流体軸受スピンドルモータの潤滑油の温度解析*

喜多 洋三^{*1}, 上野 善弘^{*1}
松岡 薫^{*1}, 小幡 茂雄^{*1}Numerical Analysis of Temperature of Lubricating Oil
in FDB Spindle MotorHiromi KITA^{*2}, Yoshihiro UENO,
Kaoru MATSUOKA and Shigeo OBATA^{*2} Devices Development Center, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.,
3-1-1 Yagumo-naka-machi, Moriguchi-shi, Osaka, 570-8501 Japan

This paper describes a temperature analysis of FDB spindle motor carried out to investigate temperature of lubricating oil in FDB. Increases in the oil temperature exert significant influences on the performance and life of an FDB. Therefore it is important to study the oil temperature when the spindle motor runs. Then, we analyzed a temperature of lubricating oil in FDB spindle motor by experimental approach and numerical analysis approach. In experimental approach, the temperature of thrust bearing was measured using infrared micro thermograph. Then temperature of lubricating oil in the rotating spindle motor was measured. On the other hand, in numerical analysis approach, temperature of lubricating oil was calculated through the thermo-fluid analysis of lubricating oil and the heat conduction analysis of FDB spindle motor. The calculated results showed good agreements with the experimental results. It became clear the temperature of lubricating oil increased exponentially with rotational speed of spindle motor.

Key Words: Hydrodynamic Bearing, Lubrication, Numerical Analysis, Measurement, Hard Disk Drive, Spindle Motor, Lubricant, Temperature, Infrared

1. はじめに

現在、磁気ディスク装置 (Hard Disk Drive : HDD) の面記録密度は年率で 100%と急速に増加している。このような HDD の高密度記録化、高転送レート化にともない、スピンドルモータにはより一層の回転の高速化と高精度化が求められている⁽¹⁾。従来から HDD のスピンドルモータの軸受には玉軸受が用いられてきたが、非同期の回転軸振れ (Non-Repeatable Run Out : NRRO) に起因する磁気ヘッドのトラックずれ量が限界に近づきつつあり⁽²⁾、また回転数の増加が軸受寿命を短くするという課題があった。これに対して、NRRO が小さく、長寿命でかつ回転騒音、耐衝撃性などの点で優れる動圧流体軸受 (Fluid Dynamic Bearing : FDB) を用いたスピンドルモータが注目されている⁽³⁾。

流体軸受では潤滑油の温度が軸受の性能や寿命に大きな影響をおよぼす。スピンドルモータの高速回転化にともなう潤滑油の温度上昇は、粘度の低下とともに

軸受負荷容量や潤滑膜剛性の低下を招くため、軸と軸受の固体接触が生じやすくなり、焼き付きの危険性が高くなる。また、温度上昇により潤滑油の蒸発や化学変化が加速されて潤滑油の劣化が促進されるなど潤滑性能にも影響をおよぼす。このため潤滑油の温度上昇は、潤滑油の設計や選択に大きな影響を与える。したがってモータ回転中の潤滑油の温度上昇を把握することは非常に重要である。

著者らは、潤滑油開発の指針とする目的で、モータ回転中の潤滑油温度を実機流体軸受スピンドルモータによる軸受温度計測ならびに数値解析により求めた。

軸受温度の計測には従来から用いられてきた熱電対による方法があるが、数ミクロンのすき間を介して回転する流体軸受部の温度計測は困難を極める。そこで著者らは赤外線熱解析装置を用いて回転中の流体軸受スピンドルモータの軸受温度を計測した。

また、数値解析では各流体軸受における潤滑油の発熱量を熱流体解析により求め、さらにその発熱量を用いてスピンドルモータ全体の伝熱解析を行なうことでモータ回転速度と潤滑油温度上昇の関係を求めた。測定結果と解析結果は良く一致した。

* 原稿受付 2001 年 10 月 18 日。

^{*1} 正員、松下電器産業㈱デバイス開発センター(〒570-8501 守口市八雲中町 3-1-1)。

E-mail: kita@hdct.ctmo.mei.co.jp

2. 流体軸受スピンドルモータ

本検討に用いた流体軸受スピンドルモータを図1に示す。このモータは3.5型HDD用の軸回転型モータで、回転軸の上下二ヶ所にラジアル軸受が、また回転軸下端のスラストフランジの表裏面にスラスト軸受が形成されている。回転軸およびスラストフランジとスリーブとのすき間は潤滑油で満たされている。

Fig. 1 Sectional view of FDB spindle motor

3. 軸受温度の計測

流体軸受スピンドルモータのスラスト軸受部の軸受温度の計測手法ならびに計測結果について述べる。

3. 1 実験機器の構成

スラスト軸受部の温度を計測するための実験機器の構成を図2に示す。温度計測装置として赤外線微小部分熱解析装置(Infra Scope II [Quantum Focus Instruments Corporation 製])を用いた。この計測装置の特性を表1に示す。本計測に用いた対物レンズの空間分解能は $60\mu\text{m}$ であり、スラスト軸受部の詳細温度分布を計測するのに十分な分解能を有する。

温度計測に使用したスピンドルモータは、図1に示した軸回転型の流体軸受スピンドルモータである。スラストフランジの材料はステンレス鋼であり、スラストフランジの表裏面には深さ $12\mu\text{m}$ のヘリングボーン形状の動圧発生溝がエッチングにより形成されている。なお、スラストプレートに板厚 1mm のガラス板を用いることにより、スラスト軸受部から放射される赤外線透過させ、スピンドルモータの底部からスラストフランジおよび潤滑油を可視観測できるように構成した。

Fig. 2 Experimental setup for measuring temperature of fluid dynamic bearing

Table 1 Specification of infrared micro thermograph

Model name	"Infra Scope II" Quantum Focus Instruments Corporation
Number of pixel	256 × 256
Sensitivity	< 0.1 °C
Thermal image area	7.68mm × 7.68mm
Spatial resolution	60 μm

スラスト軸受部から放射される赤外線は赤外線微小部分熱解析装置の 65,536 個の画素で受光し、電圧変換した後コンピュータ上で解析し温度を求める。

3. 2 軸受温度計測

軸受温度計測は、まず計測装置の較正を行い、次に温度計測を行なうという二つのステップを踏む。

軸受表面の各部位における放射率の差異影響を除去するため、較正は各画素毎に行った。スピンドルモータ

タを静止させた状態で、30℃と70℃の二つの環境にそれぞれ一定時間スピンドルモータを放置し、各温度において放射される赤外線を計測し、各画素毎に放射率を求めた。各画素毎の放射率画像を図3に示す。図中の白地部は黒体に近く放射率の高い部分であることを示す。

温度計測は、流体軸受スピンドルモータに3.5型ディスクを二枚取り付け、回転速度一定の条件下で10分間連続運転し、この間のスラスト軸受の温度変化を計測した。なお、ディスクの回転速度は5,400r/min～15,000r/minの間で変化させた。

Fig. 3 Emissivity image of fluid-dynamic thrust bearing

3. 3 スラスト軸受の温度分布

流体軸受スピンドルモータを起動し、回転速度15,000r/minで10分間連続運転させた時の、スラスト軸受温度の時間変化を図4に示す。なお起動前のスラスト軸受温度は19.4℃であった。この図より、軸受温度はスピンドルモータの起動とともに急激に上昇し、その後一定温度に漸近し平衡状態に達することがわかる。起動から10分経過時点での温度上昇は約28℃であった。

モータ起動から10分経過後のスラスト軸受の温度分布を図5(a)に、またスラスト軸受中心断面(A-A線上)での温度分布を図5(b)にそれぞれ示す。図より、スラスト軸受外周部より内周部の方が温度が高く、その温度差は3～4℃であることが確認された。スラスト軸受内周部の温度が外周部よりも高いのは、モータ駆動部のコイルの発熱がモータベース、潤滑油、回転軸を介してスラストフランジに伝わったためであ

Fig. 4 Temperature change of thrust bearing during disk rotation

a) Thermal image of thrust bearing

b) Temperature distribution along A-A line

Fig. 5 Temperature distribution of thrust bearing

り、モータ駆動部の発熱が軸受温度に大きく影響していると考えられる。

3. 4 スラスト温度とモータ回転速度の関係

流体軸受スピンドルモータの起動から 10 分経過後のスラスト軸受の温度上昇と、モータの回転速度の関係を図 6 に示す。図より、スラスト軸受の温度はモータ回転速度の増加とともに上昇し、温度上昇はモータ回転速度のべき乗に比例することがわかる。

Fig. 6 Temperature rise of thrust bearing as a function of bearing rotation speed

4. 潤滑油温度の数値解析

流体軸受スピンドルモータの潤滑油温度を数値解析により求める手法ならびに解析結果について述べる。

4. 1 解析手法

図 1 に示した流体軸受スピンドルモータの回転中の潤滑油温度を数値解析により求める。

解析手法としては、流体軸受を含むスピンドルモータ全体を 3 次元で精密にモデル化して熱流体解析を行なうことが考えられるが、モデル作成に多大な労力を要し、解析規模が膨大になり現実的ではない。そこで、解析規模の縮小および計算時間の短縮を図るために、図 7 に示すように流体軸受部の潤滑油の熱流体解析と、スピンドルモータ全体の熱伝導解析の二つのステップに分けて行なった。すなわち、第 1 のステップでは、それぞれの流体軸受部の潤滑油の熱流体解析を行い、

Fig. 7 Analysis approach

潤滑油の粘性摩擦による発熱量を求めた。次に第 2 ステップでは、先に求めた潤滑油の発熱量を用い、さらにモータ駆動部からの発熱なども考慮して、スピンドルモータの熱伝導解析を行い、流体軸受の潤滑油を含むスピンドルモータ全体の温度分布を計算した。

4. 2 潤滑油の熱流体解析

第 1 のステップでは流体軸受の潤滑油の熱流体解析を行い、モータ回転時の潤滑油の粘性摩擦による発熱量を求めた。なお、解析には市販の汎用熱流体解析プログラムを用いた。潤滑油の発熱量はプログラムの一機能⁽⁴⁾を用いることにより求めることができる。図 8 にラジアル軸受およびスラスト軸受の解析モデルを示す。境界条件は、流体に関しては、ラジアル軸受では上下端部、スラスト軸受では内外周で圧力を $p=0$ とし、ラジアル軸受では内周面に、スラスト軸受では上面に回転速度を与えた。また熱に関しては、潤滑油の粘性摩擦による発熱量を求めることが目的であるので、すべての境界を断熱境界とした。

Fig. 8 Analysis models of fluid dynamic bearing

なお、潤滑油の物性値、特に粘性係数は表2に示すように温度によって変化し、それに伴い発熱量も変化する。そこで、あらかじめ第2ステップの解析モデルを用いてモータ駆動部からの発熱のみを考慮した熱伝導解析を行い、粘性摩擦による発熱を考慮しない場合の潤滑油温度を求め、この潤滑油温度に対応する物性値を第1ステップの解析で用いた。

モータ回転速度 12,000r/min, ラジアル軸受の軸受すき間 $6.5\mu\text{m}$, スラスト軸受の軸受すき間 $9.0\mu\text{m}$ のときの潤滑油の発熱量は、スラスト軸受で 0.332W , ラジアル軸受で 0.165W であった。

Table 2 Material property of lubricant

Temp. (K)	Density (kg/m^3)	Viscosity ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	Specific heat (J/kgK)
300	867	10.2	1880
320	854	5.7	1964
340	841	3.6	2047
360	828	2.5	2131
380	815	1.8	2215
400	802	1.4	2299

4. 3 流体軸受スピンドルモータの熱伝導解析

第2のステップでは流体軸受スピンドルモータ全体の熱伝導解析を行い、モータ回転時の潤滑油の温度上昇を求めた。

図9に解析モデルを示す。計算負荷を軽減するためにスピンドルモータを軸対称形状とみなし、解析モデルを軸対称モデルとした。なお、スラストプレートの材質はステンレスとした。

解析モデルの流体軸受の潤滑油部分には、第1のステップの熱流体解析で求めた発熱量を与えた。また、モータの駆動部分にはコイルの抵抗値 R と回転数 12,000r/min 時の電流値 I から式(1)により求めたモータの発熱量 1.01W を与えた。

$$J = I^2 R \quad (1)$$

対称軸を除くモデルの外周部分には境界条件として式(2)～式(4)の回転円板の熱伝達率の近似式⁽⁵⁾により求めた熱伝達率を設定した。

Fig. 9 Finite element model of spindle motor

$$\text{Nu}_x = h_x / \lambda \quad (2)$$

$$\text{Nu}_x = 0.0212 (n + 2.6) 0.2 \text{Re}_\omega^{0.8} \text{Pr} \quad (3)$$

$$\text{Re}_\omega = x^2 \omega / \lambda \quad (4)$$

ただし、 h_x は熱伝達率、 Nu_x はヌセルト数、 Re_ω は回転レイノルズ数、 x は半径、 Pr はプラントル数、 ω は角速度、 λ は熱伝導率である。

図10に回転速度 12,000r/min 時のスピンドルモータ内部の温度上昇分布を示す。モータ駆動部から回転軸下部およびスラスト軸受にかけての領域の温度上昇が大きくなっている。また、最も温度上昇が大きい箇所は下側スラスト軸受の潤滑油部分で、その温度上昇値は $\Delta T = 15.9^\circ\text{C}$ であった。

この温度上昇分布から、モータ駆動部で発生した熱がベース、潤滑油および回転軸を介してスラスト軸受部に伝導していることがわかる。これは測定結果からの推測と一致する。このことから潤滑油の温度上昇には、粘性摩擦による潤滑油自らの発熱よりも、モータ駆動部の発熱が大きく影響しているといえる。

さて、前章の温度測定実験ではスラストプレートとしてガラス板を用いた。これが軸受温度に与える影響を確かめるために、図9の解析モデルにおいて、スラストプレートをガラス板に変更して熱伝導解析を行なった。その結果、潤滑油の温度上昇は 16.7°C (モータ回転速度 12,000r/min) で、ステンレスを用いた場合の潤滑油温度との差は 0.8°C であった。したがって温度測定に用いたガラス板のスラストプレートが軸受温度の測定値に与える影響は小さいといえる。

Fig. 10 Temperature distribution of spindle motor

4. 4 モータ回転速度と潤滑油温度上昇の関係

これまで説明した解析手法を用いて、モータの回転速度を変化させたときの潤滑油の最高温度上昇を求めた。そして得られた結果を先の図6に示した温度計測により得られたグラフ上にプロットした結果を図11に示す。解析結果と計測結果はほぼ一致しているといえるが、モータ回転数が小さくなるほど両者の差が大きくなる傾向が見られる。これは、第2ステップの熱伝導解析に用いた低回転数域での熱伝達率の値が、実際の現象よりもやや大きかったため、モータ外周からの放熱量が大きくなり、測定値よりも温度が低くなったと考えられる。

さらに、数値解析によりモータ回転速度 20,000r/min

Fig.11 Comparison between experimental results and analysis results (temperature rise of thrust bearing)

におけるスラスト軸受の潤滑油の温度上昇を求めたところ 45°Cであった。いま仮に外部気温 55°C, HDD 筐体内部の温度上昇を 20°Cとすると、モータ回転速度 20,000r/min 時の潤滑油の温度は最高 120°Cに達することになる。すなわち、回転速度 20,000r/min の HDD 用流体軸受スピンドルモータに使用される潤滑油は、120°Cでも軸受特性や軸受寿命に影響を与えない性能を備えなければならないことになる。

5. おわりに

HDD 用流体軸受スピンドルモータのモータ回転中の潤滑油温度を実験および数値解析により求めた。実験では、赤外線微小部分熱解析装置を用いて流体軸受スピンドルモータのスラスト軸受部の温度計測を行なった。また数値解析では、流体軸受部の潤滑油の熱流体解析の結果を用いてスピンドルモータ全体の熱伝導解析を行なうことで潤滑油の温度上昇を計算した。

潤滑油温度の計測結果と解析結果は良く一致しており、潤滑油温度に関して以下のことが明らかになった。

- (1) 潤滑油温度はスピンドルモータの起動とともに急激に上昇し、連続運転後は一定温度に漸近し平衡状態に達する。
- (2) モータ駆動部の発熱の影響により、スラスト軸受部の温度が最も高くなる。
- (3) スラスト軸受温度の上昇は、モータの回転速度のべき乗に比例する。
- (4) モータ回転速度 20,000r/min での潤滑油温度は外部気温 55°C, HDD 筐体内部温度上昇 20°Cの場合、最高 120°Cに達する。

文 献

- (1) 松岡 薫・小幡茂雄, HDD の発展とそれを支えるモータ技術, Matsushita Technical Journal, 46-1(2000), 22.
- (2) 小野京右, HDD スピンドル用各種油動圧軸受に関する特性比較研究, '98 モータ技術シンポジウム講演資料, A5-1-1(1998).
- (3) Matsuoka, K., Obata, S., Kita, H. and Toujou, F., Development of FDB Spindle Motors for HDD Use, IEEE Trans. on Magnetics, 37-2(2001), 783.
- (4) STAR-CD Version3.10 User Guide, (1999), 17-5, シーデーアダプコジャパン.
- (5) 伝熱工学資料(改訂第4版), (1986), 236, 日本機械学会.