

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：14501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860041

研究課題名(和文)非軸対称エンクロージャ内における回転ディスクによる複雑流れの大規模渦構造の解明

研究課題名(英文) Investigation on the Large-Scale Vortex Structures of the Complex Flow induced by Rotating Disks in a Non-Axisymmetric Enclosure

研究代表者

白井 克明 (SHIRAI, KATSUAKI)

神戸大学・自然科学系先端融合研究環・助教

研究者番号：00634916

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：ディスク回転を伴う流れにおける流体起因の振動発生メカニズム解明を目指し研究を行った。ハードディスクドライブを念頭にシユラウド開口部の非軸対称性とデータ読書きアームを考慮した実験モデルを構築した。透明実験モデルに作動流体の屈折率を一致させた屈折率整合下で可視化実験を行い、複雑流れ構造を調べた。特に、大規模渦による幾何学的構造および、シユラウド開口部の停滞流、アーム後流に着目して解析を行った。その結果、非軸対称エンクロージャ・アーム挿入下においても幾何学的構造が維持される場合があること、流れはアーム挿入の影響を受けて強い三次元性を示すことなどが確認された。

研究成果の概要(英文)：The present study aimed to clarify the onset mechanism of flow-induced vibration encountered at the flow induced by rotating disks. An experimental model was built taking into account of the non-axisymmetric shroud opening and the arm for reading/writing data existing in a hard disk drive. The complex flow structure was investigated through flow visualization under a matched refractive-index condition where the refractive index of the working fluid coincided with that of the transparent experimental flow model. In particular, the investigation focused at the polygonal flow structure formed by large-scale vortices, flow stagnation in the shroud opening and the arm wake. As a result, it was confirmed that the polygonal structure can be maintained even under the combination of the axisymmetric enclosure with the arm insertion and that the flow exhibits strong three-dimensionality influenced by the arm insertion.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体工学 流れの可視化 屈折率整合 画像計測 情報ストレージ機器 ハードディスクドライブ 3次元乱流 流体関連振動

### 1. 研究開始当初の背景

非軸対称形状のエンクロージャ内の回転ディスクによる流れは、様々な流体機器で幅広く利用されている。こうした機器において、故障や事故の原因となり得るディスク振動は、主に回転部分の機械的不具合や外部からの衝撃などで生ずるものの、それ以外の原因によっても引き起こされる。例えば、ディスク周囲の複雑な流体運動によって引き起こされる振動がその重要な一因として指摘されている。

ハードディスクドライブ(HDD)は回転ディスクを内蔵した精密情報機器として用いられている。その高速性と信頼性から、HDDは個人用途のみならずクラウドコンピューティング等サーバー用途で今後も高い需要が見込まれる。一方で、HDDには致命的なディスククラッシュが存在する。

HDDクラッシュを引き起こすディスク振動に関して、そのメカニズム解明と低減を目指してディスク振動とドライブ内の空気流を個別に扱った研究はこれまで数多く行われている。流れに関する研究の大多数は、円柱型のシュラウド壁を持つ軸対称エンクロージャ内に積層回転ディスクを収めた状態で行われている。これまでの研究で、軸対称エンクロージャ内の流れは数個の特徴的な領域に分類可能であることが分かっている。なかでも、ディスク振動と関連が深いと目される大規模渦構造は、流れの幾何学形状とディスク回転条件によって様々な多角形構造を出現させ、その波数や移流速度のレイノルズ数やディスク間無次元距離への依存性が調べられてきた。こうした知見はすべて軸対称エンクロージャによる研究で得られたものである。しかしながら、実際のHDDエンクロージャは軸対称ではなく、アーム駆動部やアーム収納用のシュラウド開口部を有する非軸対称形状となっている。また、HDD内の流れはアーム挿入など障害物による擾乱を受ける。障害物を挿入した場合にはアームが大規模渦を粉砕するため多角形渦構造は見受けられないと報告されてきた。しかし最近の数値シミュレーションではHDD実機の形状データを用いた非軸対称シュラウド流れでアーム挿入時においても大規模渦が発達し、軸対称エンクロージャほど明確でないものの多角形状の構造が形成されると報告され、これがクラッシュに至るディスク振動と関連性を持つ可能性が指摘されている。その解明は流体連成振動のメカニズム理解さらにはその低減により、HDDに限定されることなく流体機器の信頼性向上に繋がると考えられる。

### 2. 研究の目的

流体関連振動の原因と目される複雑流れの構造解明を目指した。例としてHDDを念頭に、非軸対称エンクロージャ内の回転ディスクによる流れにおいてアームが存在する場合を考えた。単純化した非軸対称エンクロージャ・モデルを製作し、屈折率調合

を用いた流れの可視化実験を行った。可視化は原始的な手法であるが、豊富な示唆的情報を与えるものである。可視化実験を通じて、大規模渦運動と多角形構造の形成、シュラウド開口部における停流域、アーム挿入の影響などに関して調べた。

### 3. 研究の方法

まず非軸対称エンクロージャ・モデルを構築した。モデル構築にあたり、特定製品に特有の現象に着目するのではなく、同様な流れに共通した普遍的物理現象を捉えるよう努めた。具体的には、3社5種類のデスクトップコンピュータ用3.5インチHDD製品に関して、各部寸法と面積を製品写真から抽出し、共通の特徴を把握した。各部寸法を平均化し、特徴を単純化することによって図1(a)に示すモデルを構築した。構築モデルは開口部を有し非軸対称形状である。シュラウド開口部はアクチュエータ部品とアーム等を収納するために存在し、その領域では流れが停留する。回転機構部はディスク2枚とハブ3枚、回転軸から成る。各アームはそれぞれ、上部ディスク上側、上下ディスク間、下部ディスク下側の隙間に1枚ずつ設置した。

構築モデルを基に、実機との相似則の観点から2:1スケールで製作した。ディスクおよびアームのみ、十分な剛性を確保するため実機の1.7倍の厚みとした。モデル材料には、回転軸も含めPMMA(Poly-methyl methacrylate、透明アクリル樹脂)を使用した。ディスクとハブは回転軸と一体となって底部から連結されたDCブラシレスモーターで駆動される。

可視化システムはシート光照射レーザと画像計測カメラから成る。レーザにはシリンドリカルレンズ一体型のもの(出力50mW、波長532nm)を用いた。画像計測にはCCDカメラ(分解能1392×1040pixel、最大フレームレート13.5fps)を用いた。モデル内全体の流れおよびアーム近傍の流れについてそれぞれ観測する観点から、2種類の単焦点レンズ(8.5mmと25mm)を用いた。トレーサ粒子にはイオン交換樹脂(平均粒径約100 $\mu$ m)を使用した。

実験モデルと作動流体の境界面における光の反射や散乱、屈折は、固体表面付近の境界層などで図1(b)のような解析不能な領域を生み出す。これはモデル材質と作動流体の屈折率の相違から生じる。本研究では屈折率整合(Reflective Index Matching)を適用し、モデル材質のPMMAに作動流体の屈折率を一致させ、境界での反射・散乱および観測画像の歪みを抑制した。作動流体にはチオシアン酸アンモニウム、グリセリンの混合水溶液を用いた。屈折率整合により、影になる部分や境界面での強い散乱が大幅に低減され、図1(c)のようにほぼ完全に透明な状態で流れ場全体の可視化が可能となった。

可視化実験は、目視による観察に続き、画

(a) 実験モデル, (b) 屈折率整合なし, (c) 屈折率整合あり

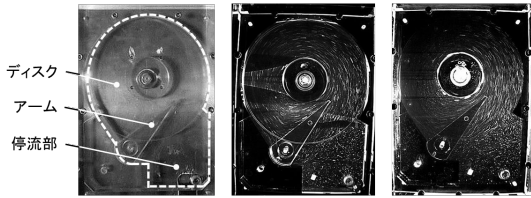


図1: 可視化実験モデル写真と可視化実験での屈折率整合の効果 (可視化モデル写真の点線内が流路。)

像の記録、定量的評価の3段階で進めた。初めの目視による観察では、二次元の画像からは捉えることのできない三次元運動を観測できる。記録した二次元画像は同一場面を繰り返し観察できる利点がある。定量的評価は、露光時間を調整して記録したストリーク画像における粒子ストリーク長さを基に流速を算出した。これら3段階を駆使して流れを解析した。

可視化実験は、レイノルズ数およびアーム挿入角度、レーザー照射面高さに関して変化させ、流れ場全体とアーム近傍に分けて可視化実験を行って考察した。本研究では相似パラメータとしてレイノルズ数を採用し、HDD実機5400~7200 rpmに相当する条件とした。アーム挿入角は $0^\circ$ を底面水平方向として反時計回りに $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $50^\circ$ と、アームなしの場合で実験した。レーザー照射面は、ディスク間中央面すなわちアーム中央を通る面および、上下ディスクとアームの中間面2面の計3面とした。

#### 4. 研究成果

##### (1) 全体の流れ挙動

まず、流れ場全体の挙動を調べた。軸対称エンクロージャを用いた過去の研究で報告されてきた多角形構造に関して、多角形構造を形成する基となる大規模渦を直接観測することはできなかったものの、本研究でも多角形構造が観察された。アーム非挿入の場合、レイノルズ数の増加とともに多角形構造の角数は減少することが観察され、これは過去の他の研究者の報告と一致する。アーム非挿入の場合、レイノルズ数 $5 \times 10^4$ で多角形構造は消滅した。また、アーム挿入時に挿入角度を変えて観察した結果、挿入角が深い条件では予想通り多角形構造は見られなかった。しかし、それ以外の角度では多角形構造が観察され、特定角度でさらに顕著に見られた。レーザー照射面の高さを変えても多角形構造は定在する傾向が見られた。

シュラウド開口部に関して、アーム挿入角が浅い場合にはディスク領域の流れはディスク回転によって周方向に流れ、シュラウド開口内には停滞する流れが観察された。アーム挿入角を深くすると、ディスク領域の流れはアームによって大幅に進路が変更され、一部はシュラウド開口部内に流入し、シュラウド開口部内の流速が高くなり、ディスク領域

と開口部を行き交う流れが多く観察された。さらに、アーム挿入とシュラウド開口部の影響で、流れはディスク1回転の間に加減速を繰り返す様子が分かった。アーム挿入角が深い場合には、その影響が顕著に見られた。

ディスク間中央面およびディスク・アーム中間面での周方向速度の定量的評価から、2つの面で周方向成分の速度に顕著な差が見られた。これはディスク間に二次流れが存在することを示唆するもので、その構造は挿入角が深い条件ではディスク間中央面に対して非対称となることが定量的評価から推測された。二次流れを観察することを試みたが、観測方向の関係から、本研究では直接観察することは困難であった。

また、アーム挿入角を問わずディスク・シュラウド間の隙間を通る軸方向成分の速度を持つ三次元的な流れの存在が目視で顕著に観察された。この隙間を通してディスク下面から上面へ向かう流れの存在は数値シミュレーションで報告されている結果によく一致する。

(2) アーム近傍とシュラウド開口の流れ挙動  
観察領域をアーム近傍とシュラウド開口部付近に限定し、アーム挿入角度が流れに及ぼす影響を全体よりも詳細に調べた。

ディスク中間面では、アーム挿入角が深くなるにつれてディスク領域で周方向へ進む流れの進路はアームの存在によって大幅に進路を変更された。その結果、図2に例示するように、シュラウド開口部への流入が増加した。それに伴い、シュラウド開口部での流速は増加し、時計回りに大きく循環する領域の面積は小さくなった。アーム挿入角が浅い条件ではシュラウド開口部での流れは比較的低速で運動し、停滞する流れが見られた。ディスク・アーム中間面では、いずれの挿入角においてもアームとディスクの隙間を通過する流れが多く観察された。特にアームがシュラウド開口部にある $0^\circ$ の条件においてもアーム上下面を通過する流れは多く観察された。アーム挿入角が $35^\circ$ の条件では、アーム先端上を通過する流れの向きはディスク周方向よりも内側に向いており、他の条件と比較してこの領域を通過する流れが顕著に多く観測された。

ディスク間中央面とディスク・アーム中間面での観察結果を比較した場合、アーム挿入

(a) アーム挿入角度  $20^\circ$  (b) アーム挿入角度  $35^\circ$

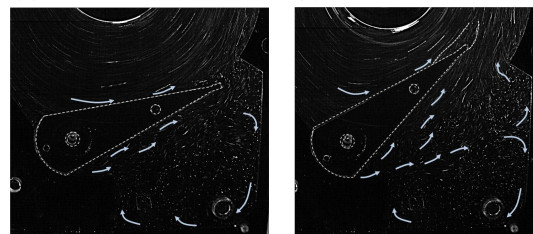


図2: アーム挿入角を変化させた際のアーム・シュラウド開口近傍での流れ挙動の相違 (画像は図1の下半分に相当。点線部分はアーム位置、矢印は平均的な流れの方向を示す。)

角が深いほどアーム後流側の領域で各観察面における流れの向きが大きく異なり、強いせん断の生成が推測された。このせん断はディスクに平行・垂直な面の両方で生じているため、アーム後流のディスク間の流れは複雑な三次元性を有し、この流れ構造が流体関連振動の一因となる可能性が示唆された。

### (3)まとめ

エンクロージャの非軸対称性およびアーム挿入を考慮した単純化モデルを構築した。構築モデルを基に透明実験モデルを製作し、流れの可視化を行った。屈折率整合の適用により、流れ場全域をほぼ完全に透明な状態で観察することが可能となった。可視化を通じて、軸付近に形成される多角形構造や、シュラウド開口部での停留、アーム挿入の影響、流れの三次元性などに関して示唆に富む重要な知見が得られた。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計1件)

- (1) Katsuaki Shirai, Lars Büttner, Jürgen Czarske, Shinnosuke Obi, “An Experimental Study on the Flow Behavior near the Read-And-Write Arm in a Hard Disk Drive Model with a Shroud Opening”, *Microsystem Technologies*, Vol. 19, pp. 1519-1527 (2013), 査読付き, DOI: 10.1007/s00542-013-1847-3

### 〔学会発表〕(計3件)

- (1) Ryo Tada, Katsuaki Shirai, Tsuyoshi Kawanami, Shigeki Hirasawa, “Visualization of the Complex Flow Behavior inside Non-Axisymmetric Enclosure Model of a Hard Disk Drive”, 12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization (FLUCOME2013), OS4-03-1, pp. 1-10, Nara, Japan, November 18-23rd (2013)
- (2) 多田遼, 白井克明, 川南剛, 平澤茂樹, 「非軸対称エンクロージャ内の回転ディスクによる複雑流れの可視化実験」, 日本機械学会年次大会, 流体工学部門一般セッション: 空力特性他, G051021, 3ページ, 岡山, 2013年9月8~11日
- (3) Katsuaki Shirai, Ryo Tada, Tsuyoshi Kawanami, Shigeki Hirasawa, “Visualization of the Flow Behavior in a Hard Disk Drive Model with Read-And-Write Assembly and Large Stagnation Area”, The 24th Magnetic Recording Conference (TMRC2013), Paper P10, Tokyo, Japan, August 20-22nd (2013)

### 〔図書〕(計0件)

### 〔産業財産権〕 ○出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

### ○取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

### 〔その他〕 特になし。

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

白井 克明 (SHIRAI, Katsuaki)  
神戸大学・自然科学系先端融合研究環  
・助教  
研究者番号: 00634916

### (2)研究分担者 なし。

### (3)連携研究者 なし。