

# 渦流形ダイオード内 3 次元流れの数値実験

堂田周治郎・逢坂一正

岡山理科大学工学部機械工学科

(1990年 9月30日 受理)

## 1. 緒 言

パワフルイディクスにおいて、渦流形素子は付着形素子とともに代表的な流体素子である。特に、渦流形ダイオードはフルイディック・ダイオードの中で構造が簡単で比較的大きなダイオード比をもつため、原子力施設におけるメンテナンスフリーの廃液移送ポンプの逆止弁<sup>1)~4)</sup>や貯水池やダム of 放水量調整用の制御弁<sup>5)</sup>などに利用されている。既報<sup>6)</sup>では、逆流時の旋回流に大きな影響を与える渦室の壁面粗さと渦室内流れおよびダイオード比との関係を明らかにした。しかしながら、ダイオード効果を明らかにするには、さらに渦室内流れを詳細に調べる必要がある。

渦室内流れについては、Savino ら<sup>7)</sup>の流速分布測定、Wormley<sup>8)</sup> や Bichara ら<sup>9)</sup>の静特性の解析や原田ら<sup>10)</sup>の動特性に関する研究がある。これらはいずれも近似解析モデルを用いたものであり流れの基礎方程式を直接解く試みはきわめて少ない。渦流形ダイオードの逆方向流れに相当する旋回流の数値計算結果が清水ら<sup>11)</sup>によって報告されているが、ダイオードを構成した場合の素子形状について順流時、逆流時の流れを計算した報告はなされていない。

そこで、本論文では、素子内の流れを非定常 3 次元非圧縮層流として数値計算を行い、渦流形ダイオードを構成した場合について順流時、逆流時の渦室内流れを調べる。まず、逆流の過渡応答について、圧力低下と内部流れの関係を中心に調べる。次に、逆流の定常流について、フローパターン、圧力分布を詳細に調べる。最後に、順方向の流れおよび重要な特性量であるダイオード比について検討する。数値計算は、付着形素子について用いた<sup>12)</sup> p-u 法により行った。

## 2. 計算方法および境界条件

計算の対象とした素子形状は、ダイオードを構成した場合の渦室内の基本的な流れを知るとい意味で計算および境界条件が比較的簡単な矩形渦室と 4 つの接線ノズルおよび矩形出口管から構成されるものとした (Fig. 1 参照)。流れを非定常、3 次元、非圧縮、粘性流れとし、Fig. 1 に示す直交座標系による無次元運動方程式と連続の式は次式で与えられる。

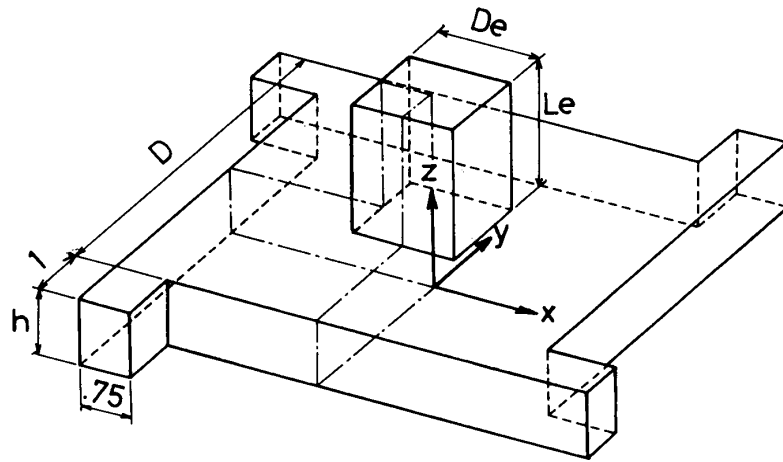


Fig. 1 Three-dimensional flow passage

$$\text{運動方程式: } \partial u / \partial t + u \cdot \nabla u = -\nabla p + R \nabla^2 u \quad (1)$$

$$\text{連続の式: } \nabla u = 0 \quad (2)$$

ここで,  $R$ は無次元の動粘性係数<sup>12)</sup>である。

(1), (2)式の差分近似式や計算方法は既報<sup>12)</sup>で詳細に述べているのでここでは省略する。上式を $p$ - $u$ 法を用いて計算する際の境界条件は以下のようにした。上流断面では, 1) 流れはノズル軸方向に変化しない。2) 断面中心の総圧 $P_t$ は時間的に一定である。下流断面では, 3) ノズル軸方向流速が1次変化する, 4) 静圧は0である。5) すべての壁面上で流れはスリップしない。初期条件は, 時刻 $t=0$ ですべての流速0, 下流断面以外の圧力は $P_t$ である。

差分近似のための直方体格子の大きさは,  $\delta x = \delta y = \delta z = 0.25$ とした。時間刻み幅 $\delta t = 0.1$ , 総圧 $P_t = 1$ とし, 各タイムステップにおける圧力は, SOR法を用いた繰り返し計算により求め, 誤差の最大値が $10^{-5}$ 以内に入るまで計算した。

流れのレイノルズ数は矩形渦室の長さ $D$ を等価直径とみなし, 渦流形素子でよく用いられる次式で定義されるものを用いた。

$$R_e = D \cdot u_o / \nu \quad (3)$$

$$u_o = Q / (\pi Dh) \quad (4)$$

ここで,  $\nu$ は動粘度,  $Q$ は流量,  $h$ は渦室高さであり, 代表流速 $u_o$ として, 渦室外周における平均半径流速を用いている。

### 3. 結果および考察

流れは渦室中心( $z$ 軸)について対称であるとし, Fig. 1の一点鎖線で示すように, 全体の4分の1の領域について計算した。渦室の大きさは $D=6$ ,  $h=1$ とし, 逆流時の出口管の幅は, 接線ノズルと出口管の断面積が大きく変わらないようにするため,  $D_e=1.5$ とした。出口管長さは $L_e=2$ とした。この基本形状における圧力の計算点数は696点とな

る。

### 3. 1 過渡状態の逆流

ここでは、 $D=6$ 、 $R=0.005$ について、逆方向流れの過渡応答について議論する。

流速、圧力、流量の時間変化をFig. 2に示す。 $V_i$ は接線ノズル中心の $y$ 方向の流速、 $W_e$ 、 $P_e$ は渦室出口中心( $z=1$ )における $z$ 方向の流速および静圧である。 $Q$ は流量であり、 $V_c$ 、 $V_d$ は後で述べる。渦室出口の流速 $W_e$ の変化に注目すると、原田ら<sup>10)</sup>が指摘しているように、時刻 $t=15$ を境に2つの段階に大別できる。第1段階) $t<15$ では、 $t=5$ までに流速は大きくなり、 $5<t<15$ ではほとんど変化しない。第2段階) $t>15$ では、再び流速が大きくなり $t=35$ でほぼ定常流となる。渦室出口圧 $P_e$ を見ると、第1段階ではほとんど変化がなく、 $t>15$ すなわち第2段階に入ると圧力低下が起こる。

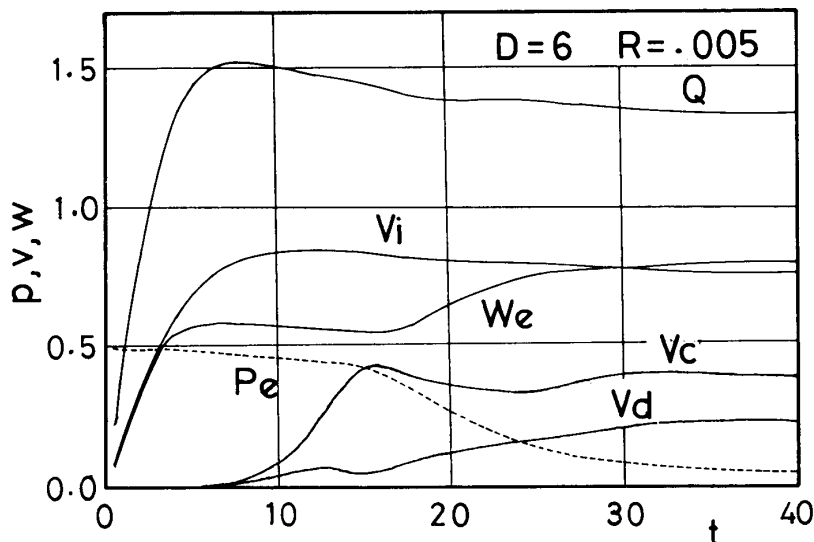


Fig. 2 Transients of velocity and pressure in the reverse flow

一方、流量 $Q$ や入口流速 $V_i$ は第2段階でやや小さくなるが、特徴ある変化は見られない。流量の最終値は1.31で(3)式で定義されるレイノルズ数は $Re = 82$ となる。Fig. 3に中央面付近( $z=0.625$ )のフローパターンの時間変化を示す。 $t=5$ ではほとんどの流体粒子は渦室中心に向かい、旋回は見られない。 $t=10$ で、接線ノズルからの流れは円弧を描いて渦室中心に向かうが、中心面( $y=0$ )付近の速度ベクトルを見てわかるように旋回流にはなっていない。 $t=15$ になると旋回しはじめるが、渦室中心および下壁近く( $z=0.125$ )では旋回がきわめて弱い。 $t=20$ では渦室全体で強い旋回流が形成される。

Fig. 2の流速 $V_c$ 、 $V_d$ がこの様子をよく表している。 $V_c$ は中心面( $y=0$ )で、中央面近く( $z=0.625$ )、 $V_d$ は下壁近く( $z=0.125$ )の $y$ 方向流速である。第1段階の $5<t<15$ は、旋回が渦室外周から中心まで及ぶ時間であり、 $V_c$ 、 $V_d$ は次第に大きくなる。 $t>15$ では旋回流が加速されていく。

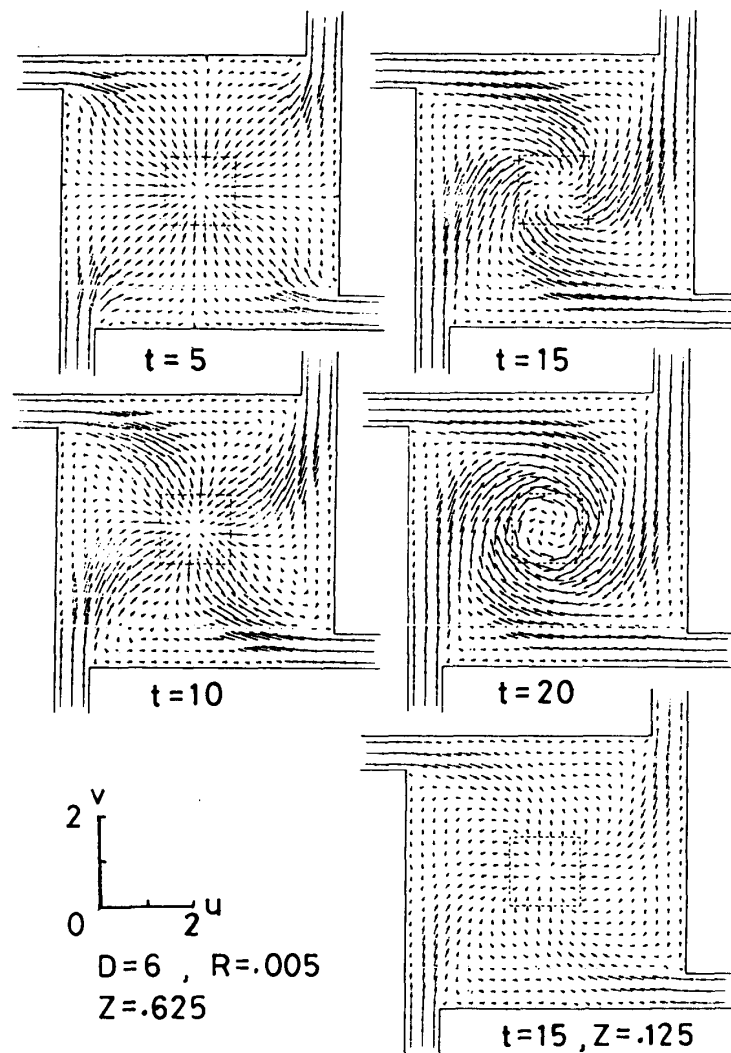


Fig. 3 Transients of the reverse flow pattern at  $z=0.625$

Fig. 4 に中心面 ( $y=0$ ) の圧力分布の時間変化を示す。第1段階の  $t < 15$  では圧力低下は小さく、第2段階に入ると次第に渦室中心の圧力が低下していく。

次に、フローパターンの深さによる違いを見る。Fig. 5 に渦室中心面における速度ベクトルを示す。出口管部の流れは略している。  $t=15$  までは同じようなパターンを示す。すなわち渦室中心付近を除いて、上下壁面に境界層が発達した単調な流速分布となる。ただ出口管側の上壁面に近い方が流速が大きい。しかしながら、  $t=20$  では、  $t=50$  の定常流に見られるように、中央面で流速が小さく、上下壁面近くで大きくなるという Savino らの実験結果<sup>7)</sup>にある特徴的な流速分布になりつつある。これは Fig. 4 の圧力分布で示されるように、渦室内の圧力勾配が大きくなり接線方向流速の小さい上下壁面近くで流れが渦室中心に向かうためである。

以上のことから、過渡状態における渦室内の流れは次のようにまとめられる。第1段階) 渦室内に静止していた流体は、渦室中心に向かう吸い込み状流れとなり、その後旋回が渦室外周から始まりやがて渦室全域に及ぶが弱い旋回流である。したがって渦室内の圧力低

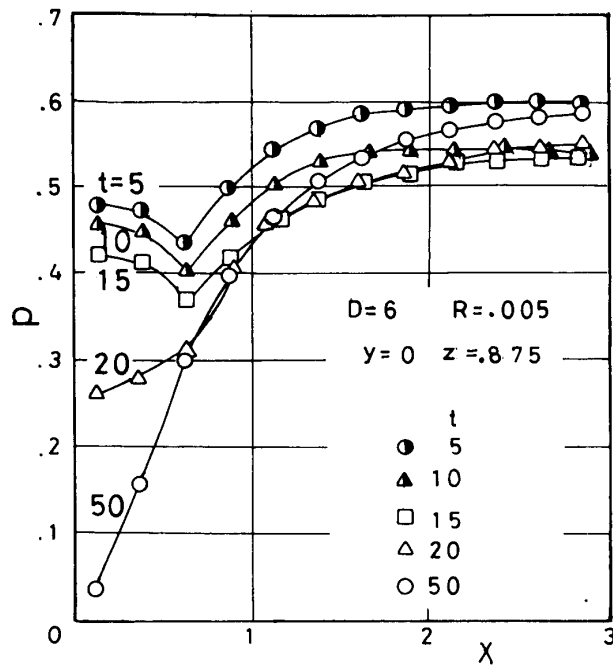


Fig. 4 Transients of pressure distribution at  $y=0$  ,  $z=0.875$

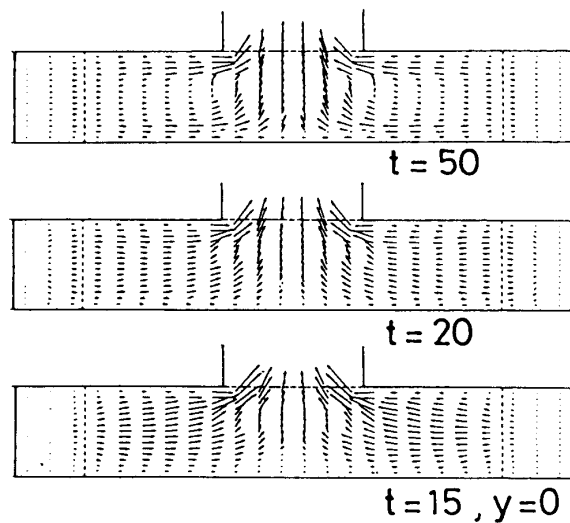


Fig. 5 Transients of the reverse flow pattern at  $y=0$  plane

下は小さく、多くの流体は素子の中央面を通り出口へ向かう。第2段階) 旋回流は加速されはじめ、渦室中心の圧力も低下しはじめる。これに伴い、渦室内では中央面より上下壁面近くで出口へ向かう流れが多くなり、やがて定常流となる。渦流形ダイオードをフルイディク・ポンプなどに利用する場合は、圧力低下が早く起こる、すなわち第1段階の時間が短い素子形状を用いることが望ましい。

### 3. 2 定常状態の逆流

ここでは、 $D=6$  ,  $R=0.005$  ,  $t=50$  の逆方向定常流について述べる。

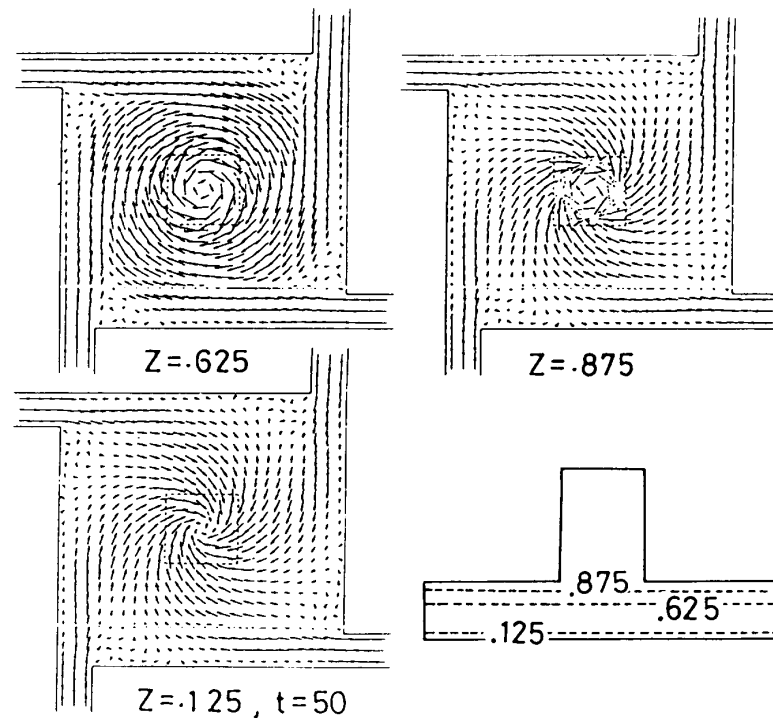


Fig. 6 Steady flow pattern at several z-plane

Fig. 6 にいくつかの $z$ 面における速度ベクトルを示す。下壁近く ( $z=0.125$ ) では、流速も小さく、短い円弧を描いて渦室中心に向かう流れとなる。中央面近く ( $z=0.625$ ) では強い旋回流となり、上壁近く ( $z=0.875$ ) では、下壁の場合とほとんど同じであるが、出口管入口の所で流速が大きい。これは Fig. 5 の速度ベクトル ( $t=50$  の場合) から、下壁より上壁の方が多くの流体が流れ、出口へ向かうためである。Savino らは旋回流が強くなると、外周へ向かう流れ (いわゆる逆流現象) が存在することを示している。Fig. 5 を見ると、渦室中心へ向かう流速が 0 となる所があり、レイノルズ数が高くなると逆流現象が起るものと思われる。

Fig. 7 に等圧分布を示す。(a)は  $z=0.125$  の場合である。これまでの多くの実験結果に見られるように、渦室中心に向かうほど圧力は低下している。(b)は 3 次的に表現したもので、出口管下の渦室では出口管に近づくにつれて圧力が低下している。さらに出口管内で負圧になる領域もある。一方、渦室の他の領域では圧力は深さ方向についてほとんど変化しない。

以上のことを Fig. 8 の流脈線 (定常流ゆえ流線でもある) を用いてまとめる。接線ノズルの上壁部からの流体粒子は比較的短い旋回ののち渦室中心に向い出ていく。一方、中央面からの粒子は大きな円弧を描きながら上部へ行き渦室出口に向かう。中央面と上壁の間の流れは旋回しつつ上部へ行きやがて渦室から出ていく。比較のために、水を動作流体、白色ポスターカラーをトレーサーとして流れの可視化実験を行った結果の一例を Photo. 1 に示す。使用した素子モデルは渦室長さ  $D=120\text{mm}$ 、渦室高さ  $h=20\text{mm}$ 、出口管

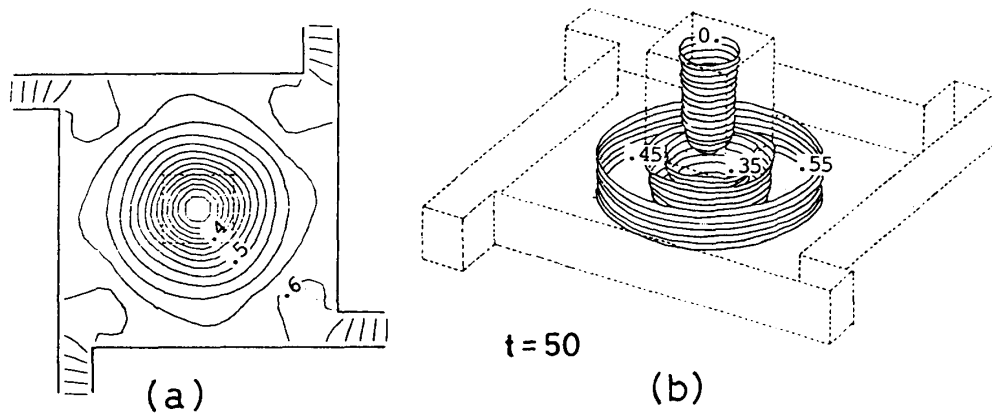


Fig. 7 Isobaric lines of the steady reverse flow  
 (a)  $z=0.125$ ; (b) 3 - dimensional

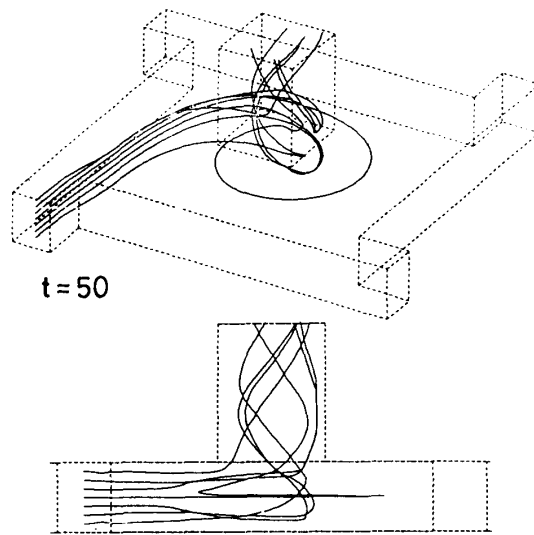


Fig. 8 Streaklines of the reverse flow

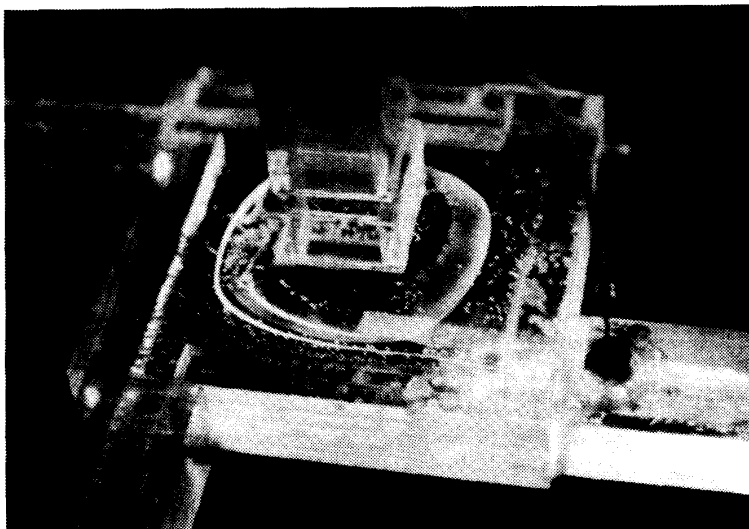


Photo. 1 Experimental streakline from a tangential nozzle

幅 $D_e=30\text{mm}$ の矩形素子である。写真を見ると計算結果と同じような流脈線を示すことがわかる。

### 3. 3 順流およびダイオード比

ここでは、順方向の流れおよびダイオード比について述べる。

Fig. 9 に流速, 圧力, 流量の時間変化を示す。 $V_i$  等の記号は Fig. 2 の場合と同じである。出入口の流速が大きく変化するのは  $t=10$  までであるが,  $V_e$  に見られるように, 渦室内は不規則な変化をする。この状態はいつまでも続き, 他の素子形状においても見られた。流量は $Q=1.42$  で定常となり, 逆流の場合より大きい。すなわち, 流れやすいことがわかる。

$t=80$  における速度ベクトルの一例を Fig.10 に示す。(a) は  $z=0.375$  面, (b) は  $y=0$  面におけるものである。(a)において渦室中心に向かう流れがみられるが, これは, (b)を見てわかるように, 流れが一度下壁にぶつかりその後外周へと向い外壁にぶつかり渦室中心に向かうためである。しかしながら(b)を見てわかるように, きわめて複雑な流れであることがわかる。

最後にダイオード比について述べる。既報<sup>6)</sup>で示したように, ダイオード比はレイノルズ数  $R_e < 2000$  までは  $R_e$  の増加とともに高くなる。低レイノルズ数においては,  $1 \sim 2$  ときわめて小さい。今回の数値計算で得られた順流時/逆流時の流量比は $D=6$  の場合 1.08,  $D=4$  の場合 1.12 である。 $D=7$ ,  $h=1.5$ ,  $L_e=1$  の場合 1.31 という値も得られてい

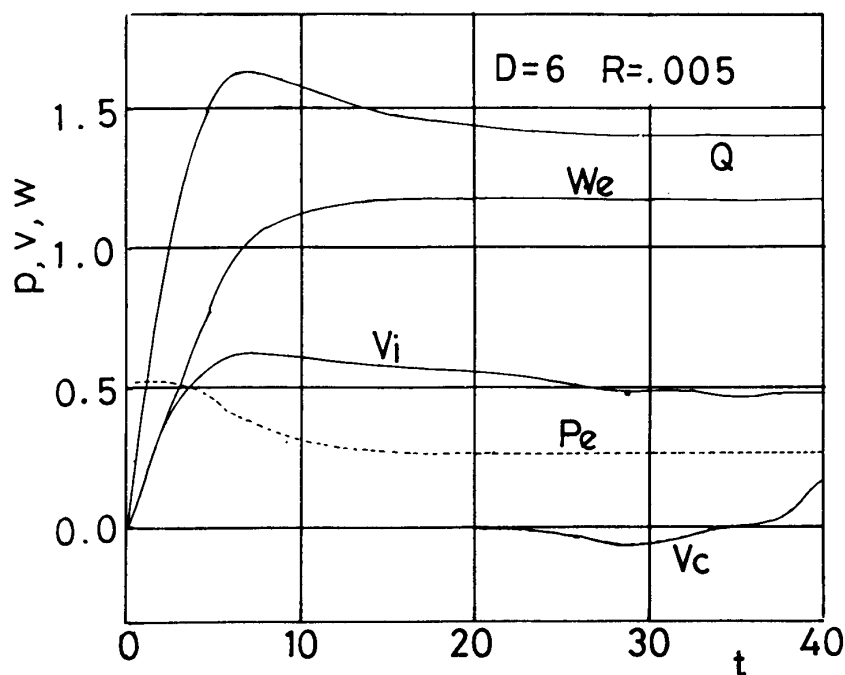
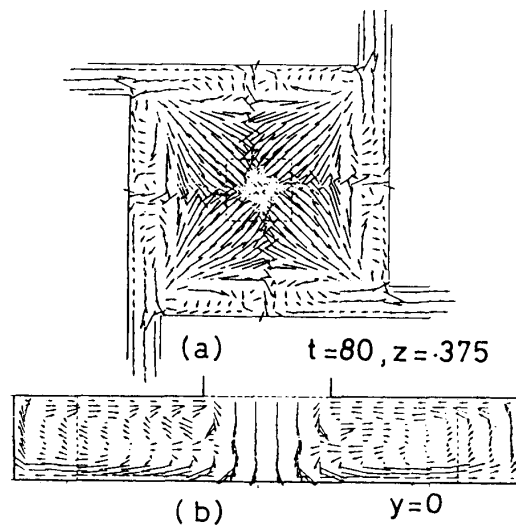


Fig. 9 Transients of velocity and pressure in the forward flow



Fig.10 Forward flow pattern at  $z=0.375$ ,  $t=80$ 

る。このように、層流領域ではあるが、ダイオード比を計算により求めることが可能となった。しかしながら、実用素子の設計に直接結びつけるには、今後乱流領域で数値計算を行う必要がある。

#### 4. 結 言

渦流形ダイオード内流れの数値実験に関する本研究は以下のように要約できる。

- (1) 逆流の過渡応答は、実験により2つの段階で起こることが知られていたが、本計算により内部流れと詳細に関係づけることができた。ダイオード効果の基本となる圧力低下は第1段階では小さく、渦室全域で旋回流が加速される第2段階ではじめて顕著になる。
- (2) 渦室中心へ向かう流速は中央面より上下壁面近くで大きいという逆流特有の現象が計算により示された。
- (3) ダイオード比を理論的に求めることが可能となった。

最後に、本研究に対し有益な御討論を頂いた岡山大学工学部和田力教授、ならびに本実験に協力された本学卒業生の泉 輝行、田村俊雄両君に対し厚く感謝します。

#### 参考文献

- 1) J. R. Tippets, G. H. Priestman and D. Thompson: Developments in Power Fluidics for Application in Nuclear Plant, Trans. ASME, Journal of D. S. M. C., 103-4, pp.342-351 (1981)
- 2) 和田 力, 清水 顕, 高木 実: 渦流形ダイオードを用いた純流体ポンプの効率に関する研究, 計測自動制御学会論文集, 20-5, pp.442-446 (1984)
- 3) 吉富秀樹, 和田 力, 小泉忠夫, 室山賢一: 渦流形流体ダイオードを用いた移送ポン

- ブの性能に及ぼす設計パラメータの影響, 日本機械学会論文集 (B編), 55-513, pp. 1386-1391 (1989)
- 4) S. M. Robinson, R. M. Counce and G. V. Smith : An Experimental Study of Important Parameters for the Operation of a Continuous-Flow Fluidic Pump, the Journal of Fluid Control, 19- 2, pp. 7-21 (1988)
  - 5) H. Brombach : Flood Protection by Vortex Valves, Trans. ASME, Journal of D. S. M. C., 103- 4, pp.338-341 (1981)
  - 6) 堂田周治郎, 逢坂一正 : 渦流形ダイオードの特性におよぼす壁面粗さの影響, 計測自動制御学会論文集, 26-11, pp.1316-1318 (1990)
  - 7) J. M. Savino and E. G. Keshock : Experimental Profiles of Velocity and Radial Pressure Distributions in a Vortex Contained in a Short Cylindrical Chamber, Technical Report No. NASA TN D-3072 (1965)
  - 8) D. N. Wormley : An Analytical Model for the Incompressible Flow in Short Vortex Chambers, Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, 91- 2 , pp. 264-276 (1969)
  - 9) R. T. Bichara and P. A. Orner : Analysis and Modeling of the Vortex Amplifier, Trans. ASME, 91- 4, pp.755-763 (1969)
  - 10) 原田正一, 渡辺哲郎 : うず室内の液体の過渡応答, 日本機械学会論文集, 43-367, pp. 1068-1074 (1976)
  - 11) A. Shimizu, Y. Matsumoto and T. Wada : A Numerical Study of Swirling Flow Field in a Vortex Diode, Proc. of International Symposium on Fluid Control and Measurement, pp. 235-240 (1985)
  - 12) 堂田周治郎, 逢坂一正 : 流体素子内 3次元流れの数値実験, 岡山理科大学紀要, 17-A, pp.57-74 (1981)

# Numerical Experiments of the Three-Dimensional Flow in a Vortex Diode

Shujiro DOHTA and Kazumasa OHSAKA

*Department of Mechanical Engineering,  
Okayama University of Science,  
1-1, Ridai-cho, Okayama 700, Japan*

(Received September 30, 1990)

In this paper, by means of numerical experiment, the transient response of the flow in the vortex diode and the steady flow field in the vortex chamber are investigated in detail. The flow in the chamber is regarded as an unsteady, three-dimensional, incompressible and viscous flow. The primitive Navier-Stokes equations are solved by using p-u method. The calculated vortex diode consists of four tangential nozzles, a square vortex chamber and an exit nozzle.

The results obtained can be summarized as follows:

- 1) In the transient reverse flow, two distinct stages are recognized as known in the physical experiment. The significant pressure drop in the chamber occurs at the second stage when the rotating flow is accelerated.
- 2) In the steady reverse flow, the radial velocity in the end wall boundary layers is larger than that at midplane. Therefore, the most fluid particles flows out of the chamber through the end wall region.
- 3) The diode ratio, which has never been known theoretically, can be predicted by calculating the forward flow field too.