

## 2 実験装置と方法

### 2.1 はじめに

本章では、まず、実験で使用した水槽と風洞装置を説明する。仕切板と副円柱をそれぞれ干渉要素として用いた実験状況を説明する。主円柱の背圧とストローハル数の計測方法を述べる。

次に、粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry 略して PIV) の計測原理を述べ、PIV の測定方法を述べる。PIV と従来の測定法を比較する。本研究で使用するパラメータの設定を検討し後処理方法について述べる。

### 2.2 実験装置

#### 2.2.1 回流水槽

図 4 は使用した水槽の概略である。水槽は鉛直回流型で上部が開放されており、測定部は長さ 4.0m、測定部の断面幅 0.4 m、高さ 0.6 m である。水深は 0.4m と設定した。流れはインペラーによって駆動され、流速 0.09~1.00 m/s がコンピューターにより制御可能である。測定位置での流れを一様化するため、測定部上流に多孔板 (縦 1000 mm× 横 400 mm) とステンレスメッシュ (縦 1000 mm× 横 400 mm) を設置している。さらに面内の流速を一様にするため、インペラーの回転数に応じてローターで水面の速度を加速させ、なおかつ表面波を抑制するため制波板を設置している。水面および壁から 50 mm 以上離れたコア領域での乱れの強さ ( $I = \sqrt{u'^2}/U$ ,  $u'$ ; 主流方向変動流速,  $U$ ; 時間平均流速) は 1.0 % 以下であった。図 5 は水槽の測定部の速度分布である。主円柱を設置する底面から 200 mm の高さで主流直角方向水平にピトー管をトラバースし流速を測定した。平均流速についても壁から 50 mm 以上離れたコア領域での一様性は良好であることを確認した。

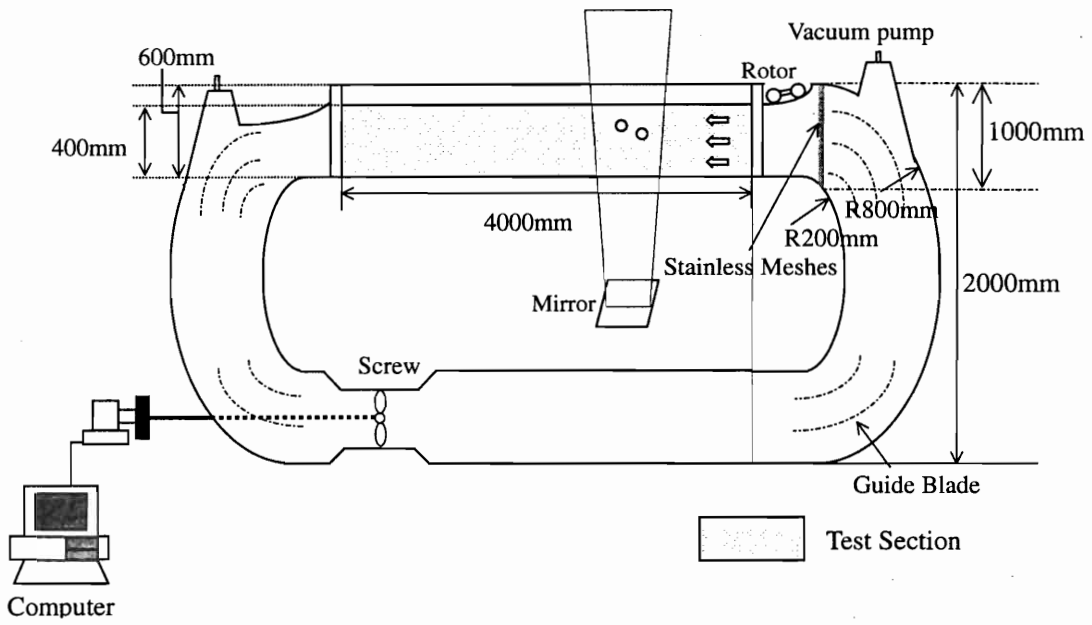


图 4: Water tank facility.

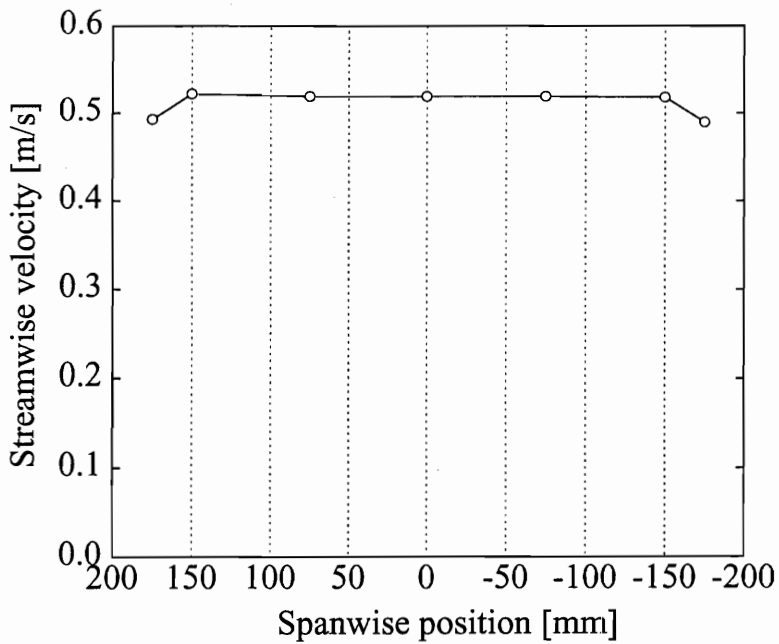


图 5: Spanwise velocity distribution in the water tank. The nominal speed is set at 0.5m/s. The model is 1340mm downstream from the test section entrance.

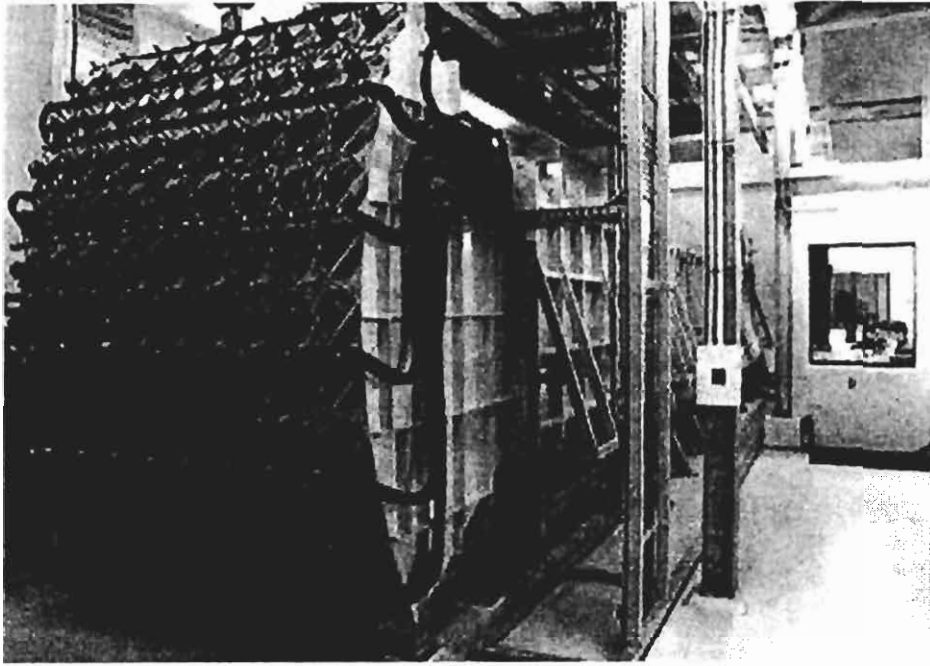
## 2.2.2 風洞

本実験に用いたマルチファン型風洞[16]は、室内開放型押込式(エッフェル型)である(図6)。この風洞は縦11個×横9個=合計99個のファンが750WのACサーボモーターに接続されており、それぞれのファンはパソコンで独立に制御可能である。それぞれのファンで駆動された気流は接続した矩形断面のダクトを通り縮流され、最終的にハニカムで整流され測定部に吐き出される。全てのファンに同一風速の定常命令を与えると風洞内に一様流が生成される。測定部は、高さ1.80m、幅2.54mである。測定部の長さは可搬胴を組み合わせでいろいろな長さが設定可能であるが最も長い15.5mとした。風洞の乱れの強さは約2.0%である。二円柱模型は、測定部入り口から10m下流地点に設置した。図7は端板を設置した状態での設定流速5.0m/sの速度分布を示す。端板を設置した状態で風洞測定部中心において主流直角水平方向にピトー管をトラバースして求めた。平均流速の非一様性は、±2.0%以下であり、一様性が良好であることを確かめた。

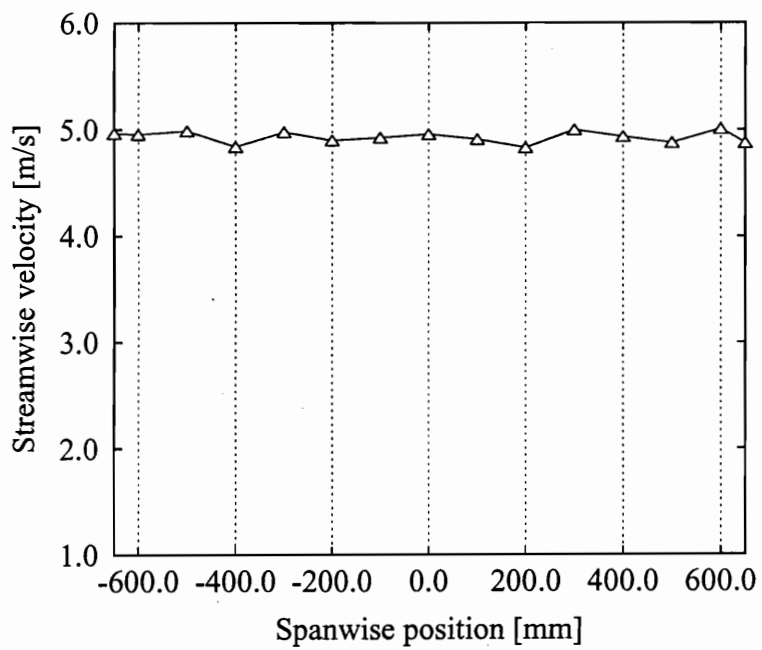
## 2.3 “仕切板のケース”と“二円柱のケース”の実験状況

本実験では二種類の流れの状況を考えた。それらの概略を図8(b),(c)に示す。両ケースの干渉要素の位置を対応させるため、ともに主円柱中心を原点とした。仕切板を干渉要素とした“仕切板のケース”では、主円柱の中心から仕切板の先端までの水平距離(ギャップ)を $G$ 、上面までの鉛直距離(レベル)を $Z$ とした。主円柱の後流の干渉要素として同直径の円柱を使用した“二円柱のケース”では、二円柱中心間の水平距離を $G$ 、鉛直距離を $Z$ とした。以下の説明の便宜のため、主円柱の上側の剥離剪断層を $T$ 、下側を $B$ 、副円柱でも同様に上側の剥離剪断層を $T'$ 、下側を $B'$ と定義した。両ケースとも同じ水槽を使って実験を行なった。

仕切板のケースでは直径 $d=25.0$  mmの透明アクリルパイプと弦長 $6d$ 、厚さ $1.5$  mm ( $0.06d$ )のアルミ製仕切板を使用した。仕切板の剛性を維持するにはこの程度の厚さが限界と思われる。流れの二次元性を確保するために、縦 $600$  mm、横 $250$  mmのアクリル製の端板で円



☒ 6: Wind tunnel facility.



☒ 7: Spanwise velocity distribution with endplates in the wind tunnel. The nominal speed is set at 5.0m/s. The model is 10 m downstream from the test section entrance.

柱を支持した。測定部の入り口から 1340 mm の位置に主円柱中心を設置した。仕切板を水平に配置させるために、端板に  $Z/d=0,0.5,0.75,1.0,1.25,1.5$  のいろいろな鉛直距離でスリットを設けた。上流角部には、有害な剥離流を避けるためにテーパをつけた。主円柱のアスペクト比は 12.0、閉塞率は 6.3 % である。平均流速  $U$  は  $U=0.5$  m/s に設定し、直径  $d$  に基づくレイノルズ数  $Re$  は  $Re=1.1 \times 10^4$  である。

二円柱のケースでは、直径  $d=15.0$  mm の透明アクリルパイプを二本使用した。副円柱を水平に配置させるために、端板に  $Z/d=0,0.5,0.75,1.0,1.25,1.5$  のいろいろな鉛直距離でスリットを設けた。仕切板のケースと同じ端板で模型を支持し、主円柱中心も仕切板のケースと同じ位置とした。アスペクト比は 23.3、単独円柱による閉塞率は 3.8 % である。平均流速  $U$  は、仕切板のケースと同じ  $U=0.5$  m/s に設定し、直径  $d$  に基づくレイノルズ数  $Re$  は  $Re=7.4 \times 10^3$  である。

レイノルズ数効果を調べるため二円柱のケースで風洞実験を追加した。広い範囲のレイノルズ数  $Re=5.0 \times 10^3 \sim 4.5 \times 10^4$  を実現するため、模型として直径 25.0 mm と 89.0 mm のアクリルパイプを各二本使用した。直径 25.0 mm の円柱ではアスペクト比は 40.0、単独円柱による閉塞率は 1.4 % である。直径 89.0 mm の円柱ではアスペクト比は 14.6、単独円柱による閉塞率は 4.4 % である。直径 25.0 mm の円柱では、流速  $U=3.3 \sim 5.8$  m/s ( $Re=5.0 \times 10^3 \sim 9.0 \times 10^3$ )、直径 89.0 mm の円柱では、流速  $U=5.0 \sim 8.0$  m/s ( $Re=2.9 \times 10^4 \sim 4.5 \times 10^4$ ) とした。円柱は風洞中心に流れに直角、床面に水平に設置した。流れの二次元性を確保するために、縦 1800 mm、横 1350 mm のベニヤ板を端板とした。このベニヤ板に円柱模型を支えるアクリル板をはめ込んだ。アクリル板には水槽での模型と同様にスリットを設置し、それに沿って副円柱をトラバースした。ベニヤ板の上流角部は、有害な剥離流を避けるためにテーパをつけた。

本研究の水槽実験と風洞実験の主な特性を表 1 にまとめた。 $H$  は水槽実験では水深、風洞実験では測定部の高さ、 $P$  は有効スパン長を示す。ここでは特に閉塞効果やアスペクト比の効果の補正は行わなかった。この程度のアスペクト比では結果に及ぼす端部の影響は少ないものと思われる [17]。閉塞率は 5.0 % 位に抑えることが望ましいとされている [18]。水

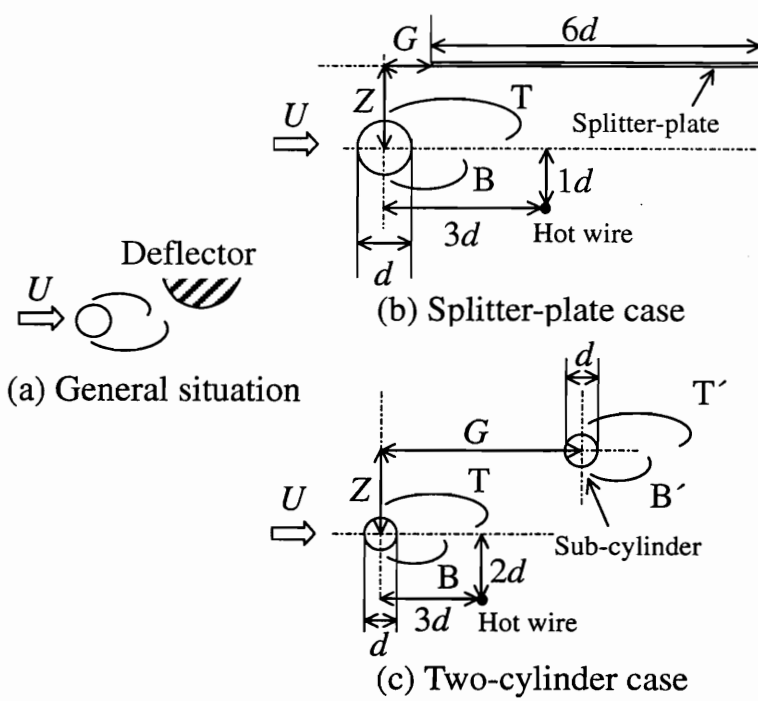
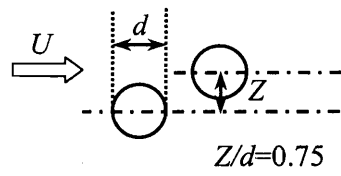
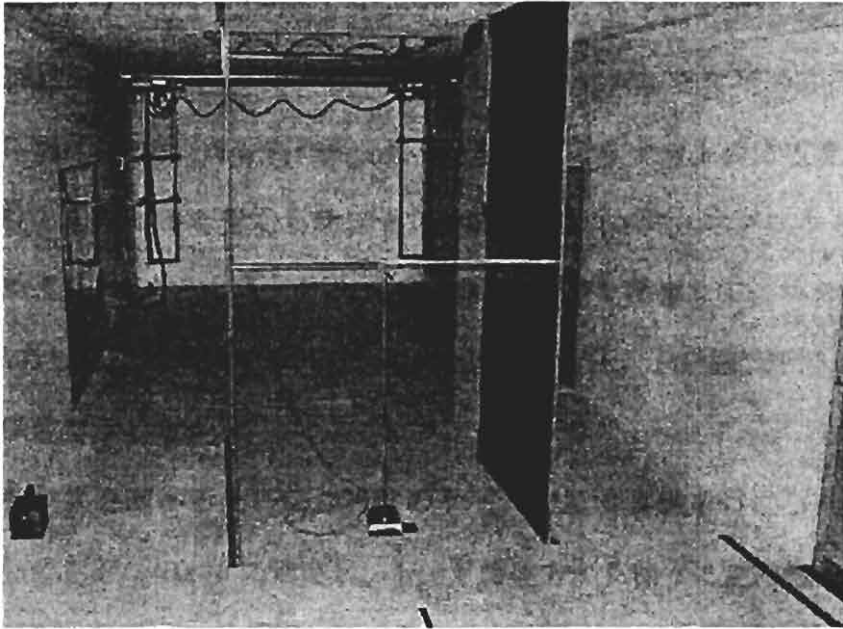


図 8: Schematic of the flow configurations.

表 1: Differences of between water tank and wind tunnel experiments.

|                      | 水槽                |                   | 風洞                         |                            |
|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
|                      | 二円柱               | 仕切板               | 二円柱                        | 二円柱                        |
| Re                   | $7.4 \times 10^3$ | $1.1 \times 10^4$ | $5.0 \sim 9.0 \times 10^3$ | $2.9 \sim 4.5 \times 10^4$ |
| 乱れ強度                 | 1.0%以下            |                   | 2.0%以下                     |                            |
| 閉塞率 $d/H \times 100$ | 3.8%              | 6.3%              | 1.4%                       | 4.4%                       |
| アスペクト比 $P/d$         | 23.3              | 12.0              | 40.0                       | 14.6                       |



☒ 9: Wind tunnel experiment situation.

槽での仕切板のケースの閉塞率は6.3%であるため、閉塞効果が懸念されるが、背圧やストローハル数などの測定結果から定性的な傾向に影響は少ないと思われる。

## 2.4 背圧の測定法

水槽で両ケースの背圧計測は、上流に主円柱を固定し、下流に干渉要素(仕切板または同直径の副円柱)を $Z/d=0,0.5,1.0$ の各レベルで、遠方から徐々に主円柱へ近づけて、背圧を測定した。主円柱の淀み点から $180^\circ$ 後方のスパン中央に背圧測定用の直径0.5mmの静圧孔を開けた。L型ピトー管(岡野製作所 LK-00)を模型より十分上流に設置し基準の静圧を設定した。円柱とL型ピトー管からチューブで微差圧計(エス・エス・ケイ, DPL6-50)に圧力を導き、動歪計(エス・エス・ケイ, M-1101)で信号を増幅して、ロガー(KEYENCE, NR-2000)に出力した。結果は $C_{pb}=2(P_b-P_\infty)/\rho U^2$ ( $P_b$ :背圧,  $P_\infty$ :基準圧,  $\rho$ :水の密度)で定義される背圧係数で示した。

レイノルズ数効果を調べるために二円柱のケースで風洞実験を行なった。この実験では、副円柱のレベル $Z$ を $Z/d=0.75$ に固定し、十分下流遠方から徐々に主円柱へ近づける時の主円柱の背圧の変化を調べた。図9に風洞での実験状況を示す。主円柱背面に真鍮管を埋め込み、0.5mmの静圧孔をスパン中央に開けた。ピトー管(岡野製作所 LK-0)を模型より十分上流に設置した。これらの圧力はシリコンチューブを経て差圧計(Kanomax 製, DM-3500)に導きロガー(KEYENCE, NR-2000)に出力した。

## 2.5 ストローハル数の測定法

両ケースで、干渉要素を遠方から徐々に主円柱へ近づけながら、主円柱後流のストローハル数 $S_t=f_v d/U$ ( $f_v$ :円柱後流渦の卓越周波数)を測定した。速度変動は熱線流速計(KANOMAX, CTA-1011)で検出した。I型熱線プローブ(KANOMAX, Model 1210-20W)は、仕切板のケースでは円柱中心から水平方向に $3d$ 、鉛直方向に $1d$ の位置に設置した(図8(b))。二円柱のケースでは主円柱中心から水平方向に $3d$ 、鉛直方向に $2d$ の位置に設置した(図8(c))。



ロガー (KEYENCE, NR-2000) でデータを収集し、パソコンでFFT解析しパワースペクトルを求め、卓越周波数を同定した。仕切板のケースでの測定点は、剪断層の少し外側と思われる位置とした。なお、主円柱からの剪断層の少し外側の数点で予備的な実験を行ない、結果に大差がないことを確かめた。

## 2.6 PIVによる流速測定

熱線流速計を用いた速度測定法では流れ場の少数点の情報しか得られない。広い範囲の領域の速度成分を同時計測するためには多数の熱線流速計、センサーなどを必要とする。さらにセンサーはモデルに近接して設置するため、その存在自体が流れ場に影響を与える恐れがある。一方、染料などによる可視化は、流れの構造を分析するための定性的手法である。したがって非侵襲的で定量的な流れ場を測定できるPIVは本論文で対象とする変位を受ける円柱後流の流れ場を正確に捉えるための手法として有効である。

### 2.6.1 実験装置と測定法

本研究のPIV(Particle Image Velocimetry)による計測では、微細なトレーサ粒子を浮遊させ、物体周りの流れ場のある断面をシート状の照明を用いて瞬間的に照射する。これらのトレーサ粒子の散乱光をCCDカメラで撮影し、二画像の粒子の輝度値パターンから相関関数を用いて移動先を算出した。二枚の粒子画像はフレームストラドリングの手法により微小時間間隔で得られた。フレームストラドリングについては後述する。二枚の粒子画像から求められる流れ場の速度  $(u, v)$  は、パルス間隔  $\Delta t$  と実像と画面上のスケール単位を変換させるための画像変換係数  $\alpha$  [pixel/mm] を用いて (1) 式より求められる。

$$(u, v) = \alpha \left( \frac{\Delta x}{\Delta t}, \frac{\Delta y}{\Delta t} \right) \quad (1)$$

本研究ではTSI社製PIVシステムで、二次元のPIV計測を行なった。システムの概要を図10に示す。背圧測定から得られた各  $Z/d$  の臨界ギャップ前後において、計測を行なっ

た. 対象とする流れ場は図 8(b), (c) である. 背圧, ストローハル数の測定と同じ模型を使用し, 主円柱も同じ位置に設置した. シート光は円柱と直角に照射させ, 主円柱後流がシート光の範囲に入るように機器の配置を調節をした. 平均流速は背圧, ストローハル数の計測と同じ  $U=0.5\text{m/s}$  とし, 仕切板のケースのレイノルズ数は  $Re=7.4\times 10^3$ , 二円柱のケースでは  $Re=1.1\times 10^4$  ある. 撮影は, デジタルクロスコリレーション CCD カメラ (630046 PIVCAM10-30) で行ない, Nd:YAG レーザ (MiniYAG, 最大  $50\text{mJ/pulse}$ ) でシート光を照射し, シンクロナイザー (610034) とフレームグラブ (600067 High Speed Digital) によって, パソコンにデータを取り込んだ. (1) 式で定義された画像変換定数  $\alpha=0.134\text{ [mm/pixel]}$  とした. カメラの解像度は,  $1008\times 1018$  ピクセル (即ち視野範囲は約  $135.1\text{ mm}\times$  約  $136.4\text{ mm}$ ) であった. 検査領域は  $32\text{ pixel}\times 32\text{ pixel}$  (即ち分解能は  $4.3\text{ mm}\times 4.3\text{ mm}$ ), パルス間隔は  $500\mu\text{s}$  とし, 相互相関アルゴリズムで流速場を求めた. 検査領域については後で詳述する. 単独円柱の渦放出周期は  $d=15\text{ mm}$  の時  $0.16\text{ sec}$ ,  $d=25\text{ mm}$  の時  $0.26\text{ sec}$  であり, これらに比べて  $\Delta t$  は小さい. 後処理は Tecplot (Amtec 社製) で行なった. ベクトル取得周波数は  $15\text{Hz}$  (時間間隔  $\delta t=1/15\text{ sec}=0.067\text{ sec}$ ) とした. 単独円柱の渦放出周波数は,  $d=15\text{ mm}$  の時には  $6.25\text{ Hz}$ ,  $d=25\text{ mm}$  の時には  $3.85\text{ Hz}$  でありこれらに比べてベクトル取得周波数は十分大きくなっている. 平均流線は 450 コマ (約 30 秒間) の一連の速度場を平均して求めており,  $d=15\text{ mm}$  の時は約 188 周期分,  $d=25\text{ mm}$  は約 116 周期分となり, 平均場を求めるのに十分と考えられる.

## 2.6.2 FFT 相互相関法

図 11 は本実験で用いた FFT 相互相関法の例を示す. ある時刻  $t$  (第一画像) での粒子画像を図 11(a) に示し,  $t+\Delta t$  (第二画像) を図 11(b) に示す. 検査領域内の輝度値パターンが検査領域内に周期的に繰り返されていることを仮定し, 移動位置を求めるのに輝度関数の相関を求めてピークを検出しベクトルを得る. 相互相関値の算出には, 直接相互相関係数を計算するよりも, クロススペクトルから逆フーリエ変換を行ない相関を求めるやり方が効率がよいことから, FFT 相互相関法を用いた. (2) 式は各画素の離散的な輝度関数を求めて

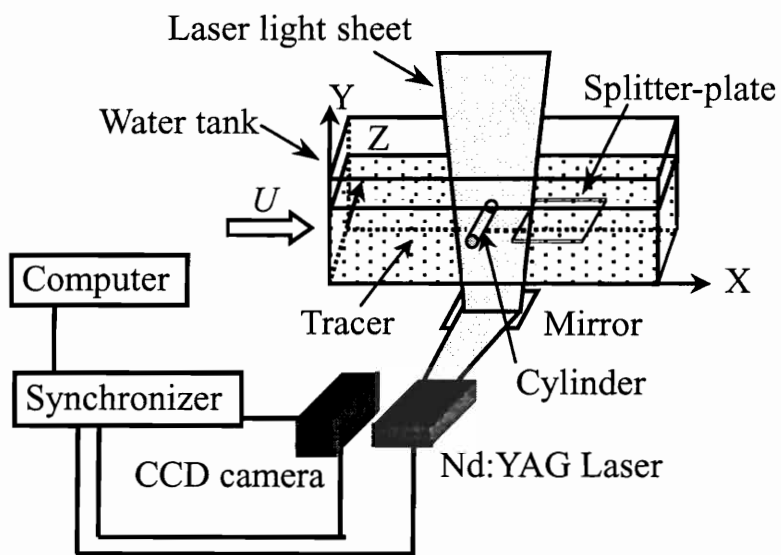


图 10: PIV system.

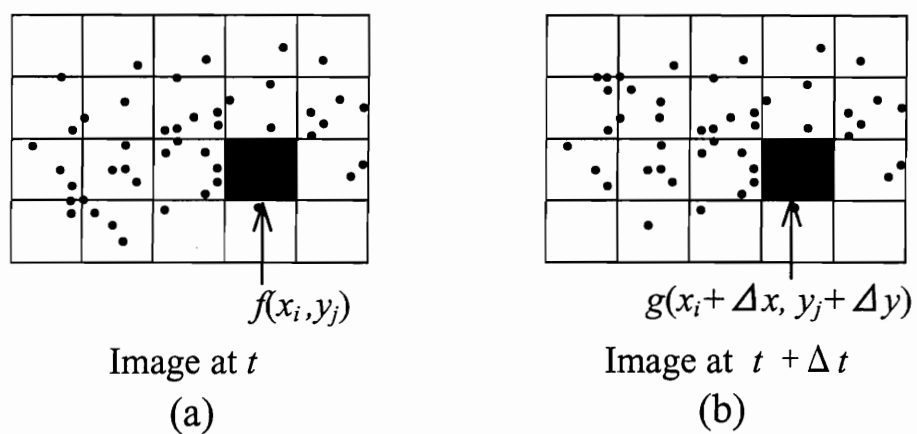


图 11: Example for FFT cross correlation method.

いる。(2)式により連続な輝度値パターンである輝度関数  $f^*(x, y)$  を離散化された輝度関数に変換する。離散化された輝度関数  $f(i, j)$  は連続な輝度関数の画素内の空間平均から得られる。これによってアナログ情報であった粒子画像がデジタル化される。

$$f(i, j) = \frac{1}{\Delta x \Delta y} \int_{i\Delta x}^{(i+1)\Delta x} \int_{j\Delta y}^{(j+1)\Delta y} f^*(x, y) dx dy \quad (2)$$

$(\Delta x, \Delta y)$  は画素の大きさを表わす。図 11(a) の検査領域  $N[\text{pixel}] \times N[\text{pixel}]$  の輝度関数を  $f(x_i, y_j)$  とし、同様に図 11(b) の粒子画像内の検査領域  $N[\text{pixel}] \times N[\text{pixel}]$  の輝度関数  $g(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y)$  とする。FFT 相互相関法では図 11(b) に図 11(a) の検査領域と同じ大きさの候補領域を同じ位置に設定する。(3)式で相互相関関数を計算する。

$$R_{fg}(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{f(x_i, y_j) - f_m\} \{g(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y) - g_m\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{f(x_i, y_j) - f_m\}^2 \{g(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y) - g_m\}^2}} \quad (3)$$

上式の計算により相互相関分布を求めてピークを検出することで、 $\Delta t$  で移動した輝度値パターンの移動量ベクトルを求めた。輝度値パターンが検査領域内で周期的に繰り返されていることを仮定して FFT 処理される。

### 2.6.3 パラメータの設定法

#### 1) 検査領域サイズと画像移動量

測定精度に影響を与えるパラメータには検査領域サイズ、粒子数密度、画像平均移動量などがあるが解析アルゴリズム上のパラメータは検査領域サイズだけである。検査領域サイズの設定方針は次のとおりである。検査領域サイズが  $N[\text{pixel}] \times N[\text{pixel}]$  のとき、理論的にはサンプリング定理から、 $N/2[\text{pixel}]$  未満の移動量が測定可能であるが、大きくとりすぎると輝度値パターンの並進運動以外に回転・せん断の影響が顕著となるため、できるだけ小さい検査領域サイズを設定する。現実には FFT アルゴリズムの関係から  $N=2^n$  と設

定する．今回の実験では  $N=32$  [pixel] を採用した．画像上の格子間隔は検査領域の半分の 16 [pixel] で設定され，主流方向に検査領域を 50 %オーバーラップさせて計算した．

画像移動量については，離散フーリエ変換のもつ原信号の周期性の過程が実際の可視化画像に当てはまらず，誤ベクトル発生の原因となることが多い．移動量を測定限界に近づけるとサンプリング数を増やすことになるので，速度の分解能が高まり，低速域の速度が細かく表現できるが，高速域で誤ベクトル(エイリアシング)が発生しやすい．そのため，実際には画像上の平均移動量は 2~3 [pixel/frame] 程度に設定される．我々の実験では，これを参考に平均移動量は  $U[\text{m/s}] \times \Delta t = 0.5 \times 500[\mu\text{s}] = 1.5$  [pixel/frame] として測定を行なった．また相関値のピーク検索の精度を上げるため，ピーク値を中心とする三つの相関値にガウス分布をあてはめ，0.1[pixel] のオーダーまで移動量を検出するサブピクセル解析[19]を用いている．

## 2) フレームレート

本研究で用いた PIV システムのタイミングチャートを図 12 に示す．プログレッシブスキャン方式カメラ (CCD 素子の奇数番目と偶数番目を一度に読み出すので，動きのある被写体でもブレがなくなる) を用いた．図 12 のカメラの露光時間をフレームと呼ぶ，一回目のフレームの終了と二回目のフレームの開始付近でレーザーパルスをそれぞれ照射することにより微小時間で二枚の画像が記録できる．この方法をフレームストラドリングと呼ぶ．ここではパルス間隔  $\Delta t$  は全て  $500 \mu\text{s}$  に設定した．フレームレートは 1 秒間にカメラが撮影するフレーム数のことである．また 2 枚の画像から一つのベクトルが得られるので，ベクトル取得周波数はビデオカメラのフレームレートの半分になる．本実験で用いたビデオカメラのベクトル取得周波数は 15 Hz である．ビデオカメラとレーザーの周期はシンクロナイザーを使用した．

## 3) シーディング

PIV は，流れにトレーサー粒子を適当な空間密度で散布 (シーディング) させて，この画像を記録・処理し，速度場を復元する計測方法であるので，PIV における速度場計測の成否は良好な PIV 画像の取得にかかっており，トレーサー粒子の選択やシーディングは重要な

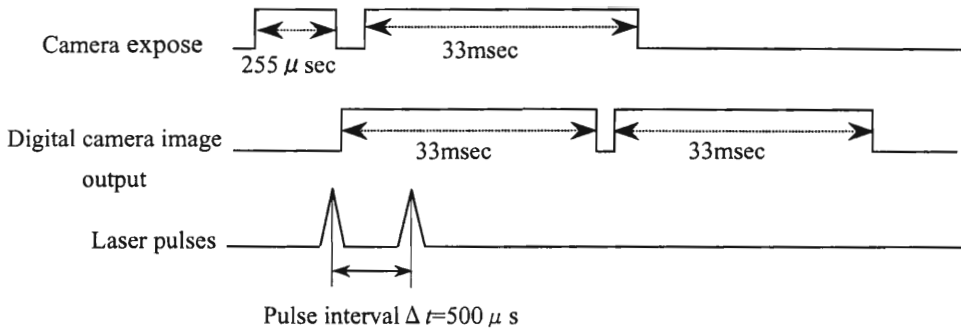


図 12: PIV system timing chart.

要素である。本実験では、一般に散乱特性が良いといわれているナイロンパウダーのオルガソールパウダー(ナイロン 12, 不定形)を使用して実験を行なった。粒子径は  $48 \sim 52 \mu\text{m}$ , 密度は  $1020 \sim 1030 \text{ kg/m}^3$  である。粒子はいったん、容器内で少量のエタノールを加えた水溶液中で希釈して、流れ場にシーディングした。実際には粒子が検索領域内に 5 個以上入るように、画像で確認しながら粒子密度(流体単位体積当り粒子数)の調整を行なった。シーディングはできるだけ均一に行なった。

#### 4) 誤ベクトル処理

二枚の粒子画像から求めたベクトルの中には、非常に大きな誤差を含むベクトルが発生する。これを誤ベクトルという。本研究では、まず明らかに大きい  $u \leq \pm 1.0 \text{ m/s}$ ,  $v \leq \pm 1.0 \text{ m/s}$  の範囲のベクトルを除去した。次に除去されたベクトルを補充するため平滑化フィルタを用いた。

平滑化フィルタは以下のように適用した。粒子画像を  $3 \times 3$  のベクトルノードで区切り、 $3 \times 3$  のベクトルノードの中央のベクトルからの距離に基づき (4) 式で各ベクトルの重み付けを決める。

$$l(k) = e^{k/m} \quad (4)$$

このとき  $m$  はガウス半径,  $k$  は中央のベクトルからの距離,  $l$  は重みを示す.

$$k = \sqrt{(i - i_c)^2 + (j - j_c)^2} \quad (5)$$

(ここで,  $i$ ; ベクトルの  $x$  座標,  $j$ ; ベクトルの  $y$  座標,  $i_c$ ; 中央のベクトル  $x$  座標,  $j_c$ ; 中央のベクトル  $y$  座標)

(4) 式により重みを決定し, 各ノードのベクトル  $u_{i,j}$  を (6) 式で求めた.

$$u_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^n l(k)u_k}{\sum_{k=1}^n l(k)} \quad (6)$$

## 2.7 むすび

本章では, 実験で使用した水槽と風洞装置を説明し, 仕切板のケースと二円柱のケースの実験状況を述べた. 水槽実験における両ケースの主円柱後流の背圧とストローハル数の計測方法を述べた. レイノルズ数効果を調べるため, 風洞における二円柱のケースでの背圧の計測方法を述べた.

本研究で用いた PIV の計測方法について述べた. PIV と従来の流速測定法を比較し流速場計測に PIV を採用した理由を述べた. 二枚の粒子画像からベクトルを取得する際の相互相関法を説明した. 良好な粒子画像を得ることで, ベクトルの発生を抑えるため, 諸パラメータの設定を検討した. 最後に平滑化による誤ベクトルの処理方法を述べた.