

## 回転加速度がウェーハ上の遷移渦の初生に与える影響\*

木村 誠一<sup>\*1</sup>, 吉川 浩行<sup>\*1</sup>, 宗像 瑞恵<sup>\*1</sup>  
栗島 啓聡<sup>\*2</sup>, 山本 壮平<sup>\*3</sup>, 大庭 英樹<sup>\*4</sup>Effect of Spin-up Acceleration on Onset of  
Transient Vortices over Rotating WaferSeiichi KIMURA, Hiroyuki YOSHIKAWA<sup>\*5</sup>, Mizue MUNEKATA,  
Hiroaki KURISHIMA, Sohei YAMAMOTO and Hideki OHBA<sup>\*5</sup> Department of Advanced Mechanical Systems, Kumamoto University,  
2-39-1 Kurokami, Kumamoto shi, Kumamoto, 860-8555 Japan

The purpose of this study is to make clear the effect of the spin-up acceleration on the boundary layer over the rotating wafer surface. In this paper, onset and breakdown of transient vortices are investigated because transient vortices interfere with the formation of uniform thin film. The air flow fields on the wafer surface are measured by a hot wire anemometer. The onset of transient vortices over the rotating wafer is detected by the spectra of the tangential fluctuating velocity. It is found that transient vortices appear at higher Reynolds number in the case of higher spin-up acceleration of the wafer. On the other hand, transient vortices break down at a certain Reynolds number and the transition of the boundary layer to the turbulent state is independent of the spin up acceleration.

**Key Words:** Boundary Layer, Flow Instability, Flow Visualization, Transition, Transient Vortices, Spin Coating

## 1. 緒 言

近年、精密機器製品の高精度化、ICの微細化に伴い、半導体製造工程の一つであるフォトレジストの塗布には、回転塗布法（スピニング）と呼ばれる方法が広く用いられている。この方法によりウェーハ表面に厚さ0.5 μm以下のレジスト膜が形成されている。一般的にウェーハの回転速度が速いほど薄いレジスト膜が形成されるが、高速で回転する場合、ウェーハの周縁付近にEkman spiralと呼ばれる筋が約30本出現し、一様な塗布を妨げることが知られている<sup>(1)</sup>。レジスト膜の厚さにムラがあると、膜に回路のパターンを正確に焼き付けることが困難となるため、製造現場では大きな問題となっている。これらの筋はウェーハ上の空気の速度境界層が層流から遷移することで発生した遷移渦が、蒸発過程で膜に転写されることにより生じるものである。遷移渦に関する研究は回転円板上の気流

の境界層流れとして工学的に大変重要であり、多くの研究がなされてきた<sup>(2)-(9)</sup>。Malikら<sup>(2),(3)</sup>は線形安定解析と熱線流速計を用いた流速計測より臨界レイノルズ数 $Re_c = 8.2 \times 10^4$ 、遷移レイノルズ数 $Re_t = 3.14 \times 10^5$ を得ている。また、Kobayashiら<sup>(4)</sup>は境界層速度分布計測と気流の可視化実験より、遷移渦の本数を31~32本、 $Re_c = 8.8 \times 10^4$ 、 $Re_t = 3.2 \times 10^5$ と導き出している。これらの研究<sup>(2)-(9)</sup>は円板が定常回転する場合に発生する遷移渦に関するものがほとんどである。しかしながら、スピニングでは円板の回転を加速しながら行われることが一般的である。そこで、回転加速中の遷移渦の初生に着目して研究を行った。

本研究ではまず、高速度カメラを用いた可視化実験により遷移渦の初生を捉えることから始めた。その後、熱線流速計を用い、回転開始から定常回転までの周方向速度成分の時系列データを取得し、遷移渦の発生・崩壊に及ぼす加速度の影響について調査した。遷移渦の $Re_c$ および $Re_t$ の特定は、周方向速度の変動成分を周波数解析することにより行った。なお、空気との摩擦により、液膜表面に誘起される流れは極めて小さく、静止液膜の有無による境界層速度分布の相違が小さい

\* 原稿受付 2008年2月4日。

<sup>\*1</sup> 正員、熊本大学大学院自然科学研究科(〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)。<sup>\*2</sup> 東京エレクトロン九州(株)(〒861-1116 合志市福原1-1)。<sup>\*3</sup> 学生員、熊本大学大学院自然科学研究科。<sup>\*4</sup> 正員、フェロー、熊本大学大学院自然科学研究科。

E-mail: yoshi@gpo.kumamoto-u.ac.jp

ことより、両実験ともに円板上に液膜がない状態で実験を行った。

## 2. 記号

- $a$  : 回転加速度 [rpm/s]
- $E_{\theta}(f)$  :  $v_{\theta}$ の変動成分のパワースペクトル [ $m^2/s$ ]
- $f$  : 周波数 [Hz]
- $f_{peak}$  : パワースペクトルの卓越周波数 [Hz]
- $N$  : 回転速度 [rpm]
- $N_{max}$  : 最終回転速度 [rpm]
- $R$  : ディスク半径 (=0.15 m) [m]
- $r$  : 半径位置 [m]
- $r_c$  : 遷移渦の発生半径位置 [m]
- $Re$  : レイノルズ数 ( $=r^2\omega/\nu$ ) [-]
- $Re_c$  : 遷移渦の初生レイノルズ数 [-]
- $Re_t$  : 乱流への遷移レイノルズ数 [-]
- $t$  : 回転開始からの時間 [s]
- $U_c$  : 遷移渦発生位置の半径内向き移動速度 [m/s]
- $V_M$  : モータドライバ電圧 [V]
- $v_{\theta}$  : 周方向速度 [m/s]
- $z$  : 円板表面からの計測高さ [m]
- $\delta$  : 式 (2) に示す境界層厚さ [m]
- $\nu$  : 空気の動粘度 [ $m^2/s$ ]
- $\omega$  : 角速度 [rad/s]
- $\omega_{max}$  : 最終角速度 [rad/s]

## 3. 実験装置および方法

**3・1 装置概要** 本研究で可視化実験に使用した装置を図1に示す。各装置はスピニング装置および計測補助機器により構成され、これらは安全のため透明アクリル板で囲まれている。回転速度の設定、ウェーハの上下移動、I型熱線プローブのトラバース操作を含め、装置全体の動作はコントロールパネルで制御する。装置天井部は大気開放となっている。ウェーハのぶれによる誤差を小さくするためにチャックと一体になった直径12 inch (0.3 m) のアルミ円板を使用し、さらに良好な撮影を行うために円板表面を黒色化した。

気流速度測定に使用した装置を図2に示す。各装置は可視化実験とほぼ同様である。本実験では熱線流速計 (KANOMAX SYSTEM 7114) を使用し、円板上に発達する空気の境界層の周方向速度を測定した。また、この装置ではモータドライバにより回転加速度を設定し、その電圧から円板回転開始時刻を検出した。さらに、円板表面からI型熱線プローブまでの位置調整のために顕微鏡を使用した。

### 3・2 注入トレーサ法による可視化実験

本実験ではドライアイスから発生するミストをトレー

サ粒子とし、高速度カメラ (PHOTRON FASTCAM ultima1024) により斜め上方から円板上の気流の様子を撮影した。実験条件を表1に示す。予備実験で遷移渦が視認できた  $0.7 \leq r/R \leq 1.0$  を撮影領域に設定した。静止したアルミ円板上にトレーサ粒子を十分供給した後、 $N_{max} = 3000$  rpm まで加速させる間、円板上に現れる遷移渦の挙動を撮影した。なお、本実験で使用したドライアイスミストは回転円板上の速度境界層に影響を与えないことが実験<sup>(10)</sup>で確認されている。

回転開始時刻は、目印として円板に付着させたアルミテープの移動開始の時刻とした。撮影終了後、目視

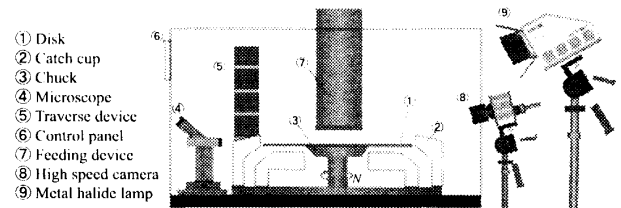


Fig. 1 Schematic view of experimental setup for visualization

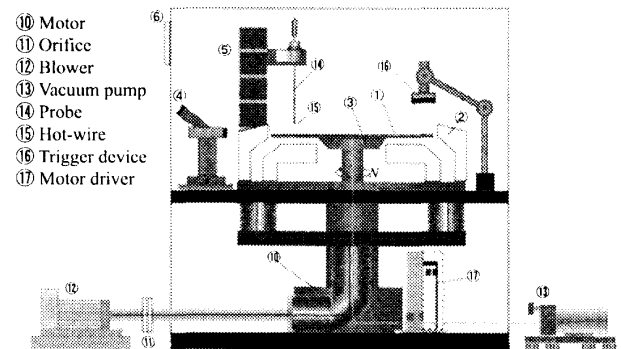


Fig. 2 Schematic view of experimental setup for velocity measurement

Table 1 Experimental condition (visualization)

$N_{max}$ [rpm]	3000
$a$ [rpm/s]	111 / 333 / 1000
Frame rate [fps]	1000
Shutter speed [Hz]	4000
Tracer particle	CO <sub>2</sub>

Table 2 Experimental condition (velocity measurement)

$N_{max}$ [rpm]	3000	
$a$ [rpm/s]	333 / 500 / 1000	2500 / 5000
$\delta$ [mm]	0.219	
$z$ [mm]	0.34 (1.6 $\delta$ )	0.46 (2.1 $\delta$ )
Sampling Frequency [kHz]	20	100
LPF [kHz]	5	

により遷移渦の発生時間および遷移渦が最も内側に発生した半径位置  $r_c$  を特定した。ここで、各半径位置に遷移渦が発生した時間をその半径位置での発生時間とし、 $Re_c$  を次式で定義する。

$$Re_c = \frac{r_c^2 \cdot \omega}{\nu} \quad (1)$$

**3・3 周方向速度計測** 周方向速度成分の時系列を取得し、遷移渦の初生を捉える実験条件を表 2 に示す。この条件下で、1 型熱線プローブの円板表面からの計測高さは、式 (2) で示される境界層厚さを指標とする回転円板上層流境界層速度分布<sup>(11)</sup>と照合することで速度測定後に特定した。

$$\delta = \sqrt{\frac{\nu}{\omega_{\max}}} \quad (2)$$

$N = 1000 \sim 3000$  rpm で遷移渦が存在すると考えられる  $0.4 \leq r/R \leq 0.9$  の 6 点に熱線プローブを置き、5 kHz のローパスフィルタを介した熱線流速計からの電圧値と、モータドライバから出力された円板の回転速度に応じた電圧値を取得した。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4・1 注入トレーサ法を用いた可視化実験

図 3 に可視化により得られた画像を示す。円板は時計まわりに回転し、回転加速度は  $a = 1000$  rpm/s であり、それぞれ  $t = 1.28, 1.68$  s の画像である。わかりやすいように、その時刻で確認された遷移渦を図中に実線で表している。図 3 (a) では円板エッジ部から  $r/R = 0.85$  まで遷移渦が存在している。また、図 3 (b) では  $r/R = 0.75$  まで遷移渦が到達している。 $a = 1000$  rpm/s では  $N_{\max} = 3000$  rpm に達しても、 $r/R \leq 0.7$  の領域で遷移渦を視認できなかった。また、図 3(a) から 0.4 秒後の図 3(b) では  $r/R > 0.9$  でトレーサ粒子が拡散していることから、その領域で境界層は乱流状態に遷移していることが推測される。ここで、図 3 (a) を例にすると、 $r_c/R = 0.85$ 、 $a = 1000$  rpm/s、 $t = 1.28$  s から  $N = 1280$  rpm、したがって  $Re_c = 1.4 \times 10^5$  と算出される。これらの計算を踏まえ、図 4 に可視化により得られた  $Re_c$  を示す。図中には定常回転時 ( $a = 0$  rpm/s) に Kobayashi ら<sup>(4)</sup>が気流計測によって得た  $Re_c = 8.8 \times 10^4$ 、Malik ら<sup>(3)</sup>が線形安定性解析によって得た  $Re_c = 8.2 \times 10^4$  をあわせて示している。図より回転加速度が増すとともに、 $Re_c$  が高くなる傾向が

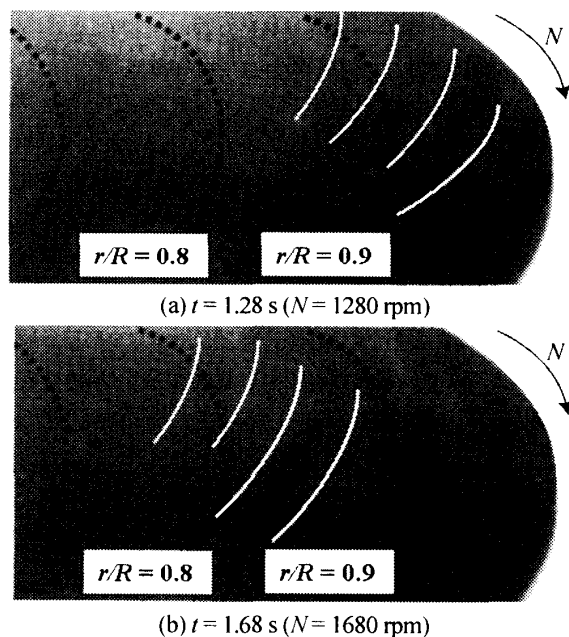


Fig. 3 Photographs of transient vortices ( $a = 1000$  rpm/s)

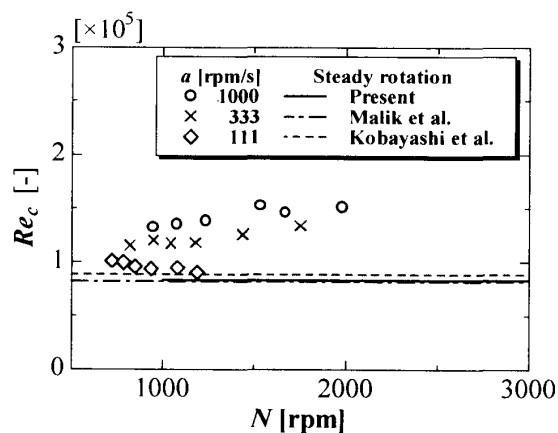


Fig. 4 Relation between  $Re_c$  and  $N$  in accelerating (visualization)

明らかである。また、いずれの回転加速度でも円板が定常で回転している場合の  $Re_c$ <sup>(3),(4)</sup>より高いことがわかる。以上より、円板の回転加速度が遷移渦の初生に影響を及ぼしていることは明らかである。

##### 4・2 速度のパワースペクトルに及ぼす回転加速度の影響

4.1 節では、円板上の気流を可視化することで円板が回転加速している場合の臨界レイノルズ数を求めた。しかしながら、可視化実験で視認できる遷移渦は、トレーサ粒子が十分に集まるほど大きく強い渦領域に限定されると考えられる。そこで、 $Re_c$  および  $Re_j$  をより詳細に特定するために、円板上に発達する境界層の周方向速度を周波数解析し、そのパワースペクトルのピーク周波数の時間変化を調べた。

図5に  $a = 500 \text{ rpm/s}$ ,  $r/R = 0.8$  において計測された速度の時系列とモータドライバの電圧値を示す。回転開始から6秒間、円板は等加速度で回転速度を増し、それに対応して周方向速度が加速している。回転開始6秒後、円板は最終回転速度に達し、それ以降気流は発達し、ある一定の平均速度を保ち続けている様子がわかる。

図6に図5の周方向速度時系列の一部を拡大して示す。それぞれ (a) 遷移域、(b) 乱流域に該当する。図6 (a) では円板のぶれに起因する低周波成分と遷移渦に起因する高周波成分が重畳している。一方、図6 (b) では、速度は不規則に変動している。

図7に図6に示した周方向速度の時系列データより算出したパワースペクトルを示す。過去の研究<sup>(1),(2),(4),(8)</sup>では、円板が定常回転している場合、遷移渦は周方向に約30本あることを明らかにしている。ここで、回転加速中も周方向に30本の遷移渦が発生していると仮定すると、円板の回転速度とパワースペクトルのピーク周波数との間に次式が成り立つ。

$$f_{\text{peak}} = \frac{N}{60} \times 30 \quad (3)$$

図7で  $t = 4.0 \text{ s}$  ( $N = 2000 \text{ rpm}$ ) でのパワースペクトルの卓越周波数は約  $1000 \text{ Hz}$  であり、式(3)をほぼ満たしている。このことから、このピークは遷移渦によるものであり、遷移渦は周方向に約30本存在するものと考えられる。 $t = 6.0 \text{ s}$  では、スペクトルは全周波数で上昇しており、 $t = 4.0 \text{ s}$  で認められるような鋭いピークは存在しない。そのため、乱流域に移行した流れ場であることがわかる。

図8に  $a = 500 \text{ rpm/s}$  における周方向速度成分パワースペクトルの時間変化を示す。スペクトルのピーク周波数は時間の経過（回転速度の増加）と共に直線的に上昇し、定常回転 ( $t = 6.0 \text{ s}$  後) となる  $N_{\text{max}} = 3000 \text{ rpm}$  では約  $1500 \text{ Hz}$  に達しており、遷移渦に起因するピークが回転加速中にも生じている。また、円板回転速度とこのピーク周波数とが式(3)をほぼ満たしていることから、遷移渦は発生直後より周方向に約30本存在していることがわかる。

以上の結果より、本研究では回転速度に対応する遷移渦によるものと判断されるパワースペクトルピークが周方向速度時系列で検知された最初の時刻を求め、それを遷移渦の初生時間とし、各半径位置での  $Re_c$  を算出した。また、パワースペクトルピークの消滅時刻より、乱流遷移を示す  $Re_c$  を算出した。

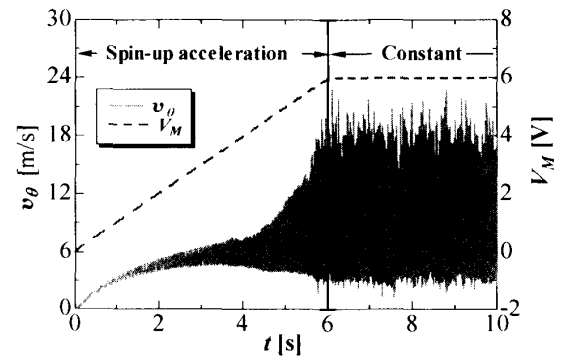
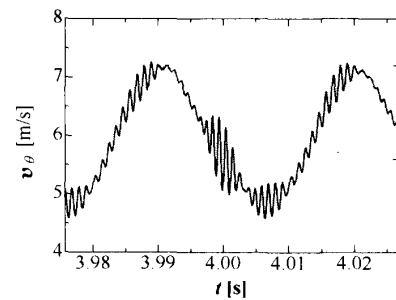
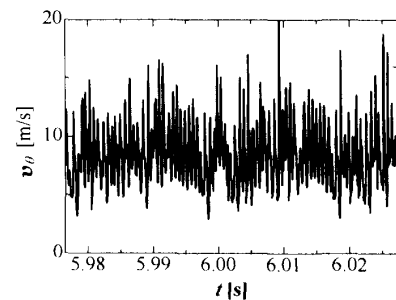


Fig. 5 Relation between time series of  $v_\theta$  and driver voltage  $V_M$  ( $a = 500 \text{ rpm/s}$ ,  $r/R = 0.8$ )



(a)  $t = 4.0 \text{ s}$  ( $N = 2000 \text{ rpm}$ )



(b)  $t = 6.0 \text{ s}$  ( $N = 3000 \text{ rpm}$ )

Fig. 6 Time series of tangential velocity ( $a = 500 \text{ rpm/s}$ ,  $r/R = 0.8$ )

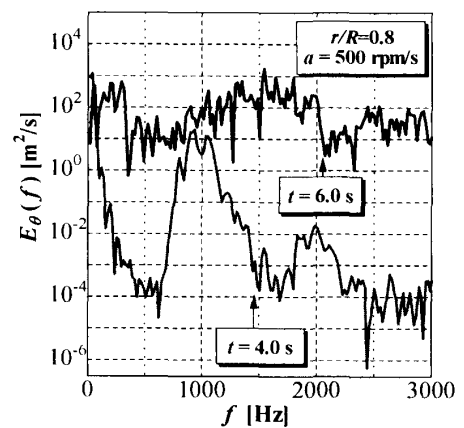


Fig. 7 Power spectrum of tangential fluctuation velocity ( $a = 500 \text{ rpm/s}$ ,  $r/R = 0.8$ )

4・3  $Re_c$  に及ぼす回転加速度の影響

図9は周方向速度により求めた遷移渦の臨界レイノルズ数  $Re_c$  と瞬時の回転速度  $N$  との関係を示している。図中に Malik ら<sup>(3)</sup>, Kobayashi ら<sup>(4)</sup> によって得られた  $Re_c$  もそれぞれ示している。また、図中に示す実線は実験結果を最小二乗近似したものである。可視化実験結果と同様、回転加速度が増すとともに  $Re_c$  が上昇することがわかる。いずれの回転加速度での  $Re_c$  も、定常回転での  $Re_c$ <sup>(3)(4)</sup> より高く、また  $N_{max} = 3000$  rpm に近づくほど  $Re_c$  は低下し、定常回転での  $Re_c$  に漸近している。 $Re_c$  が右下がりであることは、遷移渦の発生位置が回転加速中に円板中心へ移動していることを表している。この特徴は可視化実験において遷移渦がエッジ部より発生し、円板中心側へ移動することと一致する。

図10は図9と同様に周方向速度から得られた遷移渦が各半径位置に到達したときの臨界レイノルズ数  $Re_c$  である。回転加速度  $a$  が大きいほど各半径位置での  $Re_c$  は大きく、また、遷移渦の発生位置が円板中心側に移動するにつれて  $Re_c$  は小さくなっており、定常回転時の  $Re_c$  に近づいている。

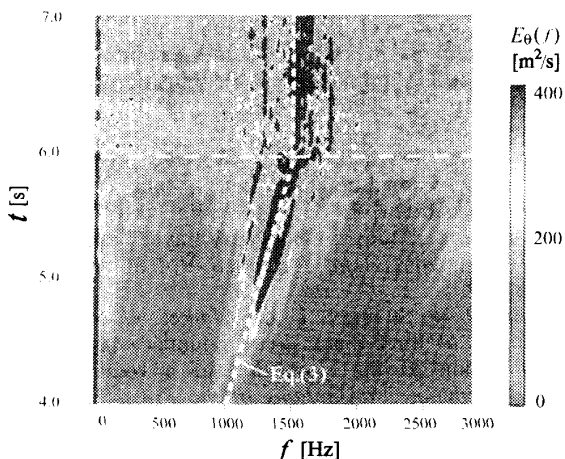


Fig. 8 Spectrogram of tangential fluctuation velocity ( $a = 500$  rpm/s,  $r/R = 0.8$ )

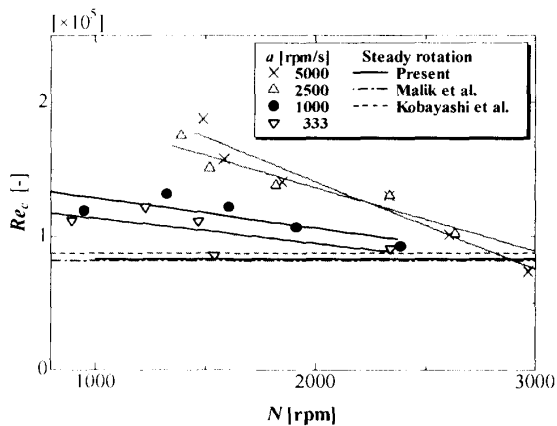


Fig. 9 Relation between  $Re_c$  and  $N$  in accelerating

図11は速度計測から求めた遷移渦発生位置の円板中心方向への移動速度  $U_c$  を示している。 $r/R \geq 0.70$  では  $a$  が大きいほど遷移渦の移動は高速であるが、遷移渦の発生位置が円板中心側に移動するにしたがい、移動が遅くなっている。上述したように、 $a$  が大きいほど円板エッジ部での遷移渦の初生は遅れるが、 $r/R \geq 0.70$  の領域では発生位置の移動が速いため、円板中心側では回転加速度による  $Re_c$  の差が減少することが図10からわかる。

ここで  $a$  が  $Re_c$  に影響を及ぼした要因を考察する。円板の回転が加速される場合、境界層内の周方向速度の  $z$  方向 (円板に鉛直方向) 分布が定常回転時の速度分布には即座に追従できないことが考えられる。そのため、円板が加速される場合、境界層内のある高さにおける周方向速度は、定常回転時の速度より小さくなっている。流れの遷移は境界層内速度に依存するため、流速が小さいことで定常回転時に比べて遷移が遅れ、その結果、加速度が大きいほど遷移渦の初生が遅れると考えられる。図12に  $a = 100, 1000$  rpm/s,  $r/R = 0.8, z = 1.6\delta$  における周方向速度 (回転一周分のピーク値) を示す。同一の瞬間回転速度に対して  $a = 100$  rpm/s の速度が  $a = 1000$  rpm/s の速度をわずかに上回っている。円板表面にさらに近い位置での計測が可能であれば、この差はより顕著になると考えられる。

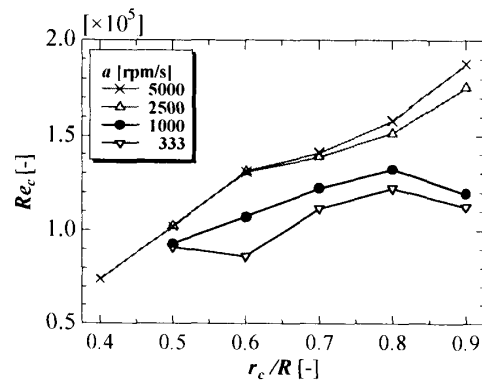


Fig. 10 Radial distribution of  $Re_c$

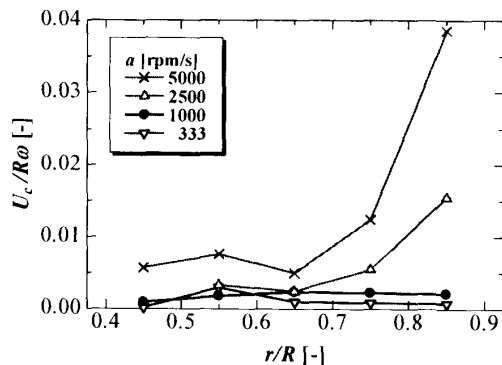
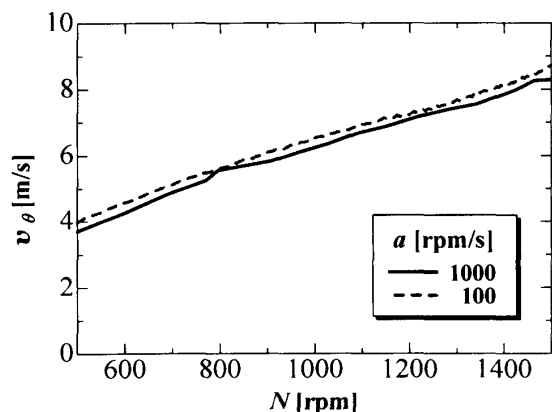
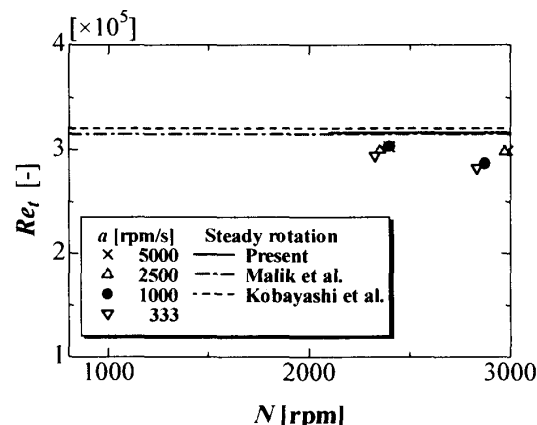


Fig. 11 Radial distribution of  $U_c / R\omega$

Fig. 12 Time series of tangential velocity at  $z = 0.34$  mmFig. 13 Relation between  $Re_t$  and  $N$  in accelerating

#### 4・4 $Re_t$ に及ぼす回転加速度の影響 図

13に周方向速度から求めた、遷移渦が崩壊するときのレイノルズ数  $Re_t$  (乱流に遷移する  $Re$ ) と回転速度  $N$  との関係を示している。また、 $Re_c$ の場合と同様にMalikら<sup>(3)</sup>、Kobayashiら<sup>(4)</sup>によって得られた  $Re_t$  も示している。乱流遷移を示す  $Re_t$  は、いずれの加速度においても定常回転時の  $Re_t$  よりもわずかに低い値をとるが、 $Re_t = 2.8 \times 10^5$  から  $3.1 \times 10^5$  付近に集中しているため、 $Re_t$  に及ぼす回転加速度の影響は小さいものと考えられる。

#### 5. 結 言

本研究ではスピニングで問題となる遷移渦に着目し、回転加速度が遷移渦に及ぼす影響に関して調査を行った。円板上に発生する遷移渦の可視化実験および周方向速度の周波数解析から、回転加速度が大きいほど遷移渦が発生する臨界レイノルズ数は高くなることを明らかにした。これは円板回転が加速される場合、境界層内速度の発達は円板回転速度に即座には追従できず、定常回転時と比べて流れの遷移が遅れるためである。

また、遷移渦は発生直後より周方向に約30本あり、回転加速度が大きいほどエッジ部から円板中心へと高速に移動し、円板中心に近づくにつれその移動は遅くなる。一方、遷移渦が崩壊する遷移レイノルズ数は回転加速度によらずほぼ一定であることを示した。

遷移渦の発生は回転加速度の増大とともに遅れることから、円板上に遷移渦が発生しない状態を保ちながら高速に円板を回転するよう制御することで、円板上に塗布したレジストの膜厚の均一性を損なわずに乾燥時間を短縮できる可能性があることがわかった。

#### 文 献

- (1) Öztekin, A., Bornside, D. E. and Brown, R. A., The Connection between Hydrodynamic Stability of Gas Flow in Spin Coating and Coated Film Uniformity, *Journal of Applied Physics*, Vol. 7 (1995), pp. 2297-2308.
- (2) Wilkinson, S. P. and Malik, M. R., Stability Experiments in the Flow over a Rotating Disk, *AIAA Journal*, Vol. 23, No. 4 (1985), pp. 588-595.
- (3) Malik, M. R., Wilkinson, S. P. and Orszag, S. A., Instability and Transition in Rotating Disk Flow, *AIAA Journal*, Vol. 19, No. 9 (1981), pp. 1131-1138.
- (4) Kobayashi, R., Kohama, Y. and Takamadate, Ch., Spiral vortices in boundary layer transition regime on a rotating disk, *Acta Mechanica*, Vol. 35 (1980), pp. 71-82.
- (5) Reed, H. L. and Saric, W. S., Stability of three-dimensional boundary layers, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 21 (1989), pp. 258-284.
- (6) Kohama, Y., Study on Boundary Layer Transition of a Rotating Disk, *Acta Mechanica*, Vol. 50 (1984), pp. 193-199.
- (7) Gregory, N., Stuart, J. T. and Walker, W. S., On the stability of three-dimensional boundary layers with application to the flow due to a rotating disk, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 248 (1955), pp. 155-199.
- (8) Kimura, S., Munekata, M., Kurishima, H., Matsuzaki, K. and Ohba, H., Influences of the Exhaust Flow on the Boundary Layer Flow on the Wafer Surface in Spin Coating System, *Journal of Thermal Science*, Vol. 14, No. 2 (2005), pp. 130-135.
- (9) Wahal, S., Öztekin, A., Bornside, D. E. and Brown, R. A., Visualization of a Gas Flow Instability in Spin Coating Systems, *Applied Physics Letters*, Vol. 62, No. 20 (1993), pp. 2584-2586.
- (10) Kimura, S., Munekata, M., Kurishima, H., Watanabe, S., Yoshikawa, H., Matsuzaki, K. and Ohba, H., Effects of the Catch Cup Geometry and the Exhaust Flows on the Boundary Layer Flow over the Wafer Surface in a Spin Coating System, *Proceedings of the Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science*, (2006-6), pp. 244-247.
- (11) Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*, (1955), pp. 83-89, McGraw-Hill.