菱形角柱群管路内の交差流れの可視化*

坂西 俊一¹, 梅田 眞三郎², Wen-Jei Yang³

Visualization of X-shaped Intersecting Flows in Multiple Diamond-shaped Islands

Shyunichi SAKANISHI, Shinzaburo UMEDA, Wen-Jei YANG

ABSTRACT

Experimental study was performed to investigate X-shaped intersecting flows in multiple diamond-shaped islands. Two kinds of upstream and downstream apex angles in islands were 30 ° and 60 °. Flow control was performed by placing a turbulence mesh at a right side in the front surface of the first-row of diamond-shaped islands. The X-shaped flows in intersecting regions were visualized using the fluorescein dye illuminated by a laser light sheet. The velocity variations in their flow fields were measured using two-dimensional laser Doppler velocimetry (LDV). It is found that the difference of flow patterns depends on the arrangement of the diamond-shaped islands, the Reynolds number, the existence of the turbulence mesh, and row numbers of diamond-shaped islands. The characteristics of velocity variations in the X-shaped intersecting flows are also clarified in each intersecting region of diamond-shaped islands.

Keywords: X-shaped intersecting flows, Multiple diamond-shaped islands, Dye injection method, Velocity variation, LDV

1. 緒 論

X字形交差管路の交差部¹⁾では、管路断面の変化とともに合流と分流が連続したX字形交差流れがみられる。筆者でもある梅田ら²⁾⁻⁴⁾は、その合・分流の角度である交差角の違いによって交差部の流れが異なることを明らかにしてきた。特に、交差角が30 °と60 °のそれぞれの場合の交差管路内の流れの特性が大きく異なっていることを明らかにしてきた。

交差角が30 °の場合^{2),3)}には、上流側の左右の供給流量を同じにしても、分流領域のせん断層の位置が左右のいずれかの方に片寄り、分流領域の片方の壁面近くのみ渦の形成がみられる流れの非対称性を示すことが明らかとなっている。また、上流側の片方から乱流格子などによって強制的にその流れへ攪乱を供給した場合には、交差部でのせん断層付近の流れの振動に乱流格子の影響が大きく及び、分流領域の全体にわたって乱れの分散効果があらわれることも明らかとなっている。

一方、交差角が60 °の場合⁴⁾には、X字形交差管路の両下流端流量が上流側の左右の供給流量に関係なく同じとなる現象が明らかにされている。

さらに梅田らは、菱形⁵⁾、短冊形⁶⁾及び円形⁷⁾の物体で構成されるネットワーク管路内の流れの可視化を行った。これらの物体の配列交差角によって管路内の流況が異なるこ

とを明らかにしてきた。特に、配列された物体間の中心を結ぶ交線の鋭角である配列交差角が30 °の場合には、管路内の物体背後に形成される渦が連結振動を起こし、それに伴って管路末端からの流出噴流が純流体素子からの噴流と同様の左右への振動現象を示すことを発見している。これは、電子工学でのフリップ・フロップ回路のスイッチングと同様の現象であることから、フリップ・フロップ現象と呼ばれている。本論では、その振動現象を管路内の菱形物体まわり及び末端からのそれぞれの交差流れに振動がみられることからフリップ・フロップ流れという名前で用いる。それに対して、配列交差角が60 °の場合には、ネットワーク管路内の物体背後にほとんど左右対称な渦が形成され、X字形交差管と同様の管路末端流量の均等化が可能であることを明らかにしている。いずれの角柱物体を有するネットワーク管路も角柱の直径あるいは幅に対して管路水深方向の角柱高さが同程度の小さいものとなっており、従来の二次元性流れを研究対象にした管路とは異なっている。

このようにネットワーク管路内の流れは、交差流れと渦の形成などにより大変複雑であるが、既にそのような角柱高さの小さい菱形角柱物体を有するネットワーク管路を用いた振動発生管路体装置⁸⁾や流出量の均一化及び冷却・加熱の効率化などを行う流体路装置⁹⁾が発明され、フリップ・フロップ流れなどの応用がみられる。しかしながら、フリップ・フロップ流れの発現メカニズムなどの管路内での流れの解明は十分に行われていない。従って、流体工学的にネットワーク管路内の流れの応用をさらに発展させていくためには、基礎研究として詳細なるその流れのメカニズムの解明が求められている。

そこで本研究では、30 °と60 °の頂角を有する菱形（以下では、それぞれを30 °菱形と60 °菱形という名前で用いる）

*原稿受付 2000年8月1日

¹ 福山大学大学院

² 正会員 福山大学工学部

³ 正会員 ミシガン大学工学部

の角柱群管路内の交差流れを蛍光染料を用いた注入トレーサ法や二次元レーザ流速計 (LDV) によって可視化計測し、上流側からの流れの供給条件や流れ方向の菱形成角柱列数の違いによる交差流れの変化を調べた。

2. 実験方法

実験装置の概要をFig.1に示すように、菱形成角柱群管路の試験区間の上・下流側に水槽を設け、ポンプでもって水を循環させる形で実験を行った。Fig.1の上面図には、一個の菱形を黒塗りつぶしで示し、その後列の中央部の二個の菱形に挟まれる部分に網掛けの陰影を示している。これらの三つの菱形に挟まれる部分にみられる交差流れを今回の可視化対象とした。その可視化対象領域からみて上流側に並ぶ角柱群管路内の列数の違いによる流れの変化を調べるために、黒塗りつぶしの菱形より上流側へ流れの横断方向に菱形成角柱を一列に並べたもの（以下横一列角柱群とする）を最大四列まで追加できるようにした。すなわち、黒塗りつぶしで示される菱形が並ぶ列が第一列目で、それより上流側に四個の菱形あるいは三個と半個づつの菱形を並べた横一列角柱群管路を最大四列まで追加することができ、その場合には黒塗りつぶしで示される菱形が並ぶ列は第五列目になる。

このような菱形成角柱群管路と上流側水槽との間には600mmの長さの助走管路を設置した。30°と60°のそれぞれの菱形の短・長軸長さは、40mm・149.3mmと40mm・69.3mmとした。菱形の横一列角柱群管路を最大四列まで並べた場合の角柱群管路長は、それぞれ1,158mmと638mmとなる。それらの管路断面は、いずれも幅 b が320mm、水深 d が40mmとした。菱形の横方向間隔である交差部の流路の最も狭い部分の間隔も40mmで、その流路断面は正方形となっている。正方形の一辺でもある水力直径 h_D をレイノルズ数 (Re 数) 算定における代表長さとし、下流端流量 Q とこの隙間

の断面積から算定される流速 U_{max} を代表流速とした。上流側水槽ヘッド Hu と下流側につけた逆L型補助管路末端での開放穴の数の調節により Re 数を変化させた。

菱形成角柱群管路については、底面を黒色とし、その他の上面や側面及び角柱はすべて透明のアクリル板にて製作した。Fig.1の黒塗りつぶしで示す菱形の左右前面（左右の区別は、下流側方向に向かっての左右の位置で行っている）の中央位置には、蛍光染料を注入するための小さな穴も開けられている。この黒塗りつぶしの菱形の背後の可視化対象領域において、蛍光染料のウラニンとレーザシート光を用いた注入トレーサ法による流れの可視化を行った。可視化にあたっては、管路側面の水深方向の中央断面位置にレーザシート光を照射し、管路上方にカメラを設置して菱形まわりの染料の流れで示される流脈を撮影した。

なお今回の注入トレーサ法による流れの可視化では、X字交差管路で試みたものと同様の乱流格子³⁾を可視化対象領域より上流側に挿入し、交差流れの変化を調べた。その乱流格子は、Fig.1に示すように、黒塗りつぶしの菱形の上流側の横一列角柱群の菱形前面の右側（図中の矢印の先端位置）に挿入した。乱流格子の形状は、1mm程度の細い針金で流路断面の大きさの枠を作り、その枠内に糸を縫った形のネットを設けたものである。ネットの糸の部分の太さは針金同様1mm程度で、間隔は5mm程度となっている。

LDVによる計測は、Fig.1の網掛けで示す可視化対象領域の交差流れの分流域で行った。30°及び60°菱形に対して、分流域の剥離に伴う渦の形成が予想される付近の地点にて流速変動の時系列データを求めた。また分流域の最下流側鉛直断面での流速変動の計測も行った。いずれの場合も、可視化対象領域より上流側に横一列角柱群を順次追加して、列数の違いによる流れの変化を調べた。前者の時系列データの計測にあたっては、LDVにおけるData rateの最も高い点を選出した。この場合のサンプリング数は約5万個となっている。一方、後者の流速変動の計測については、計測対象の鉛直断面を19×8格子に切り、それぞれの格子点で流れ方向及び流れの横断方向の平均流速成分 u 及び v とそれらの変動 u' 及び v' をそれぞれ計測した。流れの状況を考慮してデータレートを10Hz程度の低いものとして、サンプリング数が約2,000個となるように計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 注入トレーサ法による流脈の可視化

蛍光染料とレーザシート光による注入トレーサ法を用いた可視化対象領域の交差流れの可視化結果の数例をFig.2～5までに示す。この場合の菱形成角柱列数は、Fig.1の下流側に並ぶ三列半となっている。

まず、Fig.2と3に示す30°菱形成角柱群管路での結果では、 $Re = 400$ 前後までの流脈については、 Re 数の増加に伴って左右の流脈にわずかながらふくらみがみられるが、それぞれの流脈は揺れもなく真っ直ぐに流れている。しかし、Fig.2(a)に示す $Re = 430$ の場合の流脈には、実験時にわずかながら揺れが観察され(b)図の $Re = 540$ の場合には完全に流脈の揺れが写真にあらわれている。さらに Re 数を増加させると(c)図に示すように、角柱後流域(Fig.1に示す黒塗りつぶしの菱形の背後から可視化対象領域の交差流れの分

Fig.1 Schematic of experimental setup.

(a) $Re = 430$

(b) $Re = 540$

(c) $Re = 650$

(d) $Re = 2,100, t = t_0(\text{sec.})$

(e) $Re = 2,100, t = t_0 + 1.22(\text{sec.})$

(f) $Re = 2,100, t = t_0 + 3.26(\text{sec.})$

Fig.2 Flow patterns around diamond-shaped islands for $\theta = 30^\circ$.

(a) $Re = 260$

(b) $Re = 570$

Fig.3 Flow patterns around diamond-shaped islands with turbulence mesh for $\theta = 30^\circ$.

流域の入口手前まで)に蛍光染料が広くゆきわたっているような逆流領域や左右の剥離せん断層の振動が顕著にあらわれている。Fig.2(d)~(f)に示す $Re = 2,100$ の乱流域まで Re 数を増加させると、後流域の流れが複雑になり、左右への振動が顕著にあらわれている。その(d)図では、流れに向かって右寄りに蛍光染料の広がりがみられるが(e)と

(a) $Re = 260$

(c) $Re = 1,860, t = t_0(\text{sec.})$

(b) $Re = 320$

(d) $Re = 1,860, t = t_0 + 2.44(\text{sec.})$

Fig.4 Flow patterns around diamond-shaped islands for $\theta = 60^\circ$.

(f)図に至っては、中央から左寄りに染料の広がりが移っているのがわかる。参考までに実験時のビデオ撮影によってその振動周期を求めた結果、5.65秒であった。この振動現象は、菱形角柱群流路内にみられたフリップ・フロップ現象⁵⁾と同じであり、流れ方向にわずか三列を並べた角柱群での第二列目の背後から振動が発生し、しかも $Re = 2,000$ 程度でもそれを確認することができた。

次に、乱流格子を挿入した場合の交差流れの変化を調べ

(a) $Re = 250$ (b) $Re = 280$ **Fig.5** Flow patterns around diamond-shaped islands with turbulence mesh for $\theta = 60^\circ$.

た. **Fig.3(a)**に示すように, Re 数が小さいときの分流域では完全に非対称流れとなっていることがわかる. Re 数が大きくなると, **Fig.3(b)**に一例を示すように, 流脈が振動し始め, 後流域の流れが複雑になっている. そのため分流域での左右の流れの非対称性は不明となっている. さらに, Re 数を2,120に増加させると, 前述の乱流格子のない場合と同様の結果が得られ, 交差流れのせん断層の振動に伴って分流域での乱れの分散を推定することができる. しかしながら, 蛍光染料を用いた注入トレーサー法での乱流格子の影響を鮮明には識別することはできなかった.

一方, 60° 菱形角柱群管路での結果では, **Fig.4(a)**に一例を示すように, Re 数が260以下では Re 数の増加とともに後流域の幅が広がり, ふっくらとした流脈の形成がみられる. しかもそれらの流脈は左右対称となっている. **Fig.4(b)**に示すように, Re 数が大きくなると, 後流域での流れの振動がはっきりとあらわれ始めている. さらに Re 数が大きくなった**Fig.4(c)**と**(d)**に示す連続写真の結果の一部での流脈の変化をみると, 後流域での左右の流れの振動があらわれているのがわかる. しかしながら, 上述の**Fig.2(d)~(f)**の結果と比べても明らかなように, 菱形に挟まれた交差流れのせん断層付近の流脈の変化は, 30° のものよりも小さくなっている. 流脈が左右のいずれかに移る時間を比較してみると, 連続写真結果のタイトルに示すように 30° の約3.3秒に対して 60° の場合には約2.5秒となり, その振動周期が短くなっている. また振動の範囲を示す蛍光染料の広がり, 菱形の左右の前面の辺を延長した線と菱形に挟まれる流路内にほとんど収まっており, ある時間での流れの平均をとれば菱形の長軸延長線に対してほぼ左右対称な流動を示していると思われる.

次に, 乱流格子を入れた場合の結果では, Re 数が100程度であれば完全に左右非対称の流脈を示しているが, **Fig.5(a)**に示す Re 数が250程度になると対称な流脈を示している**(b)**図に示す $Re = 280$ 前後で左右への流脈の揺れが始まり, さらに Re 数を増加させると(図を省略), 後流域での流れの振動が顕著にあらわれるが, 前述の乱流格子を入れない場合と同様に, ある時間での流れの平均をとればほぼ左右対称な流動を示している.

以上のように 30° 菱形の場合には, Re 数が500前後で流脈の揺れがあらわれ始め, 乱流格子の影響により流れの非対称性もあらわれている. さらに Re 数が大きくなると, 乱流格子の有無に関係なく後流及び交差流れのせん断層のそれぞれの振動が顕著にあらわれている. 一方, 60° 菱形の場合には, 250程度の Re 数ではふっくらとした流脈で, 振動もほとんどみられず, 乱流格子による流れの非対称性もあ

らわれなかった. さらに Re 数を増加させると, 30° と同様に流脈の揺れが始まり, 後流及び交差流れのせん断層のそれぞれの振動は発現するが, 30° の場合に比べ流脈の変化が小さく, 振動の周期も長くなった. なお, 乱流格子を入れた場合にも, 30° に比べて全体的に流れの変化が小さいために左右対称の流動を示していると推定することができた.

3.2 分流域における流速測定

3.2.1 剥離領域における後流の振動特性

Fig.1の網掛け部分の分流域において, それより上流側に並ぶ 30° 及び 60° の菱形角柱群管路の列数を変化させた場合に, その分流域の左右の菱形角柱からの剥離領域での後流の流速変動がどのように異なるかをLDVによって調べた. 測定によって得られた流速変動の時系列データからパワースペクトルを求めた. それらのなかから v 方向の流速変動のパワースペクトルの結果の二例を**Fig.6.1**と**6.2**に示す.

まず 30° 菱形角柱群管路では, **Fig.6.1**に一例を示すように, 列数が少ない場合には種々の周波数の波があらわれるノイズのような変動を示すスペクトルとなっている. Re 数を変化させた場合でもパワースペクトルの形はよく似ており, パワースペクトルのピーク値 f_v をみると, 同じ Re

Fig.6.1 Power spectrum distribution in case of 1-row for 30° ($Re = 12,300$). **Fig.6.2** Power spectrum distribution in case of 5-row for 30° ($Re = 7,760$).

数で再度測定した結果でもそのピーク値が変化する場合がみられ、流れの片寄りや不安定性があらわれていることを想像することができる。しかしながら、横一列角柱群管路を順次増やして四列や五列に角柱群の列数を増加させていくと、Fig.6.2に一例を示すように、パワースペクトルにはっきりとしたピーク値を示す卓越周波数があらわれている。

Re 数を変化させた場合もパワースペクトルに卓越周波数があらわれ、それらの Re 数に対する変化を示したのがFig.7である。可視化対象領域より上流側の角柱群の数が一列だけの場合には、 Re 数の変化に対して f_v は種々の値がみられ、前述のように同じ Re 数に対して異なった f_v の値もみられる。しかし、角柱群の数が四列や五列になると、 Re 数の増加に対して f_v はほぼ直線的に増大している。

次に、 Re 数に対する f_v に関するStrouhal数 (St 数) の変化をFig.8に示す。角柱群の列数が少ない場合には、 St 数の値に変動がみられるが、五列の場合の結果の Re 数が8,000以上では、 St 数の値はほとんど一定となっている。これらの結果より列数が多くなるにつれて、また Re 数が大きくなるにつれて分流域での剥離領域の後流にはっきりとした振動周期特性を示すことが明らかとなった。

一方、60°菱形角柱群管路では、五列の場合でもパワース

Fig.7 Change of dominant frequency f_v versus Re for $\theta = 30^\circ$.

Fig.8 Change of Strouhal number St versus Re for $\theta = 30^\circ$.

Fig.9 Change of dominant frequency f_v versus Re in case of 5-rows for $\theta = 60^\circ$.

ペクトルに明確な卓越周波数があらわれ難く、パワースペクトルのピーク値をとって Re 数に対する変化を調べた結果、Fig.9のようになった。 Re 数の増加に対して f_v はやや増大傾向がみられるが、30°の列数の少ない場合の結果と同様に、同一の Re 数に対しても異なった f_v の値があらわれている。

3.2.2 最下流側鉛直断面における流速変動

分流域における最下流側鉛直断面において、菱形角柱群管路の列数を変化させた場合の流速変動の測定もLDVによって行った。その鉛直断面の格子点での流速変動によるレイノルズ応力- $\overline{u'v'}/U_{max}^2$ を求め、等レイノルズ応力分布の等高線図を作成した。Fig.10(a)~(c)には30°の黒塗りつぶしの菱形より上流側に横一列角柱群管路が一列だけ並ぶ場合の結果を、Fig.11(a)~(c)にはそれらが五列並ぶ場合の結果を、Fig.12(a)と(b)には60°菱形角柱群管路が五列並ぶ場合の結果をそれぞれ示す。それぞれの図では、等レイノルズ応力線の正の値に対しては太線で、負の値に対しては細線で示し、それぞれの正負の主要なピーク値も示している。なおレイノルズ応力の値は、図中の数値に図の枠外の右上に示す 10^{-3} を乗じたものである。

まず30°の菱形角柱群管路が一列だけ並ぶ場合の結果が示されているFig.10(a)~(c)では、零を示す等レイノルズ応力の等高線は(a)図では中央部の左右に広がる形で分布し(b)や(c)図では Re 数の増加に伴って中央部にほぼ真っ直ぐな線で示されている。図の左右の正負の等高線については、凹凸がはっきりとあらわれ(a)図では左のピーク値の95やその下の70の値付近が盛り上がり、右では-74のピーク値及び-60の値付近がくぼんだ形を示している。(b)図では左のピーク値の99やその右の60の値付近が盛り上がり、右では-73のピーク値付近だけがくぼんでいる。最後の(c)図の右では、-75のピーク値及びその上下付近の三個所にくぼみの部分がみられ、左では57のピーク値付近のみ盛り上がっている。

このように黒塗りつぶしの菱形より上流側に30°菱形角柱群管路が一列だけ並んだ場合では、分流域の最下流側鉛直断面のレイノルズ応力分布には、 Re 数による違い及び左右の正負の部分での値の変化がみられる。特に、それぞれの Re 数での左右のいずれかに等レイノルズ応力線の盛り上

(a) $Re = 1,530$ (b) $Re = 5,170$ (c) $Re = 8,130$ **Fig.10** Iso-Reynolds stress distribution in case of 1-row for $\theta = 30^\circ$. (a) $Re = 1,530$ (b) $Re = 5,220$ (c) $Re = 8,100$ **Fig.11** Iso-Reynolds stress distribution in case of 5-rows for $\theta = 30^\circ$.

がりまたはくぼみの部分が上述のように複数あらわれ、左右の正負の絶対値の差もみられる。これらのことから左右の部分での流速変動が複雑となり、流速変動分布の非対称性、すなわち流れの非対称性があらわれていると思われる。

次に **Fig.11(a)~(c)**に示す 30° 菱形角柱群管路を五列並べた結果については **(a)**図では一列の場合と同じような等レイノルズ応力分布図を示しているが、 Re 数が大きくなった**(b)**や**(c)**図では中央部の零の等高線を軸にして、左右のレイノルズ応力のピーク値が70前後の正負の値を示し、それらの絶対値の差もわずかとなった左右対称的な分布を示している。しかもその盛り上がりあるいはくぼみの形が図の左右の縦方向に峰または谷を延ばした形を示している。

このような角柱群の列数が五列に増えた場合には、可視化対象領域に鮮明なフリップ・フロップ流れの発現が考えられ、左右の主流部付近の全体にわたって流速変動の分散がみられ、左右のレイノルズ応力の絶対値の差も小さくなってほぼ左右対称的な流速変動の分布を示していると思われる。

一方 60° 菱形角柱群管路内でのレイノルズ応力の分布は、 30° の場合と同様に零の等高線が中央部の縦断方向にあら

われ、ほぼ左右対称的ではあるが、 30° の場合分布とは異なるところもみられる。**Fig.12(a)**と**(b)**に 60° 菱形角柱群管路を五列並べた場合の結果の二例を示すように、等レイノルズ応力の正負の値の分布が中央部付近も二つに分かれ、左右の部分とで合計四つに分かれている。しかもその等高線の多くが図の縦方向に延びる形の分布を示しているのが特徴的である。前節の剥離領域における流速変動の振動結果と同様、これらの結果は、フリップ・フロップ流れの発現が考えられる 30° の場合のもの比べると、流れの振動の変化がみられ難いことを示しているものと思われる。

以上のような 30° 菱形と 60° 菱形角柱群管路内での分流域における流速測定結果をまとめると、 30° と 60° の交差角の違いで菱形に挟まれた部分の流れ方向長さに対する流路幅の変化率が異なるために、それぞれの分流域での渦の形成や交差流れのせん断層における振動などの違いがあらわれている。さらに角柱群管路内の角柱列数を変えることによって流速変動特性の違いがあらわれている。具体的には 30° 菱形角柱群管路内の流れにおいては、列数が増えることによって鮮明なフリップ・フロップ流れが発現し、交差流れの左右の主流の流速変動の分布もほぼ対称になることが

Fig.12 Iso-Reynolds stress distribution in case of 5-rows for $\theta = 60^\circ$.

明らかとなった。この結果には、X字形交差管路内での乱流格子による乱れの分散効果³⁾が関係していると思われる。すなわち、流下に伴って交差流れのせん断層の振動と乱れの分散効果により流れの片寄りや不安定性が解消され、フリップ・フロップ流れの発現とともに主流の流速変動分布がほぼ左右対称となったと思われる。それに対して60°菱形角柱群管路内の流れでは、交差流れのせん断層の振動周期がやや長くなり、30°菱形の場合のような乱れの分散効果があらわれ難くなっているものと思われる。しかしながら流速変動分布などの流れは、ほぼ左右対称的なものとなっていると思われる。

4. 結 論

30°及び60°菱形角柱群管路における角柱列数の違いによる交差流れの変化を注入トレーサ法及びLDVによって可

視化計測した結果、次のような結論を得ることができた。

- (1) それぞれの菱形角柱群管路内の交差流れにおける流脈は異なり、 Re 数によっても流脈の振動が異なることが明らかとなった。また今回の注入トレーサ法での可視化結果による乱流格子の影響については、60°菱形角柱群管路内の流れではほとんど影響を及ぼさないことがわかった。
- (2) それぞれの菱形角柱群の列数の違いによって交差流れの分流域における後流の振動特性が異なることを明らかにすることができた。特に、5列のように列数が多い30°菱形角柱群管路内の剥離領域の流れにはフリップ・フロップ流れが発現し、その流れの変動のパワースペクトルに鮮明な卓越周波数があらわれ、はっきりとした振動周期特性を示すことが明らかとなった。
- (3) 30°菱形角柱群管路の分流域では、 Re 数の増大や角柱列数が多くなるにつれてレイノルズ応力の正負の値が左右への二つの領域へ鮮明に分かれ、交差流れのせん断層における振動に伴った乱れの分散効果があらわれることが明らかとなった。一方、60°菱形角柱群管路の結果では、レイノルズ応力分布が二つあるいは三つの領域へ分かれ、30°菱形のものとは大きく異なっていることが明らかになった。

参 考 文 献

- 1) Zhang, N., Yang, W.-J., Xu, Y. and C.P. Lee : Flow characteristics in flow networks, Experiments in Fluids, Vol.14 (1993) pp. 25-32.
- 2) Umeda, S., Yang, W.-J. and T. Tanaka : Mechanics and Correlations of Flow Phenomena in Intersecting Ducts, Experiments in Fluids, Vol. 17, No.5 (1994) pp.323-329.
- 3) 梅田眞三郎, Wen-Jei Yang : 交差管路内の交差流れの特性, 日本機械学会論文集B編, Vol. 66, No.650 (2000), pp. 2619-2626.
- 4) 梅田眞三郎, Wen-Jei Yang : 鉛直交差管内の流れの可視化 - 抵抗と流量特性 -, 可視化情報, Vol. 15, No.59(1995) pp. 41-46.
- 5) 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(1995) pp.28-36.
- 6) Umeda, S. and W.-J. Yang : Flow Through Rectangular Cylinder Bundles, Jour. of Flow Visualization and Image Processing, Vol. 5, No.2(1998) pp.167-186.
- 7) Umeda, S. and W.-J. Yang : Interaction of Von Karman Vortices and Intersecting Main Streams in Staggered Tube Bundles, Experiments in Fluids, Vol.26, No.5 (1999) pp.389-396.
- 8) 特許第2841173号 : 流体噴出方向の振動発生管路体と, これを利用した装置(1998).
- 9) 特許第3084610号 : 流体路装置(2000).