

令和元年6月13日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06089

研究課題名(和文) 自公転円板上の流体の流れ現象の解明と応用

研究課題名(英文) A study on mechanism and application of fluid flow on a rotating disk under orbital motion

研究代表者

宗像 瑞恵 (MUNEKATA, MIZUE)

熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授

研究者番号：30264279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：回転円板上に形成される気流の流れ構造は公転運動の付加によって、境界層遷移が促進されるのみならず、境界層構造全体の移動や変形が生じていることを明らかにした。親水性の微量の液体を付着させた円板を回転させると、その回転角加速度が大きく、液滴の粘度が高くて液滴の体積が小さいほど、動き出しに必要な加速度が大きくなっていることを動的可視化によって明らかにした。さらに、公転運動を付加した場合、液体の動き出すタイミングや液体の流れる軌道は自公転速度の相対速度の大きさに依存していることを明らかにした。また、自転に公転運動を付加することによって、円板に設置した障害物後方にも液体を回り込ませることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

回転円板上の境界層流れの遷移現象の詳細なメカニズムは未だ明らかにされていないが、本研究で付加した公転運動によってその境界層遷移のメカニズム解明に有用な結果が得られた。回転円板に公転運動を付加することによって、濡れ性の異なる円板上の液体がどのように流れていくのかを明らかにすることによって、未だ液体の動き出す臨界条件が理論的に予測できない濡れ科学分野において意義のある結果が得られている。また、半導体製造工程中など回転円板上で液体の流れを伴う塗布工程や洗浄工程において有用な結果を示した。

研究成果の概要(英文)：It was clarified that the flow structure of the air flow formed on the rotating disk not only promoted boundary layer transition but also caused movement and deformation of the entire boundary layer structure by the addition of the orbital motion. When the disk on which a small amount of hydrophilic liquid is attached starts rotating, the higher the rotation angular acceleration, the higher the viscosity of the droplet and the smaller the volume of the droplet, the larger the acceleration required for movement is shown by dynamic visualization. Furthermore, it was found that the timing of the liquid movement and the flow path of the liquid depended on the relative velocity of the rotating and orbital speeds. In addition, by adding orbital motion to the rotational motion, the liquid also flowed successfully behind obstacles placed on the disk.

研究分野：流体工学

キーワード：回転円板 境界層遷移 液流れ 流体計測 濡れ性

1. 研究開始当初の背景

自転のみの回転円板上の流れは、三次元ねじれ境界層の代表的な流れ場であり、国内外で幅広く研究されてきた。高速回転や大口径の円板になると、円板半径  $R$  を代表長さ、回転速度  $R\omega$  を代表速度とするレイノルズ数( $Re = R^2\omega/v$ ) が大きくなり、回転円板上の流れが不安定になるため、図1のように遷移域には周方向に30本程度の遷移渦が発生し外周部で乱流化することが知られている。この遷移渦の発生は線形安定性解析により、変曲点型不安定が原因であり、乱流遷移は二次不安定によって生じると考えられている。特に、半導体製造分野では回転ウェハ上に発生する遷移渦は一様成膜の妨げとなるため、次世代型大口径ウェハへ対応するには境界層遷移を制御する技術が必要とされている。しかし、自公転円板上の境界層流れに関する研究は、国内外を問わず、我々のこれまでの研究以外に未だ報告されておらず、唯一の研究である。また、半導体製造分野では、回転塗布工程において、チップ後方への塗り残しや洗浄漏れなどの問題があり、回転ウェハ上の液体の流れに公転を与える影響について調査することが期待された。

2. 研究の目的

自転のみの回転円板上の流れは、高速回転や大口径の円板になると、遷移渦が発生し外周部で乱流化する。この遷移渦は定在渦であるため、半導体製造分野では回転ウェハ上のレジスト膜に気流の境界層内に発生する遷移渦による筋が転写され、一様な成膜の妨げとなる。そこで、公転運動を付加して遷移渦の定在性を無くし、一様な薄膜を形成するための気流境界層の制御の可能性を調査することを念頭に、公転が与える回転円板上の境界層流れ構造への影響について調査することを目的とする。また、回転円板上の液体の流れについて濡れ性を変化させて調査し、公転運動が与える回転円板上の液体の流れについて調査する。

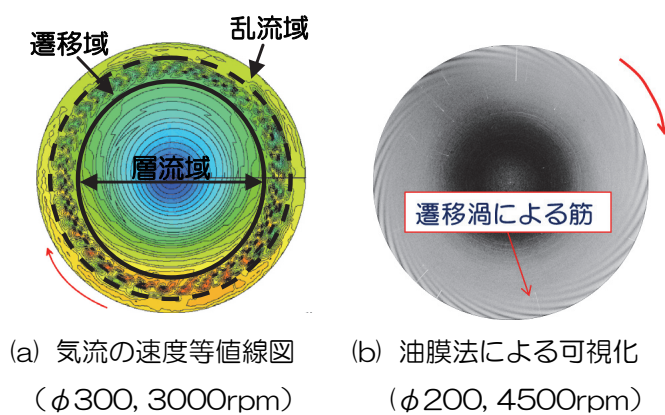


図1 自転円板上に発生する遷移渦 ( $Re > 3 \times 10^5$ )

3. 研究の方法

円板の自公転運動をサーボモータで制御する自公転円板装置を設計製作し、自公転円板上に形成される境界層内の流れ特性を、(a)熱線流速計による境界層流れの速度場計測、(b)油膜法および(c)煙可視化法により境界層内の気流を可視化した。また、各種円板での各条件において、新たな手法を組み込んで(d)感圧塗料による表面圧力の計測、(e)感温塗料による表面温度の計測による調査の基礎研究を行った。

アルミ円板やウェハなど性状や濡れ性の異なる円板上においた液体の自公転運動をあたえた場合の流れについて影響に各種条件で調査する。微量の液滴を静止円板上に設置して回転運動を開始する実験においては、液の軌跡や動き出す臨界条件について液量や設置半径位置、液の種類を変えて調査した。

ウェハ中心部に液体を盛った状態から起動回転を開始し、ある半径位置にチップを想定した障害物を設置して液体の動きを動的に調査した。

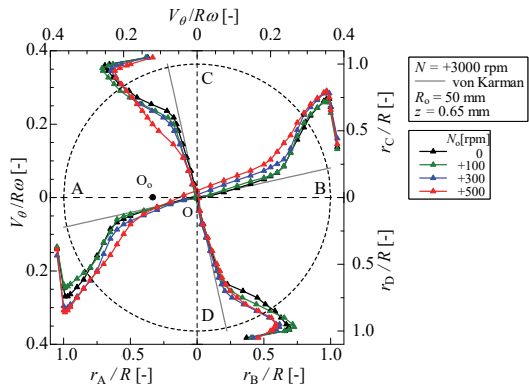
4. 研究成果

平均速度場への影響

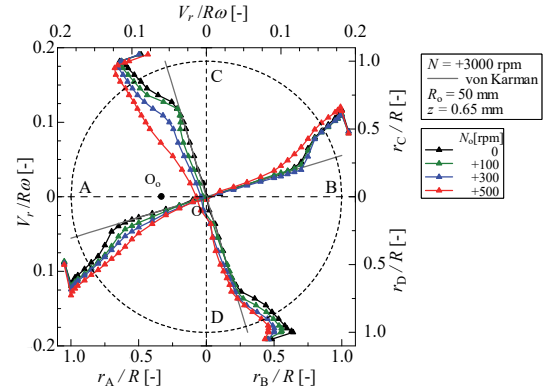
ある公転位相角での円板上の境界層流れについて図2に  $V_\theta$  分布、図3に  $V_r$  分布を示している。自転と公転が同方向に回転している場合を図(a)に、逆方向回転の結果を図(b)にそれぞれ示している。図中の破線の円は円板端を表し、公転中心  $O_o$  は計測断面 AOB 上に位置している。各速度は円板端での周方向速度  $R\omega$  で無次元化されている。ここで、 $\omega$  は円板の自転角速度である。OC 断面 ( $r_c$  方向) と OB 断面 ( $r_B$  方向) での周方向速度は OA, OC 断面であってもそれぞれ  $r_c$  方向(上向き)、 $r_A$  方向(左向き)を正とする。

自転のみの場合、いずれの計測断面においても  $r/R \leq 0.55$  の円板中心付近では自転のみの層流境界層で成り立つ von Karman の理論式と一致している。速度こう配の変化から、 $r/R = 0.55$  付近で層流から遷移が開始し、 $r/R = 0.75$  から乱流へと遷移していることがわかる。

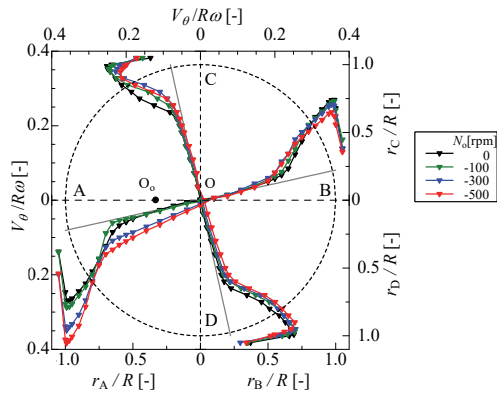
図2(a)に示すように、直線的な速度分布を呈する円板中心付近(層流領域)では、公転速度の



(a) Coinciding orbital and rotational directions

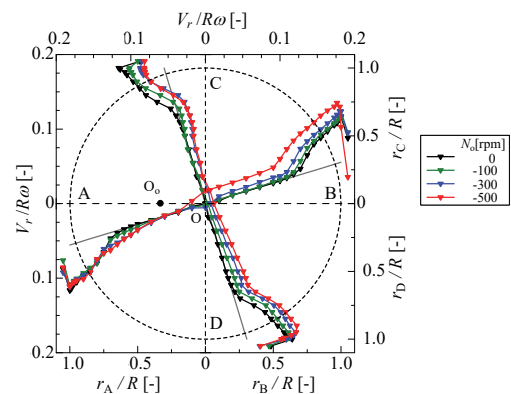


(a) Coinciding orbital and rotational directions



(b) Opposite orbital and rotational directions

Figure 3 Radial distributions of phase averaged tangential velocity



(b) Opposite orbital and rotational directions

Figure 4 Radial distributions of phase averaged radial velocity

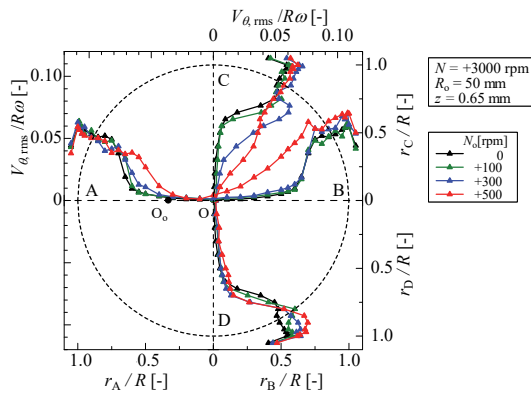
増加に伴い同方向回転において AOB 断面（公転半径方向）では  $V_\theta$  および速度こう配は著しく増加している。OC 断面での速度は公転速度の増加に伴いわずかに増加しているが、COD 断面（公転半径方向に垂直な断面）での速度こう配に公転速度による影響はみられない。図 3(a) の  $V_r$  分布では、円板中心付近で  $V_\theta$  ほどの著しい速度こう配の増加はみられないが、COD 断面では  $V_\theta$  分布でみられなかった  $V_r$  の増速や減速がみられる。これらの速度分布から、旋回中心  $V=0$  となる点は、 $r_A$  と  $r_D$  方向に移動し、OAD 領域 ( $180^\circ < \theta < 270^\circ$  の  $r-\theta$  面) にあることがわかる。また、円板中心から旋回中心までの距離は公転速度が増加するにつれて大きくなっていることがわかる。さらに、遷移域および乱流域への境界層遷移開始位置は OA, OB, OC 断面では平均速度  $V$  の増速に伴い円板の中心側へ移動し、境界層遷移が早まっている。しかしながら、OD 断面では境界層遷移位置が円板の外側に移動している。これは公転運動に伴うせん断流の影響により 3 次元境界層流れの構造が変形し、OD 方向へと流されているのではないかと考えられる。

逆方向回転の場合、図 2(b) に示す  $V_\theta$  分布では直線領域の速度分布は同方向回転の場合と同様に、公転速度の増加に伴い増速される傾向がみられる。OA 断面では著しい増速が観察され、同方向回転の場合とは加速領域の配置が逆になっていることがわかる。また図 3(b) に示す  $V_r$  分布では、 $V_\theta$  で増速がわずかである OB 断面で層流域から乱流域のにわたる広い範囲で増速している。また、OC, OD 断面においても公転速度の増加にしたがって、全域にわたり  $V_r$  は減速、増速され、分布が右側にシフトしている。これらの速度分布から、気流の旋回中心は OBC 領域へ移動していることがわかる。

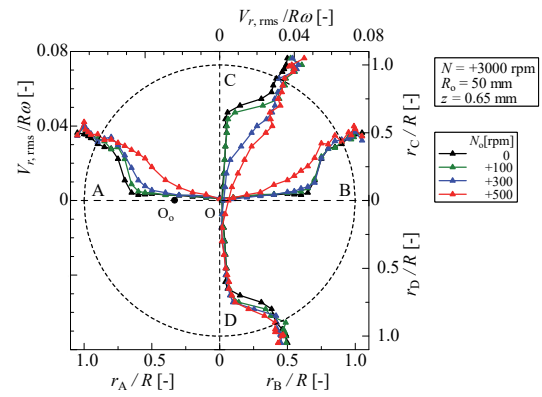
境界層遷移および乱流遷移位置は周方向、半径方向平均速度ともに OA, OB, OD 断面では平均速度  $V$  の増速に伴い円板の中心側へ移動し、境界層遷移が早まっている。しかしながら、OC 断面では境界層遷移位置が円板の外側に移動している。同方向回転の場合とは反対の OC 方向へ気流が流され、旋回中心が OBC 領域に移動しているためである。

### 変動速度への影響

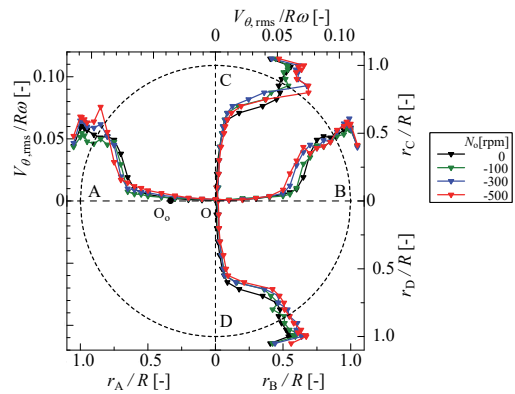
図 4, 5 に図 2, 3 のデータベースとなった各半径位置における周方向速度および半径方向速



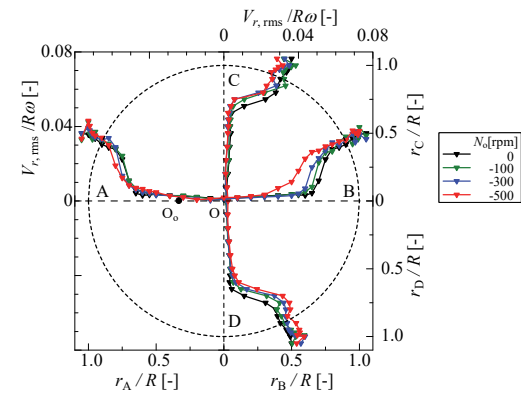
(a) Coinciding orbital and rotational directions



(a) Coinciding orbital and rotational directions



(b) Opposite orbital and rotational directions



(b) Opposite orbital and rotational directions

Figure 4 Radial distributions of turbulence intensity of tangential velocity fluctuations

Figure 5 Radial distributions of turbulence intensity of radial velocity fluctuations

度の乱れ強さ分布を示す。自転のみの場合、乱れ強さは円板中心付近（層流領域）ではほとんどゼロに近いが、平均速度分布と同様、遷移領域で急激に増大している。乱れ強さの半径方向のこう配は乱流域よりも遷移域の方で急になっている。

同方向回転の場合、図 4(a)に示す周方向速度の乱れ強さは、図 2(a)と同様公転運動の影響による境界層遷移位置の移動に伴い急激に増加する領域が移動している。しかしながら、 $N_o = +500\text{rpm}$ でのOB、OC断面に着目すると、平均速度分布からは層流領域と判断できる円板中心付近( $r/R \leq 0.5$ )で乱れ強さの増加がみられる。さらに図 5(a)の半径方向速度の乱れ強さ分布にも同様の傾向がみられる。また、乱流域における乱れ強さはOA断面を除いて公転速度が増加するとともに大きくなっている。

図 5(b)、図 6(b)に逆方向回転の場合の周方向および半径方向速度の乱れ強さ分布を示す。同方向回転の場合と同様、周方向および半径方向のいずれにおいても公転運動の付加による遷移開始位置の移動に伴い乱れ強さが増加しはじめる点移動している。同方向回転でみられた円板中心付近における低周波かく乱による乱れ強さの増加は、逆方向回転では公転速度によらず観察されることなく層流状態を保っている。

### 回転円板状の滴の軌跡

図 6(a)~(f)に自転もしくは公転加速終了時の液の軌跡を示す。図 6(a)は自転のみの起動回転加速を与えた際の液の軌跡である。液は  $r/R = 0.2$  の位置から動き始め、自転中心から放射状に伸長している。円板の回転方向と逆方向に軌跡がわずかに傾いており、コリオリ力の影響を受けていることがわかる。図 6(b),(c)に加速中に自転と公転にわずかな速度差を持たせながら加速させる  $N_o = \pm 20\text{rpm}$ での液の軌跡をそれぞれ示す。公転を付加することによって、自転のみの場合と比較するとどちらも液は大きく湾曲した軌跡を描きながら伸長していること、軌跡の途中から細い軌跡が伸びていることがわかる。(b)と(c)とを比較すると、湾曲した軌跡の曲率半径はおおよそ同程度であるが、その軌跡の方向は逆になっている。(b)は自転速度が公転速度よりも  $20\text{rpm}$  高い状態で加速しているのに対して、(c)は公転速度の方が高い。そのため、自転および公転によって液滴に作用する合成加速度ベクトルの大きさは等しいが、その向きは相対速度の正負によって異なっている。

図 6(d), (e)にそれぞれ大きい相対速度で加速するときの  $N_r = \pm 100\text{rpm}$  での液の軌跡を示している. 図 6(d)の場合は自転速度が  $100\text{rpm}$  に到達してから公転が加速を開始することから, 公転力が小さい間に自転力の影響を大きく受けながら液滴は伸長し, 結果として図 6(a)の自転のみの場合とほとんど同じ軌跡となった. 一方で図 6(e)の場合は公転速度が  $100\text{rpm}$  に到達してから自転が加速を開始する. 公転のみの加速度を与えた場合, 液滴は公転台座が一周する間の時間平均を考えると半径方向に移動するための加速度は受けずその場に留まると考えられる. 以上のことから, 自転が回転開始するまで液滴は移動開始せずに留まった後に自転が回転開始してから移動を開始する. しかしながら, 公転の回転数が卓越した状態で自転による半径方向加速度を受けることから液滴の移動速度は他の条件よりも遅くその軌跡も太くなっている.

#### 障害物後方への液の回り込み

図 7(a)~(e)に液盛りした液が十分に塗り広がった後の結果をそれぞれ示す. 図 5(a)は自転のみの回転加速度を与えた場合の結果である. 円板中心の液膜は自転による遠心力を受け広がっていき, ある時刻から液膜から細い液(フィンガー)が先行して伸長し, 円板全面を濡らしていく. 図 6(a)の結果からも予想できるように障害物後方に塗り残しが発生していることがわかる. 図 7(b), (c)に小さい相対速度  $N_r = \pm 20\text{rpm}$  での結果をそれぞれ示す. 図(b), (c)の結果から予想できるように, 自転のみでの塗られ方と大きく異なり, シール後方へと液が回り込んでいることがわかる. 動画を観察すると, 回り込み方に自転のみのようにシールをよけて伸長した液が公転の影響を受け徐々に周方向に広がっていき障害物後方を塗る場合と, 液が障害物より外側へと伸長する時点で障害物の後方へと液が流れていく場合の 2 種類があった. 自転のみでは交わることのないフィンガーが後者の場合ではクロスすることになり, 一様な成膜を目的とするスピコーティングへの応用を考えると不利であると考えられる.

図 7(d), (e)に相対速度が大きい  $N_r = \pm 100\text{rpm}$  での結果を示す. 図 7(d)は正の相対速度を持つ場合の結果であり, (a)の自転のみの結果と比較して塗られていない面積がわずかに減少しているものの, 障害物後方への液の回り込みは大きくない. 一方, 図 7(e)に示す負の相対速度を与えた場合はシール後方へと液が回り込んでいることがわかる. 図 6(e)の液滴の軌跡では液軌跡の湾曲が見られないことから障害物後方へは回り込まないと考えられるが, 公転速度が卓越

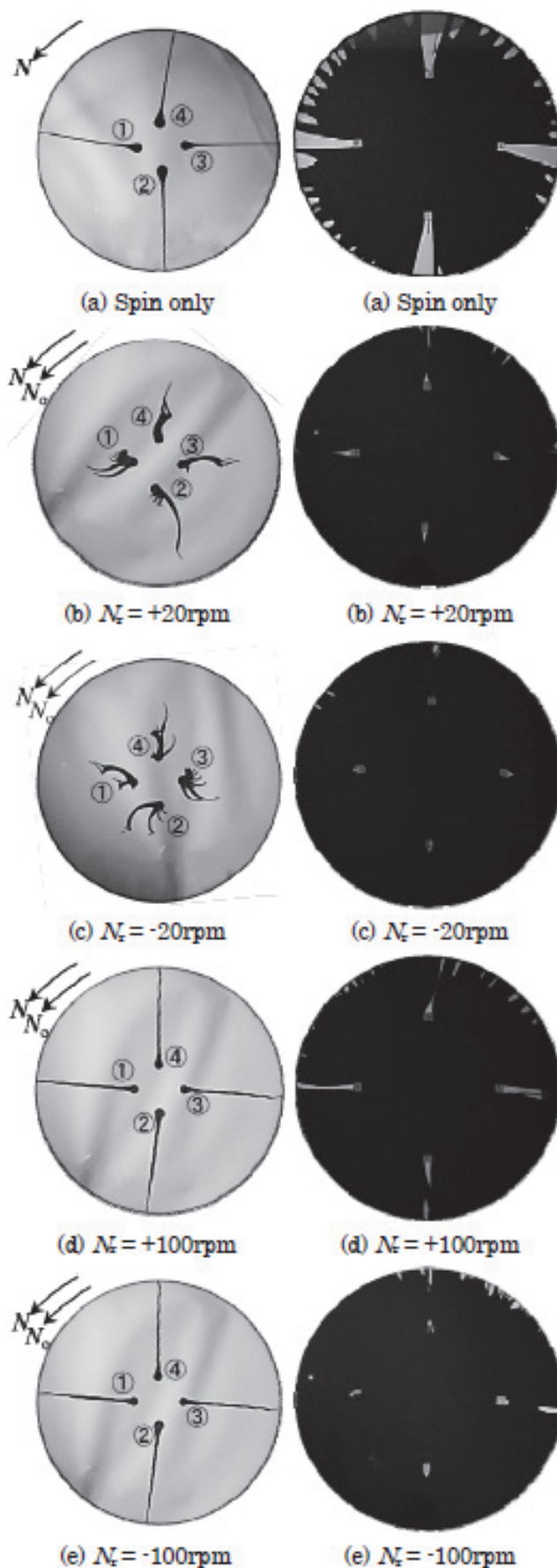


Fig. 6 Trajectory of

Fig. 7 Patterns of piled

しているために液が半径方向に広がっていく速度は他の条件と比較して遅いものの、液盛りの内部で液は周方向の速度成分を持っていることから、液はシールの後方へと回り込んでいく。

## 5. 主な発表論文等

1. Mizue Munekata, Takaomi Utatsu, Hiroyuki Yoshikawa, Yasuhiro Okumura, “Effects of Orbital Motion on the Velocity Field of Boundary Layer Flow over a Rotating Disk”, Open Journal of Fluid Dynamics, 2017, Vol.7, pp.169-177.
2. Mizue Munekata, Takaomi UTATSU, Misaki KAN and Hiroyuki YOSHIKAWA, “Flow Characteristics of a Drop of Liquid on a Starting Rotating Disk under Orbital Motion”, Proceedings of The 13th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, 2017, ISTP27-212.  
〔雑誌論文〕(計 5 件)
1. Mizue Munekata, Takaomi Utatsu, Hiroyuki Yoshikawa, Yasuhiro Okumura, “Effects of Orbital Motion on the Velocity Field of Boundary Layer Flow over a Rotating Disk”, Open Journal of Fluid Dynamics, 2017, Vol.7, pp.169-177.
2. Mizue Munekata, Takaomi UTATSU, Misaki KAN and Hiroyuki YOSHIKAWA, “Flow Characteristics of a Drop of Liquid on a Starting Rotating Disk under Orbital Motion”, Proceedings of The 13th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, 2017, ISTP27-212.
3. Mizue Munekata, Daisuke Yorita, Ulrich Henne, Christian Klein, Gerhard A. Holst, “Investigation of Frequency-domain Lifetime PSP Technique using a Fluorescence Lifetime Imaging (FLIM) Camera”, Proceedings 18th International Symposium on Flow Visualization, ETH Zurich, 2018, <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/279189>.
4. Boleslaw Stasicki, Ulrich Henne, Krzysztof Ludwikowski, Mizue Munekata, Daisuke Yorita, Gerhard A. Holst, A sine-modulated high-intensity UV-LED light source for pressure-sensitive paint applications using fluorescence lifetime imaging technique, Conference Proceedings online, 11051 (0C). SPIE.Digital Library, 2018, <https://doi.org/10.1117/12.2524599>.
5. Daisuke Yorita, Ulrich Henne Christian Klein, Mizue Munekata and Gerhard A. Holst, “Investigation of Image-based Lifetime PSP Measurements with Sinusoidal Excitation Light”, AIAA SciTech Forum - 56th AIAA Aerospace Sciences Meeting (0023), Seiten 1-9. AIAA. AIAA Science and Technology Forum AIAA SciTech 2019, 2019, <https://doi.org/10.2514/6.2019-00233>.  
〔学会発表〕(計 9 件)
1. 歌津貴臣, 奥村康紘, 宗像瑞恵, 吉川浩行, “自公転円板上の境界層流れの速度場に与える公転の影響”, 日本機械学会 2016 年度年次大会, G0500605, 2016.
2. Takaomi UTATSU, Mizue MUNEKATA, Hiroyuki YOSHIKAWA, Yasuhiro OKUMURA, “Effects of Orbital Motion on the Velocity Field of Boundary layer flow over a Rotating Disk”, The 27th International Symposium on Transport Phenomena, 2016.
3. 歌津貴臣, 菅未沙希, 宗像瑞恵, 吉川浩行, “自公転円板上に付着した微小液体の挙動に関する基礎研究”, 日本機械学会九州支部講演論文集 (第 70 期総会講演会), No.178-1, pp.87-88, 2017.
4. Mizue Munekata, Takaomi UTATSU, Misaki KAN and Hiroyuki YOSHIKAWA, “Flow Characteristics of a Drop of Liquid on a Starting Rotating Disk under Orbital Motion”, Proceedings of the 13th International Symposium on Experimental Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, ISAI13-S-0117, 2017.
5. Mizue Munekata, “Estimation of New CMOS Image Sensor Camera PCO.FLIM for PSP Lifetime Imaging”, 6th German-Japanese Joint Seminar (High-speed Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research), Universität Hohenheim, Stuttgart, Germany, September 25 – 27, 2017.
6. Mizue Munekata, Yorita Daisuke, U. Henne, C. Klein, G. A. Holst, Investigation of frequency-domain lifetime PSP technique using a Fluorescence Lifetime Imaging (FLIM) camera, 18th International Symposium on Flow Visualization, Zurich, Switzerland, June 26-29, 2018.
7. Boleslaw Stasicki, Ulrich Henne, Christian Klein, Krzysztof Ludwikowski, Mizue Munekata, Daisuke Yorita, Gerhard A. Holst, A Sine-Modulated High-Intensity UV-LED Light Source for Pressure-Sensitive Paint (PSP) Applications using Fluorescence Lifetime Imaging (FLIM) technique, The 32nd International Congress on High-speed Imaging and Photonics, October 9-12, 2018, Twente, Netherlands.
8. Daisuke Yorita, Ulrich Henne Christian Klein, Mizue Munekata and Gerhard A. Holst, “Investigation of Image-based Lifetime PSP Measurements with Sinusoidal Excitation Light”, AIAA SciTech Forum - 56th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2019, San Diego, California, USA.
9. 宗像瑞恵, 依田大輔, Ulrich Henne, Christian Klein, Gerhard A. Holst, 藤田位朔, 住山遥, 吉川浩行, 変調光を用いた FLIM-PSP 計測における感度特性, 第 14 回学際領域における分子イメージングフォーラム, 調布, 2019.

## 6. 研究組織

### (1) 研究協力者

研究協力者氏名：吉川 浩行

ローマ字氏名：YOSHIKAWA HIROYUKI