

パルサレシーバーを用いた Taylor 漩流れの測定

The measurement of the Taylor vortex flow by Pulser Reciever

○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) 学 工藤寛士 (室蘭工大)

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 25. As the result, the velocity profiles and their absolute values were in good agreement with the ones obtained by the Ultrasonic velocity profiler (UVP), which results in well approximated in the vortex structures of Normal 2 and 4 cell modes. This measurement system was applied to the multi-phased flow as a solid-liquid flow experimentally, and well measured even in the dilute solution up to 2.0g/400ml.

Key Words:Taylor vortex flow, Pulser receiver, UVP

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 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。

TVF における乱流スペクトル遷移の研究は武田らがしらるる⁽¹⁾。そこでは、UVP(Ultrasonic Velocity Profiler :UVP)を用いた非接触高精度の速度分布が測定され、時空間同時計測が行われている。これらの研究では境界端のない無限遠 Taylor 渦での物理現象が捉えられ、特異的なスペクトルのカオス的挙動が明らかになっている。

我々は、上下境界端を有する有限アスペクト比 Taylor 渦に 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た⁽²⁾。そこでは、一部カオス的挙動も捉えられた。UVP を用いた速度場の測定は、固液混合系のようなスラリーでもある程度計測できることから、今後さらに発展すると思われる。

このように UVP は高精度な速度の空間分布を瞬時に取り込める極めて有用な装置である。しかし、まだ高価であり、普及には時間を要すると思われる。このため、同じ超音波測定ではあるが、ドップラー周波数を測定する原理とは異なり、自己相關法で速度分布を計測するパルサレシーバー法が注目されている。この方法は、UVP ほどの解像度はないものの、比較的の廉価であり、固液混合系への応用も可能であることから、今後普及する可能性がある。

ここでは、UVP と対比しながら比較的ダイルート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する。TVF 装置は上下境界端を有し Ekman 境界層の影響を受けるアスペクト比の小さいものを使用する。

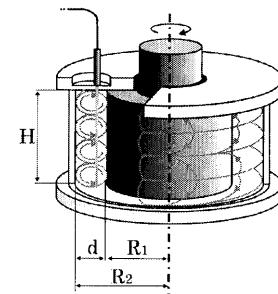


Fig.1 Test section

2. 実験装置と実験条件

2-1 TVF 発生装置 Fig.1 に上下境界端を有する 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 $d=R_1-R_2=25[\text{mm}]$ 、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 TVF の渦モードについて 上下境界端を有する TVF は、Ekman 境界層の影響を受けて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。実験条件は、アスペクト比 $\Gamma=3$ 、 $\eta=0.667$ 、 $Re=380$ とし、平均粒子径約 $100\mu\text{m}$ のアルミナ粒子を用い、グリセリン水溶液は 68wt%とした。光学系はアルゴンシートレーザー光を使用した。図中右側が内円筒側である。渦モードは正規モードと変異モードに大別される。図中 N は正規モード(Normal)を、A は変異モード(Anomalous)を表す。正規モードでは上下固定端に接する渦の流れ方向が、外円筒から内円筒に向かう場合を言い、変異モードは、片端あるいは両端の流れ場が内円筒から外円筒に向かう流れがある場

合を言う。変異モードは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、正規モードに比べてかなり不安定である。また、Fig2-(d)の変異4セルモードは $\eta=0.667$ では実験的にはほとんど発生しない。

同じ正規モードでも主モードと二次モードが存在する。本実験で言えば、Fig.2-(a)は主モード、Fig.2-(d)は二次モードである。主モードは内円筒をゆっくり加速していく場合に形成されるモードで、二次モードは比較的急速に加速する場合に得られる。正規モードは変異モードに比べればはるかに安定であるが、その中でも主モードは最も安定なモードである。

以後の実験では、アスペクト比 $\Gamma=3$, $\eta=0.375$ において、主モードに限定する。

2-3 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ズデューサ(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フローメータ法である。

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の通りである。68wt%グリセリン水溶液中の音速は1820m/sで、このときの測定体積は、直径2.5mm×高さ0.925mmの円筒状であり、この測定点が128個あるため最大測定深さは117.5mmとなる。二重円筒容器はFig.1のように直立で用い、TDXは容器下端部に設置した。この結果、軸方向の時空間流速分布から内円筒近傍の渦構造を捉えることができる。超音波の反射体として超音波ビーム直径に対して十分小さい平均直径80μmのナイロンパウダー（ダイセンヒュルス製：WS200P, みかけ密度1.02g/m³）を混入して計測を行った。

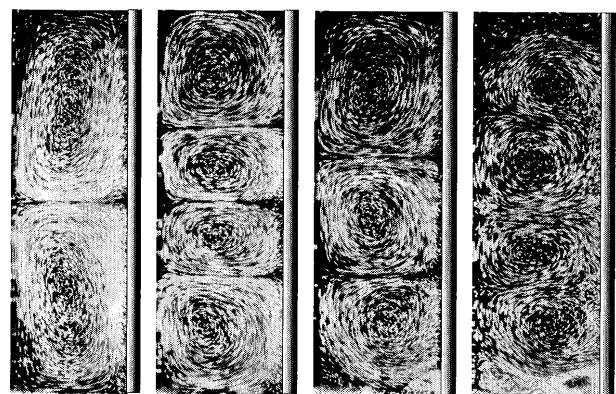
Table1 UVP parameters

Basic frequency	8MHz
Ultrasonic beam diameter	2.5mm
Channel distance	0.925mm
Measurement points	128
Number of profiles	1024

2-4 パルサレシーバ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。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。

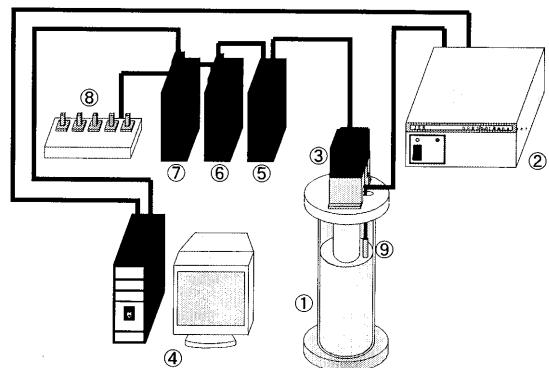
3. 実験方法

Fig.3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3mm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。



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

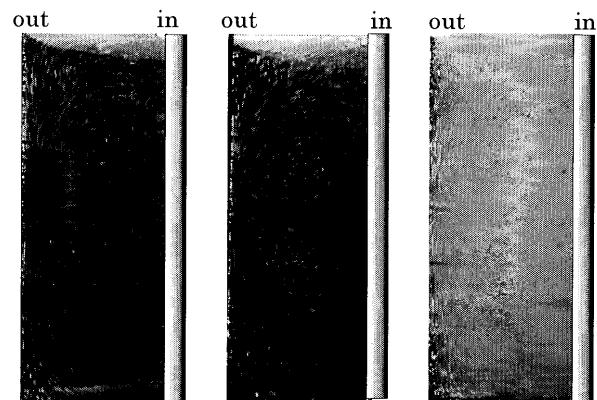
Fig.2 Visible images of the different mount of particle



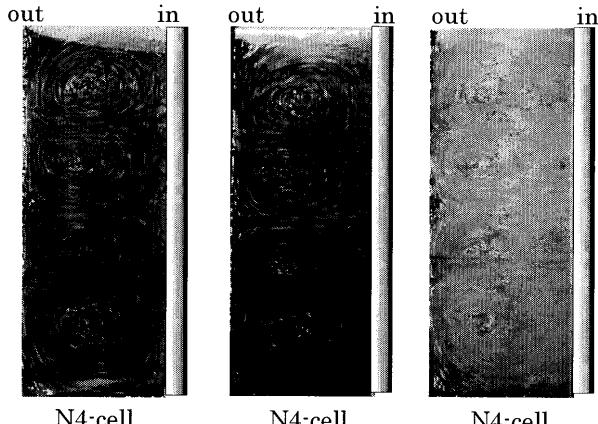
1. Test section, 2. Pulser receiver, 3. Motor,
4. Personal computer, 5. servo driver, 6. controller, 7. AC
power supply, 8. upper controller, 9. Transducer
Fig.3 Experimental setup

4. 実験結果および検討

4-1 可視化結果 Fig.4, Fig.5に本実験の可視化画像を示す。可視化にはナイロン粒子（平均粒子径80μm）を0.1g, 0.5g, 1.0gをテスト部に混入し撮影したものである。本実験のアスペクト比 $\Gamma=3$, $\eta=0.375$ においては $Re=790$ において、正規モードとして正規2セルモード(N2-cell), 正規4セルモード(N4-cell)が観測された。変異モードとしては、変異3セルモード(A3-cell), 変異4セルモード(A4-cell)が観測された。通常、変異4セルモードは実験では得られにくくされるが、本実験装置では高確率で得られることがわかった。本実験では安定性のある正規2セルモード、正規4セルモードをパルサレシーバーによって測定した。



粒子量 : 0.1g 0.5g 1.0g
Fig.4 Visible images of the different mode($Re=790$)

Fig5. Visible images of the different mode($Re=790$)

4-2 UVP およびパルサレシーバーの速度場計測 Fig.6 に UVP によって得られた渦モードの平均流速分布を示す。ただし、速度は軸方向（鉛直方向）を正とした速度分布である。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正規 2 セルモードより渦個数が多い正規 4 セルモードでやや小さい傾向を示した。

Fig.7 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。可視化画像の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。以上より、速度分布図から渦モードが判別できる。また、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出来る。これらの結果より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。

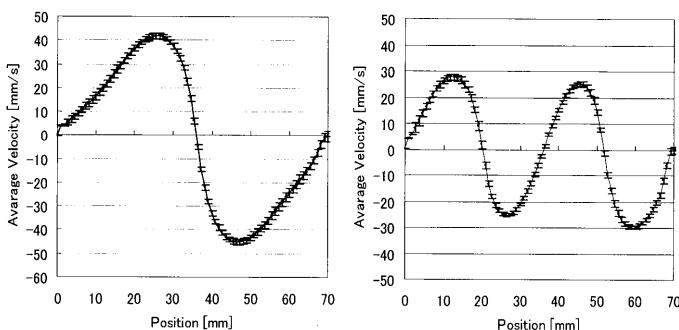
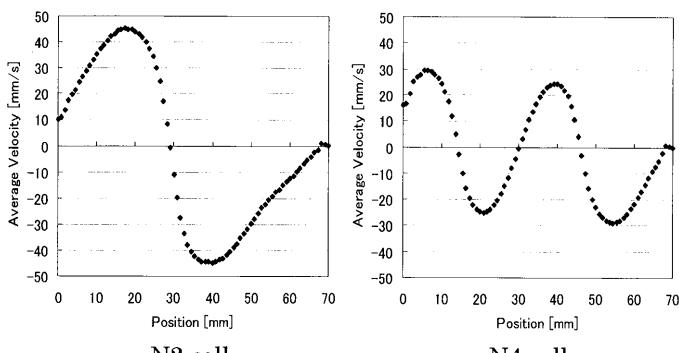
Fig.6 Mean velocity profiles for $Re=600$ by UVPFig.7 Mean velocity profile for $Re=600$ by Pulser Receiver

Fig.8 にパルサレシーバーによって得られた速度分布を示す。左図が N2 セル、右図が N4 セルの結果である。 Re 数は $Re=500, 1000, 1500$ の範囲で変化させた。N2 セル、N4 セルそれぞれにおいて、渦の個数に従う速度分布が時間平均値として得られている。N2 セルおよび N4 セルとも、 Re 数の上昇

にしたがって、流速の絶対値は顕著に増加するが、渦形状はほとんど変化しないことが観察される。また、流速の絶対値の最大値をみると、ほぼ Re 数の上昇率に比例した値をとることが確認される。ただし、N4 セルについては Re 数の増加とともに、最下部の渦の絶対値は小さくなっている、最上部の渦との幾何学的対称性を示さなかった。この理由については不明である。また、N2 セルでは $Re=1000$ 付近で平均流に乱れが生じる。 $\eta=0.375$ における UVP の実験では、波動 TVF に遷移する Re 数は、N2 セルの場合 $Re=900$ 、N4 セルでは $Re=1000 \sim 1200$ 付近であることが観測された。Fig.8 の結果は、このデータとも定性的によく整合する。 $\eta=0.667$ において、波動 TVF へ遷移する臨界 Re 数は N2 セルの方が高いことが知られるが、 $\eta=0.375$ では逆の結果であり、N2 セルは主モードであるにも関わらず、波動 TVF への遷移は二次モードより低い臨界 Re 数で起こることになる。

Fig.9 には、作動流体を水ベースに変えて、 $Re=7100$ まで上昇させた場合の時間平均速度分布を示す。渦モードは N2 セルである。ナイロン粒子は Fig.8 と同様のものを使用した(みかけ密度: 1.02 g/m^3)。したがって、水とほぼ中立浮遊を保つ。この結果より、渦中心は Fig.8 に比べて、より上下境界端方向に移動している。これは慣性力の効果によるものと推測される。流れは大きく乱れており、目視では判別しにくくなっているが、パルサレシーバーによる計測では N2 セルの基本構造は整然と保たれているのが明確に分かる。

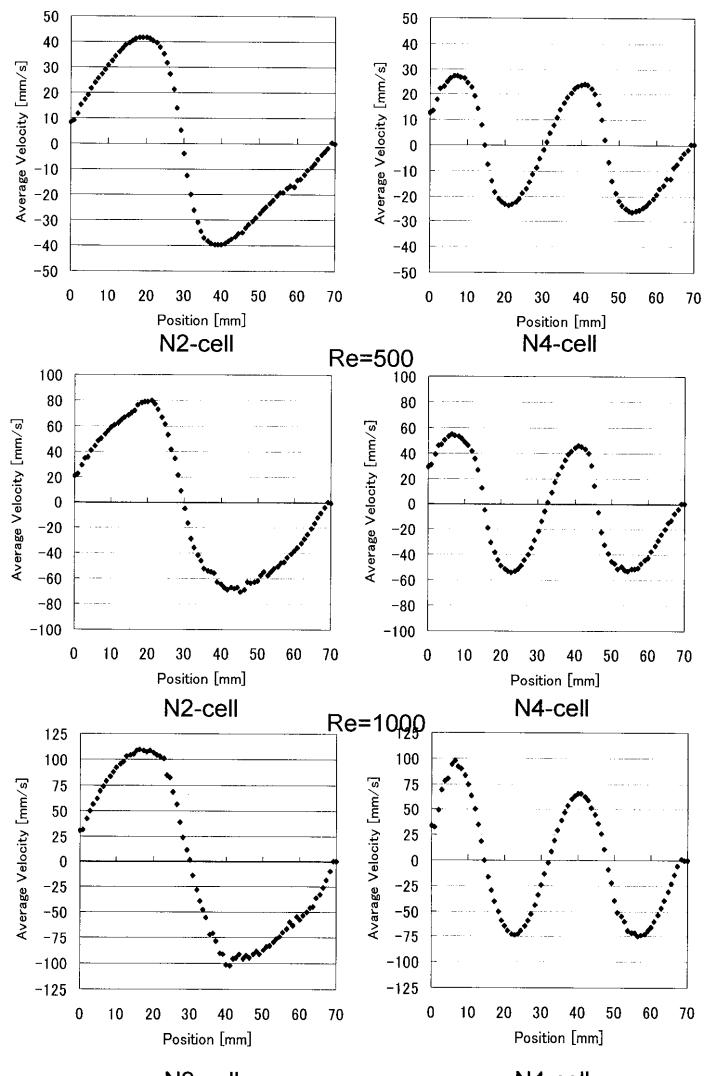
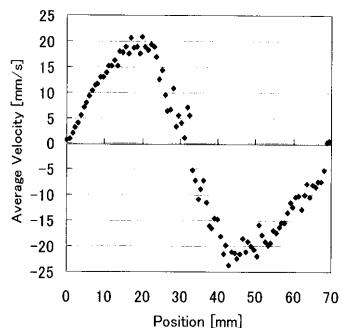


Fig.8 Mean velocity profile by Pulser Receiver



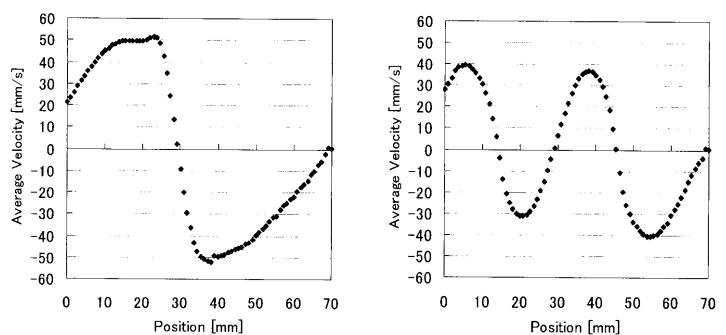
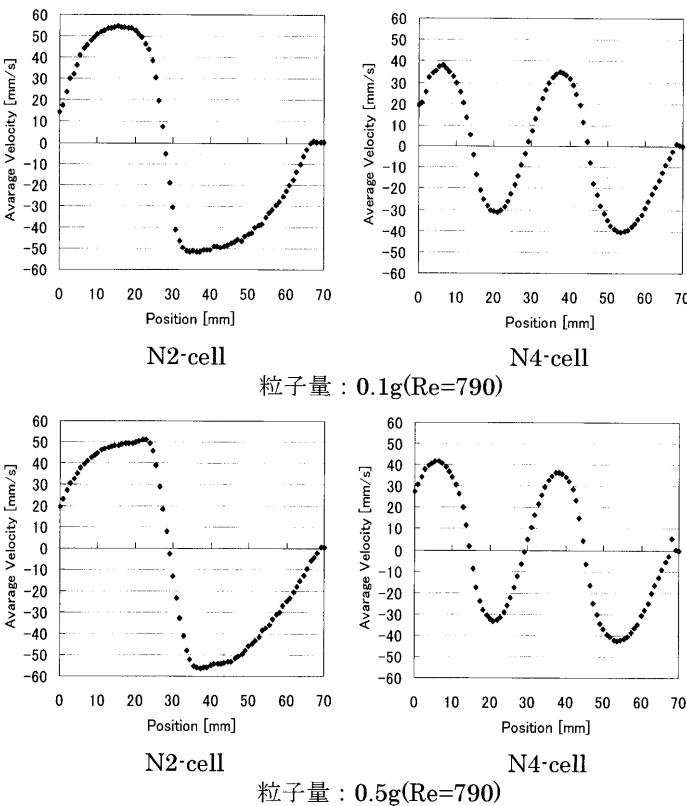
Re=7100(作動流体：水)

Fig.9 Mean velocity profiles for water by Pulser Receiver

4-3 固液混合系への適用

Fig.4 および Fig.5 の結果からわかるように、粒子の投下量が 0.1g, 0.5g の場合、目視観測による TVF の渦挙動の把握はかろうじて可能である。しかし、投入量が 1.0g になると、白濁してしまい懸濁状態となって、目視観測はほとんど不可能になる。このようなスラリー液の場合においても速度計測が可能かどうか実験を試みた。その結果を Fig.10 に示す。Fig.8 と同様、左図は N2 セル、右図は N4 セルモードである。この結果、投入粒子が 1.0g でも基本的に速度分布は問題なく計測された。また、渦モードは粒子濃度の影響をほとんど受けることなく、安定して存在することがわかる。ただし、投入量 2.0g では、測定位置から約 50mm 以上でパルス波が粒子に阻害されて拡散するため、誤差が出始めている。

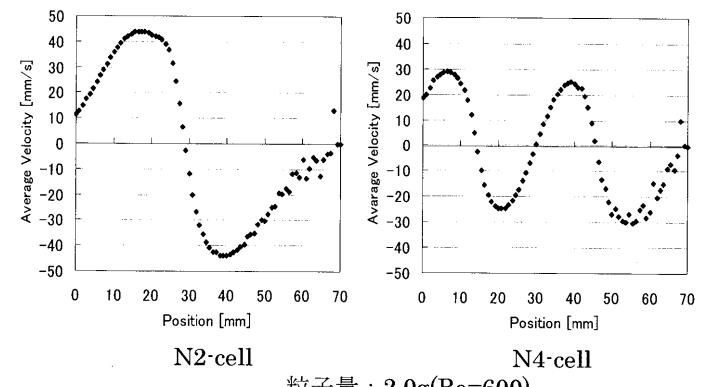
濃厚系での計測は今後の課題であるが、ダイルート系では TVF の時間平均流は濃度に影響されることなく、安定して存在することがわかった。



N2-cell

N4-cell

粒子量 : 1.0g(Re=790)



N2-cell

N4-cell

粒子量 : 2.0g(Re=600)

Fig.10 粒子量による違い

5. 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。また、粒子濃度を変えて、固液系での応用の可能性について検討した。この結果、以下の知見を得た。

1. $Re=600$ 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。
2. $Re=500, 1000, 1500$ における渦モードを計測した。これより、N2 セル、N4 セルとも渦形状はほとんど変わらないことが分かった。渦速度の絶対値は Re 数の上昇率にはほぼ比例して増加した。また、UVP 計測の結果、N2 セルにおける波動 TVF への遷移臨界 Re 数は、N2 セルでは $Re=1000 \sim 1200$ であったが、本測定結果は、ほぼそれを裏付ける結果となった。
3. 粒子投入量 2.0g までは本測定法で流速場の測定が可能であった。これより、 $Re=790$ において、粒子投入量 2.0g までは TVF は安定で粒子濃度の影響をほとんど受けないことが分かった。

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必要性がある。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) 河合・ほか 4 名, 日本機械学会流体部門講演会講演概要集, 05-32(2006)