

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560202

研究課題名(和文) 公転を利用した自転円板上の境界層遷移の制御に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Control of Boundary Layer Transition on a Rotating Disk using Orbital Motion

研究代表者

宗像 瑞恵 (Munekata, Mizue)

熊本大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：30264279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では公転を伴う自転円板上に形成される境界層流れを明らかにし、その自転円板上の境界層流れのパターンを体系化し、境界層遷移を制御することを目的としている。自転円板上の境界層流れの油膜法による可視化、スモークワイヤ法による動的可視化および熱線流速計による速度場計測により、円板全体が層流域となる低レイノルズ数の流れ場から円板外周部まで乱流域となる高レイノルズ数における流れ場まで、円板直径、公転半径、公転速度および公転運動の方向などの影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The objective in this study is to investigate the boundary layer flow, and to control the boundary layer transition on the rotating disk by systematizing the effects of the orbital motion on the boundary layer flow. The effects of a disk diameter, orbital speed and orbital direction on the boundary layer flow on a rotating disk under orbital motion are found from the flow of low Reynolds number(laminar flow) to the high Reynolds number(turbulent flow), by the flow visualization using a oil-film technique, the dynamically flow visualization using a smoke-wire technique, and the velocity measurements using a hot-wire anemometer.

研究分野：流体工学

キーワード：流体計測 境界層遷移 回転円板 境界層制御

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る。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、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抑制する技術が必要とされている。

自転円板上の流れについては数多く研究されてきたが、公転を伴う回転円板上の流れは明らかになっていないため、本研究には研究対象とする流れ場を明らかにすることに学術的価値がある上、半導体製造分野での活用が期待されている。

これまでに研究代表者は自転のみの回転円板上における境界層遷移に及ぼす物理的要因として、円板の表面粗さ、半径方向気流（外部流）、回転加速度、液膜流などの影響について調査した。これらの結果から、境界層遷移を促進する要因に気流の半径方向速度を増加させることが考えられた。そこで、逆回転の公転を与えることによって、周方向の相対速度が減少し、半径方向速度を減少させることができれば境界層遷移を抑制することができるのではないかと予想した。しかしながら、予想に反し、逆回転のみならず、自転と同じ方向の公転を与えてもある条件下で境界層遷移が抑制されることを可視化実験により確認している。そこで、自公転円板上で境界層内の流れ場が時空間的にある範囲で周期的に変動することによって、境界層遷移を抑制しているのではないかという仮説をたて、本構想に至った。

2. 研究の目的

三次元回転系円板上の境界層流れについて、円板直径、公転半径、回転速度、回転速度のゆらぎ、回転軸角度などの影響を明らかにし、公転を伴う自転円板上に形成される境界層流れのパターンを体系化し、境界層遷移を制御することを目的としている。つまり、回転による力（主に遠心力）の時間的・空間的分布が境界層遷移に与える影響を明らかにする。回転円板上の境界層遷移を抑制できる円板の最適運動条件が明らかになれば、半導体製造分野で適用されている回転塗布法に応用して、次世代型大口径ウェハに対応するための技術開発に貢献できる。

3. 研究の方法

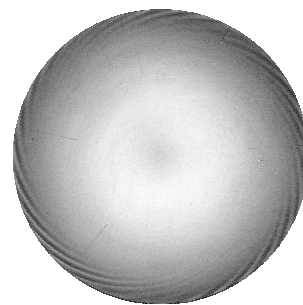
自作した自公転円板装置（直径 300mm 以下の円板を搭載）を改良して、まずは、公転半

径を 0mm までできるように、アイドラー軸を介した円板の自転運動を可能とする装置に改良し、熱線プローブが自転円板上を任意に移動できる円板運動と同期する熱線計測システムを構築する。円板直径、公転半径、自転速度および方向、公転速度および方向を変化させ、熱線流速計で回転円板上の気流の境界層内の速度を熱線流速計にて自公転運動と同期しながら計測する。また、それらのすべての条件において、油膜法による可視化を行い、いくつか特徴ある条件において、スモークワイヤ法による煙可視化により自公転円板上の境界層流れの動的可視化を実施し、境界層流れの構造を調査する。

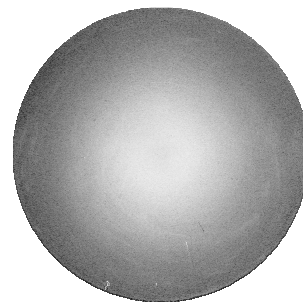
4. 研究成果

(1) 油膜法による可視化

直径 200mm と 300mm の円板において、自公転円板上の境界層流れに円板に定在する渦が存在しているかどうかを油膜法により、調査した。図 1 のように、自転のみでは外周部に遷移渦による 30 本の筋が転写されるが、公転運動の付加により、遷移渦の転写が抑制される。



(a) $N_0 = 0$ rpm (自転のみ)



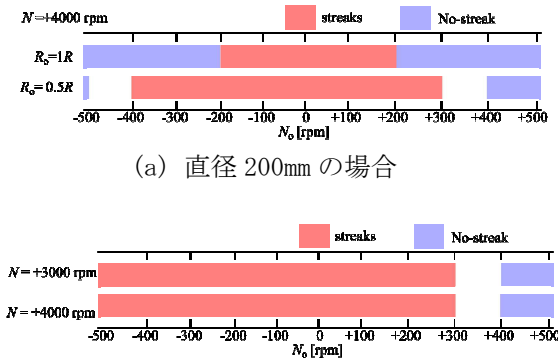
(b) 公転速度 $N_0 = -200$ rpm

図 1 油膜法による可視化例 (直径 200mm 円板, 公転半径 100mm, 自転速度 +4000rpm)

油膜法による筋の転写の有無についてまとめたものを図 2 に示す。直径 200mm ($2R$) 円板の場合、公転半径 100mm ($1R$) の場合、自転速度 4000rpm に対して、公転方向によらず、速度の大きさが 200rpm 以上の公転運動を付加すれば、遷移渦による筋の転写が抑制された。公転半径 50mm ($0.5R$) の場合、自転速度 +4000rpm に対して、自転と同方向の公転運動では +400rpm 以上で、自転と逆方向の公転運動では -500rpm で筋の転写が抑制された。

また、直径 300mm 円板の場合、公転半径 50mm (0.33R) で自転速度 +3000rpm, +4000rpm においていずれも、公転運動の方向によらず、同方向の +400rpm 以上の公転運動の付加によって、遷移渦の転写が抑制されたが、逆方向の公転運動の付加では -500rpm までの公転速度では遷移渦の転写が抑制されなかった。

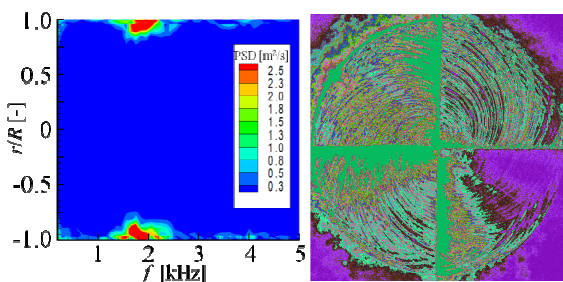
このように、公転半径が大きいほど、公転速度が大きいほど、遷移渦の転写の抑制には効果的であることを明らかにした。また、自転運動の方向とは逆方向の公転運動のほうがより効果的であることも明らかにした。



(a) 直径 200mm の場合
(b) 直径 300mm の場合 ($R_o = 50\text{mm} = 0.33R$)
図 2 公転運動付加による筋の転写への影響

(2) 自公転円板上の遷移渦の挙動

図 3 に、(a)自転のみの場合の周方向速度変動の時間平均パワースペクトル密度(PSD)のコンタマップおよび(b)スモークワイヤ法による可視化動画の一画像を示す。図(b)の円板外縁付近にみられる筋が遷移渦によるもので、全周に渡って等間隔に約 30 本観察できる。図(a)のコンタマップの縦軸は、(b)の縦に走るライン(ニコム線)に対応し、 $r/R = -1, +1$ 付近の 2kHz 弱のピークはこの遷移渦によるものである。

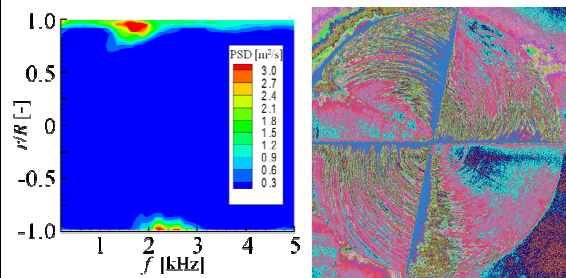


(a) PSD (V_θ) コンタマップ (b) 可視化画像
図 3 周方向速度変動の時間平均パワースペクトル密度の半径方向分布と可視化画像 ($N = +4000\text{rpm}$)

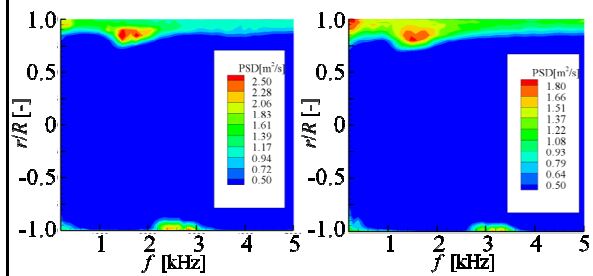
図 4 に、自転速度 $N = +4000\text{rpm}$ 、公転速度 $N_o = -100\text{rpm}$ 、公転半径 $R_o = 100\text{mm} = 1R$ の場合の(a)PSD コンタマップおよび(b)可視化動画の一画像を示す。図(b)の画像から、自転のみと比べて渦の間隔が外半径側(画像上側)では疎に、内半径側では間隔が密になっ

ていることがわかる。図(a)のコンタマップにおいても、間隔の疎密に応じてピーク周波数のシフトが起きている。

図 5 に、 $R_o = 0.5R$ 、逆方向回転の場合の PSD コンタマップを示す。公転速度が速いほど、このピークはシフトしている。このように、この現象は公転半径や公転の回転方向によらず発生するが、同方向回転の場合は内半径と外半径で密疎が逆転する。このとき、遷移渦は外半径側と内半径側を周回するたびに、その間隔を時間的に伸縮させていると推測でき、油膜法での転写筋の薄れや筋の消失の要因の一つとして、このように円板に対して遷移渦が定在しないことが考えられる。



(a) PSD (V_θ) コンタマップ (b) 可視化画像
図 4 公転運動の遷移渦への影響 ($N = +4000\text{rpm}$, $N_o = -100\text{rpm}$, $R_o = 1R$)

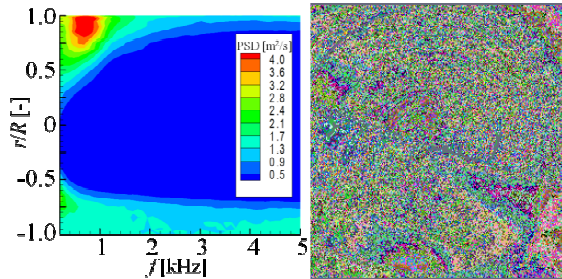


(a) $N_o = -300\text{rpm}$ (b) $N_o = -500\text{rpm}$
図 5 逆方向回転における PSD (V_θ) コンタマップ ($N = +4000\text{rpm}$, $N_o < 0\text{rpm}$, $R_o = 0.5R$)

(3) 公転により発生する進行波かく乱の影響

図 6 に、 $N = +4000\text{rpm}$, $N_o = -300\text{rpm}$, $R_o = 1R$ の場合の(a)PSD コンタマップおよび(b)可視化画像を示す。図(a)のコンタマップは、外半径側で強い低周波ピークが存在する。このときの図(b)可視化画像では、低周波ピークが存在する外半径側にトレーサが集合した同心円状の筋が数本観察できる。下流側に流れるにつれトレーサが収束していることから、気流に筋状に発達する流れ(速度変動)が発生していると考えられる。可視化動画や二本の熱線プローブを使用した速度変動の半径方向移動速度の計測結果から、この筋が低周波ピークの原因であると推察され、この低周波かく乱は円板に対して定在性を持たず、半径方向へ移動していることを明らかにした。この低周波かく乱は直径 200mm 円板で

の実験では、遷移渦が発生しなくなる公転速度において発生し、可視化実験において、低周波かく乱と遷移渦が同時に観察されることはなかった。このことから、低周波かく乱が発生することにより、遷移渦の発生が抑制され、油膜法での転写筋の消失に寄与していると考えられる。

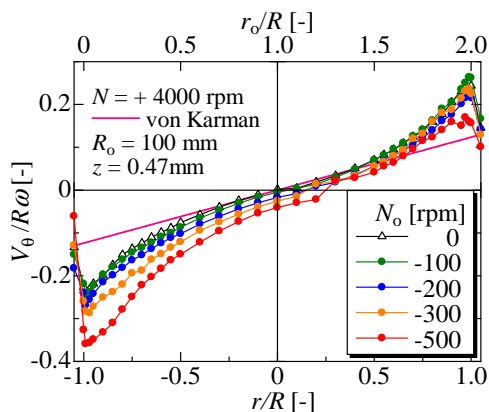


(a) PSD (V_0) コンタマップ (b) 可視化画像
図6 進行する低周波かく乱の検出
($N = +4000\text{rpm}$, $N_0 = +300\text{rpm}$, $R_0 = 1R$)

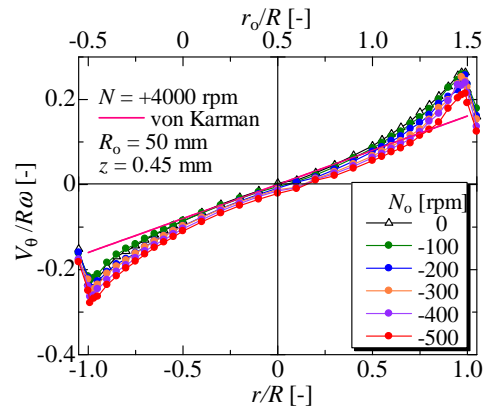
(4) HWA による位相平均速度場計測

図7に、二つの公転半径((a) $R_0 = 1R$, (b) $R_0 = 0.5R$)についての、逆方向回転時の各公転速度での周方向平均流速 V_0 の半径方向分布を示す。横軸に無次元半径位置をとり、縦軸は平均速度を自転の周速度で無次元化している。いずれの公転半径も、公転速度の増加に伴い、自・公転が逆向きとなる外半径側では自転のみの場合より減速、同じ向きとなる内半径側では増速されており、公転半径が小さい図(b)の方が、公転による速度変化が小さい。加えて、特に内半径側で公転半径による変化幅に違いがある。大きく増速されている図(a)の $N_0 = -300\text{rpm}$, -500rpm では強い低周波かく乱が発生するのに対し、図(b)の $R_0 = 0.5R$ のときは顕著ではない。低周波かく乱の周方向速度は大きく、これにより V_0 が増加したと考えられる。

このほか、同方向回転の場合や半径方向平均流速を計測した結果、全体的に公転半径が小さいほうが、公転の影響が小さくなることを明らかにした。



(a) 公転半径 $R_0 = 100\text{mm} = 1R$



(b) 公転半径 $R_0 = 50\text{mm} = 0.5R$

図7 逆方向回転時における周方向速度の半径方向分布

(5) 境界層遷移, 乱流遷移および乱流域への影響

境界層遷移および乱流遷移位置に与える公転の影響は、周方向および半径方向平均速度の半径方向分布の結果より、同方向回転の場合、外半径側で遷移は早まるが、内半径側で遅れる傾向がある。一方、逆方向回転の場合、その逆の傾向がみられることを明らかにした。

直径 300mm 円板の自転速度 $N = +4000\text{rpm}$ の乱流域に与える公転の影響は、図8にみられるように、自転のみでは、6.5kHz 付近に速度変動のパワー密度の高い帯域が、逆方向回転の場合、高周波側にシフトすることを示した。

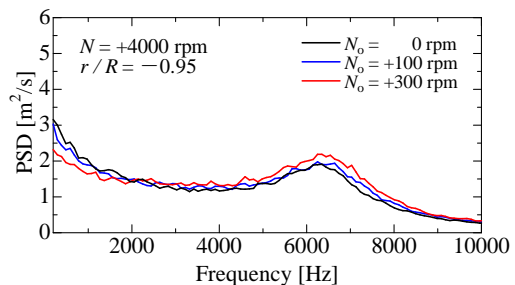


図8 乱流域の周方向速度変動の周波数特性 (公転半径 $R_0 = 50\text{mm} = 0.33R$)

<参考文献>

- ① Y. Kohama, Acta Mechanica, 50(1984), pp.193-199.
- ② H. Schlichting, MCGRAW-HILL, pp.193-199, (1955)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① Mizue Munekata, Keiichiro Kubo, Hiroyuki Yoshikawa, Visualization of Traveling Vortices in the Boundary Layer on a Rotating Disk under Orbital Motion, Open Journal of Fluid Dynamics, Vol.5, pp.17-25, 2015. 査

読有

DOI: 10.4236/ojfd.2015.51003

- ②奥村康紘, 藤川晋之介, 宗像瑞恵, 吉川浩行, 工藤和幸, “高レイノルズ数における自公転円板上の境界層流れに与える公転の影響”, 日本機械学会九州支部講演論文集 (第 68 期総会講演会), No.158-1, pp.153-154, 2015. 査読無
- ③高木 悠, 石澤 紳太郎, 宗像 瑞恵, 吉川 浩行, 栗島 啓聡, “スピニングコート内の回転円板上を流下する液体の飛散特性に及ぼす濡れ性の影響”, 日本機械学会九州支部講演論文集 (第 68 期総会講演会), No.158-1, pp.163-164, 2015. 査読無
- ④奥村康紘, 宗像瑞恵, 久保慶一郎, 藤川晋之介, 吉川浩行, 自公転円板上の境界層流れに与える公転の影響 (円板直径の影響), 日本流体力学会年会講演論文, No.100, 2014, pp.1-4(USB). 査読無
- ⑤高木悠, 平田敏大, 宗像瑞恵, 吉川浩行, 栗島啓聡, スピニングコート内における回転円板から飛散する液滴の挙動計測 (円板エッジ形状の影響), 日本機械学会九州支部大分講演会論文, 4D3, 2014, pp.1-2(USB). 査読無
- ⑥Mizue Munekata, Naoya Jobi, Keiichiro Kubo, Hiroyuki Yoshikawa, Characteristics of Transient Vortices in the Boundary Layer on a Rotating Disk under Orbital Motion, Journal of Thermal Science Vol.22, No.6, pp.600-605, 2013. 査読有
DOI: 10.1007/s11630-013-0668-0
- ⑦城尾直哉, 久保慶一郎, 宗像瑞恵, 吉川浩行, 公転を伴う回転円板上の境界層遷移とその流れ構造に関する研究, 日本機械学会九州支部第 66 期総会講演会講演論文集, No.138-1, pp.221-222, 2013. 査読無
- ⑧大瀬戸太一, 宗像瑞恵, 吉川浩行, 小野光太, 栗島啓聡, スピニングコート内の回転円板上を流下する液体の飛散特性に及ぼす円板エッジ形状の影響, 日本機械学会九州支部第 66 期総会講演会講演論文集, No.138-1, pp.219-220, 2013. 査読無
- ⑨Mizue Munekata, Naoya Jobi, Koichi Ikebe, Hiroyuki Yoshikawa, Effects of Orbital Motion on the Boundary Layer Flow on a Spinning Disk, Open Journal of Fluid Dynamics, Vol.2, pp.181-186, 2012. 査読有
DOI: 10.4236/ojfd.2012.24A020

[学会発表] (計 8 件)

- ① Yasuhiro Okumura, Shinnosuke Fujikawa, Mizue Munekata, Hiroyuki Yoshikawa, Visualization of the Boundary Layer Flow over a Rotating Disk under Orbital Motion, 2014 International Symposium on Nano Science and Technology, 2014 年 10 月 17 日, 台南 (台湾)
- ② Yu Takaki, Toshihiro Hirata, Mizue Munekata, Hiroyuki Yoshikawa, Hiroaki KURISHIMA, Measurements of Scattering Behavior of Droplets Spun Off from Rotating Disk in the Spin Coater (Effects of Disk Edge Profile), 2014 International Symposium on Nano Science and Technology, 2014 年 10 月 17 日, 台南 (台湾)
- ③ Mizue Munekata, Keiichiro Kubo, Hiroyuki Yoshikawa, Visualization of Traveling Vortices in the Boundary Layer on a Rotating Disk under Orbital Motion, The 5th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science 2014, 2014 年 9 月 26 日, 長崎ハウスステンボス (長崎県・佐世保市)
- ④ 久保慶一郎, 宗像瑞恵, 吉川浩行, 回転円板境界層の遷移領域における遷移渦および低周波かく乱の挙動に与える公転の影響, 日本流体力学会中国・四国・九州支部平成 25 年度支部講演会 (西日本乱流研究会創立 30 周年シンポジウム), 2013 年 10 月 12 日, 山口大学 (山口県・山口市)
- ⑤ Mizue Munekata, Naoya Jobi, Keiichiro Kubo, Hiroyuki Yoshikawa, Characteristics of Transient Vortices in the Boundary Layer on a Spinning Disk with the Addition of Orbital Motion, the 11th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, 2013 年 5 月 9 日, 深セン (中国)
- ⑥ Mizue Munekata, Taichi Oseto, Hiroaki Kurishima, Hiroyuki Yoshikawa, Effect of Disk Edge Profile on Scattering Characteristics of Liquid Droplets Splashed from Spinning Disk, The 11th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, 2013 年 5 月 9 日, 深セン (中国)
- ⑦ Mizue Munekata, Naoya Jobi, Koichi Ikebe, Hiroyuki Yoshikawa, Effects of Orbital Motion on the Boundary Layer Flow on a Spinning Disk, The 4th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, 2012 年 10 月 16 日, 釜山 (韓国)
- ⑧ 宗像瑞恵, 城尾直哉, 久保慶一郎, 奥村康弘, 吉川浩行, 自公転円板上の境界層流れ

に与える公転の影響，第9回日本流体力学会中四国・九州支部講演会，2012年8月30日，岡山理科大学（岡山県・岡山市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宗像 瑞恵 (MUNEKATA, Mizue)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：30204279

(2) 連携研究者

吉川 浩行 (YOSHIKAWA, Hiroyuki)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：40221668