t_{rot}) = h(t) \text{ の場合 : } -\int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt = \int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \quad (7-9)$$

$$\textcircled{3} h_{spin}(t_{rot}) > h(t) \text{ の場合 : } -\int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt > \int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \quad (7-10)$$

試験結果が①、②に当てはまる場合、潤滑状態を満足する。試験結果が③に当てはまる場合、磁気ディスク装置の稼働中に潤滑膜厚が減少するため、潤滑条件を満足しない。(7-5) 式、(7-6) 式または(7-7) 式を満たさない場合は、これらの式を満たすように表 7-2 に示した潤滑膜の吸着エネルギーなどを変化させ、上記 (1) ~ (4) のステップを繰り返し適正化を図る。

さらに、潤滑膜設計手法に基づき設計した磁気ディスクは潤滑条件を満たしていることを、検証した。潤滑膜設計手法に基づき設計した磁気ディスクを組み込んだ磁気ディスク装置について市場での故障発生状況を調査した。その結果、その磁気ディスクは4年以上稼働して耐摩耗性に問題がないことから、潤滑条件と潤滑膜設計手法提案の妥当性を確認した。さらに、磁気ヘッドの浮上量が低くなり、磁気ディスクとの接触頻度が多くなると摩耗が著しく進行するため、潤滑条件が成立しなくなることを実験結果で示した。

第8章 潤滑剤供給方式の提案

8-1 本章の目的

第7章で潤滑条件が成立しない場合について検討した。図7-7に示したように浮上量8nmの磁気ヘッドでシーク試験を行った場合、磁気ヘッドとの接触で潤滑膜厚は著しく減少した。このように磁気ヘッドの浮上量が低く、磁気ヘッドとの摺動で潤滑膜厚が著しく減少する場合、潤滑条件が成立しないため、摺動条件の改善や潤滑剤の見直しが必要となることを述べた。

しかし、摺動条件の改善には磁気ヘッドや位置決め機構部などの新規設計が必要となるため、開発コストの増加、開発期間の長期化などの問題が発生する。そのため、摺動条件の改善はかなり困難である。

また、潤滑剤の見直しを行うにしても、摺動による潤滑膜厚減少の小さな潤滑剤が市販されていれば問題ないが、そうでなければ潤滑剤そのものを開発することが必要となる。これにも多大な開発コスト、開発期間を要する。従って、潤滑剤の見直しもかなり困難である。

これらのことから、磁気ヘッドが低浮上化しても潤滑条件を成立させる方法を見出すことは重要な検討課題であることがわかる。

そこで、図7-2を基にして、磁気ヘッドがさらに低浮上化した場合における潤滑条件が成立しない潤滑膜の問題点を考察する。そして、その問題点を解決するための1つの方法として、磁気ディスクの潤滑膜に外部から潤滑剤を供給する潤滑剤供給方式を提案する。また、この潤滑剤供給方式が潤滑条件を満足させることに有効であることを検証した。

8-2 潤滑剤供給方式の提案

まず、潤滑膜の被覆状態変化と潤滑状態との関係を示した図7-2を基に、現状の潤滑膜が持つ問題点を考察すると次の2点となる。

- (1) 磁気ヘッドと磁気ディスクが厳しい摺動条件で摺動すると潤滑膜厚が急激に減少する。つまり、摺動による潤滑膜厚減少量（摺動減少量）が修復による潤滑膜厚増加量（修復量）より著しく大きい場合は、潤滑条件を満足しない。
- (2) 磁気ディスクが高温環境下で高速回転するとスピノフする。

さらに、潤滑剤の高性能化で現状の潤滑膜の持つ問題点を解決できるか否かを考えるために、潤滑剤の吸着エネルギーという観点でその問題点を考察すると次のように考えられる。

第1項目「摺動減少量が修復量より大きい」

図7-1に示したように、摺動減少量・修復量は吸着エネルギーの変化に対し同じ傾向を示すことか

ら、摺動減少量の低減と修復量の増加とを両立させることはできない。

第2項目「潤滑膜がスピノフする」

吸着エネルギーが大きくなるとスピノフによる潤滑膜厚減少（スピノフ量）は少なくなる。しかし、修復量も少なくなる。すなわち、吸着エネルギーの変化に対しスピノフ量と修復量とが同じ傾向を示す。つまり、スピノフ量の低減と修復量の増加とを両立させることはできない。

第1、2項目で述べた問題を整理すると、修復量の増加と摺動減少量・スピノフ量の低減とが相反する関係となっていることがわかる。その相反する関係のため、潤滑剤の吸着エネルギーの適正化で、つまり潤滑剤の高性能化で、修復量の増加と摺動減少量・スピノフ量の低減とは容易にできない。

上記の問題を解決する方法として、図8-1に示したように、磁気ディスク上に外部から潤滑剤を供給することを考えた。外部から供給された潤滑剤は、修復量を増加させるとともに、スピノフした潤滑剤を補充する。このため、磁気ディスク上の潤滑剤の吸着エネルギーに関係なく修復量は増加し、スピノフ量は小さくなるため、潤滑性は向上すると推定される。

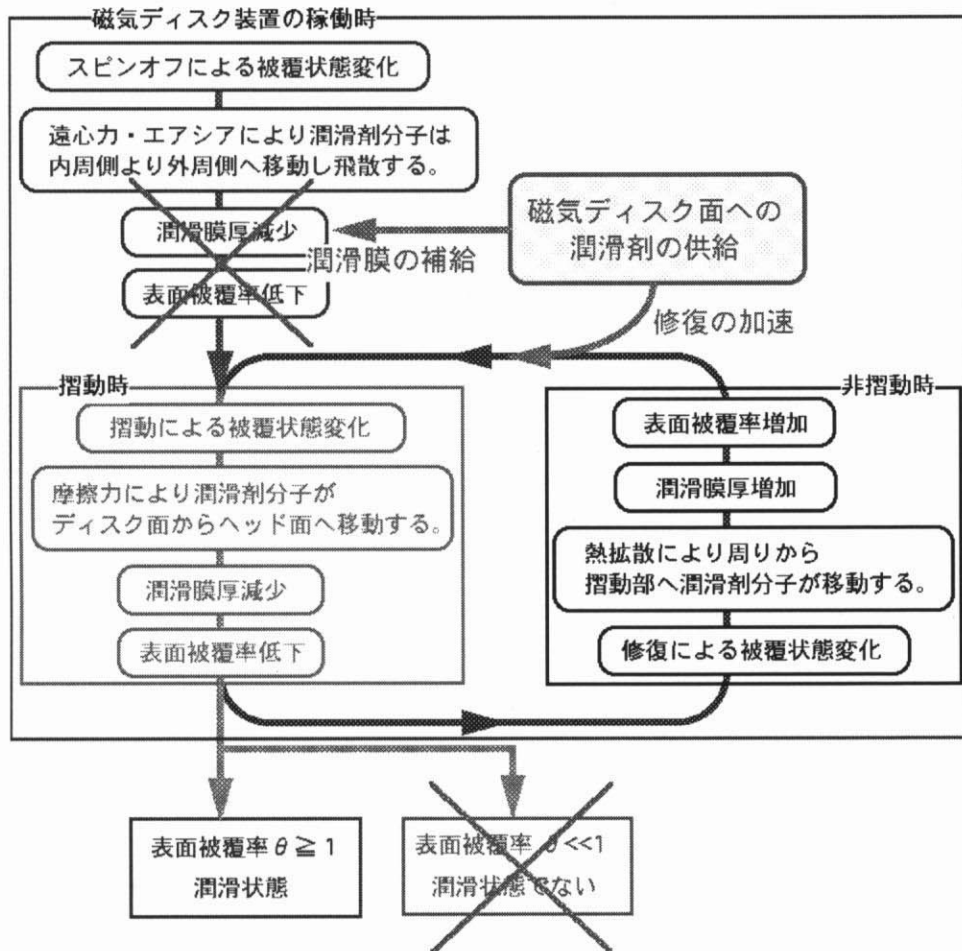


図8-1. 潤滑剤供給方式に期待される効果を示す概念図

8-3 潤滑剤供給方式の検証

潤滑剤を供給する方法として、磁気ディスク装置内に潤滑剤の供給源を作り、そこから潤滑剤をガスとして磁気ディスク面に供給することを考える。この方法を潤滑剤供給方式と呼ぶことにする。本論文では、図 8-2 のようにヘッドのサスペンションに潤滑剤を滴下して、その潤滑剤を磁気ディスクに供給する方法を検討した。そして、この潤滑剤供給方式により、潤滑性が向上することを実験によって確認した。

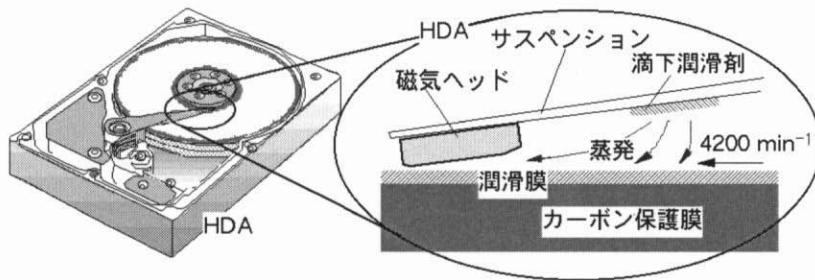


図 8-2. 潤滑剤供給方式の概念図

8-3-1 検証のための実験方法

図 8-2 のように潤滑剤をヘッドサスペンション部に予め滴下し、その潤滑剤を供給源とした。そして、(1) 試験中における潤滑剤の磁気ディスク面への安定供給、(2) 潤滑剤を供給し続けることが可能な初期滴下量、(3) 潤滑剤供給がもたらす潤滑膜のスピンオフの低減、(4) 潤滑剤供給がもたらす潤滑性の向上、の 4 点を実験により確認した。

試験装置は 2.5 インチ型の HDA を改造した、磁気ディスク 1 枚、磁気ヘッド 1 本を使用して試験できるスピンスタードである。スピンドル回転数を 4200min^{-1} 、試験ヘッド半径位置を 15mm にして、連続的にヘッドを浮上させるフォローイング試験と呼ばれる試験を行った。スピンスタードは恒温槽内に設置し、環境温度を一定にして試験した。供給潤滑剤には、蒸発しやすく、修復量の増加が期待できる平均分子量が 2000 と小さい潤滑剤 Fomblin Z-DOL を用いた。磁気ディスクの潤滑剤は供給潤滑剤との相溶性を考慮して、平均分子量 3000 の潤滑剤 Fomblin Z-DOL である。サスペンションに滴下する潤滑剤は、マイクロピペットで滴下体積を調整した。試験温度は $70\pm 2^\circ\text{C}$ であり、湿度は約 30% である。

潤滑剤はガスとして磁気ディスク面に供給されるか否か、潤滑剤が供給される速度はどの程度か、を定量的に把握するために、フォローイング試験開始から 0、100、600、1500 時間経過した時点で、それぞれ潤滑剤を塗布していない無潤滑ディスクに組み替えてフォローイング試験を行い、そのディスクに吸着した潤滑膜厚を FTIR で測定した。また、無潤滑ディスクを試験するときは、ガスとして潤滑剤が供給されることを確認するため、磁気ヘッドの無いサスペンションを組み込んで試験した。

8-3-2 潤滑剤供給方式の検証

サスペンションに滴下する潤滑剤の量は 0.3、0.03mg とした。0、100、600、1500 時間経過したとき、無潤滑ディスクに組み替えて 24 時間だけフォローイング試験を行い、試験後のディスクの潤滑膜厚を測定した。その結果を図 8-3 に示す。0.03mg の潤滑剤を滴下した場合は、時間経過とともに 24 時間当たりの潤滑剤の吸着量は減少し、1500 時間でほぼ 0 となっている。一方、潤滑剤を 0.3mg 滴下した場合は、100 時間まで潤滑剤吸着量は増加し、その後、時間のとともに減少していく。減少の対数勾配は 0.3、0.03mg でほとんど同じである。0.3mg の滴下量の場合には 10000 時間後においても 0.5~0.6nm/24h の潤滑剤の吸着量と推定される。この結果より、潤滑剤の量を最適化すれば数 10000 時以上、潤滑剤をガス状態で供給し続けることが可能であることがわかった。

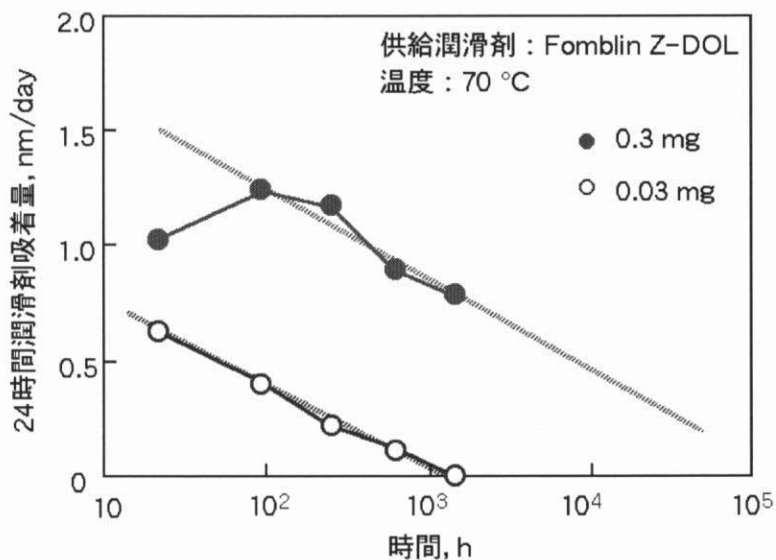
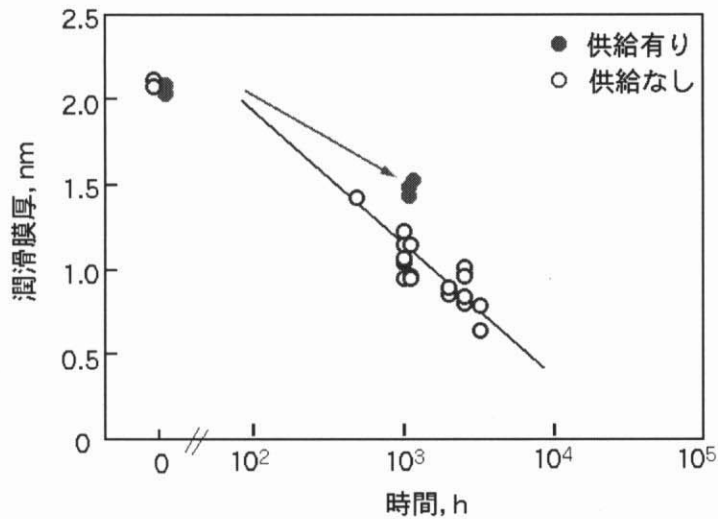
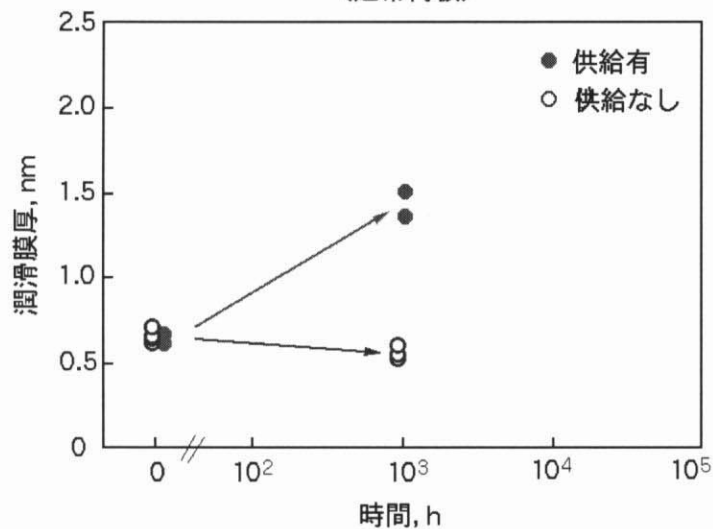


図 8-3. 24 時間潤滑剤吸着量の経時変化

次に、潤滑剤を供給すれば潤滑膜のスピノフが少なくなるか否か、を確認した。結果を図 8-4 に示す。実験には、潤滑膜厚を約 2.0nm とした通常の磁気ディスクと、溶媒でリンスして潤滑膜厚が約 0.6nm となった磁気ディスクを使用した。リンスした磁気ディスクの潤滑膜は固定潤滑膜だけとなり潤滑膜厚も薄くなっているため、長時間スピノフした後の潤滑膜の状態に近いと推測される。そこで、スピノフ後の磁気ディスクでも、潤滑剤が供給されるか否かを確認するためリンスした磁気ディスクも使用した。



(a) 潤滑剤供給しつつ稼働した場合の潤滑膜減少 (通常円板)



(b) 潤滑剤供給しつつ稼働した場合の潤滑膜減少 (リンス円板の場合)

図 8-4. 潤滑剤供給方式の膜厚減少抑制効果

潤滑剤の供給がある場合と無い場合で上記の磁気ディスクを 1000 時間回転させた後の潤滑膜厚を比較した。図 8-4-(a)が通常の磁気ディスクの場合であり、図 8-4-(b)はリンスした磁気ディスクの場合である。通常の磁気ディスクの場合、潤滑剤の供給があると 1000 時間後の減少量は約 0.5nm であるが、供給が無い場合だと 0.8~0.9nm 減少している。リンスした磁気ディスクの場合、潤滑剤の供給があると初期の潤滑膜厚よりも約 0.8nm 増加しているが、供給が無い場合だと 0.1~0.2nm ほど減少している。

この試験結果は、潤滑膜のスピンオフ速度と磁気ディスクの外部から潤滑剤が供給される供給速度の間の次の関係を示唆している。すなわち、スピンオフ速度が供給速度より大きい場合、磁気ディスク面の潤滑膜厚は減少するが、スピンオフ速度が供給速度より小さい場合、潤滑膜厚は増加するという関係である。

つまり、スピンオフ速度と供給速度とをバランスさせれば、磁気ディスクの潤滑膜厚を経時的に一定に保つことが可能なことを示唆している。少なくとも、この実験結果から、潤滑剤を供給することで、潤滑膜のスピンオフを少なくすることが可能であることが確認された。

さらに、潤滑剤の供給によって潤滑性が向上するか否かを評価するため、磁気ヘッドの浮上量を 5nm 以下に設定して、連続摺動状態でのフォローイング試験を行い、クラッシュまでの時間を測定した。この摩耗試験は、サスペンションに滴下する潤滑剤の量をパラメータとして行った。結果を図 8-5 に示す。潤滑剤の滴下量の増加に伴ってクラッシュまでの時間は急激に増加する。潤滑剤滴下量が 0.1mg 以上では、クラッシュまでの時間が供給が無い場合に比較して 100 倍以上の時間となっている。この結果が示すように、潤滑剤供給方式における潤滑膜の潤滑性は、現状の HDI 方式における潤滑性より向上している。

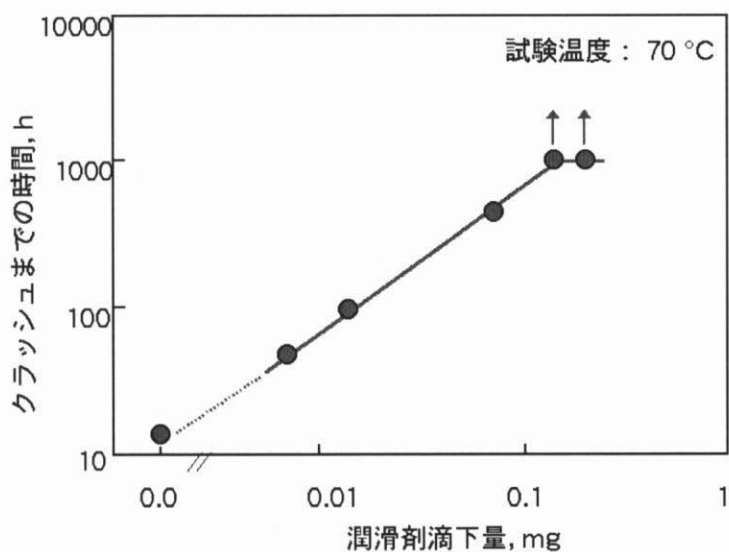


図 8-5. 潤滑剤供給方式による潤滑性向上効果

このように、潤滑剤供給方式は潤滑条件を満足させる1つの手段として極めて有効であることが上記の実験結果により確認された。

8-3-3 実験結果のまとめ

ヘッドサスペンションに Fomblin Z-DOL を 0.3mg 滴下すると、環境温度 70℃ の場合、磁気ディスク面に潤滑剤を 10000 時間以上の間、0.5nm/24h 以上の潤滑剤吸着量で供給できる。また、潤滑剤の供給によってスピノフは少なくなる。さらに、連続接触状態のフォローイング試験において、潤滑剤供給方式は現状の潤滑剤を供給しない HDI 方式より 100 倍以上潤滑性が向上した。

8-4 本章のまとめ

本章では、潤滑剤供給方式を提案し、実験により検証した。その結果、潤滑剤供給方式は、潤滑条件を満足させる1つの手段として極めて有効であることが上記の実験結果により確認された。結論をまとめると次の通りである。

- (1) 潤滑剤供給方式は、磁気ディスク面に潤滑剤をガスとして長時間供給し続けることができるので、潤滑膜のスピノフ量の低減および潤滑性の向上が可能となる。

第9章 本研究成果の適用範囲と他分野への応用例

本章では HDI におけるトライボロジの特殊性を、HDI と他分野におけるトライボロジにおける研究開発の目的、扱われる摺動条件の比較から考察し、その後、本研究の適用範囲と他分野への応用例について述べる。

9-1 HDI におけるトライボロジの特殊性

HDI におけるトライボロジは、他分野（一般的な転がり軸受け・滑り軸受けを用いた機械分野）におけるトライボロジと大きく異なっている。まず、その目的を比較する。HDI におけるトライボロジの研究開発は、磁気ヘッドと磁気ディスクとの間の隙間を一定に保ち、かつその隙間（浮上量）を小さくすることを目的としている。しかし、上述した他分野のトライボロジでは、負荷を支持することが目的であり、その隙間の絶対値や変動を制御することを重視していない。この点において、HDI のトライボロジと他分野のトライボロジで異なっている。次に、HDI と他分野におけるトライボロジで扱われる摺動条件の比較を以下に行う。

- (1) 摺動環境：磁気ディスク装置は一般的に温度 0～70℃、湿度 10～80%、気圧 0.7～1 気圧で使用されるので、他分野と大きな差はない。
- (2) 摺動速度：磁気ディスクと磁気ヘッドとの相対速度は 5m/s～数 10m/s であり、他分野の軸受け等と比較して高速である。
- (3) 摺動荷重：磁気ヘッドの荷重は、現状 10mN～数 10mN であり、他分野の軸受け等は数ニュートンにおよぶため、他分野と比較すると非常に小さい。
- (4) 摺動材料：磁気ヘッド・磁気ディスクともカーボン保護膜が形成されているのが一般的である。他分野の軸受けでは金属材料などが摺動部に用いられたりしており、カーボン・カーボンの摺動材料の組合せは少ない。また、保護膜の膜厚も数 nm と極薄膜であり、他分野と著しく異なる。
- (5) 摺動面の粗さ：磁気ディスクの面粗さは数 nm～10nm 程度であり、機械による平坦化加工の最高レベルの加工精度を要求される。そのため、他分野の軸受け面の面粗さと比較すると著しく小さい。
- (6) 潤滑膜の厚さ・種類：磁気ディスクの潤滑膜の膜厚は 1～2nm であり、他分野の軸受けの場合の油膜厚さと比較すると、著しく薄い。また、磁気ディスクにはフッ素系潤滑剤（PFPE）が一般的に用いられるが、他分野の軸受けには潤滑剤として hidrocarbon 系潤滑剤が一般的に用いられる。
- (7) メンテナンス性：磁気ディスクは磁気ディスク装置に組み込まれた後は、動作保証期間内に

潤滑剤の補給、磁気ディスク・磁気ヘッドの交換などはできない。

以上のことから、HDIにおけるトライボロジは他分野のトライボロジと比較して、高速、軽荷重、極薄膜、極平滑表面、非メンテナンスという摺動条件で大きく異なる。

9-2 本研究成果の適用範囲

本研究成果の適用範囲は、前節に示した HDI におけるトライボロジの摺動条件に似た摺動条件を対象とする分野に限られる。また、本研究は磁気ディスクの潤滑膜に関する研究であり、研究の対象とした潤滑膜の材料が PFPE、特に Fomblin 系潤滑剤であるため、以下のことを考慮しなければならない。

潤滑剤が Fomblin 系潤滑剤ではなく他の主鎖構造を持つ潤滑剤（例えば、片末端官能基しか持たない Demnum 系潤滑剤）の場合は、潤滑剤分子の吸着形態そのものが異なる可能性がある。PFPE ではなく hidrocarbon 系潤滑剤の場合も同様に吸着形態が異なる可能性がある。そのため、吸着モデルの見直しが必要である。それに伴い、潤滑剤分子挙動モデル（修復モデル、摩耗モデル、スピノフモデル）の見直しも必要となる。

また、保護膜の材料がカーボン以外の材料の場合も潤滑剤の吸着形態が異なる可能性がある。そのため、吸着モデルの見直しが必要である。さらに、本研究では潤滑機構におけるテクスチャ形状の影響を接触面圧というパラメータで論じたが、テクスチャの方向性の影響を考慮していない。テクスチャ形状が異方性を有しており、その異方性で接触面圧で代表できないような効果や影響が有る場合には、本研究成果は適用できないと考えられる。

最後に、磁気ヘッドとの摺動状態という観点から本研究を考察する。本研究は磁気ヘッドと磁気ディスクとの2体間の接触摺動を論じており、摩耗粉や塵埃が関与した3体間の摺動状態を前提とはしていない。実際の HDI では摩耗粉や塵埃が関与したクラッシュも発生する。このような摩耗粉や塵埃が関与するアブレイブ摩耗やクラッシュに関して、本研究の成果は適用できない。

9-3 本研究成果の他分野への応用例

ここでは、本研究成果の他分野への応用の可能性を検討する。9-1 節でも検討したように HDI のトライボロジは一般的な軸受け等のトライボロジとは異なっており、それらの分野へ潤滑膜の潤滑機構の概念を応用できないと考えられる。

しかし、特殊なトライボロジを必要とする分野、たとえばマイクロマシンの分野への応用は可能である。マイクロマシンではその部品そのものが小さいため、許容される摩耗が小さいこと、また、加工精度が優れているため摺動部の表面粗さも平坦なこと、さらに、荷重が小さいこと、などから

マイクロマシンのトライボロジに本研究成果である潤滑膜設計の概念を応用し、その潤滑膜設計を行うことは有効である。また、潤滑剤を供給することで潤滑膜の劣化を防ぎ、寿命を延ばしたり、メンテナンスを少なくするなどの応用も可能であると考えている。例えば、Stiram Sundararajan M. S. はマイクロモータの摩耗を低減するために Fomblin Z-DOL を潤滑剤として検討している⁽¹²²⁾。

磁気ディスク装置以外の情報記録装置へも、その摺動条件が極めて似通っているため本研究の成果を応用できる。たとえば、磁気テープやフロッピーディスクなど、高速、低荷重の摺動へ潤滑膜設計手順の概念を応用し、潤滑膜設計を行うことは有効である。

第2章で得たフッ素コーティング被膜処理をした探針を用いた AFM 測定も、他分野への応用が考えられる。例えば、DNA を AFM で観察する場合は吸着水によるメニスカスが発生し、その影響を受けるため、熱処理を行って観察する必要がある⁽¹²³⁾。本研究で示した AFM 測定は探針と試料との間のメニスカス力の影響を受けにくいことが特徴であるから、上記のような生体試料などの表面に液体が多いものの観察、あるいは試料表面に吸着した有機物コンタミネーションの観察、などには有効である。

また、マイクロマシンでは表面力が大きく作用するため、摩擦係数は一般的な機械の摩擦係数と比較すると大きい。そこで、フッ素コーティングをマイクロマシンの摺動部に行い、メニスカス力を低減して摩擦係数を下げるという応用の可能性がある。AFM を利用した情報記憶装置の開発も行われているが、この装置でもメニスカス力の低減が正確に情報の記録・再生を行うために必要となる。そこで、探針をフッ素コーティングすればメニスカス力の低減が可能となる。

磁気ディスクの潤滑膜観察以外への応用として、磁気ヘッドへの応用が考えられる。CSS 方式の磁気ディスク装置ではスティクションが増加する問題がある。そこで、磁気ヘッドの表面をフッ素コーティングすれば、潤滑剤によるメニスカス力を低減でき、スティクションの増加を抑制することが可能である。

以上のように本研究の成果は多くの他分野へ応用できると考える。そこで、フッ素コーティングと潤滑膜設計手法の応用をマイクロマシンについて詳細に論じる。従来の研究結果でマイクロマシンにおけるトライボロジ的な問題は、摺動部の摩耗とスティクションの増加であると指摘されている⁽¹²²⁾。例えば、図 9-1 に示した非常に小型のマイクロモータでは、ハブとロータとのすき間が 0.25 μm であり、それぞれの面粗さが 14~21nmRMS と小さい。

そのため、ハブとロータとの間に水のメニスカスが形成されてスティクションが増加する。その問題を解決するため、ロータに Fomblin Z-DOL を塗布した後にリンスして固定潤滑膜を 1nm の厚さで形成するとスティクションの増加が無いと報告している。しかし、潤滑膜設計手法の概念に基づき、ロータとハブとの摺動を考えると、固定潤滑膜のみでは潤滑膜の修復が期待できないため長時間の稼働で潤滑膜が摩耗する問題がある。この問題を解決するためには、メニスカス力を小さくするとともにモバイル潤滑膜を含んだ潤滑膜をロータかハブに形成することが必要である。そこで、

本研究の成果を応用したモータの摩耗を低減する方法を図 9-2 に示す。まず最初に、①ロータあるいはハブにフッ素コーティング被膜を形成することでスティクションの増加を抑える。次に、②吸着エネルギーの大きい潤滑膜を形成することで潤滑膜の摺動減少量を少なくする。さらに、③モータの外部より吸着エネルギーが小さく低粘度の潤滑剤を供給することで潤滑膜の修復量を多くする。このような方法により、スティクションの低減と摩耗の低減を両立することが可能となり、マイクロモータの信頼性を向上することが可能であると考えた。

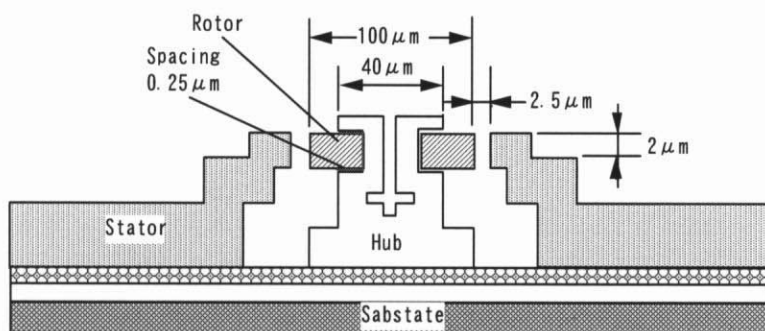


図9-1. マイクロモータの構造と代表的寸法の例 [参考文献 (112) より転記]

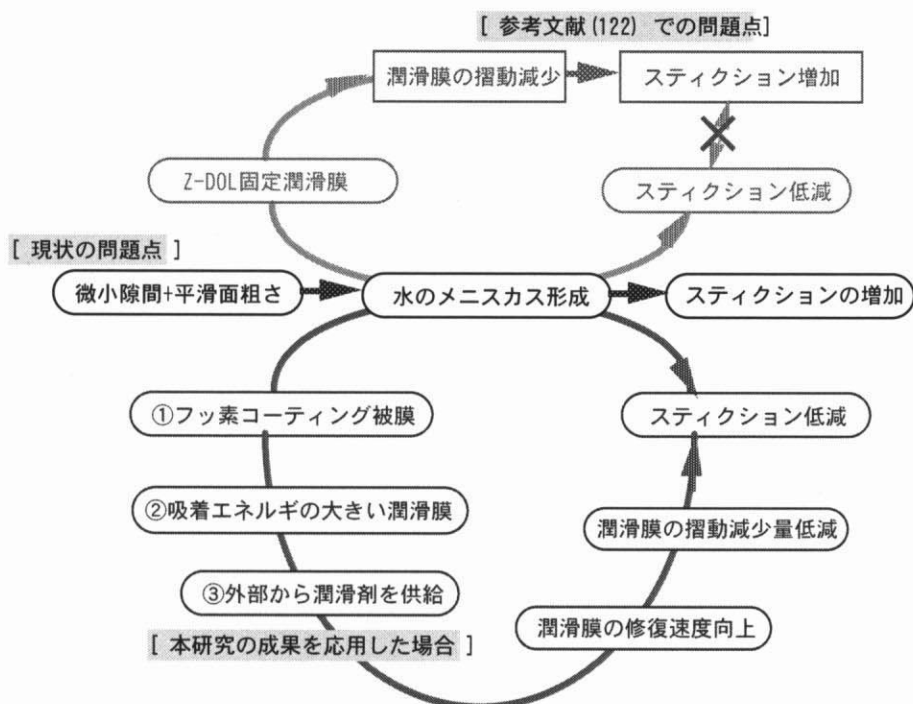


図 9-2. 本研究の成果をマイクロモータに応用した摩耗とスティクションの低減.

第 10 章 結論

10-1 本研究の結論

修復・摺動・スピノフによる磁気ディスク潤滑膜の被覆状態変化機構を潤滑剤分子の挙動に基づき解明した。また、潤滑膜が潤滑状態を維持するための条件として、潤滑条件を明らかにした。そして、潤滑条件を満たす潤滑膜を設計するための実際的な手法として潤滑膜設計手法を、提案した。

潤滑膜の被覆状態変化機構、潤滑条件および潤滑膜設計手法について以下に述べる。

10-1-1 潤滑膜の被覆状態変化機構

修復・摺動・スピノフによる潤滑膜の被覆状態変化は、次のような潤滑剤分子の挙動によるものである。すなわち、以下のような潤滑剤分子の挙動である。

磁気ディスク上の潤滑膜は、潤滑剤分子が多くても 2 層に層状に吸着している。潤滑剤分子は、吸着エネルギーの大きさによって固定潤滑剤分子とモバイル潤滑剤分子に区別され、モバイル潤滑剤分子は第 1 層目のグレイン凹部に選択的に吸着している。分子が静置時はランダムコイル状に分子が吸着しているが、遠心力・エアシアや摩擦力の外力 F が分子に作用すると、伸びて隣の空の吸着点に移動する。また、その力が働かなくなると、同様に熱振動で隣の空の吸着点に移動して潤滑膜は修復される。外力 F が作用したときの外力方向への移動確率 p_F および修復のときの移動確率 p_r は、潤滑剤分子の吸着エネルギーを E 、潤滑剤分子に作用する外力を F 、温度を T 、としたとき、それぞれ次式で表される。

$$p_F = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{2E}{RT}\right) \left[\exp\left(\frac{Fd}{2kT}\right) - \exp\left(-\frac{Fd}{2kT}\right) \right] \quad (10-1)$$

$$p_r = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (10-2)$$

ここで、気体定数を R 、ボルツマン定数を k 、プランク定数を h 、潤滑剤分子の分子回転直径を d とした。上記の移動確率に従った潤滑剤分子の移動にともない、潤滑膜の表面被覆率 θ は変化する。

10-1-2 潤滑条件

潤滑膜の表面被覆率が1以上であれば、潤滑状態にあることを検証した。そして、表面被覆率が常に1以上となるスピノフ・摺動・修復による潤滑膜の被覆状態変化の相互関係を潤滑条件として導いた。

潤滑条件は下記の式で表される。

$$-\int_0^{t_{cont}} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt \leq \int_0^{t_{uncont}} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \quad (10-3)$$

$$h_{spin}(t) + \int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt + \int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \geq h_c \quad (10-4)$$

ここで、 t_{cont} は一回の接触時間を、 t_{uncont} は次回の接触までの時間を、摺動による潤滑膜厚の変化速度を $(\partial h / \partial t)_s$ 、修復による潤滑膜厚の変化速度を $(\partial h / \partial t)_r$ 、時間 t 後のスピノフ後の潤滑膜厚を $h_{spin}(t)$ 、許容膜厚を h_c とする。

10-1-3 潤滑膜設計手法

潤滑膜設計手法は、以下の手順で潤滑膜を設計する手法である。

- (1)保証時間経過時の潤滑膜厚 $h_{spin}(t_{rot})$ を求める。
- (2)潤滑膜厚を変数として磁気ディスクの摩耗試験を行い、保護膜が摩耗しない最低の潤滑膜厚を求め、これを許容膜厚 h_c とする。そして、次式を満たすことを確認する。

$$h_{spin}(t_{rot}) \geq h_c \quad (10-5)$$

- (3)潤滑膜設計の対象とする動作（CSS 動作やシーク動作）を潤滑膜がスピノフしない時間 t の間行う。
- (4)試験後の潤滑膜厚 $h(t)$ を測定し、結果を次の3つの場合にあてはめ、修復と摺動による潤滑膜厚変化のバランス状態を確認する。

$$\textcircled{1} h_{spin}(t_{rot}) < h(t) \text{ の場合 : } -\int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt < \int_0^t \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \quad (10-6)$$

$$\textcircled{2} h_{spin}(t_{rot}) = h(t) \text{ の場合 : } - \int_0^i \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt = \int_0^i \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \quad (10-7)$$

$$\textcircled{3} h_{spin}(t_{rot}) > h(t) \text{ の場合 : } - \int_0^i \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_s dt > \int_0^i \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_r dt \quad (10-8)$$

試験結果が①、②に当てはまる場合、潤滑状態を満足する。試験結果が③に当てはまる場合、磁気ディスク装置の稼働中に潤滑膜厚が減少するため、潤滑条件を満足しない。(10-5)式、(10-6)式または(10-7)式を満たさない場合は、これらの式を満たすように表10-1に示した潤滑膜の吸着エネルギーなどを変化させ、上記(1)～(4)のステップを繰り返し適正化を図る。

表 10-1. 修復・摩擦移動・スピノフ速度の各設計項目に対する依存性

	修復速度		摩擦移動速度		スピノフ速度	
	低減	増加	低減	増加	低減	増加
面粗さ 突起径 曲率半径	大	小	大	小	影響なし	
	影響なし		小	大	影響なし	
保護膜ヤング率	影響なし		小	大	影響なし	
吸着エネルギー (末端官能基) (保護膜質)	大	小	大	小	大	小
潤滑剤分子量	影響小 ^(*)		小	大	影響小 ^(*)	

10-2 本研究の意義

本研究の意義について、以下に述べる。極薄膜である磁気ディスク潤滑膜の被覆状態変化に関する従来の研究では、潤滑膜を連続体として扱っていたため、スピノフ・摺動・修復などによる潤滑膜の被覆状態変化を計算によって予測できなかった。また、被覆状態についても不明な部分が多かった。本研究では、AFM観察手法により、潤滑膜の被覆状態を明らかにし、潤滑膜の被覆状態変化機構を潤滑剤分子の挙動に基づき解明した。その結果から、潤滑条件、潤滑膜設計手法を提案した。この潤滑膜設計手法を適用することで効率的に潤滑膜を設計できることになる。そして、設計した潤滑膜は潤滑条件を満足するため、磁気ディスクの信頼性は向上する。

謝 辞

東京大学の中尾政之先生には、本論文の執筆に当たって、主査を快く引き受けていただいた上、論旨の決定から語句の使い方にいたるまで、何回にもわたる文章推敲等、ご指導を頂き、感謝と尊敬の念にたえません。本論文の執筆を始めて、中尾教授のご指導のもと研究者・エンジニアのあり方、技術開発の進め方について深く考える機会を持てたことを大変幸せに思うとともに、深く感謝いたします。また、多くの時間を費やして御討論ならびにご指導いただきました田中正人先生、光石衛先生、鈴木健司先生、濱口哲也先生に深く感謝いたします。

(株)日立製作所小田原工場(現(株)日立製作所ストレージ事業部)入社当初より、企業における設計者の在り方をご指導頂くとともに、学会発表・論文投稿などを快く許可して頂きました大浦正樹氏(当時(株)日立製作所ストレージ事業部)ならびに白倉高明氏((株)日立製作所ストレージ事業部)、加藤明氏((株)日立製作所ストレージ事業部)に深く感謝いたします。会社の先輩として、技術者としてご助言・励ましを頂いた小島修一氏((株)日立製作所ストレージ事業部)、日々の業務の中で実験結果について議論して頂いた松本浩之氏((株)日立製作所ストレージ事業部)に深くお礼申し上げます。また、学位論文執筆を勧めて頂き、中尾政之教授にご紹介くださっただけでなく、つたない論文にご指導いただいた濱口哲也先生(現東京大学助教授、当時(株)日立製作所機械研究所)にも深くお礼申し上げます。これらの方々のおかげで、ご指導、ご協力なくしては、私の成長もこの論文もなかったに違いありません。

最後に私的ではありますが、4年間にわたる論文執筆の期間、休日に出勤する私を怒りもせず許してくれ、論文の推敲を夜遅くまで手伝ってくれた妻のさとみに深く感謝します。そして、本論文の完成を長男の祐樹、次男の拓実とともに喜び、この経験を生かして、エンジニアとしてさらに社会に貢献したいと考えています。本当に多くの人に助けられて、今の自分があるということを改めて認識し、感謝したいと思います。

2003年 春

参考文献

1. Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices, B. Bhushan, Springer Verlag, N. Y. 1990.
2. On Tribological Problems in Magnetic Disk Recording Technology, F. E. Talke, *Wear*, 190 (1995), pp.232-238.
3. ヘッドディスクインターフェースのパラダイムシフト, 三矢保永, *トライボロジスト*, 43 (1998) 5, pp. 357-362.
4. Correlation Between Contact Start/Stop and Constant Speed Drag Testing in Magnetic Head-Disk Tribology, S. K. Ganepathi and F. E. Talke, *ASME J. of Trib.*, 115 (1993), pp. 387-391.
5. Slider/Disk Interaction During the Landing Process, H. L. Leo, S. R. Chapman, and R. M. Crone, *ASME J. of Trib.*, 117 (1995), pp. 119-123.
6. ニアコンタクト記録インターフェース, 徳山幹夫, 川久保洋一, *トライボロジスト*, 43 (1998) 5, pp. 363-369.
7. Tribology of Thin Film Media in Both Flying and Sliding Modes, M. H. Azarian, C. L. Bauer, and M. S. Jhon, *Wear*, 168 (1993), pp. 59-76.
8. Non-Gaussian Surface Roughness Distribution of Magnetic Media for Minimum Friction/Stiction, B. Bhushan and S. Chilamakuri, *J. Appl. Phys.*, 79 (1996) 8, pp. 5794-5797.
9. A New Laser Texturing Technique for High Performance Magnetic Disk Drives, P. Baumgart, D. J. Krajnovich, T. A. Nguyen, and A. C. Tan, *IEEE Trans. On Magn.*, 31 (1995) 6, pp. 246-2951.
10. The Development and Implementation of Discrete Texture for the Improvement of Tribological Performance, Y. Li and A. K. Menon, *ASME J. of Trib.*, 117 (1995), pp. 279-284.
11. Long-Term Stiction at the Magnetic Thin-Film Disk-Slider Interface, N. V. Gitis, L. Volpe, and R. Sonnenfeld *Adv. Info. Storage Syst.*, 3 (1991), pp. 91-105.
12. Influence of Roughness on Head/Disk Stiction Induced by Mobile Lubricant Film, R. Koka, K. V. Vismanathan, and W. Rothchild, *Adv. Info. Storage Syst.* 3 (1991), pp. 117-126.
13. Role of Mechanical Properties and Surface Texture in the Real Area of Contact of Magnetic Rigid Disk, B. Bhushan and M. F. Doener, *ASME J. of Trib.*, 111 (1989), pp. 42-458.
14. Contact Start/Stop Characteristics on Photolithographic Magnetic Recording Media, H. Ishihara, H. Yamagami, T. Sumiya, M. Okudera, A. Inada, A. Terada, and T. Nakamura, *Wear*, 72 (1994), pp. 65-72.
15. Wear Characteristics of Carbon-Coated Magnetic Rigid Disks with Well-Defined Surface Texture, H. Tanaka, K. Shiota, K. Gomi, and Y. Miyake, *ASME J. of Trib.*, 115 (1993), pp. 573-577.
16. A Study of Dynamic Friction at Head-Disk Interface, H. Tang, L. Wang, J. Gui, and D. Kuo, *J. Appl. Phys.*, 87 (2000) 9, pp. 6152-6154.

17. Current and Future Approaches for Laser Texturing of Thin Film Media, J. J. Liu, W. Li, and K. E. Johnson, *IEEE Tran. on Magn.*, 36 (2000) 1, pp. 125-132.
18. Effects of Laser-Induced Diskrete Texture Parameters on Optimization of Head-Disk-Interface Tribology, J. Xuan, G. Chen, and T. Nguyen, *IEEE Trans. On Magn.*, 32 (1996) 5, pp. 3762-3764.
19. Experimental Study of Long-term Static Friction and Magnetic Slider/Disk Interplaner Separation, C. T. Gerber, B. Bhushan, and N. V. Gitis, *ASME J. of Trib.*, 118 (1996), pp. 12-19.
20. A Stiction model for a Head-Disk interface of a Rigid Disk Drive, J. Gui and B. Marchon, *J. Appl. Phys.*, 78 (1995) 6, pp. 4206-4217.
21. The Role of Relative Humidity Surface Roughness and Liquid Build-up on Static Friction Behavior of the Head/Disk Interface, H. Tian and T. Matsudaira, *ASME J. of Trib.*, 115 (1993), pp. 28-35.
22. A Study on Nano-wear at Laser-textured Bump Tips and the Failure Mechanism at the Head-Bump-Interface, J. Xuan, C. Shih, Z. Feng, G. Peng, and T. Nguyen, *IEEE Trans. On Magn.*, 33 (1997) 5, pp. 3187-3189.
23. Corrosion Induced Stiction and Poletip Recession in Disk Drives, A. M. Toxen, M. Snallen, P. Golden, and P. Mee, *Adv. Info. Storage Syst.*, 1 (1995), pp. 29-39.
24. Tribological Wear on Amorphous Carbon Thin Films, B. Marcon, M. R. Khan, N. Heiman, P. Pereira, and A. Lautie, *IEEE Trans. On Magn.*, 26 (1990) 5, pp. 2670-2675.
25. Ultrathin Amorphous C:H Overcoats by PCVD on Thin Film Media, K. J. Grannen, X. Ma, R. Thangaraj, J. Gui, and G. C. Rauch, *IEEE Trans. On Magn.*, 26 (1990) 5, pp. 115-119.
26. Lubricant Performance in Magnetic Thin Film Disks with Carbon Overcoat-Part II: Durability, J. L. Streater, B. Bhushan, and D. B. Bogy, *ASME J. of Trib.*, 113 (1991), pp. 32-37.
27. Performance of Hard DLC Protective Film Prepared by PECVD Method for Thin Film Magnetic Disk, K. Iechika, Y. Kokaku, M. Ootake, K. Abe, H. Tani, and H. Inaba, *IEEE Trans. On Magn.*, 30 (1994) 6, pp. 4134-4136.
28. Wear of Silicon Carbide in Sliding Contact with Lubricated Thin-Film Rigid Disk, R. Koka, Preprint of ASME/STLE Trib. Conf. (1994).
29. Ion Beam Deposition of Carbon Overcoats for Magnetic Thin Film Media, K. J. Grannen, X. Ma, R. Thangaraj, J. Gui, and G. C. Rouch, *IEE Trans. On Magn.*, 36 (2000) 1, pp. 120-124.
30. Lubricant Bonding Effects on Thin Film Disk Tribology, T. E. Karis, G. W. tyndal, and R. J. Waltman, Preprint of STLE Trib. Conf. (2000).
31. パーフルオロポリエーテル潤滑剤の熱処理効果, 青木由朗, 名畑嘉之, 山田真爾, トライボロジー会議予稿集, 1993-11, pp. 423-426.
32. 潤滑剤 (吸着・フリー) 厚と CSS 耐久性, 青木由朗, 名畑嘉之, 山田真爾, トライボロジー会議

- 予稿集, 1993-11, pp. 427-430.
33. ディスク表面に固定されない潤滑剤とスティクションの関係, 中川路孝行, 高村友恵, 村上祐子, 庄司三良, 松本浩之, トライボロジー会議予稿集, 1994-10, pp. 129-132.
 34. 磁気ディスク用潤滑剤の官能基構造と膜の形態及び摺動特性との関係, 中川路孝行, 木本浩司, 石田美奈, 伊藤豊, トライボロジー会議予稿集, 1996-10, pp. 207-208.
 35. 薄膜ディスク用潤滑剤の自己修復性, 柳沢雅広, 日本潤滑学会研究発表会予稿集, 1989-10, pp. 433-436.
 36. Ultrafiltered Perfluoropolyether Lubricant under Molecular Weight Distribution Control, Nakakawaji T., Ishida M., Ito Y., Matsumoto H., Tani H., and Ishihara H., *STLE Trib. Trans.*, **43** (2000) 4, pp 671-676.
 37. The Flow of Thin Viscous Liquid Films on Rotating Disk, M. L. Forcada and C. M. Mate, *J. of Colloid Inter. Sci.*, **160** (1993), pp. 218-225.
 38. Tribological Characteristics of Liquid Lubricant on Magnetic Disks Treated by Far-UV Radiation, H. Tian and T. Matsudaira, *ASME J. of Trib.*, **115** (1993), pp. 400-405.
 39. 潤滑剤回転飛散低減磁気ディスク装置構造の研究, 栗田昌幸, 水本宗男, 清水勇人, 大谷祐一, トライボロジー会議予稿集, 2000-5, pp. 205-206.
 40. 潤滑膜の吸着構造, 庄司三良, 今関周治, 宇佐美勝久, トライボロジー会議予稿集, 1996-5, pp. 47-49.
 41. X-Ray Reflectivity on Perfluoropolyether Polymer Molecules on Amorphous Carbon, M. F. Toney and C. Thompson, *J. Chem. Phys.*, **92** (1990) 6, pp. 3781-3793.
 42. XPS Measurement of Lubricant Layer Thickness on Magnetic Recording Disks, M. Hoshino and Y. Kimachi, *J. Elect. Spect. Related Phenom.*, **81** (1996), p. 79-.
 43. Molecular orientation of polymer lubricant films: Its tribological consequence, Chao Gao, Tam Vo, and Joel Weiss, *ASME J. Tribol.*, **120** (1998), pp. 369.
 44. Determination of Lubricant Film Thickness on Particulate Disk Surface by Atomic Force Microscopy, C. M. Mate, M. R. Lorenz, and V. J. Novotny, *IEEE Trans. On Magn.*, **24** (1990) 3, pp. 1225-1227.
 45. Molecular Conformation and Disjoining Pressure of Polymeric Liquid Films, C. M. Mate and V. j. Novotny, *J. Chem. Phys.*, **94** (1991) pp. 8420,
 46. Direct Observation of the Configuration, Adsorption, and Mobility of Lubricants by Scanning Tunneling Microscopy, R. Kaneko, S. Oguchi, Y. Andoh, I. Sugumoto, and T. Dekura, *ASME Adv. Infr. Storage Syst.*, **2** (1991), p. 23.
 47. AFM Observation of Hard Disk Lubricant Coated with Plasma Polymerized Carbon, Y. Sakane and M. Nakao: "", *IEEE Trans. Magn.*, **35** (1999) 5 p. 2397.
 48. 磁気ディスク上潤滑剤の高空間分解能観察, 熊谷, 折笠, 石渡, トライボロジー会議予稿集,

- 1999-5 (1999) p. 355.
49. Adsorption and Configuration of Lubricant Molecules on Overcoat Materials, M. Yanagisawa, *Wear*, 168 (1993), pp. 167-173.
 50. Design of Carbon Surface Functional Groups on the Viewpoint of Lubricant Layer Structure, Yatsue, T., Ishihara, H., Matsumoto, H., and Tani, H., *Trans. on Trib.* 43 (2000) 4, 802-808.
 51. Adsorption of Perfluoro-Polyethers on Carbon Surfaces, M. Yanagisawa, Preprint of STLE Trib. Conf., (1994).
 52. Spreading of PFPE Lubricants on Carbon Surfaces: Effect of Hydrogen and Nitrogen Content, X. Ma, J. Gui, K. J. Grannen, L. A. Smoliar, B. Marchon, M. S. Jhon, and C. L. Bauer, *Trib. Lett.*, 6 (1999), pp. 9-14.
 53. Spreading of Perfluoropolyalkylether Films on Amorphous Carbon Surfaces, X. Ma, J. Gui, K. J. Grannen, L. A. Smoliar, B. Marchon, M. S. Jhon, and C. L. Bauer, *J. Chem. Phys.*, 110 (1999) 6, pp. 3129-3137.
 54. Spreading Profiles of Molecularly Thin Perfluoropolyether Films, G. W. Tyndall, T. E. Karis, and M. S. Jhon, Preprint of STLE No. 98-TC-5E-3.
 55. Complex Terraced Spreading of Perfluoropolyalkylether Films on Carbon Surfaces, J. Gui, K. J. Grannen, L. A. Smoliar, B. Marchon, M. S. Jhon, and C. L. Bauer, *Phys. Rev.*, 59 (1999) 1, pp. 722-727.
 56. Lubricant Dynamics in Sliding and Flying, V. J. Novotny and M. A. Baldwinson, *J. Appl. Phys.*, 70 (1991)10, pp.5647-5652.
 57. Migration of Liquid Polymers on Solid Surfaces, N. V. Novotny, *J. Chem. Phys.*, 92 (1990)5, pp. 3189-3196.
 58. Lubricant Removal, Degradation, and Recovery on Particulate Magnetic Recording Media. V. J. Novotny, T. E. karis, and N. W. Johnson, *ASME J. of Trib.*, 114 (1992), pp. 61-67.
 59. A Fluorescence technique for Measuring Lubricant Thickness on Hard Magnetic Disks, K. Tanimoto and E. Rabinowicz, Preprint of SLTLE No. 91-TC-3A-1, (1991).
 60. The Dynamic Behavior of Thin-Film Lubricants, M. S. Jhon, D. M. Phillips, S. J. Vinay, and C. T. Messer,, *IEEE Trans. on Magn.* 35 (1999) 5 pp. 2334 – 2337.
 61. Two-Dimensional Measurements of Lubricant Spreading on Diamond-like Carbon Surface using Image Processing on Fringe Patterns Formed by Michelson Interferometry, Y. Mitsuya, H. Zhang, and S. Ishida, *ASME J. of Trib.*, 123 (2001), pp. 188-195.
 62. Lubricant Replenishment on Carbon Coated Discs, X. Ma, J. Gui, B. Marchon, M. S. Jhon, C. L. Bauer, G. C. Rauch,, *IEEE trans. on Magn.* 35(1999) 5, pp. 2454-2456.
 63. Simulation of Ultrathin Lubricant Films Spreading over Various Carbon Surface, S. J. Vinay, D. M.

- Phillips, Y. S. Lee, C. M. Schroeder, X. Ma, M. C. Kim, and M. S. Jhon, *J. Appl. Phys.*, 87 (2000) 9, pp. 6164-6466.
64. *Principles and Applications of Tribology*, B. Bhushan, Wiley-Interscience, N. Y., 1999.
 65. 固体の摩擦と潤滑, バウデンテイバー, 丸善, 1961.
 66. トライボロジー, H. チコス, 講談社, 1986.
 67. トライボロジ, 松原清, 産業図書, 1985.
 68. 潤滑の物理化学, 桜井俊男, 幸書房, 1983.
 69. トライボロジー, 山本雄二, 兼田貞宏, 理工学社, 1998.
 70. *Handbook of Micro/Nano Tribology*, B. Bhushan, CRC Press, N. Y., 1995.
 71. *Tribochemical Reactions of Very Thin Layers on Magnetic Recording Disks*, S. Mori, N. Onodera, and M. Itoh, *Wear*, 168 (1993) pp. 85-90.
 72. *Gaseous Wear Products from Perfluoropolyether Lubricant films*, B. D. Strom, D. B. Bogy, R. G. Walmsley, J. Branalt, and C. S. Bhatia, *Wear*, 168 (1993), pp. 31-36.
 73. *Hydrogenated Carbon Overcoats*, C. Chen, J. Wei, W. Fong, D. B. Bogy, and C. S. Bhatia, *ASME J. of Trib.*, 122 (2000), pp. 458-464.
 74. 磁気ディスク用潤滑剤の現在と将来, 森誠之, 沼田俊充, *トライボロジスト*, 43 (1998) 5, pp. 388-393.
 75. *Flyability Failures Due to Organic Siloxanes at the Head/Disk Interface*, V. Raman, D. Gillis, and R. Wolter, *ASME J. of Trib.*, 122 (2000), pp. 444-449.
 76. *Influence of Component Outgassing on a Head-Disk Interface*, Y. Yamamoto, M. Takahashi, and M. Shinohara, *Trib. Mech. Magn. Storage Syst. VII* (1990), pp. 91-94.
 77. *Humidity Effects on PFPE Lubricant Bonding to a-CH_x Overcoats*, R. Z. Lei and A. J. Gellman, *Langmuir*, 16 (2000), pp. 6628-6635.
 78. *Chemical Contamination at Head-Disk Interface I a Disk Drive*, D. E. Fowler and R. H. Geiss, *IEEE Trans. on Magn.*, 36 (2000) 1, pp. 133-139.
 79. *Silicon Oxide Formation in the Disk Environment*, P. H. Kasai and F. P. Eng, *J. Info. Storage Syst.* 2 (2000), pp. 125-128.
 80. *Effect of Humidity on Stiction and Friction of the Head/Disk Interface*, Y. Li, D. Trauner, and F. E. Talke, *IEEE Trans. on Magn.*, 26 (1990) 5, pp. 2478-2489.
 81. *The Effect of Vapor Phase Chemicals on Head/Disk Interface Tribology*, M. S. Jesh and P. R. Segar, *STL Trib. Trans.*, 42 (1999) 2, pp. 310-316.
 82. 磁気ディスク装置における有機系アウトガスと信頼性, 勝本正之, *日本応用磁気学会誌*, 24 (2000) 7, pp. 1119-1130.

83. 磁気記録とマイクロトライボロジー, 柳沢雅広, トライボロジスト, 45 (1992) 11, pp. 908-912.
84. Tribological Effects of Various Gases and Water Vapor on Thin Film Magnetic Disks with Carbon Overcoats, B. D. Strom, D. B. Bogy, C. S. Bhatia, and B. Bhushan, ASME J. of Trib., 113 (1991), pp. 689-683.
85. Tribochemistry at Lubricated Interface, V. J. Novotny, X. Pan, and C. S. Bhatia, J. Vac. Sci. Tech., A12 (1994) 5, pp. 2879-2886.
86. Surface Potential and Magnetic Recording Media Tribology, V. J. Novotny, T. E. Karis, and R. J. Whitefield, Preprint of STLE No. 96-TC-6C-1, (1996).
87. Figures of Merit for Dynamically Unloaded Air Bearing Sliders, P. W. Smith and G. L. Best, STLE Trib. Trans., 42 (1999) 2, pp. 407-412.
88. Numerical Simulation of Dynamic Loading in Hard Disk Drives, T. G. Jeong and D. B. Bogy, ASME J. of Trib., 115 (1993), pp. 370-375.
89. Lubricant Redistribution in thin film disks, Raman V., Gillis D. R., and Wolter R. F., Synopses of Inter. Trib. Conf., 4F1-4, p521, (2000).
90. Flying Stiction, Lubricant Pick-up and Carbon-Overcoat Wear of Magnetic Heads, C. Gao, P. Dai, and V. Vu, ASME J. of Trib., 121 (1999), pp. 97-101.
91. An Asperity Contact Model for the Slider Air Bearing, W. Huang, D. B. Bogy, and M. Honchi, ASME J. of trib., 122 (2000), pp. 436-443.
92. コンタクト記録インターフェース, 柳沢雅広, トライボロジスト, 43 (1998) 5, pp. 370-375.
93. 磁気記録, 柳沢雅広, トライボロジスト, 45 (2000)12, pp. 928-931.
94. Lubricant Performance in Magnetic Thin Film Disks with Carbon Overcoat-Part I: Dynamic and Static Friction, J. L. Streater, B. Bhushan, and D. B. Bogy, ASME J. of trib., 113 (1991), pp. 22-31.
95. Particle Induced Damage on Heads and Discs Due to Fine Particles of Different Materials, L. Zhang, R. Koka, Y. Yuen, and E. Iarn, IEEE Trans on Magn., 35 (1999) 2, pp. 927-938.
96. Particle Build-up on Flying Slider and Mechanism Study of Disk Wear and Head-Disk Interface Failure in Magnetic Disk Drives, B. Liu, S. H. Soh, A. Chekanov, S. B. Hu, and T. S. Low, IEEE Trans. on Magn., 2 (1996) 5, pp. 3687-3689.
97. Magnetic Head-Media Interface Temperatures-Part 3 Application to Rigid Disks, B. Bhushan, Preprint of ASME No. 91-Trib-5, (1991).
98. The Determination of Flash Temperature in Intermittent Magnetic Head/Disk Contacts using Magnetoresistive Heads: Part II-Experimental Investigation, Y. Li and A. R. Kumaran, ASME J. of Trib., 115 (1993), pp. 179-184.
99. The Theory of Rate Process, Glasstone, S., Laidler, K. J., and Eyring, H., McGraw-Hill Book Co.

- (1941).
100. 粘弾性の基礎, 京谷隆, 潤滑, 30 (1985)11, pp779-784.
 101. 潤滑油のレオロジー (2) , 玉井康勝, Petrotech, 2 (1979) 11. Pp.1020-1023.
 102. 高分子の物理学, 田中文彦, 裳華房, 1994.
 103. 物性論, 黒沢達美, 裳華房, 1979.
 104. 物理学概論, 梶山正登, 日刊工業, 1979.
 105. Atomic Scale Friction Measurements using Friction Force Microscopy: Part II - Application to Magnetic Media, B. Bhushan and J. Ruan, ASME J. of Trib., 116 (1994), p. 1611-.
 106. 粉体の表面科学, 小石真純, 角田光雄, 日刊工業新聞社, 1982.
 107. 高分子物性工学, 金丸競, 地人書館, 1968.
 108. H. L. Frisch, M. Y. Hellman, J. L. Lundberg, *J. Olym. Sci.* 38 (1959) 441.
 109. Dip-Coating of Ultra-Thin Lubricant and its Control for Thin-Film Magnetic Hard Disks, C. Gao, Y. C. Lee, J. Chao, and M. Russak, IEEE Trans. on Magn. 31 (1995) 6, pp. 2982-2984.
 110. Tribological Properties of Thin-Film Magnetic Disks with Model Patterned Surface Texture, Tanaka, H., and Tani, H., J. JAST, 42 (1997) 4, pp. 251 – 256.
 111. Calibrating ESCA and Ellipsometry Measurements of Perfluoropolyether Lubricant thickness, M. F. Toney and C. M. Mate, IEEE Trans. On Magn., 34 (1998) 4, pp. 1774-1776.
 112. Spreading Characteristics of Thin Liquid Films of Perfluoropolyalkylethers on Solid Surfaces. Effect of Chain-End Functionality and Humidity, Min, B. G., Choi, J. W., Brown, H. R., Yoon, D. Y., O'Connor, T. M., and Jhon, M. S., Trib. Lett., 1 (1995) pp. 225- 232.
 113. H. Tani, Observation of PFPE Lubricant Film on Magnetic Disk Surface by Atomic Force Microscopy, IEEE Trans. on Magn. 35 (1999) 5, 2397 –2399.
 114. Effect of Reactive End Groups of the Rheology of Disk Lubricant Systems, Kono, R., Jhon, M. S., Choi, H. J., and Kim, C. A., IEEE Trans. on Magn., 35 (1999) 5, pp. 2388 – 2390.
 115. Ultrathin Perfluoropolyether Films – Influence of Anchoring and Mobility of Polymers on Tribological Properties, Ruhe, J., Novotny, V., Clarke, T., and Street, . B., ASME J. of Trib. 118 (1996), pp663 – 668.
 116. The Chemistry of Silica, Iler, R. K., J. wiley, New York, (1979) p. 692.
 117. トライボロジ, J. ホーリング, 近代科学社, 1984.
 118. Boundary-Layer Theory, H. Schlichting, McGrow-Hill, 1979.
 119. 回転ディスク上の分子レベル潤滑膜の流動, 柳沢雅広, トライボロジー会議予稿集, 1994-10, pp. 593-596.
 120. The Flow due to a Rotating Disc, W. G. Cochran, Proc. Cambridge Phils. Soc., 30 (1934), pp. 365-375.
 121. Airflow at the Tip of an Observation between Corotating Disks, J. C. Harrison, D. H. Lou, and F. E.

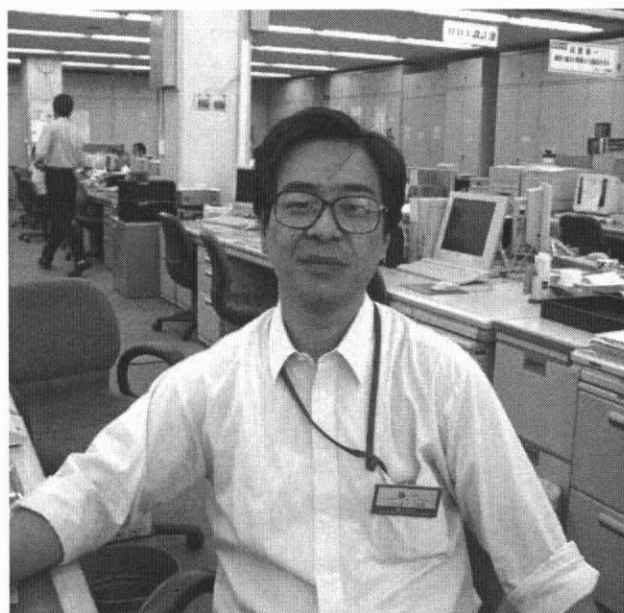
Talke, *Adv. Info. Storage Syst.* 5 (1993), pp. 159-174.

122. *Micro/Nanoscale Tribology and Mechanics of Components and Coatings or MEMS*, Sriram Sundararajan M. S. the Ohio State Univ. 学位論文, (2001).
123. 走査プローブ顕微鏡でDNAを見る, 田中裕行, 河合知二, *生物物理*, 40(5), (2000), 336-340.
124. Spin-off Behavior of PFPE Lubricant on Magnetic Disks, H. Tani and H. Matsumto, *International Tribology*, (2003), to be published.

125. 著者紹介

1960年10月 出生
1979年4月 国立広島大学理学部物理学科 入学
1984年3月 同学科 卒業
1984年4月 国立広島大学理学研究科物理学専攻科博士前期課程 入学
1986年3月 同専攻科 修了
1986年4月 株式会社日立製作所小田原工場（現ストレージシステム事業部）
入社、以来、磁気ディスクの設計に従事。現在、主任技師。

著者近影



主な業績

1. 筆頭執筆論文

- (1) **H. Tani** and Y. Ogawa, Friction and Wear Behavior of Magnetic Recording Heads with Textured Air Bearing Surface Overcoats, *J. Magn. Soci. Japan*, 21 (1997) S2, pp. 95-98.
- (2) **H. Tani**, Observation of PFPE Lubricant Film on Magnetic Disk Surface by Atomic Force Microscopy, *IEEE Trans. on Magn.* 35 (1999) 5, 2397-2399.
- (3) **H. Tani** and H. Matsumoto, Spreading Mechanism of PFPE Lubricant on Magnetic Disks, *ASME J. of*

Trib., Vol. 123 (2001), 533-540.

- (4) **H. Tani**, Lubrication Mechanism of PFPE Lubricant on Magnetic Disks in Head Disk Interface, Proceedings of International Tribology Conference, (2001), 2568.
- (5) **H. Tani** and H. Matsumoto, Adsorption Model of PFPE Lubricant on Magnetic Disks, Proceedings of International Tribology Conference, (2001), 2574.
- (6) **H. Tani** and H. Matsumoto, Spin-off Behavior of PFPE Lubricant on Magnetic Disks, Tribology International, vol 36 (2003), 397 – 403.

2.共同執筆論文

- (1) H. Matsumoto, **H. Tani**, and T. Nakakawaji, Adsorption Properties of Lubricant and Additive for High Durability of Magnetic Disks., IEEE Trans. on Magn., Vol. 36 (2000) 5, 2680-2682.
- (2) H. Matsumoto, **H. Tani**, and T. Nakakawaji, Molecular Weight Dependence of Lubricant on Performance of Magnetic Disk., Proceedings of International Tribology Conference, (2001), 2546.
- (3) T. Nakakawaji, M. Ishida, Y. Ito, H. Matsumoto, **H. Tani**, and H. Ishihara. Ultrafiltered Perfluoropolyether Lubricant under Molecular Weight Distribution Control, STLE Trib. Trans., **43** (2000) 4, pp 671-676.
- (4) K. Iechika, Y. Kokaku, M. Ootake, K. Abe, **H. Tani**, and H. Inaba, Performance of Hard DLC Protective Film Prepared by PECVD Method for Thin Film Magnetic Disk, IEEE Trans. On Magn., 30 (1994) 6, pp. 4134-4136.
- (5) T. Yatsue, H. Ishihara, H. Matsumoto, and **H. Tani**, Design of Carbon Surface Functional Groups on the Viewpoint of Lubricant Layer Structure, 43 (2000) 4, 802-808.
- (6) M. Shoda and H. Tani, Catastrophic Damage of Magnetic Recording Disk Caused by Slider –Disk Impact during Loading/ Unloading, IEEE Trans. on Magn. To be published.

3.解説

- (1) 谷弘詞, 磁気ディスク潤滑膜の自己修復性と自己保持性, トライボロジスト, Vol (2002)10,756-763
- (2) 谷弘詞, AFM による磁気ディスク潤滑剤の観察, トライボロジスト, Vol 46(2001) 6, 433-438.
- (3) 田中秀明, 谷弘詞、表面モデル形状パターンニングによる薄膜磁気ディスクのトライボロジー特性解析, トライボロジスト, 42 (1997) 4, pp. 251-256.

4. 口頭発表

- (1) 谷弘詞, 井上雅典, 白倉高明, 磁気ディスクの表面形状と耐摩耗性に関する考察, トライボロジー会議予稿集, 1994-10 (1994) 153.
- (2) 谷弘詞, ヘッドディスクインターフェースにおけるテクスチャ突起近傍の潤滑剤の挙動観察, トライボロジー会議予稿集, 1996-5 (1996) 50.
- (3) 谷弘詞, 小川陽子, コンタクト記録用ヘッド ABS テクスチャの検討, トライボロジー会議予稿集, 1996-10 (1996) 214.
- (4) 谷弘詞, 小川陽子, ヘッド表面処理による Fly Stiction 低減, トライボロジー会議予稿集, 1997-5 (1997) 521.
- (5) 谷弘詞, 井上雅典, 園田幸司, 磁気ディスク装置における潤滑剤の修復性と摩耗特性, トライボロジー会議予稿集, 1998-5 (1998) 352.
- (6) 谷弘詞, 松本浩之, 磁気ディスクの液体潤滑剤の付着形態, トライボロジー会議予稿集, 1999-5 (1999) 81.
- (7) 谷弘詞, 小川陽子, 磁気ディスク耐塵埃強度評価のための高速スクラッチテストの開発, トライボロジー会議予稿集, 1999-10 (1999) 319.
- (8) 谷弘詞, 松本浩之, モンテカルロ計算による潤滑剤の修復過程の検討, トライボロジー会議予稿集, 2000-5 (2000) 207.
- (9) 谷弘詞, モンテカルロ計算による潤滑膜のスピンオフ特性, トライボロジー会議予稿集, 2001-5 (2001).
- (10) **H. Tani**, Observation of PFPE Lubricant Film on Magnetic Disk Surface by Atomic Force Microscopy, InterMag (1999).
- (11) **H. Tani**, Lubrication Mechanism of PFPE Lubricant on Magnetic Disks in Head Disk Interface, International Tribology Conference, (2000).
- (12) **H. Tani** and H. Matsumoto, Adsorption Model of PFPE Lubricant on Magnetic Disks, International Tribology Conference, (2000).
- (13) **H. Tani**, Spin-off Behavior of PFPE Lubricant on Magnetic Disks, Tribology of Storage Devices, (2001).

5. 出願特許 (1993年～2003年3月公開まで)

- (1) 特許 2807478 号、 磁気記録媒体及びその製造方法.
- (2) 特開平 5-2741、 磁気記録媒体、磁気記録媒体の製造方法、磁気記録媒体の製造装置及

- び磁気記録装置.
- (3) 特開平 5-114127、 磁気ディスク及びその製造方法並びに磁気ディスク装置.
- (4) 特開平 6-76278、 磁気ディスク.
- (5) 特開平 6-243463、 磁気ディスク基板、磁気ディスク、磁気ディスク装置及び磁気ディスク基板の製造方法.
- (6) 特開平 7-57245、 磁気記録媒体、磁気記録媒体の製造方法及び磁気ディスク装置.
- (7) 特開平 7-192201、 磁気ディスク装置.
- (8) 特開平 7-192256、 磁気記録媒体及び磁気記録装置.
- (9) 特開平 8-45238、 磁気ディスク装置.
- (10) 特開平 8-63733、 磁気記録媒体.
- (11) 特開平 8-203068、 磁気記録媒体.
- (12) 特開平 8-212539、 磁気記録媒体の製造方法及び磁気記録再生装置.
- (13) 特開平 8-227519、 磁気ディスク媒体.
- (14) 特開平 8-227522、 磁気ディスク媒体の欠陥検査方法.
- (15) 特開平 8-249638、 コンタクト型磁気ヘッドおよび磁気ディスク装置.
- (16) 特開平 9-63030、 磁気ヘッド.
- (17) 特開平 9-204625、 磁気ヘッドスライダおよび磁気記録装置.
- (18) 特開平 9-219077、 磁気ヘッド及び磁気記録装置.
- (19) 特開平 9-251744、 磁気ヘッドおよび磁気ディスク装置.
- (20) 特開平 10-3649、 磁気記録媒体及びその製造方法.
- (21) 特開平 10-11730、 吸着防止磁気ヘッド.
- (22) 特開平 10-11731、 磁気ヘッドスライダ及び該磁気ヘッドスライダの製造方法.
- (23) 特開平 10-97774、 磁気ディスク装置及びそれを用いた外部記憶装置.
- (24) 特開平 10-222829、 磁気ヘッドおよびその製造方法及び磁気ディスク装置.
- (25) 特開平 10-293983、 スライダ及び磁気ディスク装置.
- (26) 特開平 10-320765、 磁気記録媒体及びその製造方法.
- (27) 特開平 10-326416、 磁気ディスク装置と磁気記録媒体及び磁気記録媒体の製造方法.
- (28) 特開平 11-16314、 磁気ヘッド及びそれを用いた磁気記録装置.
- (31) 特開平 11-86278、 磁気ディスク装置及び磁気ディスク.
- (32) 特開平 11-110750、 磁気ディスクの製造方法、その製造装置及び磁気ディスク.
- (33) 特開平 11-120547、 磁気ディスク用基板、磁気ディスク媒体、磁気ディスク媒体製造装置、及び磁気ヘッド.
- (34) 特開平 11-144414、 磁気ディスク装置.

- (35) 特開平 11-306728、 記録再生装置及びその装置の製造方法。
- (36) 特開平 11-328647、 磁気記録媒体および磁気記録媒体の製造方法。
- (37) 特開 2000-30201、 記録再生装置。
- (38) 特開 2000-30387、 記録再生装置。
- (39) 特開 2000-30390、 磁気ヘッド及びその製造方法並びに磁気ディスク装置。
- (40) 特開 2000-65553、 磁気ディスクの表面欠陥検出装置及び摩擦試験装置。
- (41) 特開 2000-315314、 情報記録再生媒体、情報記録再生装置並びに磁気ディスク、磁気ディスク装置、潤滑剤分子量制御法、潤滑剤分子量制御装置。
- (42) 特開 2000-82204、 磁気ヘッド及び磁気ディスク装置。
- (43) 特開 2000-155084、 原子間力顕微鏡、それを用いた表面形状の測定方法及び磁気記録媒体の製造方法。
- (44) 特開 2000-315314、 情報記憶再生媒体、情報記憶再生装置並びに磁気ディスク、磁気ディスク装置、潤滑剤分子量制御法、潤滑剤分子量制御装置
- (45) 特開 2001-091445、 スクラッチ強度試験装置および試験方法
- (46) 特開 2001-152176、 潤滑剤分子量制御法並びに磁気ディスク、磁気ディスク装置
- (47) 特開 2001-153634、 小型高感度微小傾斜検出器
- (48) 特開 2001-210035、 磁気ディスク装置
- (49) 特開 2001-229519、 スライダおよび記録装置
- (50) 特開 2001-266333、 磁気記録媒体及び磁気ディスク装置
- (51) 特開 2001-331926、 磁気記録媒体
- (52) 特開 2002-015411、 磁気ヘッド及び磁気ディスク装置
- (53) 特開 2002-042332、 板状物体縦形保持体及び潤滑膜形成方法
- (54) 特開 2002-083484、 磁気ディスク装置
- (55) 特開 2002-22513、 磁気ディスク媒体とその製造方法
- (56) 特開 2002-22577、 磁気ディスク装置用潤滑剤含浸材の製造方法および磁気ディスク装置
- (57) 特開 2002-230937、 磁気記録媒体の突起検査用または表面クリーニング用ヘッド
- (58) 特開 2002-312929、 磁気ディスク媒体の製造方法
- (59) 特開 2003-6837、 極薄膜保護膜の磁気ディスク媒体
- (60) 特開 2003-41279、 潤滑剤の精製方法およびその精製方法により得られた潤滑剤の膜を備えた磁気ディスク