

406 アスペクト比の小さい Taylor-Couette 渦の数値解析

Numerical simulation in a Taylor-Couette Vortex Flow with a small aspect ratio

○正 河合秀樹 (室蘭工大) 学 齋藤義鷹 (室蘭工大)

Hideki KAWAI, Muroran Institute of technology, 27-1, Mizumoto-cho, Muroran City, Hokkaido
Yoshitaka KAWAI, Muroran Institute of technology**Keywords:** Taylor-Couette vortex flow, Photosynthesis, destruction of assessment of cell, Microorganism, Bio Support Polymers, Chlorella Calibration curve

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でバイオリアクターへの応用などが期待されている. その実用化には小型化が重要なファクタであるが, TVF 装置において作動流体高さ(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.

本報告では, 低アスペクト比 TVF における多重モードの中で, 安定的な正規 2セルおよび正規 4セルモードについて振動領域までの流れについて数値解析を行った.

2 数値解析方法

基礎方程式は無次元円筒座標系 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. 無次元化にあたり代表寸法と代表速度は, それぞれ内円筒半径(R_{in})と内円筒周速度(W_{in})を選択し, 離散化として時間には Euler 前進差分, 空間には中心差分を用いた. 格子点数は, 半径方向(r)に 30, 軸方向(z)に 90 で, 円周方向(θ)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. 実際の TVF 装置としては, $R_{in}=50\text{mm}$, 外円筒半径 $R_{out}=75\text{mm}$, 高さ $H=75\text{mm}$ を想定し, 円筒高さ H と内外円筒の間隙 $d (=R_{out}-R_{in})$ の比であるアスペクト比 $\Gamma=H/d=3$, 内外円筒の半径比 $H=R_{in}/R_{out}=0.667$ とした. また, Reynolds 数は $Re=dR_{in}\Omega/\nu$ (ν : 動粘度, Ω : 角速度) で定義される. 作動流体はグリセリン水溶液 68wt% を想定し, $\nu=1.05\times 10^{-5} [\text{m}^2/\text{s}]$ とした.

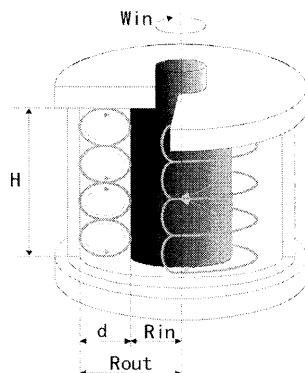
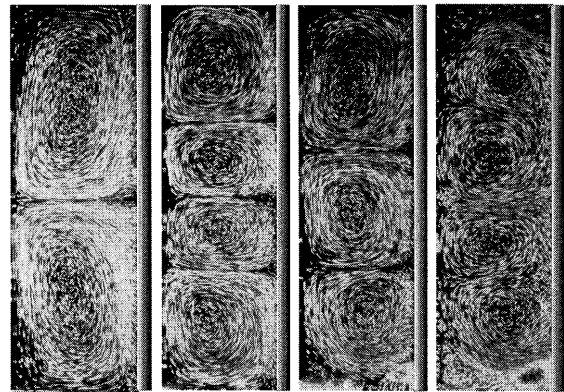


Fig.1 Taylor vortex flow



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

Fig. 2

Various vortex modes

($\Gamma=3$, $\eta=0.667$, $Re=380$)

3 多重渦モード

多重モードの分類については, Nakamura らが知られるが, 本実験が対象とする $\Gamma=3$ において発生する多重渦モードを可視化図 Fig.2 に沿って簡単に説明する. 多重渦は Re 数が同じでも, 装置上下境界端から発生する Ekman 境界層の影響を受けて様々なモードに分岐する現象を言い, それぞれの渦モードへの分岐は内円筒の加速率によって変化する. この図に示されるモードは, 半径比 $\eta=0.667$, $Re=380$ で, 各々波動 Taylor 渦に遷移する前の定常状態を示す. 左から(a) Normal 2cell mode (N2 セル), (b) Normal 4cell mode (N4 セル), (c) Anomalous 3 cell mode (A3 セル), (d) Anomalous 4cell mode (A4 セル) と呼ばれる. ここで正規(Normal)モードとは上下境界端に接する流体が両者とも内円筒に帰る方向 (inflow 方向) を持つ流れで, $\Gamma=1$ を除いて一般的に後述の変異モードより安定である. また同じ正規モードでも内円筒を徐々に加速することで得られる主モードは, 内円筒を急加速させる二次モードに比べて更に安定であると言われ, 高 Reynolds 数領域でも擾乱によって渦が壊れにくい. $\Gamma=3$ では正規 2セルモード (N2 セル) が主モードである. 変異(Anomalous)モードとは正規モードと逆の流れが上下境界端の少なくともどちらか一方に現れる現象で, Extra 渦が境界端角に内在すると言われている. 本実験では, 流れの安定な N2 セル

ルと正規モードより不安定な変異モード(A3セル)の流れを対象とし、それぞれについて渦状態を調べる。

4 解析結果および実験結果

Fig.3に $Re=700$ における N2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、右図は半径方向に対して $d/2$ の位置における $\theta-z$ 断面での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も $\theta-z$ 速度成分は時空間的にほとんど振動しておらず、 $\eta=0.667$ の N2セルにおいては、波動 TVF へ遷移した直後では界面振動は見られない。

Fig.4には $Re=900$ における同様の結果を示した。この Reynolds 数は波動 TVF への遷移からかなり高い Re であり、全体的に活発な振動現象が観察され、軸対称性も崩れて、周方向に位相のずれが確認される。それぞれの渦中心は上下方向へ広がっており z 軸中央付近の渦対の界面振動も空間的振動も大きく、上下の渦対同士が界面で大きく振動している。

Fig.5には、N4セルにおける $Re=600$ の結果を示した。上下に二つの outer flow が観察されるが、その空間的な位相差は見られない。また波動 TVF への遷移についても N2 よりも低く、早い段階で波動 TVF に遷移することが分かる。この結果は中村らとよく一致している。

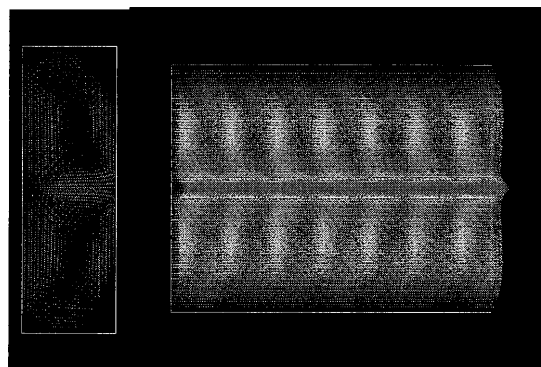
5 結言

正規2および4セルモードにおいて波動 Taylor 渦へ遷移する臨界 Reynolds 数近傍の流れを三次元による数値解析で行い、両モードとも中村らの臨界 Reynolds 数と定性的によく合った。また各々のモードについて、以下のことが示された。

- (1) 正規2セルモードの波動 TVF への遷移については軸対称流が存在し、その後周方向に対する振動が出現する。
- (2) 正規4セルに関して、軸対称流は殆ど確認されず、臨界 Reynolds 数を越えたと同時に周方向流れに振動が生じる。

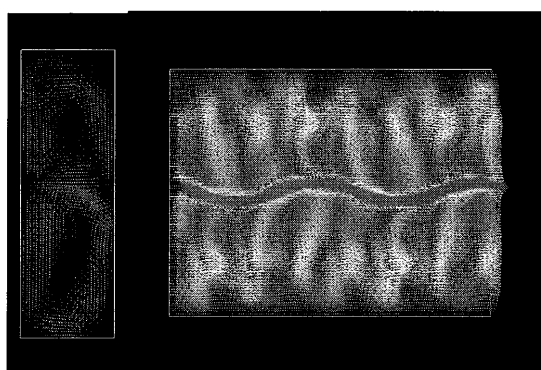
参考文献

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



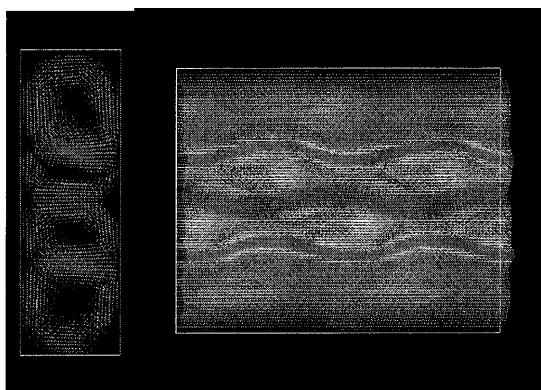
(a) $r-z$ (b) $\theta-z$

Fig.3 Velocity vector at N2cell, $Re=700$



(a) $r-z$ (b) $\theta-z$

Fig.4 Velocity vector at N2cell, $Re=900$



(a) $r-z$ (b) $\theta-z$

Fig.5 Velocity vector at N4cell, $Re=600$