回転円板上淀み点流れの流動特性[†]

荻野文丸・齊藤泰司*・松本 初

京都大学大学院工学研究科 化学工学専攻^{††}

回転円板上淀み点流れの流動特性を実験的に検討した。レーザドップラ流速計を用いて周方向速度を測定し、可視化実験により装置内の二次流を観察した。実験結果から、円板の回転レイノルズ数に比べて回転円板に垂直方向に接近する流れのレイノルズ数が小さい時、回転円板上部に循環流が発生し、この循環流は円板の回転周波数の1/2~1/6倍程度の周波数で変動することがわかった。また、層流から乱流への遷移レイノルズ数は約 1.5×10^5 であり、遷移域では円板回転周波数の約28倍の周波数の速度変動が卓越することがわかった。さらに、層流域での周方向速度は無限回転円板の層流の解析解と一致することがわかった。

緒 言

従来のCVD装置の大部分はチャンパー内に水平におかれた基板に平行にガスを流す水平流型CVD装置であるが、このような装置では基板面上に形成される境界層の厚さは流れ方向に変化するため、成膜時において膜厚、膜内の各化学種の組成などを均一に制御するのが困難となる。そこで、淀み点流れと回転円板上の流れでは境界層の厚さが一定であることに着目し、基板回転型のCVD装置が考案されている(Ohmine *et al.*, 1989)。本研究ではそのような基板回転型CVD装置の基礎として、円筒容器内の水平回転円板に垂直に流体が流れる場合の流動機構について実験的に検討した。

回転円板上の流れについては古くから理論的、実験的に数多くの研究が行われているが(Cochran, 1934; Gregory *et al.*, 1955)、これらは主にKármánの解析的な研究(Kármán, 1921)に端を発したもので、円板の有限性などを考慮しない、いわゆる“無限回転円板モデル(free disc)”にしたがったものがほとんどである。基板回転型CVD装置内の流動についても理論的な研究は数多くされているが系統的な実験的研究はほとんど行われていない。さらに、製膜速度の均一性を実現するためには円板上の速度境界層が層流になるように運転しなければならない。したがって、装置内の流動と回転円板上の層流境界層の安定性を評価することが重要となる。

また円板上に発達する速度境界層は典型的な3次元速度境界層を形成し、層流から乱流への遷移領域では回転円板上にFig. 1に示すような定在渦が発生する。Smithはこのような速度場を熱線流速計を用いて、 $Re_r = 2.1 \times 10^5$ から現れる周期的な波を観察している(Smith, 1947)。また、最近ではKohama(Kohama, 1987), Aubryら(Aubry *et al.*, 1994)によっても熱線を用いた詳細な測定がなされている。しかしながら、本研究のように装置内流動を対象とした場合、熱線のようにプローブを流れ中に挿入する測定方法では系内の流れを大きく乱す可能性がある。そこで、本研究では回転円板上境界層の測定においてはほとんど適用例がないレーザドップラ流速計を用いて周方向の速度を測定した。また、可視化実験により装置内に発生する2次流について考察し、回転円板に垂直に接近する流れの速度が回転円板上速度境界層へ及ぼす影響を調べた。

1. 実験装置および実験方法

実験装置の概略をFig. 2に示す。装置本体は内半径29 cmの亚克力製円筒であり、回転円板は半径20 cm、厚さ15 mmのアルミ製円板である。流体としては水を用いた。装置上部から流入した流体は、偏流防止用の衝突板および多孔板を通り、さらに円板上部20 cmのところに設置したハニカムによって整流される。整流された流体は円板に衝突した後、装置下部から排出される。また境界層内速度測定において重要となる回転円板の回転時の振れについては、円板表面の任意の点が水平面から上下に偏倚するのは最大で15 μm であり、回転軸の水平方向への偏倚は最大で20 μm である。座標は円板中心から鉛直方向に z 、半径方向に r とした。接近流の流量はオリ

[†] 1997年4月10日受理；化学工学会第60年会(大阪, 1995年3月)にて発表

^{††} 〒606-01 京都市左京区吉田本町

* 京都大学原子炉実験所

Fig. 1 Velocity boundary layer on the rotating disc

Fig. 2 Experimental apparatus

フィスマノメータ、円板回転速度はデジタルタコメータを用いて測定した。実験時の水温は 20°C で一定に保った。周方向速度の測定にはレーザドップラ流速計 (DISA 55 X) を用いた。散乱粒子には粒径 $11\sim 15\ \mu\text{m}$ の高分子ポリマー (日本フィライト製エクспанセル DU) を用いた。なお、円筒の曲率の影響を除去するために、レーザの送光部、受光部のそれぞれに補償水槽を設けた。信号処理器にはトラックおよびカウンタプロセッサを使用した。サンプル数は 2^{14} で、サンプル周波数は $300\ \text{Hz}$ とした。得られた経時データから時間平均速度と乱流強度を求めた。

2 実験結果および考察

2.1 可視化実験の結果

装置内の流れ場を評価するために可視化実験をおこなった。スリット光を装置の回転軸を含む平面を通るように入れ、そのときの流れの様子をカメラまたは VTR で撮影した。シード粒子には三菱化成 (株) 製 CHP 20 P を用いた。

可視化写真の一例を Fig. 3(a), (b) に示す。(a) の写真は円板の回転レイノルズ数が小さく、円板上部に循環流が形成されない時の流れの様子である。(b) の写真は

(a) $Re_s=700, Re=1.0\times 10^5$

(b) $Re_s=700, Re=2.3\times 10^5$

Fig. 3 Flow visualization

回転レイノルズ数が大きく円板上部に循環流が生じる時の様子である。Fig. 3(b) より、ハニカムから流出した流体は装置中央付近では円板に対してほぼ垂直に流れているが、装置壁と円板との間に二次的な循環流が形成されることがわかる。また、このような循環流を VTR により観察したところ、形成された循環流の大きさおよび循環流の中心位置は時間的に変動することがわかった。

可視化実験から、装置内の流れ場について領域分けを行った結果が Fig. 4 である。縦軸に接近流レイノルズ数 Re_s 、横軸に回転レイノルズ数 Re をとると、可視化によって得られた循環流の生じる境界は実線のようになる。Fig. 3(a) および (b) の Re, Re_s の値は Fig. 4 の点 A および B に相当する。また、無限回転円板の場合、円板回転に伴う遠心力によって流体が半径方向に流れるが、その流量に相当する接近流の流速を w_{sc} とし、これを基準にしたレイノルズ数を Re_{sc} とすれば、

$$Re_{sc}=0.886Re^{1/2} \quad (1)$$

である (Cochran, 1934; Owen and Rogers, 1989)。これを Fig. 4 に破線で示す。本実験範囲においては式 (1) で与えられる Re_{sc} よりも大きい Re_s でないと循環流が消滅しないことが分かる。ただし、Fig. 4 の実線は円筒内径と円板の直径の比およびハニカムと円板との間の距離

Fig. 4 Demarcation between the flows with and without circulating flow

と円板直径の比に依存すると考えられる。

2.2 速度分布

Fig. 5(a), (b) および (c) にそれぞれ $Re=1.25 \times 10^5$, 2.5×10^5 , および 4.2×10^5 の場合の $z=1.0$ mm における周方向時間平均速度の半径方向分布を示す。Fig. 5 の Re および Re_s の組み合わせは、いずれも Fig. 4 の $C_1, C_2, \dots, E_3$ に相当している。図中に示した実線は無限回転円板の層流の解析解である。破線は円板端の位置を示し、 $r/R=1.45$ はアクリル円筒の内壁にあたる。

Fig. 5(a) より、循環流の有無にかかわらず、速度の実測値は無限回転円板の層流の解析解と $r/R < 0.9$ でよく一致し、 $1 > r/R > 0.9$ ではやや小さい値をとる。すなわち、 $r/R < 0.9$ では円板端や装置側壁の影響のみならず、 Re_s の影響もなく、無限回転円板と同様にみなすことができる。 $r/R > 1$ では、循環流のない条件 C_2, C_3 の場合、周方向速度は円板端近傍では周方向運動量が半径方向に輸送されるのでやや大きい値をとる、 r/R の増大と共に単調に減少する。しかし、循環流のある条件 C_1 の場合は $r/R > 1.1$ で周方向速度は逆に r/R の増大と共に大きくなる。これは大きな周方向運動量を持った流体が円板端から遠心力により円筒側壁に向かって流れ、さらに循環流によって円筒側壁に沿って上方に流れる為であると考えられる。すなわち、円筒側壁近傍の周方向運動量が負の半径方向に輸送されている。

$Re=2.5 \times 10^5$ 場合は、Fig. 5(b) よりわかるように周方向速度は r/R が 0.87 近傍より小さい領域では無限回転円板の層流の解に一致するが、 $0.87 > r/R > 1$ では実測値は解析解より急激に大きくなる。これはこの領域の流れが乱流となり、円板からの周方向運動量の z 方向の輸送量が大きくなるためと考えられる。また、周方向速

Fig. 5 Radial distribution of the time-smoothed circumferential velocity

度は層流領域では循環流の有無にはほとんど依存しないが、乱流領域では循環流のある場合の方が、ない場合よりやや大きい値をとる。 $r/R > 1$ の領域の速度分布は Fig. 5(a) と同様である。

Re が 4.2×10^5 の時の周方向平均速度は $r/R=0.74$ までは層流の解析解とほぼ一致しており、 $0 < r/R < 0.74$ では層流と考えられる。Fig. 5(a), (b) と同じく層流領域の周方向速度は Re_s にほぼ無関係である。 $r/R > 0.74$ では速度は解析解より大きくなり、この点から乱流へ遷移し始めていると考えられる。 $r/R > 1$ では、循環流のある条件 E_1 の場合、循環流の影響による速度の r/R の増大と共に増大する領域は $1.3 < r/R < 1.4$ と円筒側壁近傍のみとなっている。これは、Fig. 5(a), (b) の場合に比べて円板の回転レイノルズ数が大きいので、円板

Fig. 6 Radial distribution of the time-smoothed circumferential velocity

端からの周方向運動量の半径方向への輸送量が大きくなる為 $1.0 < r/R < 1.3$ の領域の速度が大きくなったためと考えられる。一方、循環流のない条件 E_3 の場合においても $r/R > 1.2$ で速度は r/R の増大と共にやや大きくなる傾向を示す。これは可視化実験では捉えることの出来ない小さな循環流がこの領域で発生している為であると考えられる。

Fig. 6(a), (b) および (c) にそれぞれ $Re = 4.2 \times 10^5$ の場合の $z = 0.6$ mm, 2.0 mm および 10.0 cm における周方向時間平均速度の半径方向分布を示す。 $z = 0.6$ および 2.0 mm における速度は Fig. 5(c) の $z = 1.0$ mm の場合と同様に $1 > r/R > 0.74$ で層流の解析解より大きく、この領域では乱流であると考えられる。 $z = 0.6$ および 2.0 mm で $r/R > 1$ における速度場も Fig. 5(c) と同様

Fig. 7 Radial distribution of the turbulence intensity of the circumferential velocity fluctuation

である。 Fig. 6(c) の $z = 10.0$ cm の位置は円板上境界層の外側であり、 $Re_s = 670$ の場合は循環流のほぼ中心の位置である。循環流が存在する $Re_s = 670$ のとき、周方向速度は $0 < r/R < 0.4$ ではほとんど 0 であるが、 $0.4 < r/R$ では r/R と共に増加する。これは明らかに循環流の影響である。また、循環流の存在しない $Re_s = 2800$ のときも、 $r/R > 1$ で周方向速度はやや大きくなる。これは、前述したように可視化実験では判別出来ないような弱い循環流が円筒壁近傍に発生している為であると考えられる。

2.3 乱流強度分布

$Re = 4.2 \times 10^5$ の時の乱流強度の半径方向分布を Fig. 7 に示す。 Fig. 7(a), (b), (c) はそれぞれ $z = 0.6$ mm, 1.0 mm および 2.0 mm における測定結果である。いずれの場合も乱流強度は r/R の小さい中心近傍ではほと

Fig. 8 Variation of the time-smoothed circumferential velocity and relative turbulence intensity with local Reynolds number

んど0に近い値をとり、 $z=0.6$ mmの場合、 $0.63 < r/R < 0.8$ の範囲で乱流強度は急激に増大し、乱流への遷移が始まっていることがわかる。 $r/R=0.8$ を越えると乱流強度の増加の割合は緩やかになり、この点から外側が完全乱流域であると考えられる。また、 r/R が1より少し大きい所で乱流強度が再び大きくなるのは、円板端の効果であると考えられる。 Re_s の乱流強度に対する影響は $r/R < 1$ で循環流のある場合の方が乱流強度はやや大きいようであるが、全体的には Re_s は乱流強度にはほとんど影響しないと言ってよい。

$z=1.0$ および 2.0 mmにおける乱流強度は $0.75 < r/R < 0.8$ の狭い領域で急激に大きくなる点を除けば $z=0.6$ mmの場合とほぼ同じである。 $r/R > 1$ の領域ではFig. 7(a), (b), (c) いずれの場合も乱流強度は $r/R \approx 1.03 \sim 1.05$ で極大値をとり、 r/R の増大と共に単調に減少する。

2.4 遷移レイノルズ数

Fig. 8に測定点を $z=0.6$ mm、 $r/R=0.8$ に固定して円板の回転速度を変化させて時間平均速度および乱流強度を測定した結果を Re_r に対してプロットした。 Re_r は半径 r 基準の局所回転レイノルズ数である。 Re_s は310で一定である。図からわかるように乱流強度は $Re_r = 1.5 \times 10^5$ で急激に増加し始め、 $Re_r = 2.6 \times 10^5$ で最大値を示した後、減少し、 $Re_r > 3.4 \times 10^5$ で、ほぼ一定の値をとるようになる。時間平均速度は $Re_r > 2.6 \times 10^5$ では Re_r の増加と共に緩やかに増大し、 $2.6 \times 10^5 < Re_r < 3.4 \times 10^5$ で急激に増大するが、 $Re_r > 3.4 \times 10^5$ では再び緩やかに増大するようになる。以上より、遷移レイノルズ数は $Re_t = 1.5 \times 10^5$ 、臨界レイノルズ数は $Re_c = 3.4 \times 10^5$ と考えられる。

Fig. 5(b)の $r/R=0.87$ における局所レイノルズ数 Re_r は 1.89×10^5 であり、Fig. 5(c)の $r/R=0.74$ にお

Fig. 9 Velocity fluctuation for various local rotational Reynolds number

Fig. 10 Power spectrum of the velocity fluctuation

けるそれは 2.3×10^5 で、いずれも 1.5×10^5 と 3.4×10^5 の間にある。また、既往の研究では研究者にばらつきはあるが遷移レイノルズ数は 1.6×10^5 から 2.0×10^5 となっている。

ここで、層流、遷移、乱流の各々の領域における速度の時系列データをFig. 9に示す。この図からわかるように $Re_r = 2 \times 10^5$ では規則的な変動が生じ、遷移渦が発生していることがわかる。また $Re_r = 4 \times 10^5$ では乱流変動していることがわかる。 $Re_r = 2 \times 10^5$ の時の速度変動のパワースペクトルをFig. 10に示す。図からパワースペクトルは円板の回転周波数 ω の約28倍のところに強い

Fig. 11 Power spectrum of the velocity fluctuation in the flow with circulating flow

ピークを持ち、遷移渦が Fig. 1 に示すように円板上に固着して発生すると考えると、回転円板上には 28 個の遷移渦が発生していることになる。これは無限回転円板を模擬した実験 (Kohama, 1987) で得られている 28~32 個ともほぼ一致しており、遷移機構は無限回転円板上のものとほとんど同様とみなしてもよいことがわかる。

Fig. 11 に $Re = 4.2 \times 10^5$, $z = 10$ cm, $r/R = 0.8$ で循環還流のある $Re_s = 670$ の場合の速度変動のパワースペクトルを示す。図から円板回転周波数 ω の約 1/2, 1/3, 1/6 倍に強いピークを持つ、長周期の変動が起きていることがわかる。可視化実験と合わせて考えれば、このような長周期の速度変動は、非軸対称な流れによって起きていると考えられる。このような変動を伴う循環還流は、実際の CVD 装置では一部の化学種の円筒壁への析出等で問題になるので、今後更に詳細に調べることが必要である。

結 言

基板回転型 CVD 装置の基礎研究として、円筒容器内の水平回転円板に垂直に流体が流れる場合の流動について実験的に検討した。その結果、以下の結論を得た。

1. 円板の回転レイノルズ数に比べ、円板に垂直に接近する流体のレイノルズ数が小さい時、円板上方に循環還流が発生し、この循環還流は円板の回転周期の 1/2~1/6 倍程度の周波数でゆっくり変動する。
2. 本実験系では、層流から乱流への遷移レイノルズ数は約 1.5×10^5 である。遷移域では円板回転周波数の約 28 倍の周波数の速度変動が卓越する。

3. $Re_r < 1.5 \times 10^5$ かつ、 $r/R < 0.9$ であれば、境界層内の流れは層流であり、この領域の周方向速度は無限回転円板の層流の解析解と良く一致する。

Nomenclature

- $E(n)$ = power spectrum of velocity fluctuation [m²/s²]
 H_d = distance between honey comb and rotating disc [m]
 r = radial distance in cylindrical coordinate [m]
 R = disc radius [m]
 R_o = radius of outer cylindrical container [m]
 Re = rotational Reynolds number $R^2\omega/\nu$ [-]
 Re_r = local rotational Reynolds number $r^2\omega/\nu$ [-]
 Re_s = approaching Reynolds number Rw_{in}/ν [-]
 Re_{sc} = Reynolds number based on w_{sc} Rw_{sc}/ν [-]
 v = circumferential velocity of fluid [m/s]
 w_{in} = vertical velocity of fluid [m/s]
 w_{sc} = approaching velocity for free disc [m/s]
 z = vertical distance in cylindrical coordinate [m]
 ν = kinematic viscosity [m²/s]
 ω = angular velocity of rotating disc [rad/s]
 <Subscript>
 c = critical
 t = transitional

Literature cited

- Aubry, N., M. Chauve and R. Guyonnet; "Transition to Turbulence on a Rotating Disk," *Physics of Fluid*, **6**, 2800-2814 (1994)
 Cochran W. G.; "The Flow Due to a Rotating Disc," *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **30**, 365-379 (1934)
 Gregory N., J. T. Stuart and W. S. Walker; "On the Stability of Three-Dimensional Boundary Layers with Applications to the Flow Due to a Rotating Disk," *Phil. Trans. Roy. Soc.*, **A248**, 115-199 (1955)
 Kármán, Th von; "Über Laminare und Turbulente Reibung," *Z. angew. Math. Mech.*, **1**, 233-252 (1921)
 Kohama Y.; "Study on Boundary Layer Transition of a Rotating Disk," *Acta Mechanica*, **66**, 21-38 (1987)
 Ohmine, T., K. Kataoka and Y. Sato; "Growth of AlGaInP in a High-Speed Rotating Disk OMVPE Reactor," *J. Electronics Materials*, **19**, 429-433 (1989)
 Owen, J. M. and R. H. Rogers; *Flow and Heat Transfer in a Rotating-Disc Systems*, Vol. 1, John Wiley & Sons Inc., New York, USA (1989)
 Smith, N. H.; "Exploratory Investigation of Laminar-Boundary-Layer Oscillations on a Rotating Disk," *N. A. C. A. Tech. Note*, No. 1227 (1947)

Flow Near a Rotating Disc with Stagnation Flow

Fumimaru Ogino, Yasushi Saito*
and Hajime Matsumoto

Department of Chemical Engineering, Kyoto University, Kyoto, 606-01

Key Words: Rotating Disc, Stagnation Flow, Transitional Flow, Turbulent Flow

An experimental investigation of flow near a rotating disc with stagnation flow has been carried out. Flow visualization indicates that a circulating flow appears on the disc and fluctuates with a frequency of half to one sixth of that of the rotating disc. Measurements of circumferential velocity have been made by a laser Doppler velocimeter. The result shows that the transition to turbulent flow occurs at a local rotational Reynolds number of 1.5×10^5 , and the velocity fluctuates with a frequency 28-times as large as that of the rotating disc in the transitional region. The time smoothed circumferential velocity in the laminar region is in good agreement with the theoretical value of the free disc, irrespective of the Reynolds number of the approaching flow.

* Research Reactor Institute, Kyoto University