

縦列円柱周辺部における流れの可視化実験と組織的乱れ構造の移流過程

Visualization of flow pattern around two-in-tandem cylinders and advection of coherent turbulence-structures

門田章宏*・ヒカルド デ アラガオン**・鈴木幸一***

Akihiro Kadota, Aragão Ricardo de and Koichi Suzuki

*博(工) 愛媛大学講師, 理工学研究科生産環境工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3)

** Dr. Eng. セルジー・ピ州立大学助手 土木工学科 (49100-000, São Cristóvão, Sergipe, Brazil)

***工博 愛媛大学教授, 理工学研究科生産環境工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3)

Two-in-tandem circular cylinders are an important combination, which is widely encountered in several areas such as flow around bridge piers and vegetated open channel flow. One of typical Japan-river characteristics is the sudden change of discharge due to big amount of rainfalls so that the bridge piers are affected by surrounding instantaneous flows such as separated and wake flows which lead to the serious scouring problem. In order to reveal such kind of flow effects, flow visualization around two-in-tandem cylinders is conducted under non-submerged condition in the present study by means of particle tracking velocimetry (PTV), which is developed to estimate more accurate velocity under conditions of large-velocity difference. In addition, the POD analysis of typical fluctuating pattern, spectral analysis and conditional sampling analysis are applied to reveal the coherent structures.

Key Words: Two-in-tandem cylinders, Particle Tracking Velocimetry (PTV),

Proper Orthogonal Decomposition (POD), Conditional Sampling Analysis

キーワード: 縦列円柱, PTV 法, 正規直交分解法, 条件付きサンプリング手法

1. はじめに

後流(wake)とは、流れの中に置かれた物体、あるいは静止流体中で移動する物体の後方に発生する現象である。このような物体後流は、多くの自然界または工業的分野において、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。このため、単体円柱背後に発生する後流の研究は、これまで可視化実験による二次元・三次元的構造や数値計算によって三次元渦構造の解明まで行われている。しかし、後流が発生する状況において、多くの自然界等では縦列・複列の場合があるにもかかわらず、実験手法の困難さゆえにこの様な流れや組織的構造に着目した研究は、近年の流れの可視化技術の発展に伴い始まったばかりである。

縦列に並んだ二つの円柱周辺の流れは、単体円柱周辺の流れと比較して非常に複雑な流れを呈する。特に、上流側円柱から発生する後流(wake)が、円柱間および下流側円柱背後の定常あるいは非定常渦形成・発達への大きな役割を果たすと考えられる。また、この渦構造は縦列した二つの円柱の間隔にも影響される。この点に着目した従来の研究として、縦列配置した円柱周辺の流れの形態に関する分類が、Igarashi (1981, 1984)^{1,2)} や Zdravkovich (1982)³⁾ によって行われている。基本的には、ある一つのしきい値 L/D (L :

二つの円柱の中心点間隔、 D :円柱径)以上の領域では、二つの円柱どちらからも渦列が形成されるものの、そのしきい値以下では二つの円柱間には渦列が発生しないこと、またしきい値 L/D は Reynolds 数の関数でもあることが分かった。さらに、二つの円柱間と円柱極近傍の後流領域の定量的な流れの計測および可視化が Ishigai ら(1972)⁴⁾、Ljungkrona ら (1991)⁵⁾、Ljungkrona & Sundén (1993)⁶⁾、Wu ら (1994)⁷⁾ によって行われている。Ljungkrona ら(1991)は、Reynolds 数の影響が明らかであることを示し、さらに境界層付近における乱れについて検討し、円柱間の間隔距離が減少するとともに乱れ強度が増加することを示唆した。Ishigai ら(1972)は、円柱間と後流域の流れのパターンの写真映像から、その変化の様子を観察している。また、Wu ら(1994)は水素気泡法による準二次元的でかつ横断方向の流れの画像を示すと同時に、ホットフィルム流速計による横断方向の組織構造を円柱間隔を変えて明らかにした。さらに、Igarashi (1981, 1984)は、円柱間隔と広範囲に変化させた Reynolds 数との関係から、上述したしきい値に関する検討に加えて様々な流れの形態を定義した。ここでは、不安定と双安定な状態やそれらの境界付近の状態が、縦列円柱の配置によって複雑な現象が発生することを示した。この他、流れに対して傾斜配置など様々な状況における配置のデザインに関するガイドラインを提示し



写真-1 Eidersperrwerk (洪水防止設備)

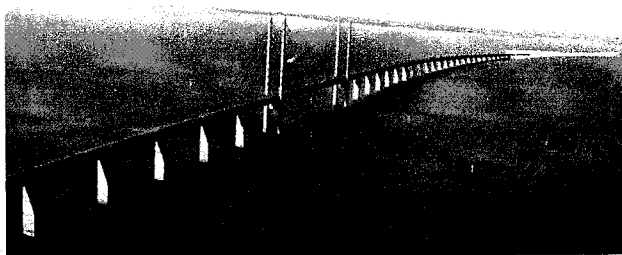


写真-2 Öresund Bridge (鉄道橋)

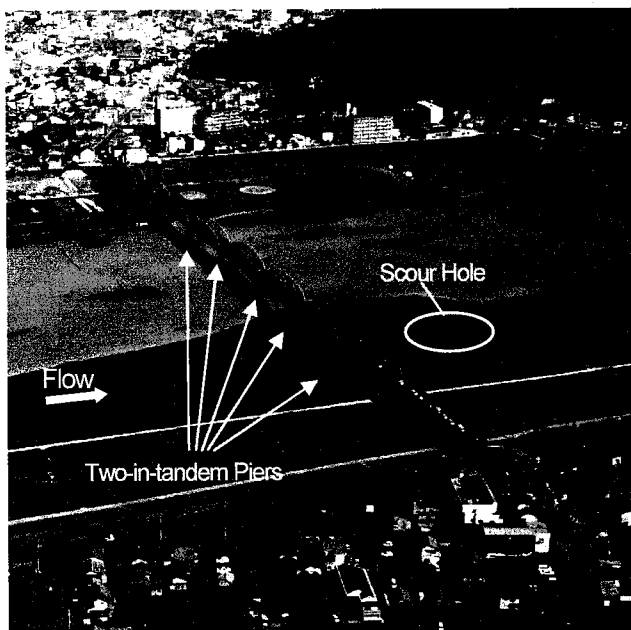


写真-3 四万十川橋(通称赤鉄橋)

た研究や staggered 状に配置された二つの円柱周辺に発生する流れのパターンを可視化法で計測し、せん断層を伴う再付着や剥離、渦の連結やシンクロナイズの様子、渦の影響などを観察した研究が存在する。

上述した研究は様々な状況下での縦列円柱システム周辺の流れの重要な知見を与えている。しかし、これらの円柱システム周辺の瞬間的かつ組織的構造の詳細で定量的な評価という観点からの理解は非常に乏しいといえる。特に、剥離せん断流れによって形成される Kelvin-Helmholtz 型の不安定性が現れる円柱システム周辺の流れでは、その不安定性によって円柱間や円柱システムの後流部での組織渦構造を変化させる。単一円柱については Chyu & Rockwell (1996)⁸⁾によって、この様な不安定性による影響が明らかにされている。その影響に加えて、二つの縦列円柱間の流れにおいては、瞬間流的かつ平均流的な流れに非対称な構造が出現する可能性があり、その構造が下流側円柱の後流に影響を及ぼすと考えられる。また、二つの円柱間の距離による影響が、二円柱周りの全ての流れ構造を決定すると考えられる。

以上の様な背景により、本研究では構造物が河川などの流れに置かれた状況において、組織的かつ瞬間的な流れの局所的な場に及ぼす影響がむしろ重要であるという観点から、縦列円柱周辺の瞬間的に発生する組織的流れの構造に着目する。ここでは、本研究グループで従来開発してきた広範囲で速度差のある瞬間流速ベクトルを評価でき



写真-4 出水時の縦列橋脚周辺

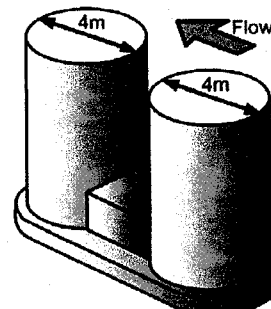


図-1 縦列円柱橋脚

る PTV(Particle Tracking Velocimetry)法と高速カメラからなる可視化画像撮影システムを設置することで瞬間流速を計測・評価する。ここでは、2台の高速カメラを同時使用することで、新たに縦列円柱間とその下流部の後流域を含めた広域場の高精度撮影を試みた。その後、客観的に乱流の組織構造を抽出できる方法として正規直交分解法の POD (Proper Orthogonal Decomposition)解析と条件付きサンプリング手法(Conditional Sampling Technique, 以下 CST 法)を採用し縦列円柱周辺に瞬間的に起きる乱れ変動のパターンの中で最も高いエネルギーもつ組織的構造を抽出し、その移流過程の解明を試みた。

2. 実験方法および条件

縦列・横列あるいは複列に並んだ円柱群は、自然界や工業分野等の様々な状況において存在する。河川・海岸構造物に着目すると、ドイツ北海沿岸にある洪水防止設備 (Eidersperrwerk, 写真-1)やスウェーデンとデンマークを結ぶ鉄道橋(Öresund Bridge, 写真-2)等が存在する。特に、前者では、出水時にゲートを開放することで構造物背後に特徴的な組織渦が発生していることが分かる。また、日本の河川においても、橋梁にかかる道路の幅を確保するために橋脚が縦列配置されている状況がいくつか存在する。特に高知県中村市にある四万十川橋(河口から 9.5km, 通称：赤鉄橋)の橋脚は縦列配置された円柱群から成っており(写真-3)、大出水によって周辺の流れが急激に変化し、局所洗掘現象に影響を及ぼしている(写真-4)。また、図-1に示すように四万十川橋の橋脚の形状は、楕円形のベース上に2本の円柱形橋脚(径 4m)とその間にコンクリートブロックが挟む構造になっている。本研究では、この様な縦列配置された円柱(縦列円柱)周辺の瞬間的で組織的な流れを解明するため、以下に示す可視化実験・解析を行った。

本実験で使用した可視化実験装置は、アクリル製の直線

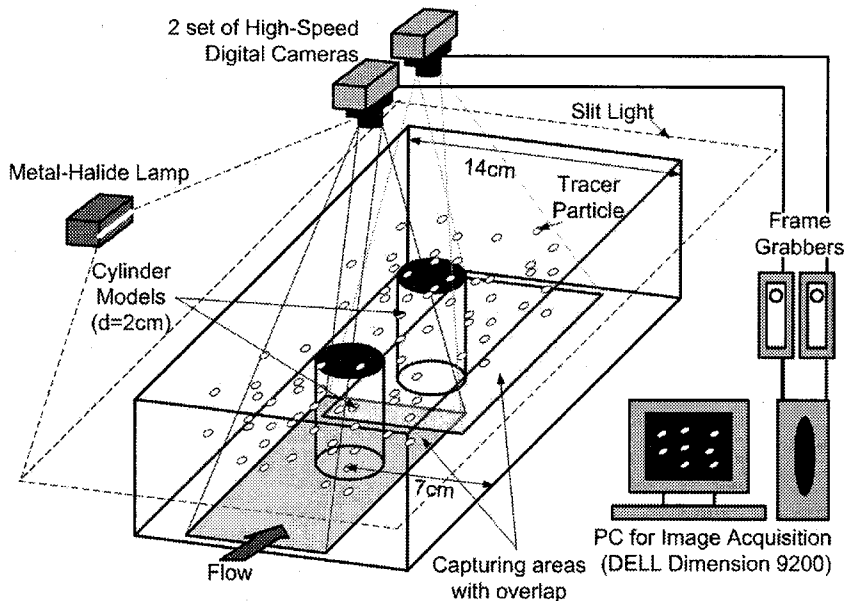


図-2 2台の高速カメラによる可視化画像撮影システム

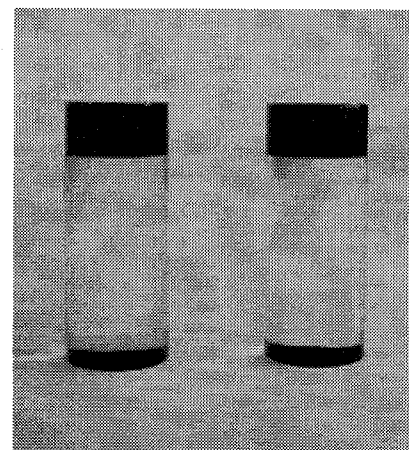


写真-5 透明アクリルと遮光部を組み合わせた縦列円柱模型

開水路(長さ 3m, 幅 14cm, 高さ 20cm), 2 台の高速 CCD カメラ(IMPERX IPX-VGA120-LM), 画像取得および解析用 PC(DELL Dimension 9200), 画像キャプチャーボードから構成されている(図-2)。この直線開水路は, ポンプ(最大流量約 3000cm³/sec), 流量制御コントローラ(TOSHIBA, VF-S9)を用いた循環式水路となっている。撮影時に用いた光源はメタルハライドファイバー照明装置(MORITEX MME-250)であり, 1mm のスリットを通して平面光を発生させた。散乱トレーサー粒子には DIAION(三菱化学, 径 250-600μm, 密度 1.02g/cm³)を用い, 粒子どうしの吸着を防ぐために界面活性剤(メタノール)を加えて使用した。縦列円柱模型については, 円柱背後にもスリット光が透るように写真-5 に示すような透明アクリル製の円柱を作成した。円柱模型のサイズは, 図-1 に示した二つの円柱橋脚の径と間隔を参考に 1/200 スケールの 2cm とし, 図-2 に示すように水路中心線上に配置した。実験条件については, 四万十川橋周辺全域が浸水するとされる水深が 8m, 流量 5000m³/sec 程度(Re 数 2×10^6)であり, 可視化実験の制約上 Fr 数(約 0.28)のみを一致させ, 模型実験における水深を $h=4$ cm, 流量については $Q=1000$ cm³/sec(Re 数 7140)とした。一方, 円柱間および背後に発達する後流の移流過程を見る上で, 図-3 に示すように 1 台のカメラのサイズを 480×520pixel とし二つのカメラからの画像をオーバーラップさせ同期させることで, より広域な領域をカメラの精度の劣化をなくすように同時撮影を行った。

上述の実験方法は, 上流側の円柱を取り除いた単一円柱のみの実験も同様に行い, 単一・縦列円柱周辺の組織渦構造等の比較を行うことで, 縦列円柱配置による流れに及ぼす影響を明らかにした。

3. 解析方法

様々な粒子画像流速測定法の中でも, 3 次元ヴォリューム内の 3 成分流速ベクトルへの応用が期待できるとして

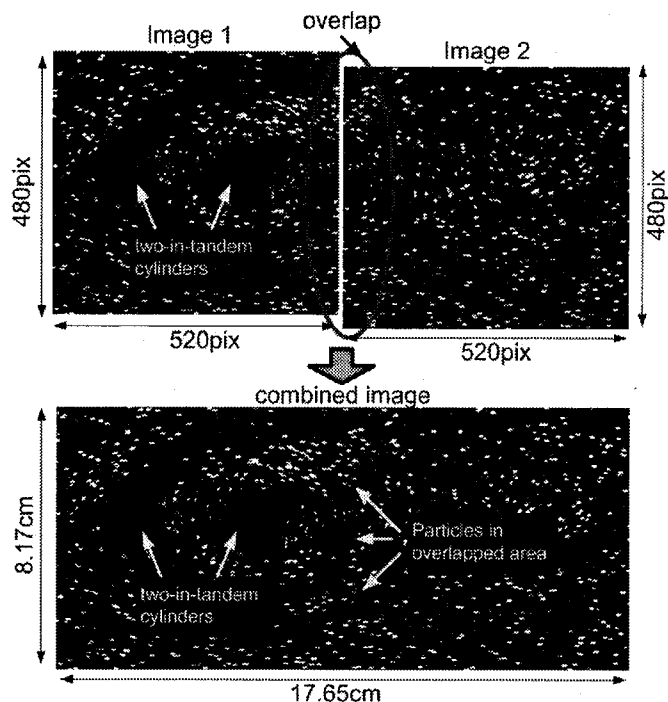


図-3 2台のカメラからの画像をオーバーラップさせた様子

最近注目されている手法が, 個々の粒子あるいは周囲粒子の組み合わせを追跡し流速ベクトルを評価する PTV 法である。また, PTV 法は水制周辺の流れのように主流・死水領域間の流速差の大きな流れ場にも適用できる。本解析では, 従来から PTV 法で用いられている FFT 相互相関法と直接相互相関法のそれぞれの利点を組み合わせ, それぞれの欠点を補う手法を考え開発した。具体的には, FFT 相互相関法のみを用いた場合, 高速な計算は可能であるが, 相関領域が 4 の倍数(16, 32 ピクセルなど)に限られ, 領域の 1/4 を超える移動が生じた場合は誤ベクトルの確率が高くなる。また, 直接相互相関法を用いた場合は, 精度は良いものの探索領域サイズを決定するのに不確実性があることと長時間の計算が必要となる。そこで本解析では, 図-4 に示すようにまず FFT 相互相関法によって精度のやや低い仮ベクトルを評価し, このベクトルの先端を中心に上下左右

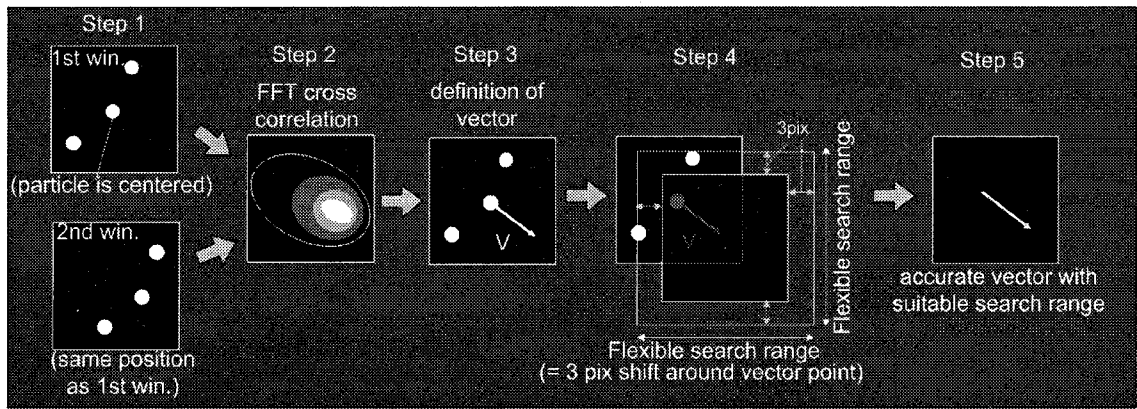


図-4 FFT法と直接相互相関法を組み合わせたPTV解析アルゴリズム

3 ピクセルだけシフトさせた(個々のベクトルに対して上下7回×左右7回=49回のみの計算で済む)探索領域を新たに設定し直接相互相関法に適用する手法を考えた。この手法によって、広範囲の個々のベクトルに対して精度を保ちつつ高速計算を可能にする。この他、サブピクセル解析、画像処理として解析前に全画像の平均画像を個々の時系列画像から引くことにより背景・ノイズ除去を行った。

次に、本研究で開発したPTV法によって得られた瞬間流速ベクトルを、画像中にある粒子の数とほぼ同じになるように等間隔メッシュ上に補間し、この補間データを用いて平均流速やその他の乱れ変動量に関する平均流統計解析を行った。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)をこの補間した瞬間変動流速データに適用した。POD法は、非一様せん断流の研究のためLumley(1967)⁹⁾によって提案され、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。具体的な解析手順およびその他の抽出・分解法の比較についてはKevlahanら(1994)¹⁰⁾によって述べられているが、概して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¹⁰⁾。

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

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¹⁰⁾。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。

さらに、POD解析によって抽出された組織的な乱れ変動パターンの移流過程を観察する手法として、以下の条件付きサンプリング手法(CST法)を採用した。一般的にCST法では、抽出される任意の変動量を $\langle q(x, z, \Delta x, \Delta z, t, \tau) \rangle$ として、以下のように定義される。

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

ここでは、任意変動量 q を乱れ変動量(瞬間流速の平均流速からの差)の主流および横断方向成分(u, w)に適用する。上式(3)における x および z は、それぞれ特徴のある変動パターンを示す点(固定点として定義)における主流方向および横断方向の位置である。また、 Δx および Δz は固定点から離れた移動点までの距離、 τ は遅れ時間を示す。さらに、 $I(x, z, t)$ は半判別関数といい、固定点における特定の変動パターンを示したときに1、それ以外は0と定義する。上式(3)によって遅れ時間 τ をもつ変動パターン(組織的構造)のみを抽出し、その移流過程が求められる。具体的な半判別関数の定義の手順については、以下の結果の考察とともに述べることにする。

4. 実験結果および考察

縦列円柱配置による周辺の乱流構造への影響を観るために、以下の解析結果の考察では単一円柱の結果との比較で考察を行う。

4.1 平均流特性

図-5は、底面から2cmの中央位置における平面内の平均流速ベクトルの分布を縦列円柱、単一円柱それぞれについて示したものである。また、図中のコンターはベクトルの大きさを示している。ここでは、PTV解析によって評価された瞬間流速ベクトルを等間隔メッシュ上に補間し、この補間データを用いて平均流速やその他の乱れ変動量に関する平均流統計解析を行っている。

縦列円柱配置による平均流速ベクトル分布への影響は、主に下流側に現れており、二つに並ぶ円柱の中で下流側円柱の背後の旋回域が単一円柱の場合と比較して小さくなっている。この領域は下流側の円柱表面におけるせん断が、上流側円柱表面のせん断と円柱間に流入する流れによって起きる減速流の影響で弱くなり、その結果下流部の旋回域が小さくなると考えられる。また、縦列円柱間の分布では、上述した縦列・単一円柱下流部の旋回流は観られない傾いた非対称な流れが発生していることが分かる。流入条件等の微細な流れの条件にも影響されるが、このような傾向は最近の可視化実験や数値シミュレーションによっても同様な傾向が得られている。Linら(2002)¹¹⁾は円柱間隔を変えた可視化実験で、円柱直径に対する円柱中心間距離の比 L/D が1.5~2.0の付近では、平均流速ベクトルパターンに非対称性が現れ、上流側円

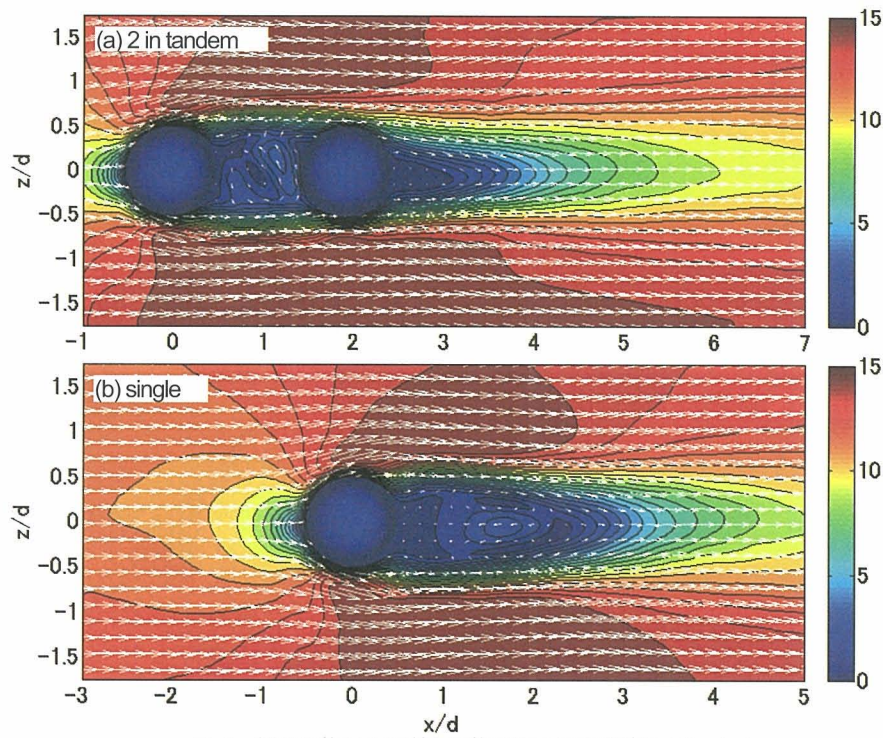


図-5 縦列円柱および単一円柱周辺の平均流速分布(cm/sec)

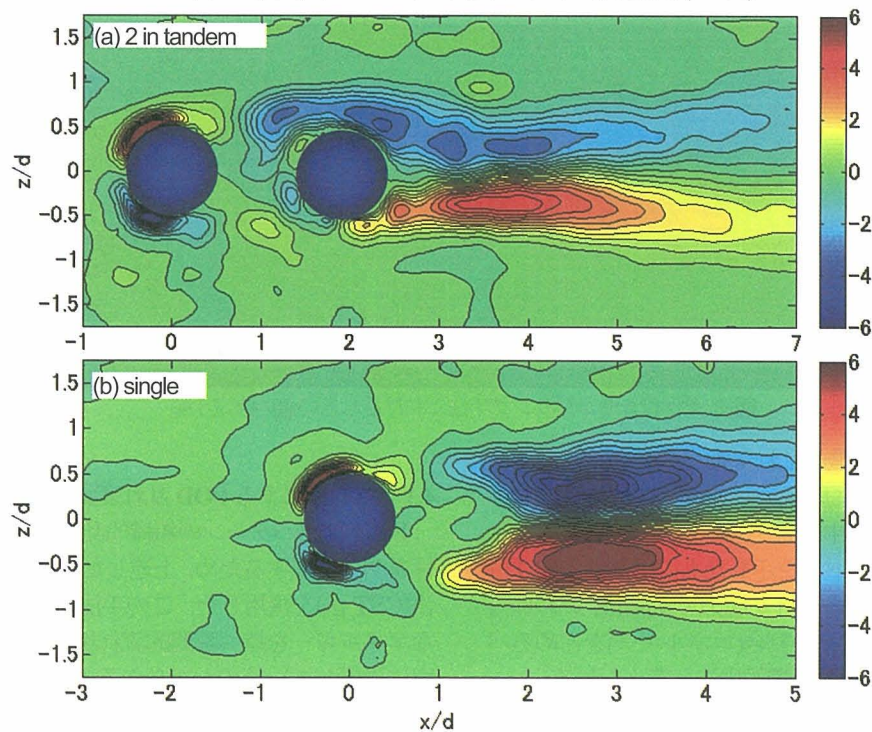


図-6 縦列円柱および単一円柱周辺のレイノルズ応力分布 ($-\overline{uw}$) (cm^2/sec^2)

柱両側面から非定常的に放出される Karman 渦の影響であると示唆している。また、Mizushima & Suehiro (2005)¹²⁾も DNS シミュレーションなどの結果から円柱間距離の変化による不安定性の存在を示している。これらの傾向は、図-6 に示す Reynolds 応力分布にも現れている。Reynolds 応力の大きさは、いわゆるせん断層の強さに相当すると考えると、主に縦列円柱間の旋回域から左岸側後流域に向かって比較的大きなせん断層が形成され、乱れ変動の集中した非対称な分布であると言える。さらに、下流側円柱を過ぎた領域においても、せん断の強さに関して非対称性の影響が伝わっているが比較

的左右対称に分布している。一方、単一円柱における後流部では、同一水理条件下であっても縦列円柱と比較して Reynolds 応力の非常に強い分布を示している。図-5 に示したように、縦列円柱では上流から流入してきた流れが円柱間から下流側円柱周辺部にかけて一旦減速され、その結果単一円柱と比較して弱いせん断層が形成されたものと考えられる。上述した Reynolds 応力等の平均的乱流特性に加えて、後述する POD 解析や CST 法によってこれらの瞬間的・組織的な特性の詳細がより明らかになる。

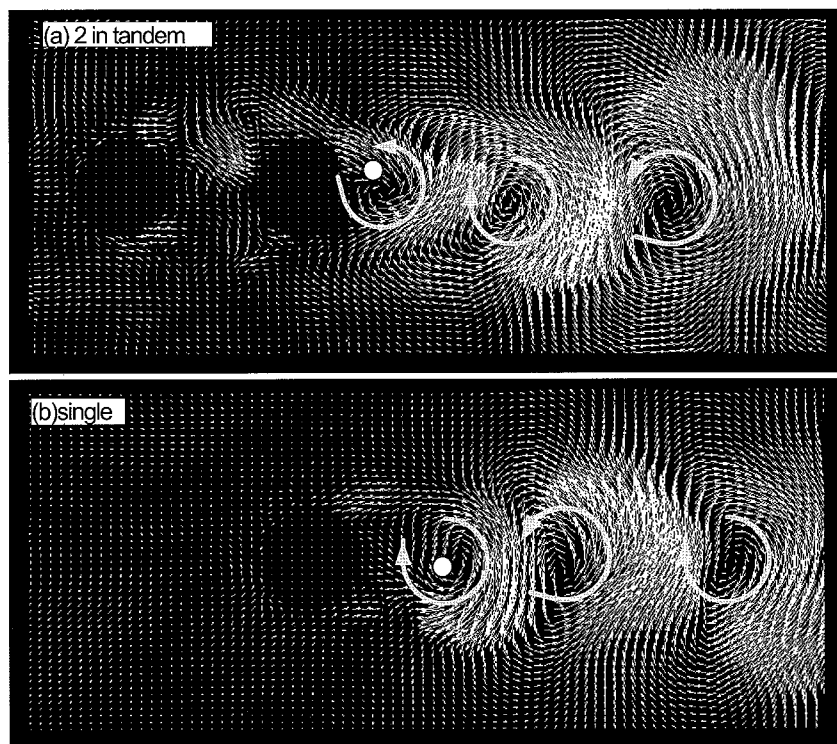


図-7 POD 解析による乱れ変動(モード 1)の組織的構造 (図中の点は CST 法における固定点位置)

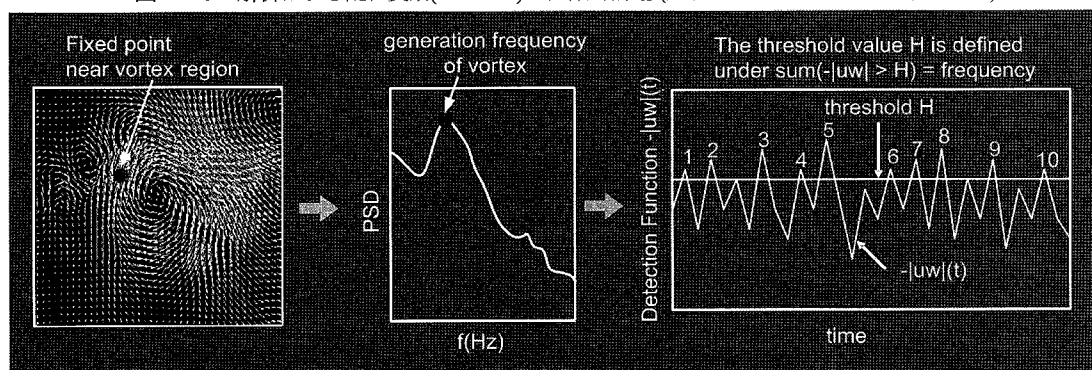


図-8 条件付きサンプリング手法におけるしきい値の決定手順

4.2 POD 解析による組織的乱れ変動パターン

図-7 は、前図と同様に底面から 2cm の中央位置における平面内の乱れ変動の中で最も強いエネルギーをもつ POD 解析抽出結果(モード 1)を示したものである。POD 解析によって抽出されたモード 1 の乱れ変動場は、いわゆる全ての乱れ変動場の中で高い割合(エネルギー)を占めるパターンであり、乱れ変動の組織的構造と考えられる。

これらの図より、縦列円柱、単一円柱それぞれにおいて、円柱後流部では Karman 渦的な流れに沿って発生する大きな乱れ変動場が現れており、図-6 に示した Reynolds 応力(乱れ)の強い領域とその組織的乱れ方向成分が明らかとなっている。一方、縦列円柱周辺の乱れ変動場が、その左岸側表面付近に偏った乱れ変動を示しており、ここにおいても非対称性の傾向が観られる。また、後流部の旋回流に沿った乱れ変動パターンは、縦列円柱の下流側円柱背後において発生するのに対し、単一円柱では円柱より少し離れた位置でこの傾向を示している。また、横断方向への乱れ成分の分布は単一円柱の後流部では、横断方向においても拡大している。

4.3 CST 法による POD 乱れ変動パターンの移流過程

POD 抽出パターンの組織的乱れ変動パターンの移流特性を明らかにするため、上述した条件付きサンプリング手法(CST 法)を採用した。この手法を採用することで、大きなエネルギーを持つ瞬間的流れ場が、物質拡散現象にどのような影響していくのかが分かると考えられる。以下では、まず、CST 法における式(3)にある判別関数 $I(x,z,t)$ の定義について述べた後、その判別関数を用いて得られた組織的乱れ変動パターンの移流特性について述べる。

図-8 は条件付きサンプリング手法における固定点の定義からしきい値決定までの手順を示したものである。この図に示すように、縦列円柱・単一円柱ともに、式(3)における固定点の位置を、後流部の組織的構造の移流過程を観察するためにそれぞれ図-7 の点で示した位置の円柱下流側に定義する。次に、これらの固定点における乱れ変動パターンから判別関数を以下のように定義する。

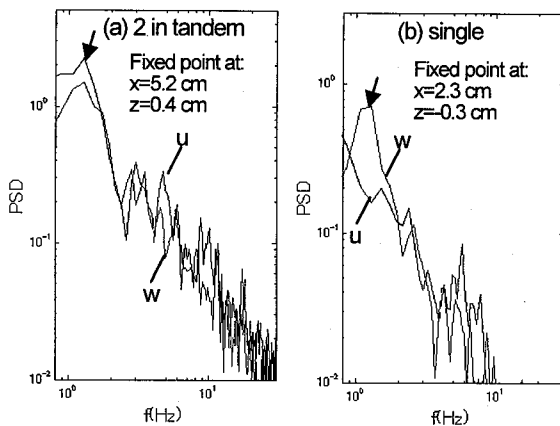


図-9 各固定点におけるパワースペクトル分布

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

ここで u' および w' は、それぞれ乱れ変動量の主流・横断方向成分 (u, w) の標準偏差 (rms) 値である。また、 H はしきい値であり、図-8 に示したように固定点位置におけるスペクトル解析によって得られる卓越周波数から求められる。図-9 は、各固定点におけるパワースペクトル分布を示したものである。縦列円柱・単一円柱の後流部には、それぞれ主流方向・横断方向成分において特徴的な卓越周波数が現れていることが分かり、上述した単一円柱後流部では横断方向に特徴的な乱れ変動の傾向を示している。図-10 に示した自己相関係数の変化においても、周期性のある傾向が現れ、縦列円柱の方がやや速く、単一円柱では横断方向成分において大きな周期性を示している。本解析では、スペクトル解析で得られた各固定点における乱れ変動の周期性が、POD 解析から得られた同点の乱れ変動パターンの特性であると考え、式(4)に示すように、しきい値の決定では、図-9 の矢印で示した卓越周波数(発生周期)と、あるしきい値 H が式(4)の条件を満たすデータ個数が一致するように求められる(図-8)。この手順によって求められたしきい値 H と乱れ強度で無次元化された Reynolds 応力の絶対値 $|uw / u'w'|$ の関係を図-11 に示している。

上述の手順によって定義された CST 法における条件(判別関数としきい値)を用いて、円柱周辺の瞬間的乱れ変動成分の全ての時系列に式(3)を適用した。これらの解析結果を図-12 に示した。瞬間的乱れ変動場の中で、ある一つのパターンがこの CST 法における条件と一致し、かつ式(3)中にある遅れ時間(τ)後の乱れ変動パターンを集合平均させることで、 τ 秒後の移流過程を追跡できる。図-12 では、縦列円柱・単一円柱それぞれの後流部における乱れ変動パターンの移流過程が明らかとなっている。前述した、Reynolds 応力分布などの傾向と同様に、瞬間的に時計・反時計回りに変動する組織的なペアリング構造が主に主流方向に移流する縦列円柱周辺の流れ場に対し、単一円柱では横断方向への移流が卓越していることが分かる。また、縦列円柱間と下流側円柱の左側面で発生した非対称な乱れ変動の移流過程も捉えられていることが確認できる。また、図-9 で得られた固定点での発生周波数 f をもとに、ス

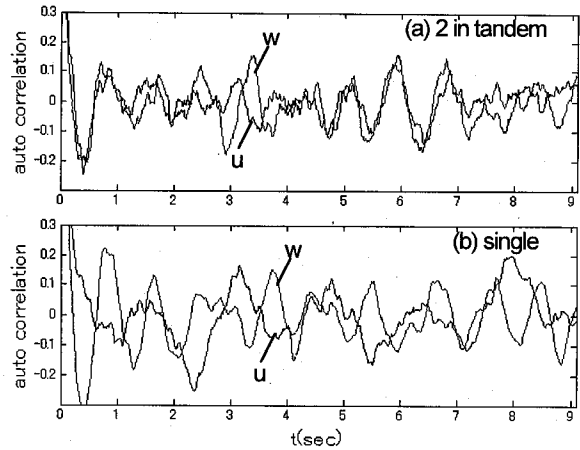


図-10 各固定点における自己相関係数

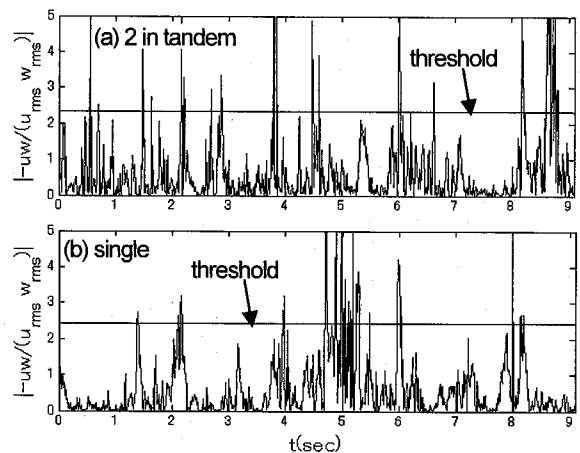


図-11 判別関数の変化としきい値

トローハル数 $S_r = f d v$ (v : 上流部の平均流速) を算定したところ、縦列円柱では 2.2、単一円柱では 2.0 となり、若干縦列円柱のほうが POD 乱れ変動パターンの発生間隔が狭いといえる。

この様に、ある大きなエネルギーをもった組織的で瞬間的な乱れ変動の移流過程を評価することで、瞬間的な物質拡散現象の評価に有益な情報を与えることが可能であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、縦列円柱周辺の瞬間的に発生する組織的流れの構造に着目し、広範囲で速度差のある瞬間流速ベクトルを評価できる PTV 法と 2 台の高速カメラからなる可視化画像撮影システムを設置することで瞬間流速を計測・評価した。また、客観的に乱流の組織構造を抽出できる方法として正規直交分解法の POD 解析と条件付きサンプリング手法(CST 法)を採用し縦列円柱周辺に瞬間的に起きる乱れ変動のパターンの中で最も高いエネルギーもつ組織的構造を抽出し、その移流過程の解明を試みた。

これらの結果は、卓越するエネルギーを持つ乱れ変動場が局所的に起き、どの様に移流するかを明らかにすることができる。瞬間的で局所的で乱れ変動の組織的な構造が、全体的な流れ場への影響だけでなく物質拡散現象などへの影響についても考慮できると考えられる。

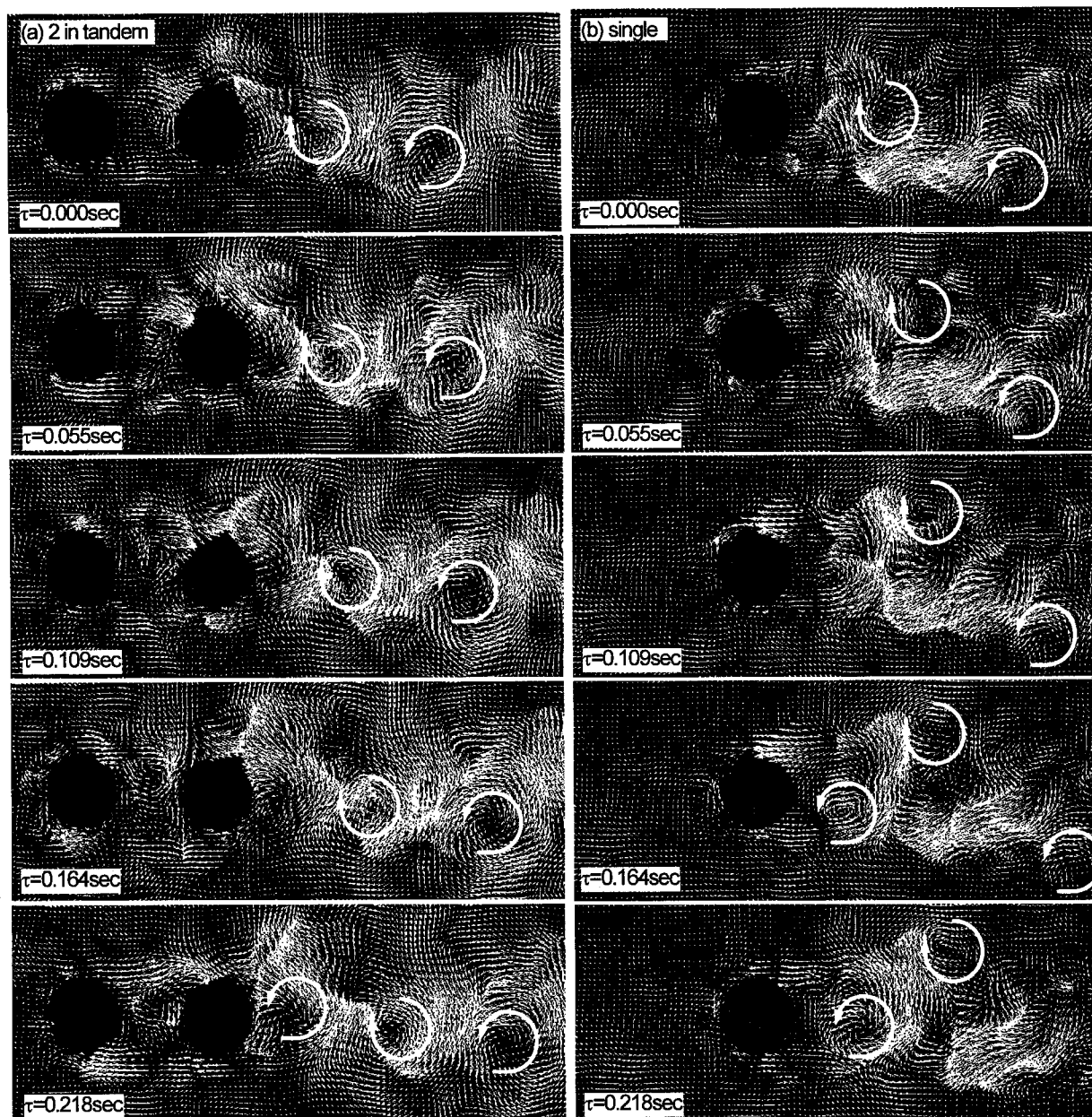


図-12 条件付きサンプリング手法による POD 乱れ変動パターンの移流過程

参考文献

- 1) Igarashi, T.: Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem I. Bulletin of JSME 24, 323-331., 1981.
- 2) Igarashi, T.: Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem (2nd Report). Bulletin of JSME 27, 2380-2387., 1984.
- 3) Zdravkovich, M. M.: Flow induced oscillations of two interfering circular cylinders. In Proceedings International Conference on Flow Induced Vibration, pp. 141-154. Bowness-on-Windermere, England, Cranfield, UK: BHRS., 1982.
- 4) Ishigai, S., Nishikawa, E., Nishimura, K. & Cho, K.: Experimental study on structure of gas flow in tube banks with tube axes normal to flow (Part 1, Karman vortex flow from two tubes at various spacings). Bulletin of the JSME 15, 949-956., 1972.
- 5) Ljungkrone, L., Norberg, C. H. & Sundén, B.: Free-stream turbulence and tube spacing effects on surface pressure fluctuations for two tubes in an in-line arrangement. Journal of Fluids and Structures 5, 701-727., 1991.
- 6) Ljungkrone, L. & Sundén, B.: Flow visualization and surface pressure measurement on two tubes in an inline arrangement. Experimental Thermal and Fluid Science 6, 15-27., 1993.
- 7) Wu, J., Welch, L. W., Welsh, M. C., Sheridan, J. & Walker, G. J.: Spanwise wake structures of a circular cylinder and two circular cylinders in tandem. Experimental Thermal and Fluid Science 9, 299-308., 1994.
- 8) Chyu, C.-K. & Rockwell, D.: Near-wake structure of an oscillating cylinder: effect of controlled kelvin-helmholtz vortices. Journal of Fluid Mechanics 322, 21-49., 1996.
- 9) Lumley, J. L.: Atmospheric Turbulence and Radio Wave Propagation (ed. Yaglom A. M. and Tatarsky V. I.), Nauka, Moscow, 166-178., 1967.
- 10) Kevlahan, N.K.-R., Hunt, J.C.R. & Vassilicos, J.C.: A comparison of different analytical techniques for identifying structures in turbulence. Appl. Sci. Res. 53, 339-355., 1994.
- 11) Lin, J. C., Yang, Y. & Rockwell, D.: Flow past two cylinders in tandem: instantaneous and averaged flow structure, Journal of Fluids and Structures, 16(8), 1059-1071., 2002.
- 12) Mizushima, J. and Suehiro, N.: Instability and transition of flow past two tandem circular cylinders, Physics of Fluids, vol.17, no.10, pp.104107-1-11., 2005.

(2007年4月12日 受付)