潤滑剤回転飛散を低減するための 高速回転磁気ディスク上の空気せん断力解析*

栗田 昌幸^{*1}, 清水 勇人^{*1}
水本 宗男^{*1}, 大谷 祐一^{*2}

Analysis of Radial Air-Shear Force on Magnetic Disks for Reducing the Spin-off of Lubricants

Masayuki KURITA^{*3}, Hayato SHIMIZU,
Muneo MIZUMOTO and Yuuichi OOTANI

^{*3} Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd.,
502 Kandatsumachi, Tsuchiura-shi, Ibaraki, 300-0013 Japan

To reduce the spin-off of lubricants, which is caused by the radial component of air-shear force on a magnetic disk, we analyzed the air-velocity distribution and the air-shear force by using the three dimensional large eddy simulation (LES) and the finite-element method. A sensitivity analysis of five design parameters showed that disk/arm clearance and arm thickness had greater effect on the mean radial air-shear force than the other three parameters. The air-shear force was decreased when these two parameters became small. The force on the disk with the optimum parameters is 12% less than the force on a current design disk. The optimized drive can thus be operated at 14% higher rotational speed with the same reliability as current drives.

Key Words: Magnetic Disk Drives, Lubrication, Numerical Analysis, Shear Flow, Sensitivity Analysis

1. 緒 論

サーバ用磁気ディスク装置においては、ディスクの高回転速度化と、それによるデータの高転送レート化が大きな目標となっている。

高回転速度で、かつ長時間連続運転されるハイエンド装置では、初期には均一に塗布されたディスク表面潤滑剤が、長時間の連続運転に伴って次第に外周へ偏る現象が観察される。これを潤滑剤の回転飛散と称する。

回転飛散の原因は、潤滑剤自体に働く遠心力、スライダ下部に発生する圧力変化、スライダと潤滑剤の直接接触などの他に、径方向空気流れによる空気せん断力が挙げられている^(1~4)。そこで、径方向空気せん断力を解析で求め、これを低減する設計指針を明らかにし、得られた設計指針に従って設計にフィードバックすれば、装置信頼性をより高めることができる。あるいは同等以上の信頼性を保ったままで、高回転速度

化を進めることができる。本研究では、今後の更なる高速回転化に対して、径方向空気せん断力を現状レベル以下に抑え、回転飛散を抑制することを目的とする。

ディスク上の空気せん断力の解析⁽⁴⁾は行われているが、アームの存在を考慮していない単純な形状での解析に留まっている。本研究では、アームの存在を考慮した複雑形状における空気せん断力を、乱流数値流体シミュレーションを用いて解析し、アームの存在が径方向外向きせん断力を生み出すメカニズムを明らかにする。さらに、パラメータサーベイによって、上記空気せん断力を低減するための磁気ディスク装置設計指針を得る。

2. 解 析 方 法

2.1 解析方法 本研究で使用した非定常乱流解析用のコードは、有限要素法によるラージ・エディ・シミュレーション (LES)⁽⁵⁾である。ナビエ・ストークス方程式と連続の式にグリッドスケールのフィルタ平均処理をすると

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{u}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{p} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu \bar{T}_{ij} - \overline{u_i u_j})$$

* 原稿受付 2001年11月9日。

^{*1} 正員、日立製作所機械研究所第二部(〒300-0013 土浦市神立町502)。

^{*2} 日立製作所ストレージシステム事業部(〒256-8510 小田原市国府津2880)。

E-mail: kurita@merl.hitachi.co.jp

(1)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \bar{u}_i = 0 \quad (2)$$

となる。ただし、

$$\bar{T}_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_i + \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{u}_j \quad (3)$$

であり u は各流速成分, p は圧力, ρ は気体密度, ν は粘性係数を表し, 添字は各方向を示しており, 総和の規約に従う。また上式で上棒はフィルタ平均処理をした変数を表す。式 (1) で $-\overline{u_i u_j}$ はサブグリッドスケールの乱流応力であり, 本解析ではスマゴリンスキー・モデル

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_{SGS} \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_i + \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{u}_j \right) \quad (4)$$

$$\nu_{SGS} = (C\Delta)^2 \left(\frac{1}{2} \bar{T}_{ij} \cdot \bar{T}_{ij} \right) \quad (5)$$

を用いてモデル化する。ここで Δ は計算格子のサイズであり, C は乱流モデル定数で 0.15 を用いた。以上のように定式化した支配方程式 (1), (2) を有限要素法で空間離散化し, 時間方向には 2 段階陽解法の ABMAC 法⁹⁾を用いて積分した。

2.2 解析モデル 解析対象となる磁気ディスク装置モデルは, 要素数を減らして解析規模を小さくし, 解析時間の短縮を図るため, 以下のように単純化した。

- (1) ディスク間に挿入されているのはキャリッジアームのみで, サスペンションやスライダは省略した。
- (2) 本来はキャリッジ回転中心の周辺部ではシュラウドが開口しているが, ここでは省略して完全円筒シュラウドを仮定した。
- (3) アームおよびディスクの軸方向中心断面に対称境界を置いた (図 1)。

解析領域は 6 面体要素で分割し, 総節点数は約 10 ~ 15 万個となった。標準の解析条件におけるメッシュ分割例 (全体図およびアーム近傍拡大図) を図 2 に示す。アームの輪郭付近はメッシュを密にした。軸方向には, ディスク/アーム間隔については 15 分割, アーム厚さ, ディスク厚さについてはそれぞれ 16 分割 (対称境界を置いているので実際に計算するのは 8 要素) とした。

時間ステップ数は, 当初はディスクが 6 回転する時間に相当する 60000 ステップとしたが, 3 回転目から

Fig. 1 Boundary conditions

Fig. 2 Mesh division

は解析結果に変化が見られなかったため, 以後は 20000 ステップとした。

解析諸元は, 実際のサーバ用磁気ディスク装置の諸元を標準条件とし, 図 3 に示す 6 項目を解析パラメータとした。ただし, ヘッドが内周側のデータ領域にある時のアーム形状とした。

Table 1 Calculated air-shear force

	Parameter	Change	Air-shear force
1	Rotational speed	$\times 1.5$	$\times 1.52$
2		$\times 2.0$	$\times 2.05$
3	Disk/Arm clearance	-10%	-2.7%
4		+10%	+2.4%
5	Arm thickness	-10%	-4.5%
6		+10%	+4.2%
7	Shroud clearance	-38%	-1.6%
8	Arm hole	Without $\rightarrow$ With	+1.6%
9	Arm corner cut	Without $\rightarrow$ With	-0.6%
	3, 5, 7, and 9 at the same time		-12%

3. 解析結果と考察

3.1 せん断力発生メカニズム 標準条件におけるディスク上の径方向せん断力分布を図4に等高線で示す。単位はPaで、径方向外向きが正である。

図4中に(a)~(c)で示した位置における軸方向速度分布を図5に示す。それぞれのグラフ左端における実線の傾きが、ディスク上における径方向せん断力を表わす。アーム上流側の(a)位置では、先ずぼまりの流路で高圧になり、一方アームの下流側(c)の位置では流路が急拡大することにより低圧になる。すなわち、アームの前後で差圧が発生する。差圧によって加速させた流れがアーム直下の(b)位置に生じるが、アームが斜めに挿入されているために上記流れは径方向外向き成分を持つ。これが(b)(c)位置における外向きせん断力の主な原因になっていると思われる。なお、(c)位置ではディスク表面付近では外向きの流れが、アーム中心断面付近では内向きの流れが生じる還流状態になっていることがわかる。

3.2 せん断力に及ぼす各パラメータの影響 表1にパラメータサーベイの結果を示す。ディスク回転速度の影響は非常に大きく、せん断力は回転数の1乗に比例して増大する。

ディスク/アーム間隔、アーム厚さおよびシュラウド間隔は、それぞれ小さい方がよい。中でもディスク/アーム間隔とアーム厚さの影響が比較的大きい。これらの寸法を小さくすると、径方向の空気流れそのものが小規模になる結果だと思われる。なお、シュラウド間隔の狭小化については、潤滑剤飛散を低減できる他に、ディスクフラッタを低減できる⁹⁾という効果もある。アームくり貫きおよびアーム面取りの影響は比較的小さい。

Fig. 3 Analysis parameters

Fig. 4 Distribution of radial air-shear-force (Pa)

確認のため、表1のパラメータサーベイでせん断力を減少させる効果のあった3, 5, 7, 9の改良を同時に実施した場合のせん断力を計算した。結果を図6に示す。一因子解析の4つの結果を足し合わせた効果より大きな12%の径方向せん断力低減効果が、10000~20000 min⁻¹のディスク回転速度範囲で得られた。径方向せん断力は回転数に比例するので、これらの改良を行えば、逆に回転数を14%増やしても、今までと同レベルのせん断力に留めることができ、潤滑剤膜厚を十分確保することができる。

Fig. 5 Axial profile of air-flow velocity

4. 結 論

磁気ディスク装置の潤滑剤回転飛散を低減できる装置構造を求めるため、アームの存在を考慮した空気流れシミュレーションによって円板上の空気せん断力に及ぼすパラメータの影響を検討し、以下の結果を得た。

- (1) 潤滑剤回転飛散低減のための設計指針を得た。円板/アーム間隔、アーム厚さ、およびシュラウド間隔は小さい方が、アームくり貫きは無い方が、

Fig. 6 Parameter optimization

アーム面取りは有る方がそれぞれ良い。中でも円板/アーム間隔およびアーム厚さを小さくすると効果大きい。

- (2) 4 パラメータの改良によって、空気せん断力を12%低減することができ、14%高速回転化しても現在と同レベルの潤滑剤の膜厚を確保することができる。

謝辞 研究の方向付けをしていただいた信州大学の川久保洋一教授に感謝いたします。

文 献

- (1) Stanley Middleman, The Effect of Induced Air-flow on the Spin Coating of Viscous Liquids, *Journal of Applied Physics*, 62-6 (1987), p. 2530-2532.
- (2) 柳沢雅弘, 回転ディスク上の分子レベル潤滑膜の流動, トライボロジー会議予稿集, 金沢 (1994), p. 593-596.
- (3) 柳沢雅弘, 回転ディスク上の分子レベル潤滑膜の流動 (2) - 板間の影響 -, トライボロジー会議予稿集, 東京 (1995), p. 89-92.
- (4) 柳沢雅弘, 磁気ディスク上の液体潤滑剤の流動 (シュラウドの影響), 機講論, No.96-1(IV) (1996), p. 580-581.
- (5) 加藤千幸, 東京大学博士論文, 1995.
- (6) J. A. Viecelli, *Journal of Computational Physics*, 8 (1971), p. 119.
- (7) Satomitsu Imai, Mikio Tokuyama, and Yuzo Yamaguchi, Reduction of Disk Flutter by Decreasing Disk-to-shroud Spacing, *IEEE Transactions on Magnetics*, 35-5 (1999), p. 2301-2303.