

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*

呉 平^{*1}, 羽二生 博之^{*2}, 宮越 勝美^{*2}

Generation of New Frequencies by Nonlinear Interaction between Different Vortex Shedding Frequencies in Span Wise Direction of a Stepped Circular Cylinder

Ping WU, Hiroyuki HANIU^{*3} and Katsumi MIYAKOSHI

^{*3} Department of Mechanical Engineering Kitami Institute of Technology,
165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido, 090-8507 Japan

It is known that the low-frequency fluctuation about $1/20$ of vortex shedding frequency exists in the irregularity of the vortex shedding from a two-dimensional circular cylinder. Local vortex shedding frequency in spanwise direction is considered to differ from one point to another due to different local Strouhal number caused by flow three-dimensionality. Therefore, nonlinear interaction between vortex shedding cells of different frequencies is considered to be the cause of the low-frequency fluctuation. In this study, two distinctive different vortex shedding frequencies have been forced to occur at a local spanwise position with use of a stepped circular cylinder, and modified particular phase difference TSC (Trans-Spectral Coherence) analysis was conducted to investigate the presence of quadratic (or second order) nonlinear interaction in the wake. It is expected that the quadratic nonlinear interaction is generated as the result of complicated interaction between spanwise vortex cells of different frequencies.

Key Words: Vortex, Fluid Transient, Flow Measurement, Nonlinear Interaction, Trans-Spectral Coherence

1. 緒 論

円柱などの鈍い物体からの渦放出には、カルマン渦放出周波数の約 $1/30 \sim 1/20$ の周波数を持つ低周波数の変調が存在することが知られており、この低周波数変調の生成機構は、流れの三次元構造に関連していると考えられるようになってきた^{(1)~(6)}。この渦放出の不規則な現象のメカニズムの解明は、カルマン渦を応用した流量計の性能向上につながるだけでなく、新たな乱流制御手法の開発にもつながる可能性があり、工学的に重要である。Gaster⁽⁷⁾は円すい柱後流の速度変動を調べ、スパン方向における異なった周波数を持つ渦放出セル間の干渉によって、流速変動に低周波数の不規則変動が生じていることを報告している。Williamson⁽⁸⁾は、円柱のスパン方向にわずかに異なった周波数を持つ渦放出セルが存在し、その領域の境界に三次元的な渦転移(Vortex Dislocation)が生じており、その発生周期はカルマン渦の放出周期の20倍程度であることを報告した。さらに Williamson⁽⁹⁾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。このような周波数の一致は、流れ場における低周波数変調の周期が、スパン方向に同時に存在する異なった渦放出セルの周波数差に、依存していることを示唆するものである。著者ら⁽¹⁰⁾は周波数間の非線形干渉モデルに基づいて、周波数間スペクトル位相相関解析法(Trance-Spectral Coherence)⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を改良した特定位相差TSC解析法を用いて解析を行い、円柱後流における異なった周波数間の二次非線形干渉の存在を、定量的な計測によって確認した。よって、スパン方向の異なった周波数を持つ渦放出セル間の非線形的な結合が、この低周波変動の生成機構に関与しているものと考えられる。しかし、二次元円柱の場合、異なった渦放出周波数の差が平均渦放出周波数の $1/20$ 程度と非常に小さく、二つの周波数間の変調はスペクトルピークの裾野の広がりとして現れ、スペクトル分布において二つの周波数を識別できないため、周波数間二次非線形干渉における流れ構造をより詳しく調べることは困難である。本研究では段付き円柱を用いて、スベ

* 原稿受付 2006年6月9日。

^{*1} 正員, 北見工業大学SVBL(☎090-8507 北見市公園町165)。

^{*2} 正員, 北見工業大学機械システム工学科。

E-mail: harry@mail.kitami-it.ac.jp

クトル分布においても明りょうに識別可能な二つの異なる渦放出周波数を持つ領域を、流れ場に人為的にコントロールされた状態で生成した。段付き円柱接合部付近における後流のパワースペクトルに現れた、卓越周波数のマッピングによって流れ場の空間構造を把握し、短時間フーリエ変換により渦放出の時間-周波数特性を調べた。また、特定位相差 TSC 法を用いて、円柱近傍後流でのスペン方向に存在する異なった渦放出周波数間の、二次非線形干渉による新たな周波数の生成を調べた。さらに、周波数間二次非線形干渉が起こっている測定領域において、主流方向に垂直な断面での時間平均速度分布や渦度分布、およびせん断変形速度分布を調べた。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 本実験は前報⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾と同じ、断面が高さ 500 mm×幅 240 mm、長さが 2180 mm の測定部を有する回流形風洞を使用した。供試物体は図 1 に示すように、直径 30 mm と 20 mm で直径比が 3:2 の円柱で構成されており、段付き部から発生する高周波成分の影響を除去し、異なった渦放出周波数間の非線形干渉によって生じた高周波数成分の検出をしやすくするため、円柱接合部は 45° の面取りをした形状とした。また、本研究では太い円柱の直径を d_1 、細い円柱の直径を d_2 と定義し、円柱中心軸の接合部中央を原点として、流れ方向を x 、鉛直上向きを y 、スペン方向を z とした右手座標系を用いた。ただし、 z 軸

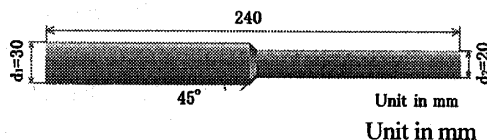


Fig. 1 The test body

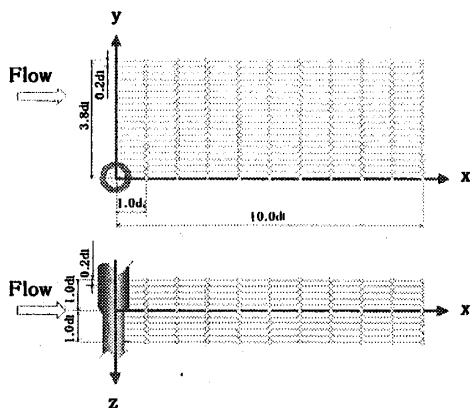


Fig. 2 Schematic view of coordinate system and measuring locations for velocity measurements

に関しては d_1 側を負、 d_2 側を正と定めた。また、 d_1 を代表長さとして、主流速 10 m/s におけるレイノルズ数は約 20 000 である。

速度変動の測定は I 形と X 形熱線プローブによって行われ、コンピュータへのデータ収集には 12 bit の A/D 変換器を用いた。本研究における渦放出周波数は、速度変動のパワースペクトルから求めた結果、直径 d_1 の太い円柱の渦放出周波数 F_1 は約 68 Hz、直径 d_2 の細い円柱の渦放出周波数 F_2 は約 110 Hz である。データサンプリングにおいては FFT 処理の際の折返し現象を防止するために、ローパスフィルタによるカットオフ周波数を、サンプリング周波数の 1/2 以下に設定した。またサンプリング周波数は、二つの渦放出周波数の和の周波数成分まで見るため、周波数和の約 1.5 倍の周波数まで観察できるように $F_s=1000$ Hz に設定した。

段付き円柱の接合部付近の後流における流れ場の空間構造を把握するために、パワースペクトルに現れた卓越周波数のマッピングを行った。マッピング範囲は、直径の異なる二円柱において生じる二つの渦放出周波数間で、非線形干渉が起こっているのが接合部付近の後流中であると考えて設定した。具体的な測定位置は、座標軸原点より x 方向に $1.0d_1$ 刻みで $1.0d_1 \sim 10d_1$ 、 y 方向に $0.2d_1$ 刻みで $0.0d_1 \sim 3.8d_1$ 、 z 方向に $0.2d_1$ 刻みで $-1.0d_1 \sim 1.0d_1$ の範囲の計 2 200 点とした。図 2 にマッピングにおける測定点の位置を示してある。各測定点においては、30 720 個の速度データを一組として 10 回ずつ計測した。

2.2 周波数間のスペクトル位相相関解析 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つ波動の非線形的相互作用 (位相のカップリング: phase coupling) を調べる手法である。著者ら⁽¹⁰⁾ は位相のカップリングの簡単な例として、二つの異なる変動周波数が f_1 と f_2 で、それぞれの位相角が θ_1 と θ_2 である余弦波信号の掛け算の結果、得られる関数を挙げている。すなわち、周波数間非線形干渉が起きると、新たに f_1+f_2 、 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ことになる。この場合 f_1+f_2 、 f_1-f_2 といった周波数成分は、元の周波数成分 f_1 と f_2 に依存したものになる。このような非線形的干渉 (入力の加減算以外の演算) によってできた成分のことを、位相のカップリングであると表現する。TSC 解析は信号成分のうち、カップリングであるような成分の存在や程度を調べる解析方法である。本研究では周波数間非線形干渉の強さを表すパ

ラメータとして、式(1)と式(2)に示すように T_+ と T_- を定義する。

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

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

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

ここで、 $\Delta\theta$ は実測データを用いた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、 $\Delta\theta_-$ 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。また $\langle \rangle$ は多数のフーリエ変換を行ったときの平均値である。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。重み関数が $-\pi \sim \pi$ の間でガウス関数の形を表すように、ガウス関数の標準偏差を $\sigma = \pi/4.0$ とした。さらに、先の報告⁽¹⁰⁾ で生じていたランダムな位相変動によるバイアスを抑制するために、式(1)のガウス関数の $-\pi$ から π の範囲での積分値が零になるように、 $b = \sqrt{\pi/32}$ とした。

3. 実験結果および考察

3.1 段付き円柱後流における卓越周波数 図3は、円柱後流 $x=4d_1$, $y=0.2d_1$ の測定位置において、スペン方向の位置のみを変化させて流れ場の卓越周波数の変化を示したものである。ただし図3では、この測定の中で最もピークエネルギー密度の高かった $x=$

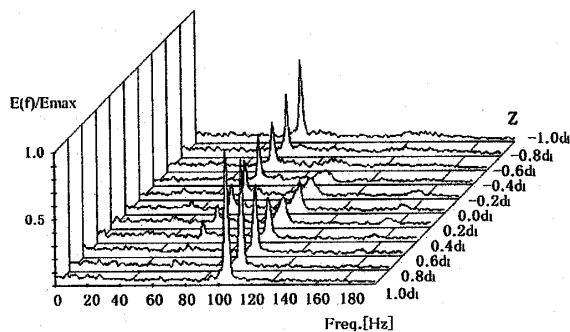


Fig. 3 Power spectra in span wise direction at $x=4d_1$, $y=0.2d_1$

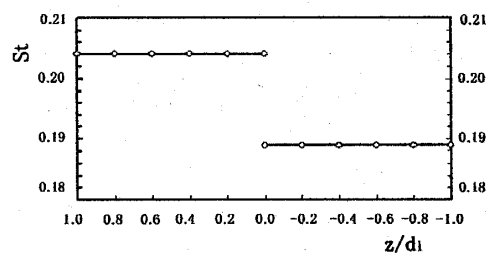


Fig. 4 Strouhal number in span wise direction

$4d_1$, $y=0.2d_1$, $z=1.0d_1$ の位置における、周波数 F_2 のパワースペクトル密度のピーク値で無次元化している。図3に示すように、段を境にしてスペクトルピークの強さが、一方の渦放出周波数成分から他方の周波数成分へと移り変わっている。段付き円柱の接合部付近の $-0.4d_1 \leq z \leq 0.4d_1$ の範囲では、二つの異なる渦放出周波数 F_1 と F_2 が共存している。また、この二つの渦放出周波数が共存する領域においては、スペクトルピークの密度が低下していることがわかる。図4は、図3で示されたパワースペクトルの第1卓越周波数から求めたストローハル数 St を示す。図4では、横軸をスペン方向の位置とし、縦軸の St における代表長さは、周波数 F_1 と周波数 F_2 については、それぞれ円柱直径 d_1 および d_2 を用いている。図4からわかるように、太い円柱側では $St=0.189$ であり、細い円柱側の $St=0.204$ と比べて約7.4%低下している。このようなスペン方向におけるストローハル数の変化は、八木田ら⁽¹³⁾ の $Re=2000$ における直径比0.8の段付き円柱の場合にも見られた。八木田ら⁽¹⁴⁾ は、主流が太いほうの円柱背後に流れ込んで背圧が高まり、円柱表面のはく離点が前方に移動するために、ウェークの幅が増大してストローハル数が減少すると推測した。

また、図3のスペクトル分布図の円柱接合部付近の位置に着目すると、180 Hz と 40 Hz 付近の周波数において、わずかなピークが現れていることがわかる。しかし、パワースペクトル密度の値が最も大きい値で無次元化されているため、これらの卓越周波数のピークはあまり明確ではない。そこで図5に、 F_1 と F_2 のスペクトルピークが同時に見られる測定範囲内で、代表的な $x=4d_1$, $y=0.2d_1$, $z=0.2d_1$ の位置におけるパワースペクトルを示した。図5から段付き円柱の接合部の下流においては、それぞれの円柱からの渦放出周波数 $F_1=68$ Hz と $F_2=110$ Hz 以外に、図中▼印で

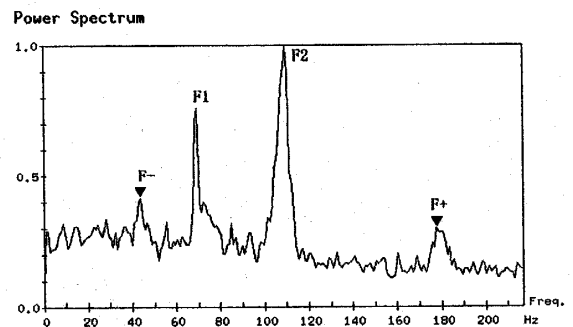


Fig. 5 Dominant frequencies detected at $x=4d_1$, $y=0.2d_1$, $z=0.2d_1$

示すように 42 Hz と 178 Hz においてもスペクトルピークが現れていることがわかる。この二つの周波数はそれぞれ F_1 と F_2 の差と和に等しいので、以下では F_- と F_+ と定義する。またこの周波数の一致から、 F_- と F_+ が F_1 と F_2 に依存し、 F_1 と F_2 の周波数間の非線形な相互作用によって生成されているものと考えられる。よって、段付き円柱の後流は、 F_1 , F_2 ,

F_- と F_+ の四つの卓越周波数で支配されていることがわかる。

3・2 段付き円柱後流における卓越周波数の空間的な分布 図 6 には段付き円柱の後流での、卓越周波数の全測定領域における空間的なスペクトル密度分布を示す。ここで、同じ濃さで示した所は、各周波数でのパワースペクトルピーク密度が同じ測定点である。

まず、異なった二つの渦放出周波数 F_1 と F_2 の分布状況を見てみる。図 6(a) と (b) では、 F_1 と F_2 はそれぞれ発生元である円柱後流で、かなり広範囲にわたって検出されている(特に黒色の現れている部分に着目)ことがわかる。また、 F_1 は細い円柱後流側にもある程度入り込んで、広い領域にわたって検出されるのに対して、 F_2 はおおむね細い円柱後流内に分布している。したがって太い円柱の後流渦は、段付き円柱の接合部において細い円柱の後流渦を取り込んで、細い円柱側の下流部へ徐々に広がっているものと考えられる。また、 F_1 と F_2 がともに強く現れているのは円柱接合部付近の下流であり、接合部からスパン方向に離れるに従い、二つの周波数間のスペクトル密度の差が大きくなり、次第にそれぞれの径の直棒円柱後流のスペクトル分布に近づいていく。よって、周波数間の非線形干渉による新たな周波数成分は、円柱接合部付近の後流内で生成されていると考えることができる。

次に、 F_1 と F_2 の周波数間非線形干渉により生じた可能性のある、周波数変動について見てみる。図 6(c) では、 F_- は円柱接合部より若干細い円柱奇りの位置である $z=0.2d_1$ を中心に、比較的広範囲に分布していることがわかる。また F_+ には、図 5 に示されるように明確な卓越周波数が見られ、周波数間非線形干渉によって、新たな周波数成分の生成が行われたことを示しているが、その分布状況は図 6(d) からわかるように、後流中心付近の比較的狭い範囲に限られている。これは F_+ のスペクトル密度が他の卓越周波数に比べて低いため、この周波数変動の生成源から離れると、雑音に埋もれてしまうためと考えられる。なお x 方向における分布の変化を見ると、 F_1 と F_2 のスペクトルは $x/d_1=4.0\sim 6.0$ の場合に比べて、 x/d_1 が 3.0 以下において大幅に弱まっており、TSC 解析によって検出される非線形干渉も弱いものと思われる。

3・3 段付き円柱後流速度変動の時間-周波数特性

円柱後流 $x=4d_1$, $y=0.2d_1$ の測定位置において、スパン方向の位置のみを変化させて、流れ場における速度変動周波数の時間変動特性を調べた。図 7 は、スパン方向の各測定位置で計測した主流方向速度成分 u の時系列データに対して、前報⁽⁶⁾ で用いた短時間フー

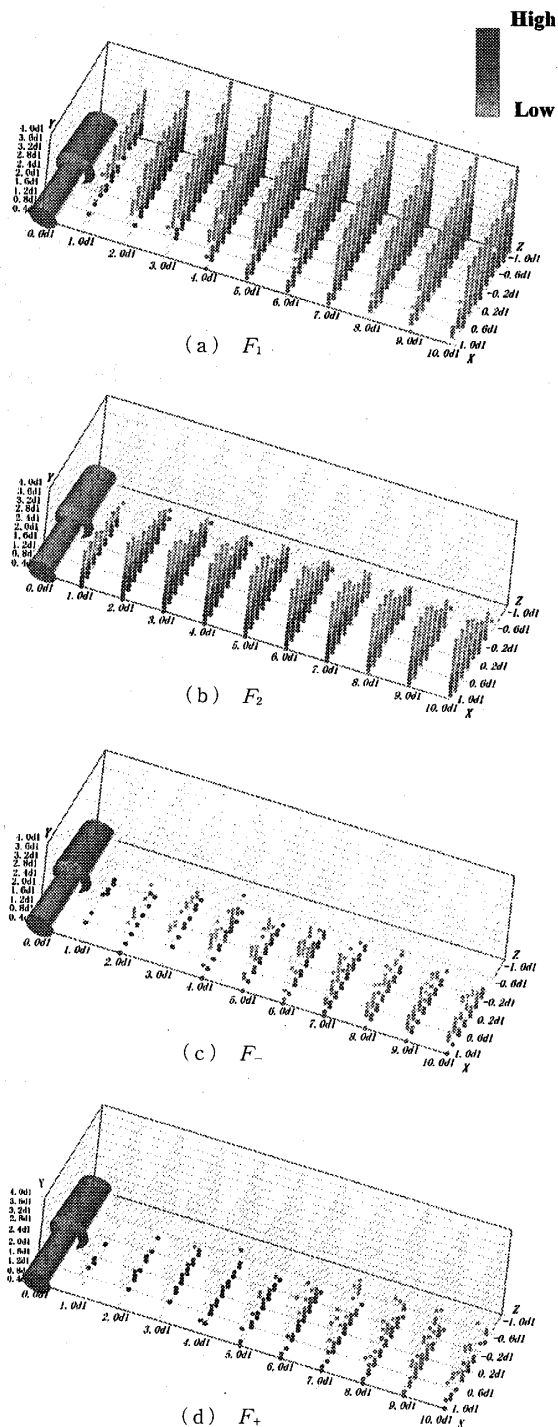


Fig. 6 Distributions of different dominate frequencies existing in the wake

リエ変換解析を行い、その結果から代表的な部分を抜粋して約0.8s間示したものである。図7では横軸に時間 t を、縦軸に周波数 f をとって、フーリエ係数 $W(f, t)$ の実部と虚部を合成した絶対値 $|W|$ の等値分布を、グレースケールで色分けして表示してある。

図7(a)に示すように、 $z=1.0d_1$ の細い円柱寄りの測定位置においては、単独直円柱後流の検出結果と似ており、主に周波数 $F_2(110\text{Hz})$ の所に $|W|$ の極大値が時間的に連続して現れている。この測定位置においては、周波数 F_2 が後流の流れ場を支配していることがわかる。円柱接合部付近に近づくと、図7(b)に示す $z=0.2d_1$ の場合のように、流れ場における F_1 、 F_- 、 F_+ の卓越周波数に対応する $|W|$ の極大値も、検出できるようになる。また、 F_1 と F_2 に対応する $|W|$ の極大値の持続時間が比較的長いのにに対して、 F_+ と F_- に対応する $|W|$ の極大値の持続時間は短い。よって、 F_+ と F_- は後流生成の始めから存在しているものではなく、 F_1 と F_2 の周波数間での相互干渉の結果、間

欠的に生じているものと考えられる。さらに、図7(c)の太い円柱側の $z=-1.0d_1$ では、 F_1 に対応する $|W|$ の極大値のみがほぼ連続して現れており、周波数 F_1 が後流の流れ場を支配していることがわかる。これらの結果から、 F_+ と F_- が同時に検出された所で、周波数間非線形干渉が間欠的に生じているものと考えられる。

3.4 異なった渦放出周波数間のスペクトル位相相関
3.3節の結果に基づき、段付き円柱後流で周波数間非線形干渉が起こっている可能性の高い $z=0.2d_1$ 、 $x=4d_1\sim 6d_1$ の領域において、 y 方向の測定点を $y=0.0d_1\sim 0.6d_1$ の範囲で変化させてTSC処理を行った。

まず図8に、円柱後流 $x=4.0d_1$ 、 $y=0.2d_1$ 、 $z=0.2d_1$ の測定点における基準周波数を、それぞれ F_1 と F_2 にした場合のTSCの結果を示した。なお、周波数間非線形干渉の強さをより明確に示すために、図中のTSCは $T_+ \times T_-$ の結果を示してある。図8(a)の基準周波数を F_1 としたTSC解析結果から、図中Aで示した変動周波数には、 F_1 の変動周波数との間に明らかな非線形干渉の存在を示す大きな相関値が現れている。また、図5のパワースペクトル分布と対比してみると、Aの変動周波数が F_2 と一致していることがわかる。よって、流れ場に存在する高周波数成分 F_+ と低周波数成分 F_- は、 F_1 と F_2 の周波数間での非線形干渉により、生成されているものと考えられる。なお、図8(b)の基準周波数を F_2 としたTSC解析結果においても、 F_2 と周波数間非線形干渉を起こして

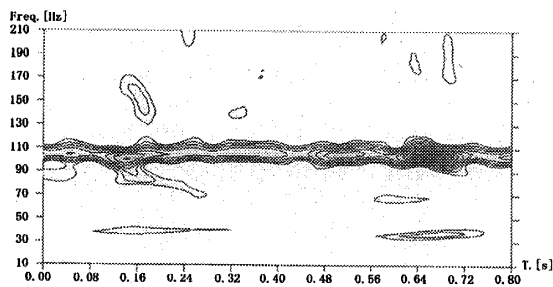
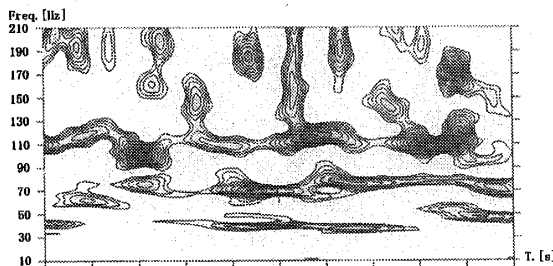
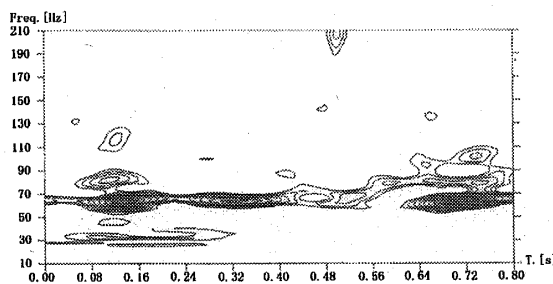
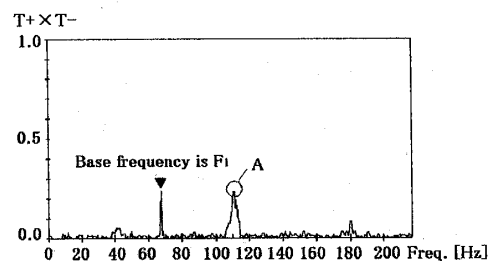
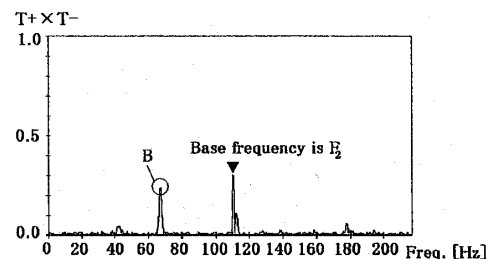
(a) $x=4d_1$, $y=0.2d_1$, $z=1.0d_1$ (b) $x=4d_1$, $y=0.2d_1$, $z=0.2d_1$ (c) $x=4d_1$, $y=0.2d_1$, $z=-1.0d_1$

Fig. 7 Time-frequency characteristic of velocity in the wake

(a) Base frequency is fixed to F_1 (b) Base frequency is fixed to F_2 Fig. 8 TSC result at $z=0.2d_1$, $x=4d_1$, $y=0.2d_1$

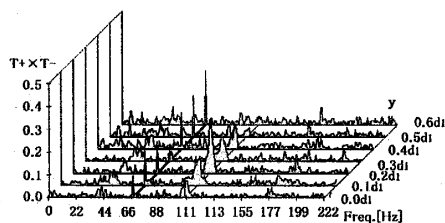
いる B の変動周波数が F_1 であることが確認できる。また、 F_1 と F_2 の間の非線形干渉を示す二つのピークが現れる以外に、周波数 F_- と F_+ の付近にも、周波数間非線形干渉を示す弱いピークが現れている。よって、周波数間非線形干渉により新たに生じた周波数 F_- と F_+ が、さらに F_1 と F_2 の間で周波数間非線形干渉を起こし、その結果次々と新たな変動周波数を作り出していると考えられる。

さらに、図9~11には、円柱近傍下流のスパン方向で $z=0.2d_1$ 、主流方向で $x=4.0d_1$ 、 $5.0d_1$ 、 $6.0d_1$ の三つの測定断面において、 y 方向の測定点を $y=0.0d_1 \sim 0.6d_1$ の範囲で変化させた TSC 処理の結果を、三次元的に示した。まず、図9~11の(a)に示す基準周

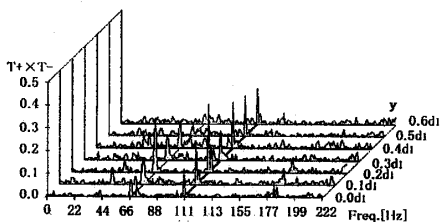
波数を F_1 としたときの TSC 解析結果からは、 F_2 の周波数において周波数間非線形干渉を示す大きな相関値が現れている。同様に、図9~11の(b)に示す基準周波数を F_2 としたときの解析結果にも、 F_1 の周波数において周波数間非線形干渉を示す相関値のピークが現れている。さらに、主流方向の $x=4.0d_1$ 、 $5.0d_1$ 、 $6.0d_1$ の三つの測定断面のうち、 $x=4.0d_1$ において、周波数間非線形干渉が最も強く検出されていることがわかる。なお、 x/d_1 が3.0以下の領域においても TSC 解析を行ったが、検出された非線形干渉は、 $x/d_1 = 4.0 \sim 6.0$ の場合よりもかなり弱いものであった。これらのことから、流れ場に存在する卓越周波数 F_1 と F_2 の間に周波数間非線形干渉が生じ、その結果、周波数差に対応した低い周波数変動と、周波数和に対応した高い周波数変動が生成されているものと考えられる。また、この周波数間非線形干渉が、段付き円柱の接合部下流のウェークの中心から少し上の、約 $y/d_1 = 0.2 \sim 0.3$ の測定位置において最も強く生じていることがわかった。

3・5 主流に垂直な断面での流速測定結果

図12は、円柱後流において非線形干渉が最も強く検出された $x=4.0d_1$ における、主流方向に垂直な測定断面での y と z 方向成分の時間平均流速 v と w の合成ベクトルを、下流側から見た図である。図12において、横軸はスパン方向 z 、縦軸は上下方向 y である。図12に示すように、太い円柱側において細い円柱側へ向かうスパン方向の速度成分が発生しているのがわかる。また、細い円柱側においては、円柱中心軸から離れた所ではスパン方向の流れの向きは変わらないが、円柱

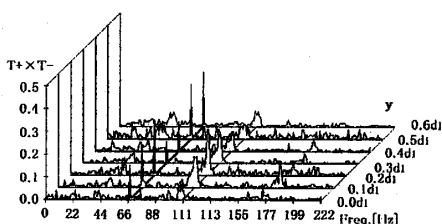


(a) Base frequency is fixed to F_1

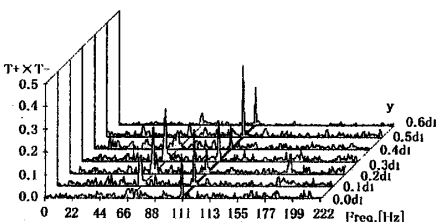


(b) Base frequency is fixed to F_2

Fig. 9 TSC results at $z=0.2d_1$, $x=4d_1$

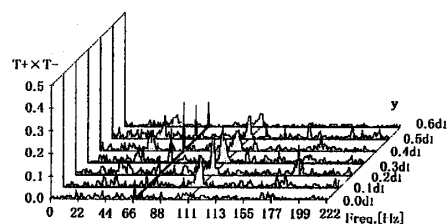


(a) Base frequency is fixed to F_1

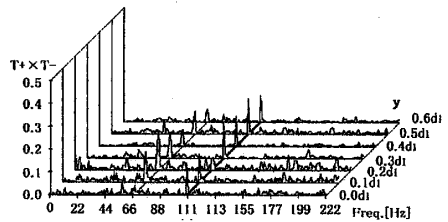


(b) Base frequency is fixed to F_2

Fig. 10 TSC results at $z=0.2d_1$, $x=5d_1$



(a) Base frequency is fixed to F_1



(b) Base frequency is fixed to F_2

Fig. 11 TSC results at $z=0.2d_1$, $x=6d_1$

中心軸付近では流れの向きが逆となって接合部へ向い、その結果円柱接合部の左上と左下では、流れが接合部に向かって急に曲がっており、上下対称な位置に x 方向を軸とする回転速度成分があるように思われる。この図 12 全体に見られる太い円柱側から細い円柱側へ向かう流れは、主流の流れ込みによる太いほうの円柱背圧の上昇によるものと思われる。また、細いほうの円柱中心付近で円柱接合部に流れが向かうのは、 x 方向に軸を持つ縦渦が周囲の流体を連行するた

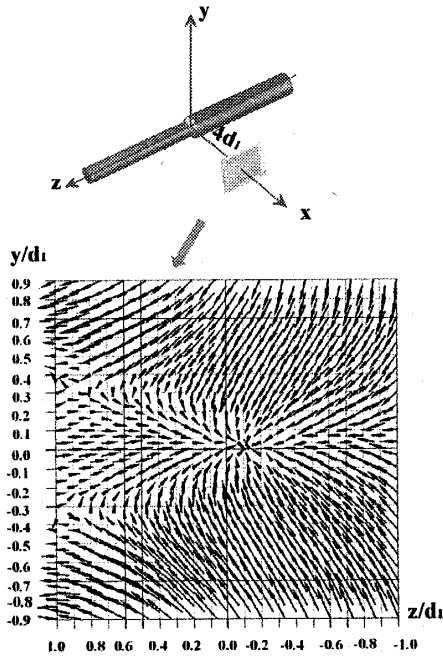


Fig. 12 Velocity vectors at the cross-section of $x=4.0d_1$

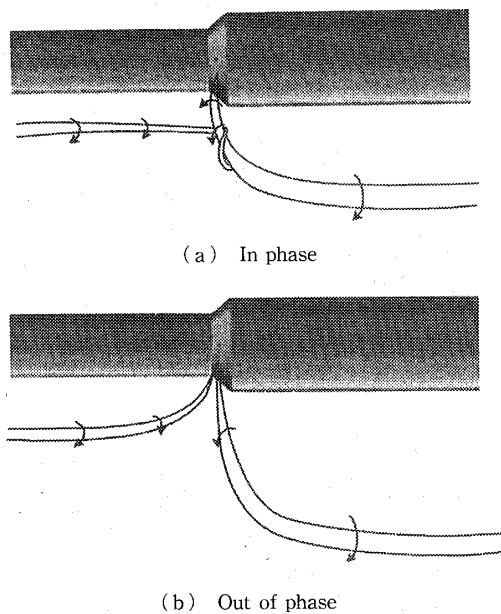


Fig. 13 Sketches of "in phase" and "out of phase" vortices formation

めだと考えられる。一方縦渦の生成については、スパン方向に軸を持った主渦が太いほうの円柱背後に巻き込まれるとき、その主渦の円柱接合部側の端が上流側に曲がって接合部に付着し、下流側から見たときに円柱の上側には x 方向を軸とする反時計回りの回転が、下側には時計回りの回転が生じるものと思われる。その後、それらの部分が主流の下流への移動に伴って引き伸ばされて、 x 方向に軸を持つ縦渦が部分的に形成されるものと思われる。また、円柱接合部をはさんで左右の主渦の放出位相が近いとき (in phase)⁽⁹⁾ には、図 13(a) に示すように細いほうの円柱背後に形成される主渦は、円柱接合部側の端が下流側へ曲がって太いほうの円柱背後の主渦につながる縦渦の部分に、絡みつくように結合するものと思われる。なお、二つの主渦が絡み合うように結合するようすは、Williamson⁽⁹⁾ の可視化写真(図 19, 20, 24)に明りように示さ

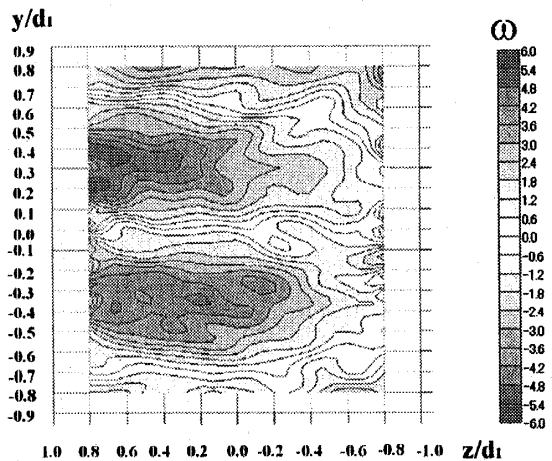


Fig. 14 Vorticity distribution at the cross-section of $x=4.0d_1$

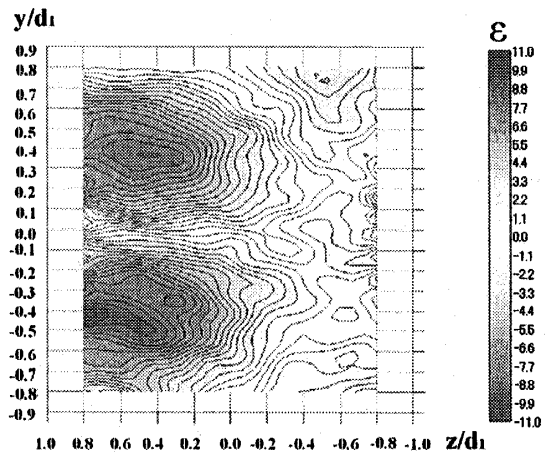


Fig. 15 Shear velocity distribution at the cross-section of $x=4.0d_1$

れている。この結合により縦渦の部分に渦度が供給されて、縦渦が強化されると考えられる。これに対して、左右の主渦の放出位相が離れている (out of phase) とときには、左右の主渦は結合されないため縦渦が弱まるものと思われる。この縦渦強化の間欠性が、 F_1 と F_2 の非線形干渉の結果生じると思われる、 F_- と F_+ の間欠性に関わっているものと考えられる。一方、この左右の主渦の結合と縦渦の強化によって、主流の流体が太いほうの円柱背後に流れ込んで、ストローハル数が減少するものと思われる。

時間平均速度ベクトルの分布から、断面内の渦度 $\omega(\partial w/\partial y - \partial v/\partial z)$ とせん断変形速度 $\varepsilon(\partial v/\partial z + \partial w/\partial y)$ を求め、それぞれ図 14 と図 15 に示した。図 14 と図 15 には、図 12 において接合部の左上および左下で流れの方向が大きく曲がる領域に、縦渦の存在を示唆する渦度とせん断変形速度が集中する領域が見られる。この領域内における TSC 解析には、速度変動波形に含まれる二つの周波数 F_1 と F_2 間の非線形干渉が検出されたことから、円柱接合部をはさんで、左右の主渦が結合しながら部分的な縦渦領域を形成する過程で、流れの非線形干渉が間欠的に生じているものと考えられる。この縦渦の挙動と非線形干渉の間欠性に関しては、今後段付き円柱内に埋め込んだ圧力センサからの信号を基準とした、位相集合平均法⁽¹⁵⁾によって明らかにすることを考えている。

4. 結 論

(1) 段付き円柱のスパン方向に、同時に存在する異なった二つの渦放出周波数間では、二次非線形干渉が起きており、その結果二つの渦放出周波数の和と差の周波数変動が生成されていることがわかった。

(2) 短時間フーリエ変換の解析から、非線形干渉が生じている領域においては、二つの渦放出周波数成分の変動は連続的に存在するが、和と差の周波数成分の変動は間欠的であり、非線形干渉も間欠的に生じていることを示唆する結果が得られた。

(3) 段付き円柱の場合、周波数間非線形干渉が明確に現れる範囲は、2 円柱接合部下流のウェークのセンタから y 方向に少し離れた、 $y/d_1=0.2\sim 0.3$ 付近であることがわかった。

(4) 段付き円柱接合部下流においては、縦渦の存在を示唆する渦度およびせん断変形速度が集中する領域が見られる。その領域内では二つの異なる周波数間の非線形干渉が生じており、左右二つの主渦が結合しながら主流方向に曲がって、部分的な縦渦領域を形成する過程で流れの非線形干渉が間欠的に生じている

ものと考えられる。

文 献

- (1) Yokoi, Y. and Kamemoto, K., The initial stage of three-dimensional vortex structure existing in a two-dimensional boundary layer separation flow (the observation of laminar boundary layer separation over a circular cylinder by flow visualization), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 57, No. 534 (1991), pp. 427-433.
- (2) Yokoi, Y. and Kamemoto, K., The initial stage of three-dimensional vortex structure existing in a two-dimensional boundary layer separation flow (the visual observation of laminar boundary layer separation over a circular cylinder from the side of a separated region), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 57, No. 541 (1991), pp. 3273-3277.
- (3) Szepešy, S., 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.
- (4) Haniu, H. et al., Long time scale fluctuation in the irregularity of vortex shedding (spectral analysis of the local rms value and circulation), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 61, No. 582 (1995), pp. 379-387.
- (5) Ishikawa, H. et al., Low-frequency modulation of turbulent karman vortex street, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 62, No. 598 (1996), pp. 2180-2186.
- (6) Haniu, H. et al., Long time scale fluctuation in the irregularity of vortex shedding (different vortex shedding frequencies detected at the same time in the spanwise direction of wake of a two-dimensional circular cylinder), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 68, No. 673 (2002), pp. 2557-2563.
- (7) Gaster, M., Vortex shedding from slender cones at low Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 38 (1969), pp. 565-576.
- (8) Williamson, C. H. K., Oblique and 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.
- (9) 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.
- (10) Wu, P. et al., Nonlinear interaction between different vortex shedding frequencies existing at the same time in the spanwise direction of a wake behind two-dimensional circular cylinder, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 70, No. 699 (2004), pp. 2838-2845.
- (11) Vaidya, P. J. and Anderson, M. J., Use of the trans-spectral-coherence technique to separate signals from noise, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 89 (1991), pp. 2370-2377.
- (12) 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).

- (13) Yagita, M. et al., Flow around a stepped circular cylinder, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 55, No. 518 (1989), pp. 3044-3048.
- (14) Yagita, M. et al., A study on the wake vortices of a stepped circular cylinder, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 49, No. 443 (1983), pp. 1338-1344.
- (15) Haniu, H. et al., Transitional characteristics of flow in a vortex-generating region behind a body by means of LDV, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 59, No. 567 (1993), pp. 3303-3307.
-