

301 低アスペクト比 Taylor 渦の数値解析と可視化実験による振動特性について

Oscillation analysis of a Taylor vortex flow with a short annulus
by numerical and experimental visualization

○学 長井 明寛 (室蘭工大院) 正 河合 秀樹 (室蘭工大)
正 高橋 洋志 (室蘭工大)

Akihiro NAGAI, Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto-cho, Muroran, Hokkaido
Hideki KAWAI, Muroran Institute of Technology
Hiroshi TAKAHASHI, Muroran Institute of Technology

Keywords : Taylor vortex flow, small aspect ratio, numerical analysis, visualization experiment

1 緒言

Taylor 渦流れ(TVF)とは, 同軸二重円筒間に流体を満たし, 内円筒のみを回転させると軸方向にセル状に発生する渦流れのことである. Taylor 渦流れは軸受けなどの流体を用いる機械の振動や騒音を生じる原因となる一方, 局所的なせん断や高せん断流れの発生が非常に少なく, 動植物の細胞壁を傷つけることなくソフトに攪拌できることからバイリアクターへの応用, また, セル状の渦構造によりフィルターの目詰まりや濾さいの堆積を抑制できることから, 医療分野への応用も期待されている. これらの応用には小型化が求められるため, 作動流体高さと同軸円筒間隙との比であるアスペクト比の小さな Taylor 渦流れの研究が望まれる. この様な小さな系では上下境界層の影響が大きくなり, 複雑な流れ場になることが知られており, その詳しい解析が求められている.

ここでは, 低アスペクト比における Taylor 渦流れについて, 3次元数値解析と PIV による可視化実験によって, 時間発展に伴う渦モード形成過程と振動特性について調査した.

2 実験装置・実験方法

2・1 TVF 発生装置

TVF 発生装置を Fig.1 に示す. R_{in} は内円筒半径, R_{out} は外円筒半径, H は測定部高さ, $W_{in}=R_{in}\Omega$ (Ω は角速度)は内円筒周速度を表す. これより, 円筒間隙間 $d=R_{out}-R_{in}$, アスペクト比 $\Gamma=H/d$, 半径比 $\eta=R_{in}/R_{out}$, レイノルズ数 $Re=d R_{in}$

Ω/ν , 動粘性係数 $\nu=\mu/\rho$ (μ は粘性係数, ρ は密度)で定義される. 本実験では, 実寸法 $R_{in}=50\text{mm}$, $R_{out}=75\text{mm}$ で $\eta=0.667$, $H=75\text{mm}$ で $\Gamma=3$ の装置を使用する. 作動流体にはグリセリン水溶液, トレーサー粒子にアルミニウム粒子(平均粒子径 $80\mu\text{m}$)を用いた.

2・2 PIV システム PIV システム(Particle Image Velocimetry system)とは, 作動流体にトレーサー粒子を添加し, レーザーシ-

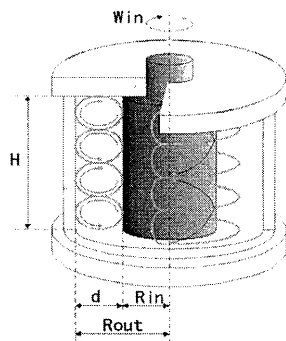
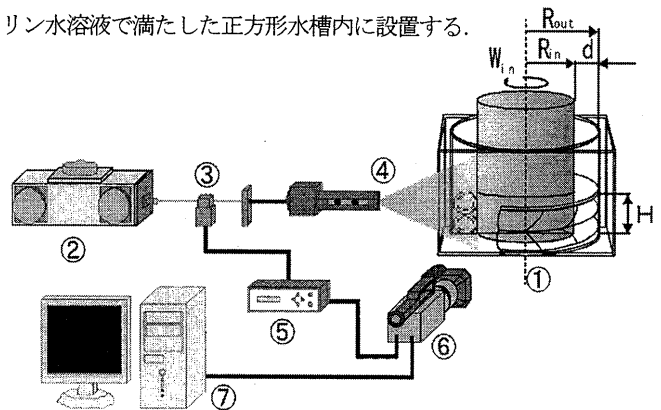


Fig.1 Taylor vortex flow

ト光を内円筒の軸方向に対して水平に入光させる. そして AOM(音響振動発生機)により高精度で点滅させたレーザーシート光とデジタルビデオカメラを同期させ微小時間差の画像を撮影し, 画像間を動いた粒子の挙動を追跡することにより非定常な流速分布を測定するものである. またレーザーの屈折を防ぐために外円筒はグリセリン水溶液で満たした正方形水槽内に設置する.



①Test section ②Argon laser
③AOM ④Laser sheet light
⑤PIV driver ⑥Digital video camera
⑦Computer

Fig.2 Particle image velocimetry

PIV システムによる可視化実験において, 変異 3 セルモードと正規 2 セルモードの渦が見られた. ここで正規モードとは, 上下の境界面において流れが外円筒から内円筒方向へ流れる状態で定義され, 最も安定なモードである. 以後表示するベクトル図は右側を内円筒, 左側を外円筒とする.

3 数値解析手法

基礎方程式は円筒座標系 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.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -\nabla P + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 V \quad (1)$$

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (2)$$

このアルゴリズムは速度の予測値を考慮することにより圧力かわりにスカラーポテンシャル ϕ を導入し、連続の式を満たすように ϕ のポアソン方程式を解くものである。離散化の方法として、時間はEuler前進差分、空間には中心差分を用いた。表示はすべて無次元量で内円筒半径 R_{in} と代表速度 W_{in} を代表寸法とする。格子点数は、半径方向(r)に30、軸方向(z)に90、周方向(θ)には100である。解析では軸対称を仮定する。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。また、解析結果の可視化のために以下のような関数 ψ を用いる。

$$u = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (3)$$

4 実験・数値解析結果

4・1 渦モード形成過程 $Re=400$ における変異3セルモード形成過程のPIV測定結果、数値解析結果をそれぞれFig.3, Fig.4に示す。Fig.3のPIV測定結果から、時間 t の進行に伴い、まず内円筒側の上下端面からそれぞれセルが形成されていき、そのセルからさらに軸方向に複数のセルが形成される。その後、振動を伴いながら中央2つのセルの境界面付近のセルが押しつぶされ、また下側端面のセルが押しつぶされることで、変異3セルモードへと変化する結果が捉えられた。Fig.4から数値解析結果においても同様な形成過程が捉えられた。定常状態まで発達した渦の形状も、PIV測定結果、数値解析結果ともによく合致しており、数値解析は渦モード形成過程の傾向において実験結果を良好に再現しているといえる。

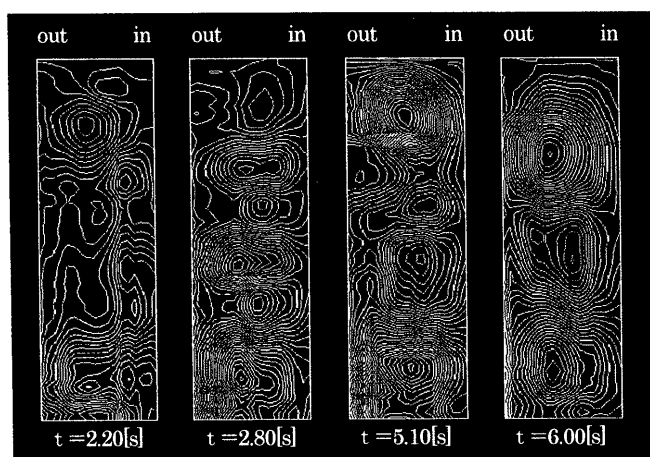


Fig.3 Anomalous 3cell mode by PIV ($Re=400$)

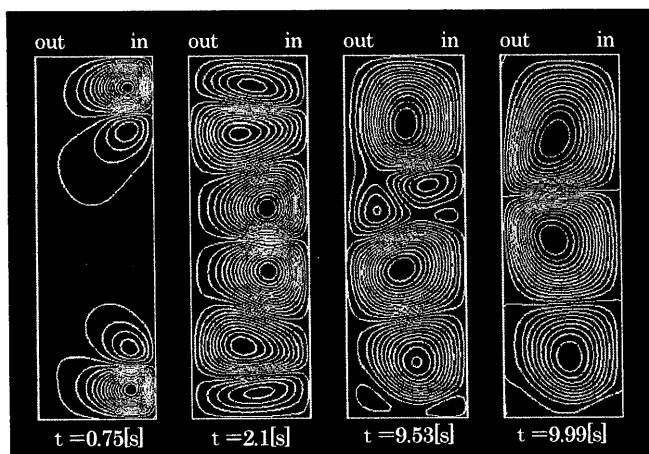


Fig.4 Anomalous 3cell mode by numerical analysis ($Re=400$)

4・2 定常流れにおける渦振動 Fig.5は $Re=800$ における正規2セルモードの数値解析結果である。十分な緩和時間を取り、定常流れとなったある時間での結果であり、 $r-z$ 断面の渦形状が周方向(θ)への進行に伴い、変化していく様子を表している。結果から θ が異なる $r-z$ 断面において、上下2つのセルがそれぞれ軸方向へ伸縮し、またセル同士の境界面が振動している様子が捉えられた。この振動は周方向に周期的にみられ、また振動の様子は時間的に周方向へと変化していく結果がみられた。これまでの研究³⁾から、正規2セルモードが波動Taylor渦(Wave Vortex Flow)に遷移する臨界 Re 数は $\eta=0.667$ では、 $Re=700\sim 800$ であることが確認されている。このためFig.4の結果から、3次元数値解析においてはTVFが波動Taylor渦へ遷移する臨界 Re 数付近の、振動を伴う渦流れも再現できると考えられる。

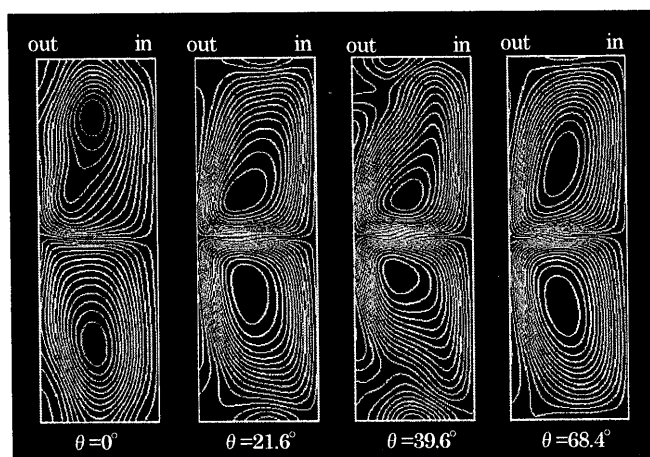


Fig.4 normal 2cell mode by numerical analysis ($Re=800$)

5 結言

- (1) 時間発展に伴うTVFの形成過程において、安定した Re 数領域ではPIV測定結果と数値解析結果が良好に合致する結果が得られた。
- (2) 3次元数値解析により、波動Taylor渦へ遷移する臨界 Re 数付近の、TVFが捉えられた。

参考文献

- (1) 古川裕之, 渡辺崇, 戸谷順信, 中村育雄, アスペクト比が小さい場合のテイラー渦流れ(時間発展力学系におけるモード形成と分岐), 日本機械学会論文集, B編, 66-643, 2000, pp.655-662.
- (2) 渡辺崇, 梅村宣生, 古川裕之, 中村育雄, 低アスペクト比のテイラー渦流れのモード形成に関する3次元数値解析, 日本計算工学会論文集, Vol.6, pp.83-90.
- (3) 岸川真吾 “低アスペクト比におけるTaylor-Couette渦流れの流動挙動” 平成16年度室蘭工業大学修士学位論文
- (4) 宮脇博史 “固液相流におけるTaylor渦構造の解析” 平成13年度室蘭工業大学修士学位論文