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

Effects of Surface Roughness of the Rotating Disk on the Air Boundary Layer Transition over the Liquid Film Flow

○ 学 西山 潤 (熊本大) 学 野口 晃 (熊本大) 学 大瀬戸 太一 (熊本大)

正 宗像 瑞恵 (熊本大) 正 吉川 浩行 (熊本大)

栗島 啓聡 (東京エレクトロン九州株)

Jun NISHIYAMA¹, Akira NOGUCHI¹, Taichi OSETO¹, Mizue MUNEKATA¹, Hiroyuki YOSHIKAWA¹, Hiroaki KURISHIMA²¹Kumamoto University, 2-39-1, kurokami, kumamoto-shi, Kumamoto, ²Tokyo Electron Kyushu Ltd.

Key Words: Spin coating, Rotating disk, Boundary layer flow, Liquid film flow, Surface roughness

1. 緒言

回転円板上の大気境界層流れ(液膜なし)⁽¹⁾や回転円板上の液膜流れ⁽²⁾については境界層遷移に関してそれぞれ幅広く研究されているが、液膜流れを伴う回転円板上の気流の境界層遷移に着目した研究はほとんど報告されていない。この気流の遷移は、半導体製造工程におけるスピニング(回転塗布法)においてもウェーハの高速回転時に生じ、気流の遷移渦による筋がレジスト膜に転写され、レジストの様な塗布を妨げる。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⁽³⁾であり、乱流遷移は二次不安定によって生じる⁽⁴⁾と考えられているが、これらの発生に及ぼす物理的要因を把握することも実用上極めて重要である。

そこで、本研究では表面粗さの異なる円板を用い、その表面粗さが液膜流れを伴う回転円板上の気流の境界層遷移にどのような影響を及ぼすのかを液膜流れの流量を変えて調査することを目的とする。熱線流速計で気流の速度分布を計測し、レーザ変位計を用いて液膜表面粗さを計測した。その結果から、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報告する。

2. 装置概要および実験方法

2.1 装置概要 図1に実験装置の概要図を示す。直径 300 mm (= 2R) の表面粗さの異なる 2 種類のアルミ円板①を使用する。装置天井部は大気開放となっており、送風機⑨を用いて装置内に下降気流を強制的に発生させる。この下降気流はキャッチカップ②内へ導かれ円板上を通過し、排気孔へと流出する。円板の回転速度は $N = 3000$ rpm とし、排気流量は $Q = 2.0$ m³/min とする。液膜にはフォトレジストと粘性が同程度であり、濡れ性、揮発性、および安全性の面からエタノール(96%)を使用し、ノズル⑩口径 $\phi = 3.9$ mm から円板中心に連続的に滴下する。液膜の流量はバルブで $Q_L = 0, 1.2, 3.5, 5.0$ mL/s に調整する。

2.2 円板の表面粗さ、液膜表面粗さ R_a の計測 円板の表面粗さは円板上部に固定したレーザ変位計⑬により円板を $N = 6$ rpm で回転させながら計測する。周方向に 0.018° 間隔、半径方向に無次元半径 $r/R = 0.2 \sim 1.0$ までは 0.1 間隔で 3 回ずつ計 5.4×10^5 点のデータを計測する。液膜表面粗さは円板を $N = 3000$ rpm で回転させ計測する。周方向に 0.18° 間隔、半径方向に無次元半径 $r/R = 0.3 \sim 1.0$ までは 0.1 刻みで 5.2×10^5 点のデータを計測する。これらのデータから算術平均粗さ R_a を求める。粗面円板、滑面円板の表面粗さはそれぞれ $R_a = 14.1, 4.6$ μ m であった。

Fig. 1 Schematic view of the experimental setup

2.3 熱線流速計による気流の速度場測定 円板上の任意の位置に固定した I 型熱線流速計により回転円板上の気流の周方向速度を計測する。円板外周に設けたノッチ(切りかき)を検知するレーザ変位計からの信号を用いて、回転と同期した速度計測を行なっている。サンプリング周波数 100 kHz で同期計測するため、全周を周方向に $\Delta\theta = 0.18^\circ$ で計測している。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、周方向に平均した周方向平均速度 V_θ を算出する。熱線による気流計測高さは、円板表面から $z = 0.55$ mm (2.5 δ) 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 : 空気動粘度, ω : 回転角速度) の 2.5 倍に相当する。

3. 実験結果および考察

図 2(a), (c) に液膜がない場合の $z = 0.55$ mm での粗面円板、滑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(c))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(a))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。図 3, 4 には v_θ を周方向に平均した周方向速度 V_θ および乱れ強さ $V_{\theta, rms}$ の半径方向分布を示す。両図には直線的に増加する内側の層流域、外側の乱流域およびそれらの領域の間に遷移域が存在している。その遷移域は粗面円板の場合 $0.45 < r/R < 0.8$ 、滑面円板の場合 $0.625 < r/R < 0.85$ と判定でき、表面が粗いほど遷移域は広くなる傾向はあるが、内側に移動している。また、

Fig.2 Contour maps of v_θ ($N = 3000$ rpm, $z = 0.55$ mm)

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わかる。

図3により粗面円板における液膜流量の影響を比較すると、 $Q_L = 0, 1.2$ mL/s の遷移の位置は、ほぼ同じである。 $Q_L = 3.5, 5.0$ mL/s の場合は $0.425 < r/R < 0.7$, $0.4 < r/R < 0.7$ に遷移域が存在し、 Q_L が増加するにつれて遷移がより内側から生じている。しかし、 v_θ の等値線図(図2(b))では、内側から等値線は波打っているが、遷移渦による周期的な速度分布はみられず $Q_L = 0$ mL/s の場合のように明瞭な遷移渦は形成されていないことが考えられる。また、滑面円板の場合も同様に $Q_L = 3.5, 5.0$ mL/s では遷移渦による周期的な波打ちがみられない。このことから液膜流量が増加すると、液膜流れは気流の遷移を促進するだけでなく遷移域の流れ構造に大きく影響していると考えられる。

遷移が早まる(変曲点型不安定を引き起こしやすい)原因として、液膜表面(気流との界面)の乱れ強さ(粗さ)や液膜表面の半径方向速度が増加することが考えられる。そこで図5,6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(気流界面)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。一方、いずれの円板でも Q_L が増加するにしたがって、 $V_{r,L}$ も増加している。また、 $r/R < 0.6$ での $R_{a,L}$ も Q_L の増加に伴い大きくなる傾向がみられ、両者とも気流の遷移を促進する要因になり得る。ただし、滑面円板の場合は、液膜表面の粗さよりも液膜表面の半径方向速度の増加による影響のほうが強いと考えられる。それは、滑面円板の $R_{a,L}$ が、粗面円板に比べて小さいにもかかわらず、滑面円板の $Q_L = 3.0, 5.0$ mL/s での遷移位置($r/R = 0.45, 0.425$)が、粗面円板の遷移位置に近づいていることからわかる。

4. 結言

円板の表面粗さが円板上の気流の速度分布に影響を与え、粗いほど遷移域が円板内側へシフトし、液膜がある場合も気流との界面の乱れが遷移に大きく影響することを明らかにした。滑面円板の場合には、液膜流量の増加に伴う液膜の半径方向速度の増加が、遷移の促進に強く影響することを示した。

文 献

- (1) Kohama, Y., Acta Mech. Vol.50 (1984), pp.193-199.
- (2) 東恒雄, 星野達郎, 機論B, Vol.50 (1984), pp.974-981.
- (3) Gregory, N., Stuart, J. T. and Walken, W. S., Phil. Trans. R. Soc. Lond., A248 (1955), pp.155-199.
- (4) Reed, H. L., Saric, W. S., Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.21 (1989), pp.235-269.

Fig.3 Radial distributions of V_θ and $V_{\theta,rms}$ in air flow on the rough disk ($N = 3000$ rpm, $z = 0.55$ mm)

Fig.4 Radial distributions of V_θ and $V_{\theta,rms}$ in air flow on the smooth disk ($N = 3000$ rpm, $z = 0.55$ mm)

Fig.5 Radial distributions of $R_{a,L}$

Fig.6 Radial distributions of $V_{r,L}$