

# 振動流中における鉛直函体構造物への流体力 低減空気放出アクチュエータの性能評価

ESTIMATION OF AIR SPOUTING TYPE ACTUATOR TO REDUCE FLUID FORCE  
APPLIED TO A VERTICAL CYLINDER IN THE SINUSOIDAL OSCILLATING FLOW

飯島 徹<sup>\*1</sup>・吉田 稔<sup>\*2</sup>・近藤 俣郎<sup>\*3</sup>・長内戦治<sup>\*4</sup>・黒島 利一<sup>\*5</sup>  
Toru IJIMA, Minoru YOSHIDA, Hideo KONDO, Senji OSANAI, and Toshikazu KUROSIMA

- 1 正会員 工博 室蘭工業大学助教授 地域共同研究開発センター (〒050-8585 室蘭市水元町 27 の 1)  
2 非会員 工博 北海道機械開発 技術部 (〒065-0043 札幌市東区苗穂町 10 丁目 1 番 15 号)  
3 フェロー工博 ㈱沿岸圏システム研究所 (〒060-0807 札幌市北区北 7 西 2-15-1)  
4 正会員 工博 ㈱北日本港湾コンサルタント (〒003-0029 札幌市白石区平和通 2 丁目北 11-18)  
5 非会員 室蘭工業大学技官 地域共同研究開発センター (〒050-8585 室蘭市水元町 27 の 1)

Nowadays, in Northern Europe, Japan, and USA, many researches have been presented about S.F.T. (Submerged Floating Tunnel) adapting for coastal and Fjords traffic systems. But the natural frequency of S.F.T. is below a few Hz because of three types support conditions that are tension-leg type, piling, and floating support type subjected steady and sinusoidal oscillating flow. So they said that we must consider about the fluid force. In this paper, we proposed the air spouting type actuator to reduce fluid force of S.F.T's main body in the sinusoidal oscillating flow. We testified effects of the control system for reducing fluid force acting on S.F.T. to measure  $C_D$ ,  $C_M$ ,  $C_L$ , and phase angle between displacement and force experimentally. We found that this actuator reduce fluid force effectively at some parameters (Air Spouting Fraction, K.C., spouting pattern).

**Key Words:** *Vibration control device, flow-Induced vibration, air spouting type actuator, S.F.T., air spouting fraction, K.C., sinusoidal oscillating flow*

## 1. 緒言

今日、メガフロート及び天然ガス等の海底パイプラインなどの大規模な海洋構造物の開発が進められており、その構造物には海水中で設置される円柱構造物が数多くある。また、海洋空間の有効利用の観点から水中トンネルの開発が活発である。北欧においては、10 数世紀から水中トンネルの構想があり、現在では、日<sup>(1)</sup>、米、欧、とりわけ北欧では実現化の動きがある。しかし、水中トンネルの支持形式がいずれのときでも、構造上固有振動数が 1~3 (Hz) と低く、渦励振問題の検討が必要となっている。

そこで、著者らの水中トンネルの流体力低減につ

いての研究では定常流にさらされる場合における水平函体の流体力低減システムとして、空気放出型アクチュエータを利用した有効性を示し<sup>(2)</sup>、実際には鉛直函体の場合もあり、その振動の報告も行った<sup>(3)</sup>。他実用面での使用方法に関して特許出願中です。本報では振動流にさらされる場合を想定し流体力低減アクチュエータを用いて流体力の低減効果を明らかにし、制御手法を構築した上でその有効性を流体力によって評価する。

## 2. 記号

$$C_D : \text{抗力係数} \quad \left( = -\frac{3}{4} \int_0^{\pi/2} \frac{F \cos x}{\rho U_m^2 L D} dx \right) \quad (2a)$$

$$C_M : \text{慣性力係数} \left( = \frac{2U_m T}{\pi^3 D} \int_0^{\pi/2} \frac{F \sin x}{\rho U_m^2 L D} dx \right) \quad (2b)$$

$$C_L : \text{揚力係数} \left( = \frac{2F_{RMS, F_L}}{\rho U_m^2 L D} \right) \quad (2c)$$

D : 円柱直径 (m)

$f_v$  : 加振振動数 (Hz)

$$KC : \text{クーリガン・カーペンター数} \left( = \frac{U_m T}{D} \right) \quad (2d)$$

L : 円柱直径 (m)

$m_a$  : 付加質量 (kg)

r : 振動振幅 (m)

T : 振動流の周期 (sec.)

$U_m$  : 振動流速 (m/s)

V : 円柱の排除体積 (m<sup>3</sup>)

$P_n$  : 流体力の PSD (1/Hz-密度関数) をシステム未稼働時の PSD で正規化 (無次元値)

$Q_a$  : 一周期での空気の換算排除流量 (m<sup>3</sup>/s)

$Q_w$  : 一周期での水の換算排除流量 (m<sup>3</sup>/s)  
 $\left( = \left( V + \frac{m_a}{\rho} \right) f_v \right) \quad (2e)$

X : 振動流変位

$\ddot{X}$  : 円柱の加速度

$\dot{X}$  : 円柱の速度

$\alpha$  : 空気放出率  $\alpha \left( = \frac{Q_a}{Q_a + Q_w} \times 100 \right) (\%) \quad (2f)$

$\theta$  : 振動流変位に対する力の位相角 (°)

$\rho$  : 水の単位体積重量 (kg/m<sup>3</sup>)

(実際にはアクチュエータ未稼働時の  $C_D$ ,  $C_M$ ,  $C_L$  の値で正規化して  $C_{Dn}$ ,  $C_{Mn}$ ,  $C_{Ln}$  の値で評価.)

### 3. 実験装置

#### (1) 実験装置概略図

図 1 に実験装置概略図を示す。

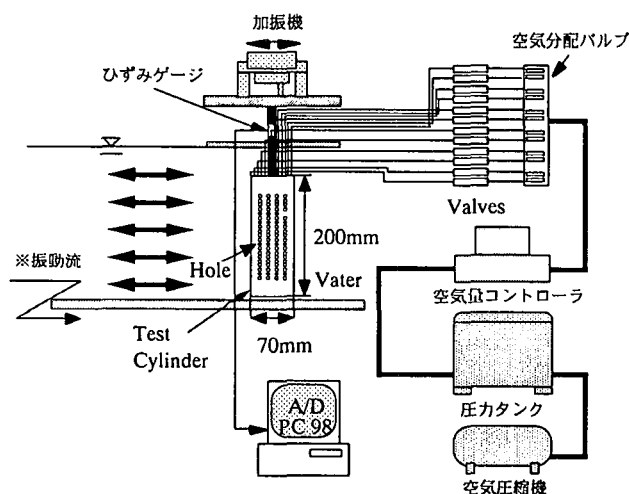


図 1 空気泡出アクトエータシステム図

このシステムは、データ取り込みと制御出力を行う PC 系および、空気放出機器系から構成されている。水槽には表面波の影響をなくすため、空気を抜

くための数個の穴をあけたプレートを上方に備え付け、完全固定波面を実現した。

#### (2) 正弦加振装置

本研究では海洋構造物を対象として振動流で実験を行った。その流体力係数は Sarpkaya<sup>(4)</sup>を参考にし、図 2 に示す、 $KC < 10$  の範囲を対象としている。この範囲をもとにして、実験を  $KC = 2.69 \sim 6.28$  で行った。そこで図 3 に示す両スライダクランク機構により単一振動数での正弦振動流を実現した。

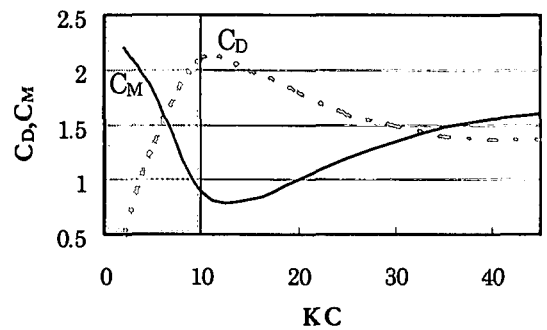
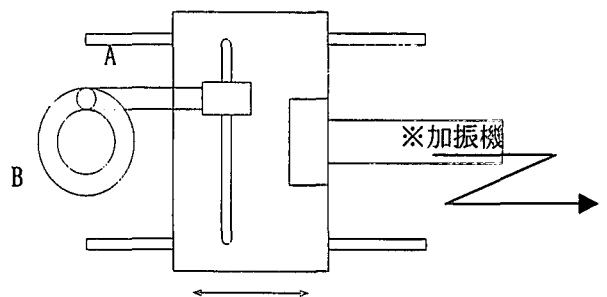


図 2 KC's での範囲



正弦波直線往復加振方向

図 3 ダブルスライダクランク図

ここで、図 3 の記号 A~B を以下に記す。

A : 直動ベアリング

B : スピードコントロールモータ

#### (3) テスト円柱

テスト円柱は直径 70 (mm)、長さ 200 (mm)、肉厚 3 (mm) の中空アクリル材を用い、図 1 の様に表面には 12 分割し、1 列あたりに 20 個の空気放出孔を設けている。このテスト円柱を用い、図 4 に示す空気放出パターン A~F により実験を行った。これらの空気放出パターンにおける円柱近傍の気泡の平均直径は可視化による実測値で 4.2mm であった。また、

この円柱は片持ち支持されている。支持棒には力計測用センサを、円柱内部に加速度センサを、揚力、抗力の二方向が同時に計測できるように互いに垂直に取り付けてある。流体力測定用円柱は想定振動数の数倍以上なので10Hz以上とし水中での実測値で11(Hz)であったので、力計測に支障がない剛性を持つことがいえる。

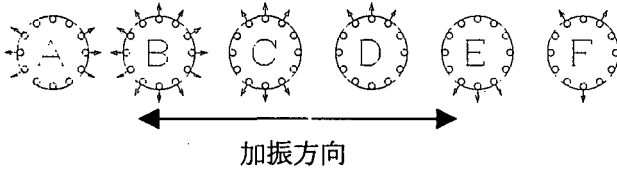


図4 空気放出パターンと加振方向

#### 4. 実験方法

図1のシステムによって円柱に加わる流体力の制御アルゴリズムを図5に示す。その制御の流れは以下の通りである。実験は2種類の制御規則で行う。一つは空気放出のタイミングを  $t=t_0$  とする。そのときにパラメータを  $\alpha$ 、空気放出パターンを設定して、加速度センサから加速度  $\ddot{X}(t)$  を収集する。通常はバルブを閉じてあり、加速度が最大値を示した時のタイミングを  $t=t_0$  とする。そのときに設定した  $\alpha$  と放出パターンで放出を開始する。

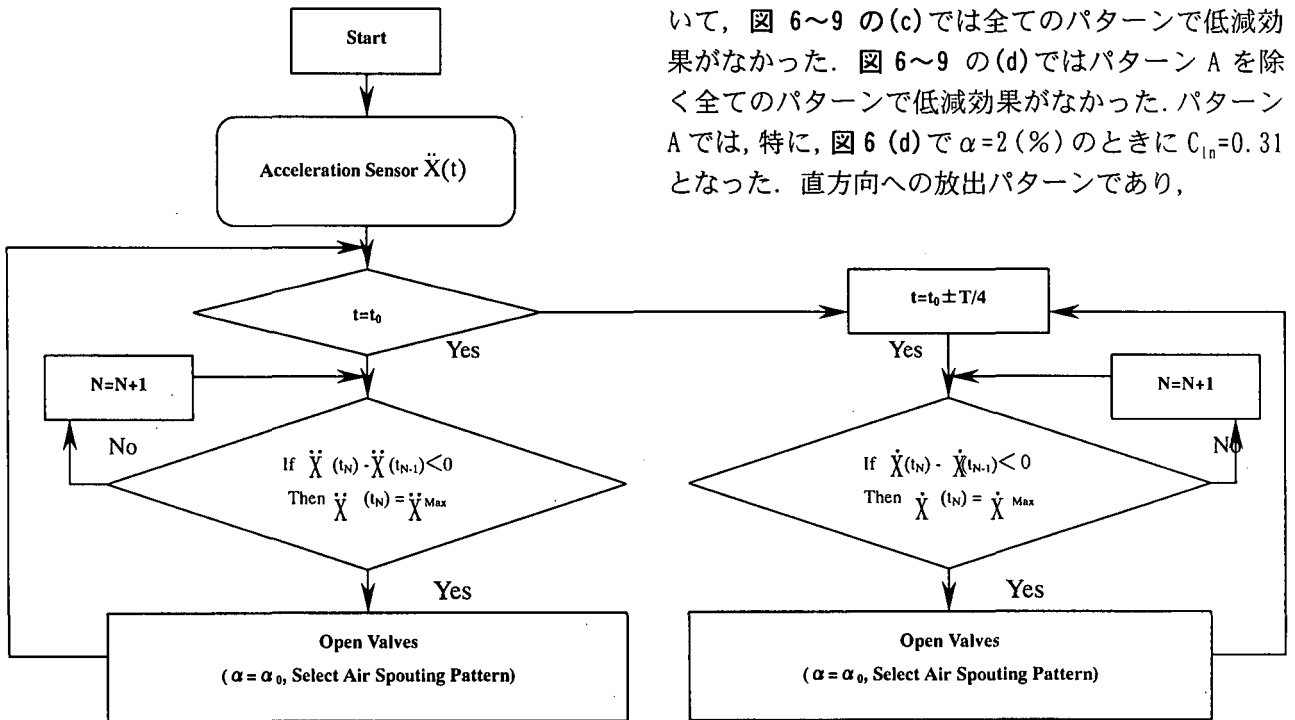


図5 空気放出システムアクチュエータアルゴリズム

もう一つは速度が最大値を示したときの実験で同様に通常はバルブを閉じてあり、空気放出のタイミングを  $t=t_0 \pm T/4$  とする。そのときに選定した  $\alpha$ 、空気放出パターンで空気を放出する。

#### 5. 実験結果と考察

##### (1) アクチュエータ作動時の流体力の評価

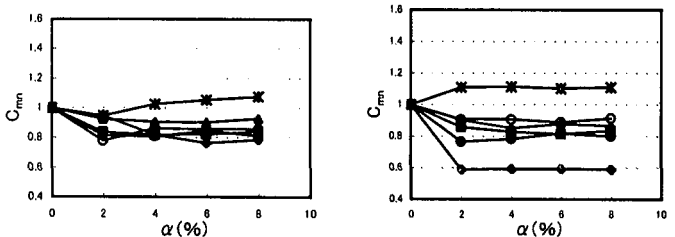
図6~9の(a), (b), および(c), (d), はそれぞれ  $\alpha$  と  $C_{mn}$ ,  $\theta$  および  $\alpha$  と  $C_{ln}$  の関係を示す。尚、図6~9はそれぞれ  $KC=2.69, 4.49, 5.38, 6.28$  である。また、加速度が最大時  $\{t=t_0: (a), (c)\}$  と速度が最大時  $\{t=t_0 \pm T/4: (b), (d)\}$  各々においてこのアクチュエータの性能を比較する。図6~9中の  $\blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle, \circ, *, \bullet$  はそれぞれ図4の放出パターンA, B, C, D, E, Fに対応する。振動流変位に対する力の位相角  $\theta$  は全て正であるため、流体力係数の大きさの割合が1より大の場合は励振、1より小の場合は制振効果があると判断する。  $C_{mn}$  について、図6(a), (b), のパターンE, および図7(b)のパターンAを除いて、低減効果があった。図8, 9{(a), (b)}では全てのパターンにおいて低減効果があり、空気放出量による  $C_{mn}$  はほぼ一定値を示す。特に、図8(a)のパターンAでは  $\alpha=4$  (%) のときに  $C_{mn}=0.57$  となった。これは、気泡が放出される際、テスト円柱が放出気泡に覆われることによって見かけ上付加質量が小さくなったためだと考えられる。  $C_{ln}$  について、図6~9の(c)では全てのパターンで低減効果がなかった。図6~9の(d)ではパターンAを除く全てのパターンで低減効果がなかった。パターンAでは、特に、図6(d)で  $\alpha=2$  (%) のときに  $C_{ln}=0.31$  となった。直方向への放出パターンであり、

この放出気泡の浮力による影響が揚力への力として加わったためだと考えられる。パターン A の場合は振動流方向のみへの気泡放出であるため、揚力を起こすカルマン渦の生成を妨げる効果を与えたと考えられる。

において抗力方向の  $P_n$  は卓越周波数成分が変動していることがわかり、揚力方向の  $P_n$  は、抗力方向と比較して、4(Hz)、6(Hz)、8(Hz)といった卓越周波数成分及びその整数倍の部位で変動し、6(Hz)以上の高周波成分で乱れが観察される。これは放出気泡が浮上する際の衝突による振動力が働く結果生じたものであると考えられる。

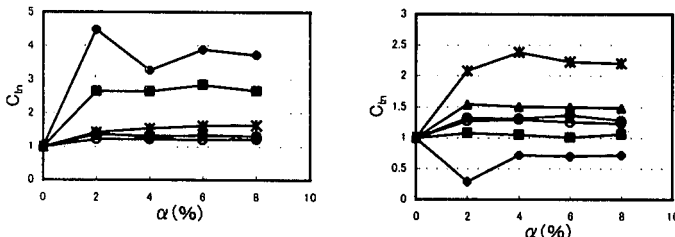
(2) PSD による流体力評価

図 10, 11 はそれぞれ  $KC=4.49$ , パターン E における  $C_{ln}$  の  $P_n$ , 図 12, 13 はそれぞれ  $KC=5.38$ , パターン D における  $C_{mn}$ , おける  $C_{mn}$ ,  $C_{ln}$  の  $P_n$  である。これらよりアクチュエータを稼働させることによって、全ての  $KC$ , パターン



(a) 加速度最大時

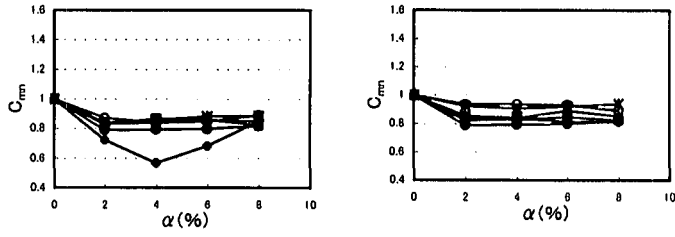
(b) 速度最大時



(c) 加速度最大時

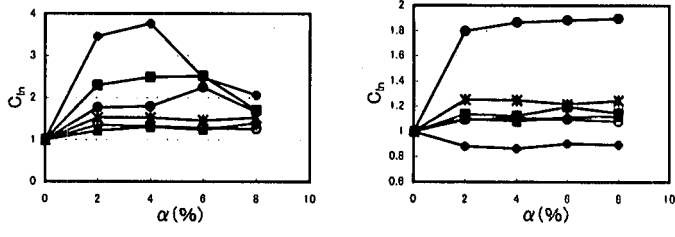
(d) 速度最大時

図 6  $\alpha$  と  $C_{mn}$ ,  $C_{ln}$  の関係 ( $KC=2.69$ )



(a) 加速度最大時

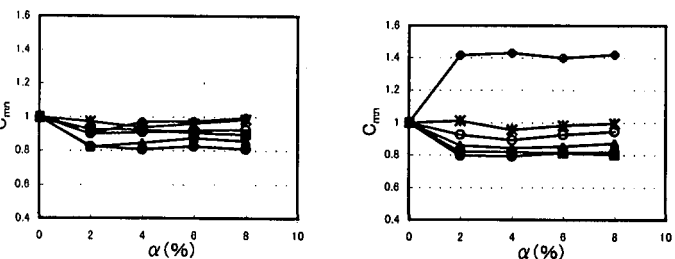
(b) 速度最大時



(c) 加速度最大時

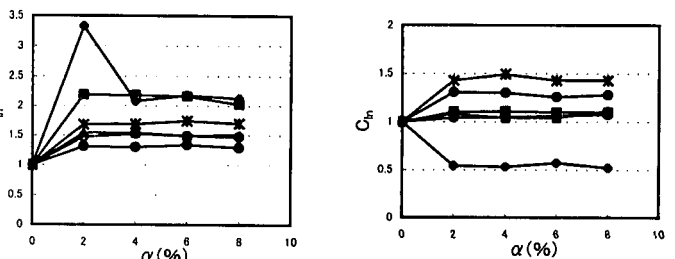
(d) 速度最大時

図 8  $\alpha$  と  $C_{mn}$ ,  $C_{ln}$  の関係 ( $KC=5.38$ )



(a) 加速度最大時

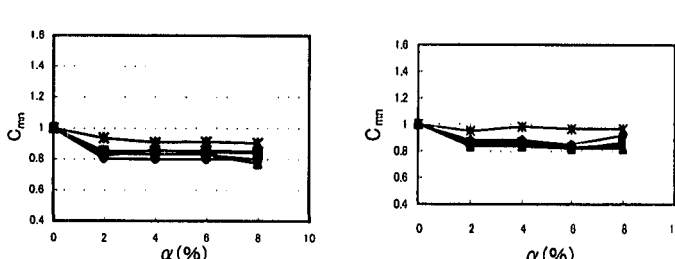
(b) 速度最大時



(c) 加速度最大時

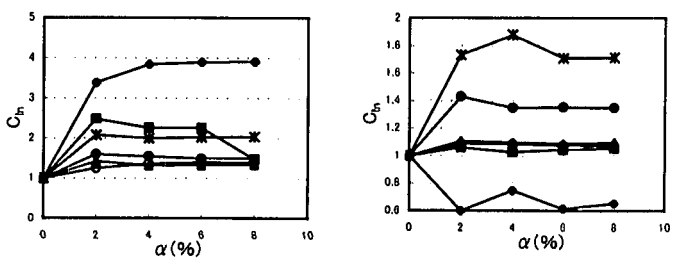
(d) 速度最大時

図 7  $\alpha$  と  $C_{mn}$ ,  $C_{ln}$  の関係 ( $KC=4.49$ )



(a) 加速度最大時

(b) 速度最大時



(c) 加速度最大時

(d) 速度最大時

図 9  $\alpha$  と  $C_{mn}$ ,  $C_{ln}$  の関係 ( $KC=6.28$ )

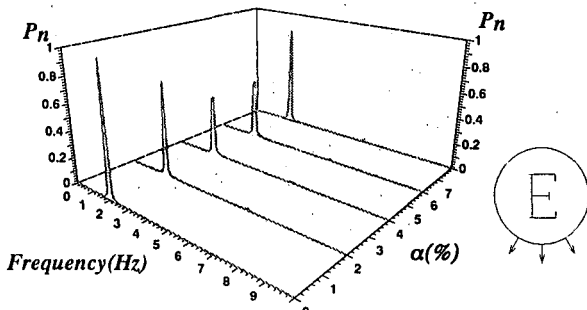


図10  $\alpha$  と  $P_n$ 、周波数の関係 ( $C_{mn}:KC=4.49$ , Pattern E)

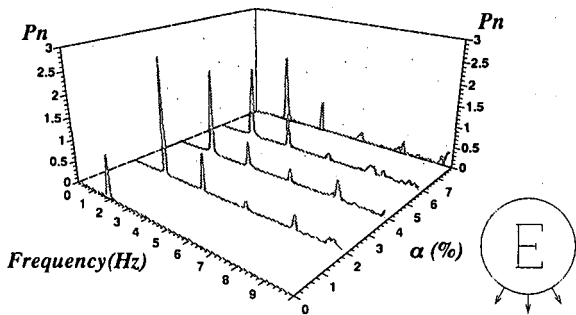


図11  $\alpha$  と  $P_n$ 、周波数の関係 ( $C_{in}:KC=4.49$ , Pattern E)

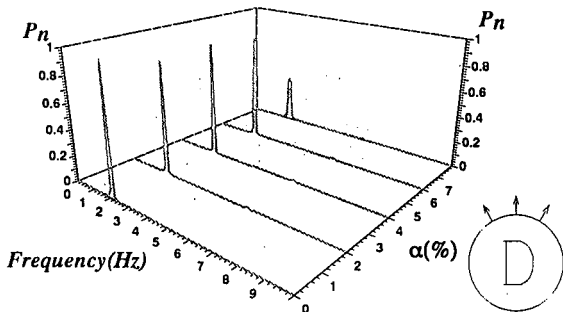


図12  $\alpha$  と  $P_n$ 、周波数の関係 ( $C_{mn}:KC=5.38$ , Pattern D)

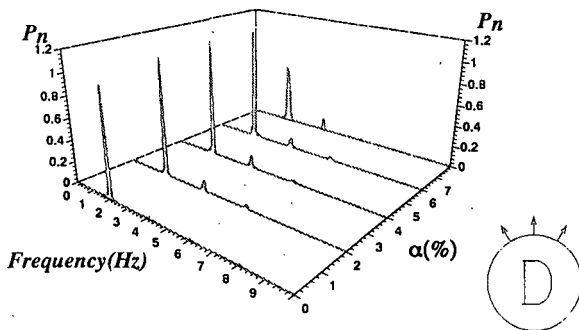


図13  $\alpha$  と  $P_n$ 、周波数の関係 ( $C_{in}:KC=5.38$ , Pattern D)

### (3) 流体力の低減に対する考察

流体力が低減する場合の流れの可視化によるスケッチを図14に示す。これより流体力低減のメカニズムは以下の(a)~(e)の効果によって生じると考察される。

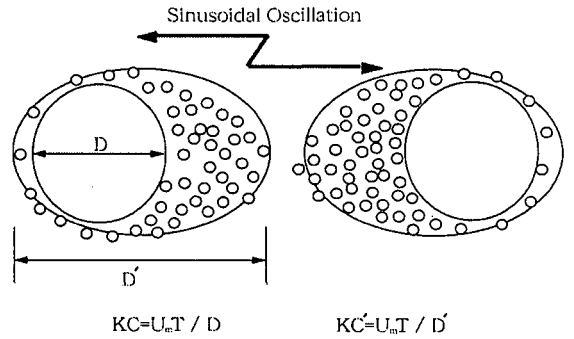


図14 速度最大時の流体力低位源氏の気泡分布スケッチ

- (a) 振動流中において速度が最大時には円柱の直径  $D$  が気泡放出によって見かけ上  $D'$  に拡大する。これによって  $KC$  の値が  $KC'$  へと小さくなり、相対速度が小さくなったため  $C_D$  及び  $C_L$  は小さくなる。また、加速度が0であるため  $C_M$  は小さくなる。
- (b) 加速度が最大時には速度が0であるため  $C_D$  及び  $C_L$  は小さくなる。また、放出気泡の上昇によって付加質量が小さくなったため  $C_M$  は小さくなる。
- (c) 気泡が移動するときその周りにある付加質量も移動することで円柱構造物の付加質量が小さくなる効果。
- (d) 放出気泡がテスト円柱を取り囲み、気泡の分布が生むダンピング効果。
- (e) 気泡放出により円柱周囲での渦放出を起こす剥離点の移動メカニズムを妨げる効果により、流体力発生メカニズムを破壊する効果。

### (4) 気泡による流体力モーメント低減モデル

本実験で流体力が3割程度減少した場合実機では何割程度の減少になるかを簡単なモデル(図15)により換算する。

まず本実験における、気泡の力の分布関数を求める。

図15(a)で気泡の上昇速度を  $V_V$ 、流速を  $V_H$  とすると、

(5a) 式で表される関係が得られる。

$$h = \frac{g}{2V_H^2} f^2 - \frac{V_V}{V_H} f \quad (5a)$$

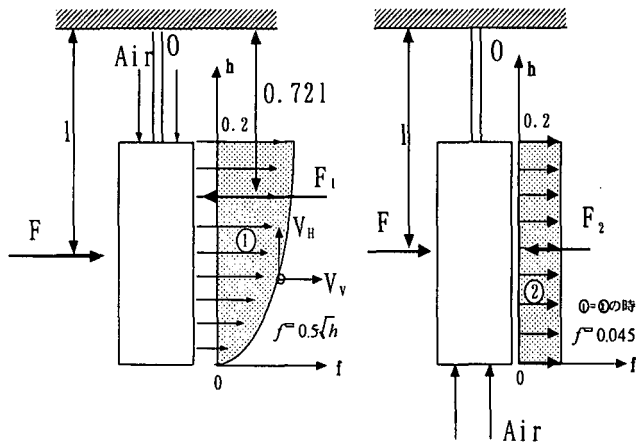


図 15 空気モーメント効果モデル

よって流体力  $f$  は次のように表される。

$$f = \frac{\frac{V_V}{V_H} \pm \sqrt{\left(\frac{V_V}{V_H}\right)^2 + \frac{2g}{V_H^2} h}}{\frac{g}{V_H^2}} \quad (5b)$$

ここで、 $V_V \ll V_H$  であるので、 $V_V / V_H = 0$  として式 (5b)

(a) 浮力効果有り (b) 浮力効果無し  
を簡略化すると、 $f = \sqrt{bh} / a$  (5c)

ただし  $a = g / V_H^2$ ,  $b = 2g / V_H^2 = 2a$  である。以上より気泡の力の分布関数が得られた。ここで換算を行うにあたり、簡単のため (5c) 式で  $b = 1$  ( $a = 0.5$ ) とする。

$$f = 0.5\sqrt{h} \quad (5d)$$

よって気泡による全作用力  $F_1$  は式 (5d) を積分し式 (5e) のように得られる。

$$F_1 = \int \sqrt{h} dh = 0.5 \left[ \frac{2}{3} h\sqrt{h} \right]_0^h \quad (5e)$$

また図 15 中で、 $F_1 = F_2$  とすると、実機での気泡の力の分布関数は、 $f = 0.045$  となる。よって全作用力  $F_2$  は

$$F_2 = 0.045h \quad (5f)$$

本実験で力が 3 割減少するとして、モーメントの釣り合いの式を力の分布関数で求めると (5g) 式のようになる。

$$Fl - 0.5 \left[ \frac{2}{3} h\sqrt{h} \right]_0^h \cdot 0.72l = 0.7 \cdot Fl \quad (5g)$$

実機の場合のモーメントの釣り合いの式を分布関数で求めると、 $Fl - 0.045hl = Fl(1-x)$  (5h)

(5g)、(5h) 式中の 1 は消去される。また、(5h) 式中の

$x$  は換算流体力低減率である。また本実験では円柱の長さ  $h = 0.2(m)$  であるので、これを (5g) に代入  $F$  を求め、

(5h) に代入すると  $x = 0.44$  となる。以上より、気泡が構造物に与える合力の位置が変わることにより、この理論では 44% 程度の流体力低減効果が見込めることとなる。

## 6. 結論

結論として以下の (1) ~ (4) にまとめる。

(1) 本アクチュエータを使用した場合、パターン A では、速度が最大時における  $C_{in}$  に関しては、いずれの KC でも低減効果があった。特に、 $KC = 2.69$  においては最大 69% の低減効果があった。

(2) KC 数が低い場合にパターン E を除いて振動流方向の流体力は本アクチュエータで低減することができる。一方 KC 数が高い場合、全てにおいて低減した (最大でパターン A,  $KC = 5.38$  で加速度が最大時に空気を吹き出す場合に約 43% の低減を確認した。)

(3) PSD の  $P_n$  から抗力方向は卓越周波数成分の変動のみが観察できる。一方、揚力方向は卓越周波数成分及びその整数倍の部位で変動し、高周波成分が現れてくることが観察できる。

(4) このアクチュエータによる流体力低減のメカニズムを  $C_{dn}$ ,  $C_{mn}$ ,  $C_{in}$  およびその特性と流れの可視化による流体力学的観点により考察した。

(5) 空気放出モーメント効果により流体力低減効果を定量的に見積もった。

このアクチュエータの実際の構造物での実証実験が今後の課題として検討が必要である。

## 参考文献

- (1) 水中トンネル研究調査会 : 水中トンネルハンドブック, 1995
- (2) 飯島ほか: 直交流中の円柱構造物に作用する非定常流体力低減アクチュエータの特性について, 海洋開発論文集, Vol. 14, pp. 329-332, 1998
- (3) 飯島ほか: 水中トンネルの二自由度フラッター振動応答特性, 海洋開発論文集, Vol. 15 1999, pp. 393-396
- (4) T. Sarpkaya : J. Applied Mechanics (ASME), pp. 32 ~ 37, (1975)

謝辞 : 本研究にあたり北日本港湾コンサルタント及び北海道機械開発の資金補助があったことに感謝します。