

非定常気流中の Bluff Body の変動圧力特性と 動的応答特性について

白石 成人・松本 勝・白土 博道
岸 明信・小林 茂雄

ON THE CHARACTERISTICS OF UNSTEADY PRESSURE AROUND BLUFF BODIES AND THEIR AERODYNAMIC BEHAVIORS IN UNSTEADY FLOW

By *Naruhito SHIRAISHI, Masaru MATSUMOTO,*
Hiromichi SHIRATO, Akinobu KISHI and Shigeo KOBAYASHI

Synopsis

The effects of pulsating flow on the flow-separation characteristics around rectangular cylinders were investigated both in a wind tunnel and in a water tunnel.

The fluid-mechanical effects caused by pulsating flow were classified into three different types concerning the enhancement-properties of shear layer instability. The first is "completely separation flow type" for rather bluff bodies, the second is "unsteady separation or reattachment flow type" for comparatively bluff bodies, and the third is "steady reattachment flow type" for rather slender bodies. Furthermore, some fundamental considerations on the effect of pulsating flow to aerodynamic phenomena, such as vortex-induced oscillation, galloping and torsional flutter, were also briefly shown.

1. ま え が き

近年、長大橋梁構造物に対する風の動的影響について関心が高まり多くの研究が重ねられてきたが、構造物の耐風性の問題はまだ未解決なものも多く残されているのが現状であり、各種空力現象の発生機構を理論的にあるいは実験的に解明し、より合理的な構造物の耐風設計を行なえるようになることが重要である。

構造物に発生する空力振動現象には、バフエッティング、渦励振、ギャロッピング、ねじれフラッタ、曲げねじれ連成フラッタなどがあげられ、後述のように発生機構については、ある程度の定性的な説明が加えられている。しかしその有効な制振対策は風洞実験による検討にたよっているという現状からわかるように、究明しなければならない点が数多く残されている。本研究では、物体と流体の相互作用により生じる不安定振動現象の発生機構解明の一助とするために、基本的な構造断面として矩形断面を対象にその断面比を変化させ、静止あるいは振動中の物体周囲の剝離せん断層の挙動について考察を行なった。

一般的に Bluff な断面で発生する空力振動現象は、次のような機構となっているものと考えられる (Fig. 1)。

流体中に Bluff な物体がある場合、流れの剝離が生じ、剝離せん断層が形成される。剝離せん断層自体が非定常な振舞いをし、それは剝離せん断層のもつ不安定性に起因していると考えてよい。この剝離せん断

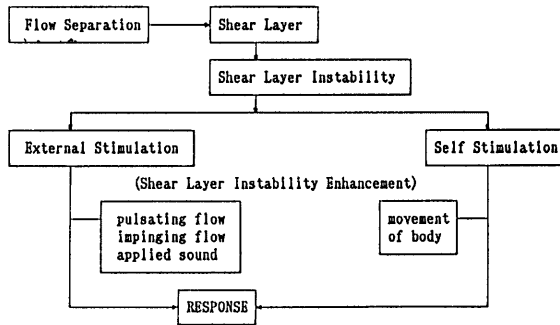


Fig. 1 Generation mechanism of aerodynamic phenomena.

層の不安定性が、カルマン渦、剝離渦、あるいは剝離バブル長の非定常性、Vorticity patch の挙動と関係づけられる。これらの挙動が、渦励振の Lock-in 現象、ギャロッピング、ねじれフラッタなどの振動現象と関連づけられ、各種空力振動現象の根本的な発生要因となっている。つまり、剝離せん断層の挙動を制御することが直接、空力振動現象を抑制あるいは制振する方法につながるのである。

本研究では、剝離せん断層の挙動を制御するために、pulsating flow (脈流) を物体に作用させ、剝離せん断層の不安定性に直接刺激を与える方法をとった。これによって空力振動挙動に対する剝離せん断層の不安定性増幅効果を実験により求め、各現象の発生機構について考察を加える。

2. 剝離せん断層の不安定性と脈流中における静止断面まわりの圧力特性

2.1 概 説

断面まわりの剝離流れは、その不安定性に基づくと考えられる種々の特性を有しており、今日までそれについての多くの研究がなされている。中口等¹⁾は角柱の断面比を変化させることにより、断面比 $B/D=0.7$ 付近で抗力係数が極大値、背圧係数が極小値をとることを示したが、Bearman 等²⁾は更に詳細な実験により臨界断面比 $B/D=0.62$ 付近の抗力係数・背圧係数の極値と渦流下との関係を示した。また中村等³⁾は格子乱流中での臨界断面比は、一様流中より小さくなる結果を得ている。Laneville 等⁴⁾は Bearman 等の実験結果より剝離せん断層の巻き込みに注目し、可視化実験により渦形成位置、後流渦形成過程から断面比によって、 $0 < B/D < 0.5$ の領域 1, $0.5 < B/D < 1$ の領域 2, $1 < B/D < 3$ の領域 3, $3 < B/D$ の領域 4 に分類している。ここでは流れの特性として剝離点からの渦度の分布、剝離バブルの成長、後流渦の形成に注目している。岡島⁵⁾は一様流中におかれた矩形柱のストロハル数及び背圧係数が断面比、レイノルズ数 ($Re = VD/\nu$, V : 平均流速, D : 代表長, ν : 動粘性係数) により複雑に変化し、レイノルズ数が 10^4 以上では断面比 $B/D=2.8$ の他に $B/D=6$ 付近でストロハル数が不連続に変化することを示している。

Michalke⁶⁾はせん断層を特徴づけるパラメータである運動量厚さ θ_0 で定義される無次元周波数 $f\theta_0/V_0$ (f : せん断層内の速度変動周波数, V_0 : 接近流速) がある範囲のみでせん断層の不安定性増幅が可能であるとしている。剝離せん断層の不安定性自身に刺激を与える方法としては、flow impingement, applied sound, movement of body, pulsating flow 等があげられるが、特に applied sound により物体側面上に主流直角方向の圧力変動を与え、種々の断面比の矩形断面まわりの流れのパワースペクトルをとり剝離せん断層の不安定性増幅効果について調べた Parker, Welsh の報告⁷⁾は注目される。Parker 等は後流の速度変動周波数特性により 4 つの領域に断面比を分類している。領域 a は $B/D < 3.2$ の範囲で、音響が与えられていない場合

には前縁から剝離した上下面の剝離せん断層が直接干渉し合い後流域に交番渦を形成する、音響が与えられても変化はないが、 $B/D=3.16$ ではすべての周波数の音響刺激に対してそれに同期した渦流下がおこる。領域 b は $3.2 < B/D < 7.6$ の範囲で、音響のない状態では前縁からの剝離せん断層は渦流下の間に断続的に後縁に再付着する。しかし音響付加によって剝離パルスが縮小し連続的に剝離せん断層が再付着するようになり、音響周波数に同期して vorticity patch が一つだけ形成される。このような流れの変化を与える音響周波数はある範囲に限られている。領域 c は $7.6 < B/D < 16$ の範囲で常に剝離せん断層が側面に再付着し、後流において明確な速度変動のスペクトルピークが得られない。しかし音響のある状態では vorticity patch は音響周波数で流下し、vortex cores となる。ある特定の周波数以上では渦列が壊れ vortex spacing が増加した安定な渦列に置き変わる。領域 d は $B/D > 16$ で速度変動の広いスペクトルピークが得られる。総じて、音響刺激を与えると剝離パルス長は短くなり音響周波数に同期して振動する。また剝離せん断層の曲率が増加して再付着点が前縁側に移動する。

本研究では剝離せん断層の不安定性に刺激を与える方法として脈流 (pulsating flow) を採用した。脈流による剝離せん断層の不安定性増幅効果として松本等⁸⁾ は、 $B/D=0.5$ の場合にストロハル数の 2 倍及び 4 倍の脈流周波数で交番渦が強くなると共に同時対称渦放出が行われ、 $B/D=2$ の場合にストロハル数の 2 倍の周波数で断面側面の変動圧力振幅が大きくなり同時対称渦放出が行われることを示している。本章では剝離せん断層の不安定性増幅効果と断面辺長比とを系統的に研究するため、脈流周波数と断面比をパラメータとして、静止断面周りの圧力特性を調べる。

2.2 実験概要

本実験で対象とした断面はすべて 2 次元矩形断面であって、臨界断面 ($B/D=0.62$)、ストロハル数が不連続となる $B/D=2.8$ 断面、及び Parker, Welsh の実験⁷⁾ で流れの特性変化が観測された $B/D=7.6$ 矩形断面を含む断面比 $B/D=0.5 \sim 20$ までの 13 断面である。すべての模型表面には表面圧力を測定する圧力孔を設置しており、模型端部に気流の 2 次元性を確保するための端板を設けてある。

使用した風洞は、京都大学工学部土木工学教室に設置された吹き出し式エッフェル型風洞 (測定部高さ 1.0 m、幅 0.7 m、長さ 5 m) で、側面境界層及び模型支持アームによる気流の擾乱を防止するために測定部側面より 3.5 cm の位置に導流壁を設け、模型設置位置付近ではほぼ均一な風速分布にすること、主流方向乱れ強さが時間平均風速 4 m/sec 付近で 0.5% 以下になることが確認されている。

脈流は Fig. 2 に示すような perforated plate と回転ブレードからなる脈流発生装置により発生させた。ブレードを回転数制御のできるモータでプーリー・V ベルトを介して回転させることにより風洞下流端の閉塞率を変化させ、その回転数をユニバーサル・カウンタ (日置電気 KK, 3601 型) により検出し、脈流周波数を設定した。

模型表面の圧力測定は測定断面を迎角 $\alpha=0^\circ$ となるように風洞内に固定し行った。断面周りの圧力測定点は、前面、前縁、側面中央、後縁、背面の計 5 点 ($B/D=0.5$ 断面では前縁部の圧力孔がなく 4 点) である。表面圧力は圧力孔より模型内のアルミ管から模型端部に導かれ風洞内静圧 (風洞壁面圧) との差圧を電気信号として検出し、直列増幅器 (豊田工機, AA 2300) を介してデータレコーダ (TEAC, R-280) にアナログ量として記録した。また、ローパスフィルタ (NF 回路設計ブロック KK, MC 6612) により平均圧力を、ローパスフィルタ (前出) を介して直列増幅器 (三栄測器, 6L02) により増幅し、リニアコ

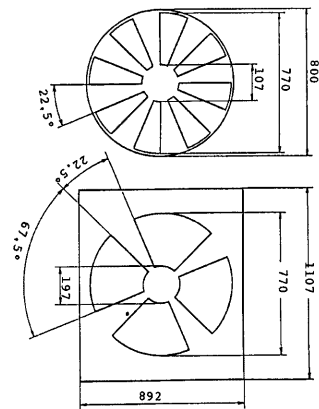


Fig. 2 Pulsating generator for wind tunnel.

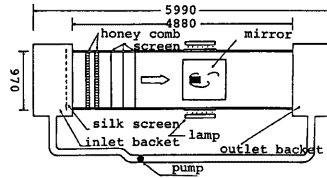


Fig. 3 Water tunnel configuration.

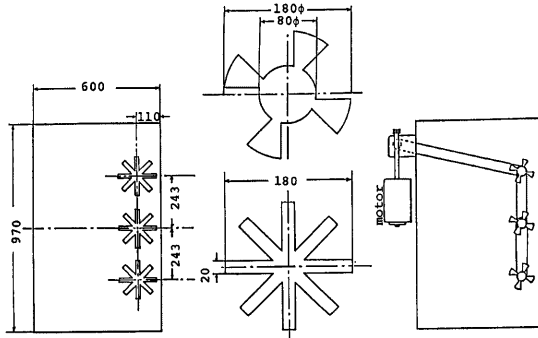


Fig. 4 Pulsating generator for water tunnel.

ーダ (グラフテック KK, WR 3101) により変動圧力波形を記録した。また, 測定圧力の変動成分を調べるため, データレコーダ (前出) より相関確率分析器 (日本カノマックス KK, SAI-470) により変動圧力のパワースペクトルをオシロスコープ (日立電子 Ltd. V-509) に出力し, 出力した図形を透明なフィルムの上に油性ペンにより書き写した。

本実験では, 断面を静止させた状態で風速を一定にし, 断面に脈流を作用させ, 脈流周波数を徐々に変化させ断面の各点における変動圧力をパワースペクトルの形で捉えた。設定した実験条件を, **Table 1** に示す。なお風洞内の平均風速は, 一樣流中では NPL 型ピトー管により, 総圧, 静圧を検出し, その差圧をデジタルマノメータ (OKANO WORKS LTD., DP-20A) で読み取った。脈流中の風速は, ピトー管と平行に熱線プローブを設置してピトー管による風速値で熱線風速計 (日本カノマックス KK, CTA (MODEL 1017) により, また電源指数可変型リニアライザ (MODEL 1013), 加減算器 (MODEL 1017), 電源ケースモニタ (MODEL 1008) にキャリブレーションを入れ熱線風速計により風速設定を行った。

一方, 可視化実験に用いた水槽は, 京都大学工学部土木工学教室に設置された回流式水槽 (Fig. 3) である。上流側タンクに整流板, 水路部にハニカム 2 段, 金属メッシュ 3 段を設けることによって測定部における乱れ強さは流速 23 cm/sec で 0.5% 程度となっている。使用した模形の寸法は風洞実験用模型と同一であり, すべてメタクリル酸樹脂製である。模型は, 水槽上部に設けられた加振装置により水槽内に鉛直に支持され, 一部メタクリル製となっている水槽底部より鏡を介して断面まわりの流れの観察を行なった。流れの可視化は, 水槽の両側壁からのスリット光線により水中に光平面をつくり, その平面内で水素気泡発生装置 (開発電子測器研究所製 SCR-RG) による水素気泡法により行った。流速の設定は直径 48 mm の円柱パイプを測定部に設置し, カルマン渦放出周波数を熱線流速計 (前出) により検出し, ストロハル数から逆算

Table 1 Experimental conditions.

B/D	$U(\text{m/sec})$	Re	$f_p(\text{Hz})$
0.5	3.0	1.031×10^4	$0 \rightarrow 45.0$
0.62	4.0	1.375×10^4	$0 \rightarrow 44.8$
1.0	3.5	1.203×10^4	$0 \rightarrow 44.0$
2.0	4.0	1.375×10^4	$0 \rightarrow 35.2$
2.8	3.0	1.031×10^4	$0 \rightarrow 46.4$
3.0	3.0	1.031×10^4	$0 \rightarrow 42.0$
4.0	2.8	7.698×10^3	$0 \rightarrow 48.0$
5.0	4.0	1.100×10^4	$0 \rightarrow 44.0$
6.0	3.0	6.186×10^3	$0 \rightarrow 45.0$
7.6	1.5	2.577×10^3	$0 \rightarrow 35.7$
8.0	1.5	2.577×10^3	$0 \rightarrow 43.5$
10.0	1.6	2.199×10^3	$0 \rightarrow 48.0$
20.0	1.26	8.660×10^2	$0 \rightarrow 47.25$

Table 2 Properties of model for flow visualisation.

B/D	thickness of body (m)	pulsating frequency (Hz)	velocity (cm/sec)	Reynolds Number
0.5	0.05	0	16.6	8.3×10^3
		0.86 (2 St)	16.6	8.3×10^3
		1.26 (3 St)	16.2	8.1×10^3
		1.67 (4 St)	16.0	8.0×10^3
0.62	0.05	0	15.3	7.7×10^3
		0.81 (2 St)	14.5	7.3×10^3
		1.63 (4 St)	14.5	7.3×10^3
1	0.05	0	14.5	7.3×10^3
		0.63 (2 St)	12.6	6.3×10^3
		1.29 (4 St)	13.2	6.6×10^3
2	0.05	0	16.5	8.3×10^3
		0.52 (2 St)	15.7	7.9×10^3
		1.03 (4 St)	16.4	8.2×10^3
5	0.04	0	15.0	6.0×10^3
		0.75 (2 St)	13.1	5.2×10^3
		1.50 (4 St)	13.1	5.2×10^3

して求めた。

水槽において脈流を発生させるため、下流側タンク部に perforated plate を設け、これに水平方向 3 基の回転ブレード（径 180 mm）を設け、回転数可変のモータ、ウォームギヤによる減速器（1/10, 1/50）を介して cogged belt により 3 基の回転ブレードを連動させる脈流発生装置（Fig. 4）を設置した。また、下流側での流速変動を上流側へ効率的に伝達するため、水面に波がたたないように測定部直後まで消波板を設置した。

本実験で設定した実験条件を Table 2 に示す。

2.3 実験結果及び考察

Fig. 5～Fig. 12 に各種断面比の矩形周りの変動圧力のパワースペクトル特性図を示す。これらのスペクトル形状に着目すると、各断面は次の3つのグループに分けることができる。

(1) ストロハル数成分主導型断面

$B/D=0.5$ 矩形断面は完全剝離型断面で、完全剝離型渦励振が発現する。Fig. 5 からわかるように、断面側面上ではストロハル成分のスペクトルピークが卓越している。またピークの高さは、 $k=2S_t, 4S_t$ (k : 脈流無次元周波数 $=f_p D/V$, f_p : 脈流周波数, D : 断面代表長, V : 平均流速, S_t : ストロハル数) で極大となる傾向があり、このとき背圧係数が極小となり抗力係数が極大となるという過去の研究成果⁸⁾と対応する。すなわち、これらの周波数の脈流刺激によりカルマン渦の巻き込みが強化されると考えられる。Photo. 1～3 に示す可視化実験結果からも、脈流中でカルマン渦の巻き込みが強くなっている様子がわかる。ただし可視化実験では Photo. 4, 5 に示すような脈流周波数に同期した同時対称渦放出が $k=2S_t, 4S_t$ で観察された。

$B/D=0.62$ 矩形断面は臨界断面比、すなわち一様流中でカルマン渦の巻き込みが最も強くなる断面として

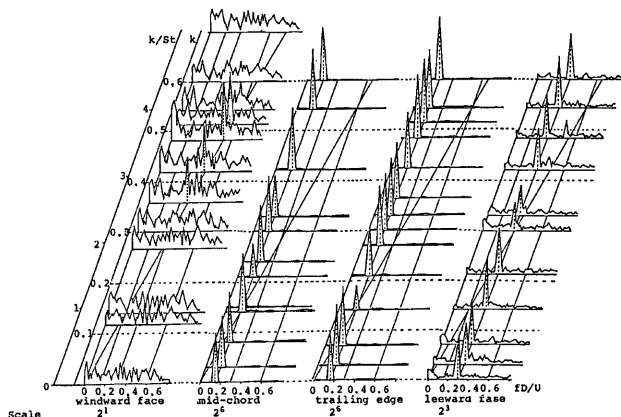


Fig. 5 Spectra of surface pressure ($B/D=0.5$, $U=3.0$ m/sec).

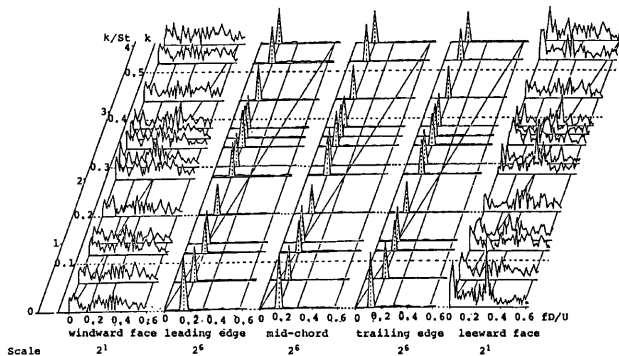


Fig. 6 Spectra of surface pressure ($B/D=0.62$, $U=4.0$ m/sec).

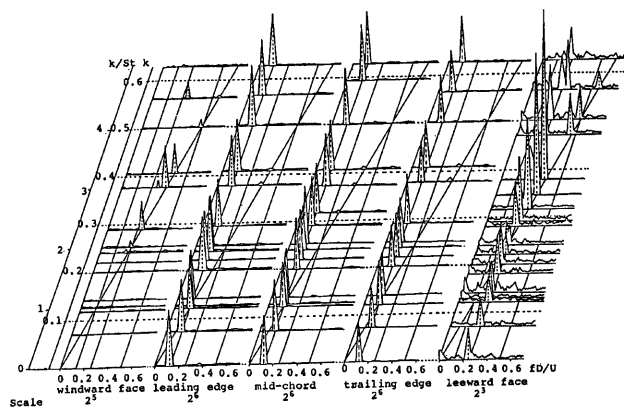


Fig. 7 Spectra of surface pressure ($B/D=1$, $U=3.5$ m/sec).

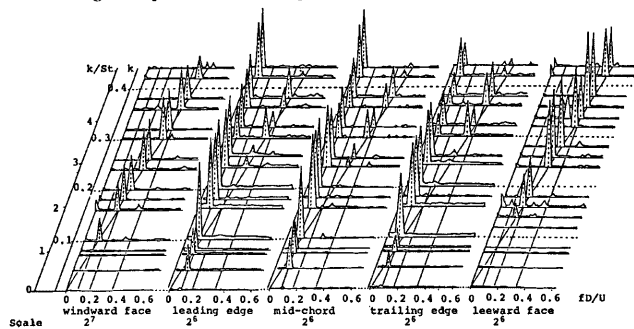


Fig. 8 Spectra of surface pressure ($B/D=2$, $U=4.0$ m/sec).

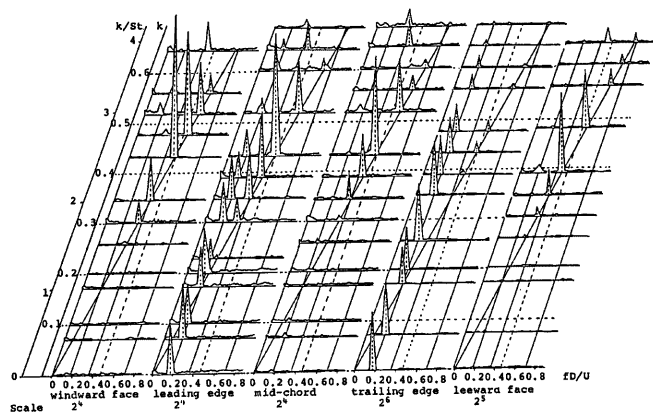
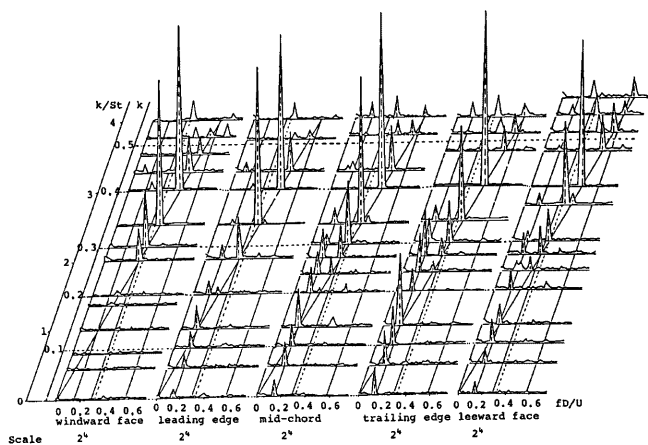
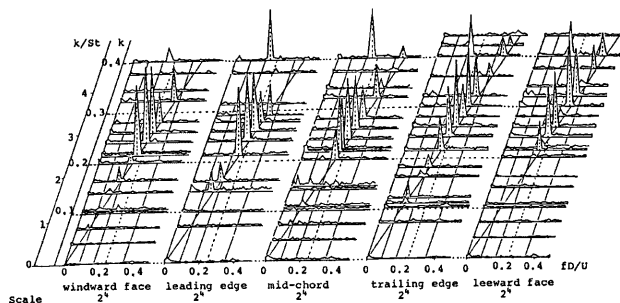
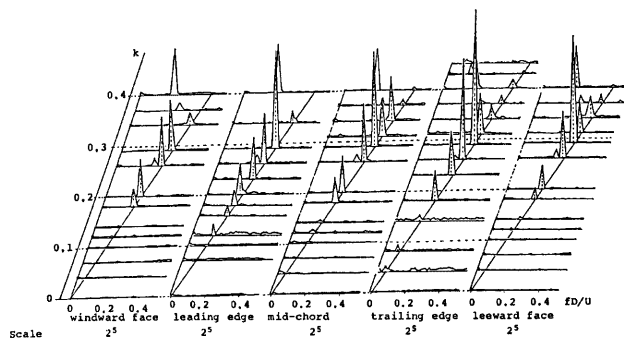


Fig. 9 Spectra of surface pressure ($B/D=2.8$, $U=3.0$ m/sec).

Fig. 10 Spectra of surface pressure ($B/D=4$, $U=2.8$ m/sec).Fig. 11 Spectra of surface pressure ($B/D=5$, $U=4.0$ m/sec).Fig. 12 Spectra of surface pressure ($B/D=6$, $U=3.0$ m/sec).

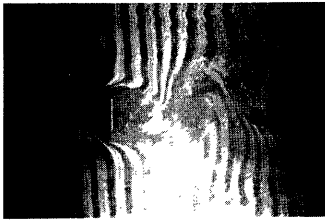


Photo. 1 Flow pattern around cylinder
($B/D = 0.5$, $Re = 8.3 \times 10^3$,
 $k = 0$).



Photo. 2 Flow pattern around cylinder
($B/D = 0.5$, $Re = 8.3 \times 10^3$,
 $k = 2 S_t$).

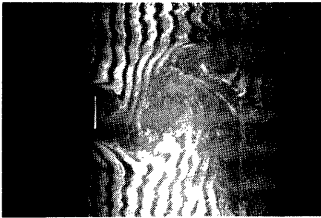


Photo. 3 Flow pattern around cylinder
($B/D = 0.5$, $Re = 8.0 \times 10^3$,
 $k = 4 S_t$).



Photo. 4 Flow pattern around cylinder
($B/D = 0.5$, $Re = 8.3 \times 10^3$,
 $k = 2 S_t$).

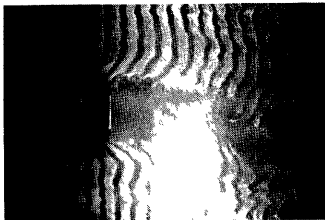


Photo. 5 Flow pattern around cylinder
($B/D = 0.5$, $Re = 8.0 \times 10^3$,
 $k = 4 S_t$).



Photo. 6 Flow pattern around cylinder
($B/D = 0.62$, $Re = 7.7 \times 10^3$,
 $k = 0$).



Photo. 7 Flow pattern around cylinder
($B/D = 0.62$, $Re = 7.3 \times 10^3$,
 $k = 2 S_t$).

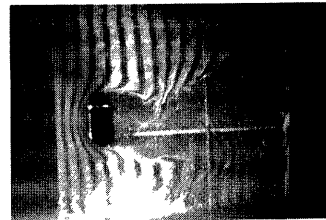


Photo. 8 Flow pattern around cylinder
($B/D = 0.62$, $Re = 7.3 \times 10^3$,
 $k = 4 S_t$).

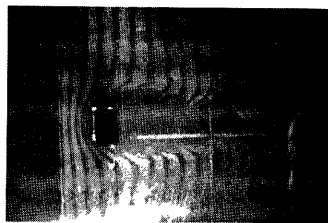


Photo. 9 Flow pattern around cylinder
($B/D = 0.62$, $Re = 7.3 \times 10^3$,
 $k = 2 St$).

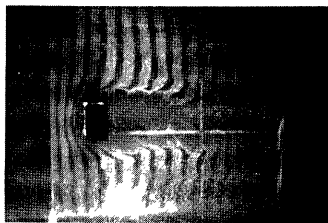


Photo. 10 Flow pattern around cylinder
($B/D = 0.62$, $Re = 7.3 \times 10^3$,
 $k = 4 St$).



Photo. 11 Flow pattern around cylinder
($B/D = 1$, $Re = 7.3 \times 10^3$,
 $k = 0$).



Photo. 12 Flow pattern around cylinder
($B/D = 1$, $Re = 6.3 \times 10^3$,
 $k = 2 St$).



Photo. 13 Flow pattern around cylinder
($B/D = 1$, $Re = 6.3 \times 10^3$,
 $k = 2 St$).



Photo. 14 Flow pattern around cylinder
($B/D = 1$, $Re = 6.6 \times 10^3$,
 $k = 4 St$).

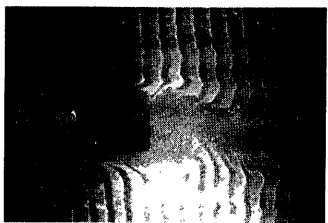


Photo. 15 Flow pattern around cylinder
($B/D = 2$, $Re = 8.3 \times 10^3$,
 $k = 0$).

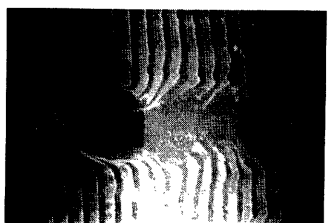


Photo. 16 Flow pattern around cylinder
($B/D = 2$, $Re = 7.9 \times 10^3$,
 $k = 2 St$).

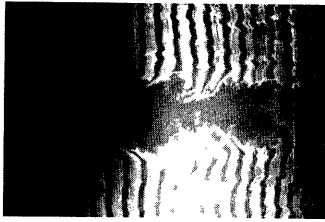


Photo. 17 Flow pattern around cylinder
($B/D = 2$, $Re = 8.2 \times 10^4$,
 $k = 4 S_L$).

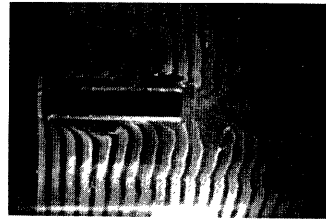


Photo. 18 Flow pattern around cylinder
($B/D = 5$, $Re = 6.0 \times 10^3$,
 $k = 0$).

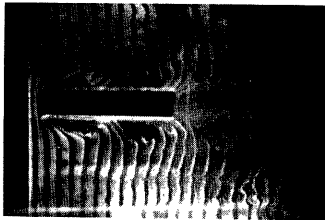


Photo. 19 Flow pattern around cylinder
($B/D = 5$, $Re = 5.2 \times 10^3$,
 $k = 2 S_L$).

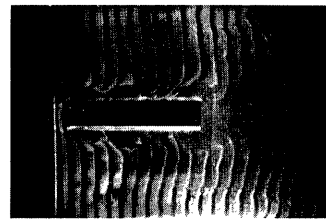


Photo. 20 Flow pattern around cylinder
($B/D = 5$, $Re = 5.2 \times 10^3$,
 $k = 4 S_L$).

知られているが、Fig. 6 に示すように、断面側面上の変動圧力のスペクトルは、ストロハル数成分のピークが卓越している。そのピーク高に着目すると、一様流中 ($k=0$) でのピークがどの圧力孔においても最高である。これは脈流の作用によりあたかも断面比が大きくなったようになり、カルマン渦の巻き込み位置が断面背面から遠ざかり、断面まわりの剝離せん断層の曲率が小さくなったためであると考えられる。しかし、 $k=2 S_L, 4 S_L$ ではピークが高くなる傾向があり、この周波数域での剝離せん断層不安定性増幅効果が現れていると思われる。Photo. 6~8 流れのパターンを示す。また、この断面においても Photo. 9, 10 に示すように、 $B/D = 0.5$ 断面と同様に同時対称渦放出が観察された。

$B/D = 1$ 渦形断面も Fig. 7, Photo. 11~14 に示すように、 $B/D = 0.5$ 断面と同様の特性を有している。この断面においては、一様中のピークと比較して脈流中のピークは断面後縁付近でほとんど大きくなる。これは断面後縁に近くほとんど不安定性増幅効果が大いことを示しており、後流のカルマン渦の影響を後縁部が受けやすいためと考えられる。

(2) ストロハル数成分、脈流周波数成分混在型断面

$B/D = 2$ 角形断面は、一様流中の剝離せん断層が非定常に再付着する断面である。Fig. 8 に変動圧力特性を示すが、断面側面のスペクトルは、ストロハル数成分のピークが卓越している。しかし脈流周波数成分のピークもみられ、背面ではこのピークが卓越している。従ってこの断面は、ストロハル数成分と脈流周波数成分の混在断面と呼ぶことができる。脈流中におけるストロハル数成分のピークは、一様流のそれの20~30倍となっている。これは Photo. 15~17 からわかるように、脈流刺激により剝離流の曲率が大きくなり、剝離せん断層が断面に近付いたことにより、vortex formation region が背面に近付いたことによると思われる。また前縁部でストロハル数成分のピークが高いのは、剝離せん断層に対する leading edge の刺激の影響が大いことを示している。可視化実験では脈流周波数に同期した同時対称渦放出が認められ、この

断面まわりの流れが、ある周波数帯域の外的刺激に非常に敏感であることがわかる。しかし後流におけるカルマン渦は明確に確認できなかった。

$B/D=2.8$ 矩形断面は、一樣流中でストロハル数が不連続となり流れが急変する断面である。Fig. 9 に示すように混在型であるが、脈流周波数成分のピークがかなり高くなっており、刺激に敏感な断面であることがわかる。ストロハル数成分のピークに着目しても、ここでは $k=2St_1$, $4St_1$ で極大となる傾向はみられない。また、前後縁部に比べて側面中央のピークはかなり小さい。これは、剝離流れに対して leading edge, trailing edge の刺激の影響が大きいたとめ考えられる。 $B/D=3$ 矩形断面でも同様の傾向がみられる。

$B/D=4$ 矩形断面も、Fig. 10 に示すように混在型であるが断面表面全体にわたって、特に $k=2St_1$ 以上の高い周波数成分の脈流によるピークが大きくなっている。一方、ストロハル成分のピークは後縁部に近づくほど大きく、後流渦の強い影響がうかがえる。

(3) 脈流周波数主導型断面

$B/D=5$ 矩形断面では、Fig. 11 に示すように、もはやストロハル数成分のピークはみられず、脈流周波数成分のピークのみが卓越している。また、そのピークが最大になるのは $k=0.25$ 付近である。この周波数は前縁剝離型曲げ渦励振の発現無次元風速の逆数の2倍付近にあたることが注目される。脈流中の流れの様子は、Photo. 18~20 からわかるように Parker 等の結果と良く対応しており、剝離流れの曲率が大きくなり、剝離バブルの長さが縮み、vorticity patch が鮮明に現れている。

$B/D=6$ 矩形断面の変動圧力特性を Fig. 12 に示すが、脈流周波数成分のピークが卓越している。 $B/D=7.6, 8, 10, 20$ でも同様の傾向がみられる。

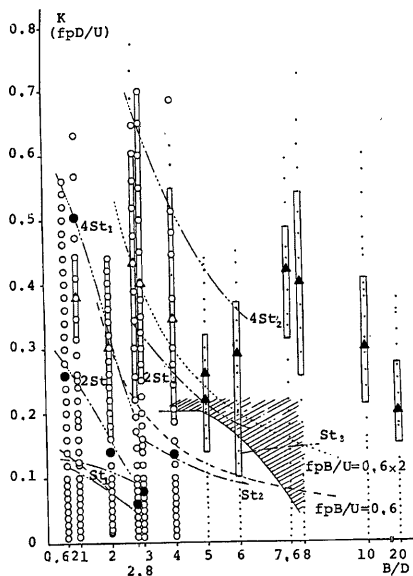


Fig. 13 Unsteady pressure characteristics on the side surface of bodies in pulsating flow (leading edge).

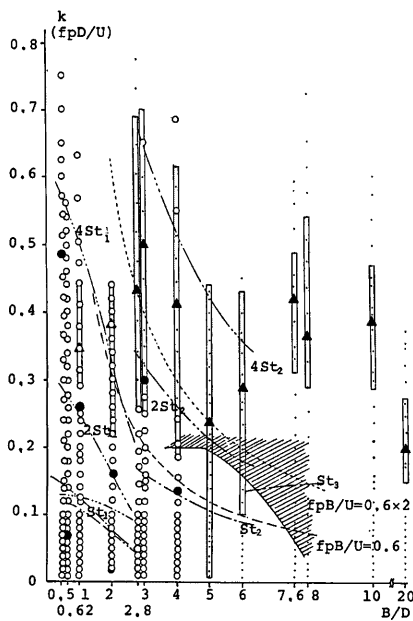


Fig. 14 Unsteady pressure characteristics on the side surface of bodies in pulsating flow (mid-chord).

2.4 ま と め

全体的な圧力特性を測定点ごとにわけ、Fig. 13 に前縁、Fig. 14 に側面中央、Fig. 15 に後縁での測定結果をそれぞれ示す。図中、ストロハル数成分のスペクトルピークが存在する周波数に○、そのピークが最大のものに●、また、脈流周波数成分のスペクトルピークが存在する周波数を枠で囲み、それが最大のものに▲を付けている。なお、斜線は Parker 等が applied sound の影響を受けやすいとした領域である。3つの図面は、ほぼ同じような特性を示しているが、剝離せん断層の不安定性増幅効果より、断面辺長比によって次の3つに分類できる。

まず $B/D < 2$ の断面で、これらは完全剝離型の断面であり、ストロハル数成分のピークが $k=2St_1, 4St_1$ で極大化する特性を有する。また可視化実験では、脈流周波数に同期した同時対称渦放出が観察された。

次に、 $2 \leq B/D < 6$ の断面でこれらは非定常再付着型の断面である。ここでは脈流による刺激を受けやすい周波数領域が、 $V_{cr} = 1.67 \times B/D$ の逆数で表される曲線、あるいはその2倍の無次元周波数付近に存在し、前縁剝離渦型渦励振の発現に対応しているものと考えられる。また、後縁部に近づくに従って脈流周波数成分のスペクトルピークが最大値をとる周波数が少し変わるの、たわみ渦励振とねじれ渦励振の発現風速の違いに対応しているのではないと思われる。

最後に $B/D \geq 6$ で、これらの断面は定常再付着の性質をもち、剝離せん断層の不安定性が増幅される周波数領域はストロハル数の約2倍付近にあることが注目される。

これらの特性は、それぞれの断面において完全剝離型渦励振、前縁剝離型渦励振、再付着型渦励振が発現することに対応するものと考えられる。

3. 脈流中における物体振動応答特性

3.1 概 説

本実験においては、静止断面で得られた結果より各断面での剝離せん断層の不安定性の増幅効果が現れる周波数域での空力振動中の物体の応答変化について考察を行う。既に、静止断面においては脈流による剝離せん断層の不安定性の増幅効果はある程度知られており、カルマン渦の巻き込み強化、同時対称渦放出、剝離せん断層の曲率の増大、剝離バブル長の縮小などが挙げられる。しかし、これらの現象は静止物体の、それれも迎角 $\alpha = 0^\circ$ の断面での特性であり、振動中の断面で物体振動により励起された剝離せん断層の不安定性が脈流により増幅される効果は予想はされるものの完全には把握できておらず、今後の課題となっている。

そこで、本実験では、各種空力振動現象をそれが発現する代表的な断面により調べ、空力振動中の断面の剝離せん断層に対する不安定性増幅効果が、振動応答特性に対して与える影響について考察を行うものである。対象とする空力振動現象と断面は次のとおりである。

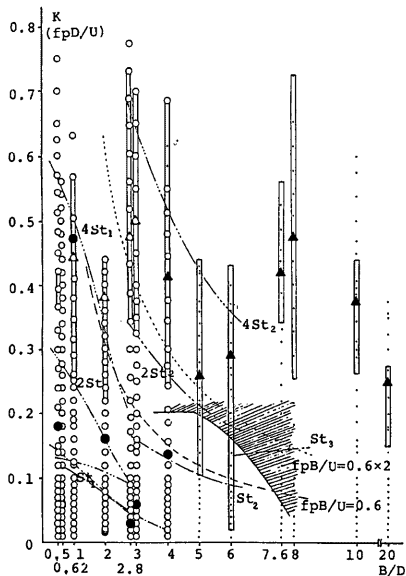


Fig. 15 Unsteady pressure characteristics on the side surface of bodies in pulsating flow (trailing edge).

完全剝離型渦励振	$B/D=0.5$ 矩形断面
前縁剝離型曲げ渦励振	$B/D=2$ 矩形断面
前縁剝離型ねじれ渦励振	$B/D=2$ 矩形断面
ギャロッピング	$B/D=1$ 矩形断面, $B/D=2$ 矩形断面
ねじれフラッタ	$B/D=2$ 矩形断面, $B/D=5$ 矩形断面

ここで、各現象の発現機構について、現在知られている事柄を以下に簡単に記しておく。

(1) 渦励振 物体背後にできるカルマン渦の放出周波数と物体固有振動数が一致する風速付近で物体が共振現象を起こすカルマン渦励振と、断面振動に伴って生じる前縁剝離渦と後縁二次渦が一体化することにより発現する前縁剝離型渦励振に分けられる。渦励振は比較的低風速で生じ、風速域、振幅が限定的な振動現象で構造物の施工性や使用性あるいは疲労等の面から問題をきたす可能性がある。

(2) ギャロッピング 曲げ1自由度フラッタ現象で正方形に近い比較的 bluff な断面で発生する。これは限界風速を超えると発生し以後風速の増加に伴って振幅が増大する発散振動である。この現象は断面まわりの時間平均流れが、振動中も再付着しない場合に起こるとされており、動きに起因した相対迎角が生じたとき下面に形成される内部循環流、上面での圧力回復が発現要因と考えられる。準定常的な取り扱いが可能であり、発生要因としては、揚力係数勾配 $dC_f/da < 0$ という条件が見出されている。ギャロッピングとカルマン渦励振では、カルマン渦の生成位置、あるいは渦の強度といったものが強く影響しているものとされている。

(3) ねじれフラッタ ねじれフラッタは振動中剝離流れが、非定常あるいは定常に再付着する場合に起こるねじれ1自由度のフラッタ現象であり、剝離バブルの存在と流れの遅れの効果が発生要因としてあげられている。特に $B/D=2$ 矩形断面のねじれフラッタは断面後縁部における剝離せん断層の挙動が励振力の要因と考えられ、流れの非定常な再付着が発生機構に対して重要なものとなっている。 $B/D=5$ 矩形断面では、断面前縁部とねじれ中心より後縁部の一部において流体より正の仕事がなされており、発生機構として前縁側の剝離バブルの挙動とねじれ中心より後流側面部分に及ぼす流下渦の挙動が励振力の原因と考えられる。

3.2 実験概要

本実験において、まず、各種断面に対する空力振動特性を知るために、風速一応答振幅曲線を求めた。模型はその両端部に取り付けられた端板に振動実験用アームを取り付け8本のコイルスプリングにより剛性を与えられており、風洞内に水平（迎角 $\alpha=0^\circ$ ）に設置された。断面の前縁及び後縁の動きを同相状態あるいは逆相状態のみに限定するために曲げ1自由度支持あるいはねじれ1自由度支持を行なっている。振動振幅は、コイルスプリング端に取り付けられたコの字型エレメントに貼り付けられた歪みゲージの抵抗値の変化として電氣的に検出し、ホイットストンブリッジ（新興通信事業部製）を通じて動歪み測定器（新興通信事業部

Table 3 Test conditions for two-dimensional model.

B/D	$f_g(\text{Hz})$	$m(\text{kg} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^2)$	$\delta(20 \text{ mm})$	$\delta(15 \text{ mm})$	$\delta(10 \text{ mm})$	$\delta(5 \text{ mm})$
0.5	3.69159	0.16949	0.03193	0.03141	0.02933	0.02885
1.0	2.36735	0.27121	0.02928	0.02882	0.02782	0.02537
2.0	3.44156	0.24716	0.008587	0.006519	0.004340	0.004036
B/D	$f_g(\text{Hz})$	$I(\text{kg} \cdot \text{sec}^2)$	$\delta(0.1 \text{ rad})$	$\delta(0.075 \text{ rad})$	$\delta(0.05 \text{ rad})$	$\delta(0.025 \text{ rad})$
2.0	7.83289	9.8387×10^{-4}	0.006983	0.006332	0.004964	0.003466
2.0	5.88889	2.0269×10^{-3}	0.008486	0.006417	0.003444	0.003272
5.0	3.03030	2.1498×10^{-3}	0.023990	0.019270	0.009301	0.003809

δ : logarithmic damping decrement

製, DSA-602B) を介しローパスフィルタ (前出) を通した後, リニアコーダ (前出) に記録した。風洞内平均風速は, NPL 型ピトー管を風洞内に設置し総圧と静圧の差圧をデジタルノメータ (前出) により測定した。また, 脈流中における応答振幅測定実験は, 各断面の風速—応答振幅曲線図より測定風速を決定し, 風速を一定とし脈流周波数を変化させて応答変化を調べた。風速は, 一様流中でピトー管により得た風速値に熱線風速計 (前出) のキャリブレーションを合わせ, 脈流中での風速設定は熱線風速計によった。なお, 振動実験で用いた模型の物理諸元を Table 3 に示す。

3.3 実験結果及び考察

(1) $B/D=0.5$ (完全剝離型渦励振) Fig. 16 に完全剝離型渦励振応答中の, 脈流周波数—応答振幅曲線を示す。縦軸は応答振幅で横軸が脈流周波数である。わずかではあるが $k=2S_t, 4S_t$ 付近で応答振幅が増加している。これは, 静止断面の変動圧力特性において, ストロハル数成分のピークが $k=2S_t, 4S_t$ で大きくなること, つまりカルマン渦の巻き込みが強くなることに対応している。カルマン渦が物体振動と脈流刺激の双方により強化され, 応答振幅が増加したと考えられる。しかしあまり顕著でないのは, 物体振動によるカルマン渦の安定化の影響が大きいためと思われる。

(2) $B/D=1$ (ギャロッピング) Fig. 17 は, ギャロッピング応答中の脈流周波数—応答振幅曲線である。脈流発生装置設置による風洞内圧変化, あるいは気流の乱れの影響をうけ, 脈流中の応答は一様流中で測定された応答振幅に比べて小さくなっている。しかし, $k=S_t, 2S_t, 4S_t$ といった周波数の脈流に対しては敏感に反応し, 応答が大きくなる。これは脈流刺激により, 振動断面まわりの剝離せん断層の不安定性が増幅され, 剝離せん断層の曲率が増大し, 時間平均流れがより断面に近づき, せん断層と断面後縁の干渉から内部循環流が強くなったことによると思われる。

(3) $B/D=2$ (前縁剝離渦型渦励振) Fig. 18 に前縁剝離渦型曲げ渦励振応答中の, 脈流周波数—応答振幅曲線を示すが, 応答振幅に顕著な変化はみられない。これは物体振動による剝離せん断層の不安定性増幅効果が大きく, 脈流刺激は応答振幅に影響を与えるほど効果をもたらしなかったものと思われる。Fig. 19 には前縁剝離渦型ねじれ渦励振についての結果を示す。ここでは $k=0 \sim S_t$ で振幅の増大が認められるが, 脈流周波数が低周波数の場合は, 主流方向の乱れ強さが大きくなる傾向があり, その影響が出たものと判断される。 k が S_t を越えと一度一様流と同じレベルに振幅が減少した後 $k=2S_t$ 付近で振幅が大きくなる。これは静止断面実験で得られた脈流周波数に対して敏感な周波数帯域と, ある程度対応していると判断される。

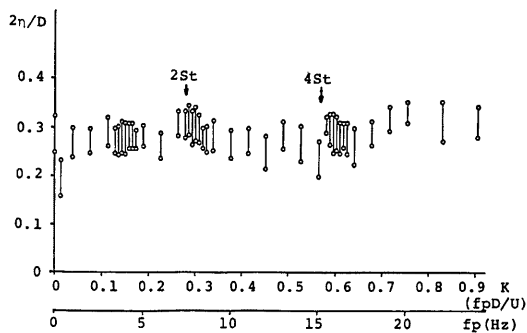


Fig. 16 Heaving response amplitude v.s. pulsating flow frequency diagram ($B/D=0.5$, $D=0.05$ m, $f_y=3.69159$ Hz, $U=1.332$ m/sec).

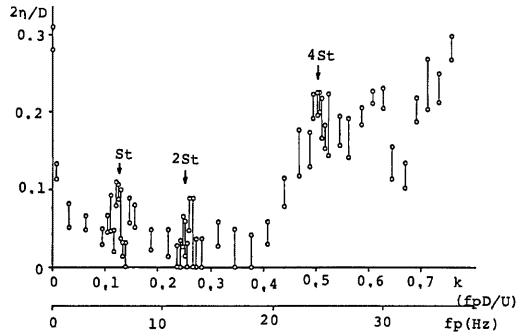


Fig. 17 Heaving response amplitude v.s. pulsating flow frequency diagram ($B/D=1$, $D=0.05$ m, $f_p=2.36735$ Hz, $U=2.39$ m/sec).

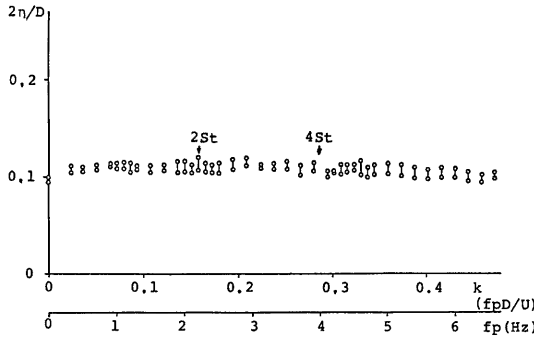


Fig. 18 Heaving response amplitude v.s. pulsating flow frequency diagram ($B/D=2$, $D=0.05$ m, $f_p=3.44156$ Hz, $U=0.697$ m/sec).

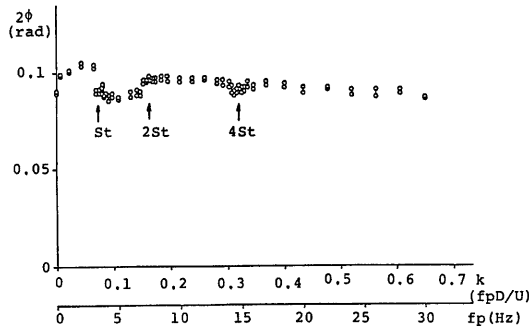


Fig. 19 Torsional response amplitude v.s. pulsating flow frequency diagram ($B/D=2$, $D=0.05$ m, $f_p=7.83289$ Hz, $U=2.309$ m/sec).

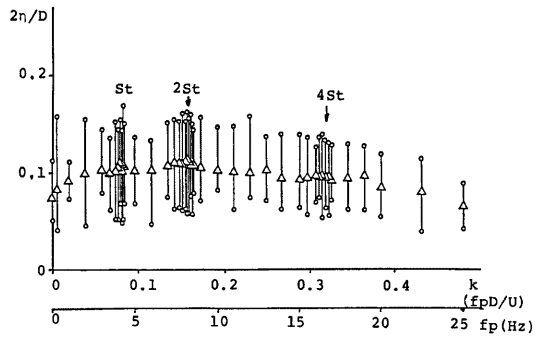


Fig. 20 Heaving response amplitude v.s. pulsating flow frequency diagram ($B/D=2$, $D=0.05$ m, $f_p=3.44156$ Hz, $U=2.607$ m/sec).

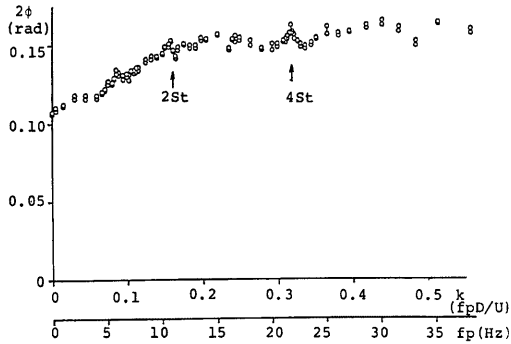


Fig. 21 Torsional response amplitude v.s. pulsating flow frequency diagram ($B/D=2$, $D=0.05$ m, $f_p=5.8889$ Hz, $U=3.430$ m/sec).

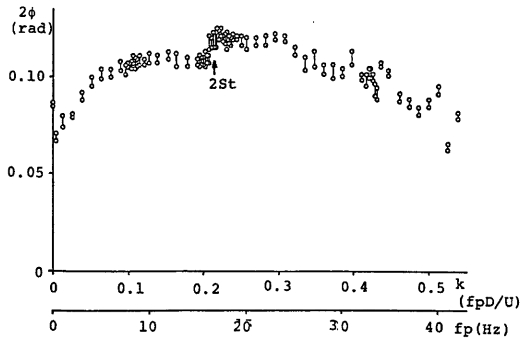


Fig. 22 Torsional response amplitude v.s. pulsating flow frequency diagram ($B/D=5$, $D=0.04$ m, $f_p=3.03030$ Hz, $U=3.124$ m/sec).

(4) $B/D=2$ (ギャロッピング) Fig. 20 にギャロッピング応答中の結果を示す。波形がビート状で評価が困難であるが、発生機構としては $B/D=1$ 矩形断面と同様であると考えてよく、わずかではあるが脈流による剝離せん断層の不安定性増幅効果を受けていると思われる。

(5) $B/D=2$ (ねじれフラッタ) Fig. 21 にねじれフラッタ応答中の脈流周波数一応答振幅曲線を示す。脈流中では一様に応答振幅が大きくなっているが、特に $k=4S_t$ 付近のピークが着目される。この周波数の脈流中では、静止断面の変動圧力特性が、ストロハル数成分のスペクトルピーク、脈流周波数成分のスペクトルピークともに極大となっており、その結果と対応している。すなわち剝離せん断層の不安定性が増幅されてその曲率が増大し、剝離バブルの縮小など生じ、後縁でのエネルギー授受が活発に行われていることによると考えられる。

(6) $B/D=5$ (ねじれフラッタ) Fig. 22 にねじれフラッタ応答中の結果を示す。ここでは $k=2S_t$ でピークを迎え、その後徐々に振幅は減少している。 $k=2S_t$ では、振動断面まわりの剝離せん断層が脈流による刺激を受け、曲率増大に伴う剝離バブル内の圧力低下、及びそこから生じる安定した流下渦形成などにより、励振力が大きくなっているものと考えられる。

4. 結 論

本研究では脈流における矩形断面の変動圧力特性、動的応答特性を調べることにより以下のような結果が得られた。

1. 静止断面周りの変動圧力特性により、矩形断面は次の3つのタイプに大別される。

(1) 完全剝離型 $B/D < 2$ の断面で完全剝離渦型渦励振が発現する。このタイプの断面の剝離せん断層は、 $k=2S_t, 4S_t$ の周波数成分の脈流により不安定性が増幅され、安定したカルマン渦放出、同時対称放出を行う。

(2) 前縁剝離型 $2 \leq B/D < 6$ の断面で、前縁剝離渦型渦励振が発現する。このタイプの断面の剝離せん断層は、前縁剝離渦型渦励振の発現無次元風速の逆数で定義される無次元周波数の2倍付近で不安定性が増幅され、同時対称渦放出を行う。

(3) 再付着型 $B/D \geq 6$ の断面で定常再付着型の断面である。このタイプの断面の剝離せん断層は、ストロハル数の2倍付近で不安定性が増幅され、同時対称渦放出を行う。

2. 脈流刺激による剝離せん断層の不安定性増幅効果としては、カルマン渦の強化、剝離せん断層の曲率の増大、剝離バブル長の縮小、各種の渦生成などが挙げられる。

3. 完全剝離型の渦励振は、カルマン渦の巻き込みの強さに反応し、脈流刺激により応答振幅に変化を生じる。

4. ギャロッピング、ねじれフラッタでは、特に k (脈流無次元周波数、 $f_p D/U$; f_p : 脈流周波数、 D : 代表長、 U : 平均流速) がストロハル数の整数倍付近で応答に変化がみられ、それらの現象とカルマン渦との関連を示唆する結果が得られた。前縁剝離型渦励振においては、今回のような小さな乱れ強さの脈流の場合には顕著な変化はみられなかったが、物体振動による刺激の強さとの相対的な問題もあり、ギャロッピング、ねじれフラッタ等と同様にさらに詳細な検討が必要である。

参 考 文 献

- 1) 中口 博・橋本貴久裕・武藤真理: 矩形断面柱の抗力に関する一実験, 日本航空学会誌, 第16巻, 第168号, 1968, pp. 1-5.
- 2) Bearman, P.W., D.M. Trueman: An Investigation of the Flow around Rectangular Cylinders, The Aeronaut, Q. Part 3, 1972, pp. 229-237.
- 3) Nakamura, Y., Y. Tomorari: The Effect of Turbulence on the Drags of Rectangular Prisms,

- transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 19, 1977, pp. 81-86.
- 4) Lanevill, A., Lu Zhi Young: MEAN FLOW PATTERNS AROUND TWO-DIMENSIONAL RECTANGULAR CYLINDERS AND THEIR INTERPRETATION, Journal of Wind engineering and Industrial Aerodynamics, 14, 1983.
 - 5) 岡島 厚：種々な断面辺長比の矩形柱周りの流れ，日本風工学会誌，第17号，pp. 1-19，昭和58年．
 - 6) Michalke, A.: The Instability of Free Shear Layers, A Survey on the State of Art, Deutsche Luft-und Raumfahrt, Marz 1970.
 - 7) Parker, R., M.C. Welsh: Effects of sound on flow separation from blunt flat plates, Int. J. Heat & Fluid Flow, Vol. 4, No. 2, pp. 113-127, June, 1983.
 - 8) 松本 勝・C. Knisely, F. Menacher: 非定常流れの中での矩形断面の流れのパターンと空力特性について，第8回風工学シンポジウム論文集，1984年．