

機関番号：17401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760135

研究課題名 (和文) 公転を伴う回転円板上の境界層流れの解明

研究課題名 (英文) A Study on Boundary Layer Flow on a Rotating Disk with Orbital Motion

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：30264279

研究成果の概要 (和文)：

公転を伴う回転円板上の三次元ねじれ境界層の解明を目的とし、自公転円板回転装置を設計・製作し、自公転円板上の流れ場について調査した。油膜法により円板表面の気流を可視化し、熱線流速計により気流の速度分布を計測することによって、表面粗さや液膜流量の増加は境界層遷移を促進することを明らかにした。また、回転円板の外縁から飛散する液滴挙動を撮影し、PTV (粒子追跡法) により、液滴飛散挙動を明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

The purpose of this study is to investigate three-dimensional boundary layer flow on a rotating disk with orbital motion. The disk rotating device as like a spin-coater is designed and is built, however the disk spins with orbital motion. The air flow in the boundary layer on the rotating disks is visualized by the oil flow method. The velocity field in the boundary layer is measured by hot-wire. As a result, it is found that the increases in the surface roughness of disk and the flow rate of droplet liquid remote the boundary layer transition. The behavior of droplets scatter shot from the edge of a rotating disk are investigated by using PTV (particle tracking velocimetry).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：流体計測, 回転円板, 液膜流れ, 薄膜, 画像解析

1. 研究開始当初の背景

スピン(自転のみ)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、高速回転や**大口径の円板になると**、つまり、円板直径を代表長さとして回転速度を代表速度とするレ

イノルズ数が大きくなると、回転円板上の流れは不安定になり、**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。

実際のウェハスピンコーティングでは、遷移渦により塗布膜に筋が転写されないよう、

低速回転で運用している。つまり、大口径ウェハに対応するには、さらに現状よりも低速で回転することが必要になる。しかし、低速化は膜厚の増大やレジストの定着度合いを下げるだけでなく、乾燥に時間がかかり生産性が低下するため大口径化による生産性向上の目的が達成できないことになる。また、さらなるレジストの薄膜も要求されるため、高速回転での実用が望まれている。経済産業省の技術ロードマップでは 2012 年には 450mm ウェハの実用化が目標として設定されており、大口径ウェハへの対応が急務となっている。これまでにヘリウムガスを回転ウェハ上の境界層内に注入して、雰囲気動粘度を下げ、つまりレイノルズ数を低下させ、遷移渦発生の抑制を実現できる報告がある。この技術は特許公開され、450mm ウェハへの適用も検討する 1 つの方法となっているが、ヘリウム噴射法の課題とヘリウムに関わるコスト面の問題が生産性を低下させる可能性を持ち合わせている。そこで、本研究で取り組む公転を伴うスピン塗布技術により、生産性の高い大口径ウェハの塗布技術の開発を試みる。また、実用レベルでは膜厚の均一性が重要視されるので、面内様な乾燥速度が得られる回転塗布技術の開発が次の目標となる。

実機のスピンコーターでは、ウェハへのレジストの再付着や塵の付着を防止するために円板外周部からの強制排気や外回りにカップがあるため、単なる回転円板上の流れとは円板周りの環境が異なる。これまでに回転ウェハ上（自転のみ）の境界層がそれらの強制排気やカップ形状が遷移渦の発生に与える影響について調査してきた。遷移渦が発生しない低速回転では円板まわりの外部流（排気）やカップ形状の影響が境界層の速度場に出たが、遷移渦や乱流域が生じる高速回転ではそのような円板周りの環境の境界層内の速度場への影響はあまり見られず、高速回転によって形成される速度場が支配的であることを明らかにした。さらに、回転加速度の遷移渦発生への影響も調査し、加速度の大きさが境界層流れの応答性に影響を及ぼし、高加速度になるにつれて、遷移渦の発生がわずかに遅れることを明らかにした。本研究ではそれらの結果を踏まえ、自転の回転方向とは逆回りの公転を導入して気流の半径方向速度を抑制できれば、円板と気流の相対速度が小さくなり、遷移渦の発生を遅らせることができるのではないかと予想している。

2. 研究の目的

本研究の目的は公転を伴う回転円板上の三次元ねじれ境界層の解明であるが、三段階の目的に分けている。

- (1) 第一段階では、公転半径の調整可能な公転を伴うスピン装置を設計・製作し、安定に安全に稼働する状態にすることである。
- (2) 第二段階では公転半径、公転速度、自転速度、自転方向と公転方向の関係が遷移渦の発生位置にどのような影響を及ぼすかを気流の可視化および速度場・温度場の計測により明らかにする。ただし、この期間内では自転軸と公転軸は平行のときのみとする。
- (3) 第三段階では円板外縁から飛散する液滴挙動を解析することである。

以上の三段階の目的を達成し、大口径ウェハの塗布装置としての可能性について検討する。

3. 研究の方法

円板の公転と自転を独立に制御できる装置を設計製作し、安定に稼働するまで改良を繰り返し、安全に実験できる状態にする。特に、安全カバー、振動対策については十分に考慮した装置を製作する。

自公転円板装置を公転半径、公転速度、自転速度をパラメータとして変更し、円板上の境界層流れの可視化を墨汁と液体洗剤を混合した液体を用いた油膜法やドライアイスを用いる方法により行い、そのフローパターンをカメラで撮影する。

また、熱線流速計により速度場の計測を試み、回転円板上の境界層流れに与える公転の影響、表面粗さの影響、液膜流れの影響について明らかにする。一方で、回転円板上に流れる液膜の表面温度を赤外線カメラで計測し、その温度変化から気流の流れ状態と乾燥速度との関係について明らかにする。

さらに、回転円板の外縁から飛散する液滴挙動を、高輝度照明で照射し、高速度カメラで撮影することにより、その撮影画像から液滴挙動を PTV（粒子追跡法）で解析し、液滴飛散速度、液滴飛散角度、液滴直径などを明らかにする。

得られた結果から、大口径ウェハの塗布工程に応用できる回転組み合わせがあるのかどうかを検討する。

4. 研究成果

公転機能を伴う装置や結果の詳細については、特許提出に備え、控えるものとする。

ウェハの代用として、アルミ円板を用い、自転速度は最高 3000rpm、公転速度は最高 500rpm の条件により運転可能な自公転円板回転装置を設計・製作した。円板直径は 200mm または 300mm のものを使用した。

し、回転速度を上げて回転基板の流れを次世代型大口径基板の場合の流れと相似な条件にすること（気流のレイノルズ数を一致）によって、大口径基板用の条件を見積もることは可能である。図1に自公転円板装置の概略を示すが、先述のように特許申請に備えて詳細は省略している。自公転円板は公転天板（円板）に搭載しているが、自転速度および公転速度は正負も含めて独立に設定可能なように、独立した回転モーターを利用している。公転半径も任意に変更可能な設計にしているが、公転半径に応じて回転部全体のバランスを取り直して安定化・安全化を図った。また、振動対策として土台にはトラス型の鉄材で補強した。さらに、安全対策として、回転部全体を十分に覆う安全カバーを5mmの鉄板を用いて製作・設置した。なお、上面と側面の観測窓には10mmの透明ポリカーボネイト材を用いた。

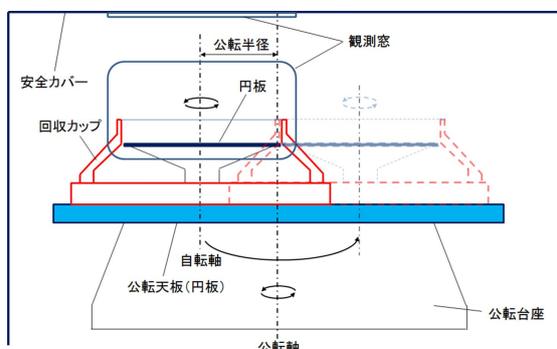
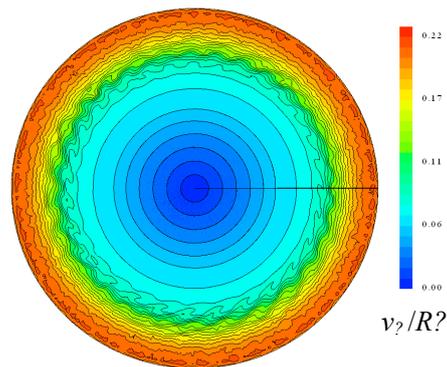
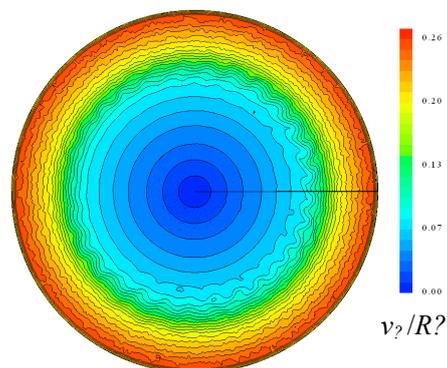


図1 自公転装置概略図

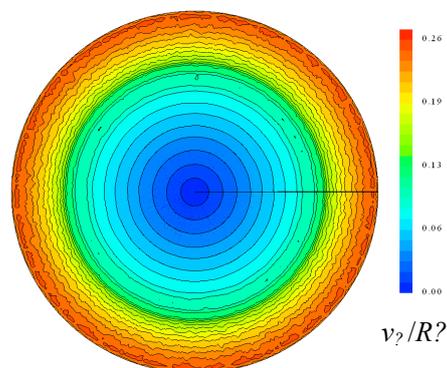
以後、自転のみの実験結果を示す。サンプリング周波数 100 kHz で熱線流速計で自転と同期計測して 125 回転分の計測データから各点の時間平均値 v_θ を求め、 R^2 で無次元化した周方向速度のコンターマップを図2に示す。熱線による気流計測高さは、円板表面から $z = 0.55 \text{ mm}$ (2.5δ) に固定する。この高さは液膜がない円板上での気流の境界層厚さ $\delta = (\nu/\omega)^{0.5}$, ν : 空気の動粘度, ω : 回転角速度) の 2.5 倍に相当する。図2(a), (b)に液膜がない場合の滑面円板, 粗面円板上の気流の周方向速度 v_θ の等値線図を示す。滑面円板(図2(a))では無次元半径 $0.675 < r/R < 0.9$ で等値線が周方向に波打っていることがわかる。これは気流に生じた約 32 本の遷移渦による。この遷移渦発生位置は粗面円板(図2(b))では $r/R = 0.525$ 付近から観察されている。つまり、円板表面が粗いほど遷移する位置が内側にシフトしている。また、粗面円板では、遷移渦による等値線の密集度が低いことから、表面の凸凹は遷移渦の抵抗となり、渦の強度を弱めていることが考えられる。



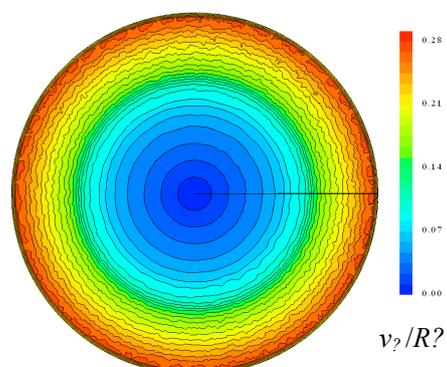
(a)滑面円板 (液膜無し, $R_a = 4.6 \text{ } \square\text{m}$)



(b)粗面円板 (液膜無し, $R_a = 14.1 \text{ } \square\text{m}$)

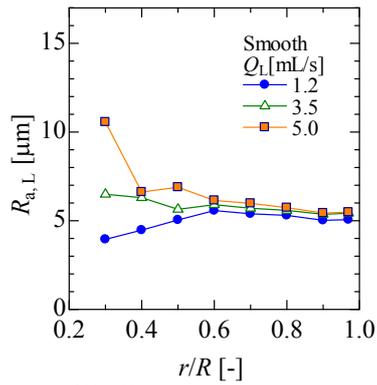


(c)滑面円板($Q_L = 5.0 \text{ mL/s}$, $R_a = 4.6 \text{ } \square\text{m}$)

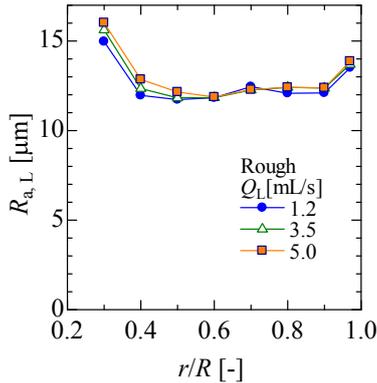


(d)粗面円板($Q_L = 5.0 \text{ mL/s}$, $R_a = 14.1 \text{ } \square\text{m}$)

図2 周方向速度 v_θ の分布

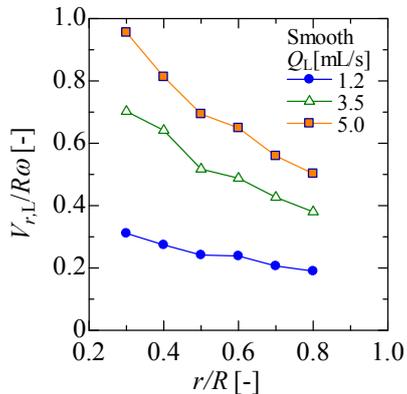


(a)滑面円板 ($R_a = 4.6 \mu\text{m}$)

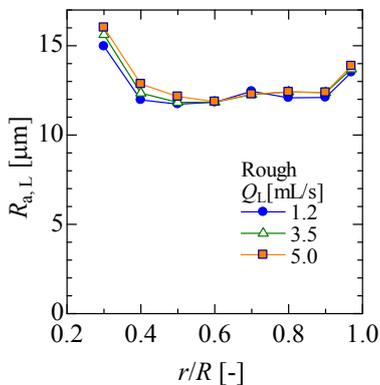


(b)粗面円板 ($R_a = 14.1 \mu\text{m}$)

図3 液膜表面の粗さ $R_{a,L}$ の分布 ($N=3000\text{rpm}$)



(a)滑面円板 ($R_a = 4.6 \mu\text{m}$)



(b)粗面円板 ($R_a = 14.1 \mu\text{m}$)

図4 液膜流れを伴う回転円板上の気流の半径方向速度分布 ($N=3000\text{rpm}$, $z=0.55\text{mm}$)

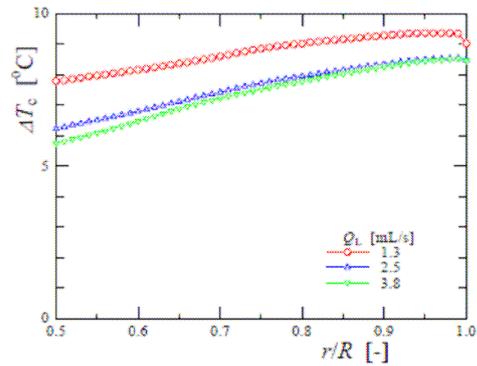


図5 液膜表面の温度低下量 ΔT_c の分布 ($N=3000\text{rpm}$)

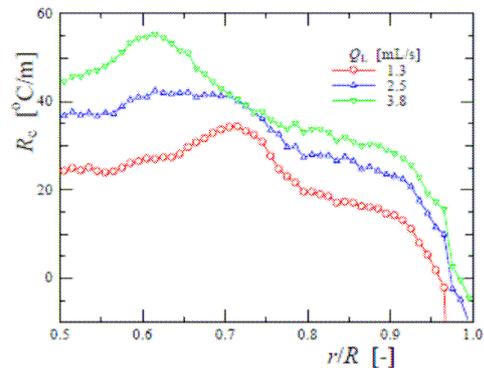


図6 液膜表面温度の半径方向勾配 R_c ($N=3000\text{rpm}$)

同じ Q_L で、円板表面粗さが遷移発生位置に与える影響を比較しても、液膜がない場合と同様に円板表面が粗いほうがより内側から遷移することが図 2(c),(d)からわかる。

図 3, 4 に液膜表面の粗さ $R_{a,L}$ および液膜の断面平均半径方向速度 $V_{r,L}$ の分布を示す。 $V_{r,L}$ は膜厚の計測結果から見積もった断面平均速度であるが、表面速度に比例するものとして考える。粗面円板での液膜表面は滑面円板の場合に比べて全体的に 2 倍程度は粗くなっているが、粗面円板の $V_{r,L}$ は滑面円板の $V_{r,L}$ と大きな差はない。同じ Q_L では粗面円板のほうが早く遷移することから、液膜表面の流れよりも液膜表面(气流界面)の粗さが気流の遷移位置に大きく影響することがわかる。

また、図 5, 6 には赤外線カメラにより計測した初期状態から平衡状態になるまでの液膜表面温度から求めた、液膜の乾燥(蒸発)によって低下した温度の大きさ ΔT_c の分布および液膜表面温度の半径方向勾配 R_c を示す。円板外側にいくにつれて温度低下量が増加していることがわかるが、半径方向の温度勾配 R_c が大きいのは円板エッジ側の気流の乱流域ではなく、遷移渦が発生しているところであることがわかる。つまり、遷移渦が発生している領域で最も乾燥速度が速まり、層流域のように一様に乾燥しないことが膜厚の一様性を悪化させる要因となることが明ら

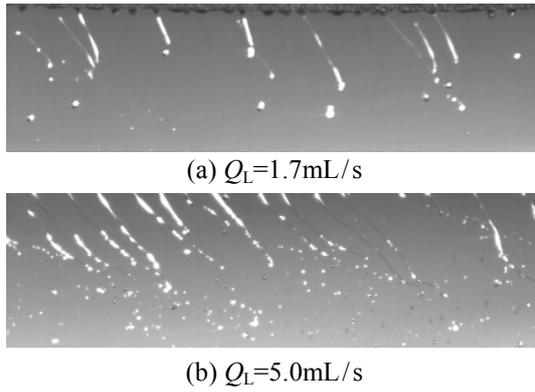


図7 液滴飛散挙動 ($N=3000\text{rpm}$)

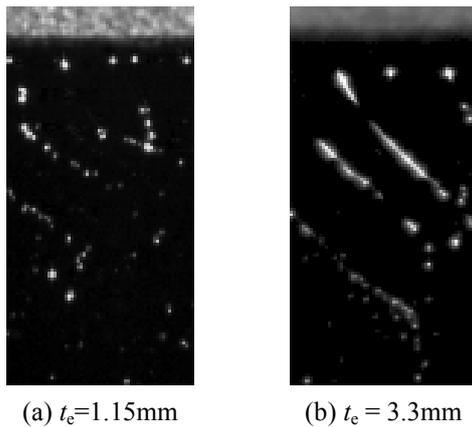


図8 液滴飛散画像 ($N=3000\text{rpm}$, $Q_L = 5.0\text{ mL/s}$)

かになった。

図7は円板エッジから飛散する液滴挙動を撮影した画像である。液膜流量が増加するにつれて液注の本数が増え、それらが分裂して液滴として空気抵抗を受けながら飛散する。また、回転速度が下がるにつれて、液注が減少し、エッジから液滴として飛散する。

図8(a)は $t_e=1.15\text{ mm}$ 、図(b)は $t_e=3.3\text{ mm}$ の円板における画像で、液膜流量は共に $Q_L = 5.0\text{ mL/s}$ の場合である。エッジ厚の薄い $t_e = 1.15\text{ mm}$ の図(a)では液柱は極端に少なく、液滴が多く飛散している。それに比べて図(b)では、繊維状の液柱がエッジから伸び、液柱自身が分裂崩壊して液滴になる様子が確認できる。エッジが薄くなると、エッジでの液溜まりが小さくなり、気流の抵抗に打ち勝つ液柱が形成されにくいと考えられる。

図9は $r - \omega$ 断面における液滴飛散速度 $V_{r\omega}$ を円板エッジの周方向速度により無次元化した $V_{r\omega}/R\omega$ の分布である。横軸はエッジからの半径方向距離 r_e である。図中の黄色の点線は円板のエッジが薄い場合、黒の破線は厚い場合の近似式を表わしている。液膜流量が $Q_L = 5.0\text{ mL/s}$ の結果のみを示しているが、液膜流量、排気の有無、エッジ厚によらず飛散位置が外側に向かうにつれて飛散速

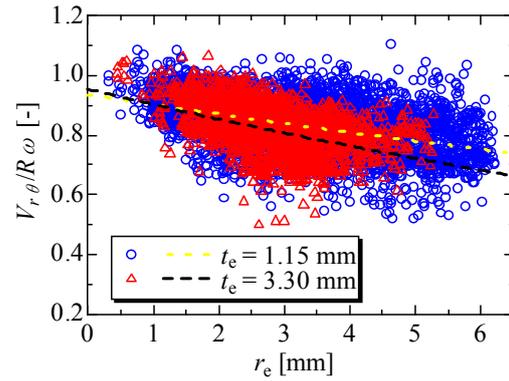


図9 飛散速度 $V_{r\omega}$ の分布 ($N=3000\text{rpm}$, $Q_L = 5.0\text{ mL/s}$)

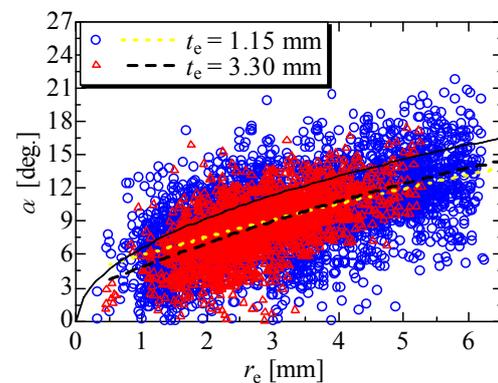


図10 飛散角度 α の分布 ($N=3000\text{rpm}$, $Q_L = 5.0\text{ mL/s}$)

度は減少していることがわかる。これは外側に行くにつれて空気抵抗を受け続けるため、液滴飛散速度が減少していると考えられる。また、円板周囲からカップ内の下方に排気した場合の方がわずかに減速されていることがわかる。これは速度の下方成分が増加したことが原因と考えられる。

図10は液滴飛散角度 α の半径方向分布である。実線はエッジ ($r_e = 0\text{ mm}$) から接線方向に飛散した場合の α の軌跡を示している。外側に向かうにつれて、いずれの Q_L でも実線にほぼ平行に分布していることから、液滴は平均的に接線方向に飛散していることがわかる。実線に比べ近似曲線が低い値をとっているのは、エッジに形成された液溜まりの分だけエッジより外側の位置から接線方向に飛散しているためだと考えられる。したがって、同じエッジ厚さでも排気した場合の方がより実線に近い近似曲線を描いているのは、よりエッジに近い位置から接線方向に飛散しているからである。これは、液溜まりが排気によって引っ張られる作用があるためだと考えられる。また、排気や液膜流量に関わらずエッジ厚は薄い方が α は大きく分散している。

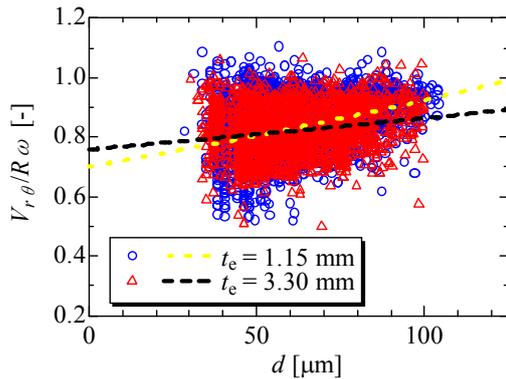


図 11 液滴直径と飛散速度の関係
($N=3000\text{rpm}$, $Q_L=5.0\text{mL/s}$)

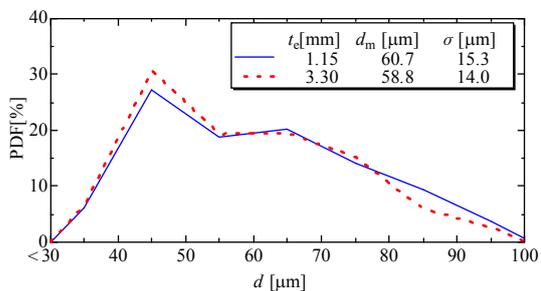


図 12 飛散液滴直径の度数分布
($N=3000\text{rpm}$, $Q_L=5.0\text{mL/s}$)

図 11 に液滴直径 d と液滴飛散速度 $V_{r\phi}/R\omega$ の関係について示す。液滴直径 d が小さいほど、速度範囲が広く低速域まで分布し、全体的には近似線で示すように d が小さくなるにつれて $V_{r\phi}$ は低下している。これは液滴直径 d が小さくなるほど外側に行くにつれて空気抵抗の影響により減速されやすくなることによる。

図 12 は液滴直径 d から得られた度数分布 (ヒストグラム) である。ビン幅 $\Delta d = 10 \mu\text{m}$ の累積個数を確率密度関数 PDF [%] で示している。エッジ厚に関係なく、最も多い液滴直径は $45 \pm 5 \mu\text{m}$ であるが、エッジ厚が薄い方が全体の平均直径はわずかに大きく直径の標準偏差 σ も大きくなっている。これは、エッジが薄い場合は細長い液柱となる前に液溜まりから飛散する液滴が多いため、液柱直径に比べて大きな液滴が飛散する確率が高くなるためだと考えられる。また、この直径の標準偏差の大きさが液滴飛散速度や飛散角度の分散の大きさに関係しているといえる。よって、エッジ厚みが薄いほど、液滴直径の標準偏差の大きさが大きくなり、液滴がより多方向に幅広い速度で飛散し、予測不能な再付着問題を引き起こすと考えられる。

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 5 件)

- ① 野口晃, 西山潤, 大瀬戸太一, 宗像瑞恵, 吉川浩行, 栗島啓聡, スピンコータ内における回転円板から飛散する液滴の挙動に関する研究, 日本機械学会九州支部講演会講演論文集, 査読無, No.118-1, 2011, pp. 199-200.
- ② 西山潤, 野口晃, 大瀬戸太一, 宗像瑞恵, 吉川浩行, 栗島啓聡, 回転円板上の境界層遷移に及ぼす液膜流れと表面粗さの影響, 日本機械学会九州支部講演会講演論文集, 査読無, No.118-1, 2011, pp. 201-202.
- ③ 野口晃, 宗像瑞恵, 吉川浩行, 西山潤, 兼田祐平, 栗島啓聡, 回転円板から飛散する液滴挙動に関する研究, 日本機械学会九州支部講演会講演論文集, 査読無, No.118-1, 2011, pp. 215-216.
- ③ Mizue MUNEKATA, Jun NISHIYAMA, Akira NOGUCHI, Hiroaki KURISHIMA, Hiroyuki YOSHIKAWA and Hideki OHBA, Drying of Flowing Liquid Film on Rotating Disk, Journal of Thermal Science, 査読有, Vol 19, No. 3, 2010, pp. 234-238.
- ④ 西山潤, 吉川浩行, 宗像瑞恵, 野口晃, 山田透, 栗島啓聡, 液膜流れを伴う回転円板上の境界層流れに及ぼす表面粗さの影響, 日本機械学会九州支部講演会講演論文集, 査読無, No.117-1, 2010, pp. 213-214.

[学会発表] (計 1 件)

- ① Mizue MUNEKATA, Jun NISHIYAMA, Akira NOGUCHI, Hiroaki KURISHIMA, Hiroyuki YOSHIKAWA and Hideki OHBA, Drying of Flowing Liquid Film on Rotating Disk, Proceedings of the 9th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows (ISAIIF9), 2009 年 9 月 11 日, Gyeongju TEMF Hotel, 慶州 (韓国) .

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: 30264279