The Japan Society of Mechanical Engineers

212 回転を伴う円筒容器内の流動挙動解析

Numerical Simulation of Vortex Breakdown in a Confined Flow Generated by a Rotating Disk

正 杉山 均 (宇都宮大学大学院工学研究科) ○大石 文高 (宇都宮大学大学院工学研究科)

Hitoshi SUGIYAMA and Fumitaka OOISHI
Energy and Environmental Science, Utsunomiya Univ., 7-1-2 Yoto, Utsunomiya,321-8585

Key Words: Numerical Analysis, Vortex Break Down, Swirling Flow

1. 緒言

密閉円筒容器内の上壁，あるいは下壁を回転させると円筒容器の中心線上での急激な逆圧力勾配の生成により，渦を形成することが実験[1]，あるいは数値解析[2]により確認されている．こうした旋回流を伴う場合の渦生成は，Peckham ら[3]による報告が最初であり三角翼後流場の流れにて確認された．その後，多くの実験と解析が各種旋回流れ場にて報告されているが，こうした渦生成と崩壊機構のメカニズムについては，未だ議論の余地を残している．

密閉円筒容器内の旋回流を伴う流れについては，これまで可視化実験による解析が主であったが，最近，レーザ流速計による定量的な測定結果が Fujimura ら[4]により報告された．そこで，本研究では，彼らの計測結果を対象に数値解析し，予測精度の査証を行うと同時に，こうした流動場について検討することを目的とする．解析に際しては，非定常三次元解析を行い実際に即した解析を行う．

2. 解析手法

2. 1 数値解析

解析に際しては，三次元流れ場として，以下に示す運動量輸送方程式を解くこととした．

$$\frac{\partial U_i}{\partial t}+U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right) \qquad (1)$$

さらに，境界条件設定に関しては，境界条件を精度良く設定可能な境界適合座標系を用いて解析を行った．境界適合座標系は以下の数学定理より支配方程式を物理座標系から計算座標系に変換する．

$$\frac{\partial}{\partial X_i}=\frac{\partial\xi}{\partial X_i}\frac{\partial}{\partial\xi}+\frac{\partial\eta}{\partial X_i}\frac{\partial}{\partial\eta}+\frac{\partial\zeta}{\partial X_i}\frac{\partial}{\partial\zeta} \qquad (2)$$

こうした座標変換を行うことにより，支配方程式はより複雑となるが境界条件の設定，支配方程式の離散化が容易となる特徴を有する．一般に円形断面に円筒座標系を適用すると中心点は，特異点となり式の離散化の際，工夫が必要となるが，境界適合座標系を適用するとこうした問題を回避することができる．

解析対象とした供試空間を Fig.1 に示す．座標系は，底壁断面の中心を原点に，底壁面に X，Y 平面をとり，底壁面に垂直な高さ方向を Z とした．それぞれ対応する速度を U，V，W とする．また，便宜的に r を導入し任意位置を示した．計算格子点は断面内で 55×55，高さ方向に 81 の総数 245025 点の格子を配列した．Fig.2 に計算格子図を示す．物理変化の大きな壁面近傍で計算格子は密に設定した．図中の ξ，η，ζ は，計算平面上の座標系を示し格子に沿う座標を示している．また，本解析では流れは層流とし，

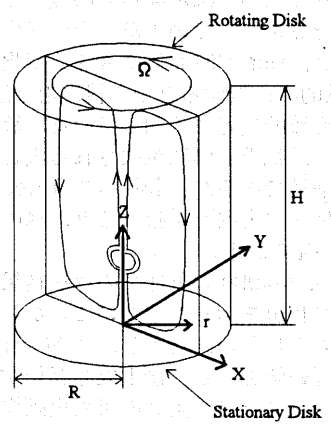

Fig.1 供試空間

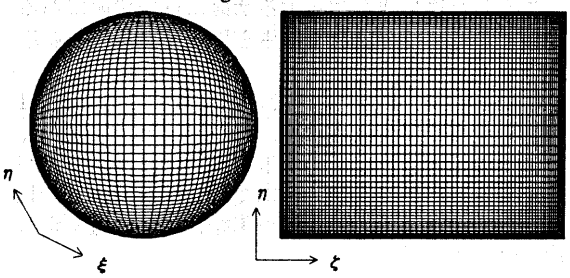

Fig.2 計算格子

回転レイノルズ数 $Re=\Omega R^2/\nu$ と容器縦横比 H/R の二つの無次元パラメータを変化させ，計算結果を実験結果と比較した．Ω，R，H および ν はそれぞれ回転角速度，円筒容器半径，円筒容器高さ，および作動流体の動粘度を示す．回転面は図に示す通り上壁面である．

3. 結果と考察

Fig. 3 から 7 に計算結果を示す．各図は，それぞれ(a)中心軸上での圧力分布と軸方向速度線（点線が計算，○が実験），(b)Y－Z 平面上での速度ベクトル線図（左が計算，右が実験），(c)流れ関数と実験での可視化写真で構成されている．ただし，圧力分布は計算結果のみ示している．

一般的に共通した流れとしては，以下のような流れを形成する．回転している上壁面に接している流体は，壁から角速度を得て角速度と垂直方向に遠心力が作用する結果，回転しながら徐々に放射状に外へ向かって流動し円筒の側壁へ達する．側壁へ達すると，流体は側壁に沿って回転しながら下方の静止面に向かって流れる．静止している下壁に達すると，静止壁に沿って中心軸に向かって流れ，中心軸に到達した流は，流れ方向を逆転し上方の回転壁へ向かって回転しながら流れる．以上のように，回転円盤による

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

旋回流と断面内に形成される圧力勾配により生成される流れが混在する三次元流れ場を形成する．

Fig. 3 に H/R=2.5, Re=1010 の結果を示す．この条件では渦は生成されない．上面が回転面であり，面に接している流体が遠心力によって側壁に向かって飛ばされ，循環流を形成している．軸方向速度の最も速い位置と，圧力の最も低い位置がほぼ一致している．計算結果は，中心軸上の速度，速度ベクトルとも比較的良好に実験値を再現している．

Fig. 4 に H/R=2.5, Re=2200 の結果を示す．この条件下では中心軸上に 2 個の渦が生成されることになるが，円筒容器の Y－Z 平面内に二つの渦が両結果に観察されている．数値解析は非定常計算を行っているが，その渦生成の初期の段階で，渦の成長，崩壊が時間的に大きく変化することが観察された．定量的に比較すると中心線に沿う速度分布，速度ベクトルとも比較的良好に予測している．静止円盤側に生成される渦と，回転円盤側に生成される渦とを比較すると，後者の方が縦長であるが，計算もこうした特長を捉えている．しかし仔細に実験と比較すると，渦の大きさと位置に若干のずれが見られる．

Fig. 5 は H/R=1.5, Re=990 の条件での比較結果を示す．中心軸上での速度が負値を示していないことから実験，計算とも渦生成は認められない．ただし，Z/H＝0.6 近傍で速度は，ほぼ零に近い値を示し，渦生成を開始する状態に近い流れとなっていることが，実験の可視化画像から推察される．計算もこの近傍で，渦度等値線図が歪んでいることから，こうした渦生成を誘起する状態に近い状態にあることが推察できる．この状態で，さらにレイノルズ数を増加した結果を Fig. 6 に示す．

Fig. 6 は H/R=1.5, Re=1290 での比較結果であるが，1 つ渦が静止円盤寄りに生成される．計算結果では渦発生後，非定常的に渦の拡大，縮小を繰り返しつつ，また，位置が徐々に静止面側に移動し，図の状態で定常になる．中心軸上に沿う速度，速度ベクトルとも計算結果は実験値を定量的に予測している．

Fig. 7 は，さらにレイノルズ数を増加させた場合の比較結果である．条件は H/R=1.5, Re=2180 であるが，ここまで増速すると渦は消滅することが両結果から解る．特徴的な現象として，Z/H＝0.2 近傍で渦度等値線が歪んでおり，また Z 軸に沿う速度も，この位置で零に近い値を示すことを指摘できる．

4. 結論

回転を伴う密閉円筒管路内の流れを三次元数値計算により予測した．その結果，本解析手法は定量的に実験値を良好に予測した．同時にこうした渦生成が時間的に変化しながら安定渦に生成していくことを明らかにした．

5. 参考文献

[1] Escudier, M.P.,Exp. Fluids 2, 1984, pp.189-196

[2] Lopez, J.M., J. Fluid Mech.,221, 1990, pp.533-552

[3] Peckham, D. H. and Atkinson, S. A., Aeronautical Research Council, C.P.No.508, TN No. Aero.2504, 1957

[4] Fujimura.K. et al.,Trans. of the ASME.,J. Fluids of Engineering, 123, 2001,p.604

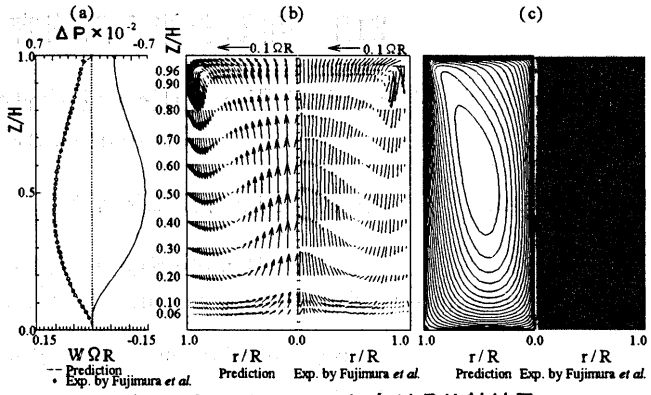

Fig.3 H/R=2.5,Re=1010における比較結果

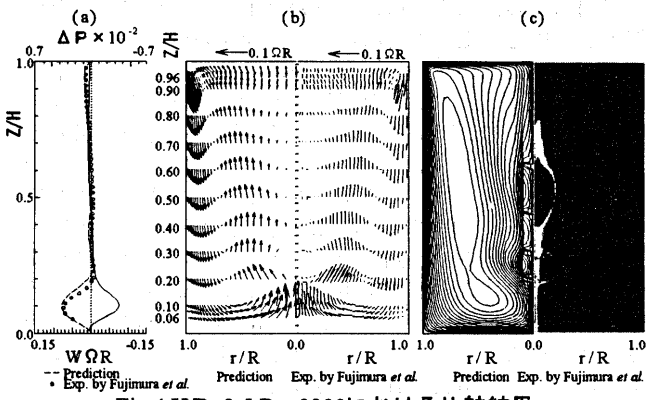

Fig.4 H/R=2.5,Re=2200における比較結果

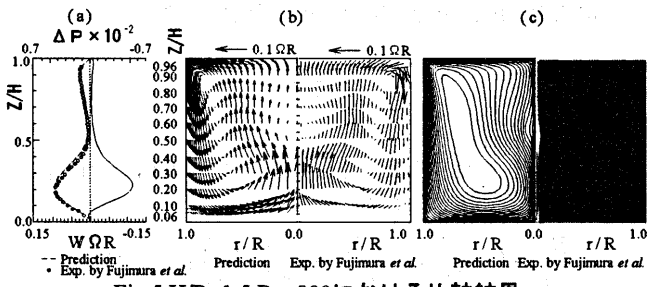

Fig.5 H/R=1.5,Re=990における比較結果

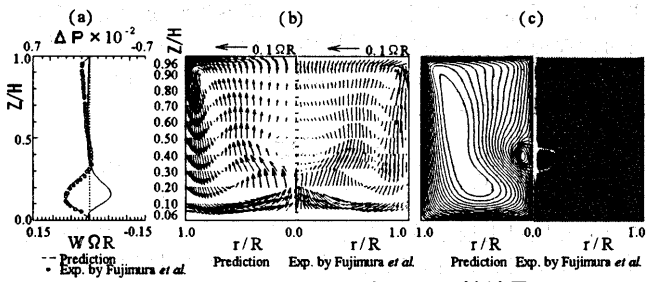

Fig.6 H/R=1.5,Re=1290における比較結果

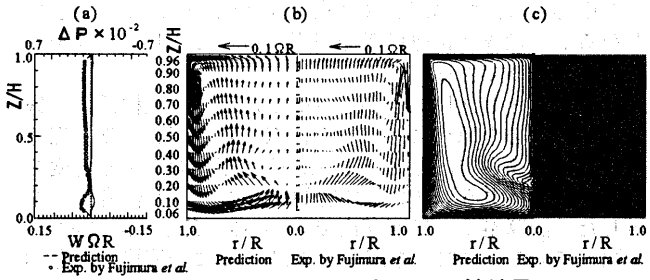

Fig.7 H/R=1.5,Re=2180における比較結果

NII-Electronic Library Service