交差噴流と薄膜噴流が共存した菱形角柱群管路内の 流れの可視化*

梅田 眞三郎¹, 谷口 輝², 長谷川 盛三³, 万本 信三², 堀井 清之⁴

Flow Visualization of Thin-Liquid Sheet with Concurrent Intersecting-Flow in Diamond-Shaped Cylinder Bundles

Shinzaburo UMEDA, Akira TANIGUCHI, Seizou HASEGAWA,
Shinzou MANMOTO and Kiyoshi HORII

ABSTRACT

A system of multiple intersecting channels or holes is known as flow network, which forms a diamond-shaped column bundle. Flow exiting from this cylinder bundles is characterized by a periodic oscillation, called flip-flop flow phenomenon. A concurrent-flow thin-liquid layer is placed over the intersecting-flow jet to compose a hybrid assembly in the present work. Flow visualization study was performed to investigate the phenomena of two flows; a slit flow and a flip-flop flow placed over it. Experiments were carried out in two different ducts; a duct with X-shaped channels consisting of large diamond-shaped bundles and a duct with small size X-shaped channels in both sides. Flow patterns are disclosed by means of fluorescent dye illuminated with a laser light sheet. The velocity variations in their flow fields are measured using two-dimensional PIV and LDV. This study clarifies the characteristics of velocity variations on the horizontal and vertical sections with different depths of their X-shaped channels.

Keywords : Flow visualization, Thin-liquid sheet, Intersecting flow, Diamond-shaped cylinder bundles

1. 緒 論

菱形角柱群管路内において菱形角柱の厚さ方向である角柱と管路壁との間に隙間を設けた場合には、その隙間の部分と菱形角柱に挟まれた部分をそれぞれ流路とする二つの流れがみられる。管路厚さを薄くすると、それらの流れは、スリット状の噴流となり、場合によっては流体膜を形成して流出する。それぞれの流路内の噴流に対して、前者を薄膜噴流、後者を流路内に合・分流が連続してみられる X 字形の交差流れ¹⁾を形成することから交差噴流、とそれぞれ名づける。管路内の交差噴流では、菱形角柱物体からの流れの剥離などによって渦を形成し、

薄膜噴流との界面付近では流体力学的にも大変興味ある流れの相互干渉などの複雑な現象があらわれていると考えられる。

ところで、流体膜に関係する混相流体の界面現象については、微粒化技術などの液膜の不安定性を工学的に応用することを目的とした研究やその膜の破断などに関する基礎的研究がみられる。例えば鈴木ら²⁾は、平面液膜噴流界面に初生するしま模様の変動波の発生機構をより明確にし、その模様の変動が液膜の内在的不安定性に起因して成長したかく乱であることを理論的に裏付けた。Roy ら³⁾は、液膜上に複雑な波のパターンがみられることをレビューし、傾斜板上での液膜についての流れの特性を実験的に調べ、波紋の可視化結果を示している。最近では Gordillo ら⁴⁾は、液体と気体の噴流が共存する流れの安定性の解析を行い、液膜の破断パターンに変化があらわれることを示している。その他に環状噴流の不安定性についての Chen ら⁵⁾の研究や軸対称薄膜の非線形ねじれや破断についての Mehring ら⁶⁾の研究もみられる。

* 原稿受付 2003 年 2 月 10 日

¹ 正会員 福山大学工学部 (〒 729-0292 福山市学園町, E-mail: s-umeda@fucc.fukuyama-u.ac.jp)

² (株)前川製作所

³ 福山大学大学院

⁴ 正会員 白百合女子大学

工業界での応用事例結果としては、食品の鮮度維持や機械・電子系の作業環境保全に薄膜噴流による膜の形成技術の向上が求められ、堀井⁷⁾は菱形角柱群を利用して局所空間的にスリット流体膜を安定させることに成功している。建築空間でのエアーカーテンなどとして空気膜の形成の適用も試みられているが、十分な膜の安定には至っておらず、その流体膜をどのような条件で安定化させるかについての基礎的研究論文はほとんどみられない。

筆者ら⁸⁾は、液膜噴流の安定化を目的とした基礎的研究として、菱形角柱群管路から同時に流出する交差噴流と薄膜噴流の相互干渉を調べてきた。それらの二層噴流の界面付近の流れには縦渦が関係し、菱形角柱群の管路厚さや角柱列数及び菱形の角度の違いによって、その流れの流速変動特性が異なることを明らかにしてきた。しかしながら、このような流出噴流の界面付近の流れは大変複雑で、流出前の管路内での二層流れの相互干渉についてはほとんど解明されていない。さらに、安定液膜形成の応用に向けた菱形配列条件や交差噴流と薄膜噴流のそれぞれの流れの厚さの条件などの関係が明らかにされていない。

本研究では、まず交差噴流と薄膜噴流が共存する管路内の流れに関する基礎的研究として、蛍光染料を用いた注入トレーサ法や二次元粒子画像測定法 (PIV) とレーザドップラー流速計 (LDV) を用いて、菱形角柱群上に隙間を有する管路内の流れの可視化を試みた。引き続き、その応用に向けた研究として上・下両壁に菱形角柱群を有する管路からの流出噴流の可視化を行った。前者の実験では、比較的大きな菱形角柱を用いて流れの可視化を容易にした。以下の説明のために便宜的にその管路を大型菱形角柱群管路と名づけた。一方後者では、逆に菱形を小さくしてその配列数を多くし、しかも薄膜噴流を両側からの交差噴流で挟む形の菱形角柱群管路とした。この管路については、便宜的に二重菱形角柱群管路と名づけた。

2. 薄膜噴流の安定化に向けた研究コンセプト

X 字形の交差管路内の交差部では、流速が最大で圧力が最小となるエネルギー供給点の存在など種々の興味ある流れの特性¹⁾を示すことが明らかになっている。交差流れが数多くみられる菱形角柱群管路内の流れに関しては、角柱群管路内の渦の自励振動に伴って下流端からの流出噴流の左右へのスイッチング現象を示すフリップ・フロップ流れの発現も発見⁹⁾され、そのメカニズムの原因分類¹⁰⁾も説明されている。

このような菱形角柱に挟まれた分流領域では、流路断面の漸拡とともに三次元流れの縦渦が発現し、エネルギー供給点より下流側では遠心力の減衰やカルマン渦列及び交差流れのせん断層のそれぞれの振動とともに乱れの消散が考えられる。従って交差噴流に対しては、エネルギー供給点から分岐点までの間での流れの変化に着目

することが重要であると考えられる。

一方、交差噴流と薄膜噴流が共存する場合の菱形角柱群管路内の流路断面を考えてみると、菱形角柱厚さ δ を薄膜噴流の流路断面厚さ η の 2 倍とした場合には、菱形に挟まれる最も狭い部分の鉛直流路断面での交差噴流と薄膜噴流のそれぞれの流路断面積は同じとなる。それを図でもって説明するために Fig. 1 に菱形角柱まわりの鉛直流路断面の概略図を示す。 λ を隣接菱形の最小間隔、 a を菱形の短軸方向の幅とすると、 $\delta = 2\eta$ の場合の薄膜噴流に関する流路断面 A_u は、 $A_u = \eta \times (\lambda + a) = (\delta/2) \times (\delta + \delta) = \delta^2$ であり、交差噴流の流路断面 A_d も $A_d = \delta \times \lambda = \delta \times \delta = \delta^2$ となって、同じ断面積となっている。この場合交差噴流は、上流側に位置する菱形角柱物体まわりに沿った二つの流れが流路断面 A_d 内の中央部で衝突する形の X 字形交差流れとなっている。この交差噴流に関する流路断面は、幅 $\delta/2$ と厚さ δ の長方形断面で、薄膜噴流の流路断面の半分となっている。そのために噴流内の流速及び圧力などの違いにより薄膜噴流部分から菱形角柱に沿って交差噴流部分への流れ込みが促進され、三次元的でより鮮明な縦渦の形成に至ることが予想される。

ところで、建築構造物内のエアーカーテンや機械加工などにおける液膜空間などの形成時にみられるスリット流体膜の不安定性の原因は、流体のもっている乱れ成分に起因していると思われる。この乱れ成分は、スリット内壁のせん断層の剥離やスリット出口での空気巻き込み現象を提起し、スリット流体噴流の流体膜厚を不均一にし、その結果流体膜がわずかな外乱により破断してしまうと考えられる。

以上のようなスリット流体膜の安定化に向けては、流下方向に波及している流体膜中の乱れを何らかの形で吸収することも重要な対策の一つと考えられる。上述のように菱形角柱群流路内の流れには工学的に大変興味ある

A_u : Vertical cross sectional area in channel of slit-liquid flow, $A_u = \eta \times (\lambda + a)$

A_d : Vertical cross sectional area in channel of intersecting flow, $A_d = \delta \times \lambda$

Fig. 1 Schematic diagram of channels in diamond-shaped cylinder bundles from rear view.

縦渦の形成がみられる。そこで菱形角柱群流路にみられる交差噴流と薄膜噴流を管路内で重層させ、薄膜噴流内の乱れを交差噴流内の縦渦に吸収させることによって流体膜の安定化が可能であると考えられる。

これが薄膜噴流の安定化に関する研究のコンセプトとなっている。その安定流体膜の発現に向けては、交差噴流と薄膜噴流が共存する菱形角柱群管路内の流れの特性把握に関する基礎的研究を欠くことができないと思われる。特に、それぞれの噴流の流路断面と交差噴流の分流領域での流れの変化に着目することが重要であると考えられる。

3. 実験装置および流れの可視化方法

3.1 実験装置

3.1.1 大型菱形角柱群管路

流れの可視化を容易にするために、大型菱形角柱群を Fig. 2 に示すような循環水路に設置した。その菱形角柱群は、Fig. 2 (a) に示すように菱形角柱を三個と半個のものを二個並べた。菱形角柱の頂角 θ は 30° で、 δ を 30 mm とし、菱形の短軸方向の幅 a や λ も 30 mm とした。二列目の角柱に挟まれる部分では、合・分流が連続した X 字形の交差流れがみられ、網掛けで示す分流領域を可視化計測対象領域に選んだ。

菱形角柱群管路については、 δ を 30 mm の一定として、その上方部分の隙間での η が異なるように菱形角柱群管路厚さ d を変化した。Type 名を付けて d と η を一覧にして Table 1 に示した。

Fig. 2 Schematic of experimental setup for large diamond-shaped cylinder bundles.

Table 1 Kinds of large diamond-shaped cylinder bundles.

Type	1	2	3	4
Depth of duct d (mm)	30	40	45	60
Depth of gap η (mm)	0	10	15	30

3.1.2 二重菱形角柱群管路

Fig. 3 に実験装置の概要を示す二重菱形角柱群管路は、上・下方向の壁側に菱形角柱群を、それらに挟まれる形で隙間を、それぞれ有した三重構造になっている。菱形角柱の寸法、角柱間隔や中央部の隙間の厚さなどを変化させた六種類の管路をアクリル樹脂板で製作した。

菱形断面に関係する a , δ および λ を考慮して Type 名の分類を行い、一覧にして Table 2 に示した。Type A と B は λ と δ を同じ 3 mm とし、Type C についてはそれぞれを 4 mm として流路断面を大きくした。さらに Type A と C については、2. に示した研究コンセプトにより η を δ と同じものと 2 倍にしたものをそれぞれ選んだ。Type B については上流側の菱形に下流側の菱形が

Fig. 3 Schematic of experimental setup for a duct with sandwich bundles of diamond-shaped cylinders.

Table 2 Kinds of ducts with sandwich bundles.

(Unit: mm)

Type	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2
a	3	4	6	4		
b	5.6	7.5	11.2	7.5		
λ	3	3		4		
δ	3	3		4		
η	3	6	3	4	8	
d	9	12	9	12	16	
Lg	b	$3b/4$	$b/2$	b		
Ld	56.0	63.4	79.0	74.6		
B	90	133	135	120		
Lm	70	70	70			
Bm	42	64	72	64		
L	239.4	256.0	279.0	280.8		

くい込み、菱形最小間隔からくい込んだ菱形先端位置までの長さ L_g の違いで Type B-1 と B-2 に分けた。Type B-1 の場合には、下流側の菱形の先端部が上流側の分流領域にその長さの $1/4$ くい込んだ配列となっている。

菱形角柱群の流れ方向の列数については、角柱背後に渦などを形成する後流の片寄りを少なくするためにいずれの管路も五列にした。それに対して横断方向については、管路末端からの噴流の安定化を促進させるために列数を多くしている。

なお、今回の実験管路内のいずれの流体も水を用いた。

3.2 流れの可視化方法

大型菱形角柱群管路内の実験では、上流側水槽でのヘッド H_u と管路末端に設置した補助管路の下流端の底に開けた穴の数をそれぞれ調整することによって管路内の流れを変化させた。その流れの可視化にあたっては、蛍光染料のウラニンをを用いた注入トレーサ法により菱形角柱群の上方からの水平断面及び角柱に挟まれた分流領域の鉛直断面の流脈の可視化撮影を行った。水平断面については菱形角柱の厚さの半分の位置になる $z = 0$ (C-C 断面) を選んだ。また鉛直断面については、菱形に挟まれた最も狭い断面の $x = 0$ (V_s 断面) から分流領域の下流端付近に位置する $x = 45$ mm (V_e 断面) までの種々の断面にレーザ光を照射し、下流側に設置したカメラにて撮影した。それら以外の可視化については、PIV と LDV を用いて流速及びその変動の計測を行った。

PIV を用いた計測では、Fig. 2(d) での上方からみた水平断面及び下方からの鉛直断面を計測対象領域とした。水平断面については注入トレーサ法の場合と同様の $z = 0$ 、角柱の上面位置になる $z = \delta/2$ (B-B 断面)、薄膜厚さの半分の位置になる $z = (\delta + \eta)/2$ (U-U 断面)、のそれぞれの断面にレーザ光を照射して上方に設置した CCD カメラで撮影した。鉛直断面も注入トレーサ法と同様に $x = 0$ から $x = 45$ までの種々断面にレーザ光を照射し、下流側に設置したカメラにて撮影した。

一方、LDV の計測にあたっては、PIV と同様の水平及び鉛直断面に計測格子を細かく設けて、それぞれの格子点での流速及びその変動の計測を行った。この場合のサンプリング周波数及び計測数は、それぞれ 20Hz 前後及び約 1000 個となっている。

次に、二重菱形角柱群管路に関する実験では、LDV を用いて薄膜噴流の流速およびその変動も調べた。この計測にあたっては、LDV では空气中に放出された噴流の計測ができないので、Fig. 3(a) に示す菱形角柱群管路末端部の B-B 断面でフランジ接合による補助管路を接続した。今回は、流れ方向長さ L_m とその横断方向の幅 B_m を計測対象領域に選び、図中の破線枠で囲まれる部分の計測結果を解析対象とした。

計測領域における管路厚さ方向の計測断面は、薄膜噴流の中央断面位置とし、大型角柱群管路内の可視化計測と同様に数多くの計測格子点を設けて計測した。

なお、今回の管路内の Re 数については、菱形に挟まれた最も狭い部分の断面平均流速 U_{max} を代表流速とし、代表長さには δ を用いた。今回の大型菱形角柱群管路を用いた実験では、いずれの Type においても Re 数が約 10,000 となるように流れの設定を行った。

4. 実験結果と考察

4.1 大型菱形角柱群管路内の流れの可視化結果

4.1.1 流脈の可視化結果

蛍光染料を用いた注入トレーサ法によって菱形角柱まわりの水平及び鉛直断面における流脈を可視化した結果の中から Type 3 の場合における三例を Fig. 4(a)~(c) に示す。

Fig. 4(a) に示す上方からの流脈の可視化結果では、角柱背後の後流のせん断層付近及び後流内にも角柱からの流れの剥離による渦の形成がみられる。また (b) に示す下流側から撮影した鉛直断面 V_s では、角柱の上方のスリット部分の流れが角柱に挟まれた部分へ入り込む形で渦の形成がみられる。さらに (c) に示す分流端近くの V_e 断面では、角柱に挟まれた中央部を境として左右の角柱寄りにそれぞれ流れの旋回を伴った渦の形成がみられる。

4.1.2 PIV による流速ベクトルと渦度

(a) 水平断面での結果

計測対象領域における水平断面での流速ベクトルと渦

(a) Top view($z=0$ mm)

(b) Rear view(V_s section)

(c) Rear view(V_e section)

Fig. 4 Flow patterns for Type-3.

Fig. 5 Velocity and vorticity distributions in horizontal section for Type 3 ($z = 0$).

度を PIV によって求めた。紙面の都合でその結果の一例のみを Fig. 5 に示し、その他は考察結果だけを述べる。

図を省略した Type 1 での結果では、分流領域の右側の下流側に渦の形成が想像できる流速ベクトルがあらわれ、その渦度の結果においても渦が形成されていると考えられる付近の渦度に正負の比較的大きな値があらわれている。

同じく図を省略した菱形の上方に 10 mm の隙間を設けた Type 2 の場合の流速ベクトル及び渦度の結果では、分流領域の片方に小さな渦の形成が想像できるとともに、中央付近のベクトルも少しながら左右へ向きを変化させている。渦度の分布においても Type 1 の場合より渦度の絶対値はやや小さくなっているが、それらのベクトルの変化を裏付けるような負の大きな渦度値もあらわれている。

Fig. 5 に示す $\eta = 15$ とした Type 3 の $z = 0$ のある瞬時の水平断面結果では、右側の下流側寄りにはっきりとした渦の形成が想像できる流速ベクトル及び渦度分布を示している。また中央部付近では、分流領域の入口からはっきりと左の方へ向きを変えた流れのベクトルもみられる。それに対して図を省略した $z = \delta/2$ の結果では、ほとんどの流速ベクトルが下流側方向に向かう真直ぐなベクトルを示しているが、中央部や左右角柱よりの部分ではわずかにベクトルの向きを変化させているものもみられる。また菱形の上方の隙間での中央水平断面における流速ベクトル及び渦度の結果も、前図の菱形の界面のものと同じようになっている。

その他の Type 4 の結果 (図を省略) については、中央部や右側での流速の変化は、今までの他の Type よりも小さくなり、中央部付近は下流側方向に向いた真直ぐのベクトルが多くなっている。しかしながら左側の角柱壁寄りの流速ベクトルの向きは大きく異なり、その付近には下流側にまで延びる形で細長い渦の形成が想像できる。また渦度値の正負の差もわずかながら小さくなっている。菱形の界面の流れの一部に流速の変化がみられるが、そ

れより上方の隙間での流れと同様に、流速ベクトル及び渦度の値の変化が小さくなっている。これらの結果は、交差噴流の薄膜噴流への影響あるいは相互干渉が他の Type に比べて最も小さくなっていることを示しているものと思われる。

以上のような Type 1 から 4 までの水平断面においては、下流側の左右のいずれかに渦が形成されていることを想像することができるが、それらの渦の形成領域の大きさは Type 1 の場合が最も大きく、逆に Type 4 の場合は小さくなっていると思われる。

(b) 鉛直断面での結果

分流領域での分流開始の $x = 0$ から下流端付近の $x = 45$ の種々の鉛直断面位置においても PIV を用いて流速ベクトルと渦度を求めた。それらは、紙面の都合で流れの変化が顕著にあらわれている Type 3 の場合の $x = 40$ の断面位置での結果のみを Fig. 6(a) と (b) に示し、その他のものは考察のみとする。

まず、Type 1 での結果については、いずれの断面においても流速ベクトルの大きさと向きが種々に変化し、数個所にわたって渦の形成が想像できるような分布になっている。特に、 $x = 35$ や $x = 45$ の断面でそれらが顕著にあらわれ、渦度分布からも流れの回転がはっきりとあらわれていることを想像することができる。

Type 2 の場合の結果では、菱形の上方の隙間に相当する部分での流速ベクトルがやや小さくなるとともに、他のところのベクトルの大きさも Type 1 に比べてやや小さくなっている。 $x = 35$ や $x = 45$ での断面の左右の一部を除いて渦度値の変化も小さくなり、Type 1 の場合に比べて流れの回転が全体的に小さくなった流れになっていると思われる。

Type 3 の場合の結果については、Fig. 6(a) と (b) の流速ベクトルと渦度分布を示すように、 $x = 40$ の断面でのそれぞれの図の左の下方部分にのみはっきりとした流れの変化があらわれているのが特徴的である。時間の異なる他のフレームにおいてもこのような流れの変化が

 Fig. 6 Velocity and vorticity distributions in vertical section for Type 3 ($x = 40$).

ははっきりとみられるのは、左右のいずれかの下方部分のところだけになっている。その他の図を省略している $x = 0$ の断面では、正負の渦度値があちこちにあらわれ、流れの回転が全体にわたっていることが想像できる。また $x = 45$ の断面では、左の上方からその下方に向っての流れがみられ、左寄りの部分にはっきりとした渦の形成が想像できる。さらに右寄りの一部にもわずかながら流れの回転が考えられる。

最後に、Type 4 の場合の結果では、Type 3 の場合とは逆に、いずれの断面においても流速ベクトルや渦度のそれぞれの分布における変化が小さくなっている。

これらの鉛直断面での結果においては、Type 3 の場合に最も流れの変化が全体的にあらわれていることを想像することができる。分流開始点の $x = 0$ から $x = 30$ 付近までと $x = 45$ 付近では、菱形の上方部分から菱形に挟まれる下方の部分へははっきりと流れ込む形がみられる。それに対して $x = 40$ においては、左右のいずれかの片方の下方部分にのみ流れの回転があらわれるような流れの遷移的な節目の断面になっていると思われる。

上述の水平の場合での結果も含めて、菱形の上方に隙間を有しない Type 1 の流れと比べた場合には、Type 2 や Type 4 では菱形角柱に挟まれた部分での流れの変化がやや小さくなっている。それに対して Type 3 では、Type 1 と同様に流れの回転もはっきりとあらわれ、菱形の上方の隙間から角柱に挟まれた部分への流れも比較的鮮明にみられ、三次元的な流れがはっきりとあらわれていると思われる。

4.1.3 LDV による流速分布及び流速変動分布

分流領域の鉛直断面で最も流れの変化が全体的にあらわれている Type 3 の場合において、流れの平均流速及びその変動による平均レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}/U_{max}^2$ を求めた。それらの等流速分布図及び等レイノルズ応力分布図をそれぞれ Fig. 7 及び Fig. 8 に示す。それらの流速結果は、上流側から下流側に向かった流速の主流方向成分を u 、その横断方向を v とし、絶対流速 $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ から

等流速分布図を算定した。

Fig. 7 に示されているように分流領域の入口付近では流速の等値線の閉じる形がみられ、しかも中央部の流速が小さく、外周に向かうにつれて速くなった流速分布を示している。しかしそれより下流側に向かうにつれて右側の壁寄りの流速が小さくなり、しかもその変化が徐々に小さくなっている。それより下流側の (b) や (c) に示す断面位置では、左右のそれぞれの壁寄りに流速の遅い部分を示す等値線の閉曲線があらわれ、中央部付近の流速が逆に速くなっている。しかも (c) の $x = 40$ の断面位置では、他のものと比べて左右対称的な流速分布の値を示している。最下流側の (d) では、流速の速い部分が中央の上下方向にもあらわれ、それ以前の上流側断面の流速分布とは多少異なっている。

等レイノルズ応力分布の結果を示す Fig. 8 では、正または負の応力の等値線の閉曲線のあらわれる位置が鉛直断面位置で異なっている。Fig. 8(a) に示す $x = 0$ では、図の中央部付近に零の値が縦方向に延び、その左右には正負の小さなレイノルズ応力の値がみられる。下流側に向かうにつれて左右の値が少し変化し、(b) に示す $x = 35$ では左右の隅の方に負と正のそれぞれの応力の絶対値が異なる形であらわれている。再び (c) や (d) に示す $x = 40$ から $x = 45$ に至っては中央部付近に応力の値が零に近いものが広がり、左右の正負の応力の値の差もほとんどなくなっている。特に $x = 40$ の断面位置では、左右の応力の絶対値がほとんど同じとなっている。

以上のような平均流れ場での流速及びその変動結果からも、Type 3 においては $x = 40$ の断面位置で流れの遷移的な節目位置の変化を示していることが明らかとなった。

4.2 二重菱形角柱群管路からの流出噴流の可視化結果

Fig. 3(a) に示す B-B 断面より下流側の補助管路内の破線枠で示した計測領域において、LDV による流速変動結果から平均レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}/U_{max}^2$ を求めた。その結果の数例を Fig. 9(a)～(d) に示す。それらの図に示す細線は計測格子線をあらわし、格子線上のレイノルズ応

Fig. 7 Equi-velocity distributions on vertical section of diverging region for Type 3.

Fig. 8 Iso-Reynolds stress distributions on vertical section of diverging region for Type 3.

力値の変化を太線で示している。(b)の Type A-2 の場合の Re 数は他のものに比べてやや大きくなっているが、この程度の Re 数の範囲内では、 Re 数が変わってもレイノルズ応力の全体的な変化はほとんど同じとなっている。

Fig. 9(a) と (b) の Type A-1 と A-2 を比較すると、薄膜厚さの違いによってレイノルズ応力の変化の大きさが異なっている。すなわち、薄膜厚さの小さい Type A-1 の方のレイノルズ応力の変化が大きくなっている。

菱形の大きさや菱形の配列を変化させた (c) と (d) に示す Type B-1 と B-2 では、さらに大きなレイノルズ応力

の変化があらわれている。(c)の Type B-1 では、隣接する格子線上のレイノルズ応力の変化がよく似た形を示している。すなわち、全体的にレイノルズ応力の正負の値がよく似た形でジグザグ的に変化し、しかも下流側までその変化があらわれている。このようなジグザグ的なレイノルズ応力の変化には、角柱群管路からの交差流れに発現していると考えられる縦渦が関係しているものと思われる。それに対して、(d)の Type B-2 では、上流側付近のレイノルズ応力の変化がはっきりと大きくあらわれ、下流側では急に減衰した形を示している。

Fig. 9 Reynolds stress distributions around center of measuring region.

その他の図を省略した Type C については、Type A とよく似たレイノルズ応力の変化を示している。特に Type C-1 の場合には、それぞれの格子線上の変化に関連性が少なくなるとともに、Type A-1 より正負の値の変化がやや大きくなっている。

以上のような流出噴流の流速変動結果から Type B-1 においては、菱形角柱厚さと薄膜厚さとの関係や上流側の菱形に下流側の菱形を分流領域の 1/4 程度までくいと込ませたことなどにより、交差噴流に発現する縦渦の影響が薄膜噴流の界面付近から流下方向に向って全体にわたって及んでいることが明らかとなった。

5. 結 論

大型菱形角柱群管路内の流れ及び二重菱形角柱群管路からの流出噴流について、注入トレーサ法や PIV と LDV による可視化計測実験結果などによって次のような結論を得ることができた。

- (1) 大型菱形角柱群管路内の流れについては、菱形角柱上方の隙間の大きさの違いによって角柱に挟まれた分流領域での流れが異なることを明らかにすることができた。特に、隙間の大きさが角柱厚さの半分である Type 3 の場合には、流れの回転などが全体にわたってはっきりとあらわれていることが明らかとなった。さらに、その分流領域の下流側付近の鉛直断面には、流れの回転に関して遷移的な節目位置の変化があらわれることも明らかにすることができた。
- (2) 二重菱形角柱群管路からの流出噴流については、菱形を分流領域の 1/4 程度までくいと込ませた菱形配列とし、薄膜噴流に関する隙間の大きさを菱形角柱厚さの半分にするなどにより、交差噴流に発現する縦渦の影響が薄膜噴流の界面付近から流下方向に向って全体にわたって及んでいることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) Umeda, S., Yang, W.-J. and Tanaka, T.: Mechanics and correlations of flow phenomena in intersecting ducts, *Experiments in Fluids*, Vol. 17, No. 5 (1994) pp. 323–329.
- 2) 鈴木孝司, 橋本弘之: 静止気体中の平面液膜噴流の不安定性解析, *日本機械学会論文集 B 編*, 56 巻 523 号 (1990) pp. 702–707.
- 3) Roy, R.P. and Jain, S.: A study of thin water film down on inclined plate without and with countercurrent air flow, *Experiments in Fluids*, Vol. 7 (1989) pp. 318–328.
- 4) Gordillo, J.M., Perez-saborido, M. and Ganan-calvo, A.M.: Linear stability of co-flowing liquid-gas jets, *J. Fluid Mech.*, Vol. 448 (2001) pp. 23–51.
- 5) Chen, J.N. and Lin, S.P.: Instability of an annular jet surrounded by a viscous gas in a pipe, *J. Fluid Mech.*, Vol. 450 (2002) pp. 235–258.
- 6) Mehring, C. and Sirignano, W.A.: Nonlinear capillary waves on swirling, axisymmetric free liquid films, *International J. of Multiphase Flow*, 27 (2001) pp. 1707–1734.
- 7) 堀井清之: 特願平 10-305751, スリット流体噴流の安定方法とその装置 (1998).
- 8) Umeda, S. and Yang, W.-J.: Interaction of thin-liquid sheet with concurrent intersecting-flow jet exiting from diamond-shaped column bundles, *Proceedings of PSFVIP-3* (2001) F3043.
- 9) 梅田眞三郎, Wen-Jei Yang: ネットワーク管路における流況特性, 可視化情報, Vol. 16, No. 61 (1996) pp. 28–36.
- 10) Umeda, S.: Characteristics of intersecting flows in multiple diamond-shaped islands, *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, Vol. 8, No. 3 (2001) pp. 165–176.