

アスペクト比の小さい Taylor 渦流れの UVP 計測 Velocity profile of The Taylor Vortex Flow with a Short Annulus by UVP

○正 河合秀樹(室蘭工大), 新部智由(室蘭工大), 正 木倉宏成(東工大), 正 高橋洋志(室蘭工大)
Hideki KAWAI, Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto-cho Muroran 050-8585, Japan
Tomoyoshi, NIIBE, Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto-cho Muroran 050-8585, Japan
Hiroshige KIKURA, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Japan
Hiroshi TAKAHASHI, Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto-cho Muroran 050-8585, Japan

Boundary effects with a short annulus of Taylor Vortex Flow (TVF) called Ekman boundary, are greatly related to the generation of the various modes in vortex structure, which is obtained even in the same Reynolds numbers. Some flows with these vortex structures are useful for cultivation of microorganism which is very weak in shearing flow, because it is said that a TVF has a mild flow characteristic even in higher Reynolds flows. In the present, the spatiotemporal velocity field in the higher Reynolds flow of TVF with a small aspect ratio is visualized and measured precisely by using ultrasonic velocity profiler (UVP) and discussed with the relationship between the flow structure and growth rate of the photo synthetic micro organism.

Key Words: Ultrasonic velocity profiler, Taylor vortex flow, Spatiotemporal measurement, Photo synthetic microorganism

1. 緒言

アスペクト比 (Γ) の小さい Taylor-Couette 渦流れ (TVF) は上下境界端に生じる Ekman 境界層の影響から, 多重安定モードを有することが知られる. その中でも, 特に $\Gamma < 1$ における上下固定端の TVF では特異的な流れ現象が見られるため, いろんな研究が行われてきた. 例えば Fister ら⁽¹⁾は, 数値解析と実験から, $\Gamma=1$ 近傍においては安定モードが Reynolds 数の増加にしたがって変異 1 セルモードから正規 2 セルモードに変化すること, また, $\Gamma < 1$ では流れは更に複雑になり, 比較的低 Reynolds 数から新たな振動モードが発生することなどが報告されている. その後も中村ら⁽²⁾や渡辺ら⁽³⁾の実験および数値解析によって, Twin 渦の存在やその振動について明らかにされた. このような低 Reynolds 数からの振動モードは, 例えせん断に弱い微生物の緩やかな攪拌混合など, 今後新たなバイオリアクターを設計する上で有益な指針を与えるものと期待される.

しかし, 実際のバイオリアクターでは, 培養液の性質などから高 Reynolds 数での攪拌混合が必要とされるケースが多く, このようなバイオリアクターを想定した TVF はほとんど検討されていない. また一回の処理量を多くしたい場合, 半径比 (η) の小さい装置の開発も今後重要になると思われる.

そこで本報告では $\Gamma=1$, $\eta=0.375$ の形状を有する TVF 装置を試作し, 高 Reynolds 数領域における速度分布を超音波ドップラ流速計 (UVP) によって測定した⁽⁴⁾. また, 同装置を用いて光合成微生物の培養実験を実施し, 流れとの関連について調べた.

2. 実験方法

実験装置は Fig. 1 に示される. アスペクト比 $\Gamma(H/d) = 1$, 内円筒半径 $R_1=28\text{mm}$, 外円筒半径 $R_2=75\text{mm}$, 半径比 $\eta (R_1/$

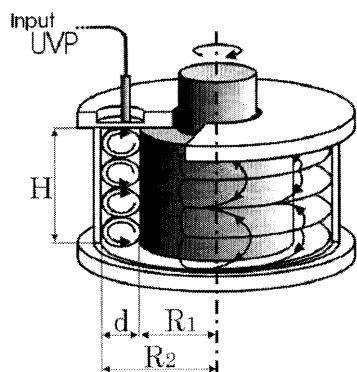


Fig.1 Taylor-Couette vortex flow

$R_2) = 0.375$ とした. 回転 Reynolds 数 (Re) は次式で定義される.

$$Re = (d R_1 \Omega) / \nu \quad (1)$$

ここで, Ω : 角速度, d : 内外円筒間隙 ($=R_2 - R_1$), ν : 流体の動粘性係数, H : 作動流体高さである. 作動流体には水を用いた.

本実験装置の内外円筒中心軸上向きを y 軸方向とし, 底面を $y=0\text{mm}$ とした. また半径方向を r 方向とし, 外円筒内面から半径座標内向き方向を x 方向とする.

2-1 可視化実験と数値シミュレーション 渦構造を把握するために可視化実験と数値シミュレーションを実施した. ただし, 両者とも高 Reynolds 数への対応は困難であるため, 流れを観察する上での参考データとした. 数値解析における流体の支配方程式は軸対称非圧縮 Navier-Stokes の式と連続の式であり, 粒子方程式は Werely ら⁽⁵⁾にしたがう混合系のモデルを応用した. 解析アルゴリズムには SMAC 法を使用し, 慣性項中の移流項は二次精度中心差分で近似した. 今回粒子としては直径 $80\ \mu\text{m}$ で質量が作動流体より若干大きいものを選定した.

2-2 UVP 計測 超音波パルスはトランスデューサー (TDX) から基本周波数 $f_0=8\text{MHz}$ で発射され, トレーサ粒子に反射して TDX にエコーバックされる. その際, トレーサ粒子の TDX 軸方向速度成分に応じたドップラ周波数がシフトされて返るため, 速度を高精度で計測することができる. このパルスの反射波は軸方向空間に分散された粒子分だけ存在す

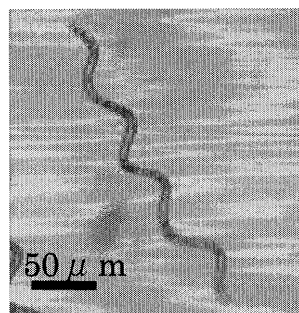


Fig.2 S.platensis

Table 1. Parameters for TDX(Transducer)

Basic frequency	8MHz
Ultrasonic beam diameter	2.5mm
Channel distance	0.87mm
Measurement points	128
Number of profiles	1024

Table2 SOT(for *Spirulina platensis*, AM M-135)

• F e S O ₄ ·7H ₂ O solution(0.1g/50ml)	5.0[ml]
• N a ₂ ·E D T A·2H ₂ O solution(8.0g/500ml)	5.0[ml]
• A5 solution	1.0[ml]
• M g S O ₄ ·7H ₂ O solution(20.0g/500ml)	5.0[ml]
• C a C l ₂ · 2H ₂ O solution(4.0g/500ml)	5.0[ml]
• N a C l	1.0[g]
• K ₂ S O ₄	1.0[g]
• N a H C O ₃	16.8[g]
• K ₂ H P O ₄	0.5[g]
• Distilled water	1.0[L]

るため、時空間同時計測が可能となる。トレーサには平均粒子径 80 μm のナイロン粒子を使用した。また、主な UVP あるいは TDX の仕様を Table1 に示した。

測定では粒子速度の TDX 軸方向成分がエコーバックされるため、その速度成分の TDX 軸上における空間分布が計測されることになる。本実験では底面から 3mm 上における半径方向分布と、外円筒から 3mm 内側位置での y 軸方向分布を測定した。この時計測される速度成分は、それぞれ半径方向速度成分と y 方向速度成分になる。

2-3 微生物による TVF 混合 UVP により流れを計測した後、実際の藻類光合成微生物を用いて培養した(Fig.3)。試供藻体は *Spirulina platensis* IAM M-135 株を使用した。*S.platensis* は高い光合成能力と栄養価を持つため、食用としても工業培養されている。Fig.2 に示すように幅約 5 μm×長さ約 500 μm の螺旋形状(長さ)をもち、流れに敏感でせん断に非常に弱い微生物である。培養液には SOT を使用し、その成分は Table2 に示される。水に対する濃度は低く粘度は殆ど水と同じである。実験はインキュベーター内で行い、培養液温度は 30°C、入射光照度は外円筒から 3.5klx、培養時間は対数増殖期にある 5 日間とした。また渦構造によっては藻体が沈殿するがあった。このため、沈殿物をそのまま放置して継続培養する実験を Normal 実験、一日に一回手動で沈殿藻体を掻き取る操作を加えた実験を Stirring-up 実験として、その影響について調べた。

本実験における培養は栄養条件の制限される回分培養に相当し、微生物は対数増殖期、直線増殖期、生育減衰期、定常期と推移する。前述のように、本実験ではこのうちの対数増殖期を培養期間とし、増殖速度の評価には比増殖速度 μ [day⁻¹]および濃度増加量 Q [g/(l·day)]を用いた。以下にその定義式を示す(ただし、本報告では Q は参考とする)。

$$\mu = \ln(C_t / C_0) / t \text{-----(1)}$$

$$Q = (C_t - C_0) / t \text{-----(2)}$$

ここで、 C_0 は初期濃度[g/l]、 C_t は培養時間 t [day]における藻体濃度[g/l]を表す。また、沈殿・凝集体の割合を表す指標として沈殿率 s [%]を次式で定義する。

$$s = (C'_t - C_t) / C'_t \text{-----(3)}$$

ここで、 C'_t は最終日攪拌後の藻体濃度[g/l]を表す。

3. 数値解析および可視化実験結果

Figs.4,5 は $\Gamma=1$, $\eta=0.375$, $Re=400$ における渦挙動の時間的変化をコンピュータによってシミュレートした結果である。内円筒加速後、上下境界端が幾何学的対称性を持つことから、渦自身も最初は正規 2 セルモードが発生する。しかし、この Reynolds 数領域では安定な渦は変異 1 セルモードであるため、まもなく正規 2 セル渦構造は崩れ、一つの渦が徐々

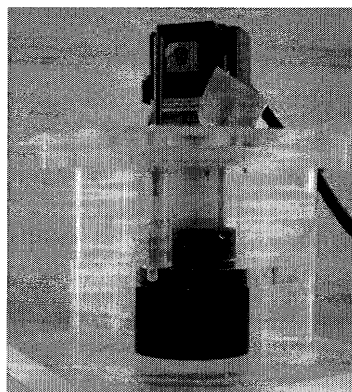


Fig.3 TVF device with microorganism ($\Gamma=1$, $\eta=0.375$)

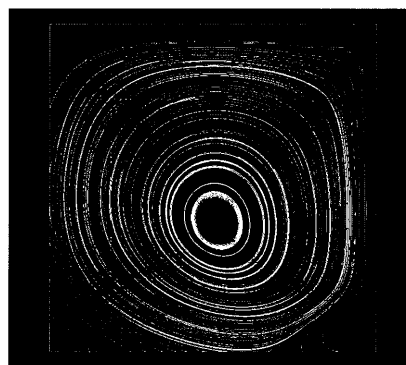


Fig.4 Computer simulation of Anomalous 1 cell mode ($\Gamma=1$, $\eta=0.375$, $Re=400$)

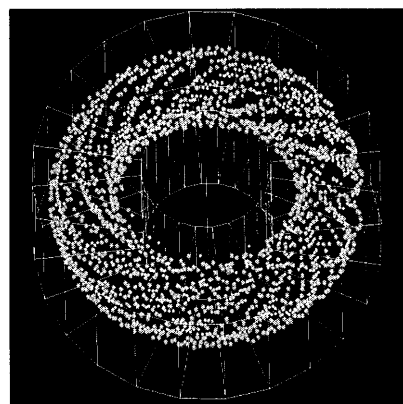


Fig.5 3D Computer simulation of Anomalous 1 cell mode ($\Gamma=1$, $\eta=0.375$, $Re=400$)

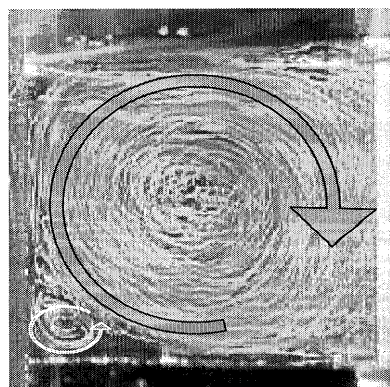


Fig.6 Visualization of anomalous 1 cell mode ($\Gamma=1$, $\eta=0.375$, $Re=5,000$)

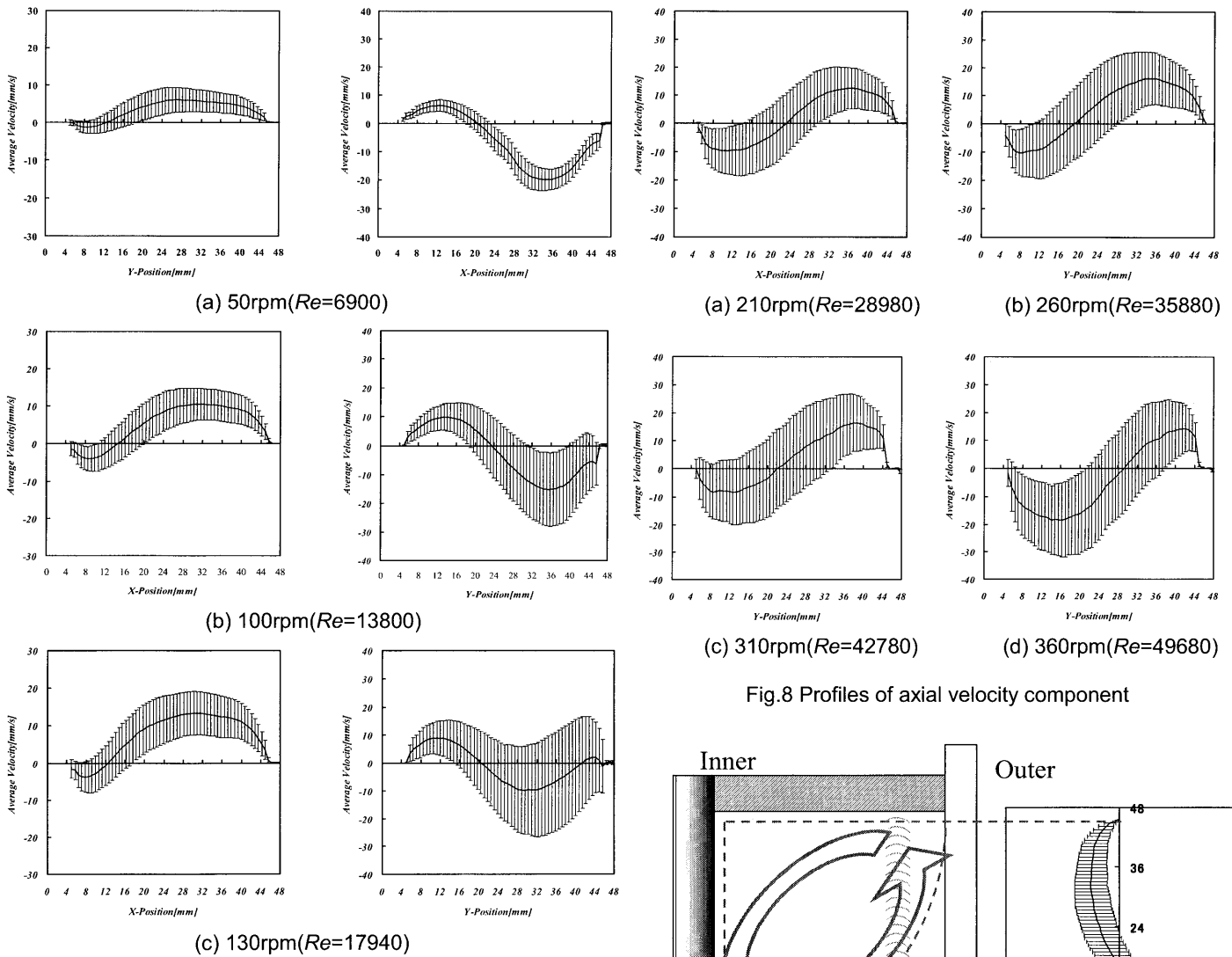


Fig.8 Profiles of axial velocity component

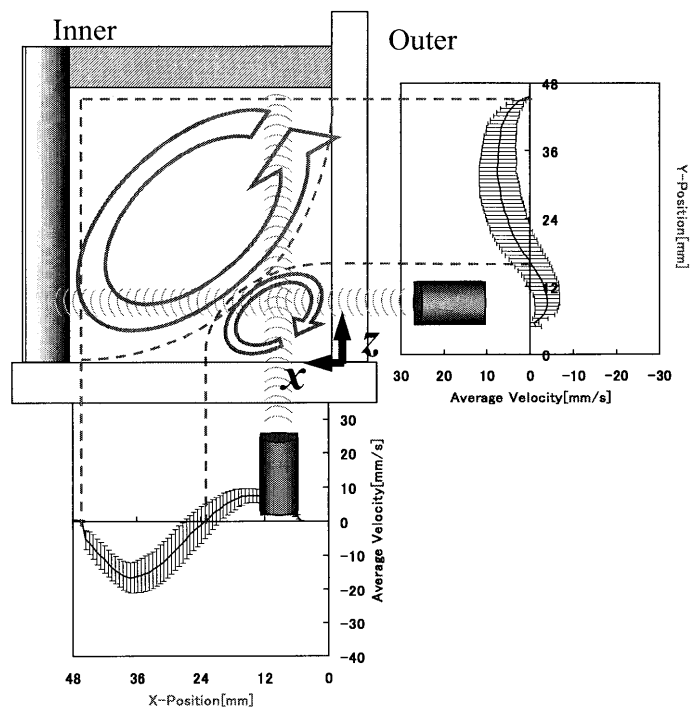


Fig.9 Schematic diagram of vortex flow structured from two velocity components

Fig.7 Profiles of axial and radial velocity component

に矮小化されて縮小する。Fig.4 では矮小化された渦が下端のコーナー部に追いやられて行く様子が捉えられている。ただ、この渦は消滅することなく、下端コーナーに常時存在することが示される。これは中村らが報告するエクストラ渦と判断される。Fig.5 は、このような変異 1 セルモードが形成された後、粒子を投入し、粒子の流れ挙動をシミュレートした結果である。粒子はトーラス上を描いており、一つの周回軌道を整然と流れる結果が得られている。蛍光塗料を入れた実際の流れにおいても、比較的低 Reynolds 数では粒子はある程度一定の軌道上を描いている様子が観察され、混合領域と非混合領域が明確に分かれる孤立混合領域が確認されている。

Fig.6 は $Re=5000$ における流れの可視化結果を示した。 Re 数の増加により流れは大きく乱れ、様々な振動成分が発生するが、基本的な主渦の輪郭は $Re=400$ の場合と同じで変異 1 セルモードであることが確認された。またその形成パターンも低 Reynolds 数の場合と同じで、最初正規 2 セルモードが形成されて徐々に一方の渦が矮小化され、下端コーナーに追いやられてエクストラ渦へと変化して行く。

Pfister らの変異 1 セルモードの形成過程、あるいは中村らのエクストラ渦に注目した報告では、 $\eta=0.6$ 近傍、 $Re=1500$ 以上の流れにおいて安定モードは正規 2 セルモードであることが示されているが、 $\eta=0.375$ では $Re=5000$ の高 Re 数領域でも依然変異 1 セルが主モード、すなわち安定モードである。

4. 実験結果

可視化実験と数値解析の結果を参考に、 $Re>10,000$ の渦挙動について、流れの速度分布を UVP で計測し、その結果を Figs.7~9 に示した。Fig.7 には $y=3\text{mm}$ における半径方向速度成分の半径方向分布と、 $x=3\text{mm}$ での y 軸方向速度成分の y 軸方向分布をそれぞれ左右に示した。また、Fig.7 には $x=3\text{mm}$ における y 軸方向速度成分の y 軸分布を $Re>20,000$ の場合に

ついて示した。いずれも図中の速度分布は平均流速分布と、その分布位置における振動成分の大きさを併記している。各方向における渦領域の存在は平均速度の大きさの正負で判断され、乱れの度合いは振動成分の大きさから類推することができる。例えば Fig.7 の結果を参考に渦の模式図を Fig.9 に描いた。この図から可視化実験で得られた渦構造と同じ下端外円筒コーナーにエクストラ渦が存在することがわかる。すなわち、高 Re 数領域においても UVP で計測された平均流速分布から渦構造の Re 数に対する変化を推測ことができ、目視では観察困難な渦の発達過程を追跡することができる。この結果、渦の振動成分は Re 数の増加とともに、特に主渦側で急激に増加している。また装置下端のエクストラ渦は y 方向に対してあまり大きな変化は見せないものの、 x 方向へは徐々にその領域を拡大させ、発達して行く様子がわかる。次に Fig.8 では $Re > 20,000$ において主渦およびエクストラ渦の振動成分がより大きくなっており、かなりの乱流状態が計測されるものの、 y 方向速度成分の平均流速は明確に捉えられており、 Re 数の増加に伴ってエクストラ渦は徐々に y 方向にも発達し始め、再び正規 2 セルモードに戻る様子が確認された。

以上 UVP の計測から $\eta = 0.375$ においては、より高い Reynolds 数で正規 2 セルモードに漸近することがわかった。次にこの系を用いて、光合成微生物を攪拌培養した結果を Fig.10 以降に示した。Fig.10 は、 $Re = 2760$ において装置を下面から撮影した結果である。培養時間は 5day であり、対数増殖期の範囲で撮影した。これより、リング状の微生物沈殿が明確に示されている。UVP の計測結果から、この Reynolds 領域において流れは構造上変異 1 セルモードであることがわかる。そして、このリングがエクストラ渦と主渦の境界に合致することからも、この状態はエクストラ渦を含んだ変異 1 セルモードであり、その渦構造の中で微生物が培養されていることになる。このリング形状は $Re = 20,000$ まで確認され、その後 Re 数の上昇とともに消えて行ったことから、現象的には UVP の実験結果と良好に一致する。Fig.11 には培養における Normal 実験と攪拌 Stirring-up 実験において Re 数に対する増殖速度 μ の違いを示した。これより $Re < 20000$ では 2 つの条件によって増殖率に明確な違いが出ており、攪拌を伴う方が高い増殖率を示した。すなわち $Re < 20000$ の流れは変異 1 セルモードによるエクストラ渦を伴う流れのため、微生物がエクストラ渦内に沈殿し、増殖率が低下している可能性がある。 $Re = 20000$ では淀み領域における沈殿がなくなる状態で、渦構造の変化が生じる Re 数であることから Normal と Stirring が急速に漸近している。これを更に裏付ける結果が、Fig.12 である。Fig.12 には Re 数に対する増殖率 (Normal 実験) と沈殿率の関係を示した。これより沈殿率は Re 数とともに急激に減少し、増殖率がそれに呼応して大きく増加する現象が見られる。すなわち装置底部のエクストラ渦が徐々に発達し、それに伴って沈殿率が急激に少なくなることが予想される。

5. 結言

アスペクト比 $\Gamma = 1$ 、半径比 $\eta = 0.375$ における TVF 培養装置を試作し、 $Re < 20000$ までの流れを UVP によって軸方向および半径方向の、各々軸方向速度成分、半径方向速度成分を測定した。これより流れは変異 1 セルモードから徐々に底面にあったエクストラ渦が発達し、正規 2 セルモードになる現象が測定された。この装置を使って光合成微生物を培養した結果、 $Re = 2000 \sim 3000$ では底面にエクストラ渦と主渦の境界を示すリング状の沈殿微生物が明確に現れ、UVP の測定結果が裏付けられた。

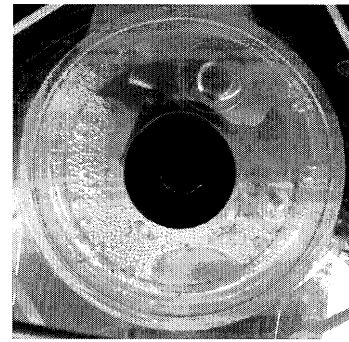


Fig.10 Sedimentation ring at the bottom plane (20rpm, $Re = 2760$)

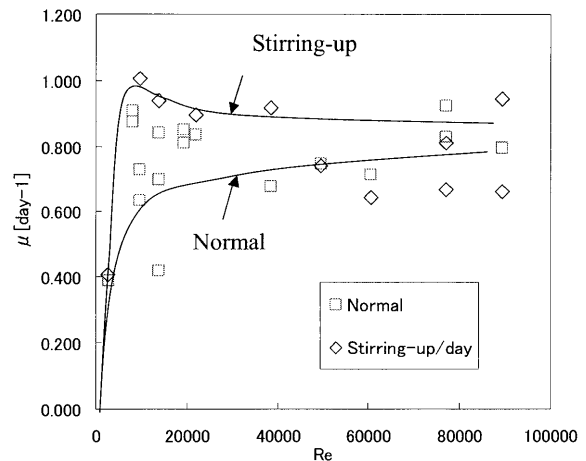


Fig.11 Specific growth rate with normal and stirring-up experiments

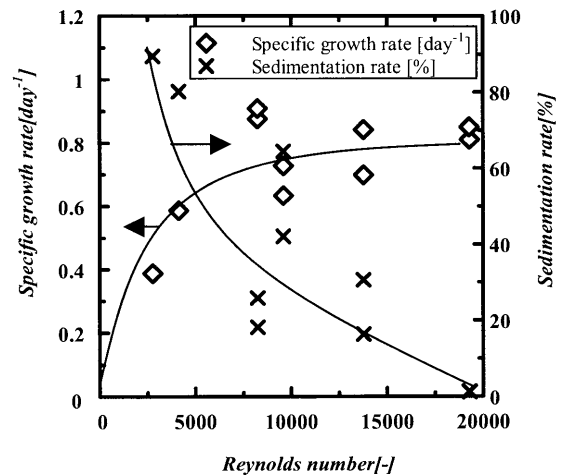


Fig.12 Specific growth rate and sedimentation rate

引用文献

- (1) Pfister G, Schmidt H, Cliffe K.A. and Mullin T., *J. Fluid Mech.*, 191 (1988), 1-18.
- (2) Nakamura, I., Y. Toya, S., Yamashita and Y Ueki, *JSME*, 56, (1990), 49-55.
- (3) Watanabe, T., H. Furukawa and Y. Toya, *J. of Visualization*, 10, (2007), 309-316.
- (4) Takeda, Y., *J. Fluid Mech.*, 389 (1999), 81-88
- (5) Wereley, S.T. and R.M. Lueptow, *Phys. of Fluids*, 11, (1999), 325-333.