



## 3D-PIV とモーダルウェーブレット画像処理による 旋回流搬送装置内の流れの可視化\*

田中 健嗣<sup>1)</sup>, 武居 昌宏<sup>2)</sup>, 都 徳熙<sup>3)</sup>, 植村 知正<sup>4)</sup>, 斎藤 兆古<sup>5)</sup>

### Visualization of Swirling Flow Transportation Equipment by 3D-PIV and Modal Wavelet Image Processing

Kenji TANAKA, Masahiro TAKEI, Deog-Hee DOH  
Tomomasa UEMURA and Yoshifuru SAITO

#### ABSTRACT

In order to evaluate three types of conveyance equipment using swirling flow, the flow fields in a vertical pipe were visualized by 3D-PIV and the three-dimensional velocity distributions were analyzed with modal wavelet transforms. The three types of equipment all have a main vertical pipe. Type A has one air inlet and an opening vertical pipe, Type B has four air inlets and an opening vertical pipe and Type C has four air inlets and a closing vertical pipe attached four air outlets. The 3D-PIV revealed that Type A and Type B exhibited an approximate axial flow along with a weak swirling flow. On the other hand, Type C had a strong swirling flow. As a result of modal wavelet transform analysis, it was found that the high frequency multiresolution element was the smallest in the Type C swirling component. This indicates that Type C has the steadiest swirling flow for suitable swirling conveyance equipment.

**Keywords :** Swirling flow, 3D-PIV, Modal wavelet transform

#### 1. 緒言

従来からサイクロン分離機<sup>1)</sup> や、空気輸送<sup>2)</sup>などの分野において、旋回流が用いられており、多くの基礎的な研究が行われている<sup>3)</sup>。これらの搬送装置内の流れを把握するために、その速度分布を計測することは非常に重要である。例えば妹尾らはピトー管を用いて圧力を計測することで、管内旋回流の速度を計測し<sup>4)</sup>、松崎らは熱線流速計を用いてサイクロン分離機の速度分布計測を行なった<sup>5)</sup>。Bediらはレーザー流速計により旋回流の速度分布と乱流速度の計測を行ない<sup>6)</sup>、Khezzerはレーザー流速計により旋回流の3成分の速度分布と乱流速度の計測を行った<sup>7)</sup>。

しかしながら、これらの計測方法は接触または非接触型の点計測であり、近年主流となっている非接触型の面計測ではない。その面計測の一例としてPIV計測が一般的であり、最近ではステレオ計測、すなわち3D-PIV計測も行われている<sup>8)</sup>。しかしながら、現在まで管内旋回流をPIV計測した例はほとんどなく、ましてや3D-PIV計測を行った例

もほとんど存在しない。

一般的にPIVで得られた速度分布には、大小さまざまなスケールの渦が混在し、最近、その特徴抽出法として連続ウェーブレット解析をPIV画像に適用する試みがなされ、バックステップ流れ<sup>9)</sup>やキャビティ流れ<sup>10)</sup>などの解析が行なわれた。さらに李らは離散ウェーブレット変換をLobJet PIV画像に適用した<sup>11)</sup>。しかしながら、離散ウェーブレット変換は画像データ数が2のべき乗でなければ適用できないため、解析領域に制限が生じてしまう。そこで、斎藤らは、画像データが2のべき乗に制限されないモーダルウェーブレット変換を提案し<sup>12)</sup>、筆者らはPIV画像に応用することを提案している<sup>13)</sup>。

安定した旋回流搬送を設計する上で、旋回流中にある大小さまざまな渦の状態を把握するため、物体が旋回する管路水平断面において旋回成分の空間周波数解析は重要となってくる。

そこで本研究では、旋回流搬送装置設計の第一段階として、3種類の旋回流発生装置を試作し、それぞれの流れを3D-PIVで可視化した後、モーダルウェーブレット変換による多重解像度解析を行い、どの装置が最も適しているかを検討することを目的とする。

\* 原稿受付 2006年1月18日

1) 正会員 オカモト株式会社  
(〒301-0801 茨城県龍ヶ崎市板橋町字西山1番地)  
E-mail : cpt.tanaka@imx.okamoto-inc.co.jp)  
2) 正会員 日本大学 理工学部  
3) 非会員 韓国海洋大学  
4) 正会員 関西大学 工学部  
5) 正会員 法政大学 工学部

## 2.10 パラメータ法

ステレオ PIV 法<sup>14)</sup>は多くの種類が存在するが, 本研究では Doh らの提唱した「10 パラメータ法」を用いる<sup>15)</sup>.

**Fig. 1(a)**に物体座標系 $(X, Y, Z)$ とカメラ座標系 $(x, y, z)$ の概略を示す. 物体座標系で定義した粒子の位置を  $P(X_m, Y_m, Z_m)$ とし, カメラ座標系で定義した粒子の位置を  $P'(x_c, y_c)$ とする. 粒子の 3 次元位置を得るためには, まず「10 パラメータ法」に基づいて 6 つの外部パラメータ $(\alpha, \beta, \gamma, dis, M_x, \text{および } M_y)$ と, 4 つの内部パラメータ $(c_x, c_y, k_1, \text{および } k_2)$ を求める.  $(\alpha, \beta, \gamma)$ は **Fig. 1(b)**で示した通り, 物体座標系 $(X, Y, Z)$ に対するカメラ座標系 $(x, y, z)$ の回転を表す.  $dis$ は物体座標系の原点  $O(0, 0, 0)$ とカメラ視点  $F(X_0, Y_0, Z_0)$ 間の光軸距離を示し,  $M_x$ および  $M_y$ は, カメラ視点  $F$ から  $X$ - $Y$ 平面に垂線をおろした時の交点の  $X, Y$ 成分である.  $c_x$ および  $c_y$ は, 焦点距離 (カメラ視点  $F$ とカメラ主点  $V$ からの距離) $c$ の  $x$ - $y$ 面における各成分である.  $k_1$ および  $k_2$ はレンズひずみ係数である. 物体座標系における粒子位置  $P(X_m, Y_m, Z_m)$ をカメラ座標系  $P'(x_c, y_c)$ で表すと,

$$\left. \begin{aligned} x_c - \Delta x &= c_x \frac{X_m - M_x}{\sqrt{dis^2 - M_x^2 - M_y^2} - Z_m} \\ y_c - \Delta y &= c_y \frac{Y_m - M_y}{\sqrt{dis^2 - M_x^2 - M_y^2} - Z_m} \end{aligned} \right\} (1)$$

となる. ここで  $\Delta x$ と  $\Delta y$ は,

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \frac{x_c}{r} \times (k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ \Delta y &= \frac{y_c}{r} \times (k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ r &= \sqrt{x_c^2 + y_c^2} \end{aligned} \right\} (2)$$

で表せる. 式(1)の左辺を右辺に移項し,  $F$ と  $G$ で表すと,

$$\left. \begin{aligned} F &= c_x \frac{X_m - M_x}{\sqrt{dis^2 - M_x^2 - M_y^2} - Z_m} - (x_c - \Delta x) \\ G &= c_y \frac{Y_m - M_y}{\sqrt{dis^2 - M_x^2 - M_y^2} - Z_m} - (y_c - \Delta y) \end{aligned} \right\} (3)$$

となる. ここで較正板を用いて 20 組の  $P(X_m, Y_m, Z_m)$ をあらかじめ光学距離計で高精度に測定する. さらにカメラ座標系での $(x_c, y_c)$ を求め, 式(3)から最小二乗法を用いて, 各パラメータを求める. ここで式(3)より  $X_m$ と  $Y_m$ を求めると,

$$\left. \begin{aligned} X_m &= \frac{x_c - \Delta x}{c_x} t + M_x \\ Y_m &= \frac{y_c - \Delta y}{c_y} t + M_y \\ Z_m &= d - t \quad d = \sqrt{dis^2 - M_x^2 - M_y^2} \\ & \quad t = \sqrt{dis^2 - M_x^2 - M_y^2} - Z_m \end{aligned} \right\} (4)$$

となる.

一方, 回転変換行列を  $M_M$ とおき, その逆行列  $M_M^{-1}$ を  $B$ とおき, カメラ座標系から求めた物体座標の粒子位置  $P(X_m, Y_m, Z_m)$ と物体座標系の三次元位置 $(X, Y, Z)$ の関係は

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = M_M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる. ここで  $M_M$ は

$$\left. \begin{aligned} M_M^{-1} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \\ M_M^2 &= \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \\ M_M^3 &= \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} (6)$$

$$M_M = M_M^{-1} M_M^2 M_M^3 \quad (7)$$

$$M_M^{-1} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

になる回転変換を示す行列である. ここで  $B$ の各要素を  $b_{11} \sim b_{33}$ で表すと

$$\left. \begin{aligned} X &= \left( b_{11} \frac{x_c - \Delta x}{c_x} + b_{12} \frac{y_c - \Delta y}{c_y} - b_{13} \right) t + (b_{11} M_x + b_{12} M_y + b_{13} d) \\ Y &= \left( b_{21} \frac{x_c - \Delta x}{c_x} + b_{22} \frac{y_c - \Delta y}{c_y} - b_{23} \right) t + (b_{21} M_x + b_{22} M_y + b_{23} d) \\ Z &= \left( b_{31} \frac{x_c - \Delta x}{c_x} + b_{32} \frac{y_c - \Delta y}{c_y} - b_{33} \right) t + (b_{31} M_x + b_{32} M_y + b_{33} d) \end{aligned} \right\} (9)$$

となる.

カメラ視点  $F(X_0, Y_0, Z_0)$ は,

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= b_{11} M_x + b_{12} M_y + b_{13} d \\ Y_0 &= b_{21} M_x + b_{22} M_y + b_{23} d \\ Z_0 &= b_{31} M_x + b_{32} M_y + b_{33} d \end{aligned} \right\} (10)$$

となる. 各カメラに対するカメラ視点  $F(X_0, Y_0, Z_0)$ と粒子を通る 1 つの直線方程式は媒介変数を  $t$ で表すと,

$$P(X, Y, Z) = P \begin{pmatrix} (b_{11} \frac{x_c - \Delta x}{c_x} + b_{12} \frac{y_c - \Delta y}{c_y} - b_{13})t + (b_{11}M_x + b_{12}M_y + b_{13}d), \\ (b_{21} \frac{x_c - \Delta x}{c_x} + b_{22} \frac{y_c - \Delta y}{c_y} - b_{23})t + (b_{21}M_x + b_{22}M_y + b_{23}d), \\ (b_{31} \frac{x_c - \Delta x}{c_x} + b_{32} \frac{y_c - \Delta y}{c_y} - b_{33})t + (b_{31}M_x + b_{32}M_y + b_{33}d) \end{pmatrix} \quad (11)$$

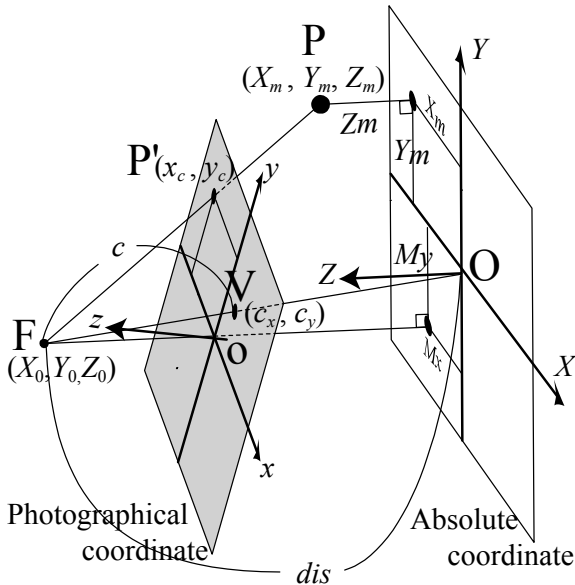
となる。これは、1個の粒子に対する1台のカメラからの直線方程式なので2台のカメラA,Bに対する2つの直線方程式は、

$$\begin{aligned} A(X, Y, Z) &= A(a_{11}t + X_0, a_{12}t + Y_0, a_{13}t + Z_0) \\ B(X, Y, Z) &= B(a_{21}t' + X_0, a_{22}t' + Y_0, a_{23}t' + Z_0) \end{aligned} \quad (12)$$

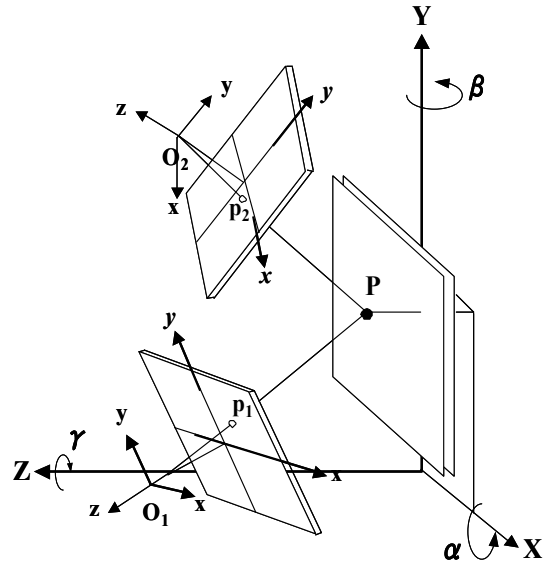
である<sup>16)</sup>。3次元座標位置はこの2つの直線の交点であり、 $t, t'$ は最小二乗法によって求める。すなわち、物体座標系の粒子の3次元位置  $P(X, Y, Z)$ は、2台のカメラAおよびBを用いて、

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \right\} \quad (13)$$

と表せる。ここで、 $(X_A, Y_A, Z_A)$ は式(12)を用いて得られたカメラAにおける物体座標系の粒子位置であり、 $(X_B, Y_B, Z_B)$ も同様にカメラBにおける粒子位置である。カメラA,Bにおいて相関法により時間の対応付けを行った。



(a) The absolute coordinate and the photographic coordinate.



(b) The Photographical coordinate of camera A and B.

Fig. 1 Relations of camera parameters on the absolute coordinate and the photographic coordinate.

### 3. 実験

#### 3.1 実験装置・条件・方法

実験装置は Fig. 2 に示した基本装置と、Fig. 3 に示した旋回流発生装置から成る。Fig. 2 に示した基本装置は、鉛直パイプ、コンプレッサー、コンプレッサー用コントローラ、旋回流発生装置取付部、レーザーシート、2台の CCD カメラ、パルスジェネレータ、およびコンピュータから成る。鉛直パイプは、長さ 600mm、内径 100mm、無色透明の亚克力製であり、下端には空気の供給量を均一にするため、鉛直パイプよりもひとまわり大きな囲いを設けた。旋回流発生装置取付部には、空気を供給するための流入口が鉛直パイプの下端(Lower part)に位置し、空気を排出するための流出口が鉛直パイプの上端(Top part)に位置する。

Fig. 4 に示した通り旋回流発生装置は 3 種類存在し、それぞれ形状が異なる。Type A は Fig. 4(a) に示した通り、上端(Top part)が開放され、下端(Lower part)に接線方向から 1 つの空気流入口 (内径 8mm) が取り付けられている。Type B は Fig. 4(b) に示した通り、上端(Top part)が開放され、下端(Lower part)に接線方向から 4 つの空気流入口が取り付けられている。Type C は Fig. 4(c) に示した通り、上端(Top part)が閉塞され、接線方向に 4 つの流出口が取り付けられ、下端(Lower part)に接線方向から 4 つの空気流入口が取り付けられている。測定位置は Fig. 3 に示した通り、下端(Lower part)の鉛直管下端より 240mm 上方の位置を中心とし  $X \times Y$  が 80 mm  $\times$  50 mm の範囲で、管壁より X 方向に 10mm 内側になるよう設定し 2 台の CCD カメラにて測定を行なった。CCD カメラは Kodak 社製の Megaplus であり、解像度 1008 Pixel  $\times$  1018 Pixel を使い、1/60sec 間隔で連続的に撮影した。光源であるレーザーシートは光源 Nd:YAG、出力 120mJ である。レーザーシートの照射と CCD カメラの

撮影を同時に行うため、パルスジェネレータに LabSmith 社製の LC880 を用いた。CCD からの画像データはコンピュータにて、解像度  $n_x = n_y = 30\text{Pixel}$  のベクトル画像として得た。鉛直パイプ下端よりコンプレッサーによって圧縮した空気とトレーサー粒子である煙を混合し、流入口に供給した。流量は実際の旋回流搬送装置により発泡スチロール製の長さ 60mm、直径 12mm の棒状物体を搬送することを考え、その棒状物体が  $L=240\text{mm}$  の位置で旋回した時の流量とした。すなわち、流量  $Q$  は TypeA の場合  $Q_A=3.83 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$ 、TypeB の場合  $Q_B=3.41 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$ 、そして、TypeC の場合  $Q_C=2.43 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$  である。流量を管断面積で除した管内の平均流速  $U$  は、Type A の場合  $U_A=0.49 \text{ m/s}$ 、Type B の場合  $U_B=0.43 \text{ m/s}$  であり、Type C の場合  $U_C=0.38 \text{ m/s}$  である。さらに平均流速から求めたレイノルズ数  $Re$  は Type A の場合  $Re_A=3250$ 、Type B の場合  $Re_B=2850$ 、Type C の場合  $Re_C=2500$  である。

これら 3 種の旋回流発生装置により、鉛直パイプ内に旋回流を発生させ、十分時間が経ち、流れが安定した時点をも  $0\Delta t \text{ sec}$  とし、 $1\Delta t \text{ sec}$  から  $500\Delta t \text{ sec}$  における管内の流れを撮影した  $1\Delta t \text{ sec}$  から  $500\Delta t \text{ sec}$  の各画像について、時間  $t$  における  $i(X, Y, Z)$  成分の  $X$ - $Y$  平面における 2 次元速度分布のベクトル画像を  $U_i^{X,Y,t}$  とし、その  $X$  と  $Y$  と  $t$  の関数の空間平均値の時間変化  $\overline{U}_i^{X,Y,t}$  は、

$$\overline{U}_i^{X,Y,t} = \frac{1}{n_x} \frac{1}{n_y} \sum_{X=1}^{n_x} \sum_{Y=1}^{n_y} U_i^{X,Y,t} \quad (14)$$

となる。その時間平均の空間分布  $\overline{U}_i^{X,Y,t}$  は、

$$\overline{U}_i^{X,Y} = \frac{1}{t_n} \sum_{t=1}^{t_n} U_i^{X,Y,t} \quad (15)$$

となる。ただし、 $Z$  成分は回転を示すため、 $U_z^t$  は絶対値をとった。ここで  $t_n$  は時間側の画像枚数を表し  $t_n=500$  であり、 $n_x=n_y=30$  である。

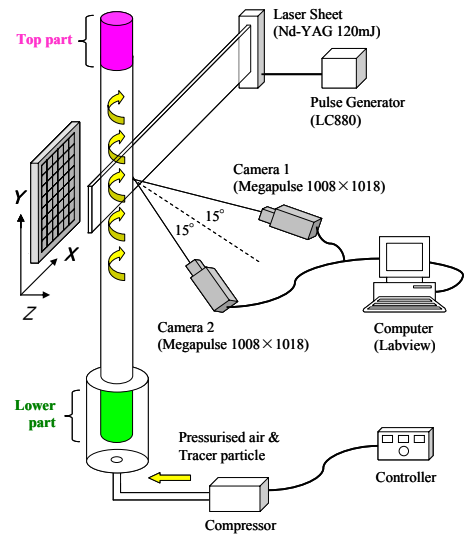


Fig. 2 Basic device of experimental setup.

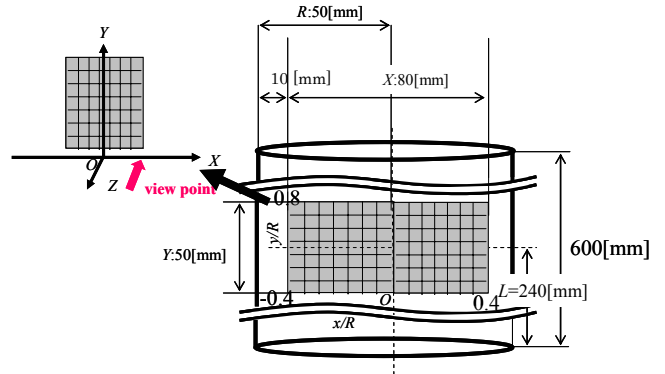


Fig. 3 Size of detecting area and direction of coordinate.

Top part	<p>Open</p>	<p>Open</p>	<p>Close</p>
Lower part	<p>Pressurised Air and Tracer particle</p>	<p>Pressurised Air and Tracer particle</p>	<p>Pressurised Air and Tracer particle</p>
Air inlet shape			
	(a) Type A	(b) Type B	(c) Type C

Fig. 4 Swirling flow generator.

### 3. 2 実験結果

$1\Delta t$  sec から  $500\Delta t$  sec における Type A, Type B, および Type C の速度分布を 3 次元ベクトル画像で示し, その一例として,  $30\Delta t$  sec を Fig. 5 に示した. ベクトルの色については, 1 枚の画像の中で一番小さいベクトルを青色, 一番大きいベクトルを赤色とし, その間のベクトルを相対的に色分けした. そして, 各速度分布画像について,  $X, Y$  および  $Z$  成分の空間平均の時間変化を, 式(14)から求め, Fig. 6 に示した. Fig. 6 より Type A および Type B は,  $Y$  成分が一番大きく, 次に  $X$  成分で  $Z$  成分が一番小さかった. 一方 Type C は  $Z$  成分が一番大きく,  $X$  成分と  $Y$  成分は小さくほぼ同じ程度であった<sup>17)</sup>. 一方時間平均の空間分布を, 式(15)から求め, Fig. 7 に示した. Fig. 7 より Type C は旋回流が顕著に可視化できたが, Type A および Type B は Type C に比べると, その旋回速度成分は小さかった. そこで, Type A および Type B の旋回流を確認するため,  $Z$  成分について正の流れを白色, 負の流れを黒色で二値化した図を

Fig. 8 に示した. その結果, Type A および Type B も管の中心を境に反時計周りに旋回しているのが確認できた.

以上より, 3D-PIV により旋回流発生装置の構造の違いによって, 旋回流の  $X, Y$  および  $Z$  成分の比率が異なることが分かった. これは, Type A および Type B は鉛直パイプの上端(Top part)が開放されているため, 下端(Lower part)で発生した旋回流が, 上昇するにつれて  $Y$  成分に移行し,  $L=240\text{mm}$  では,  $Z$  成分がわずかに存在していたと考えられる. 一方, Type C は上端(Top part)が閉塞され, 4 つの流出口が取り付けられたことによって, 下端(Lower part)で発生した旋回流が, 鉛直パイプの広い範囲で保たれ,  $L=240\text{mm}$  でも,  $Z$  成分が顕著に確認できたと考えられる.

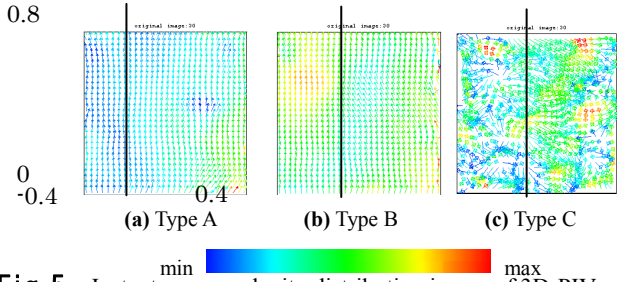


Fig. 5 Instantaneous velocity distribution image of 3D-PIV

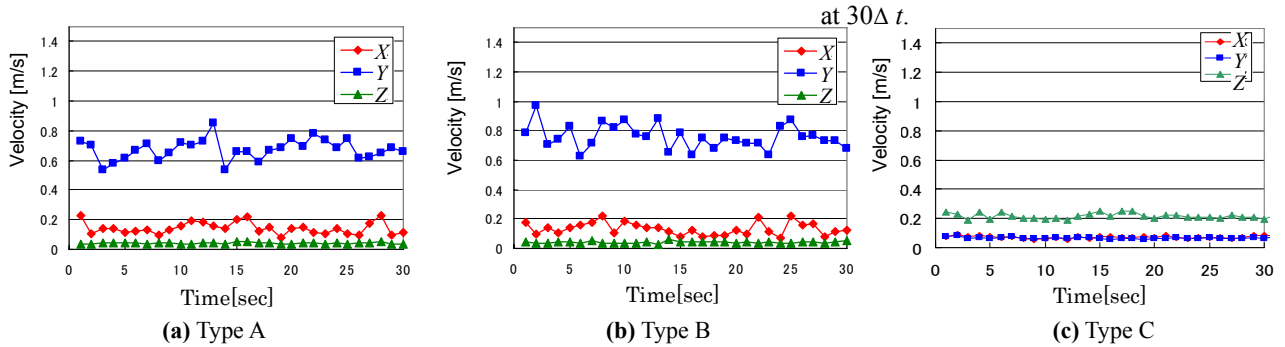


Fig. 6 Spatially mean velocity of swirling flow.

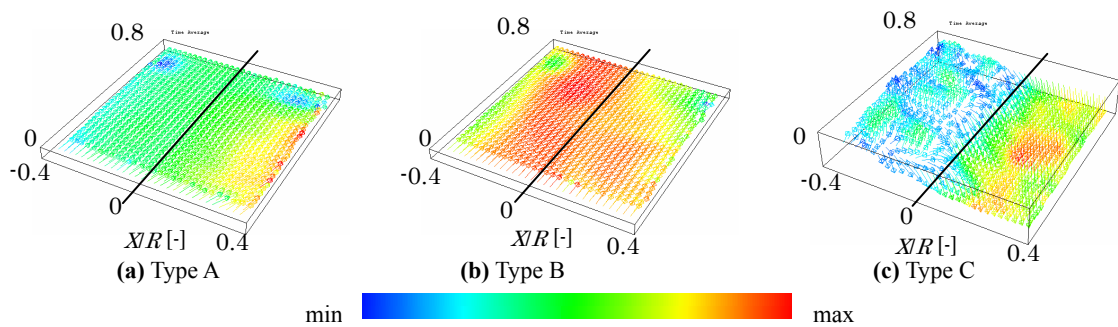


Fig. 7 Temporally mean velocity distribution images.

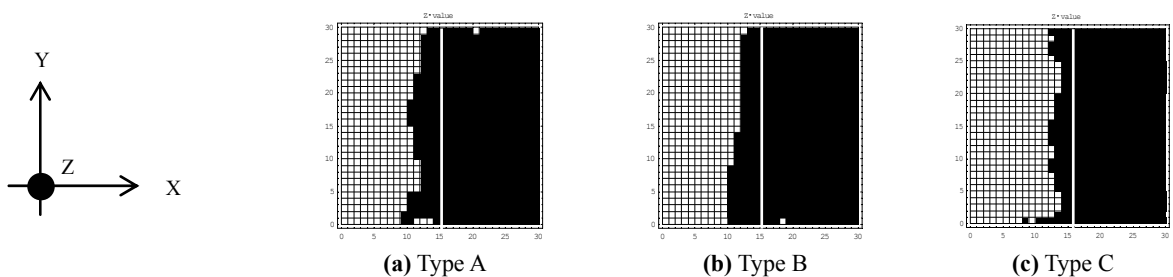


Fig. 8 Swirling direction of spatially mean velocity.

## 4. 多重解像度解析による旋回流発生装置の比較検討

### 4.1 モーダルウェーブレット変換

モーダルウェーブレット変換は画像の支配方程式にポアソン方程式を仮定し, そのモーダル行列を基底関数としたものである<sup>12)</sup>. 時間  $t$  における  $X$ - $Y$  平面における 2 次元速度分布を  $u_i^{X,Y,t}$  とすると, そのポアソン方程式は,

$$\nabla^2 u_i^{X,Y,t} = -\sigma \quad (16)$$

となる. ここで  $i$  は  $X, Y$  および  $Z$  成分を表し,  $n_x \times n_y$  ピクセルを持つ画像  $u_i^{X,Y,t}$  は,  $X, Y$  および  $Z$  方向の速度成分を持つ  $n_x \times n_y$  の 2 次元の行列である. 式(16)を離散化し行列表示すると

$$LU_i^{X,Y,t} = F \quad (17)$$

となる.  $F$  は画像のソースデンスティ  $\sigma$  である.  $L$  はノイマン型の境界条件を与えることで得られるラプラシアンに対応する係数行列であり対称行列かつ正定値となり,  $n$  個の固定値とそれに対応する固有ベクトル  $v_i (i=1,2,\dots,n)$  が存在する. そのモーダル行列  $W$  は,

$$W = (v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n) \quad (18)$$

となり, ユニタリ行列で直交行列であるので,

$$W^T W = I \quad (19)$$

となる. このモーダル行列  $W$  を, アナライジングウェーブレット行列とした変換は, モーダルウェーブレット変換と呼ばれており<sup>12),13)</sup>, ウェーブレットスペクトラムは,

$$S_i^{X,Y,t} = W U_i^{X,Y,t} W^T \quad (20)$$

となる. モーダルウェーブレット逆変換とその多重解像度は,

$$U_i^{X,Y,t} = W^T S_i^{X,Y,t} W = W^T S_i^{X,Y,t,1} W + \dots + W^T S_i^{X,Y,t,n} W = \sum_{Level=1}^n U_i^{X,Y,t,Level} \quad (21)$$

と表すことができる. ここで  $U_i^{X,Y,t,1} = W^T S_i^{X,Y,t,1} W$  は周波数が最も低いレベル 1 を示し,  $U_i^{X,Y,t,n} = W^T S_i^{X,Y,t,n} W$  は周波数要素が最も高いレベル  $n$  を示す. 空間周波数に分解した時間平均の速度分布を,

$$\begin{aligned} \bar{U}_i^{Low} &= \sum_{Level=1}^5 \left( \frac{1}{t_n} \sum_{t=1}^{t_n} U_i^{X,Y,t,Level} \right) \\ \bar{U}_i^{Middle} &= \sum_{Level=6}^{18} \left( \frac{1}{t_n} \sum_{t=1}^{t_n} U_i^{X,Y,t,Level} \right) \\ \bar{U}_i^{High} &= \sum_{Level=19}^{30} \left( \frac{1}{t_n} \sum_{t=1}^{t_n} U_i^{X,Y,t,Level} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

により定義した. ここで,  $\bar{\quad}$  は時間平均を示す.  $\bar{U}_i^{Low}$  は低空間周波数に分解した時間平均の速度分布であり,  $\bar{U}_i^{Middle}$  は中間周波数に分解した時間平均の速度分布であり,  $\bar{U}_i^{High}$  は高空間周波数に分解した時間平均の速度分布である. 本研究では, Level 1 から Level 5 までの和を低空間周

波数と呼び, Level 6 から Level 18 までの和を中間周波数と呼び Level 19 から Level 30 までの和を高空間周波数と呼ぶ. すなわち,  $\bar{U}_i^{Low}$  は空間的に平均的な速度分布を示し,  $\bar{U}_i^{High}$  は空間的に局所的な速度分布を示し,  $\bar{U}_i^{Middle}$  はそれらの中間的な速度分布を示す.

次に式(21)よりその時間空間平均の速度分布を,

$$\bar{\bar{U}}_i^{Level} = \frac{1}{t_n} \frac{1}{n_y} \frac{1}{n_x} \sum_{t=1}^{t_n} \sum_{Y=1}^{n_y} \sum_{X=1}^{n_x} U_i^{X,Y,t,Level} \quad (23)$$

により定義した. ここで,  $\bar{\bar{\quad}}$  は時間空間平均値を表す.

### 4.2 旋回流発生装置の比較検討結果

**Fig. 5** に示した  $X, Y, Z$  の 3 成分からなる  $X$ - $Y$  面の 2 次元速度分布画像に対して, モーダルウェーブレットによる多重解像度分解を行った. そして, その Level 1 から Level 30 までの時間平均の空間速度分布を式(21)から求める. 次に式(23)より低, 中, 高空間周波数に分解した時間平均の速度分布を **Fig. 9** に示す. ベクトルの色については, 1 枚の画像の中で一番小さいベクトルを青色, 一番大きいベクトルを赤色とし, その間のベクトルを相対的に色分けした. この **Fig. 9** より Type A, Type B に比べ, Type C では中, 高空間周波数の速度分布が異なっていることがわかる. さらに Level 1 から Level 30 までの各速度分布画像について,  $X, Y$  および  $Z$  成分の時間空間平均値を式(22)から求め, **Fig. 10** に示した. **Fig. 10** より, Type A, Type B では,  $Y$  成分,  $X$  成分,  $Z$  成分の順に速度が大きいのに対し, Type C では,  $Z$  成分が  $X$  成分,  $Y$  成分に対して大きい. そして, 各旋回流発生装置の比較をするために, Type A, Type B および Type C の旋回成分である  $Z$  成分のみを取り出し, 最大値を 1.0 に最小値を 0.0 に正規化し対数目盛として **Fig. 11** に示した. その結果, Type A, Type B および Type C の  $Z$  成分の値は, Level 1 から Level 18 までの低, 中間周波数ではほぼ同じであるが, Level 19 以上の高空間周波数では, Type C の値は急激に減少した. 次に,  $Z$  成分の低空間周波数, 中間周波数および高空間周波数の比率を **Table 1** に示す. この表に示した通り, Type A と Type B では, 高空間周波数の比率(約 20%)が中, 低空間周波数の比率(各約 40%)に対して比較的大きい. 一方, Type C では, 高空間周波数の比率(4%)が中間周波数(20%), 低空間周波数の比率(76%)に対して非常に小さい. 従って, Type C の旋回流発生装置を用いて物体を搬送した場合, 空間的にほぼ一様の旋回方向の抗力が得られ物体は安定して搬送されると考えられる.

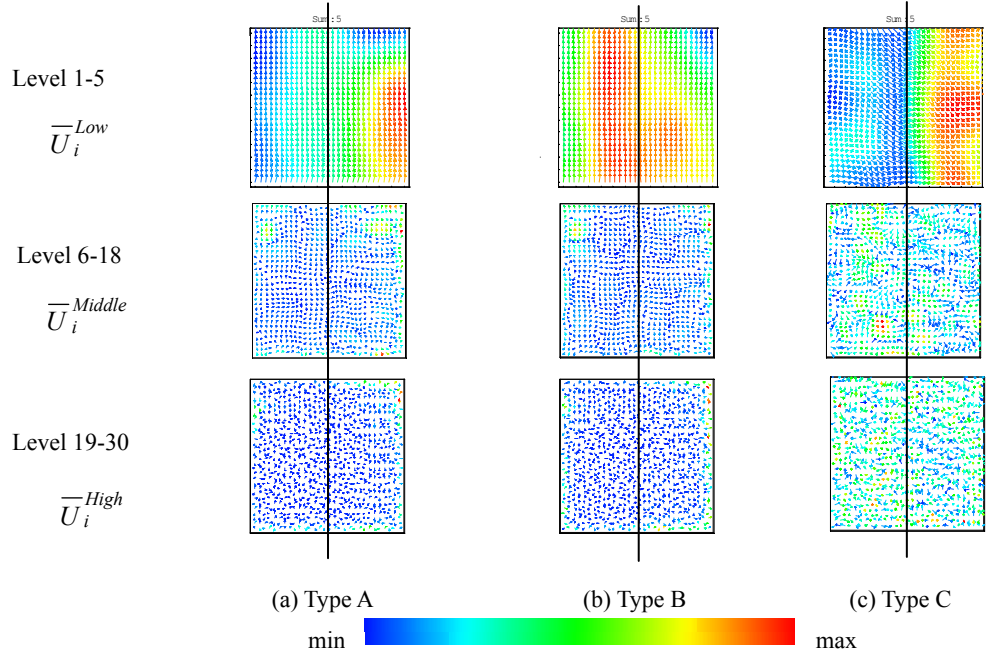


Fig. 9 Velocity distribution decompose to temporal mean frequency.

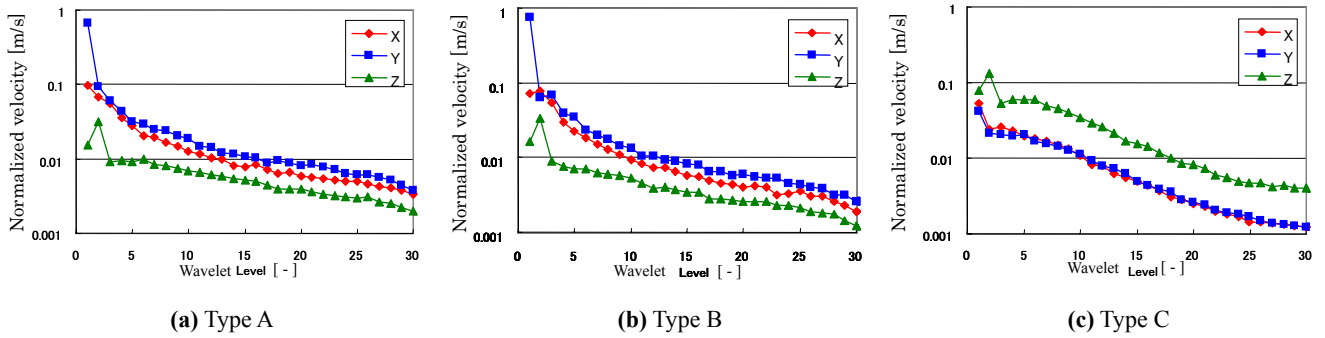


Fig. 10 Spatial mean velocity from multiresolution analysis.

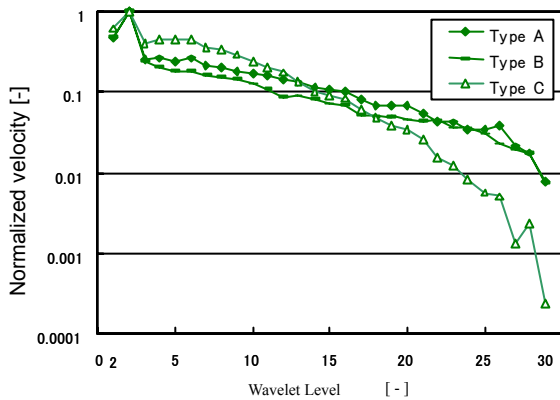


Fig. 11 Normalized velocity of swirling component.

Table 1 Frequency ratio of swirling component.

		Type A	Type B	Type C
Low spatial frequency	Level 1~5	39%	46%	76%
Middle spatial frequency	Level 6~18	43%	38%	20%
High spatial frequency	Level 19~30	19%	16%	4%

## 5. 結論

旋回流搬送装置設計の第一段階として、次の3種類の旋回流発生装置を製作した。Type Aとして空気流入口×1で鉛直パイプ上端を開放したもの、Type Bとして空気流入口×4で鉛直パイプ上端を開放したもの、Type Cとして空気流入口×4を上下に設け、鉛直パイプ上端を閉塞したものを試作した。そして、各装置を比較検討するために、鉛直パイプ

内の速度分布を 3D-PIV で可視化計測し, 得られた速度分布の 2 次元ベクトル画像に対して, モーダルウェーブレットによる多重解像度解析を行った. その結果, 旋回成分である Z 成分において, Type A および Type B には, 高空間周波数が比較的多く含まれているのに対し, Type C は, 高空間周波数が少ない流れであることが分かった. 従って, Type C の旋回流発生装置を用いて物体を搬送した場合, 空間的にほぼ一様の旋回方向の抗力が得られ物体は最も安定して搬送されると考えられる.

## 謝 辞

本研究を行うにあたり, オカモト株式会社の三浦博氏および白百合女子大学の堀井清之先生に多大なご協力ご助言をいただきました. ここに厚く御礼申し上げます.

## 参 考 文 献

- 1) 小川明: “サイクロン分離機”, アース社, (1980).
- 2) 李 輝, 富田侑嗣: “鉛直管内固気二相旋回流の数値シミュレーション”, 日本機械学会論文集(B 編), Vol.62, No.603, (1996), pp.3810-3817.
- 3) 上田寛, 武居昌宏, 趙耀華, 李輝, 越智光昭, 富田侑嗣, 堀井清之: “スパイラルフローを用いた管内壁への低接触化空気輸送”, 日本航空宇宙学会誌, Vol.46, No.534, (1998), pp.393-397.
- 4) 妹尾泰利, 永田徹三: “長い平滑管および粗面管の旋回流”, 日本機械学会, Vol.38, No.308, (1972), pp.759-766.
- 5) 松崎和愛, 本田逸郎, 後藤茂宏, 大庭英樹, 宗像瑞恵: “サイクロン分離器内旋回流に関する研究 (第 1 報, 平均流れ特性)”, 日本機械学会論文集(B), Vol.64, No.618, (1998), pp.375-379.
- 6) P.S.Bedi, M.T.Thew: "Localized velocity and turbulence measurement in turbulent swirling flows using laser Doppler anemometry", *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 5, No.1, (1973), pp.9-25.
- 7) L.Khezzar: "Velocity measurements in the near field of a radical swirler", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.16, (1998), pp.230-236.
- 8) 可視化情報学会編, “PIV ハンドブック”, 森北出版, (2002).
- 9) R.Camussi: “Coherent structure identification from wavelet analysis of particle image velocimetry data”, *Experiments in Fluids*, Vol.32, No.1 (2002), pp.76-86.
- 10) C. Schram, P. Rambaud, M.L. Riethmuller.: “Wavelet based eddy structure education from a backward facing step flow investigated using particle image velocimetry”, *Experiments in Fluids*, Vol.36, No.2 (2004), pp.233-245.
- 11) E.Özsoy, E. P.Rambaud, A.Stitou, M.L.Riethmuller.: “Vortex characteristics in laminar cavity flow at very low mach number”, *Experiments in Fluids*, Vol. 38, No.2 (2005), pp.133-145.
- 12) 斎藤兆古: 知的可視化情報処理(3), 日本 AEM 学会誌, Vol.10, (2002), pp.170-177.
- 13) 田中健嗣, 吉田美智子, 武居昌宏, 植村知正, 斎藤兆古: “モーダルウェーブレット変換を用いた PIV 画像解析における最適基底関数の選択”, 可視化情報学会論文集, Vol.26, No.8, (2006), pp.81-88.
- 14) Prasad A. K. and Adrian R. J.: “Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows”, *Experiments in Fluids*, Vol. 15, (1993), pp.49-60.
- 15) Doh D.H., Him D.H., Cho K.R., Cho Y.B., Saga T and Kobayashi T: “Development of GA based 3D-PTV technique”, *Journal. of Visualization*, Vol.5, (2002), pp.243-254.
- 16) Doh D.H., T.G., Saga T.: “3D-PTV measurements of the wake of a sphere”, *Measurement Science and Technology*, Vol.15, (2004), pp.1059-1066.
- 17) 小川明, 渦学, 山海道.