B 2 1 0

超音波による Taylor-Couette 渦の 固液混合濃度分布の計測

河合 秀樹[○] (室蘭工業大学), 新部 智由 (室蘭工業大学), 小林 広精 (室蘭工業大学)

Measurement of solid-Liquid mixture density distribution of Taylor-Couette vortex Flow by supersonic wave

Hideki KAWAI and Tomoyoshi NIIBE and Hiroaki KOBAYASHI

ABSTRACT

In this study, our purpose is to obtain a density distribution 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 concentration of TVF was able to be measured by using UTDC according to the measurement of frequency. This measurement system was applied to the solid-liquid phase flow experimentally, and well measured even in the opaque dilute solution. It is thought that this measuring method can be used to measure Isolated Mixing Region.

Keywords : Taylor-couette Vortex Flow, density distribution, UTDC, solid-liquid, Isolated Mixing Region

1. 緒 論

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 は局所的な高せん断が少なく、攪拌ムラが防止できる特徴を有するため、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 TVF 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 TVF の挙動も重要である。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、その普及には時間を要すると思われる。そのため、自己相関法により速度分布を解析し、速度場を測定する比較的兼価な方法が注目され

ている (Ultrasonic Time-Domain Correlation: UTDC)。

ここでは、UTDC の特徴を用いて固液混合系で有限アスペクト比を有する TVF の濃度分布を測定する。

2. 基礎事項

2.1 Taylor-couette 渦流れ (TVF)

Fig.1 Taylor-couette Vortex Flow outline

Fig.1 に TVF 装置を示す。図中 R_{in} は内円筒半径、

R_{out} は外円筒半径、 H は作動流体高さを表す。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 $d=R_{in}-R_{out}=25[\text{mm}]$, アスペクト比 $\Gamma=H/d=3$, 半径比 $\eta=R_{in}/R_{out}=0.375$ となる。また、レイノルズ数は(1)式で定義される。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の濃度分布はUTDCで計測する。

$$Re = \frac{d \cdot \Omega \cdot R_{in}}{\nu} \quad \dots (1)$$

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。

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(Isolated Mixing Region: IMR)

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(Isolated Mixing Region: IMR)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となり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。

Fig. 2 Visual image of each different mode ($\eta=0.667, Re=380$)

Fig. 3 Isolated Mixing Region

2.4 UTDCによる濃度測定

測定流体にTDXからパルス照射し、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。このトレーサー粒子がなければ測定できないという特徴を利用して測定できた回数によって濃度の測定を行う。本実験では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、その測定回数により固液混合系の濃度分布を測定する。パルスレーザは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。

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。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。

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

4. 実験結果及び考察

4.1 懸濁粒子の濃度測定実験

Fig.5, Fig.6 に希薄系と濃厚系での検量線実験結果を示す。

縦軸に UTDC によって相関が得られたデータ数の割合、横軸にテストセクションに投入した粒子量というグラフを作成した。Fig.5, Fig.6 ともに粒子が希薄な場合、濃厚な場合のどちらにおいても比例的な分布が得られたことで UTDC を用いて固液混合系の粒子の濃度を測定できたといえる。

Fig. 5 Effective count number - particle
(Low concentration)

Fig. 6 Effective count number - particle
(High concentration)

4.2 Taylor 渦の攪拌・混合度

Fig.7 に UTDC によって得られた $Re=1000, 1500$ の混合割合を示す。これにより、TVF の混合性能がわかる。 $Re=1000$ の結果をみると目視では確認できなかった混合ムラが確認できる。濃度の比較的濃い部分をみると渦外郭部分に濃い部分が集まっている。また薄い部分は渦と渦の間、外円筒の固定端付近に集中している。特に粒子が多い部分は孤立混合領域が生成される渦外周部分ではなく、リミットサイクルが形成される渦外殻部分であることがわかる。

$Re=1500$ の結果をみると $Re=1000$ の結果よりも混合されていることがわかる。やはり、 Re 数が上昇したことにより渦に振動が生じその影響で攪拌が進んだのではないかといえる。混合の割合をみても $Re=1000$ の時には最高 20% 近くも混合ムラがあったことに比べ、 $Re=1500$ では 5% 位の攪拌ムラしかない。このことより攪拌には Taylor 渦の振動と速度が大きく関わってきていると考えられる。

Fig. 7 Mixing state with TVF

4.3 孤立混合領域(IMR)の測定

Fig.8 Fig.9 に UTDC によって得られた測定点 6mm, 22mm 地点での N2 セルモードの IMR 測定の結果を示す。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.10 および Fig.11 に測定を行った N2, N4 セルモードの IMR 可視化結果と各測定点で計測を行い、図式化したものを示す。これにより超音波を用いて IMR を確認できる。N4 セルモードにおいて上下対象が得られない理由として IMR 形成の際粒子を渦上部から投下したため、粒子が下部まで攪拌されなかったと考えられる。

Fig. 8 Effective count number
6mm positions from the inside cylinder

Fig. 9 Effective count number
22mm positions from the inside cylinder

Fig. 10 Visual image of the Isolated Mixing Region
(Re=300, N2-cell)

Fig. 11 Visual image of the Isolated Mixing Region
(Re=300, N4-cell)

5. 結 言

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 による濃度分布の測定を試みた。この結果、粒子が希薄な場合、濃厚な場合においても UTDC を用いて濃度を得ることが出来た。また、 $Re=1000$, $Re=1500$ において TVF の混合割合を測定することができ、 Re 数の上昇に伴って混合度も改善されていることがわかった。TVF の孤立混合領域での測定において、データ数の違いにより可視化を行わなくても形成が確認できることがわかった。

今後、より速い乱流場での計測、粒子の大きさによる計測の違いについて調べ、孤立混合系や多相混合との関連を調べる。また、ノイズに対する対策も検討しなくてはならない。

6. 参考文献

- 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・他3名, 機論, 54-505, B, (1988), 2425