

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 9 月 5 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820048

研究課題名(和文) 回転ディスクによるエンクロージャ内流れに挿入された物体まわりの流れと流体力の解明

研究課題名(英文) Investigation of the flow behavior and fluid body force around an arm inserted into a flow driven by rotating disks mounted in an enclosure

研究代表者

白井 克明 (SHIRAI, KATSUAKI)

神戸大学・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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：実験では透明実験モデルに屈折率の等しい流体を用いて流れ全域を観測可能な状態を実現し、流体に混入させた微粒子画像から二次元流速場を算出するレーザー計測システムを構築した。計測で得られた速度場からは、容器内の流れは回転円盤に駆動され周回する間に周方向に加速と減速を繰り返し、流速が局所的に円盤の剛体回転速度を上回ることと、そのメカニズムを明らかにした。流れの加減速はアーム挿入と開口部の存在の影響が別々の領域で作用し発生することが解明された。また、数値解析では実験と同一形状モデルを用いた非定常シミュレーションを実施し、実験結果との比較により解析の有効性を調べ、実験をある程度補完できる可能性を見出した。

研究成果の概要(英文)：In the experiment, measurement system was built to investigate the flow velocity fields based on particle image analysis in a transparent experimental model with refractive index matched working fluid. The resulting velocity fields in the planes parallel to the disk surfaces revealed the mechanism of complex behavior of the flow undergoing acceleration and deceleration during the disk revolution. The flow velocities were found to locally exceeded that of the solid body rotation of the disks. The acceleration and deceleration are attributed to the arm insertion and shroud opening. The acceleration and deceleration induced by these factors occur separately in different flow areas. Numerical simulation of the unsteady flow was performed using the configuration identical to that of the experiment. Validity of the simulation was analyzed through the comparison of the results with the experimental ones. The results indicate that the simulation may supplement the experiment in certain extent.

研究分野：熱流体工学

キーワード：回転流 容器内流れ PIV計測 屈折率整合 コリオリ力 ハードディスクドライブ 流体機械 情報ストレージ機器

1. 研究開始当初の背景

エンクロージャ内で回転体に駆動される流れはガスタービンなど流体機械からハードディスクドライブ (HDD) など情報ストレージ機器まで幅広く用いられる流れのひとつである。HDD のディスク振動は主に回転部分の機械振動や衝撃によるが、ディスク・シュラウド間の狭窄による振動振幅の減少が知られ、クラッシュを引き起こす振動は複雑な内部流れに起因すると考えられる。HDD は主要な情報ストレージ機器として今後も高い需要が見込まれ、記録密度や位置決め精度のさらなる向上に向けて研究開発が継続されている。他方、クラッシュの要因となる流体振動メカニズムは依然不明であり、ストレージ機器の信頼性に関わる流体振動の根本的解決に至っていないのが現状である。

HDD 流れに関しては既に多くの研究がなされ、流体関連振動に着目した研究も行われている。多くの場合、振動と流体は別々に研究され、振動計測に関してはレーザードップラー振動計や各種距離センサーが用いられてきた。流体に関しては流れの可視化や圧力プローブ、レーザードップラー流速計 (Laser Doppler Velocimetry: LDV)、画像粒子流速計 (Particle Image Velocimetry: PIV) による実験が行われ、大多数は円筒型エンクロージャ内部に積層回転ディスクが収められた軸対称モデルで行われている。これまでの研究で HDD 流れはいくつかの特徴的な領域に分類されることが分かり、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パターンを出現させ、その波数や移流速度はレイノルズ数やディスク間無次元距離に依存する。しかし実際の HDD エンクロージャはシュラウド開口部を有する非軸対称形状で、これまでの軸対称に基づくアプローチで実際の流れを解明するには限界があると考えられる。また、対象とする HDD 流れはデータ読み書きアームなど障害物の挿入による擾乱を受ける。最近では実験に加え LES (Large Eddy Simulation) による 3 次元数値解析も行われ、大規模渦構造の発生も再現されている。ただし、HDD 流れは時空間スケールのダイナミックレンジが大きいため、限られた計算格子数による空間解像度の不足や、たとえ解像度が得られたとしてもわずかな数のディスク回転に相当する統計データしか得られない制約がある。

研究代表者は 2008 年から HDD の複雑な内部流れに着目して実験を行ってきた。LDV を発展させマイクロメートル域の高空間分解能を実現した速度プロファイルセンサーを活用し、ディスク・シュラウド間やディスク・アーム間の狭い隙間の流れの計測に取り組み、狭隘流路で強いせん断が存在することを明らかにしてきた。また、2012 年からは挿入アームとシュラウド開口部の停滞流を再現した非軸対称モデルを構築し、可視化実験

を開始した。完全透明実験モデルを製作し、モデル材質と作動流体の屈折率を一致させる屈折率整合の採用により、反射や屈折の影響を大幅に低減し、流れ場全域の観測を実現した。可視実験では、ハブ近傍にレイノルズ数の影響を受けて変化する多角形構造が見受けられた。挿入アーム付近でディスクに平行な方向と垂直な方向の両方向にせん断が生じ、それが 3 次元的な複雑な流れを形成する一因でないかと解明された⁽¹⁻³⁾。さらに、ハブ近傍で局所半径位置でのディスク剛体回転速度を超える速い流れの存在が見出された。しかし、これらは定性的に観察されているが定量的な議論は難しく、目指す流体関連振動の解明には、流れがアーム等へ及ぼす影響を考慮し、周囲の流れの速度場の観点から定量的に評価する必要がある。

2. 研究の目的

流体関連振動には、流れが物体に及ぼす力が関係する。それゆえ、本研究では流体関連振動の根源となり得る挿入アームへの流体力を速度場計測から非接触で評価することを目的とした。具体的には、PIV 計測で得られた速度場から、加振力となる流体力を算出する。過去約 20 年間の PIV 計測の発展に伴い、翼や鈍頭物体に働く流体力を速度場から評価する手法が研究され、応用されてきた。本研究ではこれらの手法に基づき、回転流れに挿入されるアーム周りの速度場を計測し、そこからアームに作用する流体力を圧力とせん断応力から成る加振力として評価する。その実現にはアーム周囲の速度場データ取得が欠かせない。2012 年から開始した屈折率整合により、流体力算出の前提となるアーム全周の流れの観察が既に実現されている。

本研究でアームへの流体からの加振力を評価できれば、HDD 等の内部流れの流体関連振動の原因究明が前進する。流体力の算出には、これまでアーム内部に予め圧力孔や歪みゲージ機構を埋め込む必要があった。また、感圧塗料による計測では複雑な内部機構の準備が不要だが、感度が低いのに加えアーム全周の流体力算出が困難な点が課題である。なお、対象とする現象は流体関連振動であり、単なる振動や圧力の計測だけでは加振力の源となる周囲の流れ場の速度情報が得られない。本研究では PIV 計測で速度場と流体力の両方を同時評価するので、加振力に加えて原因となるアーム周りの流れ場に関して調べられる。すなわち、挿入物体まわりの流体挙動と流体力の関係の解明に繋がる。

3. 研究の方法

本研究では上記の目的で実験と数値解析の両面から複雑流れの解明に取り組んだ。

3.1 実験

本研究で用いた実験モデルを図 1 に示す。3.5 インチ実機 HDD を模擬し、2.25 倍スケー

ルで寸法 330×240×62 mm, 液浸部深さ 30 mm とした. 可動部はディスク (半径: $R=100$ mm) 2 枚とアーム 3 枚 (半径 35 mm) で構成し, ディスクは軸方向にハブ (半径 35 mm) で交互に挟んで固定し, 軸と一体で回転する構造とした. ディスクとアームは剛性確保のため実スケールより厚い 3 mm とした. ディスク間隙間は $H=6$ mm, アームとディスクは軸方向間隔 1.5 mm で交互に積層され, ディスク半径・ディスク間隙間比は $H/R=0.06$ であった. エンクロージャにはシュラウド開口部を設け, 停滞流れの再現を目指した. モデルはベアリングとオイルシールを除き回転軸を含めて全ての部品を透明アクリル樹脂で製作した. 作動流体に屈折率整合を施した溶液を用いることで固液間での光の反射と屈折を低減し, 流れ場全域の可視化を実現した. 溶液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て, 屈折率はモデル材料の 1.49 と一致すべく配合した.

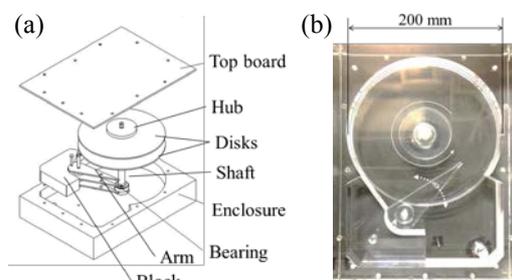


Fig. 1 Schematic of the experimental flow model equipped with a shroud opening and an arm, (a) perspective view of the design, (b) top view of the model without the working fluid.

計測手法として 2次元2成分 PIV システムを構築した. 照射光強度を考慮し, システムはダブルパルスのレーザーとダブルシャッターのカメラを用いる方式とした. 照射光はパルスレーザー (532 nm, 20 mJ/pulse) からの光をシート状に成形し, モデル側面から照射し, CCD カメラ (1392×1040 pixel, 14 bit, ダブルシャッター) で図 2 のように垂直方向から撮影した. 照射と撮像のタイミング制御はファンクションジェネレーターとパルスディレイジェネレーターで実現した. トレーサー粒子に平均粒径 70 μm のイオン交換樹脂を用い, 厚さ 1.5 mm のシート光で照射したディスク平行断面の粒子画像を撮影した.

計測はアーム挿入角 4 種類と計測面 2 面の総計 8 条件で行い, 1 条件毎に速度場 1000 組を取得した. アーム挿入角は図 3(a)の $\alpha=0^\circ, 20^\circ, 35^\circ, 50^\circ$ の 4 条件とした. 計測面は図 3(b)のアームを含むディスク間中央面 ($z=0$) と上側ディスク下面近傍のディスク-アーム間 ($z=0.4$) の 2 面とした. 軸方向座標 z はディスク間中央を原点に隙間 H で無次元化した. 流れはディスク領域の比較的速い回転流れと開口部の停滞流に大別される. 本研究では

図 4(a)のディスク領域のディスク平行面での挙動に着目し, 以下ではディスク外周速度 $R\Omega$ とディスク半径 R で定義するレイノルズ数 $\text{Re}=7.3 \times 10^4$ (実機 5400 rpm 相当) の条件で得られた結果に限定して報告する.

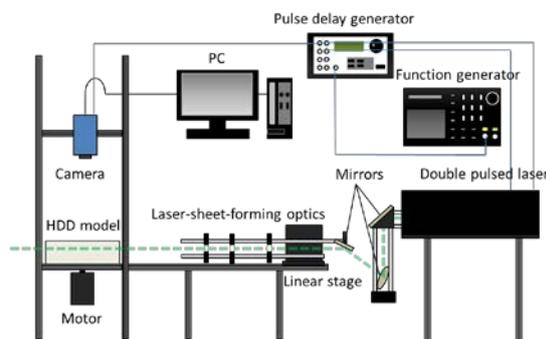


Fig. 2 Schematic of the experimental setup and PIV system, consisting of a double-pulsed laser, optics, function generator, pulse-delay generator, flow model, CCD camera and computer.

PIV 解析には, MATLAB[®]を基にした PIVlab を採用した. ディスク 1 回転につき 2.5 回の頻度で粒子画像ペアを取得し, 粒子パターン移動量はマルチグリッド相互相関法で算出した. 取得画像サイズ 1392×1040 pixel に検査窓 32×32 pixels を適用し 50%重複を設定した. その結果, 空間分解能は約 $0.8 \times 0.8 \text{ mm}^2$ となり, 速度算出の不確かさは平均 1.6%と見積もられた. なお, 実験の PIV 計測に関する詳細は研究成果(4~11)を参照されたい.

3. 2 数値解析

数値解析では実験と同一形状で流れ場を構築した. 基礎方程式にフィルター操作を施した非圧縮性の連続の式と運動方程式を用いた. サブグリッドスケールの渦粘性モデルには Wall-Adapting Local Eddy-viscosity (=WALE)モデルを適用した. 圧力と速度の連成に Pressure Implicit with Splitting of Operator (=PISO)法を用いた. 総計算格子数が 430 万個でも壁面近傍を十分に解像できず, 二次流れ発生が予想されるディスク壁面を除き Spalding 則に基づく壁関数を適用した. 解析に OpenFOAM[®]を使用し並列計算を行った. なお, 数値解析の詳細は成果(12)を参照されたい.

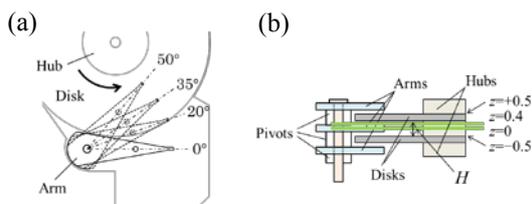


Fig. 3 Definitions of (a) the arm insertion angles ($\alpha=0^\circ, 20^\circ, 35^\circ, 50^\circ$) in a top view and (b) the PIV measurement planes ($z=0, 0.4$) in a cross-sectional view.

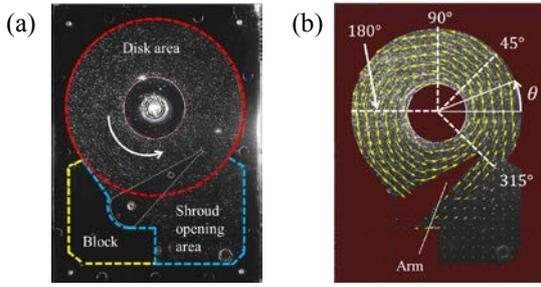


Fig. 4 Definitions of (a) the flow regions and (b) the circumferential positions.

4. 研究成果

4. 1 実験

図5にアームを含む $z=0$ 面での各アーム挿入角での周方向速度分布を示す. 流速はディスク外周速度 $R\Omega$ で無次元化し, 速度範囲を統一した. 周方向速度はシュラウド開口部からディスク領域へ合流する際に加速する一方で, ディスク領域からシュラウド開口部へ流入する際にアーム軸・シュラウド間で減速する. 流れの様相はアーム挿入角で異なり, $\alpha=0^\circ, 20^\circ$ でハブ近くの流体は概ねハブ近傍を周回し, $\alpha=35^\circ, 50^\circ$ ではアーム挿入の影響でハブ周辺とディスク外周部の間で運動量交換が見られる. 外周部の流体はアームに衝突した後に再度ディスク領域に戻り周回を続けるものと, $\theta=250^\circ$ 付近でアーム軸・シュラウド間を通り開口部に流入するものが観察される. なお, $z=0.4$ 面においても $z=0$ 面と類似した傾向が見受けられた.

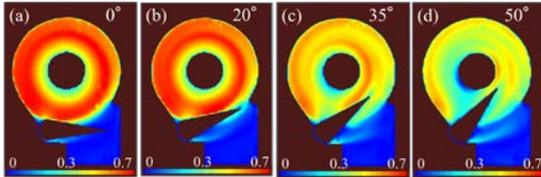


Fig. 5 Colored contour map of the normalized circumferential velocities in the disk-to-disk middle ($z=0$) at the arm insertions angle, (a) $\alpha=0^\circ$, (b) 20° , (c) 35° , (d) 50° .

次に, 図6では周方向位置 $\theta=45^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 315^\circ$ (図4(b)参照) に沿う周方向と半径方向の速度の半径方向分布を示す. 半径方向座標をディスク半径 R , 各流速を局所半径位置でのディスク剛体回転速度 $r\Omega$ で無次元化した. 図中の水平方向の点線は局所半径位置でのディスク剛体回転速度を示す. 図6(a)の $\theta=315^\circ$ では $\alpha=35^\circ, 50^\circ$ では深いアーム挿入による狭窄の影響でハブ近傍の周方向流速がディスク剛体回転速度を上回り, 同じく(b)では $\alpha=35^\circ, 50^\circ$ で開口部からディスク領域に半径内向きの流入が見られる. (c)の $\theta=45^\circ$ では $\alpha=35^\circ, 50^\circ$ においてアーム挿入の影響でハブ近傍の周速度が増加し, $\alpha=0^\circ, 20^\circ$ で局所の

ディスク剛体回転速度を上回った. これは(d)で $\alpha=0^\circ, 20^\circ$ でいずれの半径位置においても開口部からディスク領域への流入の影響で一貫して見られる半径方向内向きの流れの存在に起因する. 運動方程式の周方向成分で加速度項とコリオリ力の項が釣り合うなか, 半径内向きの流れの存在でコリオリ力の符号から周方向速度の周方向への加速が生じ, 結果的に流速が局所の剛体回転速度を上回る. この状態は(e)の $\theta=90^\circ$ においても $\alpha=0^\circ, 20^\circ, 35^\circ$ で確認される. また(f)で $\alpha=35^\circ, 50^\circ$ にて半径方向外向き流れの存在がわずかに確認され, これは下流の開口部の存在によると考えられる. さらに下流の(g)の $\theta=180^\circ$ では全てのアーム挿入角にて周方向速度が局所剛体回転速度を下回るようになり, 下流の開口部の存在で(h)において半径方向外向きの流れが一部で見られる. なお, 実験結果と考察の詳細は研究成果(4~11)を参照されたい.

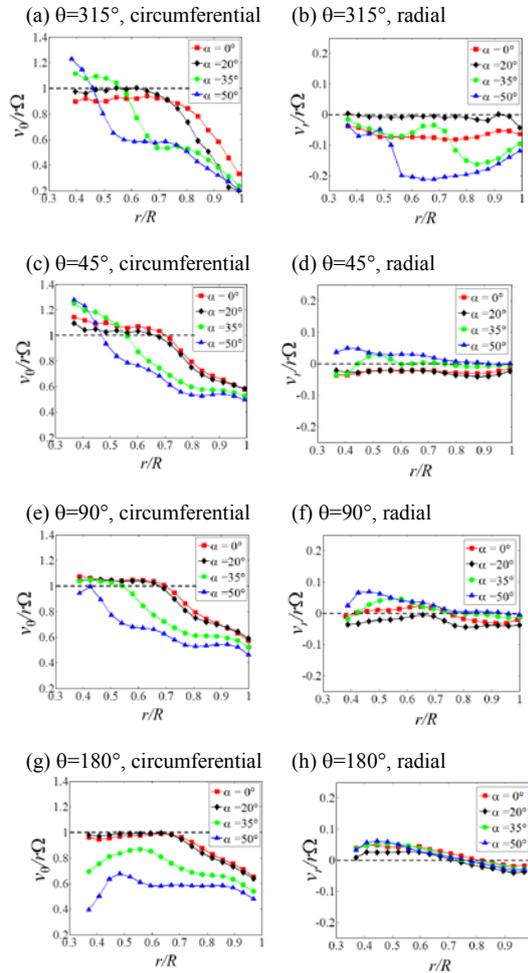


Fig. 6 Radial distributions of the circumferential and radial velocity components along the radial lines at $\theta=45^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 315^\circ$ defined in Fig. 4(b) in the arm-to-arm middle ($z=0$) for the four angles of the arm insertion $\alpha=0^\circ, 20^\circ, 35^\circ, 50^\circ$, (a) $v_\theta/r\Omega$ and (b) $v_r/r\Omega$ at $\theta=315^\circ$, (c) $v_\theta/r\Omega$ and (d) $v_r/r\Omega$ at $\theta=45^\circ$, (e) $v_\theta/r\Omega$ and (f) $v_r/r\Omega$ at $\theta=90^\circ$, (g) $v_\theta/r\Omega$ and (h) $v_r/r\Omega$ at $\theta=180^\circ$.

4. 2 数値解析

図7にディスク外周速度 $R\Omega$ で無次元化した周方向速度分布を示す。 $z=0, 0.4$ のいずれの面においてもアーム挿入角の増大に伴い流れが乱され、周方向流速の高い領域が縮小した。また、シュラウド開口部周辺のディスク近傍の領域には、ディスクから運動エネルギーを受け取り、ディスク接線方向に向かう流れが存在する。 $z=0$ 面と $z=0.4$ 面を比較すると、 $z=0.4$ 面でやや周方向流速の高い領域が多く、これはアームの影響が $z=0$ 面と比較して低いとみられる。

図8は $z=0, 0.4$ 面にて5回転分の流れ場を抽出し平均した周方向と半径方向の流速の半径方向分布を示したものである。ここでは角度 $\theta=90^\circ$ の場合の分布を示す。解析結果をディスク半径と局所周方向速度で無次元化し、実験結果と比較したものである。図中の表記で SIM は解析結果、EXP はそれぞれ計測結果を表す。実験と数値解析の結果は定性的にある程度一致し、両者の結果は概ね妥当と考えられる。実験と数値解析で結果の相違が存在するのは、主に数値解析で流れの剥離に関し予測性が低下し、解析と実験で剥離位置がややずれたことに起因すると考えられる。

このほか数値解析では渦度 ω_z に加え、直接計測できない z 軸方向流速と圧力分布を得るとともに、開口部における流れ挙動を調べた。詳細については成果(12)を参照されたい。

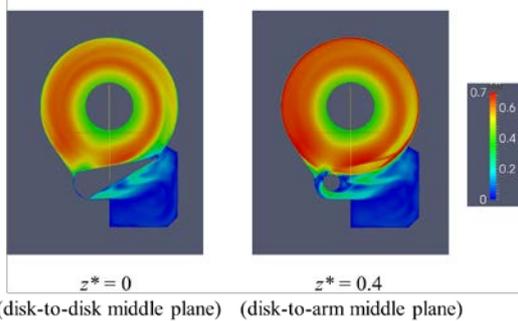


Fig. 7 Colored contour map of the normalized circumferential velocities in $z=0, 0.4$ planes at $\alpha=20^\circ$.

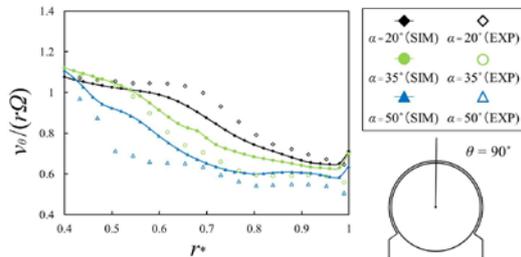


Fig.8 Radial distribution of the normalized velocities at $\theta=90^\circ$ in $z=0.4$ plane.

まとめ

本研究では情報ストレージ機器の HDD を念頭に、シュラウド開口部と挿入アームを備えた非軸対称エンクロージャ内で回転ディスクに駆動される流れについて、アームまわりの流れ挙動とアームに加わる流体力の解

明を目指し、実験と数値解析により、流れの挙動を調べた。自作 PIV システムで 2 次元 2 成分の速度場計測を実現するとともに、LES による流れの数値解析を実施した。ディスク領域に着目した PIV 計測では、以下の知見が得られた。アームの挿入とシュラウド開口部の存在は異なるメカニズムで流れの加減速を引き起こす。アーム挿入は流路狭窄を導き、上流で流れを減速させる一方で、下流で流れを加速させる。シュラウド開口部の存在により、ディスク領域と開口部の間で運動量交換が見られる。ハブ近傍で周方向流速が局所ディスク剛体回転速度を上回るのは開口部からの半径方向内向きの流れに起因し、開口部への流入は逆に周方向速度の減速を導く。

LES 解析では PIV 計測と定性的に概ね一致する結果が得られるとともに、計測では得られない情報も一部得られた。数値解析では流れの 3 次元構造が得られ、アーム挿入による影響が確認された。解析で流れを比較的良好に予測できることが示された。

残された課題として、実験ではディスクに垂直な断面の速度場の定量評価およびシュラウド開口部の流れ、アームへの流体力の評価が挙げられ、垂直断面での速度場計測を進めている。また、数値解析では限られた格子数による解像度の不足と統計量算出の際のサンプル数の少なさが挙げられる。解像度を向上し、より多くの統計サンプルを得ることで、質の高い解析が実現される。

今後は実験と数値解析を工夫して進めるとともに互いに補完し合うことで、アームに作用する流体力の算出から流体関連振動の解明に繋がると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 12 件)

(1) 白井克明, 多田遼, 川南剛, 平澤茂樹, 「非軸対称エンクロージャ内の積層回転ディスクによる複雑せん断流れの可視化を用いた解明」, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 2014 年 9 月 7~10 日, 東京, 流体工学部門: 流れの高次元化可視化に向けて(2), J0510205 (5 ページ), (2014).

(2) Katsuaki Shirai, Ryo Tada, Tsuyoshi Kawanami, Shigeki Hirasawa, “Experimental study on the internal rotating flow driven by a pair of rotating disks in a non-axisymmetric enclosure”, EUROMECH 10th European Fluid Mechanics Conference, September 14–18th, Copenhagen, Denmark, pp. 387, (2014).

(3) 白井克明, 多田遼, 石村尚平, 川南剛, 平澤茂樹 「非軸対称エンクロージャ内の積層

回転ディスクによる複雑せん断流れの解明」, 日本伝熱学会第 52 回日本伝熱シンポジウム, 2015 年 6 月 3~5 日, 博多, E211 (2 ページ), (2015).

(4) Shohei Ishimura, Katsuaki Shirai, Ryo Tada, Tsuyoshi Kawanami, Shigeki Hirasawa, "Flow visualization and velocity field measurement inside a refractive-index matched transparent model of a hard disk drive", 2015 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechanics for Information and Precision Equipment (MIPE2015), June 14-17th, Kobe, Japan, Paper TuB-2-5 (3 page), (2015).

(5) Shohei Ishimura, Katsuaki Shirai, Ryo Tada, Tsuyoshi Kawanami, Shigeki Hirasawa, "On the global behavior of the flow field in a transparent experimental model of a hard disk drive", GALA 23. Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik"(GALA2015), September 8-10th, Dresden, Germany, Paper 34 (9 pages), (2015). (<http://www.gala-ev.org/images/Beitraege/Beitraege%202015/pdf/26.pdf>)

(6) Shohei Ishimura, Katsuaki Shirai, Tsuyoshi Kawanami, Shigeki Hirasawa, "Experimental study on the complex flow in a transparent model of hard disk drive", 26th Int. Symp. on Transport Phenomena (ISTP-26), September 27th-October 1st, Leoben, Austria, Paper 80 (8 pages), (2015).

(7) 石村尚平, 白井克明, 川南剛, 平澤茂樹, 「非軸対称エンクロージャ内の積層回転円盤に駆動される複雑流れの PIV による速度場定量評価」, 可視化情報全国講演会 2015, 2015 年 10 月 10~11 日, 京都, OS2-1 流動現象の可視化と計測, A103 (2 ページ), (2015).

(8) 石村尚平, 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積層円盤による複雑流れの可視化実験と速度場計測」, 日本機械学会 第 93 期流体力学部門講演会, 2015 年 11 月 7~8 日, 東京, OS16-3 流体機械の研究開発とそれに関連した複雑流動現象, 1620 (2 ページ), (2015).

(9) 白井克明, 石村尚平, 川南剛, 平澤茂樹, 「非軸対称容器内の積層回転円盤による流れの解明 (粒子画像計測に基づく円盤領域の流れ挙動について)」, 日本機械学会 No.16-12 IIP2016 情報・知能・精密機器部門 (IIP 部門) 講演会, 2016 年 3 月 14~15 日, 東京, 情報機器コンピュータメカニクス(1) B-2-1 (6 ページ), (2016).

(10) Katsuaki Shirai, Shohei Ishimura, Tsuyoshi Kawanami, Shigeki Hirasawa, "Complex behavior of a rotating flow driven by corotating disks mounted in a non-axisymmetric enclosure",

Euromech 11th European Fluid Mechanics Conference, September 12-16th, Seville, Spain, paper 288 (2016).

(11) 白井克明, 石村尚平, 川南剛, 平澤茂樹, 「非軸対称容器内で積層回転円盤に駆動される複雑流れの速度挙動」, 日本機械学会 第 94 期流体力学部門講演会, 2016 年 11 月 12~13 日, 宇部, OS9-2 流体機械の研究開発とそれに関連した複雑流動現象, 0909 (2 ページ), (2016).

(12) 辰巳裕亮, 白井克明, 川南剛, 平澤茂樹, 「非軸対称エンクロージャ内で積層回転円盤に駆動される複雑流れに関する研究」, 日本機械学会 No.17-10 IIP2017 情報・知能・精密機器部門 (IIP 部門) 講演会, 2016 年 3 月 14~15 日, 東京, 情報機器コンピュータメカニクス B-2 (6 ページ), (2017).

[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]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白井 克明 (SHIRAI, Katsuaki)
神戸大学 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

(4) 研究協力者

なし