

アスペクト比の小さい Taylor 湧流れにおける超音波を利用した速度計測

Ultrasonic 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,
Hiroshige KIKURA, Tokyo Institute of Technology,
Hiroshi KUDOH, Muroran 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 pulser receiver 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 the ones 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 vortex flow, Pulser receiver, UVP

1.はじめに

最近の TVF(Taylor Vortex Flow)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 湧における特異的なスペクトルやカオス的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 湧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、⁽²⁾一部カオス的挙動も捉えられた。

UVP は速度の空間分布を計測できる有用な装置であるが、まだ高価であり、その普及には時間要すると思われる。そのため、自己相関法により速度分布を計測する超音波パルサレシーバー法が注目されている。この方法は、比較的廉価であり、固液混合系への応用も可能である。

ここでは、比較的大らうな固液混合系の速度分布計測にパルサレシーバー法を応用し、UVP と対比してみる。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。

更にはパルサレシーバーの応用として、TVF の特徴である孤立混合現象への計測の可能性についても言及する。

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 $R_1=15[\text{mm}]$ 、 $R_2=40[\text{mm}]$ 、 $H=75[\text{mm}]$ 。これより内外円筒間半径 $d=R_2-R_1=25[\text{mm}]$ 、アスペクト比 $\Gamma=H/d=3$ 、半径比 $\eta=R_1/R_2=0.375$ となる。また、レイノルズ数は $Re=dV/\nu$ (ν :動粘度、 V :内円筒壁面の周速度) 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、並びにパルサレシーバーで計測する。

2-2 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テューザ(TDX)から測定流体に向けて発射すると粒子にパルス波が

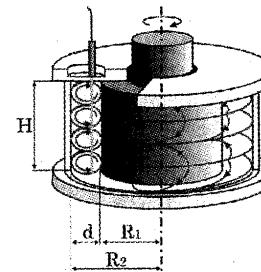
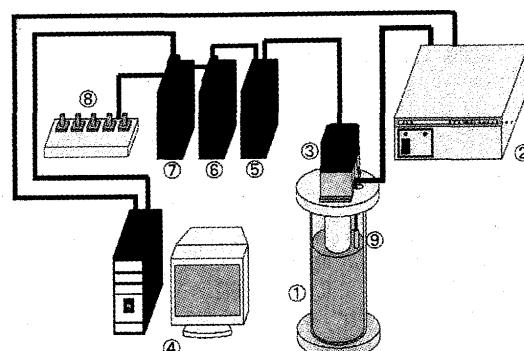


Fig.1 Test section



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.2 Experimental setup

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である。

UVP は Met-Flow 社製 UVP model X3PSi, TDX はジャパン プローブ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。UVP システムの仕様は Table 1 の通り、68wt%グリセリン水溶液中での音速は 1820m/s である。

2-3 パルサレシーバー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。流速分布算出方法を用い、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。パルサレシーバーは Imaginant 社製 DPR300、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。測定時間はおよそ 100 秒であり、その間に各測定点につき 4000 個の速度を測定する。

3. 実験方法

Fig.2 にパルサレシーバー流速測定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。内円筒付近の速度分布を得るために、UVP は TDX 中心軸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。パルサレシーバーにおいては TDX を内円筒から半径方向 6mm の装置上部に固定する。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にアクリルの厚さを 1mm 程度に加工している。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。

4. 実験結果および検討

Fig.3 に UVP によって得られた各渦モード (Nomal 2-cell mode, Nomal 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、鉛直方向を正とする。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 (Nomal 2-cell) モードより渦個数が多い N4 セル (Nomal 4-cell) モードでやや小さい傾向を示した。

Fig.4 にパルサレシーバーによって得られた Taylor 湍の速度分布を示す。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。すなわち、パルサレシーバーにおける速度分布は信頼性のにおけるものと考えられる。

5. 今後の展開（孤立混合系への応用の可能性）

スラリーなど、固液混合相を有する熱交換器の開発において、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攪拌混合が重要になる。しかし、TVF の短所として、作動流体の Reynolds 数、あるいは固体粒子と作動流体の密度比、固体粒子の大きさによって、固体粒子が渦内部まで対流混合されず、外周をあるバンド幅で回るのみの、いわゆる孤立混合領域をもつと言われる。Fig.5 は渦外周に粒子が集中した孤立混合領域を持つ TVF である。Fig.5 右図は、 $\Gamma=1$, $\eta=0.375$, $Re=370$ の実験において、発達した 1 セルの TVF に外側から蛍光粒子 (粒子径 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$) を投入した場合の投入後約 2 分の攪拌挙動を示す。前述の孤立混合領域が渦内部に見られる。Fig.5 左図は Steven⁽³⁾ らの方法に従い、粒子方程式と Navier-Stokes 方程式を用いてコンピュータで解析させた結果である。粒子の大きさに関しては様々な実験を試行しているが、図のように一部孤立混合系を捉えている。パルサレシーバー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、作動流体の粒子が少ないと流速が測れなくなる場合がある。そこで、パルサレシーバー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、及び崩壊の観測を行うことが出来ると考えている。

Table1 UVP parameters

Basic frequency	8MHz
Ultrasonic beam diameter	2.5mm
Channel distance	0.91mm
Measurement points	128
Number of profiles	1024

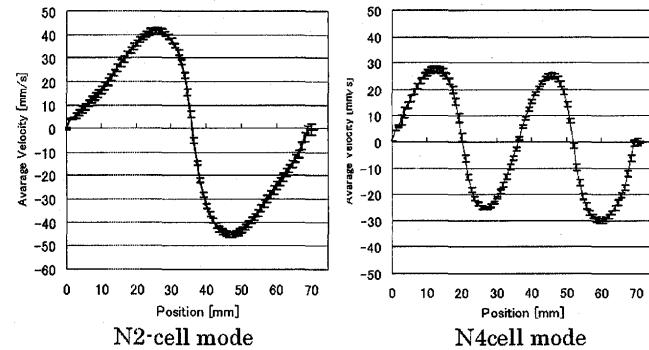


Fig.3 Mean velocity profile for $Re=600$ by UVP

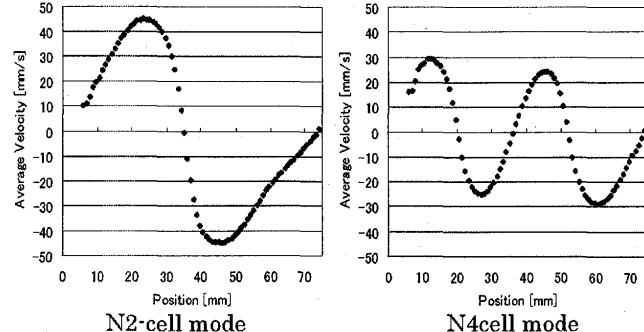


Fig.4 Mean velocity profile for $Re=600$ by Pulser Receiver

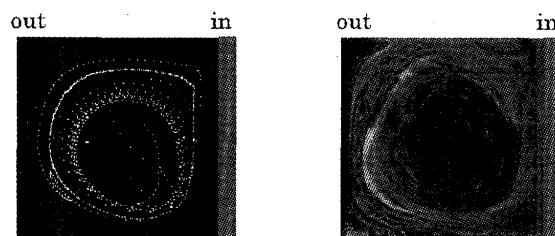


Fig.5 Isolated Mixing Region ($\eta=0.375, \Gamma=1$)

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、超音波パルサレシーバー法による速度分布の測定を試みた。この結果、 $Re=600$ の実験において、UVP 計測法とパルサレシーバー計測法を比較した。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、パルサレシーバーによる計測法の安定性を確認した。

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。これより孤立混合系との関連を探る。また、濃厚系への展開も重要な課題点である。

引用文献

- (1) Y.Takeda, *J.Fluid Mechanics*, Vol.389(1999),81
- (2) 中村・ほか 3 名、機論、54-505,B, (1988),2425
- (3) Steven T. Wereley and Richard M. Lueptow, *Phys. Fluids*, No.2, February 1999