角柱まわりのキャビテーション流れにおける励振挙動*

太田 照和^{*1}, 高橋 俊彦^{*2}, 加賀 拓也^{*3}

Resonance Behaviors of Cavity Flow around a Rectangular Cylinder

Terukazu OTA, Toshihiko TAKAHASHI and Takuya KAGA

Resonance behaviors of two-dimensional cavity flow around a rectangular cylinder, accompanied by severe vibration at some values of cavitation number, were experimentally studied by measuring the fluid dynamic forces and surface pressures, and by the flow visualization. The width-to-height ratio of the cylinder tested is 2.8, which is called the critical value. Periodic fluctuations of the surface pressure were investigated using a phase-averaging technique. Severe vibration occurs at a cavitation number, in which the fixed-type cavitation is formed in the separation bubble on the side surface and the surface pressure fluctuates during the time when a cloud of bubbles is shed from its cavity termination.

Key Words: Cavitation, Unsteady Flow, Rectangular Cylinder, Fluctuating Lift and Drag, Surface Pressure, Phase-Averaging Technique

1. 緒 言

一様流中に置かれた角柱は各種構造物あるいは熱交換器の要素として用いられる最も基本的な形状であり、その流れ特性、流力弾性振動や流体騒音、あるいは離領域における熱伝達特性等は工学的に重要な問題である。角柱まわりの流れ場は大規模渦の形成と放出により強い非定常性を示し、従来より空力特性に関する数多くの研究^{(1)~(4)}がなされている。しかしながら作動流体が高速で流動する液体の場合、キャビテーションの発生は避けられず、それにより流体力の非定常性は増大あるいは変化し、機器の安定作動の重大な障害となることが考えられる。

大規模な離領域に発生するキャビテーションの研究は円柱^{(5)~(9)}、くさび⁽¹⁰⁾、後向きステップ⁽¹¹⁾、鈍頭円柱⁽¹²⁾、垂直平板⁽¹³⁾など種々の物体に対しなされているが、角柱に関する研究例は少なく著者ら^{(14)~(16)}による実験的研究を見るにすぎない。著者らは前縁からのはく離せん断層が周期的に再付着する臨界形状とさ

れる辺長比2.8の角柱⁽³⁾に関して種々の迎え角、キャビテーション係数について実験を行い、迎え角が0°および10°の場合、特定のキャビテーション係数において空洞の分裂を伴い、変動および平均流体力が急激に増大することを示した。空洞の励振挙動は沼知ら⁽¹⁷⁾、Knapp⁽¹⁸⁾により古くから示されており、翼形^{(19)~(22)}、円柱^{(5)~(9)}等について付着空洞からの気泡群の離脱およびそれに伴う励振に関する詳細な検討がなされつつある。しかしながら、はく離点が前縁に固定されせん断層が物体と大きく干渉する角柱では、空洞の様相、流体力の非定常性は著しく変化することが予想され、流れの再付着および迎え角による影響も考えられるなど未解明の部分が多い。

こうした観点より、本研究ではキャビテーション未発生状態における時間平均再付着点が既知である辺長比2.8の二次元角柱を取り上げ、特定のキャビテーション係数範囲において発生する励振状態に着目し、表面圧力および流体力の測定、キャビテーションの様相を写真撮影することにより、励振の発生機構およびその非定常特性を解明しようとするものである。

2. 記 号

C_D : 平均抗力係数 $= D / (1/2) \rho U_\infty^2 H$

* 原稿受付 平成6年1月11日。

^{*1} 正員、東北大学工学部 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)。^{*2} 准員、東北大学大学院。^{*3} 正員、八戸工業大学工学部 (〒031 八戸市大字妙字大開88-1)。

- C_D : 変動抗力係数 $= D'/(1/2)\rho U_\infty^2 H$
 C_L : 平均揚力係数 $= L/(1/2)\rho U_\infty^2 D$
 C_L' : 変動揚力係数 $= L'/(1/2)\rho U_\infty^2 D$
 C_p : 平均圧力係数 $= (p-p_\infty)/(1/2)\rho U_\infty^2$
 C_p' : 変動圧力係数 $= p'/(1/2)\rho U_\infty^2$
 σ_v : キャビテーション係数
 $= (p_\infty - p_v)/(1/2)\rho U_\infty^2$
 Re : レイノルズ数 $= U_\infty H/\nu$
 St : ストロークハル数 $= fH/U_\infty$
 α : 迎え角
 d, h : 角柱長辺, 短辺
 D, H : 角柱の主流および垂直方向投影幅
 U_∞, p_∞ : 主流の速度, 圧力
 p_v : 飽和蒸気圧
 f : 周波数
 ν : 水の動粘度
 ϕ : 位相
 E_x : 変動量 x のパワースペクトル
 添字
 rms: 二乗平均平方値
 ref: 基準信号

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置 実験には密閉形回流水槽⁽²³⁾を使用した。本実験では水の空気含有量の計測は行っていないが、同一水槽による実験⁽²⁴⁾によれば空気含有度は $\gamma_w/\gamma_{ws}=1.18\sim 1.20$ (γ_w : 本実験水槽の水の空気含有量, γ_{ws} : 飽和空気含有量)であった。供試角柱の詳細は文献(16)と同一であるが、図1にはその概略を示す。供試角柱には表面圧力測定のため全周にわたり24箇所にひずみゲージ式圧力変換器が図1中の番号位置に埋め込まれており、測定部に片持支持される。支持部には変動流体力測定用のひずみゲージが接着される⁽²⁵⁾。ブロッケー比は5~7.9% ($\alpha=0\sim 12.5^\circ$)である。変動流体力測定系の固有振動数を調べるため、測定系を打撃加振し、ひずみゲージからの出力を周波数

解析した結果、供試角柱短辺および長辺方向にはそれぞれ約240, 320 Hzに、ケース部では約265 Hzに、卓越した周波数が見いだされた。また本実験装置によるキャビテーション未発生状態の実験結果は既存の実験値^{(1)~(4)}とよく一致することを確認している。

3.2 実験方法 実験は主流速度を $U_\infty=9.0$ m/s ($Re=1.9\times 10^5\sim 2.8\times 10^5$)と一定に保ち、迎え角 α を $0\sim 12.5^\circ$ に変化させ、主流静圧 p_∞ を低下させることにより、キャビテーション係数 σ_v を励振領域を中心とした0.4~2.0の範囲で段階的に変化させ行なった。なお本実験 σ_v 範囲ではいずれの迎え角においてもキャビテーション発生状態にあり、初生キャビテーション係数は $\sigma_v>2.0$ である。供試角柱に作用する変動流体力、表面圧力は上述のひずみゲージおよび圧力変換器により測定した。なお平均流体力は表面圧力分布を図式積分することにより算出した。本測定におけるブロッケー比は前述のとおり比較的小さく、また変動圧力に対する有効な補正法はないことから、本研究ではブロッケー効果の補正は行っていない。各信号波形は動ひずみ測定器を経てA-D変換ボードによりデジタル化した後、パーソナルコンピュータの固定ディスクに取り込み、サンプリング周波数2 kHz、標本数32 768の時系列より各統計量を求めた。キャビテーションの発生様相はせん光時間1~3 μ sのクセノンランプにより写真撮影を行なった。

本研究では角柱表面圧力の組織的変動の様相を明らかにするため、位相平均法⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾を用いて表面変動圧力の周期成分を求めた。位相平均の基準信号としては周波数フィルタを通した変動揚力波形を用いた。表面圧力波形は時間平均成分、変動の周期成分、不規則成分に分離できる⁽²⁸⁾として、位相平均を求めると

$$\langle p \rangle = p + \bar{p} \dots \dots \dots (1)$$

となる。ここで $\langle p \rangle$ は位相平均値、 $\bar{p}$ は変動の周期成分である。本研究では式(1)より $\bar{p}$ を求め、

$$\bar{C}_p = \frac{\bar{p}}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \dots \dots \dots (2)$$

より圧力係数の周期変動成分を求めた。

4. 結果および考察

4.1 平均および変動揚・抗力係数 図2は $C_D, C_{D,rms}$ の σ_v による変化を種々の α についてまとめて示す。 C_D は $\sigma_v>1.25$ においては σ_v によらずほぼ一定値を示すが、 $0.9\leq \sigma_v\leq 1.25$ の範囲では、激しい騒音を発生し、 σ_v の低下とともに C_D は急激に増大し、 $\sigma_v<0.9$ で徐々に低下する。この C_D の σ_v による変化は

図1 供試角柱および記号

図2 C_D および C_{Drms} の σ_v による変化 図3 C_L および C_{Lrms} の σ_v による変化

Ota ら⁽¹⁵⁾ による結果とほぼ一致する。一方、 C'_{Drms} は C_D が急激に増加、減少を示す $0.8 \leq \sigma_v \leq 1.25$ の範囲において著しく増大する。 $\sigma_v < 0.8$ では C'_{Drms} は急激に低下し騒音も小さくなる。この σ_v 範囲における C_D 、 C'_{Drms} の増大の程度は α の増加とともに低下し、 $\alpha = 12.5^\circ$ では C_D は増大せず、 σ_v の低下とともに減少する。

図3には C_L 、 C'_{Lrms} の σ_v による変化を示す。 C_L 、 C'_{Lrms} も C_D 、 C'_{Drms} と同様の σ_v 範囲において急激な増大を示すが、 C'_{Lrms} は α による変化は比較的小さく、 α の増加とともに低い σ_v において極大値となる傾向を示す。この C'_{Drms} 、 C'_{Lrms} が急激な増大を示す $0.8 \leq \sigma_v \leq 1.25$ の範囲を以後、励振領域と呼ぶ。

4・2 キャビテーションの発生様相 図4～5には $\alpha = 0^\circ$ 、図7には $\alpha = 10^\circ$ における代表的なキャビテーションの発生様相を示す。写真は供試角柱の側面上方よりストロボ光を照射し撮影されており、照明されていない側面近傍の様相は撮影されていない。また図4、5は角柱の斜め上方より撮影された様相であり、図6、7は角柱軸方向からの撮影である。図4(a)、(b)に示す $\sigma_v = 2.0, 1.5$ では側面前半部に塊状の流動形気泡が発生し側面後半部において崩壊、消滅する。 $\sigma_v = 2.0$ における塊状気泡の様相は垂直平板の乱流せん断流に形成される流れ方向渦およびスパン方向渦に発生するキ

ャビテーションの様相⁽¹³⁾に酷似しており、これらの流動気泡が前縁からのはく離せん断層に形成される渦中心の低圧部に発生していることがわかる。

σ_v の低下に伴いこの塊状の流動気泡は発生領域を拡大し、間欠的に励振状態を示す図5(a)、(b)の $\sigma_v = 1.25$ では前縁近傍より側面後半部まで準定常的に発生し、付着形空洞の様相を呈する。励振状態にある図5(b)では付着形の様相を呈する空洞の後半部より気泡塊が背面近傍へ離脱する様子が観察される。

励振状態にある図5(c)、(d)に示す $\sigma_v = 1.2$ では、高速度連続写真による観察結果⁽¹⁶⁾をもとに気泡塊の離脱様相を時間変化の順に示したものである。図5(c)では前縁より発生する付着形空洞は角柱前縁のごく近傍より白濁しており、翼形⁽²¹⁾、円柱⁽⁹⁾に生じる付着空洞前半部が透明な気膜状であるのに対して、角柱では空洞が前縁からのはく離せん断層より発達し、はく離点直後より強い乱流混合作用の影響を受けていることがわかる。この空洞の後半部には微細な気泡群よりなる雲状の隆起部が生じる。図5(d)では雲状の隆起部が背面に巻き上がるように離脱し、後流には渦キャビテーションが観察される。気泡塊の放出は両側面より交互に行われ、放出された気泡塊の間には渦糸状のキャビテーション⁽⁶⁾が見られる。離脱した気泡塊は背面近傍に放出される間に白色度が低下し、気泡の

(a) $\sigma_v=2.0$ (b) $\sigma_v=1.5$

図4 キャビテーションの発生様相($\alpha=0^\circ$)

(a) $\sigma_v=1.25$ (b) $\sigma_v=1.25$

(c) $\sigma_v=1.20$ (d) $\sigma_v=1.20$

図5 キャビテーションの発生様相($\alpha=0^\circ$)

(a) (b)

図6 キャビテーションの発生様相
($\alpha=0^\circ$, $\sigma_v=0.8$)

(a) (b)

図7 キャビテーションの発生様相
($\alpha=10^\circ$, $\sigma_v=1.05$)

崩壊、消滅を示している。

図6に示す $\sigma_v=0.8$ では、両側面からの空洞が背面近傍で合流し、気泡塊の放出は空洞後端部より生じる。また、図6(a)、(b)のように $\sigma_v=0.8$ では空洞後端部での気泡塊の放出位置が流れ方向に顕著に変化する様子が見られ、前縁からの空洞の著しい伸縮が観察された。 $\sigma_v<0.8$ では σ_v の低下とともに空洞は流れ方向に発達しスーパキャビテーションの様相を示す。こ

れらの観察結果より励振状態ははく離せん断層に発生する流動形空洞からスーパキャビテーションへ移行する遷移領域で生じることがわかる。

図7には $\alpha=10^\circ$ における励振領域 $\sigma_v=1.05$ でのキャビテーションの様相を示す。 α の増加に伴い側面AD上でははく離泡は縮小するため、前半部に生じる付着形空洞およびこの空洞からの気泡塊の離脱は小規模に発生する。一方で側面BCおよび背面CD近傍には発達した空洞が観察され、背面下流には、その空洞後端部から気泡塊が放出されることが観察された。また、 $\sigma_v=0.8\sim 0.95$ では背面下流に発達する空洞が $\alpha=0^\circ$ の場合と同様に伸縮することも観察された。

4.3 平均および変動圧力係数 図8には励振領域における C_p および C'_{prms} 分布を示す。図8(a)に示す $\sigma_v=1.15$ では $\alpha=0\sim 5^\circ$ において側面前半部のはく離領域に付着形の様相を呈する空洞が発生し、 C_p 、 C'_{prms} ともに小さく平坦な形状となる。この領域では壁面平均圧力は蒸気圧より高く、空洞ははく離せん断層に形成される渦の低圧部より発達していることを示している。この空洞後端部付近でキャビテーション未発生状態における再付着領域⁽¹⁴⁾に対応する側面後半部の C_p 上昇領域では気泡塊の離脱が観察され、 C'_{prms} が増大する。 $\alpha=0, 25^\circ$ では背面においても C'_{prms} が増大する。

図8(b)に示す $\sigma_v=0.95$ では、 $\alpha=7.5\sim 12.5^\circ$ において側面AD後半部の C_p 上昇領域で C'_{prms} が増大する。側面BCおよび背面では前縁Bからののはく離せん断層は側面BCより離れ、再付着しないため C_p が全域で低く平坦な形状となり、 C'_{prms} も小さくなる。 $\alpha=0\sim 5^\circ$ では側面および背面において付着形空洞が発達し、平均圧力が蒸気圧に近づくと同側面後半部および背面における C'_{prms} は図8(a)に示す $\sigma_v=1.15$ に比較して低下する。これらの結果より変動流体力の増大は再付着する側面のはく離泡内に付着形空洞が形成される際に、再付着領域からの気泡塊の離脱に伴う大きな圧力変動により生じることがわかる。

図9には $\alpha=0, 10^\circ$ の場合の代表的な位置における C_p 、 C'_{prms} の σ_v による変化を示す。図9(a)には $\alpha=0^\circ$ 、再付着領域の側面後縁近傍No.12および背面CD中央No.14における、また図9(b)には $\alpha=10^\circ$ 、図9(a)と同一の測定点および側面ADの再付着領域No.19における変化をそれぞれ示す。いずれの測定点においても、 C'_{prms} が増大する σ_v 範囲において σ_v とともに C_p は低下し、発達した付着形空洞が形成される σ_v 範囲では図9(b)に示すように多少の誤差はあるものの $\sigma_v=-C_p$ となる。図9(a)に示す $\alpha=0^\circ$ で

 図 8 C_p および C'_{prms} 分布

 図 9 C_p および C'_{prms} の σ_v による変化

は, No. 12, 14 とともに $0.9 \leq \sigma_v \leq 1.15$ において C'_{prms} は増大し C_p は急激に低下する。

図 9(b) に示す $\alpha = 10^\circ$ の場合, 側面 BC, 背面には比較的安定に空洞が発生するため No. 12, 14 における C_p , C'_{prms} の変化は, $1.05 \leq \sigma_v \leq 1.25$ においてわずかに生じる。一方で, 側面 AD 上の No. 19 では $0.8 \leq \sigma_v \leq 1.05$ において C'_{prms} は極端に増大し, σ_v の低下に従い C_p は急激に低下する。これは α が増大することにより, 側面 AD 上の再付着領域が上流に移動し, はく離泡内での C_p が上昇するため付着形空洞の発達お

よびこれに伴う気泡塊の離脱がより上流でしかも低い σ_v において生じるためであり, 励振領域では α の増大に伴い C'_{prms} は低い σ_v において極大値を示し, C'_{prms} が急激に低下することになる。

4・4 励振周波数 図 10 には $\alpha = 0^\circ$ および 10° における変動揚力 L' のパワースペクトルを示す。いずれの α においても励振領域では $f \leq 100$ Hz に非常に大きなエネルギーレベルを示す卓越周波数が現れる。またすべての σ_v の範囲において測定系の固有振動数に起因すると考えられる $200 \text{ Hz} \leq f \leq 300 \text{ Hz}$ において

図 10 変動揚力 L' のパワースペクトル

エネルギーの増大を示す。 $f \leq 100$ Hz での卓越周波数に着目すると、励振領域より高い $\sigma_v = 1.6$ では、 $\alpha = 0^\circ$ の場合 $f \approx 62$ Hz, $St \approx 0.17$ に、 $\alpha = 10^\circ$ の場合 $f \approx 46$ Hz, $St \approx 0.19$ に卓越したエネルギーの極大値を示す。 $\alpha = 0^\circ$ でのこの St は空気流における実験値^{(1)~(4)}と比較的よく一致し、また本実験装置におけるキャビテーション未発生状態での St とも一致することを確認しており、この卓越周波数が渦放出によるものでありキャビテーション発生の影響は比較的小さいことがわかる。

励振領域では、図 10(a) に示す $\alpha = 0^\circ$ の場合この渦放出周波数近傍において極端にエネルギーが増大しており、気泡塊の離脱が渦放出により生じることを示している。 σ_v が低下するに従いこの卓越周波数およびそのエネルギーレベルは低下する。

図 10(b) に示す $\alpha = 10^\circ$ の場合、励振領域では上述の渦放出周波数でのエネルギーは低下し、 σ_v の低下とともに低周波数領域に現れる卓越周波数でエネルギーが増大する。空洞の伸縮が観察された $\sigma_v = 0.95, 0.8$ では $f \approx 10$ Hz, $St \approx 0.045$ においてエネルギーが著しく卓越した極大値を示し、これらの相関が示唆される。スーパキャビテーション状態となる $\sigma_v = 0.6$ ではいずれの α でも卓越周波数は消滅し、変動の小さい安定した流れとなっていることを示している。

図 11 には変動揚力のパワースペクトルより求めた $f \leq 100$ Hz における卓越周波数の σ_v による変化を示す。励振領域では $\alpha = 0^\circ$ の場合、 $\sigma_v \geq 1.25$ における渦放出による周波数 $St \approx 0.17$ は σ_v の低下とともに徐々に減少し、変動揚力が特に増大する σ_v 範囲ではその半調波成分に近い周波数領域にも卓越周波数が現れる。この渦放出による卓越周波数は $\alpha \leq 7.5^\circ$ では励振

図 11 St の σ_v による変化

領域の全域において現れるが、 $\alpha \geq 10^\circ$ では前述のようにそのエネルギーレベルは低下する。 $\alpha \geq 5^\circ$ では $St \approx 0.045$ を中心とした低周波数領域に卓越周波数が現れ、 $\alpha = 10, 12.5^\circ$ ではこの卓越周波数が最も顕著となり、倍調波成分付近にも卓越した周波数が現れる。

4.5 位相平均法による表面変動圧力の非定常特性

表面圧力分布の周期変動の様相を調べるため位相平均法により解析を行った。基準信号としては変動揚力波形に、前述の周波数解析より得られた渦放出周波数(f_v , $St \approx 0.17 \sim 0.19$)あるいは低周波数領域での卓越周波数(f_l , $St \approx 0.045$)を中心周波数とした数値的なバンドパスフィルタを通した波形を用いた。

図 12 には $\bar{C}_p$ 分布の位相角 ϕ による変化を示す。図 12(a) に示す $\alpha = 0^\circ$, $\sigma_v = 1.6$ での f_v に基づく C_p 分布において、側面では ϕ が進むに従い極小値および極大値が中央部付近より顕著になり、下流に移動し振幅が大きくなる様子がわかる。また背面 CD でもこれに対応して $\bar{C}_p$ が大きく変化する。変動圧力の極小値は圧力測定孔上の渦構造の中心に対応し、極大値は側面

近傍に成長しつつある渦構造と放出渦の間に主流が流れ込むことによる⁽²⁹⁾と考えられるので、渦放出周波数で一つの渦構造が側面中央部付近より顕著となり、成長しつつ下流へ移動し放出されることがわかる。この渦構造の中心部付近には塊状の流動気泡が発生し、共に移動するものと考えられる。

図 12(b)には励振領域である $\alpha=0^\circ$, $\sigma_v=1.15$ における f_v に基づく $\bar{C}_p$ 分布の変化を示す。側面前半部で

は $\bar{C}_p$ の変化は小さく極小および極大値の下流への移動は不明りょうである。しかしながら、気泡塊の離脱する側面後縁近傍および背面では $\bar{C}_p$ が大振幅で変化し、 ϕ による変化は図 12(a) $\sigma_v=1.6$ と同様に極小および極大値が下流へ移動する傾向を示す。翼形に発生する空洞の励振挙動に関して久保田ら⁽²⁰⁾が示したように、離脱する気泡は側面前半部の空洞に発生した気泡が放出渦の低圧部に滞留し、共に移動する渦キャピテーションであることがわかる。図 12(b)はこの渦キャピテーションが付着形空洞後端部付近で急速に成長することを示唆しており、離脱時にその上流側に流入する高い全圧の液流により気泡の崩壊を伴い大きな圧力変動を生じるものと考えられる。

図 12(c)は $\alpha=10^\circ$, C'_{rms} が極大となる $\sigma_v=0.95$ における f_i に基づく $\bar{C}_p$ 分布の変化である。空洞の発達した側面 BC、背面で変化は非常に小さいが、前面 AB および側面 AD では $\bar{C}_p$ 分布の大きな変化が見られる。側面 AD では付着形の様相を呈する空洞後端部付近で、気泡塊の離脱が観察される領域において $\bar{C}_p$ が ϕ により大きく変化する。また前面 AB および側面 AD 後縁近傍における $\bar{C}_p$ の変化は同位相であり、前述のように側面 BC、背面近傍に発達する空洞が流れ方向に伸縮することによる影響が考えられる。側面 AD での $\bar{C}_p$ の変化はこの空洞の伸縮により気泡塊の小規模な離脱が誘発されることによるものと推測される。

図 12 $\bar{C}_p$ 分布の ϕ による変化

5. 結 言

臨界形状とされる辺長比2.8の二次元角柱に関して、特定のキャビテーション係数で発生する励振状態に着目し、主流速度一定のもとでその非定常特性を明らかにした。以下に結果の要約を示す。

(1) 迎え角により程度の差異はあるが、はく離せん断層に発生する流動形空洞からスーパキャビテーションへの遷移領域 $0.8 \leq \sigma_v \leq 1.25$ において平均および変動流体力が急激に増大する。

(2) 変動流体力の増大ははく離せん断層前半部に発達した付着形空洞が形成される際に発生する。この空洞は後端部からの気泡塊の離脱に伴い大きな圧力変動を発生する。迎え角の増加によるはく離泡の縮小に伴い、気泡塊の離脱は上流で発生するため背面における圧力変動は低下し変動抗力係数は著しく低下する。

(3) 励振状態を示すキャビテーション係数範囲では、迎え角が 0° の場合、揚力は $St \approx 0.17$ を中心としたキャビテーション未発生状態の渦放出周波数近傍で気泡塊の離脱により大きく変動する。この気泡塊は付着形空洞の後端部において急速に成長する渦キャビテーションであり、離脱時に上流側に流入する高い全圧をもつ液流による気泡の崩壊を伴い、圧力変動を生じる。

(4) 迎え角が増加するに従い励振領域での渦放出周波数での揚力変動は弱まり、 $\alpha \geq 5^\circ$ では $St \approx 0.045$ を中心とした低周波数での変動が生じる。 $\alpha = 10, 12.5^\circ$ では、特にこの低周波数領域での揚力変動が支配的になる。この振動は発達した空洞が流れ方向に伸縮することにより付着形空洞から気泡塊が離脱するために生じる。

終わりに、実験には毛利隆之君の助力が、また供試角柱および実験装置の製作には東北大学の伊藤繕弘技官、工作実習試作センター 長田輝夫技官の助力があったことを記し深く感謝する。

文 献

- (1) 中口・ほか2名, 航宇誌, **16**-168(1968), 1.
- (2) Otsuki, Y., ほか3名, *J. Sound Vib.*, **34**(1974), 233.
- (3) 岡島・ほか2名, 機論, **49**-447, B(1983), 2551.
- (4) 五十嵐, 機論, **50**-460, B(1984), 3185.
- (5) 山根・横溝, 機論, **43**-369(1977), 1829.
- (6) 大場・安, 機論, **46**-402, B(1980), 197.
- (7) 庵原, 東北大学速研報告書, **53**-441(1984), 1.
- (8) 加賀, 機論, **55**-512, B(1989), 936.
- (9) 松平・ほか3名, 機論, **55**-520, B(1991), 3613.
- (10) Young, J. O. and Holl, J. W., *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, **8**(1966), 163.
- (11) Ramamuthy, A. S., ほか2名, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **113**(1991), 278.
- (12) Katz, J., *J. Fluid Mech.*, **140**(1984), 397.
- (13) O'Hern, T. J., *J. Fluid Mech.*, **215**(1990), 365.
- (14) 太田・ほか3名, 機論, No. 911-2(1990), 65.
- (15) Ota, T., ほか3名, *ASME, FED*, **135**(1992), 207.
- (16) 加賀・ほか2名, 機論, **57**-541, B(1991), 2885.
- (17) 沼知・ほか2名, 東北大学速研報告書, **6**(1952), 75.
- (18) Knapp, R. T., *Trans. ASME*, **77**(1955), 1045.
- (19) 西山・ほか2名, 機論, **49**-448, B(1983), 2655.
- (20) 久保田・ほか3名, 造船論, **160**(1986), 78.
- (21) 伊藤・ほか4名, 機論, **54**-503, B(1988), 1555.
- (22) 緒方・ほか4名, 機論, **57**-543, B(1991), 3788.
- (23) 西山・加賀, 機論, **39**-328(1973), 3699.
- (24) 西山・ほか2名, 機論, **52**-474, B(1986), 493.
- (25) 西山, 機論, **46**-408, B(1980), 1393.
- (26) Cantwell, B. and Coles, D., *J. Fluid Mech.*, **136**(1983), 321.
- (27) 田中・村田, 機論, **51**-469, B(1985), 2838.
- (28) Reynolds, W. C. and Hussain, A. K. M. F., *J. Fluid Mech.*, **54**(1972), 263.
- (29) Cherry, N. J., ほか2名, *J. Fluid Mech.*, **144**(1984), 13.