食違い配列された2円柱周辺の流れに関する研究*

(第2報, ウェーブレット解析併用によるストローハル数の評価)

坂本 弘 志^{*1}, Md. Mahbub ALAM^{*2}
金 相 一^{*2}, 高井 和 紀^{*3}

A Study on Flow Around Two Circular Cylinders in Staggered Arrangements (2nd Report, Estimation of Strouhal Number Using in Combination with Wavelet Analysis)

Hiroshi SAKAMOTO^{*4}, Md. Mahbub ALAM,
Sangil KIM and Kazunori TAKAI

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

Characteristics of vortex shedding of two identical circular cylinders in staggered configurations were investigated experimentally at a Reynolds number of 5.5×10^4 . Measurements were performed for stagger angles $\alpha = 10^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ and 75° , and gap spacing $T/D = 0.1 \sim 5.0$, where α is the angle between the free-stream flow and the line connecting the centers of the cylinders, T is the gap width between the cylinders, and D is the diameter of the cylinders. The estimation of vortex shedding frequencies was done by using in combination with wavelet analysis results of fluctuating pressures on surface of two cylinders. The new findings for vortex shedding frequencies of two cylinders as follows. (i) For $\alpha = 10^\circ$, two Strouhal numbers appears for the range of $T/D = 0.1 \sim 2.1$, in which two flow patterns switch from one to the other. (ii) For $\alpha = 25^\circ$, in the range of $T/D < 1.1$, the two cylinders behave like a single bluff body at least with regard to vortex shedding frequency. Also, for the range of $T/D = 1.1 \sim 1.8$, two stable flow patterns with regard to vortex shedding frequency persist. (iii) For $\alpha = 45^\circ$, two stable flow patterns with regard to Strouhal numbers persist for $T/D = 0.8 \sim 2.1$. (iv) Strouhal number distributions for $\alpha = 60^\circ$ and 75° are almost the same in nature as those for $\alpha = 45^\circ$.

Key Words: Two Circular Cylinders, Staggered Arrangement, Vortex Shedding Pattern, Strouhal Number, Wavelet Analysis, Bistable Flow

1. ま え が き

本研究は、食違い配列された2円柱の定常ならびに非定常流体力、および渦放出特性に関して、実験的研究を行ったものである。第1報⁽¹⁾では2円柱の設置角 α および間隔 T/D を種々変化させた場合の定常、ならびに非定常流体力特性を詳細に調べるとともに発現する流れパターンと流体力との関係について明らかにした。本報では、同じく食違い配列された2円柱からの放出渦のストローハル数の特性を明らかにしたものである。食違い配列された2円柱のストローハル数に関する研究は比較的少なく、いくつかの報告をみるにすぎない^{(2)~(9)}。そのなかでKiyaら⁽²⁾は、種々に配列された2円柱後方の変動速度のスペクトル解析に

よって、2円柱のストローハル数を明らかにしている。しかし双安定流れを含めた発現する種々の流れパターンとストローハル数との関係については明らかにしていない。同じくIshigaiら⁽³⁾, Zdravkovich-Priden⁽⁴⁾, Price-Paidousis⁽⁵⁾, Guら⁽⁶⁾, およびSumner-Richards⁽⁷⁾は、食違い配列された2円柱のストローハル数を調べているが、限られた配列に関したものである。またストローハル数と流れパターンとの関係については言及していない。最近Sumnerら⁽⁸⁾は、 $Re = 850 \sim 1900$ の領域でPIV法を適用し、食違い配列された2円柱の周辺の流れを詳細に調べ、設置角 α , および間隔 T/D に基づく流れパターンの分類を行っている。しかしストローハル数と分類した流れパターンとの関係の検討は、不十分で不明な点も多い。またGu-Sun⁽⁹⁾は、近傍で食違い配列された2円柱周辺の流れ、特に上流側円柱からはく離するせん断層の挙動の相違に基づいて、発生する流れパターンを明らかにしている。しかし流れパターンとストローハル数との関係についての検討は行っていない。以上述べたよう

* 原稿受付 2003年10月20日。

^{*1} 正員, フェロー, 北見工業大学機械システム工学科(〒090-8507 北見市公園町165)。

^{*2} 学生員, 北見工業大学機械システム工学科。

^{*3} 正員, 北見工業大学機械システム工学科。

E-mail: sakamoto@mech.kitami-it.ac.jp

本研究は、2円柱の設置角 α 、および間隔 T/D を種々変化させて、ストローハル数を詳細に調べるとともに、発現する流れパターンとの関係を明らかにしたものである。これまで物体から放出される渦のストローハル数の評価は、後流の変動速度、あるいは変動流体力のスペクトル解析によって行われている。しかし変動波形のスペクトル解析は、卓越周波数、ならびにエネルギーレベルの大きさの評価には有効であるが、それらの時間変化に対する情報を得ることができない。このようなスペクトル解析の不十分を補うために、最近種々の変動波形解析にウェーブレット解析が用いられてきている。しかし流体工学の分野での適用は少ない。そのなかで Li-Nozaki⁽¹⁰⁾、および Yilmaz-Kodal⁽¹¹⁾ は、ウェーブレット解析を適用し、軸対称ジェットの周波数解析を行っている。また Hamdan ら⁽¹²⁾ は、円柱の流力振動の評価にウェーブレット解析を適用している。最近著者らは、ウェーブレット解析を行い、並列配列された2円柱に発現するスイッチング流れの解析を行い、発現時間等を評価するうえで、ウェーブレット解析は極めて有用であることを示した⁽¹³⁾。本研究においても、変動圧力波形に関してスペクトル解析、およびウェーブレット解析を適用し、2円柱から放出される渦の特性の評価を行った。

実験に当たっては、第1報⁽¹⁾と同様の断面 $0.3\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 、長さ 2.3 m の測定部を有する還流形風洞を用いた。実験に用いた2円柱は、 49 mm の同一直径とし、軸長は測定部の幅と同一の 300 mm である。2円柱から放出される渦の周波数の測定は、円柱表面上の変動圧力のスペクトル解析に基づいて行った。図1は、2円柱の設置状態を示したものである。設置角 α は、2円柱の中心を結んだ線と主流とのなす角、間隔 T は2円柱のすきま幅とした。また2円柱表面に沿う角度 θ は、上流側円柱では左回り、下流側円柱では右回りを正とした。さらに2円柱からはく離するせん断層は、2円柱のすきま側を Inner shear layer、外側を Outer shear layer とした。図2は、円柱表面の変動圧力を測定するに用いた、圧力変換器(Toyoda PD 104 K)の取付状態を示したものである。その状態における圧力変換器の周波数応答特性は、 $0\sim 500\text{ Hz}$ の範囲でゲインファクタは、 1 ± 0.06 であった。2円

Fig. 1 Notation of staggered configuration

Fig.2 Installation of a pressure transducer inside a cylinder

実験に当たっては、第1報⁽¹⁾と同様に主流の流速 U_0 を 17 m/s 一定として行った。そのときのレイノルズ数 $Re (= U_0 D / \nu)$ は、 5.5×10^4 であった。ストローハル数の測定は、設置角 α を 10, 25, 45, 60° および 75° の五とおり、2円柱の間隔 $T/D = 0.1 \sim 5.0$ の範囲で種々変化させて行った。なおストローハル数に対する風洞の閉そく比の補正は行っていない。またフローパターンの観測は、第1報と同一の装置および方法によって行った。

3・1 ウェーブレット解析 本研究で2円柱のストローハル数の評価に当たって採用した、円柱表面上の圧力変動波形のウェーブレット変換は、次式で定義される。

$$W(a \cdot b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int p(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \dots\dots\dots (1)$$

$W(a \cdot b)$ はウェーブレット係数、 $p(t)$ はウェーブレットとよばれる解析波形である(本研究では変動圧力波形)。 Ψ^* は Ψ の複素共役数、 a は解析波形中の種々の大きさの変動成分を抽出するためのスケーリングパラメータ、 b は解析信号中の時間軸に沿ってウェーブレットを移動させる時間軸パラメータである。ウェー

Fig. 3 Strouhal number of two circular cylinders in tandem arrangements

Fig. 4 Strouhal number for a square cylinder and a circular cylinder in tandem arrangements

プレートとしていくつかの形のもが提案されているが、本研究では Morlet ウェーブレット、

$$\Psi(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \dots\dots\dots (2)$$

ならびに Gabor ウェーブレット

$$\Psi(t) = \left(\frac{\omega_0}{\gamma}\right)^{1/2} \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-(\omega_0 t/\gamma)^2/2} \dots\dots\dots (3)$$

を採用した。ここで $\gamma = \pi\sqrt{2/\ln 2}$ で、 ω_0 はウェーブレットの中の振幅変調させた正弦波の周波数を示すもので、本研究では $\omega_0 = 6$ ならびに時間解析よりも周波数解析に重点を置く場合には $\omega_0 = 12$ とした⁽¹⁴⁾。

3・2 設置角 $\alpha = 0^\circ$ の場合 図3は、著者らがすでに報告した設置角 $\alpha = 0^\circ$ (直列配列) における2円柱のストローハル数を示したものである⁽¹⁵⁾。 $T/D = 3.0$ の臨界間隔付近では、二つの流れパターンが発生するために、 St は急変している。また $T/D = 3$ 付近を超えると、下流側円柱の渦放出は上流側円柱のそれに同期する形で行われる。このような渦放出の同期現象が、単独における二つの物体の St が異なる場合でも起こるものかどうかの検証を行ったものが、図4に示す結果である。検証に当たっては、図4中に示すように上流側に正方形柱(単独の場合の St は0.125)、下流側に円柱(単独の場合の St は0.18)とした場合と、上流

Fig. 5 Strouhal number distributions for $\alpha = 10^\circ$

(a) Downstream cylinder, $T/D = 1.0$ ($\theta = 90^\circ$)

(b) Downstream cylinder, $T/D = 3.0$ ($\theta = -90^\circ$)

(c) Downstream cylinder, $T/D = 1.0$ ($\theta = 40^\circ$)

Fig. 6 Power spectra and signal of fluctuating pressures

側に円柱、下流側に正方形柱とした場合の二とおりについて調べた。図4に示すようにいずれの場合も下流側の物体の渦放出は、上流側のそれに同期して行われることがわかる。このように直列配列された下流側の物体の渦放出は、上流側物体の渦放出周波数と異なっても、その渦放出がトリガとなって行われることがわかる。

3・3 設置角 $\alpha = 10^\circ$ の場合 図5は、2円柱の設置角 α を 10° とした場合における St の分布を示したものである。図5に示す結果において、二つの注目すべき現象が存在する。一つは、 $T/D = 1.3$ までにおい

 Fig. 7 Sketch of flow patterns for $T/D < 1.3$

て、図6(a), (b)に示す変動圧力のスペクトル解析、および図6(c)に示す変動圧力波形に認められるように、大きさおよび周波数の異なる二つの流れパターンが存在する。この二つの流れパターンは、円柱の表面流れの可視化観測に基づいて第1報⁽¹⁾ですでに明らかにしたように、図7に示す Mode 1, 2のパターンである。いずれの場合も上流側円柱の内側表面からはく離れたせん断層が下流側円柱に付着するが、Mode 1での下流側円柱の内側表面に沿う流れのはく離点は、Mode 2のそれに比べてかなり後退しているものとなっている。その結果 Mode 1のウェーク幅は、Mode 2のそれに比べて小さくなるために、ストローハル数は Mode 2の0.09に比べて、0.47とかなり高い値となっている。Gu-Sun⁽⁹⁾は、同じく $\alpha = 10^\circ$ で T/D を変化させた場合における St を測定し、Mode 1での St の存在を明らかにしているが、Mode 2での St を見だしていない。これは変動速度を測定したプローブの設置位置に問題があったために検出できなかったものと考えられる。また $T/D = 1.3$ を超えると Mode 1のみの流れパターンが発現するために、2円柱の St は0.47の値のみとなる。さらに $2.1 < T/D < 2.4$ では双安定流が発生するために、 St は急変している。

第2の注目すべき現象は、 $T/D = 2.4$ を超えると下流側円柱表面の変動圧力($\theta = -90^\circ$ の位置)において二つの St が存在することである。すなわち上流側円柱の渦放出周波数に同期した、単独円柱の St とほぼ同一となる $St = 0.18 \sim 0.19$ なるものと、 $St = 0.35 \sim 0.38$ なるものである。このような下流側円柱に発生する二つの St を明らかにするために、その表面上の $\theta = -90^\circ$ における変動圧力波形 [図8(a)に示す] に対してウェーブレット解析(Gabor ウェーブ

 Fig. 8 $\alpha = 10^\circ$, $T/D = 3.5$: wavelet scalogram of signal (a) by using Gabor wavelet

 (a) Visualized flow pattern at $T/D = 2.8$

 Fig. 9 Interaction of the incident vortices on the downstream cylinder for $T/D > 2.4$

レットを使用)を行ったものが図8(b)である。下流側円柱の変動圧力には、エネルギーレベルが高い $St = 0.175$ と、その2倍の周波数を有する $St = 0.35$ との二つが極めて規則的に出現している。この二つの St は、図9の流れパターンおよび模式図に示すように、低い St は下流側円柱から放出される渦放出周波数、高い St は上流側円柱から交互に発生する渦の通過に基づくものである。そのために高い St は、低い St の2倍の値を有することになる。

3・4 設置角 $\alpha = 25^\circ$ の場合 図10は、 $\alpha = 25^\circ$ の設置角における2円柱の St の分布を示したものである。2円柱の間隔 T/D に対する St の分布は、 $\alpha = 10^\circ$

Fig. 10 Strouhal number distributions for $\alpha=25^\circ$ (a) Upstream cylinder, $T/D=1.4$ ($\theta=90^\circ$) (b) Downstream cylinder, $T/D=1.4$ ($\theta=90^\circ$)

Fig. 11 Power spectra of fluctuating pressures

の設置角のそれとはかなり異なったようすを呈している。その第1は、 $T/D < 1.1$ までの領域において、2円柱のストローハル数 St が同一となる1種類の St のみが存在することである。この St は、図7(b)に示すところの下流側円柱の後流幅が大きくなる Mode 2 の流れパターンに基づいて発生するものである。Sumner ら⁽⁸⁾ は、 $Re=850 \sim 1900$ の範囲で同じく $\alpha=25^\circ$ における2円柱の St を測定し、図7の(a)に示す Mode 1 の流れパターンに基づくところの St が、 $T/D < 1.1$ の領域でも存在することを見いだしている。しかし本研究においては、図7(a)に示す Mode 1 の流れパターンに基づく St は、 $T/D < 1.1$ の領域では見いだされなかった。本実験結果と Sumner らのそれと異なるのは、単に Re 数の相違によるものであるかどうかは定かではない。

次に第2は、 $T/D=1.1 \sim 1.8$ の領域で2円柱の St が同一となるところの2種類の St が存在することで

Fig. 12 Instantaneous pressure signals and wavelet scalograms by using Morlet wavelet at $T/D=1.4$ for $\alpha=25^\circ$

ある。これは図11(a)、(b)に示す変動圧力のスペクトル解析結果に明りように認められる。このような2種類の St がどのような流れパターンで生じるかを調べるために行ったものが、図12に示すウェーブレット解析(Morlet ウェーブレットを使用)である。図12中の(a)と(b)は、間隔 $T/D=1.4$ における上流側円柱、(c)と(d)は下流側円柱の変動圧力波形とそのウェーブレット解析結果を示したものである。なお変動圧力の測定位置は、上流側および下流側円柱のいずれも内側表面での $\theta=-90^\circ$ である。時間の経過とともに、低い St と高い St との二つが同期する形で間欠的に発現している。この場合前報で示した流れパターン[第1報の図13(a)]から明らかなように、高い St においては2円柱の後流幅は小さく、低い St においてはそれが大きくなる流れパターンであるものと考えられる。

Fig. 13 Instantaneous pressure signals and wavelet scalograms by using Morlet wavelet at $T/D=2.0$ for $\alpha=25^\circ$

さらに第3は, $T/D=2.0$ において, 上流側円柱では0.228および0.188の二つのストローハル数, 下流側円柱では, これらのほかに0.147と三つのストローハル数が存在することである。この現象をより詳しく調べるために行ったものが図13に示す変動波形のウェーブレット解析である。なお変動圧力の測定位置は, 上流側および下流側円柱のいずれも外側表面の $\theta=90^\circ$ とした。2円柱とも $St=0.188$ となるストローハル数(単独円柱の St とほぼ一致)は, かなりの時間にわたって存在していることがわかる。この場合2円柱からの渦放出は同期し, ほぼ単独円柱の場合と同様の流れパターン [第1報の図13(b)に示す] によって行われているものと考えられる。また2円柱の St が0.228と大きい場合には, 時間経過による発現回数は少なく, 極めて間欠的なものとなっている。さらに

Fig. 14 Strouhal number distributions for $\alpha=45^\circ$

(a) Upstream cylinder, $T/D=1.2$, $\theta=90^\circ$

(b) Upstream cylinder, $T/D=1.8$, $\theta=90^\circ$

(c) Downstream cylinder, $T/D=1.2$, $\theta=-90^\circ$

Fig. 15 Power spectra from fluctuating pressures

$St=0.147$ の下流側円柱のみに発現する場合には, その出現割合は, $St=0.228$ よりも多くなっている。この場合には, 2円柱がほぼ一体化したような流れパターンとなり, かつ下流側円柱の後方に幅広いウェークが形成されるために, St は小さくなるものと考えられる。

3・5 設置角 $\alpha=45^\circ$ の場合 図14は, 設置角 α

Fig. 16 Instantaneous pressure signals and wavelet scalograms for $\alpha=45^\circ$ at $T/D=1.2$

$\alpha=45^\circ$ における2円柱の St の分布を示したものである。設置角 $\alpha=25^\circ$ の場合は、次に示す二つの相違点を有している。その第1は、 $0.8 < T/D < 2.1$ の領域での高い St は、 $\alpha=25^\circ$ の場合には2円柱の渦放出が同期する形で発生していたが、 $\alpha=45^\circ$ の場合には、図15に示すスペクトル分布が示すように、上流側円柱のみに発生する。また図14には、 $\alpha=45^\circ$ における Kiya ら⁽²⁾ の測定結果も併せて示してある(□印は上流側円柱、▲印は下流側円柱)。本測定結果と同様に、上流側円柱のみに高い St が発生している。Sumner ら⁽⁸⁾ は、 $T/D < 0.8$ の領域においても、上流側円柱において高い St が発現することを報告している。しかし $T/D < 0.8$ の領域では、図7(b)に示す Mode 2 の流れパターンで、2円柱は一体化したような形で渦放出が行われることを考えると、Sumner の結果にある上流側円柱から高い St をもった渦放出が行われることは考えにくい。ただ Sumner らのレイノルズ数 850~1900 と、本研究の $Re=5.5 \times 10^4$ 、ならびに Kiya らの 1.58

Fig. 17 Strouhal number distributions for $\alpha=60^\circ$

Fig. 18 Strouhal number distributions for $\alpha=75^\circ$

$\times 10^4$ に比べて、かなり小さいものとなっている。しかしこれらの相違は単に Re 数によるものとも考えられるが、定かではない。このような $T/D=0.8 \sim 2.1$ の領域で発現する2種類の St をより詳しく調べるために行ったものが、図16に示す変動圧力波形のウェーブレット解析である。ウェーブレット解析に用いた変動圧力は、上流側円柱において、外側のはく離せん断層が支配する $\theta=90^\circ$ における値、下流側円柱においては内側のはく離せん断層が支配する $\theta=-90^\circ$ における値である。上流側円柱の外側のはく離せん断層の交互の巻上がりによる周波数は、 $St=0.305$ および 0.15 の二つがあり、かつそれらは間欠的に行われている。一方下流側円柱では $St=0.15$ なる値のみが存在する。この場合下流側円柱の渦放出は、上流側円柱の外側のはく離せん断層に、下流側円柱の外側のそれが同期する形で行われることとなり、低い St のみが発生することになる。

次に第2は、 $\alpha=25^\circ$ では $T/D > 2.0$ の領域では、2円柱の St は同一となっていたが、 $\alpha=45^\circ$ においては、 $T/D > 2.1$ の領域での2円柱の St は異なり、両者は、 T/D の増加とともに徐々に漸近するものとなっている。このことから $\alpha=45^\circ$ では、 $\alpha=25^\circ$ の場合に比べ2

円柱の相互干渉が弱くなり、2円柱はより単独円柱に近い挙動を呈してくるものと判断される。

3・6 設置角 $\alpha=60^\circ$ および 75° の場合 図17および図18は、 $\alpha=60^\circ$ および 75° における St の分布を示したものである。 $\alpha=60^\circ$ および 75° における St の分布は、 $\alpha=45^\circ$ の場合とほぼ同一の傾向を示している。ただ二つの St が発現する領域は、 $\alpha=60^\circ$ では $0.7 < T/D < 1.5$ 、 $\alpha=75^\circ$ では $0.5 < T/D < 1.2$ と、設置角 α の増加とともに縮小している。また図17および図18には、Kiya ら⁽²⁾ の St の測定結果を示してある(□印は上流側円柱、▲印は下流側円柱)。 T/D に対する St 、ならびにその変化の傾向は、本測定結果とほぼ同一のものとなっている。結果的に $\alpha=45^\circ$ 、 60° および 75° の設置角に関して、 T/D の変化に対する St の分布の相違をまとめると、以下に示すものとなる。

(1) 上流側円柱の高い St が発現し始める間隔 T/D は、 α の増加とともに小さくなり、 $\alpha=90^\circ$ (並列配列) における $T/D=0.4^{(17)}$ に近づく。

(2) 下流側円柱の渦放出が上流側円柱のそれに同期し、同一の St となる T/D の領域は、 α の増加とともに縮小する。

(3) 上流側円柱および下流側円柱の St が、単独円柱のそれとほぼ同一となる T/D は3.0付近であり、 $\alpha=45^\circ$ を超えると設置角による相違はあまりない。

4. む す び

一様流中に食違い配列された同一径を有する2円柱のストローハル数を、2円柱表面上の変動圧力のスペクトル解析ならびにウェーブレット解析によって調べた結果、以下に示す結論を得た。

(1) 物体形状ならびに渦放出周波数が異なる正方形柱と円柱を直列に配置した場合においても、同径2円柱の場合と同様に、下流側物体の渦放出は上流側のそれに同期して行われる。

(2) $\alpha=10^\circ$ に設置した場合の2円柱の St は、 $T/D < 2.1$ の領域で、Mode 1, 2の流れパターンが発

生し、下流側円柱の後流幅の大小により、2種類の St が存在する。

(3) $\alpha=25^\circ$ に設置した場合、 $T/D < 1.1$ までにおいては2円柱が一体化したような挙動を呈するため、両者の St は同一となる。また $1.1 < T/D < 1.8$ の領域でも2円柱の St が同一となるところの2種類の St が発生する。

(4) $\alpha=45^\circ$ に設置した場合、 $T/D < 0.8$ までにおいては、 $\alpha=25^\circ$ の場合と同様に2円柱の St が同一となる2種類の St 、 $0.8 < T/D < 2.1$ の領域では、二つの流れパターンの発現により、2種類の St が発生する。

(5) $\alpha=60^\circ$ および 75° に設置した場合には、2種類の St が発生する T/D の領域は異なるが、 St の分布はほぼ $\alpha=45^\circ$ と同一のようすを呈する。

文 献

- (1) 坂本弘志・Md. Mahbub Alam・金相一・高井和紀, 機論, **70**-696, B (2003), 2034-2042.
- (2) Kiya, M., Arie, M., Tamura, H. and Mori, H., *J. Fluids Eng.*, **102** (1980), 166-173.
- (3) Ishigai, S., Nishikawa, E., Nishimura, K. and Cho, K., *Bull. JSME*, **15**-86 (1972), 949-956.
- (4) Zdravkovich, M. M. and Pridden, D. L., *J. Ind. Aerodyn.*, **2** (1977), 255-270.
- (5) Price, J. and Paidoussis, M. P., *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **17** (1984), 329-347.
- (6) Gu, Z. F., Sun, T. F., He, D. X. and Zhang, L. L., *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **49** (1993), 379-388.
- (7) Sumner, D. and Richards, M. D., *J. Fluids Struct.*, **17** (2003), 345-350.
- (8) Sumner, D., Price, S. J. and Paidoussis, M. P., *J. Fluid Mech.*, **411** (2000), 263-303.
- (9) Gu, Z. and Sun, T., *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **80** (1999), 287-309.
- (10) Li, H. and Nozaki, T., *JSME Int. J.*, **40** (1997), 58-66.
- (11) Yilmaz, T. and Kodak, A., *J. Fluids Struct.*, **14** (2000), 359-373.
- (12) Hamdan, M. N., Jubran, B. A., Shabanek, N. H. and Abu-Samak, M., *J. Fluids Struct.*, **10** (1996), 633-651.
- (13) 森谷優・Md. Mahbub Alam・高井和紀・坂本弘志, 機論, **68**-676, B (2002), 3310-3315.
- (14) Farge, M., *Annu Rev. Fluid Mech.*, **24** (1992), 395-451.
- (15) 森谷優・Md. Mahbub Alam・高井和紀・坂本弘志, 機論, **68**-669, B (2002), 1400-1406.