

## No. 8

## 周囲流体より軽い渦輪の鉛直挙動

益田重明（慶大理工）、有菌智之（慶大院）

## Vertical movement of vortex ring with smaller density than ambient

S. Masuda and T. Arizono

Dept. of Mech. Eng., Keio University,

## ABSTRACT

The purpose of the present investigation is to reveal the effect of buoyancy on vertical movement of a laminar vortex ring whose density is smaller than ambient. Its downward motion may be obstructed by buoyancy and travel distance may be reduced. The numerical simulation based on the finite volume method is performed assuming axisymmetry and incompressibility. Vertical movement is significantly obstructed by small density difference even below 0.1%. The ring is decelerated, its diameter is reduced and the circulation decreases with higher rate than uniform density. Due to the baroclinic generation of negative vorticity, the outer part of a ring is gradually peeled away and finally stops to descend. The buoyancy effect decreases relatively with increasing initial circulation.

Keywords : Vortex ring, density difference, numerical simulation

## 1. 序論

渦輪の自己推進機能を攪拌に利用する試みがある。その際に問題となるのは渦輪の到達距離で、特に周囲流体との間に密度差がある場合の挙動を知る必要がある。

そこで本研究では、周囲流体より密度が低い層流渦輪が鉛直下方に進行する時に、浮力の影響により渦輪の進行速度や到達距離などが変化する現象について、数値解析を用いて調べた。

## 2. 数値解析

図1に計算領域を示す。十分大きな円筒容器内で静止している密度  $\rho_2$  の高密度流体の上部に、密度  $\rho_1$  の低密度流体が入ったシリンダー（内径  $D$ ）が設置されていて、 $0 \leq t \leq t_{off}$  の期間にのみステップ状に一樣速度  $U_{in}$  を与えた。

非圧縮、物性値一定と仮定した無次元化された連続の式、運動方程式および物質輸送方程式は、

$$\nabla^* \mathbf{U}^* = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{U}^*}{dt^*} = -\nabla^* P^* - 2 \frac{A}{Fr} \rho^* \mathbf{j} + \frac{1}{Re} \nabla^{*2} \mathbf{U}^* \quad (2)$$

$$\frac{dX}{dt^*} = \frac{1}{ScRe} \nabla^{*2} X. \quad (3)$$

$P^* = 2(P - P_0)/(\rho_1 + \rho_2) U_{in}^2$ ,  $\rho^* = (\rho_2 - \rho)/(\rho_2 - \rho_1) Re \equiv U_{in} D / \nu$  (レイノルズ数),  $A \equiv (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1)$  (アットウッド数),  $Fr \equiv U_{in}^2 / Dg$  (フルード数),  $Sc \equiv \nu / D_{12}$  (シュミット数) である。 $X = C_1 / (C_1 + C_2)$  ( $C_1, C_2$ : 高・低密度流体のモル濃度) は低密度流体のモル分率,  $\rho = C_1 M_1$  ( $M_1$  は分子量) である。また、動粘性係数は  $\nu \equiv \mu / \rho_2$ 、供試流体は水—食塩水とし  $\mu = 1.002 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,  $D_{12} = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $Sc = 4.9 \times 10^3$  で一定とし、 $Re$  と  $A$  を変化させた。

境界条件は、シリンダ内壁と円筒容器の上面 BC ではすべり無し、流出部 (CD と DE) では対流境界条件を用いた。モル濃度に関しては、OA と AB では  $X=1$ , CD と DE では  $X=0$  とした。空間に関しては1次風上差分、時間陰解法を用い、圧力は simple 法により求めた。 $X$  は1次風上差分により離散化した。格子数は格子依存性を確認した上で  $150 \times 225$  を用いることにした。

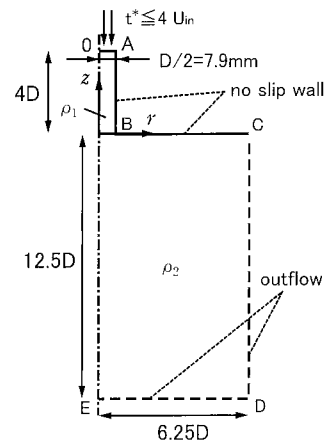


図1 流れ場の概要と計算領域

## 3. 結果および考察

## 3-1 密度差による渦輪の変化

図2にPIVによって測定された流速ベクトル図と数値解析の結果の一例を示す。等密度の場合と比較すると、実験、数値解析共、密度差の増加と共に渦輪の下降は妨げられ、渦輪の直径もわずかながら減少していることが示されている。数値解析による渦輪の下降速度が実験より全体的に小さいのは、前者では一樣な流入速度を与え

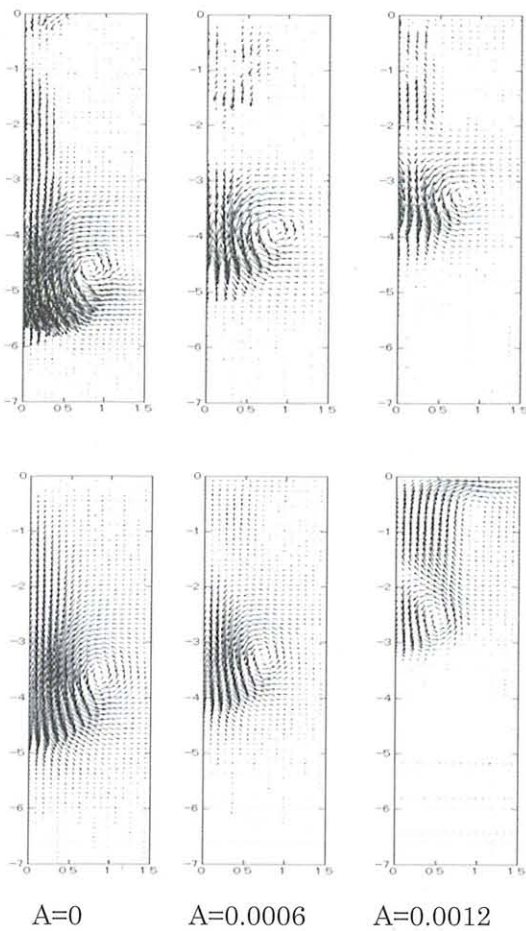


図2 流速ベクトルの例 ( $t^* = 9$ 、 $Re=630, Fr=0.01$ 、上: P I V、下: 数値解析)

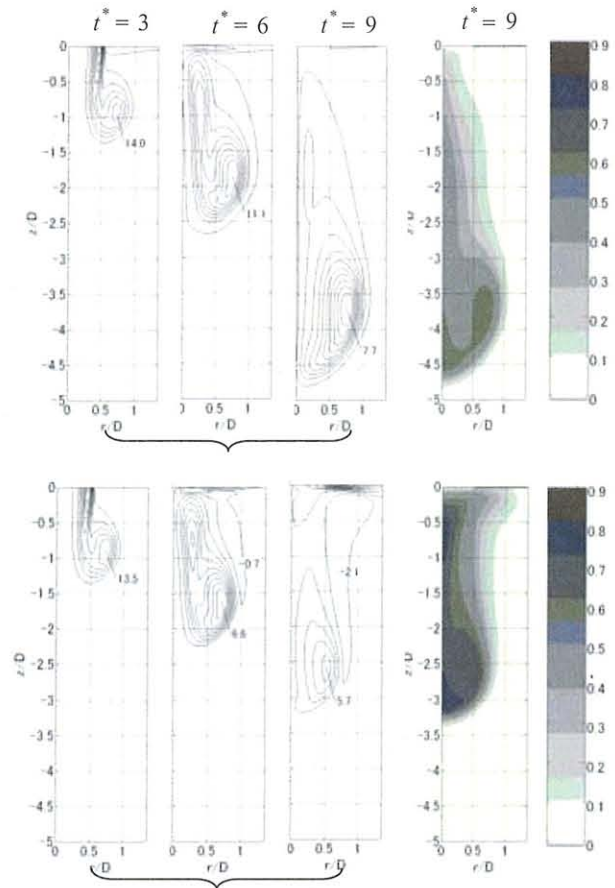


図3 渦度 (左3列) とモル濃度 (右) 上:  $A=0$ 、下  $A=0.0012$ 、 $Re=630$

ているのに対し、実験ではピストン運動により渦上:  $A=0$ 、下  $A=0.0012$ 、 $Re=630$  輪を発生させているという相違によるものと考えられる。

図3に渦度等値線図とモル濃度分布の一例を示す。等密度 ( $A=0$ 、上段) の場合の渦度に注目すると、 $t^* = 3$  で既に渦輪が形成され、 $t^* = 4$  で流出が止まった後は渦輪がシリンダ開口部を離れて下降しており、渦度等値線の輪郭はモル濃度のそれとほぼ一致している。これと密度差がある場合を比べてみると、 $z$  方向の進行が妨げられ、渦度のピーク値が減少し、渦度の分布域も縮小している。特に渦輪の外側に負の渦度が生成されていることが注目される。

### 3-2 渦度に対する浮力の影響

密度差のある渦輪の鉛直挙動をさらに検討するために渦度方程式、

$$\frac{d\omega^*}{dt^*} = (\omega^* \cdot \nabla^*) U^* + \left[ 2A \frac{\nabla^* \rho^*}{\rho^*} \times \frac{dU^*}{dt^*} - 2 \frac{A \nabla^* \rho^*}{Fr \rho^*} \times j \right] + \frac{1}{Re} \nabla^{*2} \omega^*$$

の浮力項 ([ ] 内) について吟味した。図4はその等値線で、渦輪の前方から外側にかけて負の渦度生成が確認でき、その絶対値は密度差が大きい方が大きい。負の生成により、渦輪は外側から渦度が減少している。

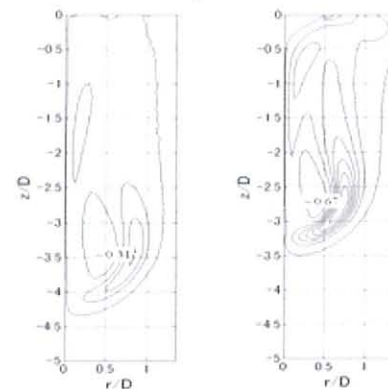


図4 渦度方程式の浮力項の分布 ( $t^*=9$ 、左:  $A=0.0006$ 、右:  $A=0.0012$ )

### 4. 結論

- 1) 0.3%程度の密度差でも渦輪の進行に強い障害となる。
- 2) 密度差が大きいほど渦度や循環の時間減少率が速まり、最終的には自己誘導機能は消滅し渦輪は停止する。
- 3) 原因は渦輪外周部に発生する、浮力に基づく負の渦度生成にある。