

第5章 磁気ディスク潤滑膜の摩擦移動モデルの検証

5-1 本章の目的

本章では、摩擦移動モデルの妥当性を検証する。そのため、摩擦移動モデルを前提として、潤滑剤分子の挙動をモンテカルロ法を用いて摺動による潤滑膜厚減少を計算した。そして、計算結果と実験結果とを対比させ、摩擦移動モデルを検証する。具体的には、次の3項目を検討する。

- (1) 浮上量が低い磁気ヘッドと磁気ディスクとを摺動させて磁気ディスク潤滑膜の膜厚減少を測定した。そして、摩擦移動モデルに基づき計算した膜厚減少と対比する。
- (2) 吸着エネルギーの異なる2種類の潤滑剤（Fomblin Z-DOL、Fomblin Z-DOLT_X）を塗布した磁気ディスクの摩耗試験を行い、その実験結果と摩擦移動モデルに基づくモンテカルロ計算結果とを対比する。
- (3) 磁気ディスクの面粗さが異なる場合（CSSゾーン、データゾーン）について摩耗試験を行い、その実験結果と摩擦移動モデルに基づくモンテカルロ計算結果とを対比する。

摩擦移動モデルでは、摺動による潤滑膜厚減少に影響する要因として図5-1に示したものがある。その要因には次の項目が挙げられる。①摩擦によるせん断力が小さい方が潤滑膜厚減少は少ない。つまり、接触面圧が小さい場合（①-1）、ヘッド・保護膜のヤング率が小さい場合（①-2）は潤滑膜厚減少が小さい。②吸着エネルギーが大きいと潤滑膜厚減少は少ない。③環境温度が低いと潤滑膜厚減少は少ない。本研究では、②吸着エネルギー、①-1突起高さの依存性について(2)(3)項のように検討し、摩擦移動モデルに基づく計算結果と比較してモデルの検証を行う。

5-2 摩擦移動モデルの検証

5-2-1 摩擦移動モデルに基づくモンテカルロ計算

摩擦移動モデルの検証を行うため、そのモデルを前提として潤滑剤分子の挙動をモンテカルロ計算し、潤滑膜の膜厚減少速度を計算した。3-2節で述べたように摩擦移動モデルでは、潤滑剤分子の移動確率 p_s は次式で与えられる。

$$p_s = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{2E_a}{RT}\right) \left[\exp\left(\frac{sd^3}{2kT}\right) - \exp\left(-\frac{sd^3}{2kT}\right) \right] \quad (5-1)$$

$$p_s = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{2E}{RT}\right) \left[\exp\left(\frac{sd^3}{2kT}\right) - \exp\left(-\frac{sd^3}{2kT}\right) \right]$$

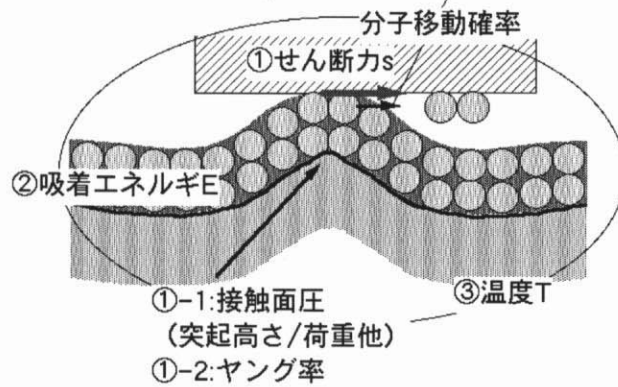


図 5-1. 摺動による潤滑膜厚減少に影響する要因

移動確率 p_s に従い、磁気ヘッドが摺動することで潤滑剤分子は摺動方向へ移動する。この時、潤滑剤分子の磁気ディスクから磁気ヘッドへの移着、あるいは磁気ヘッドから磁気ディスクへの移着など、ヘッド/ディスク間で潤滑剤分子の移動を考慮することが必要である。そこで、接触点における磁気ディスク面から磁気ヘッド面へ、磁気ヘッド面から磁気ディスク面へ、の潤滑剤分子の移動パターンを分類する。磁気ヘッド面と磁気ディスク面は潤滑剤分子より大きな粗さを持っているが、移動パターンの分類を簡素化するため、分子レベルで平坦な面と考えた。その代わりに、粗さの影響を反映させるため、(3-4) ~ (3-6) 式で示したように粗さに関する量 (突起高さ、突起幅、突起密度) によって潤滑剤分子に作用する摩擦力が変化するものとした。潤滑剤分子の移動パターンの概念図を図 5-2 に示す。図 5-2 は、摺動方向に平行な垂直断面における潤滑剤の移動を表したものである。潤滑剤分子は摺動方向のみへ移動すると考える。また、潤滑剤分子層は 3 層までと仮定する。これは磁気ディスク上の潤滑膜が 2 分子層以下で構成されるということと、ヘッドスライダ面に吸着する潤滑膜は 1 分子層で構成されると仮定したことによる。

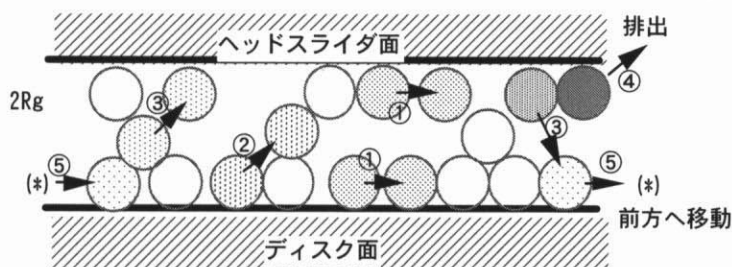


図 5-2. 接触界面の潤滑剤分子の移動パターンを表す概念図

前述の仮定の下で、潤滑剤分子の移動パターンは、少なくとも次に説明する5種類（図中の①～⑤は下記の（1）～（5）項に対応する）が存在する。

- (1) ヘッド面内あるいはディスク面内で移動方向の吸着点がない場合、すなわち隣・隣の下層に潤滑膜分子が存在していないときに移動するパターン。この場合の潤滑剤分子の移動確率は（5-1）式となる。
- (2) ディスク面第1層から第2層へ移動するパターン。移動方向の隣の第1層の吸着点には分子が存在しており、第2層は空いている場合にこの移動パターンを取る。このパターンでは、潤滑剤分子は第1層から第2層へ乗りあがって、移動する。そのため、移動に要するエネルギーは（1）のケースと比べて大きくなる。この場合、移動する潤滑剤分子は潤滑膜分子に作用するヘッド荷重に逆らい、ヘッドとディスクの間隔を広げようとする。この時の潤滑剤分子の仕事量を推定するには、他の潤滑膜分子が支えるヘッド荷重も考慮する必要があるため難しい。ここでは、潤滑剤分子がヘッド荷重に逆らい仕事をするを無視し、第1層から第2層に乗りあがるのに必要なエネルギーは、吸着エネルギーを断ち切ることに等しいと仮定して、移動確率 p_s を変形した。すなわち、次式である。

$$p_s = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{2E_a}{RT}\right) \left[\exp\left(\frac{F_s d^3}{2kT}\right) - \exp\left(-\frac{F_s d^3}{2kT}\right) \right] \quad (5-2)$$

- (3) ディスク面からヘッド面へ、ヘッド面からディスク面へ移着先の吸着点がない場合に移動するパターンである。この場合の潤滑剤分子の移動確率は（5-1）式となる。
- (4) 接触界面から、つまりヘッド面から潤滑剤が完全に排出されるパターン。この場合、移動先が潤滑剤分子の移動を束縛しない空間であるため、潤滑剤分子は移動確率 p_s のみに依存して移動する。このとき、移動した潤滑剤分子は、再び接触界面には戻ってこない。この場合も潤滑剤分子の移動確率は（5-1）式となる。
- (5) ディスク面で接触界面から潤滑剤分子が排出されるケース。磁気ヘッドの移動に伴って排出された潤滑剤分子は、再び接触界面の先端から進入する。そこで、接触界面先端のディスク面の吸着点がないならば、接触界面の後端から先端へ移動すると考えた。この場合も潤滑剤分子の移動確率は（5-1）式となる。

さらに、接触界面の磁気ディスク面と磁気ヘッド面の隙間は、潤滑剤分子3層分の厚さに等しく、かつ接触界面に存在する分子数には依存せず一定と仮定した。本来は、接触界面間の距離を界面内の潤滑剤分子数に依存するように決定すべきであるが、荷重による潤滑剤分子の変形状態が不明なため、近似としてこの仮定を用いた。この結果、磁気ヘッド面の第1層の潤滑剤分子には常に摩擦力が作用する。また、磁気ディスク面では第2層に潤滑剤分子が存在すれば第2層の潤滑剤分子に、

存在しなければ第1層の潤滑剤分子にせん断力が作用する。そして、計算の単純化のため、総ての潤滑剤分子はせん断力の作用で変形せず、平均分子回転直径 $2Rg$ の球形をしていると仮定した。

加えて、モバイル潤滑剤と固定潤滑剤の区別は行わないことにした。その理由は、摩擦力が行う仕事量は、潤滑剤分子の吸着エネルギーと同程度の値と見積もられるため、特に区別せず潤滑膜を1つの吸着エネルギーで代表することで、目的とする潤滑膜の挙動を理解することができると考えたからである。

上記の潤滑剤分子の移動パターンとそれぞれのパターンに対応する潤滑剤分子の移動確率に基づき、修復モデルの場合と同じように、モンテカルロ計算を行った。モンテカルロ計算を使って、広い面積や長い距離にわたって分子の移動を計算しようとする、分子数に対応した膨大なデータ量の取扱いが必要となり、その結果、多大な時間が必要となる。そこで、計算で取り扱う摺動方向の距離を一般的なステップスライダ（エッチングで作製されるステップ状のエアーベアリング面を持つ磁気ヘッドのこと）のスライダ面の長さに等しい 0.3mm とした。さらに取扱いデータ量を減らすために、ランダムウォーク理論を用いて分子振動数と単位移動距離の変換を行った（詳細については第4章で述べたため、本章では省略する）。計算上の分子振動数 f 、単位移動距離 ΔL と実際の分子振動数 f' 、移動距離 $2Rg$ との関係は次式で表される。

$$f' = \frac{4Rg^2}{\Delta L^2} f \quad (5-3)$$

計算上の単位移動距離 ΔL 、すなわち計算上の吸着点間の距離を大きくすると (5-12) 式から計算上の分子振動数 f は小さくなり、計算に要する時間も短縮可能となる。具体的には、計算するトータルな長さを前述の 0.3mm とし、それを 200 個に分割して、単位移動距離 ΔL は $1.5\mu\text{m}$ とした。

磁気ディスク面と磁気ヘッド面の各分割点への潤滑剤分子の配置は次のように行った。修復モデルと同様に、第1層の全ての格子点を固定潤滑剤分子に対応する格子点とモバイル潤滑剤分子に対応する格子点とに乱数を使って区別した。その格子点の比率が固定膜厚比率 BR になるように決定した。第1層目の吸着点が完全に埋まる潤滑膜厚を飽和潤滑膜厚 t_s 、潤滑膜厚を t_{LB} として $0\sim 1$ の規格化乱数と t_{LB}/t_s の大小関係で分子を配置した。

すなわち、

- $t_{LB}/t_s < 1$ の時
 - 規格化乱数 $< t_{LB}/t_s$ ならば 1層目へ分子を配置する。
 - 規格化乱数 $\geq t_{LB}/t_s$ ならば 1層目へ分子を配置しない。
- $t_{LB}/t_s \geq 1$ の時
 - 1層目の全ての吸着点へ分子を配置する。さらに、
 - 規格化乱数 $< t_{LB}/t_s$ ならば 2層目へ分子を配置する。
 - 規格化乱数 $\geq t_{LB}/t_s$ ならば 2層目へ分子を配置しない。

飽和潤滑膜厚 t_s は、潤滑膜の表面被覆率が 1 になる膜厚を用いた。最終的な磁気ヘッドスライダ面の下の平均潤滑膜厚は 200 個の分割点に存在する潤滑剤分子の平均存在個数 N_{ave} から次式で求めた。

$$t_{LB} = N_{ave} \cdot t_s \quad (5-4)$$

実際の計算のフローチャートを図 5-2 に示す。潤滑剤分子の配置を終えた後、分割点をランダムに選択しそこに存在する分子が移動するか否かを乱数で判断する作業を繰り返すことで潤滑膜の時間推移を求める。時間間隔は分子の移動確率が 1 を越えないように設定した。

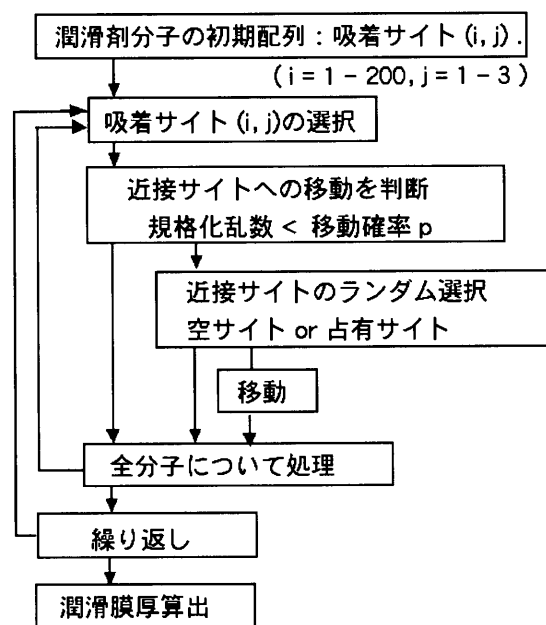


図 5-3. モンテカルロ計算の計算フローチャートの概要

5-2-2 摩擦移動モデルの検証

摩擦移動モデルを実験的に検証するために次の実験を行った。実験には Ni-P 基板に高さ 15nm のレーザバンプを形成したレーザゾーンテクスチャ円板と突起高さ R_p が約 5nm のガラス円板を用いた。潤滑剤はレーザゾーンテクスチャ円板で Fomblin Z-DOL または Fomblin Z-DOLT X を 2.0nm、ガラス円板でそれぞれ 1.5nm 塗布したものを用意した。

表5-1. 潤滑剤の構造

主鎖構造	-CF ₂ (OCF ₂ CF ₂) _n (OCF ₂) _m -	
末端基構造	Z-DOL	-CH ₂ OH
	Z-DOLTX	-CH ₂ (OC ₂ H ₄)OH
平均分子量	3000	
吸着エネルギー	Z-DOL	(32.5)kJ/mol
	Z-DOLTX	(35) kJ/mol

表5-2 モンテカルロ計算に用いたパラメータ

ヘッド荷重 W	24.5mN
突起高さ h	5 nm
突起幅 2L	0.1 mm
摩擦係数	0.2
ヘッドヤング率 E _h	200 GPa
ディスクヤング率 E _d	110GPa
潤滑剤分子直径 d	1.2 nm
飽和潤滑膜厚	1.5 nm
潤滑剤分子量	3000
分割点数	200
分割点間の距離 ΔL	1.5 μm
温度 T	60℃
スライダ幅	0.3x0.3 mm

磁気ディスクに塗布した潤滑剤の概要を表 5-1 に示す。Z-DOL は活性化エネルギーが 32～33kJ/mol、Z-DOLTX は 33.5～36.5kJ/mol であり⁽¹¹⁴⁾、潤滑剤の吸着エネルギーは Z-DOLTX が Z-DOL に比較して大きい。保護膜は双方とも窒素添加カーボン保護膜であり、保護膜厚は約 8nm である。

まず、ガラス円板上を浮上量 8nm の磁気ヘッドでシーク試験と呼ばれる磁気ヘッドが内周・外周を繰り返し移動する試験を行い、磁気ディスクの潤滑膜は Z-DOL からなる。潤滑膜厚の変化を FT-IR で測定した。試験環境温度は 60℃、ガラス円板の回転数は 10000 min⁻¹ である。また、磁気ヘッドの荷重は 24.5mN、シークエリアは 20mm～40mm である。

この実験結果と比較するため、表 5-2 に示した計算パラメータ値でモンテカルロ計算を行った。実験結果と計算結果との比較を図 5-4 に示す。シーク試験で潤滑膜厚は試験時間とともに減少する。この原因は、磁気ヘッドの浮上量が低いため潤滑膜と接触してヘッドに潤滑剤が付着したためと考えられる。この実験結果とモンテカルロ計算結果とは一致している。この比較結果から、摩擦移動モデルに基づくモンテカルロ計算で摺動による潤滑膜厚減少を予測可能であることが

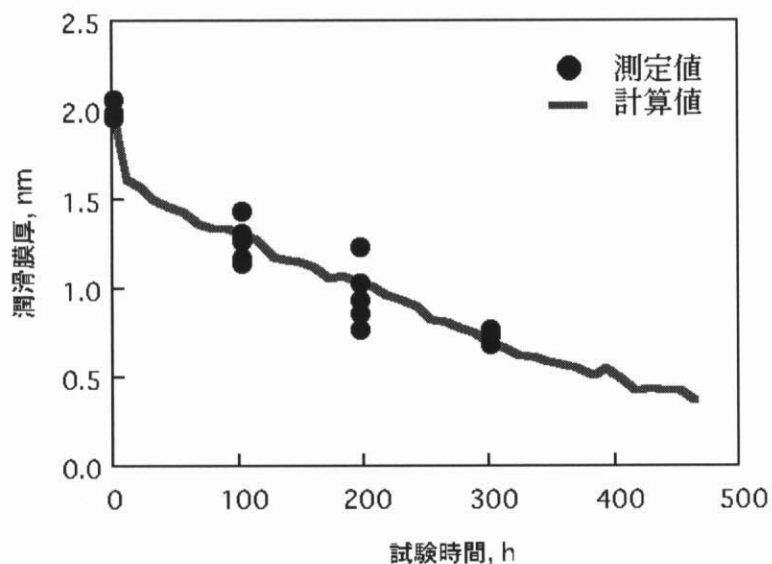


図 5-4. 磁気ディスク上をヘッドでシークしたときの潤滑膜厚減少の測定結果とモンテカルロ計算結果との比較

確認できた。

さらに、レーザゾーンテクスチャ円板の耐摩耗性を調べるため、磁気ヘッドを CSS ゾーンに位置決めし起動停止を繰り返す CSS 試験を行い、クラッシュまでの CSS 回数を測定した。磁気ヘッドは、浮上量が 7nm、ダイヤモンドライクカーボン (DLC) 保護膜でスライダ面が被覆された荷重 25mN のものである。また、ガラス円板の耐摩耗性を調べるために、データ面でドラッグ試験を行い、潤滑膜の膜厚減少を比較した。ドラッグ試験では、CSS 試験と同じ種類のヘッドを用いて、周速 10m/s の速度で半径 24.5~25.5mm の領域をシークした。その試験途中で一定時間ごとに回転を停止して潤滑膜厚をエリプソメータで測定し、潤滑膜厚の変化を測定した。

レーザゾーンテクスチャ円板の CSS 試験の結果を図 5-5 に示す。潤滑剤が Z-DOL の場合にはクラッシュまでの CSS 回数 (CSS 耐力) が 15,000 回以上であるが、Z-DOLTX の場合には 300~2,000 回でクラッシュしている。ガラス円板のドラッグ試験の結果を図 5-6 に示す。図 5-6 の横軸のドラッグ時間は実際に円板上の一点がヘッドのスライダ面の下で接触している時間をヘッドのスライダの長さから算出して表している。図 5-6 の結果は、レーザゾーンテクスチャ円板の場合と逆で Z-DOLTX を塗布した方が潤滑膜厚の減少が少なかった。この 2 つの実験結果は、潤滑膜の吸着エネルギーに関して相反する結果となっている。すなわち、磁気ディスクの面粗さが大きい場合は吸着エネルギーの小さい潤滑膜が潤滑性に優れており、逆に面粗さが小さい場合は吸着エネルギーの大きい潤滑膜が潤滑性に優れていることを示している。

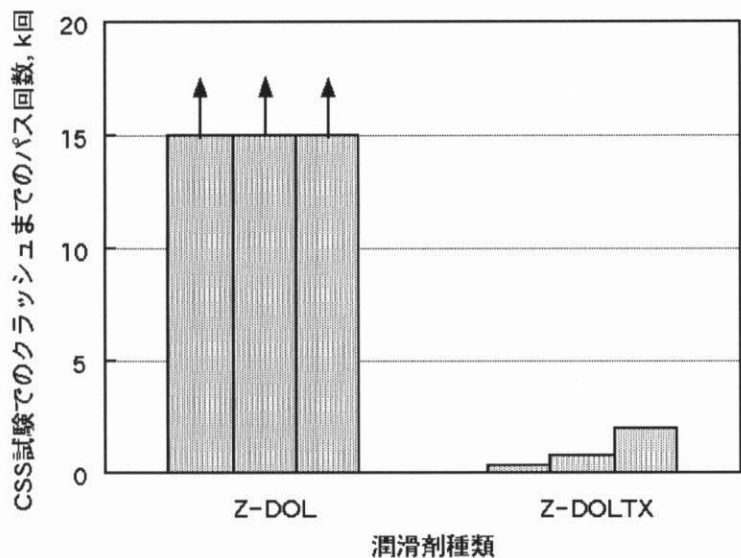


図 5-5. レーザゾーンテクスチャ円板での CSS 試験でのクラッシュまでのパス回数比較

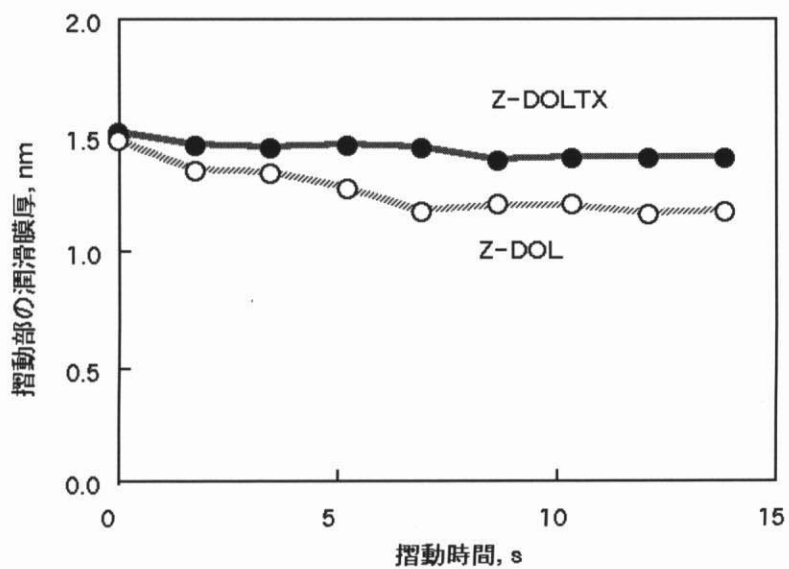


図 5-6. ガラス円板でのドラッグ試験の潤滑膜厚変化の比較

表5-3. モンテカルロ計算に用いたパラメータ

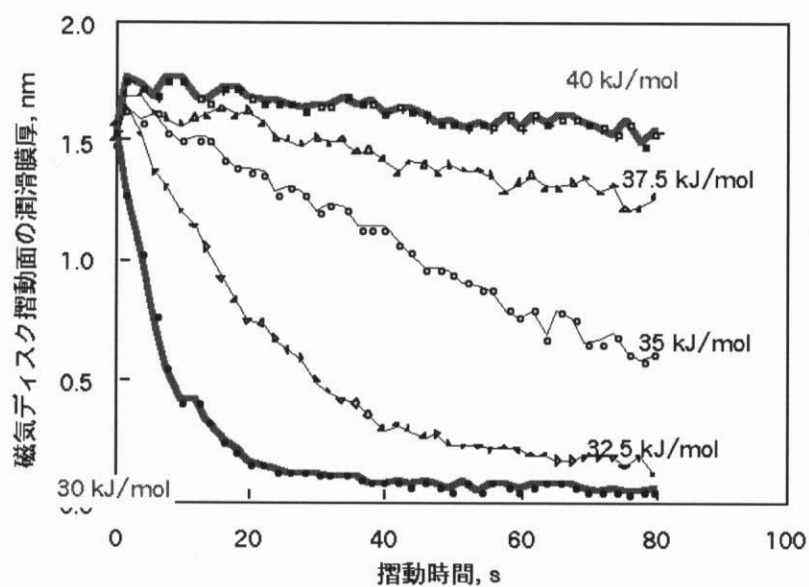
ヘッド荷重 W	8 mN
突起高さ h	5 nm
突起幅 $2L$	0.1 mm
摩擦係数	0.2
ヘッドヤング率 E_h	200 GPa
ディスクヤング率 E_d	110GPa
潤滑剤分子直径 d	1.2 nm
飽和潤滑膜厚	1.5 nm
潤滑剤分子量	3000
分割点数	200
分割点間の距離 ΔL	1.5 μ m
温度 T	25°C

そしてこの結果は、1章で論じた潤滑性におよぼす吸着エネルギーの影響が不明確であるという問題を提示している。そこで、これらの実験結果を前節で述べたモンテカルロ計算により解析し、実験結果が計算結果により説明できることを示して、摩擦移動モデルの妥当性を検証する。

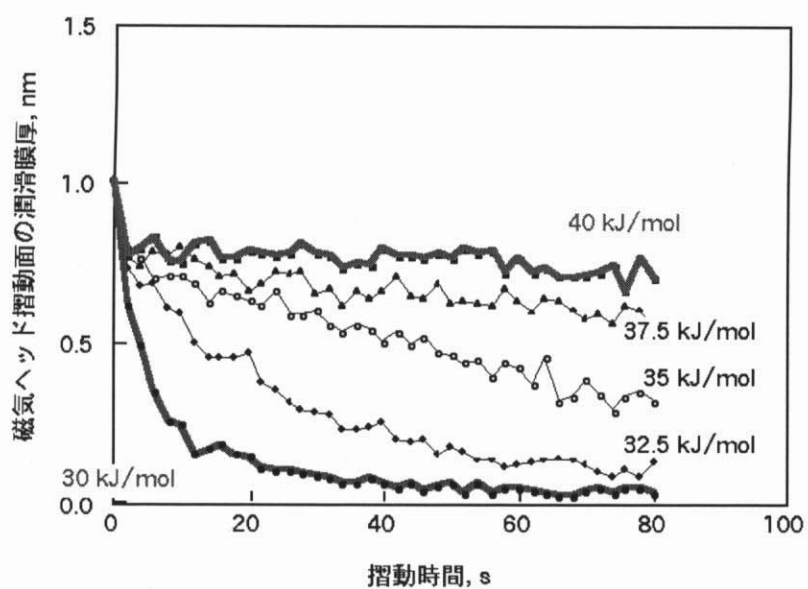
モンテカルロ計算に用いた計算パラメータを表5-3に示す。まず、潤滑膜厚の減少速度に対する吸着エネルギー依存性と突起高さ依存性について計算した。この時、磁気ディスク面の初期潤滑膜厚を1.5nm、磁気ヘッド面の初期潤滑膜厚を1.0nmとした場合の潤滑膜厚の推移を吸着エネルギー E_a をパラメータとして図5-7に示す。磁気ディスク面の突起の高さ h は5nmである。突起高さ h は3-3節に述べたように、最大接触圧力 P_{max} に変数として含まれるため、突起高さが増加すると最大接触圧力が増加し、それに応じて摩擦力も増加する。図から、吸着エネルギー E_a にかかわらず磁気ディスク面と磁気ヘッド面の潤滑膜厚は時間とともに減少するが、特に吸着エネルギー E_a が小さいほど潤滑膜厚は急激に減少することが判る。

この結果は、摺動面では、吸着エネルギーの大きい潤滑膜ほど保護膜と強固に付着して、減少速度は小さいことを示している。

次に、吸着エネルギー E_a を40kJ/mol、突起高さ h をパラメータとして計算を行った。他の条件はすべて同じである。結果を図5-8に示す。突起高さ h の増加に伴って潤滑膜厚の減少速度は著しく大きくなっている。すなわち、面粗さが大きくなると接触面圧が増加し、それに応じて摩擦力が増加するため、潤滑膜の吸着エネルギーが大きくても、潤滑剤分子の移動確率は増加し潤滑膜厚の減少速度が大きくなると考えられる。



(a) 磁気ディスク面の潤滑膜厚



(b) 磁気ヘッド面の潤滑膜厚

図 5-7. 潤滑膜の吸着エネルギーをパラメータとして求めた
摺動部の潤滑膜厚変化

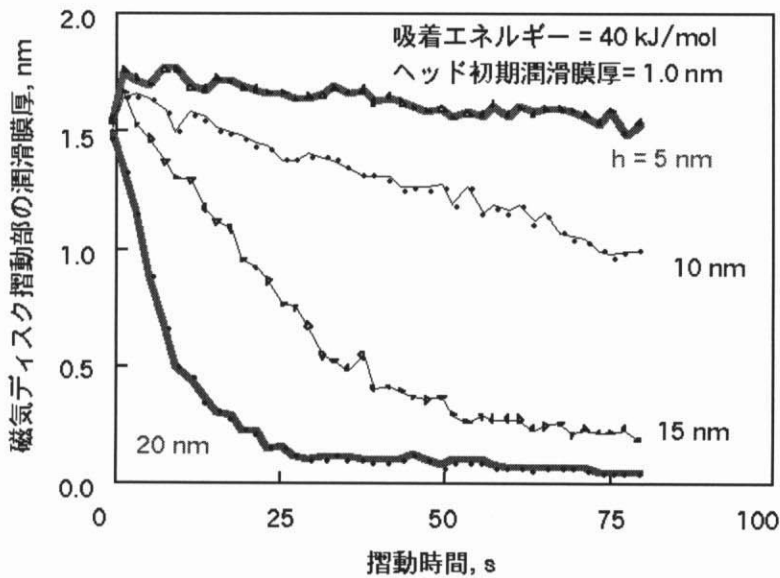


図 5-8. 潤滑膜の摺動減少推移の接触面圧依存性
(テクスチャ突起高さを変化させた場合)

この計算結果を基にして図 5-5 に示した実験結果を考察する。まず、レーザゾーンテクスチャ円板は CSS ゾーンの突起高さが 15nm と大きいため、潤滑膜の吸着エネルギーが大きい Z-DOLT-X を塗布した磁気ディスクでは、図 5-8 の計算結果に示したように潤滑膜が早急に膜厚減少する。また、吸着エネルギーが大きいため、潤滑膜の修復に要する時間も長時間となるため早期にクラッシュしたと考えられる。Z-DOL の場合は、吸着エネルギーが小さいため潤滑膜の修復が短時間で済むので Z-DOLT-X より優れた CSS 耐力を示したと考えられる。

次に図 5-6 に示した実験結果を考察する。ガラス円板の突起高さ 5nm のデータ面では Z-DOLT-X の方が吸着エネルギー 35kJ/mol と大きいため図 5-7 の計算結果に示したように潤滑膜厚が減少しにくいと推定される。このような考察により、前述した実験結果はヘッドスライダ面に潤滑剤分子が移動し摺動界面から排除されるという摩擦移動モデルにより説明可能なので、摩擦移動モデルが妥当であると考えられる。

また図 5-5 に示した実験結果のように、接触面圧が高くて潤滑膜厚の減少速度が大きいと考えられる場合、潤滑膜の修復を期待できるような潤滑膜とする必要がある。すなわち、潤滑膜の吸着エネルギーを小さくした方がよい。しかし、吸着エネルギーを小さくすると、摺動による潤滑膜厚の減少速度は大きくなる。つまり、摺動による潤滑膜厚の減少速度と修復速度は正の相関関係にあり、吸着エネルギーを制御して潤滑膜の耐摩耗設計を行うことの矛盾を示している。この矛盾を克服し耐摩耗設計を行うには、潤滑膜の吸着エネルギーと接触面圧とを考慮しつつ、潤滑膜の修復速度と摺動による潤滑膜の膜厚減少速度をバランスさせて、潤滑膜の表面被覆率を 1 以上に維持する設計が要求される。また、摺動環境温度が高くなると (5-1) (5-2) 式で示される移動確率は増加する。そのた

め、環境温度仕様の範囲内において、高温であっても摺動により潤滑膜が著しく膜厚減少しないように設計することが必要である。

5-3 本章のまとめ

本章では、浮上量が小さい磁気ヘッドで磁気ディスク面をシーク試験したときの潤滑膜厚減少の実験値と計算値との一致から、摩擦移動モデルの妥当性を検証した。また、潤滑剤の種類が異なる場合と磁気ディスクの面粗さが異なる場合について CSS 試験とドラッグ試験を行った実験結果とモンテカルロ計算結果との比較から検証し、摩擦移動モデルが妥当であることを検証した。

その結論として、次のことが導かれた。

- (1) 磁気ディスクの突起高さが大きくなると接触面圧が増加し、摩擦力が増加するため、潤滑膜の膜厚減少速度は急激に大きくなる。
- (2) 潤滑膜の膜厚減少速度は潤滑膜の吸着エネルギーが増加するに従い小さくなる。
- (3) 浮上量が小さい磁気ヘッドで磁気ディスク面をシーク試験したときの潤滑膜厚減少の実験値と計算値とが一致していることから、摩擦移動モデルの妥当性が検証された。
- (4) 図 5-9 にまとめたように、摩擦移動モデルに基づいたモンテカルロ計算で摺動による潤滑膜厚減少を予測できる。

検証項目	実験結果	モンテカルロ計算結果
潤滑膜厚減少速度	・シーク試験で時間とともに潤滑膜厚は減少	・実験結果と一致
潤滑剤依存性 (吸着エネルギー差) 面粗さ依存性	・ガラスディスク： 吸着エネルギーが大きい →潤滑膜厚減少が少ない ・テクスチャディスク： 吸着エネルギーが大きい →潤滑性が少ない	・吸着エネルギーが大きい →潤滑膜厚減少が少ない ・面粗さが大きい →潤滑膜厚減少が大きい

摩擦移動モデルに基づくモンテカルロ計算で
摺動による潤滑膜厚減少の見積もりが可能

図 5-9. 実験結果とモンテカルロ計算結果との比較

第6章 磁気ディスク潤滑膜のスピンオフモデルの検証

6-1 本章の目的

本章では、スピンオフモデルの妥当性を検証する。まず、スピンオフによる潤滑膜厚減少量が磁気ディスクの温度・回転数・吸着エネルギーにより変わることを実験によって示す。次に、スピンオフモデルを前提として潤滑剤分子の挙動をモンテカルロ法を用いて計算し、スピンオフによる潤滑膜厚の減少を求める。そして、計算結果と実験結果とを対比して、スピンオフモデルの妥当性を検証した。具体的には次の4項目を検討する。

- (1) スピンオフの環境温度依存性、磁気ディスクの回転数依存性、潤滑剤依存性、磁気ディスクのおかれている環境圧力依存性を実験的に明らかにする。
- (2) スピンオフモデルに基づくモンテカルロ計算を行い、その計算結果と実験結果が一致することを確認し、検証とする。
- (3) スピンオフモデルに基づきスピンオフの回転数依存性、吸着エネルギー依存性、環境温度依存性についてモンテカルロ計算した。その計算結果と(1)項で述べた実験結果とを対比させスピンオフモデルの妥当性を検証する。
- (4) 磁気ディスクの回転で潤滑剤が内周側から摺動エリアへ流れ込むスピンオフ修復があることをスピンオフモデルを用いて示す。

スピンオフモデルでは、スピンオフに影響する要因を図6-1に示した。その要因には次の項目が挙げられる。①遠心力・エアシアが小さいとスピンオフは少ない。つまり、回転数が低い場合(①-1)、気圧が低い場合(①-2)はスピンオフは少ない。②吸着エネルギーが大きいとスピンオフは少ない。③環境温度が低いとスピンオフは少ない。本研究では、①-1 回転数依存性、②吸着エネルギー依存性、③環境温度依存性について(3)項のように検討し、スピンオフモデルに基づく計算結果と比較してモデルの検証を行う。

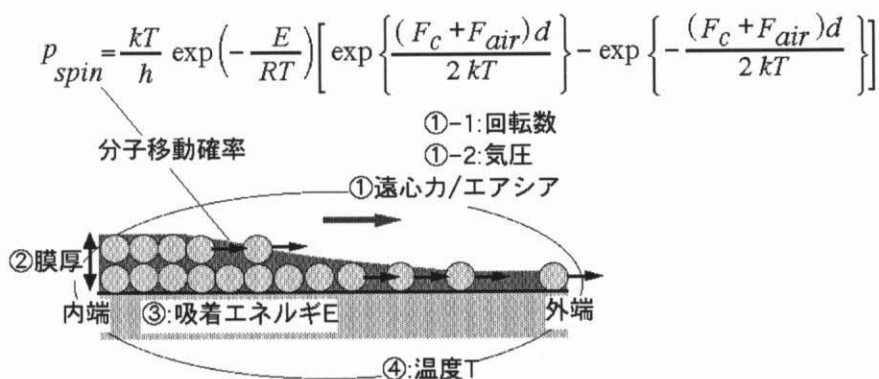


図6-1. スピンオフに影響する要因

6-2 スピンオフによる潤滑膜厚減少の確認

磁気ディスクの潤滑膜がヘッドとの接触が無い状態で膜厚減少する主な原因として、熱による蒸発とスピンオフの 2 種類が考えられる^(36,119)。スピンオフの場合、遠心力とエアシアが潤滑膜に作用するため、潤滑剤が飛散すると報告されている^(36,119,120)。そこで、スピンオフモデルの妥当性を検証するために、スピンオフがどのような場合に起こるかを実験的に確認した。確認する項目として選んだのは、(1) 磁気ディスクのおかれている環境温度の依存性、(2) 磁気ディスクの回転数の依存性、(3) 潤滑膜の吸着エネルギーの依存性、(4) 磁気ディスクのおかれている環境圧力の依存性の 4 項目である。これらの項目を選んだ理由は、次の通りである。

- (1) 修復モデル・摩擦移動モデルから示唆されるように、潤滑膜の修復速度および摩擦移動速度の両方が、温度に依存することから類推して、スピンオフ速度に対しても温度に依存すると考えた。
- (2) 遠心力およびエアシアが回転数に依存することは明らかである。
- (3) 吸着エネルギーが異なる潤滑剤は、潤滑膜の修復速度および摩擦移動速度が大きく異なることから類推して、スピンオフ速度も同様に異なると考えた。
- (4) 遠心力とエアシアのうち、エアシアがスピンオフに影響を及ぼす割合を環境圧力を変えることで定量的に明らかにできる。

6-2-1 スピンオフの温度依存性確認

平均分子量が約 2000 の潤滑剤 Fomblin Z-DOL を 1.9nm ディップ塗布した 2.5 インチ型の磁気ディスクをスピンオフ特性確認用に作成した。保護膜は窒素添加カーボン保護膜であり、窒素添加量は約 16% である。この磁気ディスクを HDA に組み込み、HAD のカバー温度を 45℃、65℃ に設定して、それぞれ 4000min⁻¹ の回転数で 100、500、1000、2000 時間回転させた後の潤滑膜厚を FTIR で測定した。潤滑膜厚測定結果を図 6-2 に示す。

この結果は、高温の 65℃ でのスピンオフが大きいことを示している。また、潤滑膜厚の経時変化は回転時間が 100 時間以上の領域で、回転時間の常用対数値に対してほぼ直線的に減少している。そこで潤滑膜のスピンオフを表す尺度として (6-1) 式で表される対数減少勾配を定義した。

$$t_{LB} = -\beta \cdot \log_{10}(t) + \gamma \quad (6-1)$$

ここで、 t_{LB} は潤滑膜厚、 β は対数減少勾配、 t は試験時間、 γ は定数である。

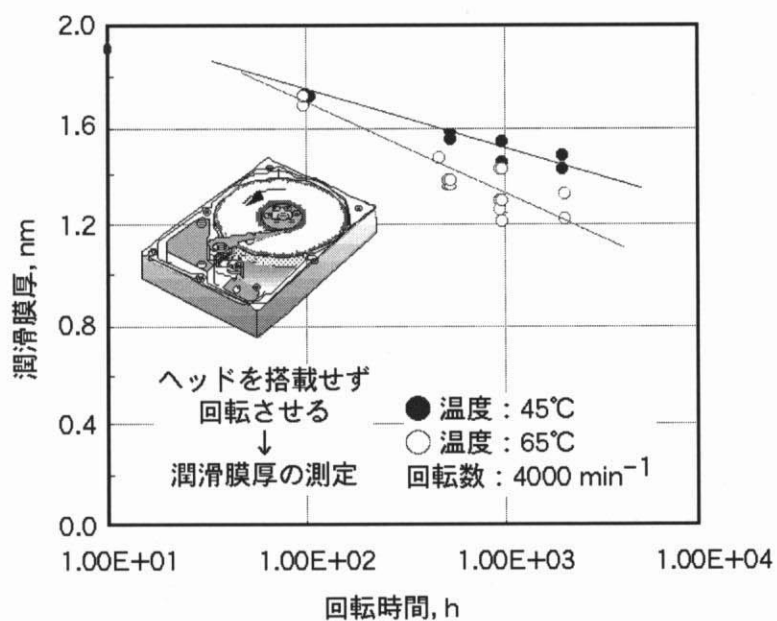


図 6-2. スピンオフの温度依存性

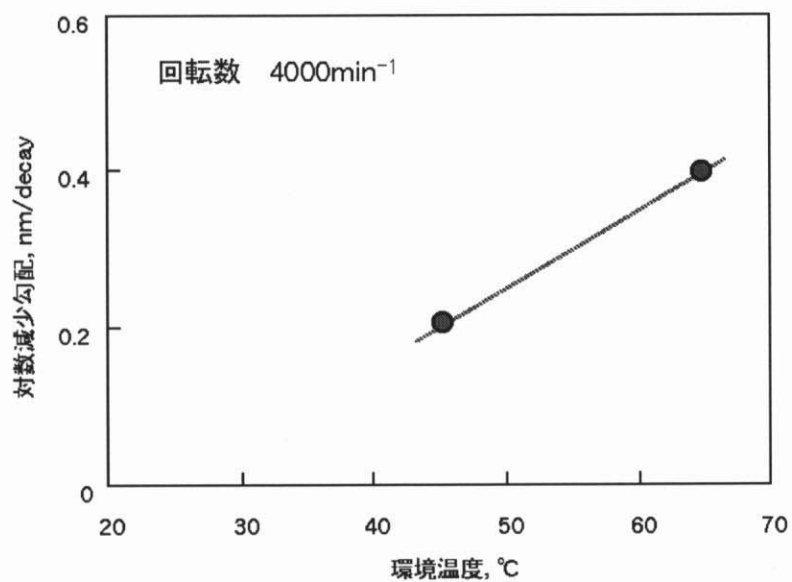


図 6-3. 対数減少勾配の温度依存性

対数減少勾配を用いて図 6-2 を書き直すと図 6-3 となる。環境温度が 60°C の場合の対数減少勾配は 45°C の場合の約 2 倍に増加している。

6-2-2 スピンオフの回転数依存性確認

潤滑剤 Fomblin AM2001 を 1.8nm ディップ塗布した 3.5 インチの磁気ディスクをスピンオフ特性確認用に作成した。潤滑剤の平均分子量は約 2000 である。保護膜は窒素添加カーボン保護膜であり、窒素添加量は約 10% である。この磁気ディスクを HDA に組み込み、HDA 温度を 60°C に設定し、6300、8100、10000 min^{-1} の回転数でそれぞれスピンオフ量を測定して対数減少勾配を求めた。また、エアシアがスピンオフにどの程度影響するかを見積もるために、温度 60°C、0.1 気圧の減圧環境下に HDA を置きエアシアを小さくして、7200 min^{-1} で磁気ディスクを回転させた時のスピンオフを測定した。対数減少勾配の回転数依存性と減圧環境下での対数減少勾配を図 6-3 に示す。回転数の増加に対して対数減少勾配は直線的に増加する。また、減圧環境下で回転させた磁気ディスクの対数減少勾配は常圧環境下での対数減少勾配に比較して約 1/4 に小さくなっている。この結果は、潤滑膜のスピンオフは、遠心力の影響よりもエアシアの影響が大きいことを示している。

6-2-3 スピンオフの吸着エネルギー依存性確認

潤滑剤が異なると吸着エネルギーが異なる。そのため潤滑剤分子の易動度も異なり、スピンオフ量も異なると容易に推定される。そこで、潤滑剤 Fomblin Z-DOL ならびに Fomblin Z-DOLTX をそれぞれ 2.0nm ディップ塗布した 2.5 インチ型の磁気ディスクをスピンオフ特性確認用に作成した。

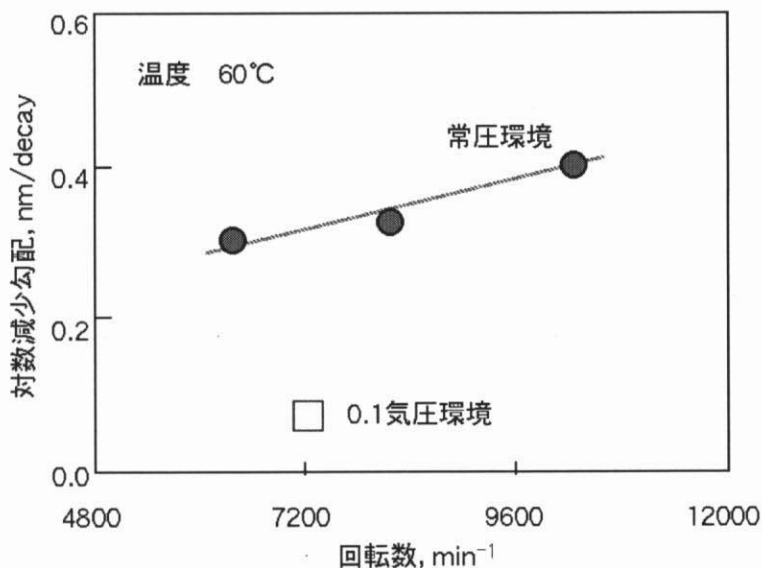


図 6-4. 潤滑膜のスピンオフに対する回転数・エアシアの影響

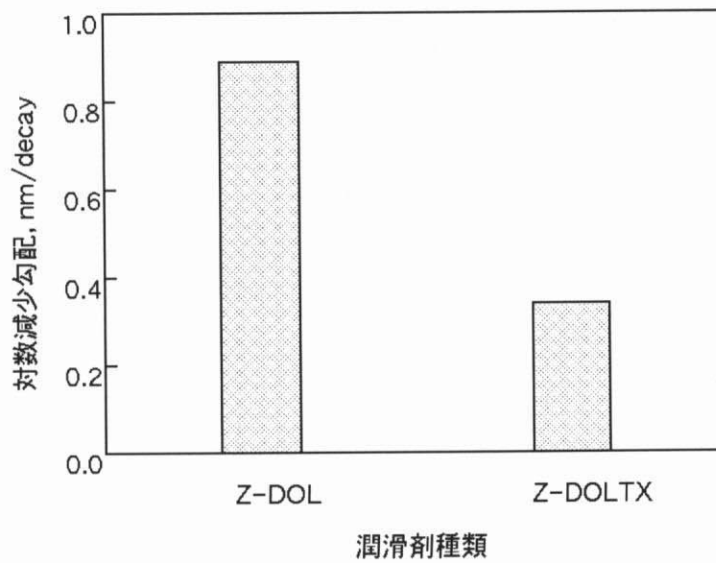


図 6-5. 潤滑剤の種類によって変化するスピノフ速度

それぞれの潤滑剤の平均分子量はともに約 3000 であり、潤滑剤の吸着エネルギーは表 5-1 に示したように Z-Dol が約 32.5kJ/mol、Z-DOLTX が約 35kJ/mol である。それぞれの磁気ディスクについて温度 60℃、回転数 12000 min⁻¹ の場合の対数減少勾配を測定した。結果を図 6-5 に示す。吸着エネルギーの大きい Z-DOLTX が、明らかにスピノフが少ない。すなわち、吸着エネルギーの大きい潤滑膜は保護膜と強く吸着しているため、スピノフが小さい。

6-2-4 実験結果のまとめ

磁気ディスクのスピノフに対する温度・回転数・エアシア・潤滑剤の吸着エネルギー、の影響をそれぞれ実験的に確認し、次のことを明らかとした。

- (1) 温度が高くなると、潤滑膜のスピノフは大きくなる。
- (2) 磁気ディスクの回転数が大きくなると、スピノフは大きくなる。
- (3) スピノフには遠心力よりもエアシアが大きく影響している。
- (4) 潤滑剤の種類によってスピノフは異なり、吸着エネルギーの大きい潤滑剤の方がスピノフは少ない。

6-3 スピンオフモデルの検証

6-3-1 スピンオフモデルに基づくモンテカルロ計算

スピンオフモデルの検証を行うため、スピンオフモデルを前提として潤滑剤分子の挙動をモンテカルロ法を用いて計算し、スピンオフ量を求める。3-3 節で述べたようにスピンオフモデルでは、潤滑剤分子の移動確率 p_{spin} は次式で与えられる。

$$p_{spin} = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \left[\exp\left(\frac{(F_c + F_{air})d}{2kT}\right) - \exp\left(-\frac{(F_c + F_{air})d}{2kT}\right) \right] \quad (6-2)$$

遠心力・エアシアが作用することで、移動確率に従い潤滑剤分子は磁気ディスクの内周側から外周側へ移動する。この潤滑剤分子の移動パターンを考えると、少なくとも図 6-6 に示した 5 種の移動パターンが考えられる。図 6-6 は磁気ディスクの内周端から外周端までの半径方向に沿った潤滑剤分子の移動を表したものである。吸着モデルに基づき、潤滑膜の分子層数は 2 分子層と仮定する。潤滑剤分子の移動パターンの詳細を以下に述べる。

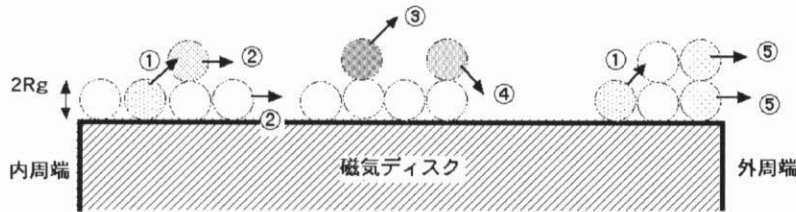


図 6-6. モンテカルロ計算で仮定した潤滑剤分子の移動パターン

- (1) 移動方向の吸着点が空いている時、すなわち外周側隣または隣の下層に潤滑膜分子が存在しない時に移動するケース (図 6-5 の②,④に相当する)。
- (2) ディスク面 1 層目から移動方向の隣の 1 層目の吸着点には分子が存在しているが、2 層目は空いている時に、1 層目から 2 層目へ乗りあがり移動するケース (図 6-5 の①に相当する)。その移動に要するエネルギーは、隣が空いている場合と比べて大きくなる。そこで、2 層目に潤滑剤分子が乗り上げる仕事量は吸着エネルギーを断ち切るのに等しいと仮定して、移動確率 p_{spin} を変形し、次式とした。

$$p_{spin} = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{2E_a}{RT}\right) \left[\exp\left\{\frac{(F_c + F_{air})d}{2kT}\right\} - \exp\left\{-\frac{(F_c + F_{air})d}{2kT}\right\} \right] \quad (6-3)$$

- (3) 磁気ディスクの外周端で潤滑剤分子が磁気ディスク表面から外周空間へ飛散するケース（図 6-5 の⑤に相当する）。また、外周端では磁気ディスクの外側に HDA のシュラウドがあるため、外周空間から円板内部への空気流れが発生し、内周から外周への空気流れは打ち消される⁽¹¹⁸⁾。そこで、外周端の分子の移動確率 p_{spin} は、エアシアを 0 として (6-4) 式となる。

$$p_{spin} = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \left[\exp\left\{\frac{F_c d}{2kT}\right\} - \exp\left\{-\frac{F_c d}{2kT}\right\} \right] \quad (6-4)$$

- (4) 第 2 層の分子が空間へ飛散する場合も想定した（図 6-5 の③に相当する）。この場合は、図 6-5 の①の場合と同じと考えて (6-2) 式で示した移動確率を用いた。

また、潤滑剤分子は遠心力・エアシアの作用で変形せず、直径 $2Rg$ の球形をしていると仮定した。

前述の潤滑剤分子の移動パターンとそれぞれのパターンに対応する潤滑剤分子の移動確率に基づき、修復モデルの場合と同じように、モンテカルロ計算を行った。潤滑膜の移動は磁気ディスクの内周端から外周端までにわたって計算する必要があるため、スピンオフモデルにおいてもランダムウォーク理論を用いて分子振動数と単位移動距離の変換を行った（詳細については第 4 章で述べたため、本章では省略する）。計算上の分子振動数 f 、単位移動距離 ΔL と実際の分子振動数 f' 、移動距離 $2Rg$ との関係は次式で表される。

$$f' = \frac{4Rg^2}{\Delta L^2} f \quad (6-5)$$

内周端 R_{in} から外周端 R_{out} までを 30 分割し、単位移動距離 ΔL は次式と定義した。

$$\Delta L = \frac{(R_{out} - R_{in})}{30} \quad (6-6)$$

モンテカルロ計算の潤滑剤分子吸着点の座標系には円柱座標を用いた。修復モデルと同様に、第 1 層の全ての格子点を固定潤滑剤分子に対応する格子点とモバイル潤滑剤分子に対応する格子点とに乱数を使って区別した。その格子点の比率が固定膜厚比率 BR になるように決定した。

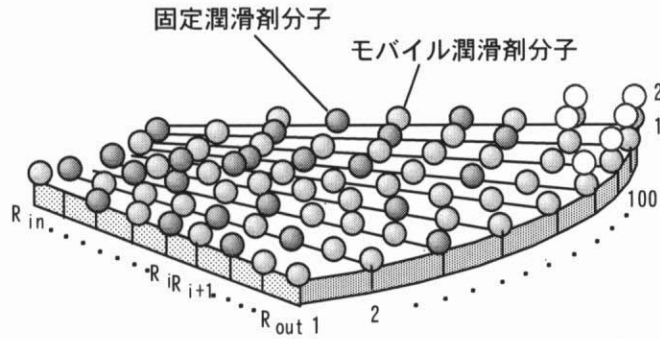


図 6-7. 潤滑剤分子の初期配置

潤滑剤分子の初期配置の概念図を図 6-7 に示す。円柱座標を用いているため、半径位置に関係なく 1 周の吸着点の数は同じとなり、現実と異なる。そこで、半径 R_i 位置の潤滑剤分子 1 個が外周側の半径 R_{i+1} 位置の吸着点へ移動した場合、移動先の吸着点では潤滑剤 1 分子が R_i/R_{i+1} 個となるように変換した。すなわち、半径 R_{i+1} 位置では半径 R_i 位置の 1 分子を n_i 個とし半径 R_{i+1} 位置の 1 分子を n_{i+1} 個として、(6-7) 式で示した計算上実数で与えられる個数を定義した。計算上、 n_i 個あるいは n_{i+1} 個の潤滑剤分子は、移動先の吸着点に存在する分子の個数との和が 1 以下の場合、移動先の吸着点へ移動可能であり、移動先での分子個数をその和とした。

$$n_{i+1} = \frac{R_i}{R_{i+1}} n_i \quad (6-7)$$

また、移動確率 P_{spin} も単位移動距離 ΔL の変換に伴って変換する必要がある。つまり、(6-2) 式の遠心力 F_c 、エアシア F_{air} は半径 r をパラメータとして含んでいるので、計算上で半径位置 R_i から R_{i+1} へ潤滑剤分子が移動する場合を考えると、各半径位置の遠心力 F_c 、エアシア F_{air} は大きく異なる。そこで、遠心力 F_c とエアシア F_{air} とが半径位置 R_i から R_{i+1} に潤滑剤分子を距離 ΔL だけ移動させる仕事は、内周側と外周側のポテンシャルエネルギー変化分 $\Delta E \times 2$ に等しいとして、計算上のポテンシャルエネルギー変化分 $\Delta E'$ を (6-8) 式で定義する。

$$\Delta E' = (F_c + F_{air}) \frac{\Delta L}{2} = \left(m + \frac{1}{2} v_{air} \eta_{air} d^2 \right) \frac{\omega^2 r \Delta L}{2} \quad (6-8)$$

(6-5) (6-8) 式を移動確率式 (6-5) ~ (6-7) 式へ適用することでモンテカルロ計算を行った。

また、半径方向分割点への潤滑剤分子の配置は次のように行った。第 1 層目の吸着点完全に埋

まる潤滑膜厚を飽和潤滑膜厚 t_s 、潤滑膜厚を t_{LB} として 0~1 の規格化乱数と t_{LB}/t_s の大小関係で分子を配置した。すなわち、

- $t_{LB}/t_s < 1$ の時 規格化乱数 $< t_{LB}/t_s$ ならば 1 層目へ分子を配置する。
規格化乱数 $\geq t_{LB}/t_s$ ならば 1 層目へ分子を配置しない。
- $t_{LB}/t_s \geq 1$ の時 1 層目の全ての吸着点へ分子を配置する。さらに、
規格化乱数 $< t_{LB}/t_s$ ならば 2 層目へ分子を配置する。
規格化乱数 $\geq t_{LB}/t_s$ ならば 2 層目へ分子を配置しない。

固定潤滑剤分子とモバイル潤滑剤分子の区別は円柱座標上の吸着点を固定潤滑膜厚とモバイル潤滑膜厚との比率になるようにランダムに区別し、その吸着点に吸着した分子を固定潤滑剤分子またはモバイル潤滑剤分子とした。飽和潤滑膜厚 t_s は潤滑膜の表面被覆率が 100% になる膜厚を用いた。最終的な各半径位置の平均潤滑膜厚は 100 回のモンテカルロ計算を繰り返し、同一周上の格子点の潤滑剤分子の平均存在個数 N_{ave} から次式を用いて求めた。

$$t_{LB} = N_{ave} \cdot t_s \quad (6-9)$$

潤滑剤分子はモバイル潤滑剤分子と固定潤滑剤分子で区別し、それぞれの吸着エネルギーで移動確率を計算した。実際の計算のフローチャートを図 6-7 に示す。

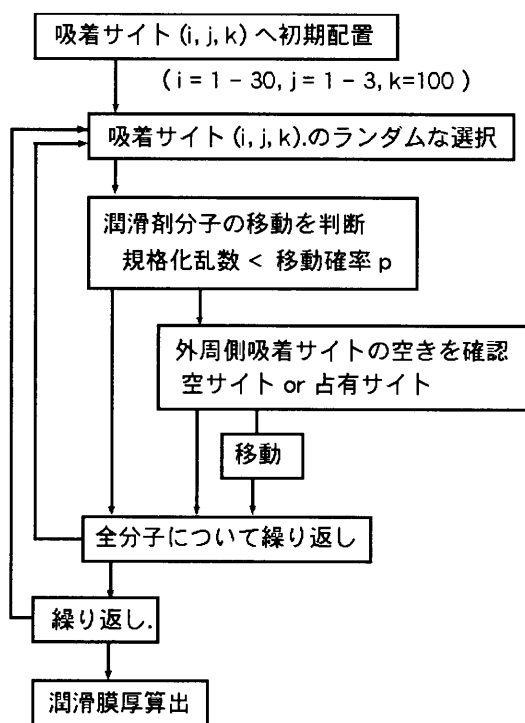


図 6-8. モンテカルロ計算の計算フローチャートの概要

表6-1. モンテカルロ計算に用いたパラメータ

回転数	4000 min ⁻¹
動粘度 ν_{air}	1.59×10^{-5} m ² /s
粘性係数 η_{air}	1.66×10^{-5} 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	3000
内周端半径 R_{in}	10 mm
外周端半径 R_{out}	32.5 mm
分割点数	30
分割点間の距離 ΔL	0.75mm
温度 T	65°C

次に、潤滑剤分子の配置を終えた後、分割点をランダムに選択し、そこに存在する分子が移動するか否かを乱数で判断する作業を繰り返して潤滑膜の時間推移を求める。時間間隔の設定は、移動確率の期待値がもっとも大きい最外端から1列内周側のモバイル潤滑剤分子の移動確率を1以下になるように設定した。表6-1に代表的な計算パラメータを示す。

6-3-2 スピンオフモデルの検証

スピンオフモデルの妥当性を検証するため、モンテカルロ計算を行い、実験結果と比較する。まず、スパッタ法をで形成したアモルファスカーボン膜 (C:N 膜) と CVD 法で形成した DLC 保護膜に、潤滑剤 FomblinZ-DOL を塗布した磁気ディスクを用意し、のスピンオフによる潤滑膜厚減少の実験値と計算結果とを比較した。温度は 60°C、回転数は 4000min⁻¹ で実験を行った。計算に用いた吸着エネルギー値 E_m は、環境温度を変化させて潤滑膜の修復速度を測定し、それぞれの保護膜についてアレニウスプロットにより活性化エネルギーとして求めた値⁽¹²³⁾ を用いた。C:N 膜の場合、吸着エネルギー E_m を 33.5kJ/mol、DLC 膜の場合、31.5kJ/mol とした。固定潤滑膜の吸着エネルギー E_b は 75kJ/mol と同じとした。

まず最初に、C:N 保護膜で初期潤滑膜厚 1.9nm の磁気ディスクを環境温度 65°C で 1000 時間回転させた後の潤滑膜厚の半径方向分布を FTIR で測定した結果を点で、計算結果を実線で、図 6-9 に示す。実験結果では、外周端で潤滑膜厚は増加し、内周側で著しく減少するが、その傾向と値は計算結果と一致している。

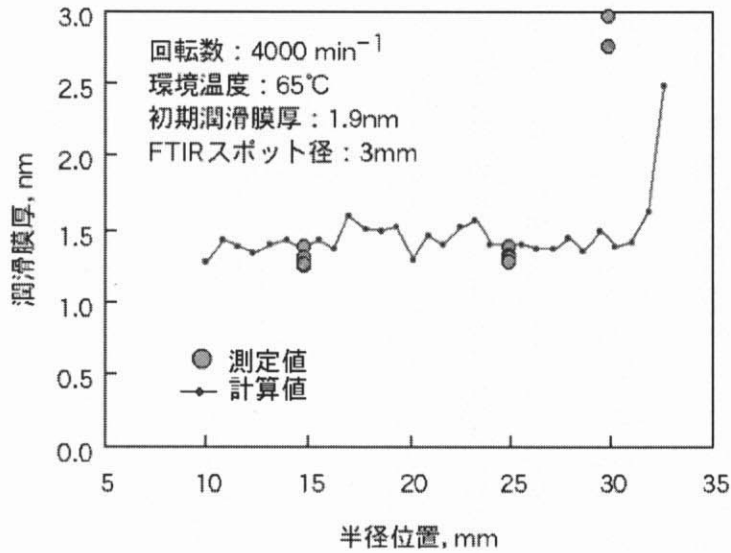


図 6-9. 1000 時間後の潤滑膜厚プロファイル

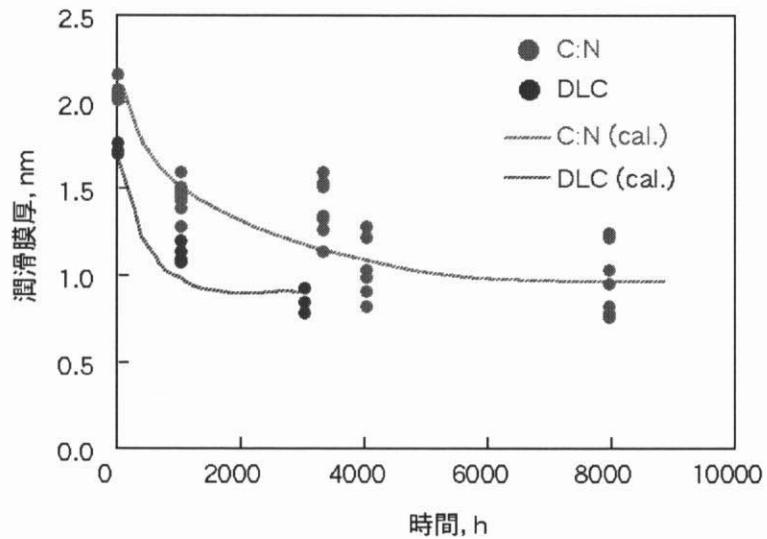


図 6-10. スピンオフモデルに基づく計算結果と実験結果との比較

次に、スピンオフによる膜厚減少の実験結果と計算結果の比較を図 6-10 に示す。実験結果と計算結果は測定値のばらつき範囲で一致している。この図 6-9、10 に示した比較結果から、スピンオフモデルに基づくモンテカルロ計算でスピンオフによる潤滑膜厚減少量を予測可能であることが確認できた。

次に、スピンオフの温度依存性を計算した。潤滑剤は FomblinZ-DOL を想定して吸着エネルギー E_m

を 32.5kJ/mol 、 E_b を 75kJ/mol とした。固定膜厚比率 BR は 0.4 とした。回転数は 4000min^{-1} 、温度 25°C 、 45°C 、 65°C で計算を行った。図 6-11 には半径 15mm の位置の潤滑膜厚の経時変化を計算した結果を示す。回転時間が 100h から 1000h の間で対数減少勾配を概算すると、環境温度 45°C の場合は約 0.3nm/decay 、環境温度 65°C の場合は約 0.4nm/decay 、となり、この計算結果と図 6-3 に前記した実験結果は比較的良く一致していることがわかる。

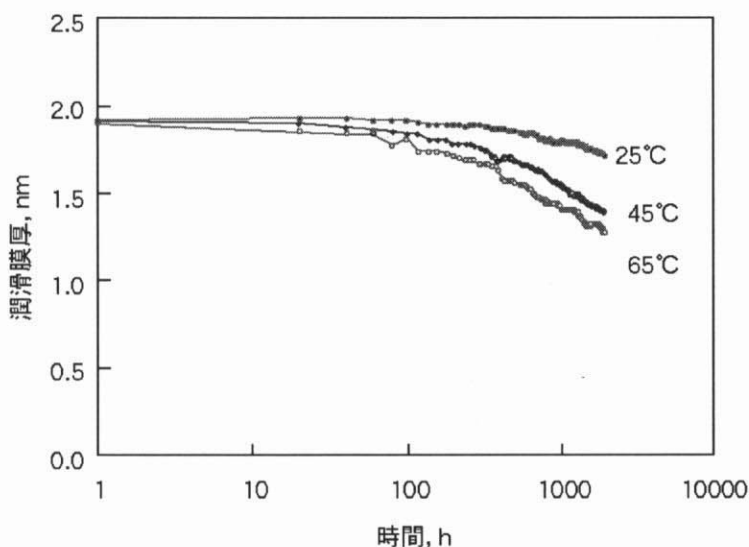


図 6-11. スピンオフの温度依存性 (計算値)

次に回転数依存性を計算により求めた。3.5 インチ型円板で潤滑剤は AM2001 の場合を想定して、モバイル潤滑膜の吸着エネルギー E_m を 35kJ/mol 、固定潤滑膜の吸着エネルギー E_b を 75kJ/mol とした。温度は 60°C 、回転数を 6300 、 8000 、 10000min^{-1} として計算を行った。図 6-12 に半径 20mm の位置での潤滑膜厚の経時変化の計算結果を示す。回転時間 100h から 1000h の間で対数減少勾配を求めると、回転数 6000min^{-1} で 0.15nm/decay 、回転数 8000min^{-1} で 0.45nm/decay 、 10000min^{-1} で 0.55nm/decay となり、対数減少勾配は回転数に比例している。この計算結果から、回転数の増加に伴ってスピンオフが増加することが計算でも示された。

さらに、潤滑膜の吸着エネルギーでスピンオフ量が変化することを計算した。吸着エネルギーは 32.5 、 35 、 37.5 、 40kJ/mol として 60°C 、 12000min^{-1} の設定で計算を行った。2.5 インチ型の磁気ディスクを想定して、半径 15mm の位置の潤滑膜厚の経時変化を図 6-13 に示す。吸着エネルギーが大きい方がスピンオフは少ない。

この計算結果を、6-2-3 節で示した実験結果、(潤滑剤 Z-DOL の対数減少勾配が約 0.4nm/decay 、潤滑剤 DOL-TX の対数減少勾配が約 0.9nm/decay)、と比較すると、Z-DOL の場合 (吸着エネルギー 32.5kJ/mol) が対数減少勾配が約 0.8nm/decay 、Z-DOLTX の場合 (吸着エネルギー 35kJ/mol) が対数減

少勾配が約 0.5nm/decay、であり、ほぼ実験結果と一致している。この計算結果を、6-2-3 節で示した実験結果、(潤滑剤 Z-DOL の対数減少勾配が約 0.4nm/decay、潤滑剤 DOL-TX の対数減少勾配が約 0.9nm/decay)、と比較すると、Z-DOL の場合(吸着エネルギー 32.5kJ/mol)が対数減少勾配が約 0.8nm/decay、Z-DOLTX の場合(吸着エネルギー 35kJ/mol)が対数減少勾配が約 0.5nm/decay、であり、ほぼ実験結果と一致している。このようにスピノフモデルを基にしたモンテカルロ計算は、スピノフの温度依存性・回転数依存性・吸着エネルギー依存性を予測が可能であることを確認した。

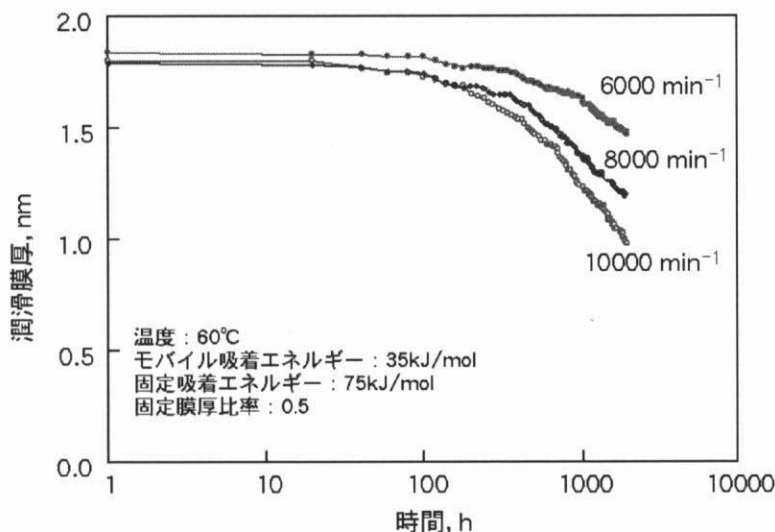


図 6-12. スピノフの回転数依存性 (計算値)

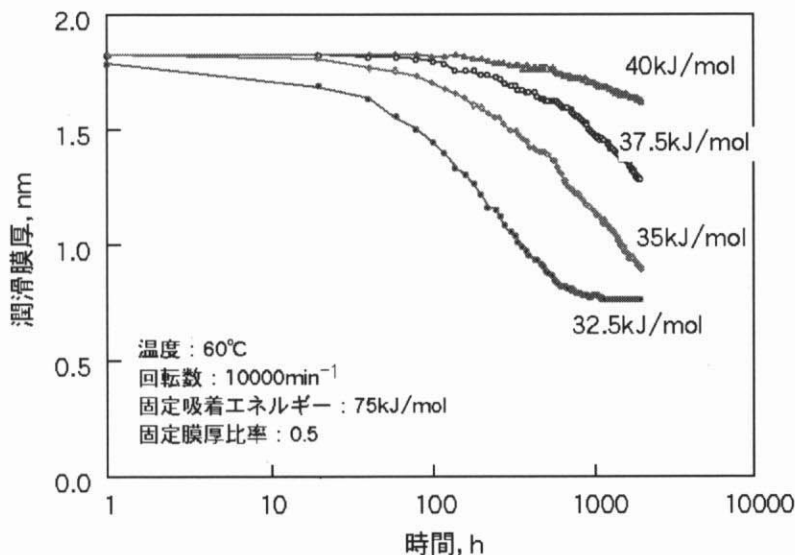


図 6-13. スピノフの吸着エネルギー依存性 (計算値)

このように潤滑膜はスピノフするが、潤滑膜厚を厚くすれば潤滑膜がスピノフしても残存する潤滑膜の膜厚は厚くなると推定される。その推定が正しいならば、潤滑膜厚を厚くすれば、スピノフ後においても耐摩耗性を維持できる可能性がある。そこで、モンテカルロ計算で初期の潤滑膜厚をパラメータとして、スピノフを計算した。モバイル潤滑膜の吸着エネルギー E_m を 35kJ/mol、固定潤滑膜の吸着エネルギー E_b を 75kJ/mol とした。回転数は 10000min^{-1} 、温度は 60°C である。計算結果を図 6-14 に示す。計算結果は推定に反し、1000 時間以上の長時間後では初期潤滑膜厚を厚くしても効果が見られない。この理由は、潤滑膜厚が厚い磁気ディスクは潤滑膜厚が薄い磁気ディスクよりスピノフする速度が大きいためと考えられる。

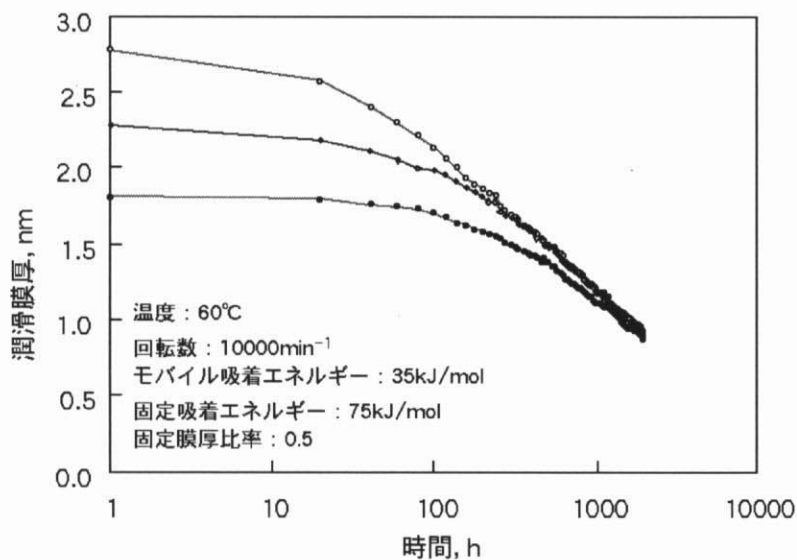


図 6-14. スピノフの初期潤滑膜厚依存性 (計算値)

6-4 スピノフによる潤滑膜の修復に関する考察

スピノフモデルでは、潤滑膜がスピノフする過程で、潤滑剤分子は内周から外周へと移動すると考た。そこで、ある半径位置で磁気ディスクがヘッドと接触摺動し、その半径位置の潤滑膜厚が減少すると、その摺動部へ内周側から潤滑剤が流れ込むことが容易に推定できる。それを確かめるために、半径 29.95mm から半径 30.15mm の領域を修復領域としてモンテカルロ計算を行い、潤滑膜の修復速度を求めた。結果を図 6-15 に示す。潤滑剤は内周側から修復領域へ流れ込み、時間とともに潤滑膜が修復する。図 4-13 に示したように磁気ディスクが静止した状態の修復速度に比べて、磁気ディスクの回転時にはスピノフによって潤滑剤の修復が加速されることが明確になった。

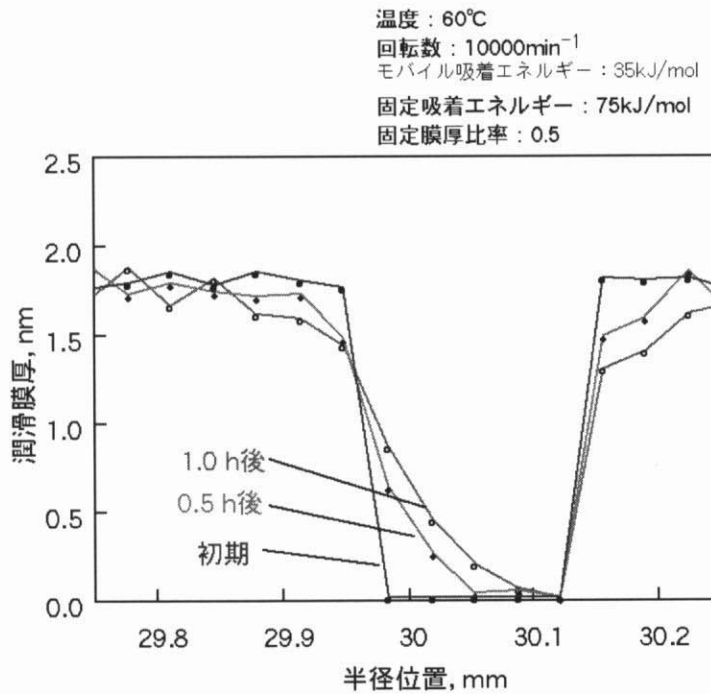


図 6-15. スピンオフによる潤滑膜の修復（計算値）

6-5 本章のまとめ

本章では、最初に潤滑膜のスピンオフ速度の温度依存性・回転数依存性・吸着エネルギー依存性を実験で示した。次に、実験結果とスピンオフモデルに基づくモンテカルロ計算結果との比較から、スピンオフモデルの妥当性を検証した。

その結論として以下のことが導かれた。

- (1) 環境温度が高温であるほど、磁気ディスクの回転数が高速回転であるほど、潤滑膜の吸着エネルギーが小さいほど、スピンオフは大きいことを実験により確認した。
- (2) スピンオフモデルに基づくモンテカルロ計算の計算結果は、実験結果と測定値のばらつきの範囲で一致している。この結果よりスピンオフモデルの妥当性が検証された。また、上記実験結果の傾向をスピンオフモデルで説明できる。
- (3) 初期潤滑膜厚が大きいとスピンオフ速度も増加するため、長時間稼働した後の潤滑膜厚は初期潤滑膜厚にあまり依存せず、ほぼ等しいことをモンテカルロ計算により明らかにした。
- (4) スピンオフによって、潤滑剤分子が内周側から外周側へ移動するため、潤滑剤の修復速度が増加することをモンテカルロ計算により明らかにした。
- (5) 図 6-16 にまとめたように、スピンオフモデルに基づいたモンテカルロ計算でスピンオフによる潤滑膜厚減少を予測できる。

検証項目	実験結果	モンテカルロ計算結果
潤滑膜厚減少速度 潤滑膜厚の プロファイル	<ul style="list-style-type: none"> ・スピノフして時間とともに潤滑膜厚は減少 ・データエリアは潤滑膜厚減少外端で潤滑膜厚増加 	<ul style="list-style-type: none"> ・実験結果と一致 ・実験結果と一致
温度依存性	<ul style="list-style-type: none"> ・高温 →スピノフ大 	<ul style="list-style-type: none"> ・高温 →スピノフ大
回転数依存性	<ul style="list-style-type: none"> ・高速回転 →スピノフ大 	<ul style="list-style-type: none"> ・高速回転 →スピノフ大
潤滑剤依存性 (吸着エネルギー差)	<ul style="list-style-type: none"> ・吸着エネルギー大 →スピノフ少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ・吸着エネルギー大 →スピノフ少ない

スピノフモデルに基づくモンテカルロ計算で
スピノフによる潤滑膜厚減少の見積もりが可能

図 6-16. 実験結果とモンテカルロ計算結果との比較