

超音波速度計測によるアスペクト比の小さいTaylor 渦流れの解析

Ultrasonic measurement of Taylor-Couette vortex flow with small aspect ratio

○正 河合 秀樹 (室工大) 学 小林 広精 (室工大)

正 木倉 宏成 (東工大) 正 有富 正憲 (東工大)

Hideki KAWAI, Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto-cho, Muroran, Hokkaido
 Hiroaki KOBAYASHI, Muroran Institute of Technology
 Hiroshige KIKURA, Tokyo Institute of Technology, Ohokayama2-12-1, Meguro-ku, Tokyo
 Masanori ARITOMI, 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 an ultrasonic measurement system. 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 0.667 or 0.375, aspect ratio of 3 and the gap length between the inner and outer cylinders of 25mm. The mean velocity profiles and their absolute values were in good agreement with those obtained with 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.

Keywords : Taylor-Couette vortex flow, UTDC, UVP, small aspect ratio, Ultrasonic measurement

1 はじめに

Taylor-Couette Vortex Flow (TVF) は、局所せん断が少ないため、せん断に弱い細胞組織を含むバイオリアクターの攪拌や、血液濾過システムなどへの応用が期待されている。また、TVF は乱流へのスペクトル遷移現象としても知られることから、軸方向無限遠のTVF は従来から多くの研究がなされている。中でも、武田らによる超音波ドップラー流速計(UVP; Ultrasonic Velocity Profile-monitor)を用いた研究では、速度分布が時空間同時計測され、非接触高精度のもとカオス挙動の解明に大きな前進が見られる⁽¹⁾。

一方、工学的にはコンパクトな装置設計の必要性から、上下境界端の影響を考慮する有限アスペクト比 TVF の解析も重要である。ここではEkman 境界層の影響のため、同じ Reynolds 数(Re 数)でも様々な渦モードが発生し、その挙動は複雑である(Fig.2)。また医療機器分野では、単相流のみならず血液など不透明な固液混相流の解析も重要になる。このような背景から、本解析では、固液系を意図した有限アスペクト比 TVF の流動挙動を、超音波計測法 (UVP 並びに超音波時間領域相関法; Ultrasonic Time-Domain Correlation)⁽²⁾を用いて解析する。Ultrasonic Time-Domain Correlation は以下 UTDC

と略す。

2 実験装置並びに実験条件

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。代表寸法として $R_1=15[\text{mm}]$ 、 $R_2=40[\text{mm}]$ 、 $H=75[\text{mm}]$ を記した。この場合、内外円筒半径差 $d=R_2-R_1=25[\text{mm}]$ 、アスペクト比 $\Gamma=H/d=3$ 、半径比 $\eta=R_1/R_2=0.375$ となる。Reynolds 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、内円筒は一定回転する。作動流体はグリセリン水溶液 68wt%を用いた。

Fig.2 には、本実験装置によって得られた $\Gamma=3$ における各種渦モード (セル) を示した。ただし $\eta=0.667$ である。左から(a)正規 2セル、(b)正規 4セル、(c)変異 3セル、(d)変異 4セルモードである。上下固定境界では、幾何学的対称性から偶数個のセルが安定で、 $\Gamma=3$ の場合、正規 2セルモードが最も安定である⁽³⁾。

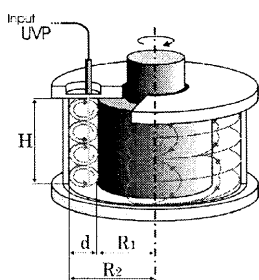
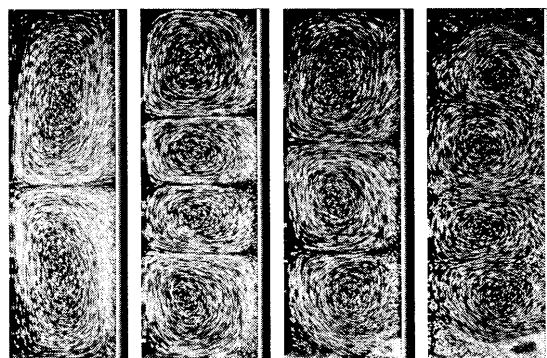


Fig.1 Test section of TVF
($\Gamma=3$, $\eta=0.375$)



(a) N2-cell (b) N4-cell (c) A3-cell (d) A4-cell
 Fig.2 Various vortex structures observed at $\Gamma=3$
 ($\eta=0.667$, $Re=380$)

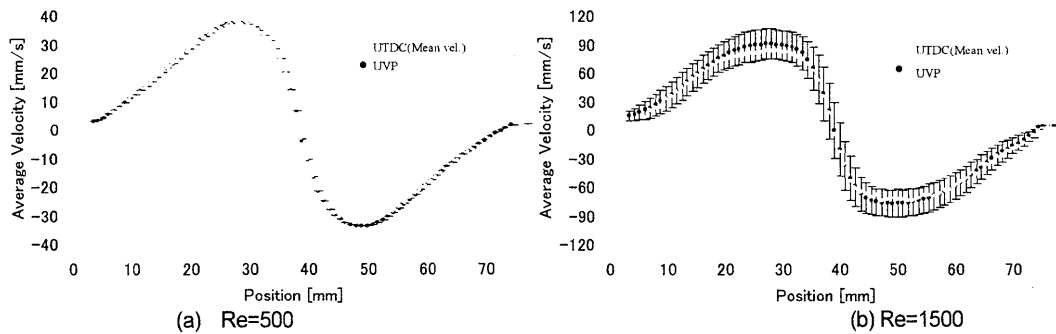
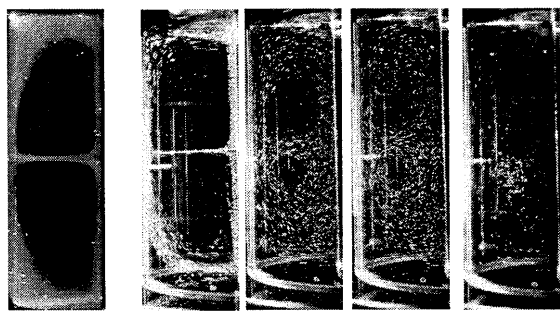


Fig.3 Comparison between the velocities with UTDC and UVP

($\Gamma=3$, $\eta=0.375$, 2cell mode, 6mm distance from the inner cylinder)



(a) Florescent (b) Nylon particles($\phi 80 \mu m$)

Fig.4 Particle behaviors with time in TVF($Re=300$, $\eta=0.375$)

2-2 超音波流速分布法 (UVP 並びに UTDC) UVP では、超音波パルスをトランスデューサ(TDX)から発射し、トレーサ粒子(Nylon 粒子 $\phi 80 \mu m$, 比重 1.02)によってエコーバックされた時間とドップラシフト周波数から流速分布を求める。また UTDC では同様の信号の自己相関を取ることで流速分布が求められる。本実験の UTDC は 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、その平均速度分布を算出した。UVP は Met-Flow 社製 UVP model X3Psi で、TDX はジャパンプロー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。パルサレーザは Imaginant 社製 DPR300 で、他は UVP と同様である。68wt%グリセリン水溶液中での音速は 1820m/s である。

3 実験結果

Fig.3 には、それぞれ、 $Re=500, 1500$ における正規 2 セルモードの軸方向平均流速分布を示した。ここで速度は軸方向成分を表し、鉛直上向き方向を正とする。半径方向の TDX 設置位置は内円筒から 6mm である。目下 UTDC は平均流速の計測に限定されるが、準周期解領域($Re=1500$)においても UVP と良好に一致していることから、その高精度が確認される。

Fig.4 では固液混合系 TVF を想定し、作動流体に蛍光粒子($\phi 1 \sim 5 \mu m$)を投入したもの[Fig.4(a)]と、Nylon 粒子($\phi 80 \mu m$)を投入したもの[Fig.4(b)], それぞれの混合状態を示した。粒子はともに外円筒近傍から注入した。これより、粒子径の小さい蛍光粒子では $t=120min$ 経過しても粒子は TVF の外周軌道を回るだけであり、渦中心方向に混合されることなく明確な孤立混合領域が形成された。しかし、粒子径の大きい Nylon 粒子では、粒子は徐々に渦中心に向かうことが確認され、特に $t=120min$ における下側セルでは、粒子が渦中心近傍にのみトラップされる現象が捉えられた。Nylon 粒子は作動流体よりも比重が小さいため、時間経過とともに浮力によ

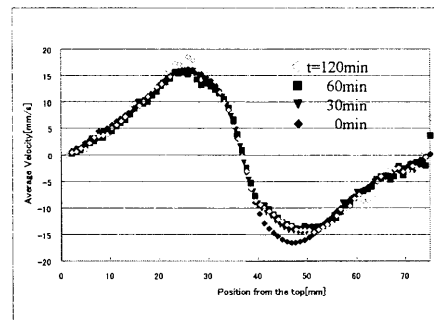


Fig.5 Velocity profiles with nylon particles under the same condition as Fig.4

って上昇するが、一对のセル間から半径方向に噴出する流れは、下方から上昇する粒子の運動を阻み、下側セル内でトラップする能力があると考えられる。

この現象に Fig.3 と同様の条件下で UTDC を適用させ、平均速度分布を測定した結果を Fig.5 に示す。これより、 $t=30min$ 以降で、下側セルの渦中心近傍の速度分布が急激に減少することがわかる。この領域では粒子密度が局所的に高くなるため、粒子速度が遅くなるようであるが、通常の TVF では粒子が濃厚状態になっても速度分布に殆ど影響されないことから、例えば凝集など、何らかの固体粒子同士の変化が生じているものと推測される。

4 おわりに

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。 $Re=500, 1500$ の測定結果を UVP と比較し、N2 セルの平均流速分布において UVP とほぼ同様の精度が得られることを確認した。これより UTDC を $Re=300$ における固液混相流に適用させ、孤立混合領域にトラップされる粒子群の速度分布が低くなることを捉えた。濃厚系の TVF においても渦中心領域で速度分布はほとんど影響されないことを考えると、本孤立混合領域での粒子間挙動は特異で更に解析する必要がある。

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