容器内積層回転円盤間の流れ*

雨宮 健一郎^{*1}, 益田 重明^{*2}, 小尾 晋之介^{*2}
徳山 幹夫^{*3}, 今井 郷充^{*4}

Flow between Shrouded Corotating Disks

Kenichirou AMEMIYA, Shigeaki MASUDA^{*5}, Shinnosuke OBI,
Mikio TOKUYAMA and Satomitsu IMAI^{*5} Keio University, Dept. of Mechanical Engineering,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa, 223-8522 Japan

As one of the important aerodynamic problems of magnetic disk drives for microcomputers, a flow between shrouded corotating disks and its instability have been investigated. The four-decker circular disk pack is enclosed in a cylindrical container to endure the axial symmetry. Mean and fluctuating velocity fields induced by the disk rotation has been obtained by employing fine scale multi-sensor hot-wire probes. First, the velocity distributions of 2D axisymmetric base flow field are reported. The occurrence of 3D non-axisymmetric flow will then be discussed, where the rotational speed as well as the number of cells will be discussed and compared with the existing data.

Key Words: Rotating Disk, Body-Force Instability, Hot-Wire Measurement, Magnetic Disk Drive

1. 緒言

計算機用磁気ディスク装置はアクセスの高速化と大容量化を目指して改良が続けられている。これにともなう、従来はあまり問題にされなかった空力問題が新たに浮上してきている⁽¹⁾。ディスク回転速度の増大に伴う第1の課題は粘性消散に起因する風損で、消費電力の増大はもちろん、温度上昇による熱変形や寿命を左右し、回転速度の3乗に比例する。第2はディスクおよびヘッド支持系の振動で、振幅が回転速度の2乗に比例すると考えられている。最近ではディスク間流れの不安定性が密接に関与していることを示唆する研究結果が報告されており^{(2),(3)}、ヘッド-ディスクインターフェイスの信頼性向上のために、流体工学的アプローチが必要となってきた。この他に塵埃除去のための内部循環流路の最適設計とフィルタリング技術、さらに、ディスク表面のせん断応力変動による潤滑皮膜の劣化⁽⁴⁾などがあげられる。

一方、回転ディスク間流れの不安定性に関しては可視化^{(5),(6)}、熱線・熱膜流速計^{(7),(8)}、LDV⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾を用いて実

Fig. 1: Schematics of the flow field.

験的に調べられている。また最近ではDNS⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾によっても調べられ、低レイノルズ数の領域ではあるが、構造の詳細が明らかにされつつある。

本論文では、磁気ディスク装置におけるディスク振動とディスク間流れの不安定性との関連を明らかにすることを最終目的として、まずディスク間流れの全体的な傾向を知るために、平均速度場および不安定流動の発生状況について実験的に検討した。実機におけるアームや周辺通路の存在による境界条件の非軸対称性を排除するために、円筒容器内で回転する積層円盤間に発生する流れを測定対象とし、回転数を可変として熱線流速計による速度計測を行った。流れ場の概要と座標系の定義を図1に示す。図中のI~VはHumphreyら⁽¹³⁾による流れ場の分

* 原稿受付 1999年8月20日。

^{*1} セイコーエプソン(株) (☎ 392-8502 諏訪市大和3-3-5)。^{*2} 正員, 慶應義塾大学理工学部 (☎ 223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)。^{*3} 正員, (株)日立製作所機械研究所 (☎ 300-0013 土浦市神立町502)。^{*4} 正員, (株)日立製作所STR事業部 (☎ 256-8510 小田原市国府津2880)。

E-mail: smasuda@mech.keio.ac.jp

類で、I: 剛体回転領域、II: 準自由渦領域、III: エックマン境界層、IV: シュラウド境界層、V: I から II への遷移領域とされている。

2. 基礎方程式と無次元パラメータ

円筒座標系における定常、非圧縮性、軸対称の運動方程式と連続の式は、それぞれ以下のように表される:

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 \left(\frac{\partial V_z^2}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial r V_r V_z}{\partial r} \right) \\ = -\frac{\partial P}{\partial z} + \varepsilon^3 \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) \\ - \alpha^2 \left(\frac{\partial \bar{v}_z^2}{\partial z} + R_{zr} \frac{1}{r} \frac{\partial r \bar{v}_z \bar{v}_r}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 \left(\frac{\partial V_z V_r}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial r V_r^2}{\partial r} \right) - \frac{V_\theta^2}{r} \\ = -\frac{\partial P}{\partial r} + \varepsilon^3 \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} \right) \\ - \alpha^2 \left(R_{zr} \frac{\partial \bar{v}_z \bar{v}_r}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \bar{v}_r^2}{\partial r} - \frac{\bar{v}_\theta^2}{r} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_\theta V_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial r V_r V_\theta}{\partial r} + \frac{V_r V_\theta}{r} \\ = \varepsilon \left(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r^2} \right) \\ - \frac{\alpha^2}{\varepsilon} \left(R_{z\theta} \frac{\partial \bar{v}_z \bar{v}_\theta}{\partial z} + R_{r\theta} \frac{1}{r} \frac{\partial r \bar{v}_r \bar{v}_\theta}{\partial r} + R_{r\theta} \frac{\bar{v}_r \bar{v}_\theta}{r} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial r V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \\ = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 r 、 z はディスク外半径 R_2 で、 r 、 z 方向速度成分 V_r 、 V_z は $\sqrt{\Omega \nu}$ (Ω はディスクの回転角速度、 ν は流体の動粘性係数) で、また周方向速度成分 V_θ は ΩR_2 で、圧力 P は $\rho (\Omega R_2^2)^2$ でそれぞれ無次元化してある。さらに、速度変動成分は、乱れ強さの代表値を α^2 として、 $\alpha \Omega R_2$ で無次元化してある。 $R_{\theta z}$ などは速度変動の相関係数の代表値である。レイノルズ数は $Re = \Omega \times R_2^2 / \nu$ と定義し、 $\varepsilon = Re^{-1/2}$ である。

最も簡単な場合として、速度変動が無視できる場合 ($\alpha \approx 0$) を考える。実用の 3.5in、2.5in 磁気ディスク装置のレイノルズ数は 10^5 程度であり、式 (1) ~ (3) の粘性項はディスク表面とシュラウド壁面近傍を除く、コア領域 (図 1 の I、II、V) では無視できる。この時、非粘性解として次の 2 つが存在することが示されている⁽¹³⁾。

$$V_r = V_z = 0, V_\theta = \Omega r \quad (\text{剛体回転}) \quad (5a)$$

$$V_r \neq 0, V_z = 0, V_\theta = \frac{C}{r} \quad (\text{準自由渦}) \quad (5b)$$

このコア領域とシュラウド壁及びディスク表面との間には、それぞれ厚さが ε のオーダーのシュラウド境界層 (図 1 の IV) およびエックマン境界層 (図 1 の III) が形成さ

Fig. 2: Experimental setup

Fig. 3: Planar dual hot-wire probe

れる。なお、本節以外では、特にことわらない限り記号はすべて有次元とする。

3. 実験装置と方法

3.1 実験装置の概要 図2に実験装置を示す。ディスクは 14in の実機ハードディスクに合わせて半径 $R_2 = 178\text{mm}$ 、厚さ $t = 1.88\text{mm}$ のベークライト製で、4枚が $H = 22.5\text{mm}$ の間隔で半径 $R_1 = 91\text{mm}$ の軸に取り付けられ、回転速度 $N = 300 \sim 2400\text{rpm}$ で回転する。シュラウド隙間 $a = 2\text{mm}$ である。測定領域は図2に示すように第2と第3ディスク間で、シュラウド壁上の測定窓を通して挿入された熱線プローブは、トラバース装置を介して r 及び z 方向に移動可能である。なお、表1に本研究と従来の研究のパラメータ範囲を示す。

3.2 熱線プローブ 円盤間の流れは垂直方向成分に比べて周方向及び半径方向成分が卓越していると考えられる。そこで、図3に示す様な平面2線式プローブを $r - \theta$

Table 1: Summary of the investigation on the co-rotating disks

Author	Year	Method	Media	N rpm	$Re(\times 10^4)$	H/R_2
Lennemann	1974	FV	water	710 - 3600	11.9 - 3.39	0.04
Kaneko et al.	1977	HW	air	3000	2.9	0.04
Kaneko et al.	1977	FV	water	20	0.286	0.04
Abrahamson et al.	1989	HF	water	15,25	0.246, 0.411	0.05
Tzeng-Humphrey	1989	LDV	air	586-5269	0.078-0.70	0.08
Schuler et al.	1990	LDV	air	300-3600	0.21-2.51	0.09
Usry et al.	1990	LDV	air	1200, 3600	0.838, 2.51	0.09
Tzeng-Chang	1991	LDV	air	3600	0.48	0.08
Humphrey et al.	1995	DNS	-	300,600	2.22, 4.44	
Iglesias-Humphrey	1998	DNS	-	100-300	0.772-2.32	
Herrero et al.	1999	DNS	-	900	8.24	
Present Study	1999	HW	air	300-2400	6.64 - 53.19	0.12
2.5" HDD	-	-	air	12000	5.93	0.066
3.5" HDD	-	-	air	7200	9.93	0.04

FV: flow visualization, HW: hot-wire, HF: Hot-film

Fig. 4: Miniature hot-wire probe

平面に設置し、周方向および半径方向速度成分を測定した。センサー部は直径 $5\mu\text{m}$ 、長さ 0.5mm のタングステン線をプロングに直接溶接する構造とした。図 3b に示すように 4 本のプロングの先端は $e \leq 200\mu\text{m}$ 以内で平面を構成していることを 300 倍デジタル顕微鏡による撮影で確認した。流速変動波形の検討の際には、直径 $5\mu\text{m}$ 、長さ 0.5mm のタングステンセンサーを持つ I 型熱線プローブを使用した。狭い隙間へのプローブの挿入が流れ場に影響を与えないことを確認するために、図 4 に示すミニチュア I 型熱線プローブも一部併用した。熱線プローブのセンサー部の小型化には特に留意し、直径 $2.5\mu\text{m}$ の白金ロジウム線を外径 $30\mu\text{m}$ の銀で被覆したウオラストン線を U 字型に曲げた後、先端部分を 5% 硝酸水溶液でエッチングし、長さ 0.5mm のセンサーを形成させた。

4. 平均流れ場

4.1 コア領域での流速分布 図 5 にディスク間中央面 ($z/H = 0.5$) における周方向平均速度の半径方向分布を示す。縦軸は周方向速度を各半径位置でのディスク周速で無次元化したものである。 $N=1200, 1800\text{rpm}$ はそれぞれレイノルズ数 $Re = 2.7 \times 10^5, 4.0 \times 10^5$ に相当する。 $0.7 \leq r/R_2$ の範囲ではおおむね $V_\theta \propto r^{-1}$ となっていることから、式 (5b) の準自由渦に近いと言える (図 1 の II)。それより内側の部分では一定値に近づくことから、この

Fig. 5: Distribution of the circumferential mean velocity component in the core region

領域が剛体回転領域に対応していることがわかる (図 1 の I、式 (5a))。比較のために示した Schuler ら⁽¹⁰⁾ の LDV データも含めて、完全な剛体回転 ($V_\theta / \Omega r = 1$) を必ずしも示さないのは、外周から挿入されたプローブによる妨害効果や粒子添加の問題などのために、この領域でのデータの信頼性が損なわれている結果と考えられる。

4.2 エックマン境界層 図 6 は $N = 1200\text{rpm}$ における、周方向及び半径方向平均速度成分のディスク間高さ方向の分布である。周方向成分 (図 6a) はディスク間中央部 ($0.05 \leq z/H \leq 0.95$) の範囲では一様で、ディスク面周速の約 60% となっている。これよりディスク面に近づくにつれて、ディスク面周速に向かって急速に増大しており、この範囲がエックマン境界層領域に対応する (図 1 の III)。半径方向成分 (図 6b) は周方向成分より約 1 桁小さ

Fig. 6: Mean velocity profiles near the disks. (a) circumferential component, (b) radial component.

いが、エックマン境界層内部で半径方向外向き、中央のコア領域で半径方向内向きとなっている。レイノルズ平均法による数値解析⁽¹⁶⁾によると、外周部 ($0.7 \leq r/R_2$) において、周方向に軸を持ち互いに反転する、一対の渦（トロイダル渦、図1のIIの部分）が形成されることが示されているが、図6の速度分布はこのことを裏付けている。

4.3 レイノルズ応力成分 図7は $N=1200\text{rpm}$ におけるレイノルズ応力の分布である。周方向および半径方向垂直応力成分 $\overline{v_\theta^2}$ 、 $\overline{v_r^2}$ は、いずれの半径位置でもエックマン境界層外縁付近で最大となり、ディスク表面に近づくにつれて急速に減少している。また、せん断応力成分 $-\overline{v_\theta v_r}$ は垂直応力とは異なり、エックマン境界層内部の壁面付近で最大となっている。いずれの成分も半径方向分布は単調ではない。後述するようにこのレイノルズ数ではすでに非軸対称構造が発生しており、その結果としてレイノルズ応力成分が半径方向に複雑な変化を示したことが考えられる。

4.4 平均流の概要 以上の平均流れ場を半径方向に見れば、回転軸及び回転するディスクに誘導される、中心付近の剛体回転領域 [I] と、静止シュラウド壁での粘着条件の影響を受ける非剛体回転領域 [II] に大別出来る。またディスク間高さ方向に見れば、非剛体回転領域 [II] と剛体回転するディスク面との間にエックマン境界層が形成される。その内部で圧力-遠心力不均衡によるものと思

Fig. 7: Reynolds stress components

われる外向き流れが発生し、さらに質量バランスによるコア領域での内向き流れの発生を経て、外周部でのトロイダル渦対が形成されるものと考えられる。これらはレイノルズ数が十分小さければ、時間平均ばかりでなく各時刻ごとに見ても定常・軸対称流となっているものと推測される。

5. 不安定流動

5.1 トロイダル渦の不安定化と非軸対称流の発生 前節で述べたトロイダル渦の形成は、凹面や回転場の境界層におけるゲルトラー渦の形成や、同軸回転円筒間のテラー渦の形成と同様の、外力型一次不安定と考えられる。通常これらは外力が強くなると渦軸方向にも変化する二次不安定が現れ、乱流化することが知られている。従って、トロイダル渦も回転数の増加に伴って何らかの周方向不安定性（言い換えれば非軸対称性）が発現し、固定点では流速変動が観測されると考えられる。実際、可視化および計測によって非軸対称流の発生が確認されており⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾、最近になって DNS の結果⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾ から、そ

Fig. 8: Velocity fluctuation at various rotating speeds

の流れ構造の詳細が明らかにされつつある。

図 8 は外周に近い非剛体回転領域のディスク間中央における I 型熱線の出力波形を、ディスク回転数 N を変えて比較したものである。低速回転時にはわずかだった流速変動が、回転数の増加と共に強まり、1200rpm 以上では明らかな周期変動を呈していることがわかる。図 9 は $N=1200, 1800, 2400$ rpm の場合の流速変動の周波数スペクトルである。回転周波数に相当するそれぞれ、20, 30, 40Hz およびその倍数以外に鋭い線スペクトルが認められることから、ディスクとは異なる速度で回転する非軸対称構造の発生が推測される。またピーク周波数は必ずしも回転数に単純には比例していないことから、構造の角数はディスク回転数によって変化しているものと思われる。

5.2 非軸対称構造の角数と回転速度 周方向に角度 θ_{AB} だけ離して 2 本の I 型熱線を設置し、その出力の相互相関関数が最大となる遅れ時間 τ_C 、および次の極大値までの遅れ時間 τ_a を用いて、非軸対称構造の回転角速度 ω と構造の角数 n を次式により見積もった。

$$\omega = \frac{\theta_{AB}}{\tau_C} \quad (6a)$$

$$n = \frac{2\pi\tau_C}{\theta_{AB}\tau_a} \quad (6b)$$

Fig. 9: Power spectrum of the velocity fluctuation

熱線プローブ設置位置は、 $r/R_2 = 0.90$ 、 $z/H = 0.5$ 、 $\theta_{AB} = 0.067$ rad とした。図 10 はこのようにして求めた構造の角数とレイノルズ数の関係を示す。角数はレイノルズ数とともに単調に減少しており、他の実験結果とも一致した傾向を示している。図 11 は同じく構造の回転角速度であるが、ディスク回転数の 60% 程度で、ディスク回転数と共にやや減少する傾向が認められる。

5.3 流れ領域図 図 12 は非軸対称構造の角数について本研究で得られた結果と従来の研究結果を、レイノルズ数と隙間比をパラメータとした流れ領域図にまとめたものである。図中の数字は観測された非軸対称構造の角数、破線は Abrahamson らによる分類⁽⁸⁾を本研究の無次元パラメータに換算したものである。彼らの分類によると a-a 線より上は、回転軸方向に軸を持つ安定した複数の渦構造が存在する領域 (Stable Vortex Region)、b-b より下は構造の角数が特定できない領域 (Indeterminate Region)、それらの中間は構造が安定せず角数が変化しやすい領域 (Alternating Vortex Region) とされている。一方、実線は Herrero らによる最近の DNS の結果⁽¹⁵⁾で、隙間比を一定にしてレイノルズ数を増加させて行くと、定常・軸対称流 (領域 A) から、非定常・非軸対称流 (領域 B、C) に分岐することが示されている。領域 C の流れは安定した多角形構造をなし、Abrahamson の Stable Vortex Region に相当すると思われる。本実験はこの領域に位置している。隙間比一定で見た場合、構造の角数がレイノルズ数の増加とともに減少する傾向は、いずれの実験結果でも共通に認められる。一方、隙間比に対する系統的变化は見られない。