

アスペクト比の小さい固液混合 Taylor 渦の速度計測と混合状態の把握

The measurement of TVF with small aspect ratio

○学 新部智由 (室蘭工大) 正 河合秀樹 (室蘭工大)
正 高橋洋志 (室蘭工大) 正 木倉宏成 (東工大)

Tomoyoshi NIIBE, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho Muroran, 050-8585, Japan
Hideki KAWAI, Muroran Institute of Technology, Hiroshi TAKAHASHI, Muroran Institute of Technology,
Hirosige KIKURA, Tokyo Institute of Technology.

In this study, our purpose is to obtain instantaneous and mean velocity profiles in a Taylor-couette vortex flow(TVF) by using a UTDC device based on a ultrasonic generator. The experiment was carried out with a small aspect ratio where the Ekman boundary layer was not neglected. The device has a radial ratio of 0.375, aspect ratio of 3 and the gap length between the inner and outer cylinders of 25mm. As the result, the velocity profiles and their absolute values were in good agreement with those obtained by the Ultrasonic velocity profiler (UVP). This measurement system was applied to the solid-liquid phase flow experimentally, and well measured even in the opaque dilute solution.

Key Words: Taylor-couette vortex flow, UTDC, UVP, Isolated mixing region

1. はじめに

同軸二重円筒の内円筒と外円筒の間に流体を満たし、内円筒もしくは外円筒に回転速度を持たせると軸方向にセル状の流れが複数個積み重なるように発生する現象が見られる。この渦は Taylor-couette Vortex Flow (TVF) として知られている。TVF はジャーナル軸受などの流体を用いる機械の振動や騒音を生じさせる原因となる。しかし、局所的な高せん断が少なく、攪拌ムラが防止できる特徴も有する。これを利用してせん断に弱い細胞組織を効率よく培養するバイオリアクターや機能性たんぱく質の分離濃縮装置などへの応用、濾過におけるフィルターの目詰まり防止を利用した汎用濾過装置の開発が期待されている。

最近の TVF における乱流スペクトル遷移に関する研究は UVP(Ultrasonic Velocity Profile-monitor)による武田らがよく知られている⁽¹⁾。そこでは非接触高精度の速度分布が時空間同時計測され、無限遠 Taylor 渦における特異的なスペクトルやカオスの挙動が明らかになっている。

一方工学的装置の設計においては上下に境界端を有する有限アスペクト比 Taylor 渦の挙動も重要である。我々は、有限アスペクト比 TVF に UVP を適用し、Ekman 境界の影響を受けた様々な渦モードの測定を試み、一部カオスの挙動も捉えられた。

UVP は速度の空間分布を計測できる有用な装置であるが、測定限界が存在し、水ベースでの高レイノルズ数領域での測定が困難である。そのため、UVP よりも時間分解能がよく、

高レイノルズ数への応用が可能な自己相関法により流れを解析する UTDC(Ultrasonic Time-Domain Correlation:UTDC)が注目されている⁽²⁾。この方法は、大きくパルスレーザとコンバーター、プログラムで構成されており、比較的コンパクトにすることが可能である。

ここでは、比較的濃度の薄い固液混合系の TVF に UTDC を応用する。ただし、上下境界端を有し、アスペクト比の小さい TVF を対象とした。また UTDC の応用として、TVF の特徴である孤立混合現象形成の有無も測定可能か言及する。

2. 実験装置と実験条件

2-1 TVF 発生装置 Fig.1 に TVF 装置を示す。図中 R_1 は内円筒半径、 R_2 は外円筒半径、 H はテスト部の高さを表す。実寸法は $R_1=15$ [mm]、 $R_2=40$ [mm]、 $H=75$ [mm]。これより内外円筒間半径 $d=R_2-R_1=25$ [mm]、アスペクト比 $\Gamma=H/d=3$ 、半径比 $\eta=R_1/R_2=0.375$ となる。また、レイノルズ数は $Re=dR_1\Omega/\nu$ (ν : 動粘度、 Ω : 内円筒の角速度) で定義される。外円筒は固定され、内円筒はモータに付属のコントローラーの制御により一定回転する。作動流体はグリセリン水溶液 68wt%を用いた。TVF の時空間流速分布は UVP、並びに UTDC で計測する。

2-2 TVF の渦モードについて 上下境界端を有する低アスペクト比の TVF 発生装置において、渦形成時の内円筒の加速度やレイノルズ数によって TVF は様々なモードが発生する。ここでは可視化実験によって得られた渦モードを中村ら⁽³⁾にしたがって簡単に説明する(Fig. 2)。ただし上下境界端を有する系に限定する。Fig. 2 の実験条件は $\Gamma=3$ 、 $\eta=0.667$ 、 $Re=380$ とし、平均粒子径約 $100\mu\text{m}$ のアルミナ粒子を用いた。図中右側が内円筒である。渦モードは大きく正規モードと変異モードに分別される。図中 N は正規モード(Normal)、A は変異モード(Anomalous)を表している。正規モードは上下境界端において渦の流れ方向が外側から内側すなわち外円筒側から内円筒側に流れるものであり、それ以外の流れを変異モードという。変異モードは渦形成の際、内円筒を急加速した場合に確率的に発生するものであり、正規モードに比べると渦の流れが不安定である。

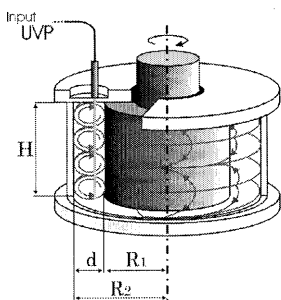


Fig.1 Test section of TVF
($\Gamma=3$, $\eta=0.375$)

また、これら正規モード、変異モードは渦形成時の加速度の違いにより主モード、二次モードに分けることができる。主モードは渦を安定させた状態で内円筒を徐々に目的の回転数に合わせる方法であり、二次モードは目的の回転数に比較的急加速度で合わせる方法である。正規主モードが $\Gamma=1$ を除いて最も安定である。

2-3 孤立混合領域について スラリーなどの固液混合相攪拌において TVF は有望である。この場合、TVF 内部でのスラリー粒子と作動流体との混合性能が重要になる。しかし、TVF の特徴として作動流体のレイノルズ数、あるいは固体粒子と作動粒子の密度比、固体粒子の大きさや形状によって、固体粒子が渦内部まで対流混合されない、いわゆる孤立混合領域を持つことが知られている (Fig. 3)。Fig. 3-(a) のように外周をあるバンド幅で回るようなリミットサイクルと呼ばれるものや、Fig. 3-(e) (f) のように渦内部もしくは渦外周部を回るものが確認されている。UTDC はトレーサー粒子に超音波を照射することで流れ場の流速を測定するため、作動流体内の粒子が少ないとパルス波が反射して戻ってこない場合がある。そこで、UTDC を用いて粒子が極端に少なくなっている部分を見つけることで、孤立混合領域の存在を確認出来るため、その形成の有無を確認できると考えられる。

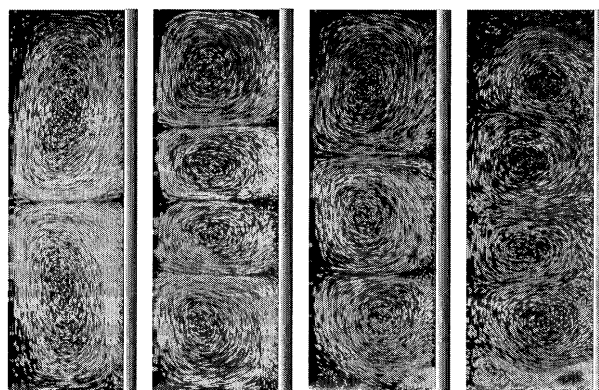
2-4 超音波流速分布計 (UVP) 測定対象の流体にトレーサー粒子を混入し、超音波のパルスを超音波トランスデューサ (TDX) から測定流体に向けて発射すると粒子にパルス波が反射し TDX に戻る。この時得られたパルスが発射されてからエコーが戻ってくるまでの時間とドップラー効果を伴い基本周波数より変化した受信超音波周波数から流速分布を求める測定原理が超音波ドップラー流速分布測定法 (UVP) である。

UVP は Met-Flow 社製 UVP model X3PSi, TDX はジャパンプロンプ社製超音波プローブ (基本周波数 8MHz, 振動子直径 3mm) を用いた。68wt% グリセリン水溶液中での音速は 1820m/s である。

2-5 UTDC による流速分布計測 測定流体に TDX からパルスを照射し、流体中のトレーサー粒子から反射したパルスを受信して流速分布を求める。照射したパルス信号と受信したパルス信号の類似性から、時間遅れを求め、流速を算出する。すなわち、UTDC は最高 2 つのパルス波から速度分布を得ることができる。本実験では渦流れの定常状態を UVP と比較するため、5 つのパルス波から得られた 4 個の速度分布のデータを 1000 個集め、平均速度分布を算出した。パルスレーザは Imaginant 社製 DPR300, TDX はジャパンプロンプ社製超音波プローブ (基本周波数 8MHz, 振動子直径 3mm) を用いた。

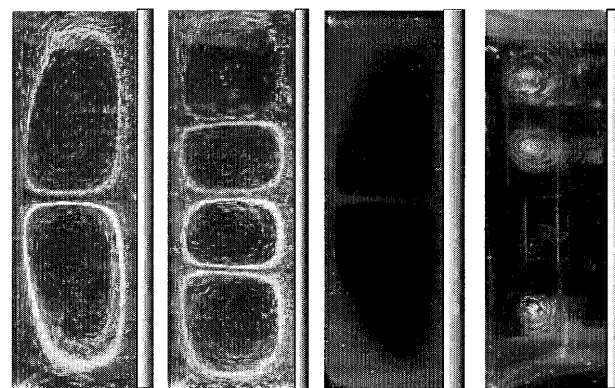
3. 実験方法

Fig.4 に UTDC システムと渦発生装置で構成される実験装置の概要を示す。UVP, UTDC との速度分布の比較においては、内円筒付近の速度場を測定するため、TDX の設置位置を内円筒から半径方向 6mm の装置底部に垂直に固定する。なお、TDX 設置位置においては超音波の透過率を上げるためアクリルの厚さを 1mm 程度に加工している。孤立混合領域を測定する際には TDX を内円筒から半径方向 3,6,9,12.5,16,19,22mm の装置上部に固定する。装置上部の設置点において、超音波がアクリルを通過する際の影響を考え、測定位置のアクリルを TDX の径に合わせて貫通させ測定を行なう。トレーサー粒子であるナイロンパウダーは比重が 1.02 と 68wt% グリセリン水溶液より低めであるが、TVF の作用により攪拌され、ほぼ流体の流れに沿うものとして考える。



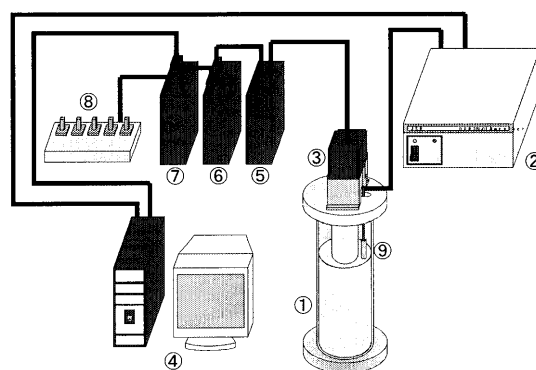
(a) N2-cell (b) N4-cell (c) A3-cell (d) A4-cell

Fig.2 Various vortex structures observed at $\Gamma=3$
($\eta=0.667$, $Re=380$)



$\eta=0.667$ $\eta=0.667$ $\eta=0.375$ $\eta=0.375$
 $Re=400$ $Re=450$ $Re=400$ $Re=500$

Fig.3 Isolated Mixing Region



1. Test section, 2. Pulser receiver, 3. Motor,
4. Personal computer, 5. servo driver, 6. controller, 7. AC
power supply, 8. upper controller, 9. Transducer

Fig.4 Experimental setup

4. 実験結果および検討

Fig.5, Fig.7 に UVP によって得られた各渦モード(Normal 2-cell mode, Normal 4-cell mode)の平均流速分布を示す。ただし、速度は軸方向成分であり、鉛直上向き方向を正とする。ここでは比較のため、安定した正規モードのみとする。これより、それぞれモードに対応した渦個数が捉えられている。

速度分布の絶対値に関しては N2 セル(Normal 2-cell)モードより渦個数が多い N4 セル(Normal 4-cell)モードでやや小さい傾向を示した。ここでは比較のため、標準偏差も示している。

Fig.6, Fig.8 に UTDC によって得られた Taylor 渦の速度分布を示す。この結果より、セルの個数に対応した山の個数が見られ、渦が上下境界端において幾何学的対称性を持っている

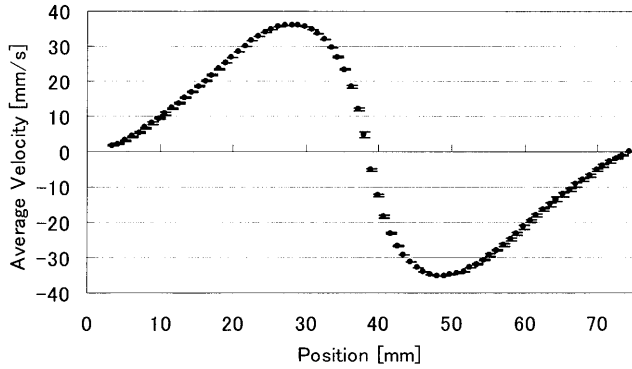


Fig.5 Mean velocity profile at Re=500 by UVP

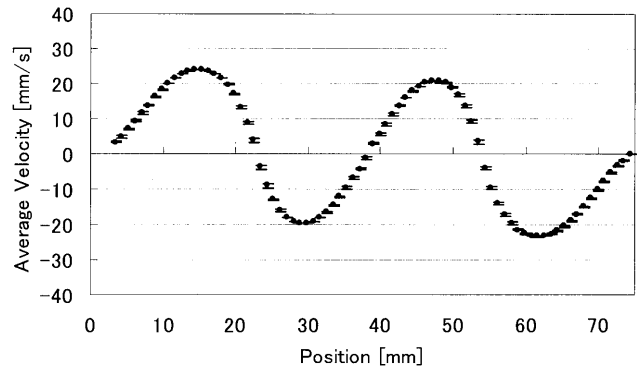


Fig.6 Mean velocity profile at Re=500 by UTDC

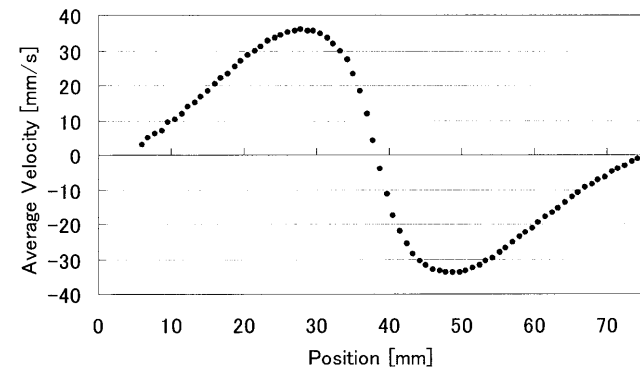


Fig.7 Mean velocity profile at Re=1500 by UVP

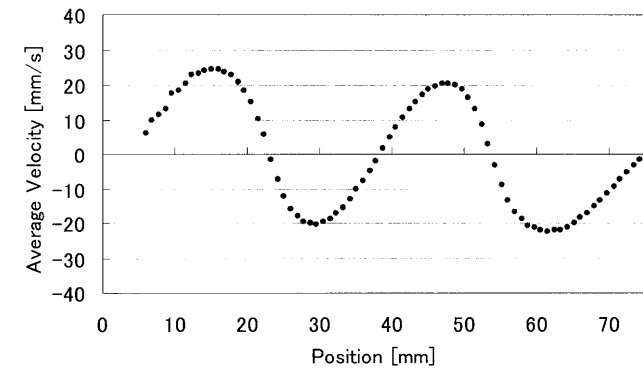
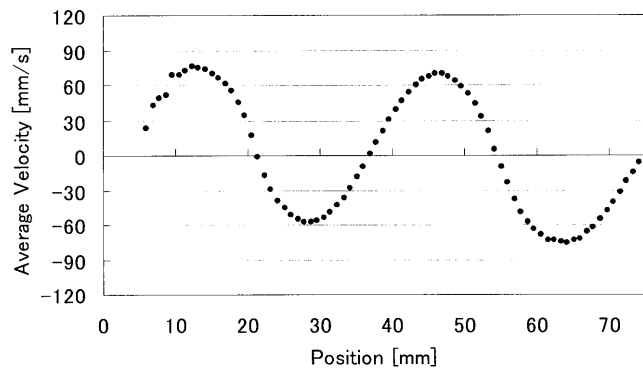
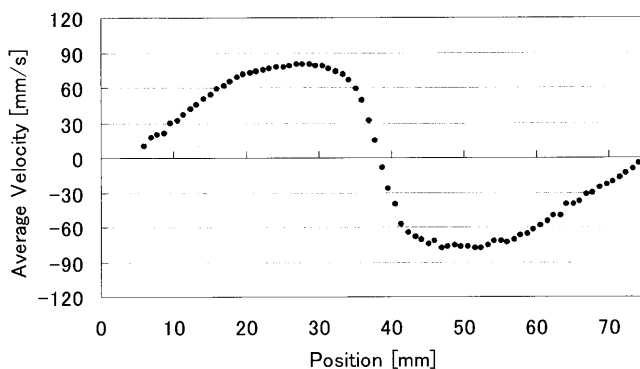
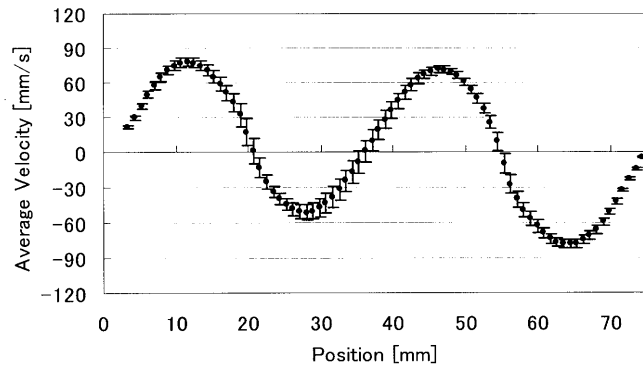
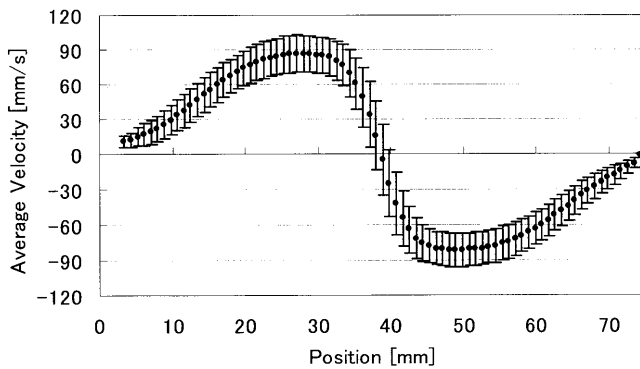
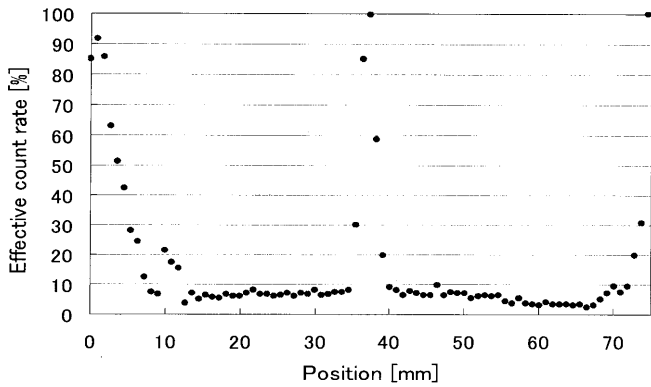
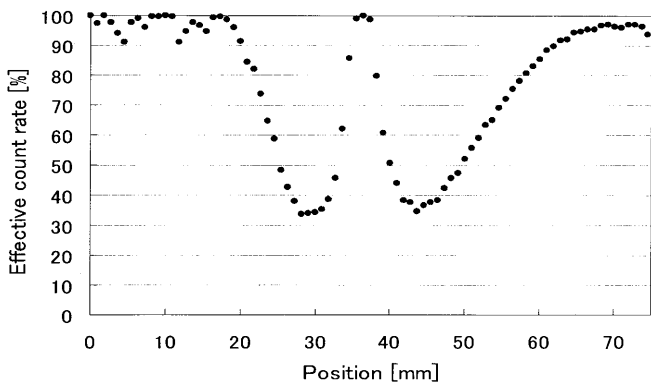


Fig.8 Mean velocity profile at Re=1500 by UTDC

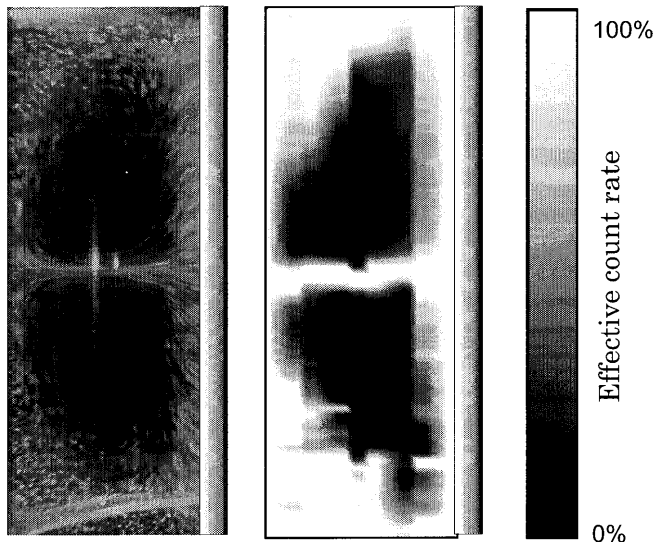




(a) 3mm distance radially from the edge of inner cylinder



(b) 22mm distance radially from the edge of inner cylinder

Fig.9 Effective count number greater than 0.8 in auto-correlation coefficient ($\eta=0.375, Re=300$)Fig.10 Isolated Mixing Region
($\eta=0.375, Re=300$)

ことがわかる。また、速度分布図から渦モードが判別できる。UVP による速度分布図と比較してもほぼ同じ形状とみることができる。

Fig.9 に UTDC によって得られた N2 セルモードの孤立混合領域の結果を示す。縦軸に自己相関が得られたデータ数、横軸に測定部深さを示している。Fig.9-(a), (b) はそれぞれ内円筒から 6mm, 22mm の位置での結果である。これより、粒子の多い場所、少ない場所が確認できる。Fig.10 に UTDC の各測定点 4000 個中、自己相関係数が 0.8 以上のカウント数をグレースケールでプロット化したもの(右)を示す。左側は可視化を行った結果である。これより光学系に頼ることなく孤立混合領域を確認することができる。

5. 今後の展開 (孤立混合系への応用の可能性)

本実験では懸濁粒子が渦内部に入らない孤立混合領域を測定したが、リミットサイクル等の渦において孤立混合領域が安定して形成されるまで数分の時間がかかる。そこで UTDC を用いて短時間の計測を連続的に行なうことによってその形成過程を調査することが可能である。また、孤立混合領域は比較的低レイノルズ数の安定した TVF で発生するものであり、レイノルズ数の上昇に伴いその領域が変化していく。そこで、レイノルズ数を変化させることによる孤立混合領域の崩壊過程も測定可能である可能性がある。

6. 終わりに

アスペクト比 $\Gamma=3$ 、半径比 $\eta=0.375$ の TVF 発生装置において、UTDC による速度分布の測定を試みた。この結果、 $Re=500, 1500$ の実験において、UVP と UTDC を比較した。これより N2 セル、N4 セルとも、流速分布およびその絶対値において UVP とほぼ同様の結果が得られた。

レイノルズ数 $Re=300$ において孤立混合領域の測定を試みた。半径方向に数点測定することにより光学系に頼ることなく孤立混合領域の形成の有無を確認できた。

今後、より速い乱流場での計測の可能性について調べていく。また他の孤立混合領域を形成する TVF の測定の可能性についても調査していく。

引用文献

- (1) Y.Takeda, *J.Fluid Mechanics*, Vol.389(1999),81
- (2) 山中玄太郎, 日本機械学会熱工学講演会論文集 2002
- (3) 中村・ほか3名, 機論, 54-505,B, (1988),2425