

UVP を用いた低アスペクト比における TVF の測定

The measurement of the Taylor vortex flow with a small aspect ratio by UVP

○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)

Hideki KAWAI, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho Muroran, 050-8585, Japan
Hiroshi TAKAHASHI, Muroran Institute of Technology, Hiroshige KIKURA, Tokyo Institute of Technology
Hiroshi KUDOH, Muroran Institute of Technology

In this study, experiment was carried out for Taylor-Couette vortex flow(TVF) with a small aspect ratio. TVF is generated with two concentric rotating cylinders; a rotating inner cylinder and a fixed outer cylinder. Two test section sizes with radial ratio of 0.375 and 0.667 were applied. Aspect ratio and gap between inner and outer cylinder were kept constant 3 and 25 mm respectively. Successive instantaneous and mean velocity profiles were obtained by using an ultrasonic velocity profiler (UVP). The spatiotemporal velocity field was analysed by two dimensional Fourier transform. In this case, the characteristics of Wavy Vortex Flow (WVF) and Modulated Wavy Vortex Flow (MVF) transition are confirmed. Furthermore, the bifurcations between each cell modes namely the N-2Cell, N-4Cell, A-3Cell and A-4Cell modes are clarified. The flow was much complicated compared with the one observed in $\eta=0.667$.

Key Words: Taylor vortex flow, Solid-liquid separation, Filtration, Rotating filter

1. はじめに

Ekman 境界層の影響を排除したアスペクト比無限大の Taylor-Couette 渦流れ⁽¹⁾ (Taylor-Couette Vortex Flow : TVF)は、攪乱のスペクトル遷移を伴うカオス発生の典型例として、多くの研究がなされている。その中でも Takeda による超音波流速分布計 (Ultrasonic Velocity Profiler : UVP) を用いた一連の研究⁽²⁾は、時間変動する軸方向の速度分布を高精度計測し注目を集めている⁽²⁾。一方、上下に固定端を有するアスペクト比の比較的小さい TVF では Ekman 境界層の影響を積極的に解明する方向で、Benjamin⁽³⁾以降研究が続けられ、近年では中村ら⁽⁴⁾や大村ら⁽⁵⁾の研究が知られる。Ekman 境界層の過渡的な発達過程は様々な渦モードを作り出し、比較的小さい Reynolds 数でも解が複雑に分岐することが知られている。

TVF を利用した攪拌では、高せん断流れや局所せん断流れが発生せず、攪拌ムラも回避できることから、せん断によって損傷を受けやすい動・植物細胞の培養装置への応用が期待される。これに伴って今後コンパクト構造の需要が高まることは容易に類推される。このため、Ekman 境界層の影響を無視した設計は信頼性を大きく損なう恐れがあり、アスペクト比の小さな TVF の流れ場を解明することは重要である。本研究では、UVP による低アスペクト比 TVF の流速分布計測を行い、得られた時空間速度データを FFT 解析することにより上下固定境界端効果を伴う TVF の速度場解析を行う。

2. 実験装置と実験条件

2-1 TVF 発生装置

Fig. 1 に実験装置の概略図とテスト部を示す。使用する二重円筒容器は内円筒外径 $R_1=15\text{mm}$ 、外円筒内径 $R_2=40\text{mm}$ で、アスペクト比は $\Gamma=H/(R_2-R_1)=3$ とした。これより半径比は $\eta=R_1/R_2=0.375$ となる。また、Reynolds 数は $Re=dV/\nu$ (ν : 動粘度, V : 内円筒壁面の速度, $d=R_2-R_1$) で定義される。外円筒は固定盤に固定され、内円筒はインバータ制御モータに直結し、モータの回転数が内円筒回転数と一致するように設計されている。内円筒の回転数はモータに付属のコントローラによって制御され、一定回転する。また、実験中の外部振動伝達を極力避けるため、共振周波数 0.5Hz の特殊除振台に装置を固定した。作動流体は 68wt%グリセリン水溶液 (密度 $\rho=1178\text{kg/m}^3$, 動粘度 $\nu=10.94\text{mm}^2/\text{s}$) を用いた。

2-2 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

Table1 UVP parameters

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

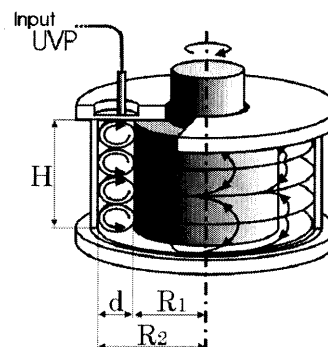


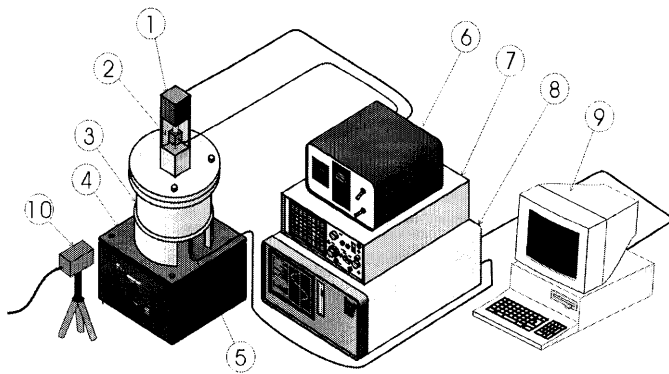
Fig. 1 Schematic diagram of a small aspect TVF

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方法が UVP 測定法である (Fig.2).

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での音速は 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. 2 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 80 μm のナイロンパウダー (ダイセンヒュルス製: WS200P, みかけ密度 1020kg/m³) を混入して計測を行った。

2-3 可視化装置

可視化には、少量のアルミ箔(平均径約 100 μm)を混入し、レーザーシート光 (アルゴンレーザー) を AOM 音響チョッパでパルスレーザを発現させ、フレームストランド方式に



1. Motor, 2. Encoder, 3. Taylor-Couette Vessel, 4. Isolator, 5. US transducer, 6. Controller, 7. Oscilloscope, 8. UVP monitor, 9. Personal Computer, 10. Video Camera

Fig. 2 Setup of UVP measurement

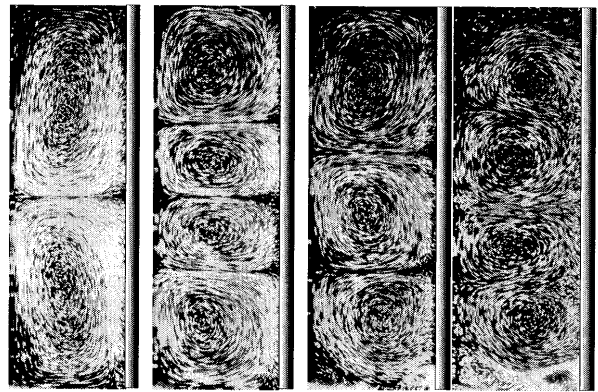
よってその微小時間差の画像を撮影してパソコンに取り込む。この二枚の画像間を動いた粒子の挙動を追跡することによって、非定常流速分布が測定できる。

2-4 実験方法

Fig.2にUVP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、TDXの設置位置は内円筒から3mm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。トレーサ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、流体の流れに沿うものとして考える。本研究では、各Re数におけるTVFの時空間流速分布を得ることで、それらの渦の特徴を捉えるものである。

2-5 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.3)。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 μ 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



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

Fig. 3 Vortex modes ($\eta=0.667, Re=380$)

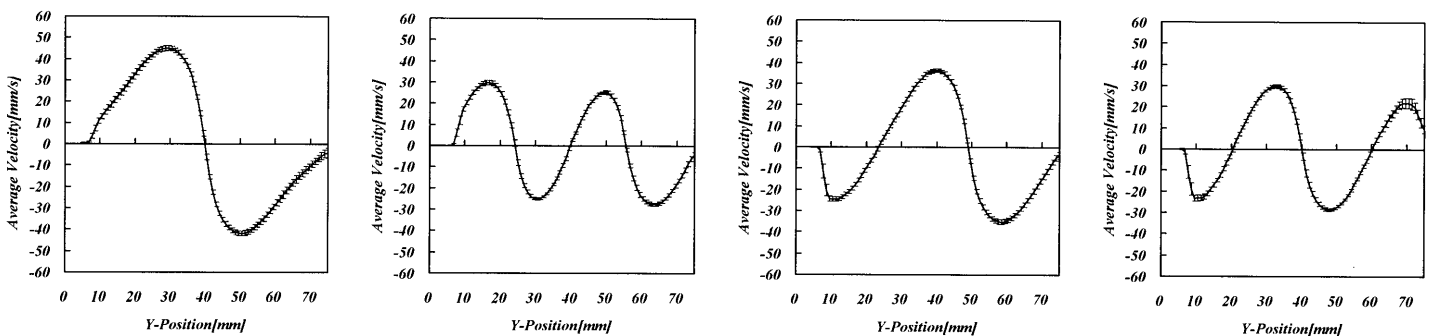
を言い、変異モードは、片端あるいは両端の流れ場が内円筒から外円筒に向かう流れがある場合を言う。変異モードは内円筒を急加速した場合に確率的に発生するものであり、正規モードに比べてかなり不安定である。また、Fig2-(d)の変異4セルモードは $\eta=0.667$ では実験的にほとんど発生しない。

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。

3 実験結果および検討 ($\eta=0.375, \Gamma=3$)

本実験では、N2cellモード、N4cellモード、A3cellモード、およびA4cellモードの4種類の渦モードを確認した。UVPによって得られたそれぞれのモードの平均速度分布をFig.4に示す。ただし、 $Re=600$ である。図において縦軸は軸方向平均速度、横軸はTDX(底面)からの距離である。なお、TDXからパルスが発射される方向、つまり上部に向かう速度成分を正、下向きを負とする。内円筒の右側が観測面であることを考慮すると、正方向の速度成分で渦は時計回り、負方向の速度成分で反時計回りとなる。(a)は2つの波形、(b)、(d)はともに4つの波形、(c)は3つの波形が、それぞれ確認できる。これより速度成分の方向も考慮すると、(a)はN2cell、(b)はN4cell、(c)はA3cell、(d)はA4cellを形成したことがわかる。



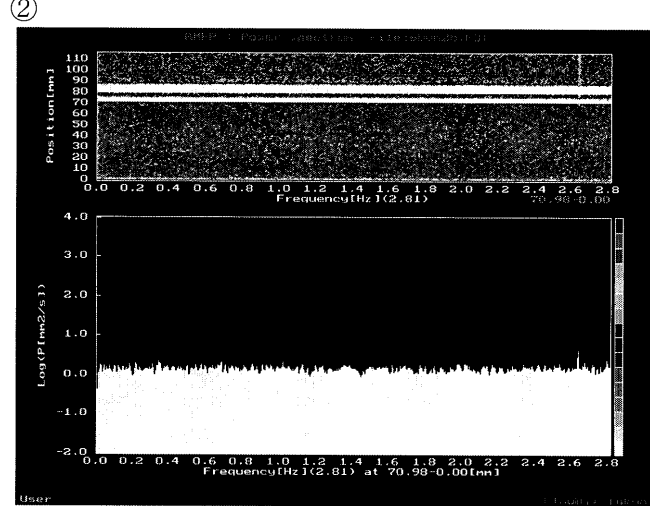
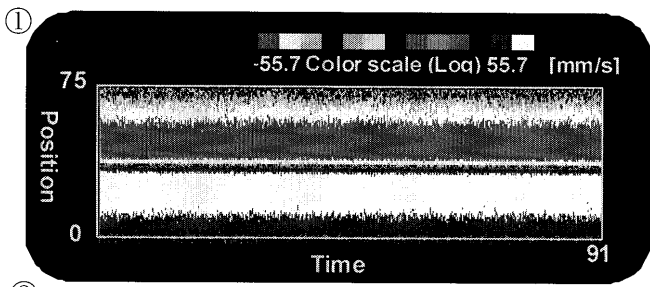
(a) N2cell Mode

(b) N4cell Mode

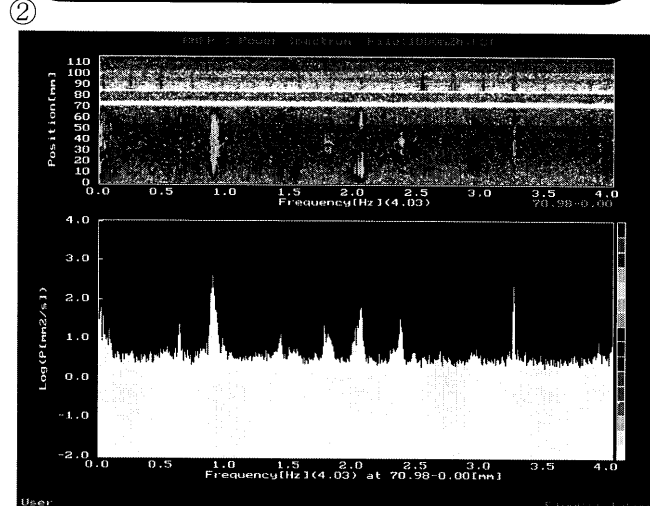
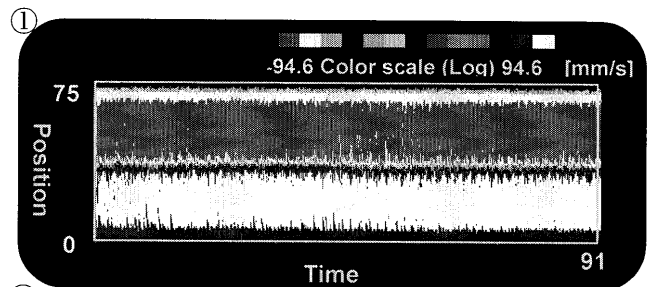
(c) A3cell Mode

(d) A4cell Mode

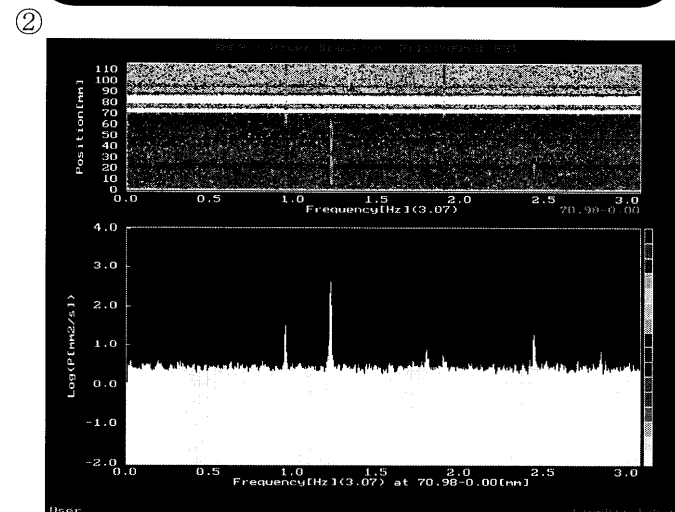
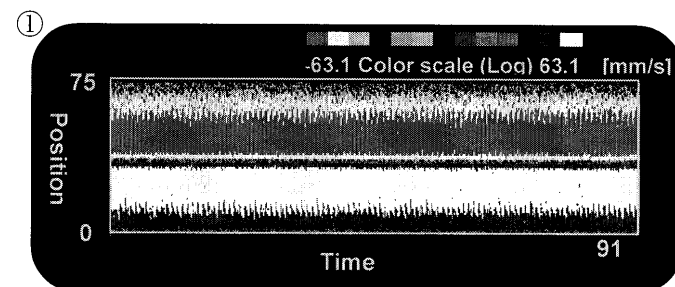
Fig.4 Mean velocity profiles by UVP($Re = 600$)



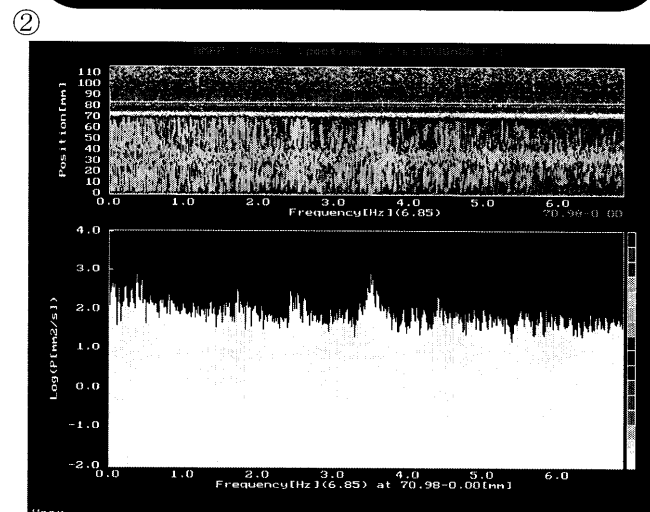
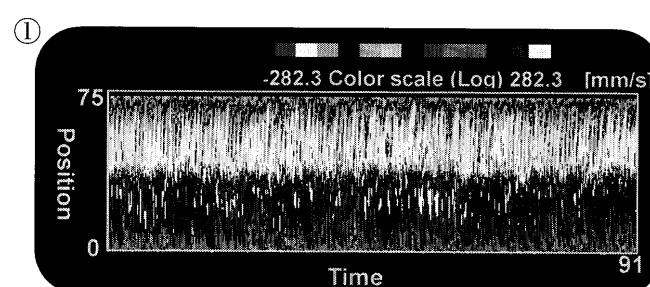
(a) $Re=600$ (Taylor Vortex Flow)



(c) $Re=1000$ (Modulated Wavy Vortex Flow)

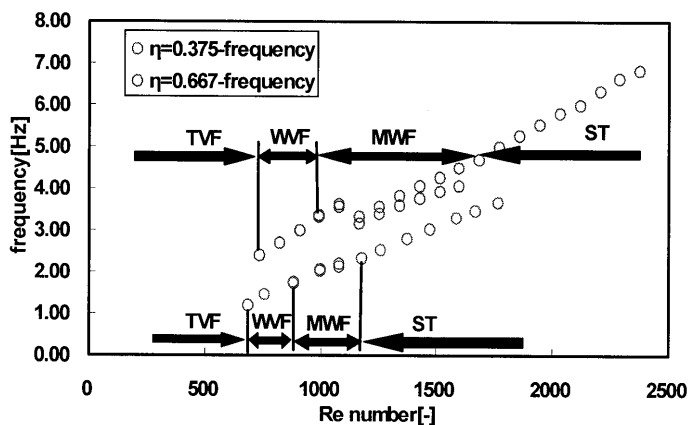
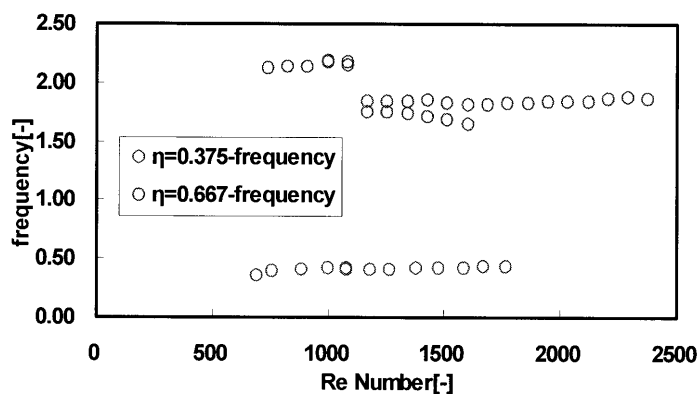


(b) $Re=700$ (Wavy Vortex Flow)



(d) $Re=1700$ (Soft Turbulence)

Fig.5 Velocity fields with the color coded velocity values and space-averaged power spectra at N2-Cell mode

Fig.6 Frequency of N2cell for $\eta=0.375$ and 0.667 Fig.7 Frequency of N2cell for $\eta=0.375$ and 0.667 (normalization)

Re 数の増加に伴い, TVF は波動 Taylor 渦流れ(Wavy Vortex Flow : WWF), 準周期解渦流れ(Modulated Wavy Vortex Flow : MWF)を経て, 弱い乱流(Soft Turbulence : ST)へと遷移することが知られている。これら遷移域について $\eta=0.375$ の特徴を把握するため, 流れの時空間速度分布について FFT 解析を行った。紙面の関係上, 今回は N2cell における測定結果を示す(Fig. 5)。Re 数は $Re=600 \sim 1700$ で変化させた。

各図とも, ①は速度の時空間分布を示し, ②は周波数スペクトルのエネルギー分布と鉛直方向に平均化されたスペクトルを示す。モノクロでは判別しにくい, 速度に関しては緑, 黄緑, 水色, 青にしたがってマイナス方向が大きくなり, 紫, 赤, 橙, 黄色にしたがって, プラス方向が大きくなる。N2Cell では, 上半分がマイナス側速度成分, 下半分がプラス側速度成分である。またスペクトルに関しては, エネルギーの高さに対応してカラーレジェンドが示されている。赤, 緑, 青の順にエネルギーが小さくなる。スペクトルがない 0 近傍のレベルでカラーレジェンドは青色である。

Fig.5 -(a)は $Re=600$ における N2cell モードの時空間速度分布を示しており, ①では速度成分の対称性から上下 2 つの渦が定常的に流れていることが確認できる。また Fig.6-(a)の②からは周波数スペクトルは確認されないことから $Re=600$ では定常 TVF 領域である。Fig.5-(b)は $Re=700$ での時空間速度分布で, ①の速度分布のカラープロットに縞模様が見られることから, 渦に振動モードが生じている。Fig.5 -(b)-②の FFT 解析からも, 渦中心付近から 1.216Hz の基波スペクトルが発生している。これより $Re=700$ で波動 Taylor 渦が発生したと考えられる。他のスペクトルとして基波周波数の 2 倍周波数である 2.432Hz も観察される。ただし, 基波スペクトルより若干低い 0.9Hz あたりに鋭いスペクトルが観察されるが, その空間分布の偏りから, モーター等から発生したノイズであ

ると考えている。1.216Hz の基波スペクトルは空間的には上下対称領域から発生しているため, 渦振動から発生していることは間違いない。Fig.5-(c)-①($Re=1000$)のカラープロットからは, 縞模様が 2 つの渦の中心界面からも発生しており, 2.056Hz を境に ± 3.0 Hz の 2 つの周期が発生している。Fig.5-(c)-②を見ると様々な周波数スペクトルが観察されるが, 基本的には, 基波スペクトル 2.056Hz から派生した中央界面の振動が準周期モードを醸し出していると考えられる。ただし, 0.9Hz 前後に 2 つの渦界面から上下渦内部領域に渡り大きなスペクトルが発生した。今のところその発生のメカニズムはよく分かっていない。また, 境界端付近の振動と渦の振動との影響によりうなりが生じている。スペクトルからも 0.032Hz の低周波がこのうなり振動の周波数で, 渦全体に振動を起こしている。これより, この渦流れは準周期解流れであると考えられる。Fig.5 -(d)-①からは渦の振動が強くなり渦が非常に乱れている様子がわかる。Fig.5-(d)の②からも渦全体から振動成分が発生しており, 弱い乱流へと遷移している。基波周波数は 3.478Hz である。

この様にして求めた各 Re 数の周波数スペクトルから, $\eta=0.667$ の研究結果と比較する形で N2cell のスペクトル遷移の様子を Fig.6 に示した。縦軸に周波数, 横軸に Re 数をとる。この結果より, $\eta=0.667$ では $\eta=0.375$ よりも約 1.4 倍近くの周波数を持つこと, $\eta=0.375$ では $\eta=0.667$ に比べ WWF, MWV の範囲が狭く, 低い Re 数領域で乱流に遷移することから, セルモードだけでなく半径比の違いにより, 渦の周波数や遷移 Re 数が異なることがわかる。これらの周波数は内円筒回転数に依存する。ここでは, Re 数の上昇が渦周波数に与える影響を調べるため, 渦周波数を内円筒回転周波数で除算し正規化した。その結果を Fig.7 に示した。これより無次元周波数は $\eta=0.375$ では約 0.40 と極めて安定に推移し, 基波周波数から準周期に分岐する現象は見られなかった。 $\eta=0.667$ でも全体的にはほぼ一定傾向を示すと考えられるが, $Re=1100$ 以降で基波周波数が不連続的にジャンプし, 準周期に分岐する傾向が明確に分かった。 $\eta=0.375$ では不連続的なジャンプも見られず, ほぼ一定で推移する。この違いについては今後の検討課題である。

4. おわりに

アスペクト比の小さい TVF の Reynolds 数に対する遷移過程について, 可視化と UVP による計測を実施した。正規 2セルモードと正規 4セルモードについて, 重点的に遷移過程を調べた。これより, 準周期モードについて

- (1) 正規 2セルモードでは, 基波周波数から第二周波数が分かれる。ただし, 第二周波数は渦中央部から発生する。
- (2) 正規 4セルモードの基波周波数は, 正規 2セルモードより低周波領域であり, また, 第二周波数は, 基波周波数から分かれることはなく, より低周波成分が渦中央部から不連続的に発生する。

ことが分かった。

引用文献

- (1) P. R. Fenstermacher, H. L. Seinney and S. J. Shebker, *J. Fluid Mech*, 94 (1979), 102
- (2) Y. Takeda, *J. Fluid Mechanics*, Vol.389 (1999), 81
- (3) T. B. Benjamin, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 359 (1979), 27
- (4) 中村・ほか 3 名, 機論, 54-505, B, (1988), 2425
- (5) 大村・ほか 3 名, 化学工学論文集, 23-6, (1997), 741