

縦列円柱周辺の組織渦構造に関する可視化計測

愛媛大学大学院 学生員 ○新家研蔵
(株)ジェイブレイン 非会員 大西邦彦
愛媛大学大学院 正会員 門田章宏
愛媛大学大学院 フェロー 鈴木幸一

1. はじめに

物体後流は、水流の流れだけではなく、多くの流体に関連する状況において観察される現象であり、様々な問題を抱えている。特に単体円柱後流に関しては、Karman 渦の特徴的な組織渦構造を伴う現象やこれに伴う物質輸送に注目して盛んに研究が行われてきた。しかし、後流が発生する状況において、縦列・複列の場合があるにもかかわらず、国内でのこれに関する研究は僅かである。本研究では縦列した二円柱周りの流れを粒子画像流速測定法の一つである PTV 法(Particle Tracking Velocimetry)を用いて、水平断面内の瞬間流速を測定し、縦列二円柱周りに発生する組織渦構造について解析・考察を行うことを目的とする。

2. 実験方法および解析方法

本実験で使用した装置(図-1)は、直線循環式水路(長さ 3m, 幅 14cm, 高さ 20cm), メタルハライド光源, 二台の高速 CCD カメラ(IMPERX IPX-VGA210-LM), 画像取得, 解析用 PC および画像キャプチャーボードから構成されている。本実験では高速 CCD カメラを二台使用し、撮影した画像をそれぞれ合成することで、画像解像度を高く保ったまま広域でかつ詳細な撮影を可能にした。また、本研究では PIV 解析でよく用いられる高速計算の可能な FFT 相互相関法と高精度な直接相互相関法をうまく組み合わせることで、PTV 解析コードを開発し、本研究の縦列円柱周辺の流れ

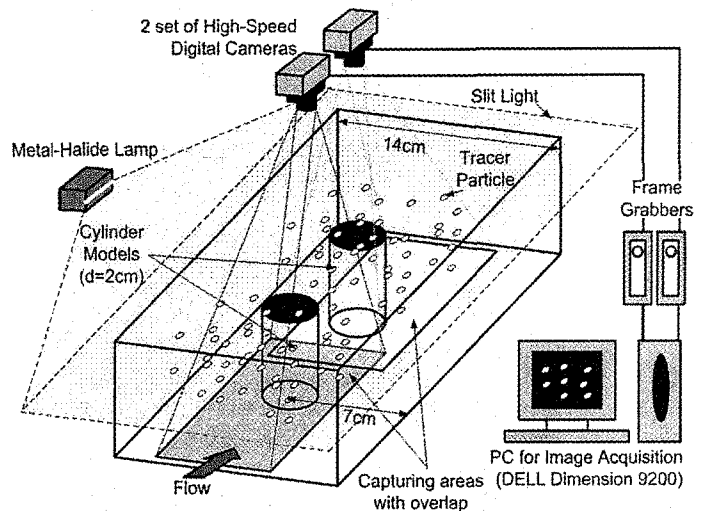


図-1 可視化画像撮影システム

の可視化画像に適用した。実験条件については、流量 $1,000\text{cm}^3/\text{sec}$ の下、スリット光の高さを水路底面から 3cm の高さで設定し、この平面内における上流側円柱から発生する後流やその他の組織渦構造を撮影・観察した。また、縦列円柱の組織渦構造に及ぼす影響を考察するため、一本の可視化実験結果との比較を行った。また、客観的に乱流の組織構造を抽出するための方法として用いられている正規直交分解法(POD 法)を適用した。POD 法は、非一様せん断流の研究のため提案され、ランダムな乱流場から最大のエネルギーを持つ変動場を抽出し、組織的な構造を見いだす手法である。POD 法では以下のようにある基底(固有)関数 $\phi(x)$ を瞬間変動流速 u と ϕ の内積を最大化するように設定する。

$$|u \cdot \phi| = \lambda_u \quad (1)$$

u に関する固有値 λ_u の最大化は以下の第一種の Fredholm 型の積分式を導くことになる。

$$\int R_{uu}(x, x') \phi_u^{(n)}(x') dx' = \lambda_u^{(n)} \phi_u^{(n)}(x) \quad (2)$$

ここで R_{uu} は二点間 (x, x') の速度相関である。上式は離散化され相関行列の固有値問題に帰着される。ある振幅に対応した固有関数(モード n)を解き、最大(あるいは第二, 第三)のエネルギーを持つ流れ場を抽出できる。また、上述の POD 解析によって抽出された乱れ変動の組織渦構造の移流過程を観察するため、以下に示す条件付きサンプリング手法を適用した。この手法は、ある固定点の流速の値が渦のある条件を満たした場合や

変動が特有のパターンにあてはまったときの、ある遅れ距離や遅れ時間を持った現象のみを抽出し、集合平均化する方法であり、ある瞬間で特有の現象を捉えようとする手法である。条件付きサンプリング手法は、一般に次式で定義される。

$$\langle q(x, z, \Delta x, \Delta z, t, \tau) \rangle = \frac{\int q(x + \Delta x, z + \Delta z, t, \tau) \cdot I(x, z, t) dt}{\int I(x, z, t) dt} \quad (3)$$

ここで、 q は流速などの任意の乱流変動量を一般に示し、 $\langle \rangle$ は抽出後集合平均化された量を表わす。また、 x および z は、それぞれ固定点の流れ方向、横断方向位置であり、 τ は遅れ時間、 Δx および Δz は固定点からの移動点の遅れ距離を示している。さらに、 $I(x, z, t)$ は対象とする乱流現象を抽出する判別関数であり、各々の現象に応じて的確に定義されなければならない。判別関数は、POD の特徴的なパターンを示す点を固定点として、この変動パターンから以下のように定義する。

$$I(x, z, t) = \begin{cases} 1: u < 0, w > 0 \text{ \& } |uw/u'w'| \geq H \\ 0: otherwise \end{cases} \quad (4)$$

ここで u および w は乱れ変動の主流・横断方向成分、 u' および w' は乱れ強度である。 H はしきい値であり、固定点におけるスペクトル解析によって求められた周波数が式(4)の条件にあてはまる変動ベクトルの数と合致するように定義される。

3. 解析結果および考察

図-2 は POD 解析によって得られた特徴的な乱れ変動パターンと条件付サンプリング手法で得られた POD パターンの移流過程を示している。縦列・単一円柱それぞれにおいて円柱両側面からの二つの剥離流れによって後流部の乱れの発達移流過程が異なっている。単一円柱の場合では主流方向ばかりでなく横断方向に移流することがわかり、縦列円柱模型の場合は主流方向の移流れが卓越していることが明らかとなった。この様に、本解析によって後流部での特徴的な組織渦の移流過程をとらえることに成功した。

以上の縦列円柱周辺における組織的構造に関する結果は、橋脚などの構造物周辺に及ぼす瞬間的な流れの影響、特に瞬間的・局所的に発生する物質輸送などの問題の解決に今後寄与するものと考えられる。

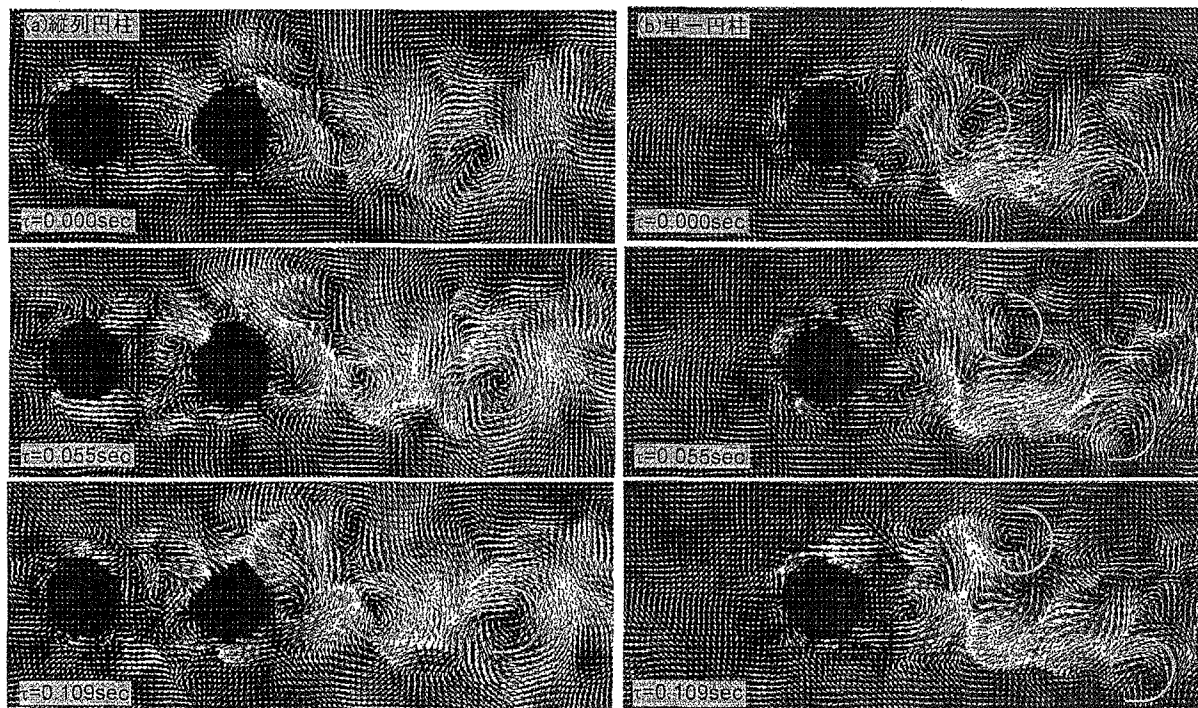


図-2 POD 解析によって抽出された組織的乱れ変動パターンとその移流過程