

## 磁性流体によるアスペクト比の小さい Taylor 渦流れの数値解析

## Numerical analysis of magnetic fluid Taylor vortex flow with small aspect ratio

○正 河合 秀樹 (室工大) 学 長井 明寛 (室工大院)

正 井門 康司 (名工大) 正 木倉 宏成 (東工大)

Hideki KAWAI, Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto-cho, Muroran, Hokkaido  
 Akihiro NAGAI, Muroran Institute of Technology  
 Yasushi IDO, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya  
 Hiroshige KIKURA, Tokyo Institute of Technology, Ohokayama2-12-1, Meguro-ku, Tokyo

It is known that the effect of the boundary edge arises on the various modes in the structure and the generating number of Taylor vortex flows with low aspect ratios. In this study, our purpose is to investigate the method to control a Taylor vortex flow (TVF) with a small aspect ratio by using magnetic fluids. Flow field of magnetic fluid under the magnetic field is investigated by numerical analysis. The numerical model device has a radial ratio of 0.667, aspect ratio of 3 and the gap length between the inner and outer cylinders of 25mm. The magnetic field is applied to the flow field using coils put in electric current located on the outside of the vessel. The flow structure of magnetic fluid is controlled by the optional magnetic field

Keywords : Magnetic fluid, Taylor vortex flow, small aspect ratio, numerical analysis

## 1 緒言

Taylor 渦流れ(TVF:Fig.1)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で, 局所的なせん断や高せん断流れの発生が少ないため, 動植物細胞壁の損傷を抑えながら効率的な培養が可能なバイオリアクターや, セル状の渦構造による固液分離機能を利用した濾過装置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間との比であるアスペクト比の小さい Taylor 渦の研究が望まれている. しかしながら, この様な上下に固定端を有する小さな系では Ekman 境界層の影響が大きくなり, 複雑且つ不安定な流れ場になるため上記装置へ応用する際の信頼性に大きく影響すると考えられる. そこで現在, 低アスペクト比 Taylor 渦の詳しい解析が求められている.

このような低アスペクト比 Taylor 渦では, 作動流体に磁性流体を用い, 任意の磁場を印加することによって複雑に分岐する渦モード遷移の制御が期待できる. そこで本研究では, 磁性流体 Taylor 渦の渦モード制御を, 数値解析を用いて試みる.

## 2 解析モデル・数値解析手法

## 2-1 解析モデル

Taylor 渦発生装置を 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,  $W_{in}=R_{in}\Omega$  ( $\Omega$  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

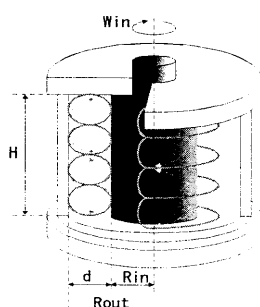


Fig.1 Taylor vortex flow

イノルズ数  $Re=dR_{in}\Omega/\nu$ , 動粘性係数  $\nu=\mu/\rho$  ( $\mu$  は粘性係数,  $\rho$  は密度) で定義される. 数値解析では, 寸法  $R_{in}=50\text{mm}$ ,  $R_{out}=75\text{mm}$  で  $\eta=0.667$ ,  $H=75\text{mm}$  で  $\Gamma=3$  の装置を仮定する. 作動流体は水ベース磁性流体 (タイホー工業: W-40) 50%希釈を仮定する. 動粘度  $\nu$  および密度  $\rho$  はそれぞれ  $\nu=2.63\text{mm}^2/\text{s}$ ,  $\rho=1200\text{kg}/\text{m}^3$  である.

Fig.2 に磁場印加に用いるコイル周辺の磁場分布を示す. そして Fig.3 のように, Taylor 渦発生装置の下端面角付近において半径方向 (coil 1), 軸方向 (coil 2) にコイルを配置し 2 パターンの磁場を印加する.

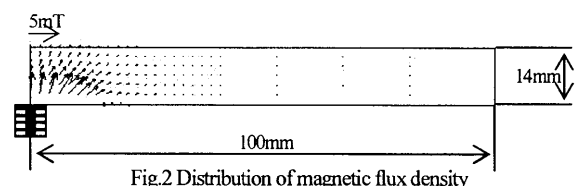


Fig.2 Distribution of magnetic flux density

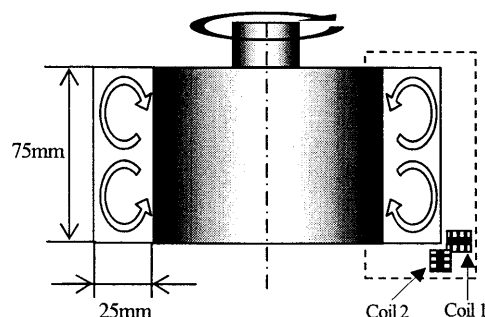


Fig.3 Analytical model of magnetic fluid Taylor vortex flow

解析結果では, 正規 2 セルモード, 変異 3 セルモード, 正規 4 セルモードの渦が見られた. ここで正規モードとは, 上下の端面に

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、Fig.3 の点線で囲まれた部分の拡大図であり左側を内円筒、右側を外円筒とする。

### 2 - 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。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のかわりにスカラーポテンシャル  $\phi$  を導入し、連続の式を満たすように  $\phi$  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。記号にはベクトル表示を使用し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 25、軸方向(z)に 75 で、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。

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

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

ここで  $F_m$  は磁性流体にはたらく磁気力で、次式 (3) で与えられる。変数はそれぞれ磁化  $M$ 、磁場  $H$ 、磁性流体の磁化率  $x_m$  である。

$$F_m = M \cdot \nabla H = x_m H \cdot \nabla H \quad (3)$$

### 3 数値解析結果

Fig.4 に正規 2 セルモードから変異 3 セルモードへの渦モード遷移結果 (Re=600) を示す。正規 2 セルモード形成後、Coil 1 のように外円筒側下端面角付近において半径方向にコイルを配置し、約 1.0 秒間磁場を印加する。すると、磁気力により下端面に変異モードのセルが強制的に形成され、そのセルは時間進行に伴い外円筒側から内円筒側へ移動し、また中央のセルを押しつけながら発達していく様子が見られた。磁場印加から 10 秒程で上 2 つのセルと下側の変異モードのセルが安定した状態となり、変異 3 セルモードへと遷移する結果が得られた。

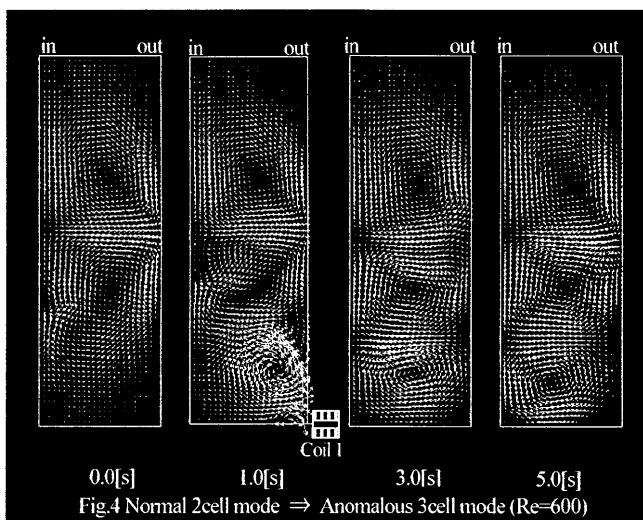
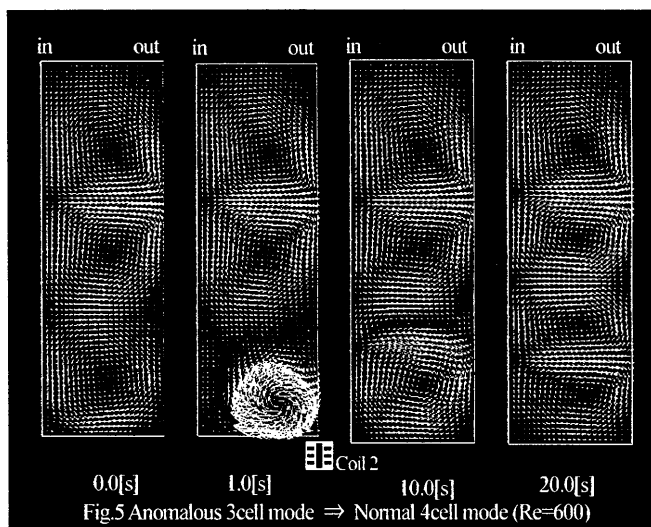


Fig.5 に変異 3 セルモードから正規 4 セルモードへの渦モード遷移結果 (Re=600) を示す。ここでは Coil 2 のように外円筒側下端

面付近で軸方向にコイルを配置する。変異 3 セルモード形成後、約 1.0 秒間磁場を印加すると、磁気力により下端面で正規モードのセルが形成され、そのセルが下から 2 つ目のセルを強く押しつけながら発達する。押しのけられたセルは、一度内円筒側へ押しつぶされそうになるが時間進行と共に再び勢力を回復し、他のセルと同様の大きさまで再度発達した。結果、磁場印加から 20 秒程で安定した正規 4 セルモードが形成される様子が捉えられた。



上記 2 つの結果から、Taylor 渦発生装置の下端面角の位置にコイルを配置することで、正規モード・変異モードのセルを発生させることができた。固定された上下端面で発生させるセルは、Ekman 境界層の影響によって中央付近で発生させるセルに比べ発達しやすいと考えられる。このことから、上下端面付近でコイル周辺の磁場から誘起される流れ場を任意に形成することで、磁性流体を用いた Taylor 渦のセル個数制御の可能性が見出された。

### 4 結言

- (1) 作動流体に磁性流体を用いた Taylor 渦流れにおいて、流れ場に任意の磁場を印加することで正規 2 セル⇒変異 3 セル、変異 3 セル⇒正規 4 セルの渦モード遷移が確認された。
- (2) 磁性流体を用いた Taylor 渦は、上下端面付近で任意の回転方向のセルを形成することで、流れ場の制御がある程度可能であると考えられる。

### 参考文献

- (1) H.Kikura, T.Sawada, T.Tanahashi and L.S.Seo, Propagation of surface waves of magnetic fluids in traveling magnetic field, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 83 (1990) 167-169
- (2) Yasushi Ido, Hideyuki Nakagawa, Takahiro Kunitomo and Hideki Kawai, Numerical Analysis of the Behavior of Magnetic Fluid in Traveling Magnetic Field Using the ALE GSMAC FEM, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 23 (2007) 1-0
- (3) 伊藤大介, 木倉宏成, 有富正憲, 磁性流体テイラーコエット渦流れにおける渦モード遷移の磁場制御, 日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集, 2005(11) pp.121-122 20050317