

# トライボロジスト

Journal of Japanese Society of Tribologists

浮上ヘッドによる磁気ディスク潤滑剤の膜厚変化の解析

柳 澤 憲 史  
川久保 洋 一  
吉 野 正 人

“トライボロジスト” 第 52 卷 第 4 号 別刷

2007年4月15日 発行

社団法人 日本トライボロジー学会



# 浮上ヘッドによる磁気ディスク 潤滑剤の膜厚変化の解析

原稿受付 2006年8月9日  
“トライボロジスト” 第52巻 第4号 (2007) 285~292

柳 澤 憲 史

信州大学 大学院学生

(〒380-8553 長野県長野市若里4丁目17-1)

川 久 保 洋 一

吉 野 正 人

信州大学 工学部機械システム工学科

(同上)

**Abstract** Lubricants on thin-film disks are very important to reduce head and disk wear. Therefore, it is necessary to know the lubricant behavior under flying heads. Lubricant depletion due to flying heads has been studied experimentally. We developed a simulation program to calculate numerically the change in lubricant thickness under a flying head on a thin-film magnetic disk with a thick nonpolar lubricant. In recent HDDs, the lubricants thickness has become molecularly thin and polar lubricants have been used. In this paper, we took account of thickness-dependent lubricants diffusion and viscosity in our simulations to study molecularly thin polar lubricants. The simulated results showed that the changes of film thickness are small in thin films without considering the thickness dependence. Then, we showed the changes of lubricants thickness with thickness-dependent diffusion and viscosity are smaller than those without them. We considered it necessary to include thickness-dependence into diffusion and viscosity in these cases.

## 1. はじめに

磁気ディスクは現在広く使われ, その大容量化, 小型化を実現するために情報記録密度の向上が要求されている. 今後  $1 \text{ Tb/in}^2$  の記録密度を実現させるためには, 磁気ディスクと磁気ヘッドのすきま (スペーシング) を  $2 \sim 3.5 \text{ nm}$  に低減することが必要である<sup>1)</sup>. このスペーシング低減に伴い, 相対運動するヘッドとディスクの接触確率が高まり, 損傷の生ずる可能性が増す. ヘッドとディスクの磁性膜の損傷を防止するため, これらはカーボン保護膜で被覆され, さらにディスク・カーボン膜上には潤滑剤が塗布されている<sup>2,3)</sup>.

磁気記録再生特性からは潤滑剤膜厚を極力薄くすることが必要であるが, 長期稼働における損傷防止のためにはその初期膜厚を長期間維持することが課題となる. 膜厚を維持するためには, 潤滑

剤の移動減少メカニズムを解析し, 減少を防止する必要がある. 磁気ディスク上の潤滑剤では, 膜厚を変化させる静的な現象として (1) 蒸発 (2) 拡散 (3) 潤滑剤分子間力 (4) 潤滑剤・ディスク表面間力があり, ディスク回転によるものとして (5) 回転による遠心力 (6) ディスク面上の空気流れからのせん断力, ヘッドから受ける影響として (7) ヘッド下部の圧力勾配およびそのための (8) 空気流れによる空気せん断力 (9) ヘッドによるピックアップ (10) ヘッドが触媒となっておこる分解 (11) ヘッドの及ぼす物理的排除 (12) ヘッド・潤滑剤間ファン・デル・ワールス力等がある.

潤滑剤膜厚の変化を実験的に調べるには FTIR, 走査式マイクロエリプソメータなどが用いられ, ヘッド浮上トラックでの膜厚の変化が報告されている<sup>4)</sup>. 最近では, 光学的表面解析装置 (OSA :

## Thickness Change of Thin Lubricant Film on Thin-Film Magnetic Disks under Flying Head

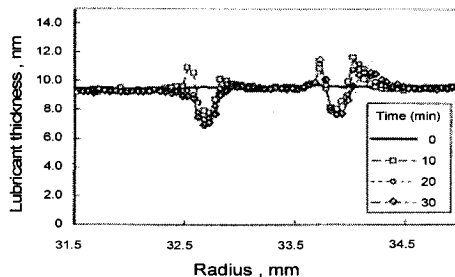
By Kenji YANAGISAWA, Student, Graduate School, Shinshu University (17-1, Wakasato 4-chōme, Nagano-shi, Nagano 380 8553), Youichi KAWAKUBO and Masato YOSHINO, Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Engineering, Shinshu University (ditto)

**Key Words:** flying head, thin-film disk, thickness-dependent diffusion, thickness-dependent viscosity, lubricant depletion

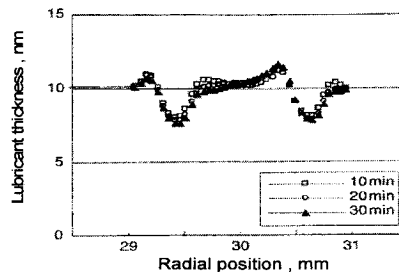
Optical Surface Analyzer) を用いた詳細な解析が進められている<sup>5)</sup>。しかし、潤滑剤塗布から測定までを、多種多様なサンプルで観察するためには時間的困難を伴う。これを解決するためには浮上ヘッド下の潤滑剤膜厚の変化を数値的に解析することにより、装置稼動時の膜厚変化を予測できるシミュレーションプログラムを開発することが有効である。

磁気ヘッドの存在しない回転ディスク上の潤滑剤膜厚変化については柳澤ら<sup>4)</sup>が膜厚 100nm でシミュレーションを行い、実験との一致を得ている。また、Karis ら<sup>6)</sup>は、膜厚 10nm でシミュレーションを行い、ディスク上潤滑剤の粘度は薄膜になるほど増加することを示した。以下薄膜での増加した粘度を薄膜粘度と呼ぶ。磁気ヘッドの影響については、Pouwer ら<sup>7)</sup>が (5) (6) (8) のみを考慮したシミュレーションを試したが、実験との一致は得られなかった。そこで前報<sup>8,9)</sup>では基礎的な解析として、潤滑剤膜に影響を及ぼす物理現象はおもに (2) 拡散、(5) 遠心力、(6) (8) のせん断力、であると考え、シミュレーションプログラムを開発した。このプログラムを用い膜厚 10nm で、拡散係数および粘度が膜厚によらず一定としてシミュレーションを行った。その結果報告されている非極性潤滑剤の厚膜での実験結果<sup>7)</sup>と比較し (Fig.1) よく一致することを示した。また頼野ら<sup>10-12)</sup>は二次元の分子気体潤滑方程式と長波方程式を併用し、微小サイズ  $0.1\ \mu\text{m}$  四方のスライダを 10nm 浮上させた場合の薄膜の膜厚変化による圧力変化を逐次計算し、膜厚の変形解析を行っている。

現在は潤滑剤の薄膜化も進み膜厚は 1.5nm 程度に薄くなっている。また潤滑剤には極性基を持つものが使われている。極性潤滑剤では、極性を持つ末端基がディスク・カーボン保護膜と結合し、ボンド層 (固定層) と呼ばれる膜が形成される。極性潤滑剤の膜厚の変化は、1.5nm 程度の薄膜でボンド層の影響を強く受ける。Ma<sup>13)</sup>は非極性潤滑剤 Fomblin Z03 および極性潤滑剤 Fomblin Z-dol をディスクの一部に塗布して段差状の界面を作成し、その後の時間により変化する膜厚分布を測定している (以下ハーフディップと呼ぶ)。その結



(a) Experimental result [出典: 文献 7)]



(b) Calculated result [出典: 文献 9)]

Fig.1 Lubricant distribution under a head (non-polar lubricant initial thickness 10nm)

果、Fomblin Z03 の拡散係数は薄膜になるほど大きくなり 1nm 辺りがピークでこれより薄膜では減少すること、ならびに Fomblin Z-dol では極性潤滑剤の特徴であるボンド層の影響を受けて数層の垂直な壁面の後退とテラス構造が見られること等から拡散係数は膜厚によって変化することを報告している。ここで報告された拡散係数の変化は潤滑剤膜厚の変化に影響を与える。清水ら<sup>14)</sup>は極性を考慮した潤滑剤においてディスク単独でも分離圧により膜の変形が突起状に成長する現象を示した。しかし、1.5nm 程度の薄膜でのヘッド下の極性潤滑剤の膜厚の変化シミュレーション結果は報告されていない。

そこで本研究では、浮上ヘッドによる磁気ディスク潤滑剤の膜厚の変化特性を明らかにすることを目的とした。Karis ら<sup>6)</sup>と Ma ら<sup>13)</sup>の論文から遠心力やせん断力による潤滑剤の移動には粘度が影響し、潤滑剤の修復には拡散係数が影響すると考えられる。そこで本研究では潤滑剤の移動と修復を別の現象としてとらえ、拡散係数と粘度を独

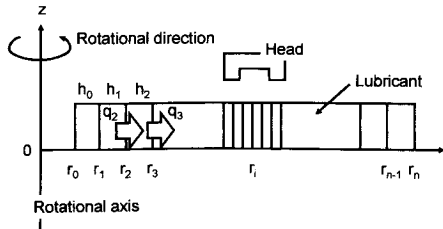


Fig.2 Calculated model of lubricant distribution on thin-film disk

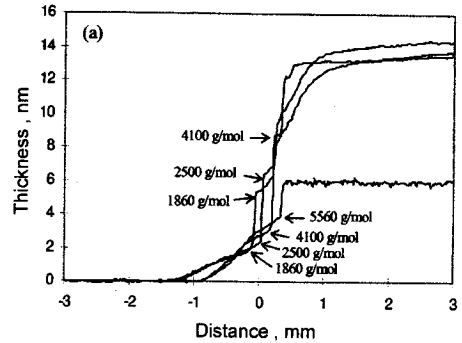
立したパラメータとして計算を行った。まず潤滑剤の薄膜化が潤滑剤膜厚の変化に与える影響を調べるため、Fig.1の計算条件を基に膜厚のみ薄くした条件で解析を行った。次に拡散係数の膜厚依存性が潤滑剤膜厚の変化に与える影響を調べるため、拡散係数の条件のみを変更した解析を行った。次に極性潤滑剤が潤滑剤膜厚の変化に与える影響を調べるため、以上の拡散係数と粘度の条件のみを変更した解析を行った。また実際のディスク動作条件に近づけるため室温より高い温度での粘度で解析を行った。以下に詳細を述べる。

## 2. 解析モデル

回転する磁気ディスク上の潤滑剤膜厚の変化を考える際、潤滑膜は中心軸に対して回転対称と考えFig.2に示すような半径方向 $r$ と膜厚方向 $z$ の二次元モデルを考える<sup>9)</sup>。ここで $h$ は半径方向に区切ったメッシュの膜厚、 $q$ はメッシュの境界における体積流束である。

前報では半径方向と膜厚方向の二次元モデルを作成し、以下に示す仮定を導入し、膜厚の変化を移流拡散方程式により求めた。

- (仮定 1) 膜厚により拡散係数は変化しない
- (仮定 2) 膜厚により粘度は変化しない
- (仮定 3) 潤滑剤の蒸発はない
- (仮定 4) ヘッドによる潤滑剤直接除去(ピックアップ)はない
- (仮定 5) せん断力による粘性の変化はない
- (仮定 6) 膜厚の変化による圧力変化は無視する



(a) Experimental result (24 hours) (出典：文献 13)

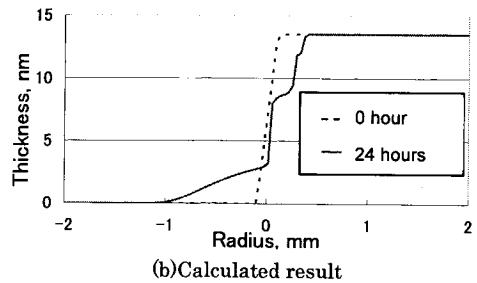


Fig.3 Thickness profiles of Z-dol (Molecular weights = 4000 g/mol) after half-dip

(仮定 7) 気体圧力による影響は無視する

(仮定 8) ラプラス圧力による影響は無視する

しかし、実際に使用されている薄膜で解析をする場合には拡散係数の膜厚依存性が潤滑剤の修復速度に、粘度の膜厚依存性が潤滑剤の除去量に、それぞれ大きく影響する。そこで本報告では、上の仮定 1 および仮定 2 を外し、新たにモデルを構築した。以下では、その詳細について説明する。

### 2.1 拡散係数の膜厚依存性の導入

本報告では、計算モデルに次式を使用した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial(rq)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rD(h(r)) \frac{\partial h}{\partial r} \right) \quad (1)$$

ここで $D(h(r))$ はMa<sup>13)</sup>によって報告されている拡散係数を与えている。式(1)の拡散項の有効性を確認するために、次に示す拡散のみの式を用い、極性潤滑剤(Fomblin Z-dol 分子量 4000 の値を使用)のハーフディップ後の拡散を解析した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(h(x)) \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (2)$$

ここで $D(h(x))$ は上記 $D(h(r))$ をデカルト座標系で

Table 1 Simulation conditions

Conditions	Lubricants	Thickness, nm	Diffusion coefficient, m <sup>2</sup> /s	Viscosity, Pa·s
1	Nonpolar	10	$0.3 \times 10^{-11}$	$5.46 \times 10^2$ [16]
2	Nonpolar	5, 2	0	$5.46 \times 10^2$ [16]
3	Nonpolar	5, 2	Thickness-dependent (Fig.6)	$5.46 \times 10^2$ [16]
4	Polar	5, 2	Thickness-dependent (Fig.8)	$1.82 \times 10^1$ [16]
5	Polar	2	Thickness-dependent (Fig.8)	$4.23 \times 10^2$ [6]
6	Polar	2	Thickness-dependent (Fig.8)	1.93 [6]

表現した拡散係数である。結果を Fig.3 に示す。Figure 3 (a)の MW=4100g/mol の実験結果と計算結果 Fig.3 (b)は、壁面の後退とテラス構造が一致することから、式(1)の拡散項は有効と考えた。

## 2.2 粘度の膜厚依存性の導入

式(1)の移流項の体積流束は遠心力と空気せん断力から次式で表される。

$$q_i = \frac{\rho \omega^2 r_i h_i^3}{3\mu(h)} + \frac{\tau_i h_i^2}{2\mu(h)} \quad (3)$$

ここで、 $\rho$ :密度  $\omega$ :回転速度  $\mu(h)$ :膜厚依存性を考慮した潤滑剤粘度である。また、膜の自由表面にかかる空気せん断力  $\tau$  は回転による空気流によるせん断力  $\tau_{air}$  と、ヘッド下の圧力勾配によるせん断力  $\tau_{head}$  とを足し合わせたものを与えている<sup>9)</sup>。

$$\tau = \tau_{air} + \tau_{head} \quad (4)$$

$\tau_{air}$  は Middleman<sup>15)</sup>が報告している次式を使用した。

$$\tau_{air} = \frac{1}{2} \omega^3 \nu_{air}^2 \mu_{air} r \quad (5)$$

ここで、 $\nu_{air}$ :空気の動粘性係数、 $\mu_{air}$ :空気の粘性係数である。ヘッド浮上により生じる空気流れによるせん断力はディスク1周中でヘッドのある部分の長さのみで働く。本計算は二次元であり円周方向で部分的に変化するせん断力を扱えない。また、(仮定5)から粘性はせん断力によらないので、 $\tau_{head}$ にはヘッドによるせん断力を円周長さで平均した値を用いた (Fig.4)。

## 2.3 解析条件

本研究では実際に近い薄膜 (2nm) で、製品に広く使用されている極性潤滑剤の膜厚変化の特性を理解するため Table 1 の条件でシミュレーショ

Table 2 Values used in simulation

Initial thickness, nm	2, 5
Rotational speed(N), rpm	5400
Air viscosity ( $\mu_{air}$ ), Pa·s	$17.9 \times 10^6$
Air kinematic viscosity ( $\nu_{air}$ ), m <sup>2</sup> /s	$14.8 \times 10^6$

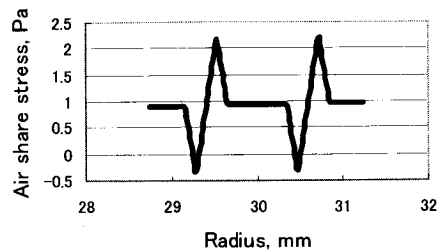


Fig.4 Shear-stress distribution used to calculate the results in this study [出典:文献13])

ンを行った。解析に使用した特性値は Table2 に示した。非極性潤滑剤には Fomblin Z03 の粘度および密度を、極性潤滑剤には Fomblin Z-dol4000 の粘度を、それぞれ SOLVAY SOLEXIS 社のカタログ<sup>16)</sup>から引用した。非極性潤滑剤の値は Fig.1(b)と比較するため、前報<sup>9)</sup>で使用した値と同じ値を用いている。また、極性潤滑剤の薄膜での粘度および密度を、ディスク動作の実際に近い値で計算するため、Karis らによる 55°Cでのバルク粘度と薄膜粘度の実測値<sup>6)</sup>を引用した。極性潤滑剤の膜厚の変化を、薄膜での粘度とバルク粘度で比較するため、この測定値を使用した。拡散係数はどちらの潤滑剤も Ma<sup>13)</sup>の文献から引用した。これは、室温のものを使用している。また、前章で述べた  $\tau_{head}$ には両サイドに2本のテーバ・フラット型のスライダを持つ単純な形状のヘッドを

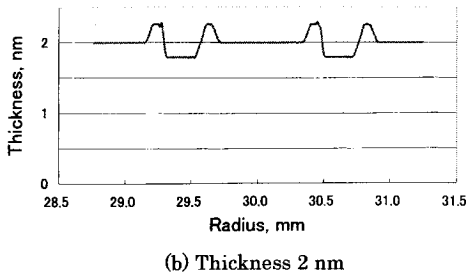
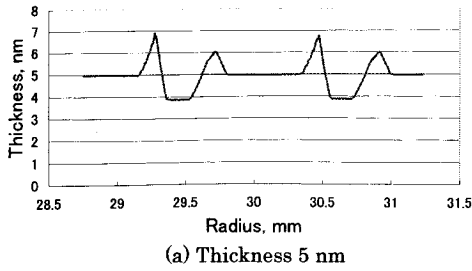


Fig.5 Calculated distribution of thin nonpolar lubricant with diffusion coefficient  $0 \text{ m}^2/\text{s}$  (after 10 minutes)

モデルとし、スペーシング  $77 \text{ nm}$  でヘッド浮上時の空気膜圧力分布を浮上計算プログラムにより計算したものに、ヘッドの外側をゆるやかなスロープ状にして使用している<sup>9)</sup>。

Figure 1 の条件 1 と潤滑剤薄膜化の影響を比較するために、膜厚のみ  $5 \text{ nm}$ 、 $2 \text{ nm}$  に変更した条件 2 を定めた。次に条件 3 では拡散係数の膜厚による変化が潤滑剤膜厚の変化に与える影響を調べるため、拡散係数を膜厚  $5 \text{ nm}$  で  $14 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 、膜厚  $2 \text{ nm}$  で  $34 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  とし計算した。条件 4、条件 5 および条件 6 では極性潤滑剤の特性が潤滑剤膜厚の変化に与える影響を調べるため、拡散係数と粘度の膜厚依存性と粘度の温度依存性を導入した条件を定めた。条件 4 では Fig.3 (a) の拡散係数が  $0 \text{ m}^2/\text{s}$  の膜厚  $5 \text{ nm}$  と、拡散係数が  $2.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  の膜厚  $2 \text{ nm}$  の薄膜で、 $20^\circ\text{C}$  のバルク粘度 ( $1.82 \times 10^{-1} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) で計算した。条件 5 では粘度の温度依存性を調べるため、 $55^\circ\text{C}$  のバルク粘度で、拡散係数は条件 4 のまま計算を行った。条件 6 では粘度の膜厚依存性の影響を調べるため、極性潤滑剤が 1 章で紹介した薄膜粘度であると仮定して、拡散係数は条件 4 のまま計算した。それぞれの結

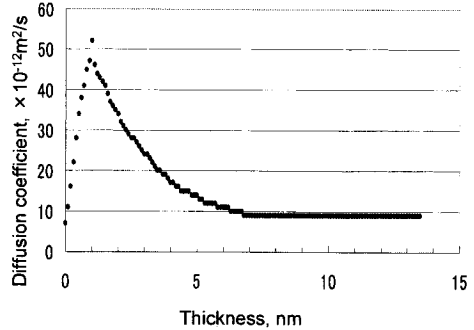


Fig.6 Thickness-dependent diffusion coefficient of non-polar lubricant used in simulation (出典：文献 13)

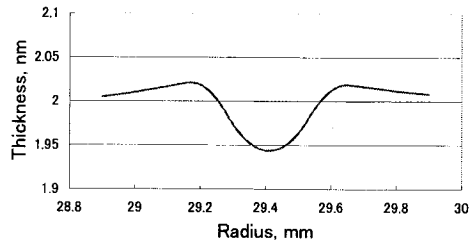
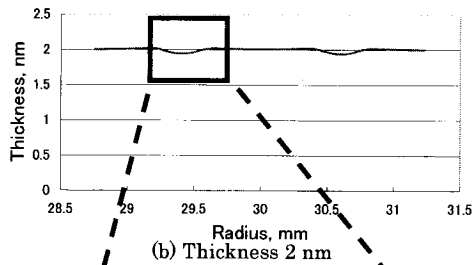
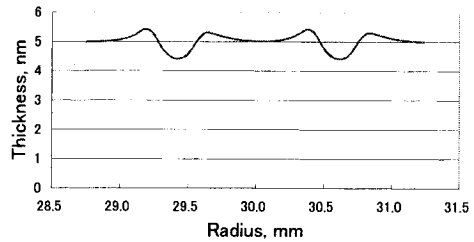


Fig.7 Calculated distribution of nonpolar lubricant under the head with thickness-dependent diffusion (after 10 minutes)

果について以下で述べる。

### 3. 解析結果

#### 3.1 潤滑剤膜厚の影響 (条件 2)

非極性潤滑剤 Fomblin Z03 の 5nm および 2nm の薄膜で、拡散係数を  $0\text{m}^2/\text{s}$ 、粘度をバルク粘度にしたときの膜厚の变化解析結果を Fig.5 (a) および Fig.5 (b) に示す。潤滑剤の凹みは、Fig.5 (a) では 1nm, Fig.5 (b) では 0.25nm であり、ピークはそれぞれ 1~2nm, 0.25nm である。これらは膜厚 10nm での凹み (2nm) およびピーク (1nm) より少ない。潤滑剤が薄膜になると拡散係数、粘度の変化がない時でも潤滑剤膜厚の変化量は少なくなることがわかる。これは薄膜化により、ヘッドからのせん断力を受ける潤滑剤の量が減ったため、潤滑剤膜厚の変化量が少なくなったためと考えられる。

#### 3.2 非極性潤滑剤の拡散係数の膜厚依存性の影響 (条件 3)

本シミュレーションで使用した Ma<sup>13)</sup> の報告による非極性潤滑剤の拡散係数  $D(h)$  の値を Fig.6 に示す。この  $D(h)$  と Table 2 の値を入力データとして非極性潤滑剤の膜厚 5nm と 2nm の潤滑剤膜厚の変化を計算した。それぞれの膜厚の変化を Fig.7 (a) および Fig.7 (b) に示す。潤滑剤の凹みが Fig.5 では膜厚 5nm で 1nm, 2nm で 0.25nm あったものが Fig.7 (a) では 0.6nm, Fig.7 (b) では 2nm で 0.06nm と浅くなっている。またピークもそれぞれ 0.5nm, 0.025nm と減少している。これは拡散の影響を導入したことで、修復の計算が可能となりピークは緩やかになり潤滑剤膜厚の変化量が減少したためと考えられる。

#### 3.3 極性潤滑剤の拡散係数の膜厚依存性の影響 (条件 4)

同様にシミュレーションで使用した Ma<sup>13)</sup> の報告からの極性潤滑剤の拡散係数  $D(h)$  の値を Fig.8 に示す。この  $D(h)$  と Table 1, 2 に示した値を入力データとして極性潤滑剤の膜厚 5nm と 2nm の潤滑剤膜厚の変化を計算し、それぞれの変化を比較した。膜厚 5nm 付近の結果を Fig.9 (a) に示す。潤滑剤はピークの鋭い膜形状になり、ピークで

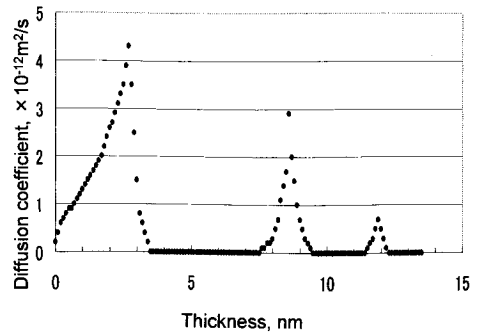
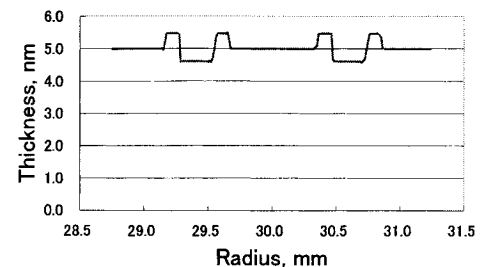
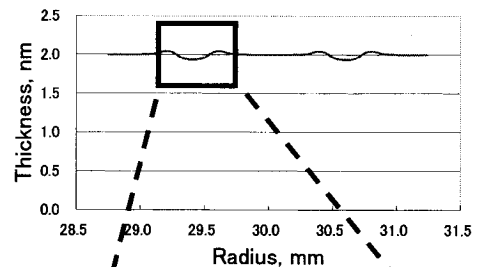


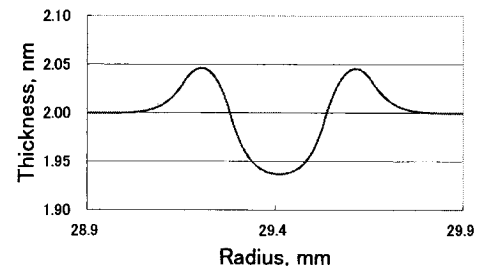
Fig.8 Thickness-dependent diffusion coefficient of polar lubricant used in simulation [出典: 文献 13)]



(a) Thickness 5 nm



(b) Thickness 2 nm



(c) Closeup of (b)

Fig.9 Calculated distribution of polar lubricant under the head with thickness-dependent diffusion at 20°C (after 10minutes)

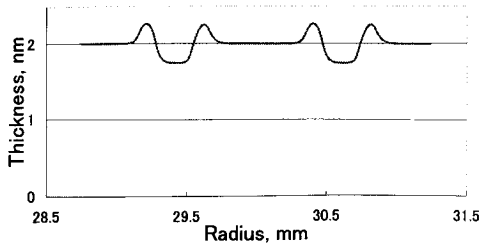


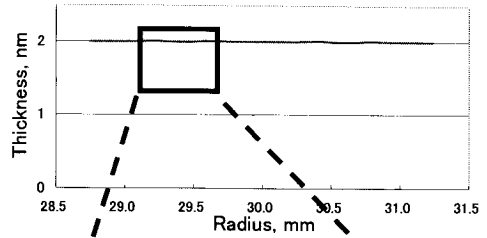
Fig.10 Calculated distribution of polar lubricant with viscosity at 55 °C and thickness-dependent diffusion (after 10minutes)

0.5nm, 凹みで 0.4nm の変化があり, 拡散は見られない. 実際の潤滑剤膜厚の変化でも膜厚の凹みとピークとの壁面は垂直に近くなると予測される. また実際の極性潤滑剤では 5nm 程度の膜厚で潤滑剤分子の凝集が発生する可能性がある<sup>17)</sup>. 本研究の解析にも分離圧の不安定現象を導入すれば凝集現象が見られる可能性がある. 次に, 膜厚 2nm の結果を Fig.9 (b)に示す. 潤滑剤形状は拡散の影響によりピークが Fig.9 (a)に比べブロードである. 変化はピークが 0.05nm, 凹みが 0.06nm となり, Fig.7 と比較して膜の凹みは非極性と比べ変わらないがピークが大きくなっている. 極性潤滑剤では, 非極性潤滑剤に比べ, 粘度が高いため潤滑剤の移動は少なくなるが拡散係数が小さいため, ピークの拡がりが遅いと考えられる.

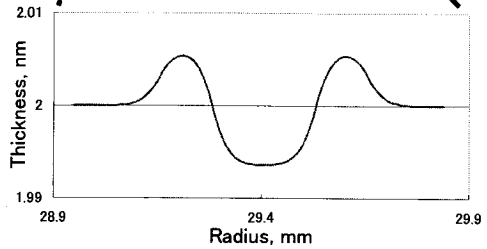
### 3.4 粘度の温度および膜厚依存性の影響 (条件 5, 条件 6)

Karis らは, 分子量 4500 の極性潤滑剤 Z-dol ではディスク表面極近傍 (~約 5nm) の潤滑剤粘度がバルク粘度に比較して約 50 倍になることを示している<sup>9)</sup>. Table 1 に示した 55°Cでのバルク粘度 ( $4.23 \times 10^{-2} \text{Pa}\cdot\text{s}$ ) と薄膜粘度 ( $1.93 \text{Pa}\cdot\text{s}$ ) で浮上ヘッド下の潤滑剤膜厚の変化を計算した結果を Fig.10 と Fig.11 に示す.

Figure 10 はバルク粘度での膜厚の変化である. 条件 5 では, 条件 4 に比べ粘度が小さいため, ピークと凹みが 0.3nm と Fig.10(b)と比べ変化が大きくなっている. 粘度が温度の影響で小さいため, せん断力による潤滑剤の移動量が大きくなる一方, 拡散係数は条件 4 と同じため膜の修復は遅くなり変化が大きいと考えられる. しかし拡散係数は温



(a) Thickness 2 nm



(b) Closeup of (a)

Fig.11 Calculated distribution of polar lubricant with thin film viscosity at 55 °C and thickness-dependent diffusion (after 10 minutes)

度が高くなれば大きくなる<sup>13)</sup>ので, 変化はこれより小さくなるのが考えられる.

Figure 11 (a)は Fig.10 と同縮尺で表した. 膜厚の変化は Fig.10 と比較して小さいことがわかる. Figure 11 (b)では潤滑剤膜厚の変化の拡大図を示す. ヘッド直下の膜の凹みはバルク粘度の場合 (Fig.10)0.3nm であったのに対して, 薄膜粘度の場合 [Fig.11 (b)]約 50 分の 1 の 0.006nm であった. これは極性潤滑剤では薄膜での粘度が高くなったため, せん断力による影響が小さく, ピークが小さくなったと考えられる.

ヘッド下のせん断力は, 現在の 10nm 程度のスペーシングでは, 圧力分布に変化がなければスペーシングに比例して 1/7 以下になり, スペーシングの減少による圧力の増加があっても, 膜厚の変化が小さいというこの結果には大きな影響はないと考えられる. また, 拡散係数も 20°Cで測定した値を用いており, 拡散係数がこれより大きくなれば膜厚の変化はより小さくなると考えられる. 実際の 2nm 程度の薄膜での潤滑剤膜厚の変化量も



10nm の非極性潤滑剤膜厚の変化に比べて大きく減少すると考えられる。

#### 4. 結言

薄膜磁気ディスク上の浮上ヘッド下の潤滑剤半径方向膜厚分布変化を計算するプログラムに、拡散係数および粘度の膜厚依存性を導入した。これを用い薄膜における浮上ヘッド下の潤滑剤膜厚の変化を計算し、以下の結果を得た。

- (1) 拡散係数、粘度を一定としたとき、潤滑剤膜厚が小さいと膜厚の変化は小さい。
- (2) 非極性潤滑剤では薄膜で拡散係数が増加するため膜厚の変化は拡散係数を一定にしたときよりさらに小さくなる。
- (3) 極性薄膜潤滑剤では非極性潤滑剤に比べて拡散係数の膜厚依存性の影響が大きく、膜厚 5nm では鋭角なピークができるが、膜厚 2nm では 5nm よりも膜厚の変化は小さくなる。
- (4) 極性のある液体潤滑剤では、2nm 程度の薄膜での粘度が増加するため、浮上ヘッドによる実稼動状態の潤滑剤膜厚の変化は粘度の膜厚依存性を考慮しない場合よりさらに少ない。
- (5) 薄膜極性潤滑剤について膜厚の変化を計算するためには、拡散係数および粘度の膜厚依存性を考慮することが必要である。

#### 文 献

- 1) R. W. WOOD, J. MILES & T. OLSON : Recording Technologies for Terabit per Square Inch Systems, IEEE, Trans. Magnetics, **38**, 4 (2002) 1711.
- 2) 川久保洋一 : 磁気記録のトライボロジー, 日本トライボロジー学会, 第 31 回トライボロジー入門講座 トライボロジーにおける基礎と新技術 (2000) 117.
- 3) 三矢保永 : ナノトライボロジー—ナノ分子膜潤滑の特徴—, 日本機械学会誌, **105** (2002) 466.
- 4) M. YANAGISAWA : Observation of Thickness Profiles on Lubricants during Sliding Tests, Jpn. J. Appl. Phys., **27**, 9 (1988) L1609.
- 5) S. W. MEEKS : Optical Surface Analysis of the Head-Disk-Interface of Thin Film Disks, Trans. ASME, J. Trib., **117**, 1 (1995) 112.
- 6) T. E. KARIS, B. MARCHON, V. FLORES & M. SCARPULLA : Lubricant Spin-off from Magnetic Recording Disks, Trib. Lett., **11**, 3-4 (2001) 151.
- 7) A. POUWER, Y. KAWAKUBO & R. TSUCHIYAMA : Lubricant Flow under a Flying Head on a Thin-Film Disk, IEEE, Trans. Magnetics, **37**, 4 (2001) 1869.
- 8) 柳澤憲史・川久保洋一・吉野正人 : トライボロジー会議予稿集 東京 2004-5 (2004) 155.
- 9) K. YANAGISAWA, Y. KAWAKUBO & M. YOSHINO : Effect of Diffusion on Lubricant Distribution under Flying Head on Thin-Film Disks, Trib. Lett., **18**, 1 (2005) 113.
- 10) 頼野一也・小西範和・山根清美・松岡広成・福井茂寿 : 薄膜気液界面の変形特性 (分子気体潤滑剤変形の有限幅解析), トライボロジー会議予稿集 鳥取 2004-11 (2004) 343.
- 11) 頼野一也・山根清美・松岡広成・福井茂寿 : 薄膜液界面の変形特性, トライボロジー会議予稿集 新潟 2003-11, (2003) 381.
- 12) 山根清美・頼野一也・松岡広成・福井茂寿 : 長波方程式による液体潤滑剤の変形・流動解析, トライボロジー会議予稿集 新潟 2003-11 (2003) 383.
- 13) X. MA : Spreading of Perfluoropolyalkylether Films on Amorphous Carbon Surfaces, Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon University (1998).
- 14) 清水宗一・山根清美・松岡広成・福井茂寿 : 長波方程式による薄膜液体表面の時間発展解析 (極性液体の表面流動シミュレーション), トライボロジー会議予稿集 東京 2005-11 (2005) 423.
- 15) S. MIDDLEMAN : The Effect of Induced Air-Flow on the Spin Coating of Viscous Liquids, J. Appl. Phys., **62**, 6 (1987) 2530.
- 16) Solvay Solexis 株式会社 : Fomblin カタログ F050307 (2003) 10.
- 17) L. XU, D. F. OGLETREE, M. SALMERON, H. TANG, J. GUI, & B. MARCHON : De-Wetting of Lubricants on Hard Disks, J. Chem. Phys., **112**, 6 (2000) 2952.