

段付き円柱後方に形成される縦渦の非定常特性と非線形干渉*

羽二生 博之^{*1}, 金 相一^{*2}, 北野 太一^{*3}, Mohammad Rofiqul ISLAM^{*4}, 宮越 勝美^{*1}

Unsteady Characteristics of Longitudinal Vortices behind a Stepped Circular Cylinder and Nonlinear Interaction

Hiroyuki HANIU, Sangil KIM^{*2}, Taichi KITANO,
Mohammad Rofiqul ISLAM and Katsumi MIYAKOSHI

^{*2} Kangwon National Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Joongang-ro 1 Samcheok-si, Gangwondo, 245-711 Korea

Since a stepped circular cylinder is composed of two cylinders of different diameters, two different vortex shedding frequencies are presented in the wake. In the wake of a stepped circular cylinder, a pair of longitudinal vortices is formed behind the step. From spectral analysis, the longitudinal vortices are found to fluctuate with time at the frequency equal to the difference of the two vortex shedding frequencies. In this experiment, time variation of the flow field behind the stepped circular cylinder was investigated by phase ensemble averaging technique by means of X type hot wire anemometer. Pressure transducers are installed in the each cylinder part of different diameter, and their signals are digitally mixed and digitally filtered to produce a signal fluctuates at difference of the two vortex shedding frequencies, and it is used as reference signal of the phase ensemble averaging. From results of the experiments, velocity vector distributions in the plane perpendicular to the mean stream direction at the downstream of the stepped circular cylinder were found to vary drastically with time, and the strength of the longitudinal vortices was also found to vary periodically with time at the difference of the two vortex shedding frequencies. Furthermore, from TSC analysis of velocity signal obtained by means of I type hotwire anemometer, nonlinear interaction between two vortex shedding frequencies was detected around the longitudinal vortices.

Key Words : Stepped Circular Cylinder, Unsteady Longitudinal Vortices, Two Different Vortex Shedding Frequencies, Non-Linear Interaction

1. 緒 言

1954年にRoshko⁽¹⁾によって示されて以来、柱状物体からの渦放出においてはレイノルズ数が300付近から強い不規則性が存在することが知られており、それが流れの三次元性に関連していると考えられるようになってきた。横井ら⁽²⁾は170~1340程度のレイノルズ数において円柱表面からの離流線の可視化を行い、スパン方向に延びる離線の蛇行に伴う円柱近傍の三次元的な流れ構造がスパン方向に渦放出周期の約20倍の長い時間スケールで移動することを報告している。また羽二生ら⁽³⁾は80~240程度のレイノルズ数において、連続して放出される渦の循環の時系列データをスペクトル解析することで、後流中に横井らと同様な時間スケールの長周期変動が存在することを明らかにした。さらに石川ら⁽⁴⁾は後流速度変動のウェーブレット解析により、同様の長周期変動が5,000程度の高いレイノルズ数においても存在することを報告している。また、Szepessy⁽⁵⁾は渦の三次元的な変動に伴ってスパン方向の位置によって渦の巻き込むタイミング(位相)が異なると考えて、43,000という高いレイノルズ数の円柱において表面圧力変動の空間相関を計測し、渦放出のスパン方向の位相差には渦放出周期の

* 原稿受付 2011年11月28日

^{*1} 正員, 北見工業大学 (〒090-8507 北海道北見市公園町165)

^{*2} 正員, 国立江原大学校 (245-711 韓国 江原道三陟市中央路1)

^{*3} (株)フジキン (〒550-0012 大阪府大阪市西区立売堀2-3-2)

^{*4} Rajshahi Univ. of Engineering & Technology (Rajshahi-6204, Bangladesh)

E-mail: kimsangil@kangwon.ac.kr



10~20 倍の長周期変動が存在することを報告している。一方 Williamson⁽⁶⁾⁽⁷⁾はレイノルズ数 120 において、円柱スパン中央に直径と幅がそれぞれ円柱直径の 1.5 倍と 0.5 倍のリングを設けて局所的に異なった渦放出周波数を生成し、周囲の渦放出周波数との差によりカルマン渦列に三次元的な渦転移(Vortex Dislocation)が生じるために周波数差に一致した低い変調周波数が生成されることを報告している。また Szepessy⁽⁵⁾は Williamson⁽⁷⁾の報告における自然渦転移がスパン方向に存在する異なった渦放出周波数を持ったセルの間で発生し、その渦転移がスパン方向の渦放出位相差の変調と円柱表面圧力変動の振幅変調を生じさせていると述べている。さらに横井ら⁽²⁾⁽⁸⁾の 2 次元円柱での報告に示されたはく離線の蛇行に伴って、はく離せん断層の広がりにはスパン方向において変化しているため、スパン方向での局所的なストローハル数も変化するものと考えられる。そのため、スパン方向には異なった渦放出周波数が同時に存在し、それら異なった渦放出周波数間の二次非線形干渉によって周波数差に対応した低い周波数変動(長周期変動)が生じているものと考えられる。異なる周波数間の非線形干渉を調べるために、Vaidya⁽⁹⁾により周波数間スペクトル位相相関 (Trans Spectrum Coherence : TSC) 法が提唱された。この TSC 法は、周波数間の位相を元に非線形干渉を求める方法で、乱流の大規模構造を調べる上で比較的簡単な方法を提唱するものである。Yogi⁽¹⁰⁾はさらに簡便な TSC 法を考案し、円柱後流の周波数間非線形干渉を調べた。二次元円柱のスパン方向に存在する異なる放出周波数の差は平均渦放出周波数の 1/20 程度と小さく、個々の渦放出周波数セル⁽⁶⁾の発生位置が不確定なため、周波数解析と縦渦の発生位置の確認が困難である⁽¹¹⁾。呉平ら⁽¹²⁾は、中心軸が同一直線上に存在する直径の異なった二つの円柱(段付き円柱)を用いて縦渦の位置を固定すると共に二つの異なる周波数を大きく離し、Yogi⁽¹⁰⁾の TSC に改良を加えた特定位相差 TSC 法によって段付き円柱後流の非線形干渉を調べ、時間平均渦度分布で示された縦渦の外縁部に二次非線形干渉を検出した。

本研究では、X 型熱線プローブを用いた位相集合平均処理により段付き円柱下流に形成される縦渦の時間変化を調べた。また、I 型熱線プローブを用いた特定位相差 TSC⁽¹²⁾によって、非線形干渉が検出される位置と時間変動する縦渦の位置の関係を調べた。

2. 実験装置および測定方法

本実験では、断面が高さ 500mm×幅 240mm、長さ 2180mm の測定部を有する回流式低速風洞を使用した。供試物体には図 1(a)に示すように直径 $d_1=35\text{mm}$ と $d_2=25\text{mm}$ の二円柱の中心軸が一致するように接合された段付き円柱を用い、水平かつ主流に対して直角に設置した。段付き部から発生する高周波成分を除去するため二円柱の接合部は 45 度に面取りして、異なる渦放出周波数間の非線形干渉によって生じる高周波成分の検出をやすくした。八木田ら⁽¹³⁾によると、本研究において重要な Y 字型結合(後述)は直径比 d_2/d_1 がおおむね 0.6 以上で生じることから、本研究では直径比 0.71 を用いた。太い方である直径 d_1 の円柱からの渦放出周波数 f_1 が約 60Hz となるように主流速は 10.5m/s に設定し、 d_1 に基づくレイノルズ数は約 25,000 である。円柱中心軸上の接合部中央を原点として、主流方向を x 軸、鉛直上向きを y 軸、スパン方向を z 軸とした右手座標系を用い、それぞれの軸方向の速度成分を u , v , w と定めた。なお、細い方である直径 d_2 の円柱側を z 軸の正の側とした。また本研究で示す座標は、太い方の円柱直径 d_1 で無次元化した。

縦渦の時間変動を調べるための位相集合平均処理法では、異なる直径の二円柱部分から放出される主渦(カルマン渦)の周波数差で変動する周期的な基準信号が必要である。本実験では、図 2 に示すように、それぞれの直径の円柱部分において主渦が生成されている付近の内部に圧力変換器を組み込み、円柱表面に設けた圧力孔を通じて検出した二つの異なる周波数の渦放出に基づく圧力変動信号をデジタル合成およびデジタルフィルタリング処理して基準信号を得た。この位相集合平均法と X 型熱線プローブを用いた縦渦の計測は、図 1(b)と(c)に示すように直径 d_1 の 4 倍と 5 倍および 6 倍下流の主流に垂直な y - z 断面で行った。X 型プローブと基準信号は同時に測定し、位相集合平均における十分な位相解像度と加算回数を得ること及び信号のエリアジングを防ぐために、サンプリング周波数は 5kHz、ローパスカットオフ周波数は 1kHz、サンプリング点数は各チャンネルともに 6 万点とした。各断面での測定領域は渦度計算や平滑化処理によるデータ欠損を考慮して $-1.5 \leq y/d_1 \leq 1.5$, $-1.5 \leq z/d_1 \leq 1.5$ とし、 y 軸方向と z 軸方向は共に $0.05d_1$ 刻みで測定を行った。

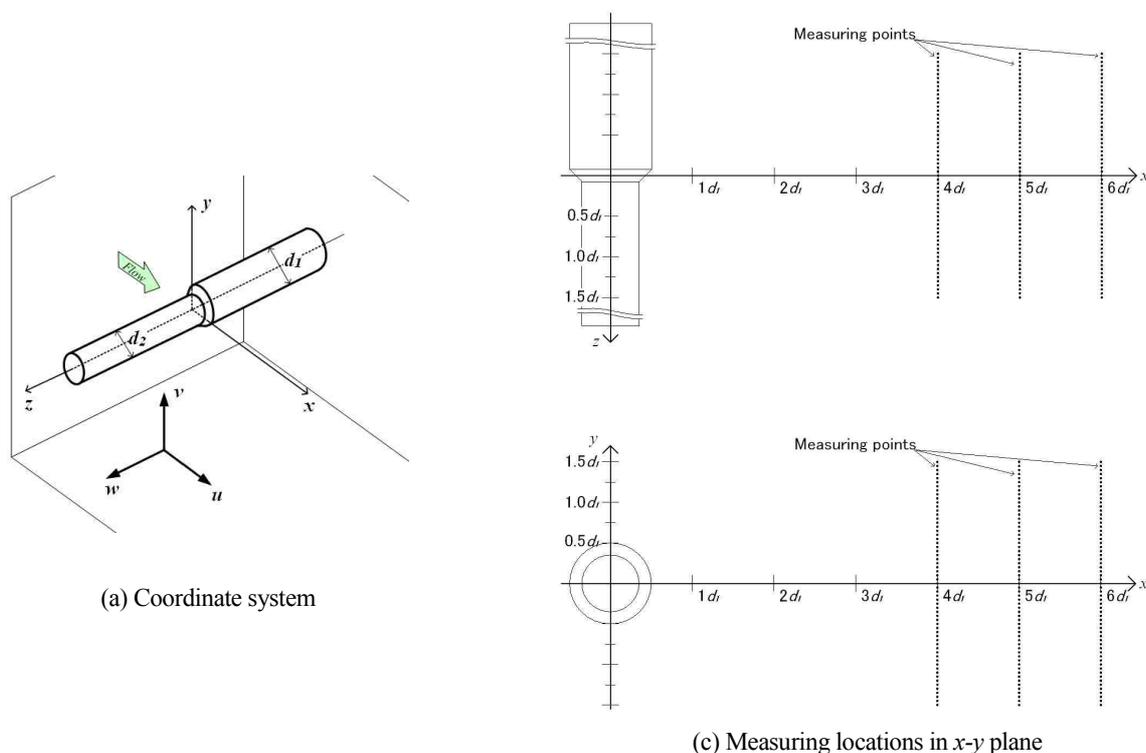


Fig. 1 Schematic view of coordinate system and measuring locations for velocity fluctuation

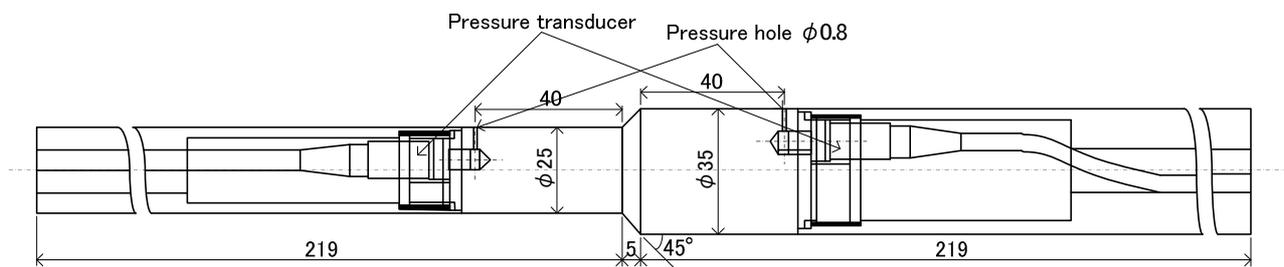


Fig. 2 Installation of pressure transducers inside of the test body

スペクトル解析および TSC 解析に用いる流速変動は I 型熱線プローブを用いて測定し、エアラジングを防止するために、サンプリング周波数は 1kHz、ローパスカットオフ周波数は 400Hz とし、サンプリング点数は 24 万点とした。測定領域は x/d_1 が 4, 5, 6 の 3 断面において、 $0 \leq y/d_1 \leq 0.5$, $-1.0 \leq z/d_1 \leq 1.0$ の範囲で行い、 y 軸方向と z 軸方向ともに $0.1d_1$ 刻みで測定を行った。

3. データ処理方法

3・1 位相集合平均処理

位相集合平均処理を行うのに不可欠な低周波(長周期)基準信号を得るための手順は以下の通りである。まず図 3 の(a)と(b)に示すように、それぞれの直径の円柱部分に組み込まれた圧力変換器からの信号のノイズを除去するために、それぞれの円柱部分における時間平均渦放出周波数付近の信号成分だけを通過させるデジタルバンドパス処理を行った。図の(a)は直径 d_1 の円柱部分から放出されるカルマン渦に基づく圧力変動波形で、その変動周波数 f_1 は約 60Hz である。図の(b)は直径 d_2 の円柱部分における圧力変動波形で、その変動周波数 f_2 は約 92Hz である。図 3 の(c)と(d)はデジタルバンドパス処理後のそれぞれの波形である。次に(c)と(d)の波形を掛け合わせることで図の(e)に示すように、 $f_2 - f_1$ の周波数変動成分と $f_1 + f_2$ の周波数変動成分が重ね合わされた信号が得られる。この信号に対して $f_2 - f_1$ 付近の周波数成分だけを通過させるデジタルバンドパス処理を施すと、図の(f)に示すような $f_2 - f_1$ の周波数変動だけの基準信号が得られる。この信号の D.C.成分はカットされており、加算処理を行

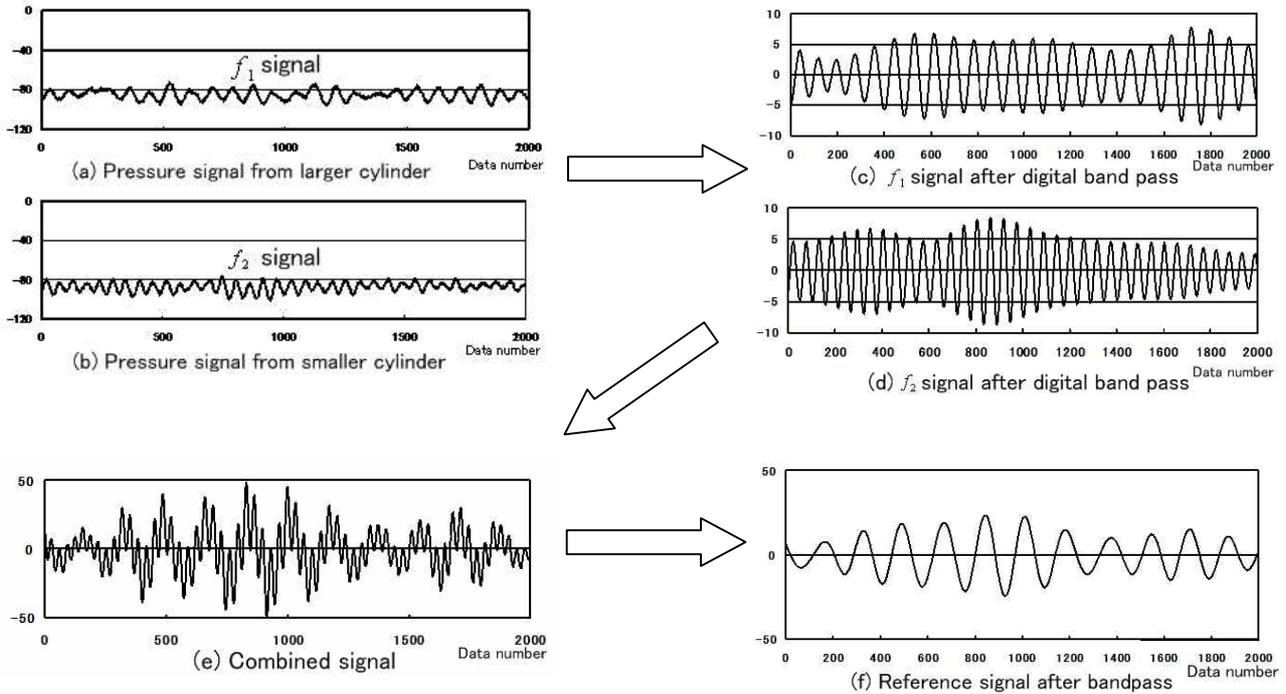


Fig. 3 Production of reference signal for Ensemble averaging

うときの各変動周期における位相の始点はプラススロープのゼロクロス点とした。圧力変換器の信号と同時にサンプリングした流速データに対して、この低周波基準信号を用いた位相集合平均処理を行い、基準信号1周期を60等分した各位相における y - z 断面での v - w 流速ベクトル分布を得た。なお、基準信号には波長の変動が見られたため、波長変動の標準偏差 σ を求め、平均波長からのズレが $\pm 0.5\sigma$ の範囲にある波長のデータのみを用いて加算平均（位相集合平均）処理した。その結果、データの採択率は約50%となり、加算回数は約150周期となった。また、デジタルバンドパス処理における移動平均処理に用いた重み関数は左右対称な SINC 関数（フーリエ変換すると矩形のフィルター関数が得られる）を組み合わせているため、この処理による波形位相のズレは生じない。

3・2 スペクトル位相相関解析(特定位相差 TSC 法)

TSC(Trans-Spectral Coherence または周波数間スペクトル位相相関)解析は、二つの異なる周波数を持った波動の非線形的相互作用(Phase coupling)を調べる手法である。例えば、二つの異なる変動周波数が f_1 と f_2 でそれぞれのスペクトル位相角（フーリエ係数の複素平面における偏角）が θ_1 と θ_2 である余弦波信号を掛け合わせて非線形的に干渉させると、新たに f_1+f_2 と f_1-f_2 の周波数成分がそれぞれ位相角 $\theta_+ = \theta_1 + \theta_2$ 、 $\theta_- = \theta_1 - \theta_2$ を持って生成される。本研究では式(1)に事象抽出関数（重み関数） $\Psi(\Delta\theta)$ を、式(2)と(3)に周波数間非線形干渉の強さを表すパラメーターである T_+ および T_- を定義する。

$$\Psi(\Delta\theta) = \frac{1}{1-b} \left(e^{-\frac{\Delta\theta^2}{2\sigma^2}} - b \right) \quad (1)$$

$$T_+ = | \langle \Psi(\Delta\theta_+) \rangle | \quad (2)$$

$$T_- = | \langle \Psi(\Delta\theta_-) \rangle | \quad (3)$$

ここで、 σ と b は後述するパラメーターであり、 $\Delta\theta$ は実測波形データを用いた1回のフーリエ変換における位相角の差である。すなわち、 $\Delta\theta_+$ は位相角 $\theta_1 + \theta_2$ と周波数 $f_1 + f_2$ における位相角 θ_+ との差であり、 $\Delta\theta_-$ は位相角

$\theta_1 - \theta_2$ と周波数 $|f_1 - f_2|$ における位相角 θ_- との差である。周波数間の非線形干渉が強ければ、これらの位相角差は 0 に近い値になる。なおフーリエ係数の周波数分布は周波数 0 に関して対称であるため、周波数 $f_1 - f_2$ と $f_2 - f_1$ における位相角は同じである。式(2)と(3)における $\langle \rangle$ は多数のフーリエ変換を行ったときの平均値である。式(1)の事象抽出関数とは、 $\Delta\theta$ が 0 付近の値を示す事象を抽出する関数であり、位相角差が 0 に近いときに 1 に近い値となる。このような目的の抽出関数としては図 4 に示すようなウェーブレット解析などでも用いられているガウス関数が一般的だが、 $\Delta\theta$ がランダムな位相差のときの値が積算されて、 T_+ と T_- の $\Delta\theta$ に対する分布に正のバイアスが生じて非線形干渉の検出感が低下する。そのため、図 5 に示すように抽出関数の $-\pi$ から π までの積分値が 0 となるように、事象抽出関数を改良してバイアスを除去した。本研究では事象抽出関数内のパラメータとして式(4)に示す値を用いた。1 回の FFT 処理では 1024 個のデータを用い、FFT 処理 200 回の平均から T_+ と T_- を求めた。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \pi/4 \\ b &= \sqrt{\pi/32} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

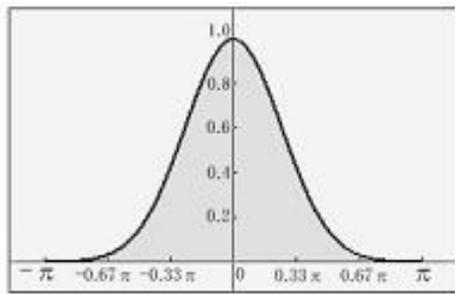


Fig.4 Ordinary event extraction function

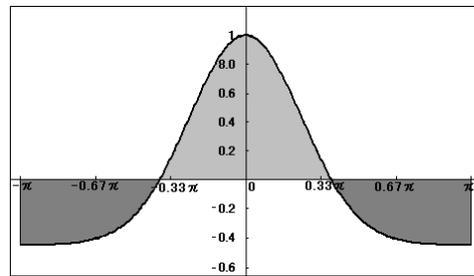


Fig.5 Modified event extraction function

4. 実験結果と考察

4・1 位相集合平均処理結果

本実験の位相集合平均処理では、 f_- の低周波基準信号一周期を 60 等分している。図 6 に、段付き円柱から d_1 の 5 倍下流の $y-z$ 断面における変動位相 2/60 と 32/60 での速度ベクトル分布を示した。図から、変動位相によって速度ベクトル分布が劇的に変化していることが分かる。変動位相 2/60 では流れは弱く、全体的に太い円柱側か

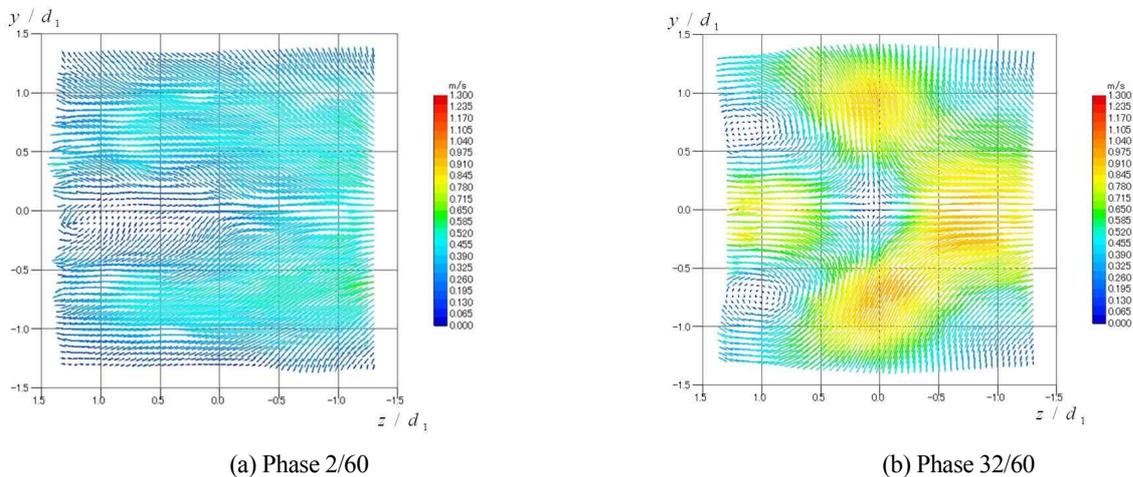


Fig. 6 Velocity vector distributions at $x/d_1=5$

ら細い円柱側に向かってほぼ平行に流れており、縦渦を示す巻き込みは見られない。位相 32/60 では、 $y/d_1=\pm 0.7$ 、 $z/d_1=1.2$ 付近を中心に縦渦を示す巻き込みが見られる。また、 z 軸付近と y 軸付近に縦渦の誘起速度によると思わ

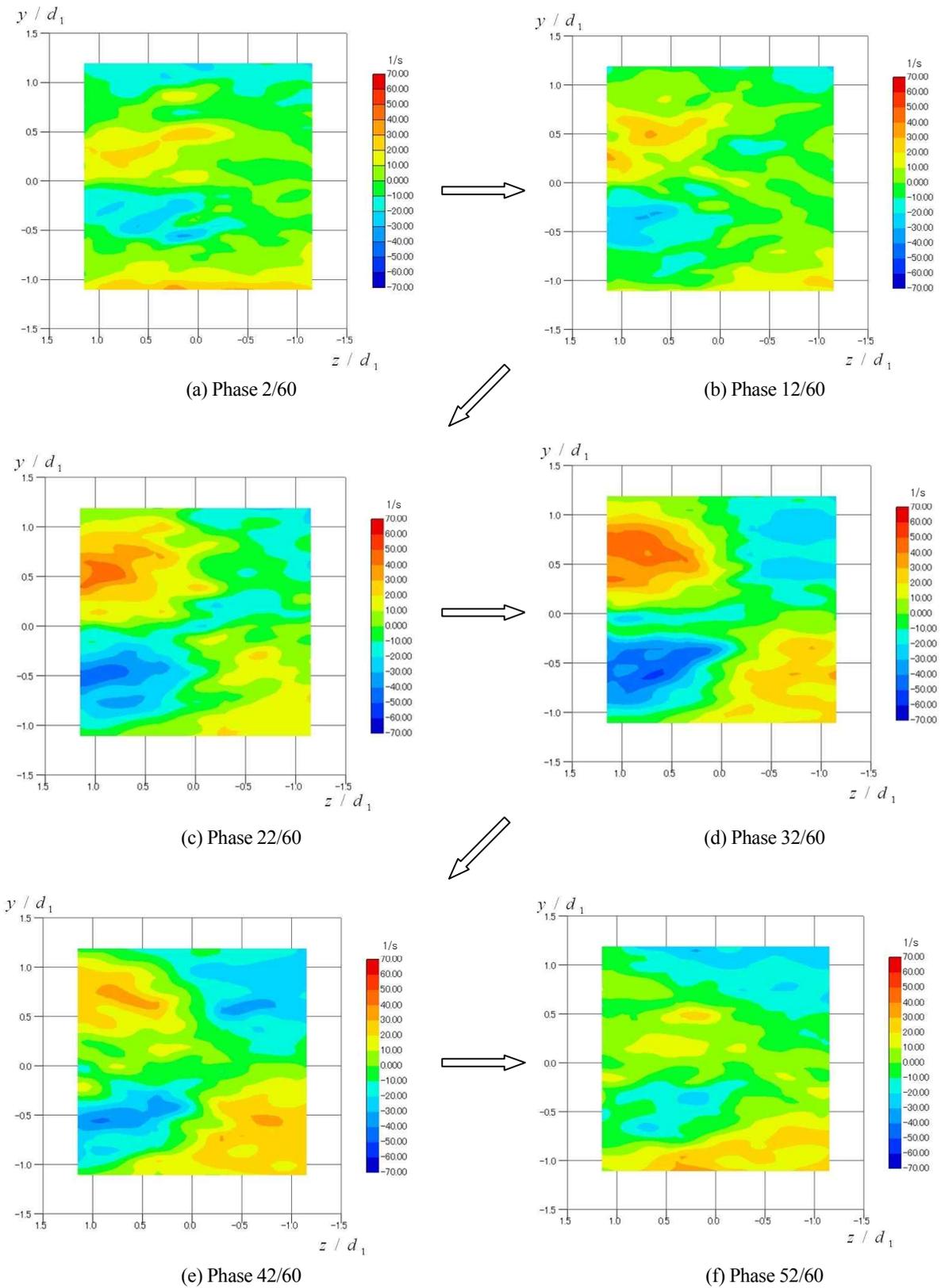


Fig. 7 Vorticity distributions at $x/d_1=5$

れる強い流れが生じている。z 軸上の流れは左右から段付き部に向かっており、段付き部の若干細い円柱寄り（左寄り）に鞍部点を形成し、y 軸方の上下方向に流れ去っている。なお、この変動位相 32/60 は、後述する渦度分布が最も強くなる位相帯である。

一般的に柱状物体の背後にはカルマン渦が形成されるため y 方向の速度成分 v の変化が大きく、物体近傍後流内における三次元速度計測に X 型熱線プローブは適さないとされている。しかしながら、段付き円柱の段付き部付近においては縦渦の形成によってカルマン渦の形成が抑制されるため、縦渦周辺の後流内では y 方向の速度成分 v の変化は小さい。このことは、図 6 における y-z 平面内の速度ベクトルの大きさが高々 1.3m/s と、主流の 13% 程度であることから分かる。

$$\omega = \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial y} \tag{5}$$

図 7 に段付き円柱から d_1 の 5 倍下流の y-z 平面における式(5)に示した渦度 ω の分布の位相変化を示した。なお v は y 方向の速度成分、w は z 方向の速度成分である。位相 2/60 では、 $y/d_1 \pm 0.4$ 、 $z/d_1 = 0.5$ 付近に弱い縦渦があるのが分かる。この弱い縦渦の存在は図 6 の(a)では存在が分からなかった。これは、弱い縦渦を示す速度ベクトルに z 方向の平行流が加わると、速度ベクトルが変形して縦渦によって生じる流れの巻き込みが分からなくなるためと思われる。位相が進むと縦渦の中心は y と z 方向共に段付部から徐々に遠ざかり、位相 32/60 では $y/d_1 = \pm 0.9$ 、 $z/d_1 = 0.7$ 付近に達し、縦渦の強さは最大となっている。その後縦渦は弱まりながら、縦渦の中心は徐々に元の位置に戻っている。

直径 d_1 側と d_2 側それぞれに形成される主渦（カルマン渦）の結合の仕方は段付部からの縦渦の存在もあり大変複雑ではあるが、主渦に着目して考えると、図 8 のような状況であると考えられる。すなわち、左右の主渦の放出位相が近い場合(In phase)には、図の(a)で示すように、渦の回転方向が一致するように結合

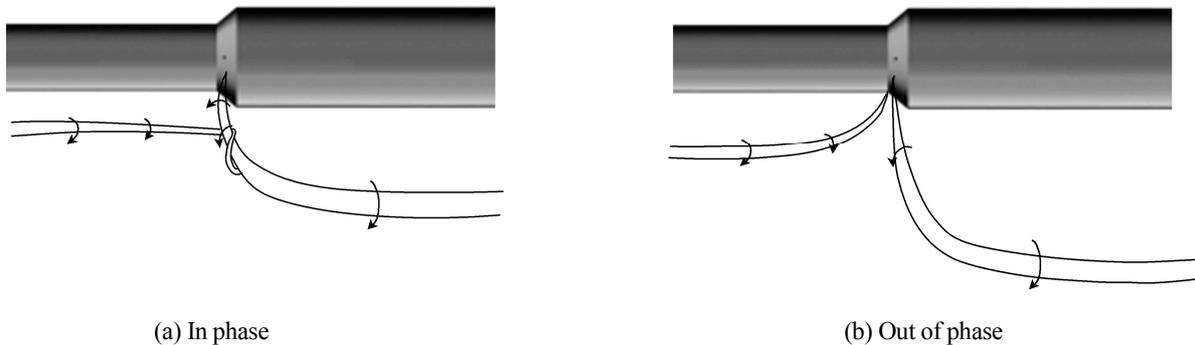


Fig.8 Connection concept of two primary vortices

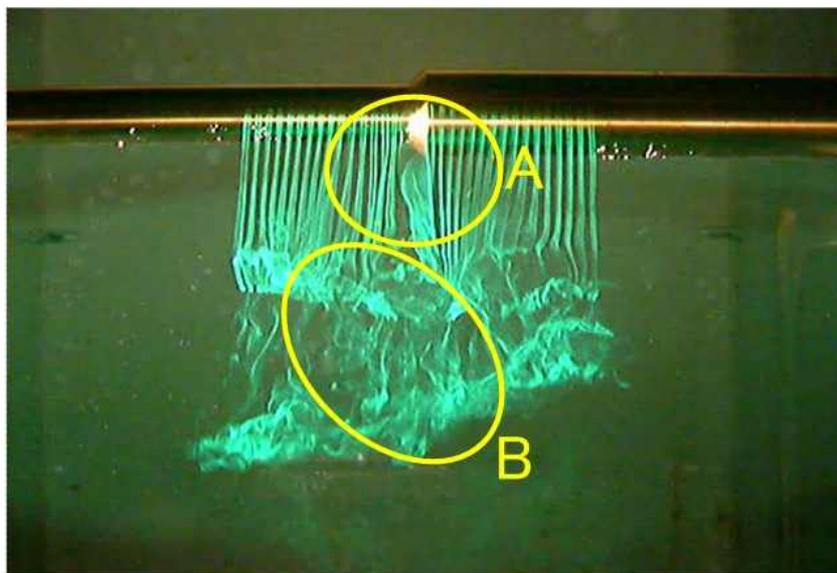


Fig.9 Flow visualization photo behind a stepped circular cylinder

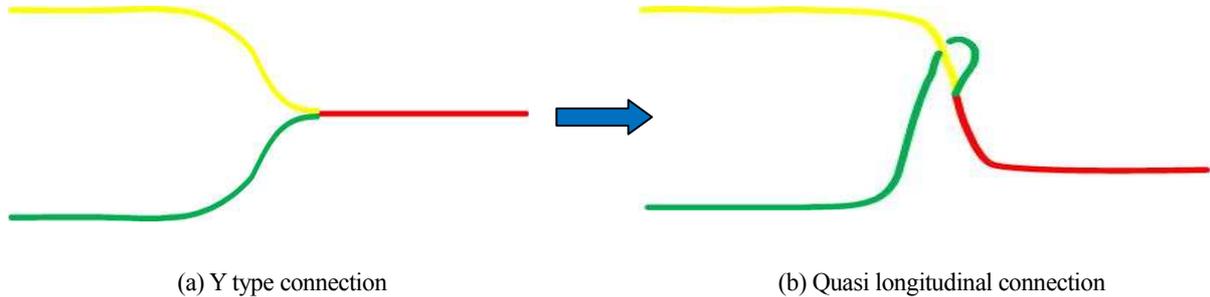


Fig. 10 Schematic view of evolution of Y type connection

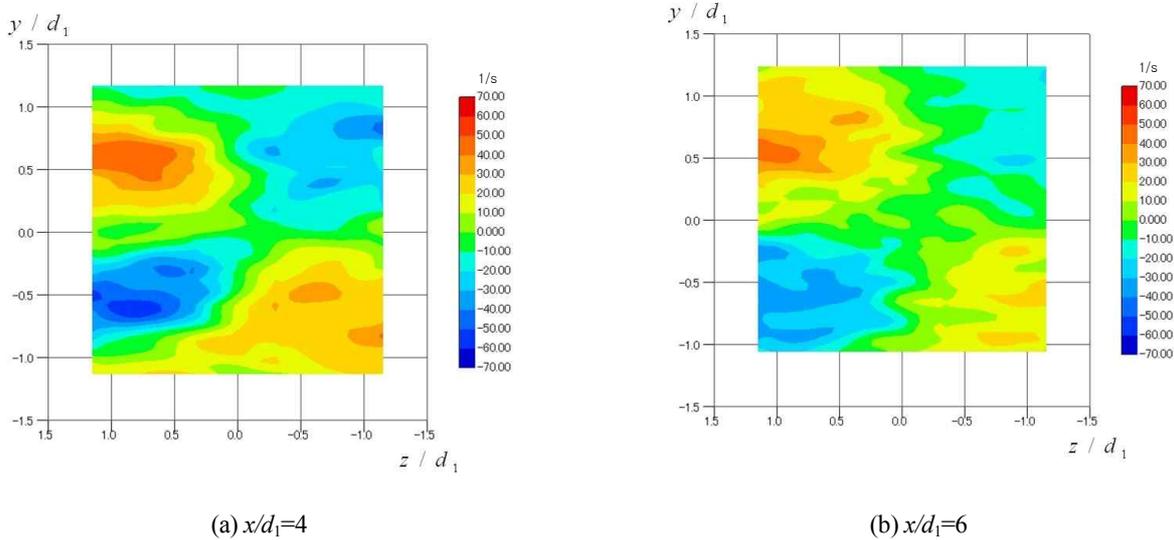


Fig. 11 Vorticity distributions at phase

し、放出位相が離れている場合(Out of phase)には、図の(b)に示すように結合しない。図9に示した水路での可視化写真においては、Aの領域が結合していない状況(Out of phase)に相当し、Bの領域が結合している状況(In phase)に相当するものと考えられる。結合している時には縦渦が強化され、結合しない場合には縦渦が弱まるものと考えられる。また結合時には、縦渦が左側の主渦に引っ張られて、中心が左側に移動するものと考えられる。八木田ら⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾はこの結合においてY字型結合が生じると報告している。図8(a)のような結合のきっかけはY字型結合であり、その後は左側(細い円柱部側)の二つの主渦のうち上流側の渦と右側(太い円柱部側)の主渦が結合した部分の周辺が縦に伸びて定在的に存在している縦渦を強化するものと考えられる。また左側下流にある主渦はループを描きながら引き延ばされて複雑な形状を示すものと思われる。その変化の様子を図10に模式図として示した。このような主渦のループ形状への変形はWilliamson⁽⁶⁾の可視化写真に明瞭に現れている。4倍および6倍下流断面での渦度分布も同様な変化を示した。4倍および6倍下流断面での位相32/60における渦度分布を図11に示した。6倍下流断面では縦渦は若干弱まり、構造も少し不明確になっている。

4・2 二つの渦放出周波数間の非線形干渉と縦渦の関係

段付き円柱後流の縦渦付近の各断面での色々な測定点においてI型熱線プローブから得られた主流方向速度変動のFFT解析を行った。いずれの断面でも同様な結果が得られたが、下流ほど乱れの影響が現れるため、一番上流にある4倍下流断面での最も特徴的なパワースペクトル分布を図12の(a)から(c)に示す。図の(a)に示した段付き部中心の背後($y/d_1=0, z/d_1=0$)では、主渦の周波数である f_1 と f_2 のスペクトルピークは見られず、二つの周波数の差である f_- と、和である f_+ だけが現れている。これら新たな周波数 f_- と f_+ は f_1 と f_2 の非線形干渉の結果生じたものと思われる。なお、この測定点は測定領域全体で f_- と f_+ のみが最も明瞭に現れる位置である。二次元円柱の真後ろ($y/d_1=0$)では通常渦放出周波数の2倍の周波数にスペクトルピークが現れるが、段付き円柱の段付部の背後には縦渦が形成されて主渦の形成が抑制されるため、そのようなスペクトルピークは現れないことが分

かる。一方、図の(b)に示した、段付き部中心から y 方向に少し上がった位置 ($y/d_1=0.2, z/d_1=0$) では、 f_1 と f_2 および f と f_+ の全てのスペクトルピークが現れている。図の(c)に示したように、そこから y 方向に少し上がった ($y/d_1=0.5, z/d_1=0$) では、 f と f_+ のスペクトルピークは見られなくなり、 f_1 と f_2 のスペクトルピークのみが現れている。なお、図の(d)は段付き部中央における各周波数のスペクトルピークの大きさの y 方向での変化を示した。したがって、4 つの全ての周波数のスペクトルピークが現れるのは、段付き円柱後流中で極狭い領域に限られている。なお、図の(b)の測定点($y/d_1=0.2, z/d_1=0$)は測定領域全体で 4 つのスペクトルピークが最も明瞭に現れた位置である。

図 13 に f_1 と色々な周波数間の非線形干渉の強さを TSC 解析で調べた結果を示す。式(2)と(3)に示した T_+ と T_- の値が共に大きくなる周波数と f_1 の間で非線形干渉が生じているものと考えられるので、 T_+ と T_- を掛け合わせた $T_+ \times T_-$ の値を縦軸に示した。図の(a)に示した、 f_1 と f_2 のスペクトルピークのみが現れる段付き部中心 ($y/d_1=0, z/d_1=0$) の背後では、 f_1 との自己干渉を示すピークは現れているが、 f_2 との干渉を示すピークは現れてはおらず、この測定点では非線形干渉が生じていないことを示唆している。図の(b)に示した、4 つの全ての周波数のスペクトルピークが現れる測定点 ($y/d_1=0.2, z/d_1=0$) では、 f_1 と f_2 の間の非線形干渉を示すピークが f_2 のところに現れている。この位置は図 7 の(d)から分かるように縦渦の端に位置し、左右の主渦同士の Y 字型結合部が縦に延ばされる領域に位置するものと思われ、非線形干渉がこの Y 字型結合の変形と縦渦との干渉によって生じているものと考えられる。また図 13 の(b)では、 f_1 と f および f_1 と f_+ との間の非線形干渉を示すピークも見られる

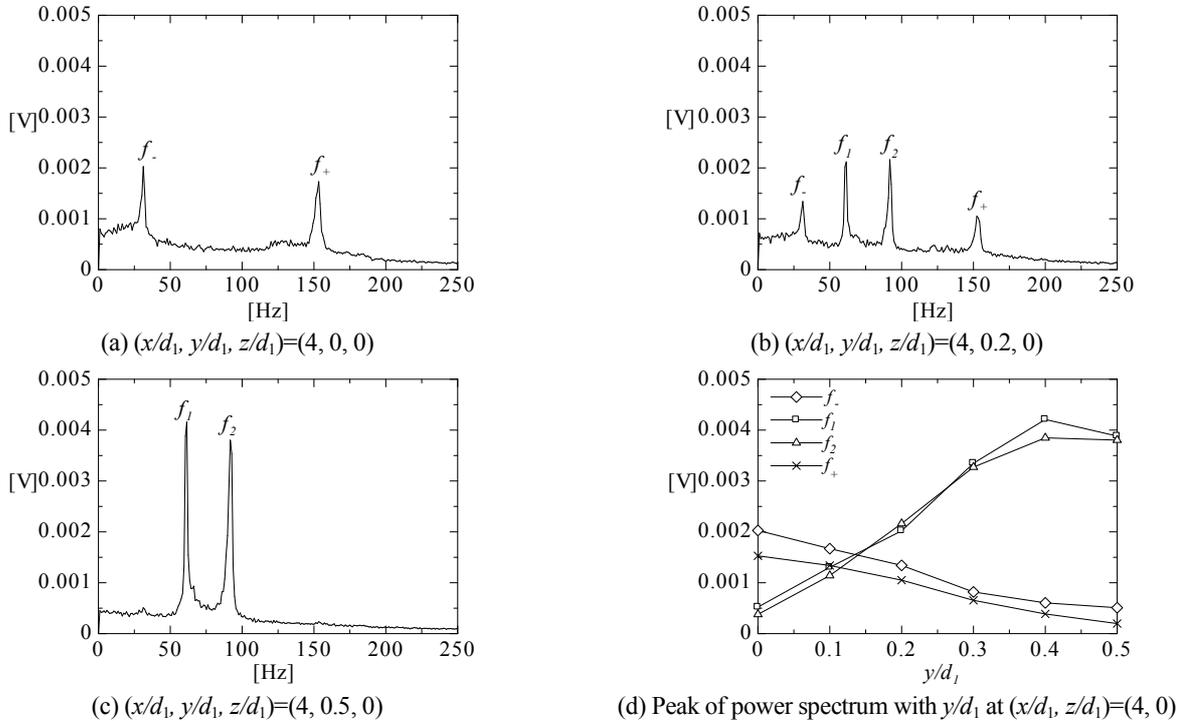


Fig. 12 Power spectra of velocity fluctuation behind the stepped cylinder

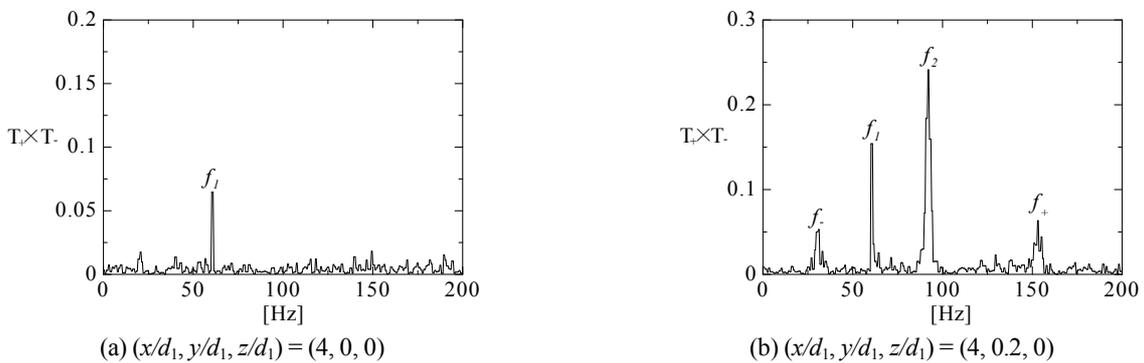


Fig. 13 TSC analysis based on f_1

ことから、非線形干渉によって生じた新たな周波数は下流において流れ場の色々な周波数と非線形干渉を起こして、さらなる新たな周波数を生成するものと考えられ、周波数間の非線形干渉は乱流における変動エネルギーのカスケードダウンの一つの要因をになっているものと考えられることができる。

5. 結 語

本研究では二つの異なる直径部を持つ段付き円柱を用いて人為的に二つの異なる渦放出周波数を生成し、後流内に形成される縦渦の時間変動を、主流に垂直な断面における速度変動の位相集合平均処理によって解析するとともに、周波数間の非線形干渉を特定位相差 TSC 法を用いて解析した結果、以下の結論を得た。

1. 二つの異なる渦放出周波数で変動する圧力信号をデジタル合成およびデジタルフィルタリング処理することで、縦渦の時間変動を速度変動の位相集合平均法によって調べるために必要な基準信号を生成することができた。
2. 位相集合平均処理の結果、段付き円柱の後流は時間と共に劇的に変化することが分かった。
3. 柱状物体の近傍後流では速度変化が大きいため X 型熱線プローブによる測定は適さないとされていたが、段付き円柱の段付き部付近においては縦渦の形成によってカルマン渦の形成が抑制されるため、縦渦周辺の後流内では速度変動は小さく、X 型熱線プローブが測定に適していることが分かった。
4. 位相集合平均処理の結果、縦渦は後流内に定在的に存在し、二つの主渦の放出周波数の差の周波数で乗じる左右の主渦の間欠的な結合によって盛衰を繰り返すことが分かった。
5. 非線形干渉によって生じる f_1 と f_2 の周波数成分は、段付き円柱の段付き部中央付近の後流の領域に発生していることが分かった。
6. 二つの異なる主渦の周波数である f_1 と f_2 および、それらの非線形干渉によって生じた差と和の周波数である f_+ と f_- の全てのスペクトルピークが現れる領域は段付き部中央の極狭い領域に限られ、その領域において f_1 と f_2 の間で非線形干渉が生じており、非線形干渉は左右の主渦の結合と変形および縦渦との干渉によって生じていることが分かった。

文 献

- (1) Anatol Roshko, "On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets", *National Advisory Committee Aeronautics Report*, No. 1191, (1954), pp. 1-25.
- (2) 横井嘉文, 亀本喬司, "二次元的な境界層はく離流れに潜在する初期の三次元構造 (円柱上層流境界層はく離の可視化観測)", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 57, No. 53 (1995), pp. 427-433.
- (3) 羽二生博之, 坂本弘志, 中村順, 小畑芳弘, "渦放出の不規則性における長周期変動 (局所 rms 値と循環変動のスペクトル解析)", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 61, No. 582 (1991), pp. 379-387.
- (4) 石川仁, 木谷勝, 小牧康之, 望月修, "乱流カルマン渦列の低周波数変調", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 62, No. 598 (1996), pp. 2180-2186.
- (5) Stefan Szepessy, "On the spanwise correlation of vortex shedding from a circular cylinder at high subcritical Reynolds number", *The Physics of Fluids*, Vol. 6, No. 7 (1994), pp.2406-2416.
- (6) Williamson C.H.K., "The natural and forced formation of spot-like 'vortex dislocations' in the transition of a wake", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 243 (1992), pp.393-441.
- (7) Williamson C.H.K., "Oblique and forced parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 206 (1989), pp. 579-627.
- (8) 横井嘉文, 亀本喬司, "二次元的な境界層はく離流れに潜在する初期の三次元構造 (円柱上層流境界層はく離のはく離領域側からの可視化観測)", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 57, No. 534 (1991), pp. 3273-3277.
- (9) P. G. Vaidya and M. J. Anderson, "Use of the trans-spectral-coherence technique to separate signal from noise", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 89, No.5 (1991), pp. 2370-2377.

- (10) Yogi, J., "Use of trans-spectral coherence technique to study the flow dynamics in the near wake of a cylinder", *Washington State University Department of Mechanical and Materials Engineering, MS thesis*, (1993).
 - (11) 呉平, 羽二生博之, 宮越勝美, "二次元円柱後流のスパン方向に同時に存在する異なった渦放出周波数間の非線形干渉", 日本機械学会論文集 B 編, Vol.70, No.699 (2004), pp.2838-2845.
 - (12) 呉平, 羽二生博之, 宮越勝美, "段付き円柱のスパン方向における異なった渦放出周波数間の非線形干渉による新たな周波数の生成", 日本機械学会論文集 B 編, Vol.73, No.725 (2007), pp. 103-111.
 - (13) 八木田幹, 児島佳弘, 松崎幸三, "段付き円柱の後流うずに関する研究", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 49, No.443 (1983), pp.1338-1344.
 - (14) 八木田幹, 河野雄三, 大谷哲也, "段付き円柱まわりの流れ", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 55, No.518 (1989), pp. 3044-3048.
-