正方形急拡大流路を通過する三次元層流の数値的研究* (循環渦領域の渦構造)

桜井 元康^{*1}, 中西 助次^{*2}, 大坂 英雄^{*3}

Three-Dimensional Structure of Laminar Flow through a Square Sudden Expansion Channel (Vortex Structure of the Recirculation Zone)

Motoyasu SAKURAI^{*1}, Suketsugu NAKANISHI and Hideo OSAKA

^{*1}Hiroshima Institute of Technology, Comprehensive Research Organization
Miyake2-1-1, Saeki-ku, Hiroshima, 731-5193 Japan

Three-dimensional numerical predictions are presented for a laminar flow through a square channel with a sudden expansion of area ratio 4 : 1 in the range of Reynolds numbers $Re = 20$ to 700, using an Open Source CFD Toolbox (OpenFOAM). In particular, the vortex structure in the recirculation zone behind the sudden expansion was examined from the fluid particle trajectory based on Lagrangian method. The results showed that the main flow diverged through the expansion, and at the constant x section, the flow vector of the duct centerline is directed towards the wall in the vertical plane, while the secondary flow vector of the duct corner is directed toward the centerline in the diagonal plane. So that, the overall regular flow structure consisted of the eight regions that is 1/8 part of the flow field surrounded by two diagonal plane, vertical plane, horizontal plane and peripheral wall. The results of the particle trajectory in the 1/8 area clarifies that the fluid particles enter into the recirculation zone behind the sudden expansion from upstream diagonal corner, and move toward spanwise direction with helical motions, and then they flow out to the downstream region near the lower wall. It seems that the helical type vortex is formed. Moreover, the other particles have been recirculated accompany with longitudinal small scale vortex motion inside the helical type vortex. We call it the ring type vortex. These structures could not be explained by two-dimensional flow structure and showed the characteristics of three-dimensional vortices.

Key Words : Vortex, Shear Flow, Numerical Analysis, Internal Flow, Expansion Channel Flow, Reattachment Length, Three-Dimensional Flow, OpenFOAM, CFD

1. 緒 言

三次元流の剥離・再付着, それに伴い形成される渦の構造は二次元流の結果から単純に予測することはできない。例えば, 平板上に設置された円柱周りに形成される馬蹄形渦⁽¹⁾や壁面からの吸い込みにより形成される竜巻状の螺旋渦⁽²⁾などは二次元流の結果からは説明できない。したがって, 三次元渦構造の理解においては, 三次元計測あるいは三次元計算による力学量の調査は不可欠である。また, Dély⁽³⁾は多数にわたる三次元物体周りの流れの可視化結果より, 可視化の重要性およびトポロジ的解釈の必要性を指摘している。流れ場の可視化による調査(数値計算においてはラグランジュ的な流体粒子の挙動の調査)の必要性は, これまでに行われた三次元の基礎的流れ場であるダクト内後ろ向きステップ流れや対称急拡大流路内流れの結果からも明らかである。この流れ場は速度分布から見ると規則的で単純な流れに見えるが, 可視化結果やラグランジュ的な挙動を見ると側壁の影響を受け予測し難い挙動をとる⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。Durst ら⁽⁵⁾は, 側壁と接合するステップ端のキャビティ

* 原稿受付 2012 年 10 月 2 日

^{*1} 正員, 広島工業大学 共同研究機構 (〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅 2-1-1)

^{*2} 正員, 広島工業大学 工学部

^{*3} 正員, フェロー, 広島工業大学 工学部

E-mail: m.sakurai.ky@it-hiroshima.ac.jp

Fig.1 Calculation model for square expansion channel

に形成される渦が側壁近傍の流れに三次元的な影響をおよぼすことを可視化結果より指摘している．岩井ら⁽⁶⁾はステップ近傍の流れをラグランジュ的な挙動から調査し，側壁近傍で複雑な運動をする流体粒子，ステップ上流から循環渦領域へ流入し渦内で螺旋運動して流出する流体粒子の存在を報告している．稲岡ら⁽⁷⁾は，ステップ上流から循環渦領域へ流入する流体の運動をラグランジュ的な挙動から調査し，スパン方向の圧力差が流体の流入に影響をおよぼすことを報告している．これら渦内へ流入・流出する運動や螺旋運動は，循環渦領域に三次元渦が形成されていることを表している．また，このような運動は二次元急拡大流路内流れや軸対称急拡大流路内流れでは見られない運動であり，三次元渦を特徴付ける上で重要と考えられる⁽³⁾．しかしながら，三次元流におけるこのような調査は，基礎的な流路形状の流れ場においてさへ皆無に近い．

一方，矩形管内流れに注目すると，この種の流れ場は側壁から発達する境界層が互いに干渉し，二次流れが生じるという特徴を持つことが知られている⁽⁸⁾⁽⁹⁾．この二次流れは角部の角度および断面アスペクト比に依存するため， 90° の角部を持ち，流路断面のアスペクト比が1である正方形流路は基本と考えて良い．Alizerdら⁽⁸⁾は，流れ方向コーナーフローの線形安定性解析を行い，コーナーの二等分線上に存在する変曲点と非粘性不安定との関連を指摘している．河原ら⁽⁹⁾は，時間平均的な二次流れには秩序構造が存在し，臨界レイノルズ数付近の乱流では管軸周りに 90° 回転すると互いに一致する二つの四つ渦パターンの平均二次流れが生じることを報告している．層流においても矩形管内の流れは周方向でひずみ速度が異なる不均一な流れとなり，また発達過程では二次流れも生じる．これらと剥離，遷移あるいは上記秩序構造との関係は明らかではない．

急拡大を伴う矩形管内流れは剥離と再付着を伴う流体力学的に重要な流れ場であり，また工学的にもよく見られる流れ場であるが，上述の特徴のため二次元流や軸対称流の結果⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾からその流れの説明はできない．そこで，本報告では正方形急拡大流路内流れの三次元計算を行うことにより，そこに形成される三次元渦の特徴を明らかにする．解析の対象とする正方形急拡大流路内流れは，拡大部上流と下流の流路中心が一致し，拡大部下流の周囲に渡り循環渦の形成がなされる点で軸対称急拡大流路内流れに類似している．一方，矩形管特有の性質を持つため三次元渦の形成が期待できる．したがって，正方形急拡大流路内流れは三次元内部流れの基準となる可能性がある．工学的にも急拡大を伴う三次元流れは数多く存在し，マイクロチップ集積化化学セ

ンシングシステム⁽¹⁴⁾，生体分野におけるマイクロ流体デバイス⁽¹⁵⁾，微細転写領域における樹脂流動解析⁽¹⁶⁾など，多様な課題と関連する．

本研究は正方形急拡大流路内の流れを CFD ツールである OpenFOAM (OpenCFD 社) を用いて三次元の層流計算を行い，拡大部下流に形成される三次元渦の三次元流路内の広がり，剥離領域内の流体の挙動，閉じていない渦領域へ流入・流出する機構を明らかにすることを目的とする．第一段階として，面積比が $A_2/A_1=4$ の場合に限って流れパターン，剥離渦の長さ，流れ場の平均速度と圧力および渦度を調査する．ラグランジュ的な挙動から三次元渦の形状を明らかにし，その挙動を運動学的に説明することを試みる．

2. 主な記号

H_1 : 入口高さ
 H_2 : 拡大部下流の流路高さ
 W_1 : 入口流路幅
 W_2 : 拡大部下流の流路幅
 A_1 : 入口断面積
 A_2 : 拡大部下流の断面積
 A_2/A_1 : 流路断面の面積比
 L_{in} : 入口から急拡大部までの長さ
 L_{out} : 急拡大部から出口までの長さ
 U : 入口平均速度
 U_C : 流路中心の速度
 u : x 方向速度
 v : y 方向速度
 v_D : y_D 方向速度
 p : 圧力
 ρ : 密度
 Re : レイノルズ数 $= UH_1/\nu$
 ν : 動粘度

3. 計算モデルと CFD 解析の概要

3・1 計算モデル

本研究に使用した正方形急拡大流路の計算モデルおよび座標系を図 1 (a) に示す．また，拡大部下流の流路長さと格子数， x 方向に使用した不等間隔格子の最小格子幅 Δx_{min} (急拡大直後の格子幅) および格子幅の下流方向増加割合 $\Delta x_{i+1}/\Delta x_i$ ， y と z 方向に使用した等間隔格子幅 Δy ， Δz を表 1 に示す．入口の流路高さ $H_1 = 1$ m，流路幅 $W_1/H_1 = 1$ (断面積 A_1)，拡大部下流の流路高さ $H_2/H_1 = 2$ ，流路幅 $W_2/H_1 = 2$ (断面積 A_2) とし，面積比 $A_2/A_1 = 4$ の場合について調べた．流路の長さは，入口から急拡大部までの長さ $L_{in}/H_1 = 10$ ，急拡大部から出口までの長さ $L_{out}/H_1 = 100$ (Model 1, Model 3) または 150 (Model 2) とした．

境界条件は，(i) 流路入口では，入口断面と等しい形状の十分長い直管流路において予備的計算を実施し，求

Table 1 Specification of models

	L_{out}/H_1	cells	H_2/H_1	cells	W_2/H_1	cells	Δx_{min}	$\Delta x_{i+1}/\Delta x_i$	Δy	Δz
Model 1	100	200	2	40	2	40	0.148281	1.010504	0.05	0.05
Model 2	150	400	2	40	2	40	0.150807	1.004042	0.05	0.05
Model 3	100	200	2	60	2	60	0.148281	1.010504	0.03333	0.03333

められた十分発達した流れにおける速度分布と圧力勾配 ($dp/dx = \text{一定}$) 値を設定, (ii) 流路出口では速度は流れ方向に変化せず ($du/dx = 0$), 圧力は断面で一定値 ($p = \text{一定}$) と設定, (iii) 壁面上では流れは滑り無しとし, 壁に垂直方向 (n 方向とする) の圧力勾配はゼロ ($dp/dn = 0$), と設定した. レイノルズ数は代表速度として入口断面平均速度 U ($= 1 \text{ m/s}$), 代表長さとして入口高さ H_I に基づく $Re = UH_I/\nu$ で定義した. 取り扱う流体は非圧縮性のニュートン流体とし, レイノルズ数 $Re = 20 \sim 700$ の層流領域を解析の対象とした.

数値計算に用いた急拡大部近傍の計算格子を図 1 (b) に, 全計算領域 (Model 1 の場合) を図 1 (c) に示す. 後述の図 5 に示すように, 流路長の異なる Model 1 と Model 2 で剥離渦長さはほぼ等しいことから, 本 Re 数範囲では $L_{out}/H_I = 100$ で十分であることが分かる. さらに, 断面の格子数の影響を確認するため, 断面の格子数を増やした Model 3 で予備的計算を行ったが, Model 1 と比較して有意な差は得られなかった. 本報告では, Model 1 を用いて得られた結果を示す.

3・2 CFD 解析の概要

流れ場の解析には OpenFOAM を用いた. 本報告で取り扱う流れは三次元非圧縮性ニュートン流体の層流なので, 支配方程式は連続の式とナビエ・ストークス方程式,

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

となる. これらの方程式を OpenFOAM の有限体積法を用いて解き, 流れ場を得る. また, 空間の離散化に関して, 対流項は QUICK, その他に関しては二次精度中心差分とし, 時間に関しては Crank-Nicolson 法を用いた.

OpenFOAM の計算精度に関して Bohorquez ら⁽¹⁷⁾ は鈍頭物体周りの層流非定常流れについて, Esparza ら⁽¹⁸⁾ はコイルを挿入した管内流れについて実験結果との比較を行っている. また今野ら⁽¹⁹⁾ は実測値および CFD 解析検証用データベースを用いて OpenFOAM の乱流モデルの検証を行っており, 広く認知されている市販のソルバと同程度の精度であることを報告している. OpenFOAM の具体的な計算手法や手順に関しては, 例えば Jasak ら⁽²⁰⁾ が報告している.

3・3 流れの非対称性および非定常性の確認

軸対称急拡大流路内の流れは $Re > 1000$ の領域で層流非定常流れ (Disordered Motion Flow)⁽¹³⁾ や遷移流れ⁽¹²⁾ などの非定常流れの存在が報告されている. また, ダクト内対称急拡大流路流れではアスペクト比に依存して非対称流れが生じる事が報告されている⁽²¹⁾. 本計算モデルにおいても流れの非対称性および非定常性について確認した. レイノルズ数 $Re = 20 \sim 1900$ の範囲で, Re 数を 100 間隔で調査したところ, $Re \geq 1000$ では非定常・非対称な Disordered Motion Flow に類似の流れが存在することがわかった. したがって, 本報告では定常流が得られる $Re \leq 700$ の流れ場を対象とした. 次に, 流れに非対称性が生じる可能性を考慮して, 入口・出口の境界条件を除く初期値に $Re \geq 1000$ で得られた非定常, 非対称な流れを設定して計算を行った. その結果, $Re \leq 700$ で得られたいずれの流れも対称な流れパターン (垂直断面, 対角断面において, それぞれ x 軸に対して対称なパターン) であった. なお, 初期値の非対称性や計算過程におけるかく乱は, 得られた結果の本質には影響を及ぼさないことが確認されている⁽¹⁰⁾.

4. 結果および考察

4・1 流れパターン

図 2 (a), (b) は, 垂直断面 ($z = 0$ 断面) および対角断面 ($y = z$ 断面) における流れパターンを流線で示したものである. ここで, 紙面に垂直な速度成分はほぼゼロであるため, それを無視している. 図 2 (a) (b) の流れ

パターンはいずれも急拡大角部下流に渦が生じ、主流部領域の流れも含めて上下対称である。また、循環渦領域付近では剥離および再付着する流線も見られ、一見すると二次元急拡大流路や軸対称急拡大流路内流れでよく見られる流れパターンを示している。しかしながら、これら剥離・再付着する流線を詳細に見てみると、垂直断面〔図2 (a) 参照〕では拡大部角を出発する流線は下流の上下壁面に付着せず、下流へと続いている。一方、上または下壁面に付着している流線は拡大部角から出発したものではなく、循環渦の渦中心付近から渦巻き状の経路を辿った流線であることがわかる。赤色の流線は、先に示した角部から出発した流線と、渦中心付近から出発し壁面に付着する流線との間を通過して下流に流れ出る流体粒子の存在を示しているため、この流線が閉じていないことを予想させる。なお、この赤の流線は $x/H_1=0.5$ において角部から出発する流線と壁に付着する流線の間点を出発点として描くと同時に、速度を反転させて逆方向にも描くことで出発点を辿っている。次に対角断面〔図2 (b) 参照〕の流線をみると、上または下壁面に付着している流線は、急拡大部角からではなく拡大部上流から来ていることがわかる。赤色の流線は、拡大部上流から循環渦領域に流入する流体粒子の存在を示しており、壁

Fig.2 Streamline ($Re = 100$) Fig.3 Velocity profile u/U_c ($Re = 100$)

(a) Contours of $(du/dy)/(U/H_1)$ on the wall (b) Reattachment length evaluated from $(du/dy)/(U/H_1)$ Fig.4 Distribution of $(du/dy)/(U/H_1)$ on the wall ($Re=100$, $y/H_1=-1$)

面に付着する流線と壁面との間を通過し循環渦領域へ流入している。緑色の流線は、赤の流線の内側の閉じた領域を周回している。これらは二次元流からは説明できない流れパターンであり、三次元渦の特徴を表している。

図3は垂直断面あるいは対角断面における流れ方向速度成分の下流方向変化を無次元化して示したものである。縦軸は流れと垂直方向の距離 y (垂直断面について) および y_D (対角断面について) を H_1 で無次元化しており、流れ方向速度 u は流路中心線上の速度 U_c で無次元化されている。図3中にはMacagnoとHung⁽¹¹⁾(軸対称急拡大流路, $Re=60$)の急拡大部および再付着点位置における分布も掲示している。主流領域に注目すると、全領域において流路中心線上で最大速度を示しており、一般的な急拡大流路内流れで見られるような速度分布となっている。拡大部直前($x/H_1=0$)に注目すると、垂直断面の速度分布はポアズイユ流に近い速度分布であるが、一方、対角断面の分布はすでに逆圧力勾配の影響が表れ変曲点を持つ分布となっており、この分布は図2(b)で示した対角断面の流れの様相とも対応している。次に循環渦領域に注目すると、対角断面の方がより下流まで逆流が生じており、対角断面と垂直断面で形成される渦の大きさが異なっていることが確認できる。これら異なる領域に分布する逆流領域は流路内で繋がっているため、ここに形成される三次元流場は単純ではないことが分かる。

4・2 剥離渦長さ

三次元流の流れ関数は定義できないため、Délery⁽³⁾は壁面上のせん断応力線(限界流線)の分布をトポロジ的に解釈し、再付着線や再付着点を定義している。著者らも、その定義を参考にし、壁面上の速度勾配から拡大部下流の三次元渦の空間的な広がりを調査する。図4(a)は $Re=100$ における拡大部下流の壁面上($y/H_1=-1$)の無次元速度勾配 $(du/dy)/(U/H_1)$ の等値線を示したものである。無次元速度勾配が正の領域を赤色、負の領域を青色で示し、等値線間隔は0.1とした。図4(a)中の等値線の値がゼロを示す尖角形状の線が限界流線であり、それを再付着線と定義した。ただし dw/dz を考慮していないため $dw/dz=0$ となる壁面中央線上($z/H_1=0$)および対角($z/H_1=\pm 1$)以外の分布は正確ではないが、ここでは概略の再付着線として示している。急拡大部すぐ下流は循環渦領域なので逆流しており負の値となる。この逆流領域は垂直断面よりも両側壁に近い領域(対角断面領域)で下流方向に広く分布しており、また壁面中央に対して対称な分布となっている。

図4(a)で得られた結果を基にして、垂直断面($z/H_1=0$)および対角断面($z/H_1=0.95$)における速度勾配の流れ方向変化を示したのが図4(b)である。これより、対角断面の再付着点距離 $X_{RD} \approx 7.3$ であり、垂直断面の

Fig.5 Variation of reattachment length on the wall as Reynolds number varies

再付着点距離 $X_{RV} \approx 3.7$ に比べ概ね 2 倍と著しく長いことがわかる．なお，ここで示した対角および垂直断面の再付着点距離は図 2 で示した流線の付着位置と対応している．

再付着点距離のレイノルズ数に対する変化を調査するため，図 4 (b) で求めた X_{RV} , X_{RD} のレイノルズ数に対する変化を示したものが図 5 である．レイノルズ数範囲 $Re \leq 700$ においては，レイノルズ数の増加に対して X_{RV} , X_{RD} のいずれも，軸対称急拡大流路内流れ⁽¹¹⁾⁽¹³⁾ や低レイノルズ数領域における二次元対称急拡大流路内流れ⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾ の場合と同様，直線的に増加している．本結果は後述の図 9 で示すような三次元渦の再付着点距離であるが，二次元および軸対称の結果と同傾向であると言える．

4・3 三次元的な流れの構造

正方形急拡大流路内の流れ構造を渦度の x 方向成分 ω_x と垂直および水平方向速度成分ベクトル ($v-w$ ベクトル) を用いて図 6 (a) に，また図 6 (a) の右下 1/4 の領域の拡大図を図 6 (b) に示す． $\omega_x > 0$ の領域を赤色， $\omega_x < 0$ の領域を青色とし，下流側から見た図を示している．等値線は ω_x を U と H_1 で無次元化した値に対し 0.02 間隔で示している．渦度は縦渦状の流れが $x =$ 一定断面において形成されていることを示しており，正負で交互に規則正しく八つ並ぶ三次元構造となっていることが分かる．速度ベクトルから見ると，流路中心からは壁面に向かう外向きの流れ，対角の四隅からは流路中心に向かう内向きの二次流れが規則的に生じている．これら八つの規則的な渦構造は，対称断面である二つの対角断面，水平・垂直断面および壁面で挟まれた領域にそれぞれ存在している．また，速度ベクトルの方向から分かるように，それぞれの領域をまたいで流体の輸送はなされていない．この挟まれた 1/8 の領域を調査することで，流れ場全体の構造を明らかにできると考えられる．

図 7 は， $Re = 100$ における流れ方向の等速度線を示したものである．速度の大きい箇所を赤色で，小さい箇所を青色で示し，等値線は順流領域を 0.1 間隔，逆流領域を 0.02 間隔とした． $x/H_1 = 0 \sim 1.0$ の範囲において，流路の形状に沿った正形状の等速度線分布は，急拡大角部を通過する際に変形を受け，流路中心付近は同心円状に，周囲の低速な領域はひし形状の分布になる．そのさらに周囲には逆流領域が生じている．そのため，角部を中心に逆流領域が形成される．このことは垂直断面にくらべ対角断面に形成される渦の寸法が大きいこと(図 2 参照)および二次流れの分布(図 6 参照)からも確認できる．

図 8 は， $Re = 100$ における断面内の等圧力分布 $p / (\rho U^2 / 2)$ を示したものである．各断面内において圧力が高い箇所を赤色で，低い箇所を青色で示し，等値線は 0.004 間隔とした．図 7 における主流の等速度線が正形状からひし形状になる原因として，急拡大直後 ($x/H_1 = 0.3$) の領域で，青色で示す圧力の低い領域が生じること，さらに対角の四隅に高い圧力の領域が生じることから説明できる．一方，循環渦領域に注目すると，対角の四隅の圧力に比べ，垂直断面内の壁面付近の圧力が小さいことより，対角四隅から壁面中央向きの圧力勾配が存在していることがわかる．このことは後述の図 9 で示す循環渦領域内における対角から壁面中央の方向への流体粒子の

Fig.6 Contours of vorticity ω_x and velocity vector $v/U-w/U$ ($Re=100$) Fig.7 Contours of velocity u/U ($Re=100$) Fig.8 Contours of pressure $p / (\rho U^2 / 2)$ ($Re=100$)

移動原因となっている。また $x/H_1=1.0$ での分布は図7で示した速度ベクトルの分布とも対応しており、流路中心の圧力が高いため主流から外向きの流れが生じる、また対角線上に青で示す圧力の低い領域が存在するため対角の四隅から内向きの速度が生じることがわかる。

Fig. 9 Behavior of fluid particles ($Re=100$) Fig.10 Longitudinal vortex motion ($Re=100, x/H_1=1.3$)

これまでの結果より、この流れ場は八分割された領域が規則的に存在する構造であることを示した。そこで、この領域の一つ（1/8の領域）を対象として流体粒子の挙動を追跡することにより流れの構造を明らかにする。なお、本報告では定常流の結果のみを扱うため、ここで示した流体粒子の挙動は流線と同一のものを表す。流体粒子の挙動解析には ParaView (Kitware 社ほか) を利用した。まずは、拡大部上流の壁面近傍と循環渦領域に設置した代表的な流体粒子の挙動から、急拡大部における流れ挙動を示す。図 9 (a) に示した流体粒子の初期位置 ($x/H_1, y/H_1, z/H_1$) は、青色 ($-0.5, -0.45, 0 \sim -0.3$) に 5 カ所 (上流壁中央寄り)、赤色 ($-0.5, -0.45, -0.4$) に 1 カ所 (上流壁対角)、緑色 ($1.5, -0.65, -0.5$) に 1 カ所 (循環渦内) とした [図 9 (a) 中の挿入図

参照]. 図9 (a) に示すように, 下流へと流されるパターン (青色の流体粒子), 循環渦内へ流入し流出するパターン (赤色の流体粒子), 循環渦内で周回し続けるパターン (緑色の流体粒子) があることがわかる. ここでは流入・流出するパターンと循環渦内を周回するパターンについて詳しく調べる.

図9 (b), (c) は図9 (a) で示した赤色と緑色の流体粒子の軌道をそれぞれ $x-y$ 断面, $x-z$ 断面に投影したものである. 図2 (b) で示した拡大部下流の壁面に付着する流線も図9 (b) 中に示す. 流入・流出するパターンに注目すると, 上流壁対角から出発した赤色の流体粒子は拡大部下流の循環渦領域に流入し, その内部を4~5周螺旋運動しながらスパン方向へ移動し, 壁面中央 ($z/H_l=0$) 付近で循環渦領域から下流へ流出している. この流体粒子の挙動により, 螺旋状の三次元渦がここに形成されていると考えられる. また流体粒子が循環渦内で壁面中央方向に移動するのは, 図8 (b) で説明したように, 急拡大直後で対角の圧力に比べて壁面中央の圧力が低いことが影響している. ここで示した上流壁対角から循環渦内への流入構造は, 図2 (b) の赤色の流線で示した流体の流入経路と対応している. また, スパン方向へ螺旋運動した後に循環渦領域から下流へ流出する構造は, 図2 (a) の赤色の流線で示した流体の流出経路と対応している. なお, これと類似の粒子挙動は, ダクト内後ろ向きステップ流れにおいても報告されている^{(6) (7)}.

一方, 前述の螺旋状の三次元渦の内部には流体粒子が周回し続けるリング状の三次元渦領域 (図9中の緑の流線で示す) が存在している. ここでは螺旋渦の内側に沿った大きな回転半径の運動 (リング状運動と呼ぶ) と, その周回方向に軸を持つ小さな回転半径の運動 (縦渦状運動と呼ぶ) の二つの運動が同時に行われている. これを詳しく見るため, リング状運動の渦中心付近 ($x/H_l=1.3$) において流体粒子が $y-z$ 断面を通過する点を図10に示す. 縦渦状運動のため, 流体粒子は楕円状に並んだ上側の通過点を反時計回りに, 下側の通過点を時計回りに上側下側交互に通過する. この運動のため, 回転半径が大きいリング状運動の時は螺旋渦 (図10中赤で示す) と同じように垂直断面の方向へ, 回転半径が小さいリング状運動の時は対角断面の方向へ移動する (図10中矢印で示す), そしてそれらを繰り返すことを表している. この対角断面方向に移動する挙動は図6に示す速度ベクトルの方向とも一致している. なお, この縦渦状運動の周期は流体粒子の初期位置にも依存するが, リング状運動15周につき1周程度である. これらは, いずれの軌道も螺旋運動する流体粒子の内側にあることから, 螺旋渦の内側の閉じた領域にリング状の三次元渦が存在していると考えられる.

5. 結 言

面積比が4の正方形急拡大流路内流れについて, OpenFOAM を用いて三次元の層流計算を行い $Re = 20 \sim 700$ の範囲で流れ場を調査した. 特に, 拡大部下流に形成される三次元渦を流体粒子の挙動から調べ, 以下の事柄を明らかにした.

1. 正方形急拡大流路の流線パターンは, 垂直断面では渦中心付近から出発して下流に流出する流線を示している. 一方, 対角断面の流線では, 拡大部上流から循環渦領域に流入する流線を示している. これらが三次元渦の特徴を表すものである.
2. 三次元渦構造を粒子挙動から求めた流線で見ると, 拡大部下流の循環渦領域で螺旋運動をする挙動が見られる. これは垂直および対角断面で見られたパターンと対応しており, 循環渦の流入流出構造を表している. 一方, 螺旋渦の内側の領域には大きな回転半径の運動と, その周回方向に軸を持つ小さな回転半径の運動をする挙動が見られる. したがって, 螺旋渦の内側にはリング状の三次元渦が存在していると考えられる.
3. $x =$ 一定断面の渦度の x 方向成分の分布は正負で交互に規則正しく八つ並ぶ三次元構造となっている. 速度ベクトルから見ると, 流路中心からは壁面に向かう外向きの流れ, 対角の四隅からは流路中心に向かう内向きの二次流れが規則的に生じている. このため流れ場には対称断面である二つの対角断面, 水平・垂直断面および壁面で挟まれた領域に, それぞれ規則的な八つの構造が存在している.

文 献

- (1) Seal, C.V. and Smith, C.R., “Visualization of a mechanism for threedimensional interaction and near-wall eruption”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.394, (1999), pp.193-203.
- (2) 趙令家, “ポンプ吸込水槽の渦の可視化”, 可視化情報, Vol.30, No.116 (2010), pp.28-33.
- (3) Détery, J., “ROBERT LEGENDRE AND HENRI WERLÉ: Toward the Elucidation of Three-dimensional Separation”, *Annual Review Fluid Mechanics*, Vol.33, (2001), pp.129-154.
- (4) Armaly, B.F., Durst, F., Pereira, J.C.F. and Schönung, B., “Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.127, (1983), pp.473-496.
- (5) Durst, F., Melling, A. and Whitelaw, J.H., “Low Reynolds number flow over a plane symmetric sudden expansion”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.64, part 1 (1974), pp.111-128.
- (6) 岩井裕, 中部主敬, 鈴木健二郎, “ダクト内後ろ向きステップ流れの三次元流動と熱伝達”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.62, No.599 (1996), pp.2729-2736.
- (7) 稲岡恭二, 西村路子, 岩井裕, 千田衛, “ダクト内バックステップ流れの熱伝達に関する数値解析 (流体粒子軌跡のパターンについて)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.75, No.749 (2009), pp.125-131.
- (8) Alizard, F., Rist, U. and Robinet, J.C., “Linear Instability of Streamwise Corner Flow”, *12th EUROMECH European Turbulence Conference*, Marburg, Germany, Sept. 7 - 10, (2009).
- (9) Pinelli, A., Uhlmann, M., Sekimoto, A. and Kawahara, G., “Reynolds number dependence of mean flow structure in square duct turbulence”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.644, (2010), pp.107-122.
- (10) 中西助次, 桜井元康, 大坂英雄, “二次元対称急拡大流路内流れの数値的研究 (力学量特性)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.61, No.589 (1995), pp.3182-3189.
- (11) Macagno, E.O. and Hung, T.K., “Computational and Experimental Study of a Captive Annual Eddy”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.28, part 1 (1967), pp.43-64.
- (12) Furuichi, N., Takeda, Y. and Kumada, M., “Spatial structure of the flow through an axisymmetric sudden expansion”, *Experiments in Fluids*, Vol.34, (2003), pp.643-650.
- (13) Rojas, E.S. and Mullin, T., “Finite-amplitude solutions in the flow through a sudden expansion in a circular pipe”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.691, (2012), pp.201-213.
- (14) 久本秀明, “マイクロチップを用いる新規化学センシングシステムの開発”, 分析化学, Vol.54, No.4 (2005), pp.267-278.
- (15) 山田博之, 吉田善一, 寺田信幸, 萩原茂, 寺澤章裕, “レーザによるフッ素樹脂への血球変形能観察用マイクロ流路の加工”, 精密工学会誌, Vol.73, No.9 (2007), pp.1035-1039.
- (16) 原崎務, “微細転写領域における樹脂流動解析”, 住友重機械技報, No.168, (2008), pp.19-22.
- (17) Bohorquez, P., Rojas, E.S., Sevilla, A., González, J.I.J. and Bazán, C.M., “Stability and dynamics of the laminar wake past a slender blunt-based axisymmetric body”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.676, (2011), pp.110-144.
- (18) Esparza, D.M. and Rojas, E.S., “Numerical simulations of the laminar flow in pipes with wire coil inserts”, *Computers & Fluids*, Vol.44, (2011), pp.169-177.
- (19) 今野雅, 大嶋拓也, 挟間貴雅, 柴田貴裕, 小縣信也, “オープンソース CFD ツールキット OpenFOAM を用いた市街地風環境予測”, 第 24 回数値流体力学シンポジウム, D5-6, (2010).
- (20) Jasak, H., Jemcov, A. and Tukovic, Ž., “OpenFOAM: A C++ Library for Complex Physics Simulations”, *International Workshop on COUPLED METHODS IN NUMERICAL DYNAMICS*, IUC, Dubrovnik, Croatia, September 19th-21th, (2007).
- (21) 太田照和, 柳岡英樹, 渋谷一幸, 中島円, 吉川浩行, “急拡大矩形流路内はく離流れと熱伝達の数値解析”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.66, No.648 (2000), pp.2109-2116.