

## アスペクト比の小さい Taylor-Couette 渦流れの解析

## Analysis of a Taylor-Couette Vortex Flow with a Small Aspect Ratio

○正 河合 秀樹 (室工大), 長井 明寛 (コスモエンジニアリング株) 正 木倉 宏成 (東工大)

Hideki KAWAI, Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto-cho, Muroran, Hokkaido  
Akihiro NAGAI, Cosmo Engineering, 2-5-1, Higashishinagawa, Shinagawaku, Tokyo  
Hiroshige KIKURA, Tokyo Institute of Technology, Ohokayama2-12-1, Meguro-ku, Tokyo

In this study, numerical analysis and experimental measurement is carried out for Taylor-Couette vortex flow (TVF) with a small aspect ratio, which is generated between two concentric rotating cylinders with a radial ratio of 0.667. The aspect ratio defined with the gap length between the inner and outer cylinders and the height of the working fluid is 3. Successive instantaneous and mean velocity profiles were obtained with using an ultrasonic velocity profiler (UVP). The spatiotemporal velocity field was analyzed by the fast Fourier transforms. In the result, the characteristics of Wavy Vortex Flow (WVF) and Modulated Wavy Vortex Flow (MVF) transition are measured and the critical Reynolds number to the WVF is qualitatively agreed with the numerical in the case of a normal 2 Cell.

Keywords : Taylor-Couette Vortex Flow, UVP, Ekman layer, Small aspect ratio

## 1 緒言

Taylor 渦流れ(Taylor Vortex Flow ; TVF:Fig.1)は局所的なせん断流れが少ないため, 微生物や動植物細胞の損傷を抑えながら効率的な培養が可能なバイオリクターへの応用などが期待されている。効率的な装置の実用化には小型化が重要なファクタであるが, TVF 装置に関しては作動流体高さ(H)と内外円筒間隙間(d)との比で定義されるアスペクト比( $\Gamma=H/d$ )が小さくなると, 上下固定端に起因する Ekman 境界層の影響が大きくなり, 同じ Reynolds 数でも渦の多重モードが発生して, 波動 TVF や準周期 TVF に遷移する状況が大きく異なることが知られている。このような複雑で不安定な流れ場に関しては未解明な部分も多い。更には, 固液混相流系の流れなどの不透明な液体流れは, 化学プラントにおけるスラリーやコロイド粒子の流れなど, 解明が望まれるケースが多い。

本報告では, 低アスペクト比 TVF の速度計測に超音波ドップラ流速計(Ultrasound Velocity Profiler)を適用させ, 多重モードとして正規2セルおよび正規4セルモードにおける波動 TVF(WVF)から準周期 TVF(MVF)領域までの流れについて周波数解析を行った。

## 2 実験装置および実験方法

## 2-1 TVF 発生装置

Fig.1 に TVF 発生装置の概略図, Fig.2 にそれを含めた計測装置の概要を示す。内円筒半径は  $R_{in}=50\text{mm}$ , 外円筒半径  $R_{out}=75\text{mm}$ , 高さ  $H=75\text{mm}$  であり, 円筒高さ  $H$  と内外円筒の間隙  $d$  の比であるアスペクト比  $\Gamma=H/(R_{out}-R_{in})=3$ , 内外円筒の半径比  $\eta=R_{in}/R_{out}=0.667$  である。また, Reynolds 数は  $Re=dR_{in}\Omega/\nu$

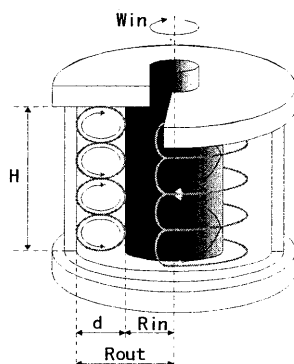
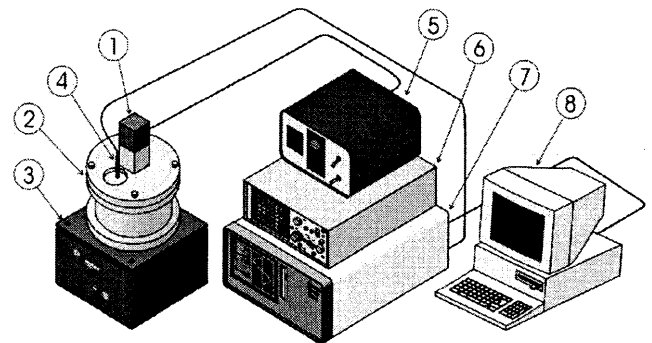


Fig.1 Taylor vortex flow

( $\nu$ : 動粘度,  $\Omega$ : 角速度,  $d=R_{out}-R_{in}$ ) と定義される。作動流体の上下は固定端とし, 内円筒回転数はコントローラによって 1rpm の精度で制御される。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 の特殊除振台を使用した。作動流体はグリセリン水溶液 68wt%,  $\nu=1.05 \times 10^{-5} [\text{m}^2/\text{s}]$  を用いた。



1. motor, 2. Taylor-Couette Vessel, 3. Isolator,
4. US transducer, 5. Controller, 6. Oscilloscope,
7. UVP monitor, 8. Personal Computer

Fig. 2 Experimental setup

Table1 UVP measurement condition

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

## 2-2 超音波ドップラ流速計(Ultrasound Velocity Profiler :UVP)

UVP は Met-Flow 社製 UVP model X3PSi で, その仕様は Table 1 に示される。パルス周波数は 8MHz を用いた。68wt%グリセリン水

溶液中での音速は1820m/sで、空間最小分解能は、直径2.5mm×高さ0.925mmの円柱単位である。超音波トランスデューサ(TDX)は容器上端部、内円筒から6mm半径方向側に設置した。トレーサ粒子には平均粒子径80 $\mu$ mのナイロンパウダー(ダイセンヒュルス製:WS200P)を用いた。

### 3 数値解析法

基礎方程式は三次元円筒座標系( $r$ - $z$ - $\theta$ )Navier-Stokes方程式と連続の式であり、解析アルゴリズムにはSMAC(Simplified Marker and cell method)法を用いた。ここで、 $r$ は半径方向、 $z$ は鉛直逆向き方向、 $\theta$ は円周方向を示す。また時間にはEuler前進差分、空間には中心差分により離散化させた。格点数は、半径方向( $r$ )に30、軸方向( $z$ )に90、円周方向に100分割、時間刻み幅は $\Delta t=0.01$ とした。上下境界条件は固定端とする。

### 4 解析結果および実験結果

Fig.3に $Re=700$ (WVF領域)における正規2セルモードの数値解析結果を示した。図中、左図は $r$ - $z$ 断面における速度ベクトル、右図は $\theta$ - $z$ 断面における速度ベクトルである。この結果、 $\theta$ - $z$ 断面において周方向に速度成分が振動していることが観察される。ただし、軸対称性が保持されており、位相のずれは生じていない。また、outer flowが存在する $z$ 軸中央部の渦界面において振動現象は時間的にも空間的にもほとんど見られなかった。このことは次の実験結果でも定性的に一致した。

Fig.4には $Re=800$ における周波数解析結果を示した。上・下図とも横軸は周波数(Hz)で、縦軸は、上図は上面からの $z$ 方向位置、下図はパワースペクトルの強度を示す。また上図についてはその位置におけるパワースペクトルの強度をグラデーションにより表した。下図パワースペクトルは、テストセクションの領域内で平均化されている。この結果からWVFへの遷移に伴って2.45Hzに顕著なスペクトルが捕捉された。本結果では、2.45Hzを基本周波数とし、その整数倍高調波成分が画面内での折り返しも含めて観察されることから、一個の基本周波数とその線形結合による単純WVFであることがわかった。またFig.4上図より、渦中心近傍でパワースペクトルの強度が高く分布していることから、渦自体の自励振動が支配的であると言える。Fig.5には、 $Re$ 数を2000まで変化させてスペクトルを解析した結果を示した。ただし、周波数は内円筒回転数で正規化(無次元化)した。これより約 $Re=800$ でWVFに遷移することから、臨界 $Re$ 数は定性的に数値解析とよく合致する。しかし、無次元周波数値1.98[-]は数値解析と隔たりがあり、この原因については今後更に検討する。WVFから $Re$ 数を増加させると、第二基本周波数が出現し、準周期モード(MVF)に遷移したことが確認される。臨界 $Re$ 数は約 $Re=1000$ であった。また、 $Re$ 数=1400では第3の低周波基本周波数が現れた。このスペクトルに関しては今の所、よく分かっておらず、今後の課題であるが、Takeda<sup>2)</sup>らが指摘する低周波からのカオス現象を捉えている可能性もある。

### 5 結言

- (1) 正規2セルモードにおいて波動Taylor渦へ遷移する臨界Reynolds数がUVPにより高精度に測定され、数値解析結果とも定性的に合致した。
- (2) 準周期解振動に遷移する臨界Reynolds数もUVP計測により明確に捕捉することができた。
- (3) 第三番目の基本周波数が $Re=1400$ あたりから捉えられたが、この解析については今後の課題である。

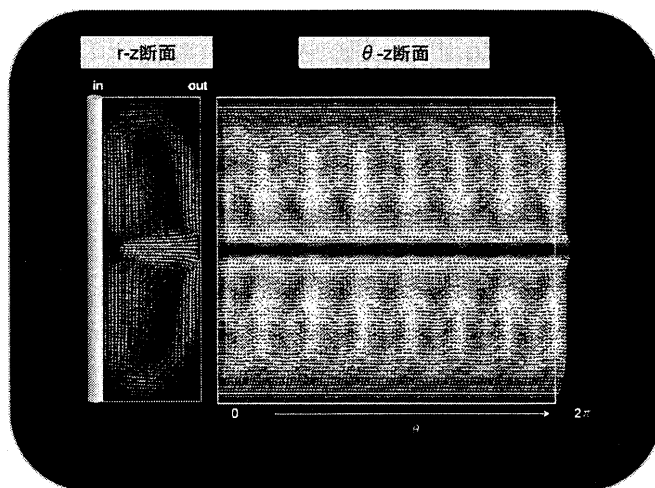


Fig.3 Numerical result (Normal2cell Re=700)

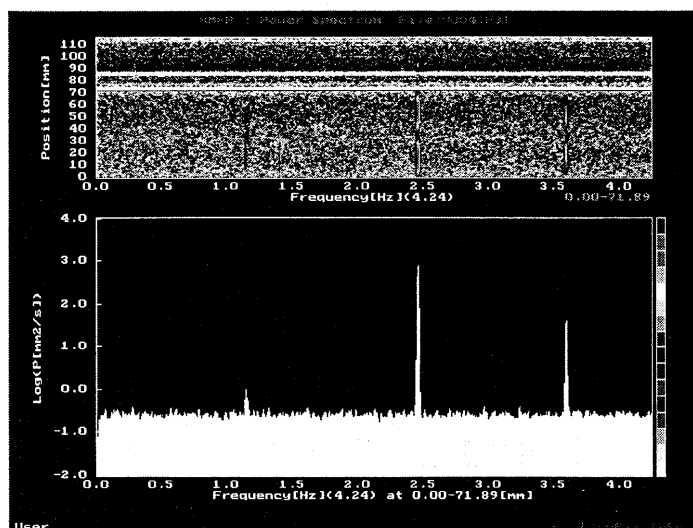


Fig.4 Spectrum with a Normal2cell mode at  $Re=800$

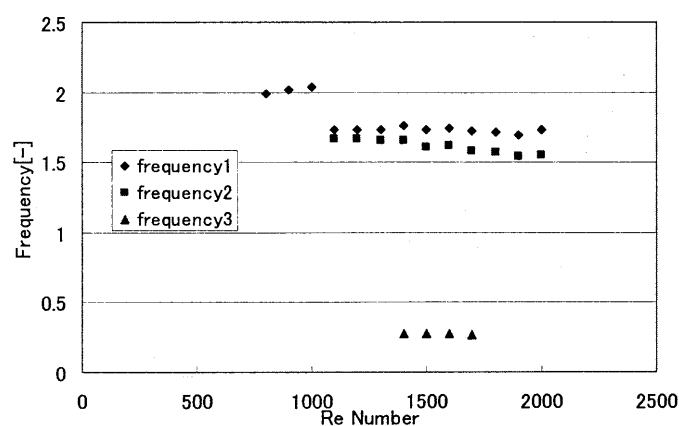


Fig.5 Dimensionless Frequency  
( $\Gamma=3$ ,  $\eta=0.667$ , N2cell)

### 参考文献

- (1) Y, Takeda, J. Fluid Mechanics, Vol.389(1999)
- (2) 中村・ほか3名, 機論, 54-505, B, (1988), 2425