

II-58

直交流にさらされる円柱構造物に作用する非定常流体力低減効果  
(空気放出型アクチュエータによるポイド率と放出パターンによる効果)

室蘭工業大学 正会員 飯島 徹  
 室蘭工業大学 フェロー 近藤 俣郎  
 室蘭工業大学 学生員 佐藤 靖尚  
 北日本港湾コンサルタント(株) 正会員 大塚 夏彦

1. はじめに

水中トンネルなどの水中浮遊式円柱構造物は長周期波や定常流にさらられる場合が懸念され、このような状況において交番流の発生によりロックイン現象を生じ揚力方向振動が発生する。本研究では定常流における場合を対象とし、回流水槽を用いた。このような円柱構造物の振動状態を模型において再現し、これに加わる流体力の特性について調べる。円柱は直交流にさらすこととし、円柱に加わる揚力の低減方法として、剥離渦発生原因を直接破壊することを目的とする模型(円柱)の表面から空気を放出する方法を考案した。この有効性を確かめるために、St数(ただしここでSt数はメカニカルストローハル数を意味する)、ポイド率、加振振動数、加振振幅比、放出パターン(位置)などについて実験的に明らかにすることを本研究の目的とする。

2. 実験装置

2.1 加振及び空気放出システム

対象となる円柱構造物はテンションレグを用いた構造のものとしその固有振動数は数ヘルツ以下となる。そこで浮遊式構造物を円柱形とし、加振機により並進加振(1、2、3Hzの3種類で加振振動数を用いた)する。その時加わる力をあらかじめ較正してある歪ゲージ出力値から力を換算することにより算出し、またその力から加振力を差し引いて非定常流体力とする。また非定常流体力を考慮する上で、対象となる流体力が渦による力であり単一振動数を有すると考えられる。そのため、図1に示すダブルスライダクランクシステムを用いて単一振動数での厳密な正弦波加振を実現した。これはモータの一定回転数をもつ運動を一定振動数での単一正弦波直線運動へと実現するための機構である。

また、空気の放出型アクチュエータの構成については図2に示す。まずエアコンプレッサーで加圧された空気を圧力タンクに蓄え、マスフローコントローラーにより一定圧力で一定流量になるように流量コントロールされる。また同時に、その流量を計測し実験装置より放出される。放出される空気は分配器により最大で12方向に分配される構造となっており、分配器にとりつけたバルブ

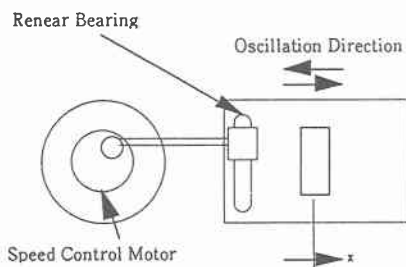


図1 ダブルスライダクランクシステム

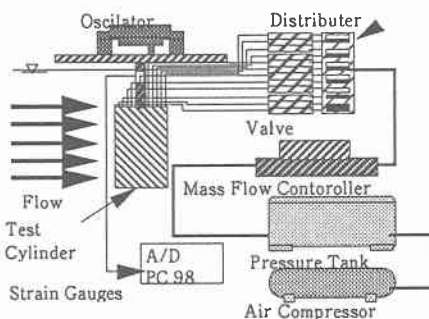


図2 空気放出型アクチュエータ

の開閉により、放出パターンを任意で決定可能としてある。

次に円柱からの空気放出パターンを図3に示す。この図は円柱の断面図でありA～Lは放出口の位置を示す。また○印で囲まれた部位が放出される位置を示す。パターンAとBは、それぞれ前方淀み点、後方淀み点および剥離点付近からの放出パターンであり、パターンCは剥離を起こす領域全てをカバーする位置での放出パターンである。

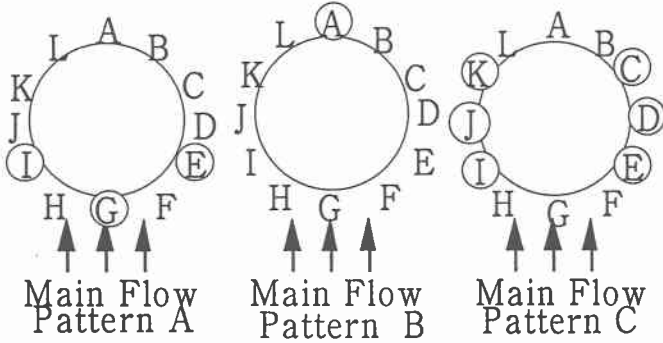


図3 空気放出パターン

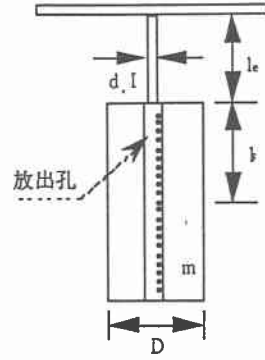


図4 テスト円柱

## 2.2 円柱の設計

円柱は加振機により1から3Hzで加振実験されるので、力計測を行うため円柱の弾性棒との共振を避けるため、これより十分大きな固有振動数（5倍程度、固有振動数15Hz以上）を選定した。円柱は片持ち支持である。

ここで、E:アルミの弾性係数、I:弾性棒の断面二次モーメント、 $l_e$ :弾性棒の長さ、 $l_s$ :円柱の重心までの長さ、 $m$ :円柱の質量とする。以上の条件のもとで諸値を決定していくと、弾性棒の直径 $d$ は0.015(m)、弾性棒の長さ $l_e$ は0.1(m)、円柱の質量 $m$ は0.210(kg)でその固有振動数は $f_0=18.5$ (Hz)であり上記の条件を満足している。円柱の使用材料としては、肉厚3mmで中空の亚克力を用いた。

円柱表面には空気を放出するための孔を開ける。空気孔のピッチは1cmで、円柱の長さは20cmであるので、図4に示すように1ライン当たり20分割し、放出孔直径は1.5mmとした。尚す法比として、円柱直径と気泡の大きさの比は流れの可視化により気泡の大きさを測定した結果、7%程度であった。

## 3.実験方法

### 3.1 非定常流体力測定実験方法

本実験では、まずエアコンプレッサーにより空気を7kgf/cm<sup>2</sup>程度まで加圧し、ストローハル数により決定した加振振動数により加振する。一方回流水槽では一定流速で運転し、マスフローコントローラーにより設定した空気流量を円柱の吹き出し装置に供給してボイド率を定める。以上の条件で非定常流体力を測定する。データ収集、及び処理の方法は図5に示す。

### 3.2 実験パラメーターと流体力の評価について

各実験パラメータについて次の様に定義する。

$$r_0 = r_i / D$$

$$St = fD / V$$

$$\alpha = Q_1 / (Q_2 + Q_1) \times 100\%$$

$$\theta$$

加振振幅比

メカニカルストローハル数

ボイド率

位相角

但し、 $D$  : 円柱直径 (m) ,  
 $f$  : 加振振動数 (Hz) ,

- $Q_1$  : 空気流量 (m<sup>3</sup>/s) ,  
 $Q_2$  : 水流量 (m<sup>3</sup>/s) ,  
 $V$  : 流速 (m/s) ,  
 $i=1,2,3$ ,  
 $r_1=0.005$  (m) ,  $r_2=0.010$  (m) ,  $r_3=0.015$  (m)  
 $\beta_1$  : 円柱表面から空気を放出しない場合のRMS値  
 $\beta_2$  : 円柱表面から空気を放出した場合のRMS値

とする。ストローハル数は、円柱の直径と剥離に伴う渦の発生間隔の関係を表わした無次元数で、ボイド率は試験区間を流れた水に対して吹き出した空気流量の割合を示し、加振振幅比は円柱の直径に対する加振振幅の割合である。各パラメータにおける空気流量は、表1のようにとる。また、本実験において流体力は式(1)により求める。力の評価方法としてはRMSを用い $\beta_2/\beta_1 > 1$ の場合は流体力の増大を意味し、又 $\beta_2/\beta_1 < 1$ の場合流体力が減少することを意味づけられる。尚、図5はデータ収集処理アルゴリズムである。

$$F(t) = k \delta(t) - ma \quad (1)$$

- $F(t)$  : 非定常流体力 (N)  
 $k$  : 力の校正係数 (N/V)  
 $\delta(t)$  : 歪ゲージ出力 (V)  
 $ma$  : 加振力 (N)

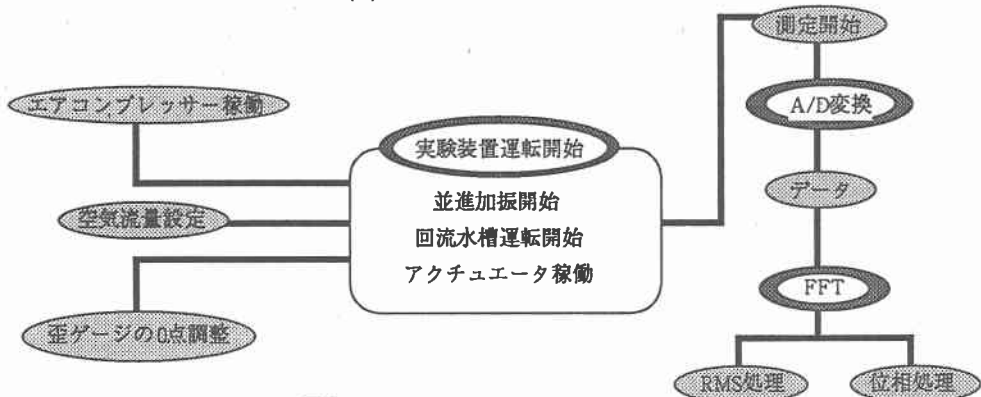


図5 データ収集処理アルゴリズム

表1 各パラメータに対する空気流量

St	V (m/s)	$\alpha$ (%) f (Hz)	2 l/min	4 l/min	6 l/min	8 l/min	10 l/min	12 l/min	14 l/min	16 l/min
0.1	0.7	1	50	100	150	200	250	300	-	-
0.15	0.47	1	33	66	99	132	165	198	231	264
0.2	0.35	1	25	50	75	100	125	150	175	200
0.25	0.28	1	20	40	60	80	100	120	140	160
0.1	1.4	2	100	200	300	-	-	-	-	-
0.15	0.93	2	66	132	198	264	-	-	-	-
0.2	0.7	2	50	100	150	200	300	300	-	-
0.25	0.56	2	40	80	120	160	240	240	280	-
0.3	0.46	2	33	66	99	132	198	198	231	264
0.4	0.35	2	25	50	75	100	150	150	175	200
0.15	1.4	3	100	200	300	-	-	-	-	-
0.2	1.05	3	75	150	225	300	-	-	-	-
0.25	0.84	3	60	120	180	240	300	-	-	-
0.3	0.7	3	50	100	150	200	250	300	-	-
0.4	0.53	3	37	74	111	148	185	222	259	296
0.5	0.42	3	30	60	90	120	150	180	210	240

## 4. 実験結果

### 4.1 空気を放出しない場合の非定常流体力特性

単一円柱を流れ場において加振した場合の流体力の特性として、縦軸に揚力のRMS値、横軸にSt数をとった場合のグラフを図6に示す。これにより、すべての加振振動数において、 $St=0.20$ 付近で最大の力を受けていることが確認され、また加振振幅の違いにかかわらずほぼ同じ現象が生じている。これは、剥離に伴った渦放出による過励振であり、図6におけるグラフのピーク値はいわゆるロックイン現象を引き起こしていることを示す。またこの時の揚力と加振変位の位相関係は、加振変位に対し揚力が位相進みのためこの結果から、このアクチュエータの効果を確認するためのデータ収集は $St=0.20$ 付近を中心に行った。

### 4.2 空気を放出した場合の非定常流体力

#### 1) St数ごとによる比較

図8にパターンA、(a)(b)(c)に、 $r_0=0.214$ における各St数ごとのグラフを示す。尚、グラフ中の○、△、□は以下の意味を示す。(○： $f=1\text{ Hz}$ 、△： $f=2\text{ Hz}$ 、□： $f=3\text{ Hz}$ 。)本実験全体を通していずれのパターンにおいても確認されたことは、加振振動数が1 Hz付近ではかなりの励振効果を引き起こしている。これが一番顕著に確認されたのが $St=0.10$ 付近であった。また、このように励振される場合では流体力が $\alpha$ に比例する傾向がある。

流体力が減少する場合について着目すると、さきほど述べたロックインが生じる $St=0.20$ において、(b)にみられるように最大でRMS比0.5以下(ボイド率4%から8%の範囲)となることが確認される。

(c)ではSt数の増加(無次元流速の低下)に伴い加振振動数の低い場合ほど、RMS比が1に収束していくため、このアクチュエータによる流体力の大きさに変化を与えないことが確認される。

#### 2) 空気放出パターン別による比較

図7の(b)(g)(h)より、パターンAとパターンCは位相関係を考慮しないとほぼ同程度の流体力が減少する結果が得られた。流れに対して前方の淀み点から放出した空気が、剥離発生メカニズムを破壊したパターンAと、直接それを破壊したパターンCにより放出された気泡が流体力の大きさに及ぼす影響は同程度いえる。流れに対して後方の淀み点から空気を放出したパターンBは、前述の2パターンと比較すると流体力の減少の割合が小さい。

#### 3) 加振振幅比( $r_0$ )ごとによる比較

図7の(d)(e)(f)より $St=0.20$ において $r_0$ ごとの比較をすると、 $f=1\text{ Hz}$ と加振振動数が低い場合では $r_0$ の減少に伴い流体力増加の割合は大きくなり、加振振動数がそれ以上になるとRMS比は1に収束するようになる。 $r_0=0.071$ と小さい場合は、 $r_0=0.214$ と大きい場合と比較して、同量の空気を放出した場合に、それだけ周囲の流れを乱す効果が大きくなったものと考えられる。そのため、 $r_0=0.071$ では流体力の減少が確認されたのは、全パターンを通じ $f=3\text{ Hz}$ の場合にのみわずかに確認された。

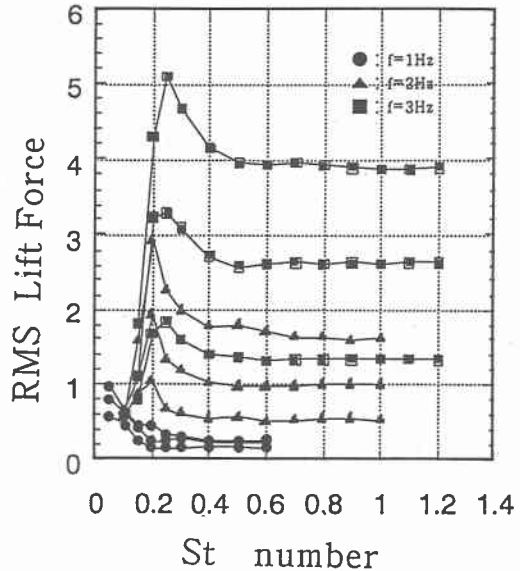


図6 St数と揚力の関係

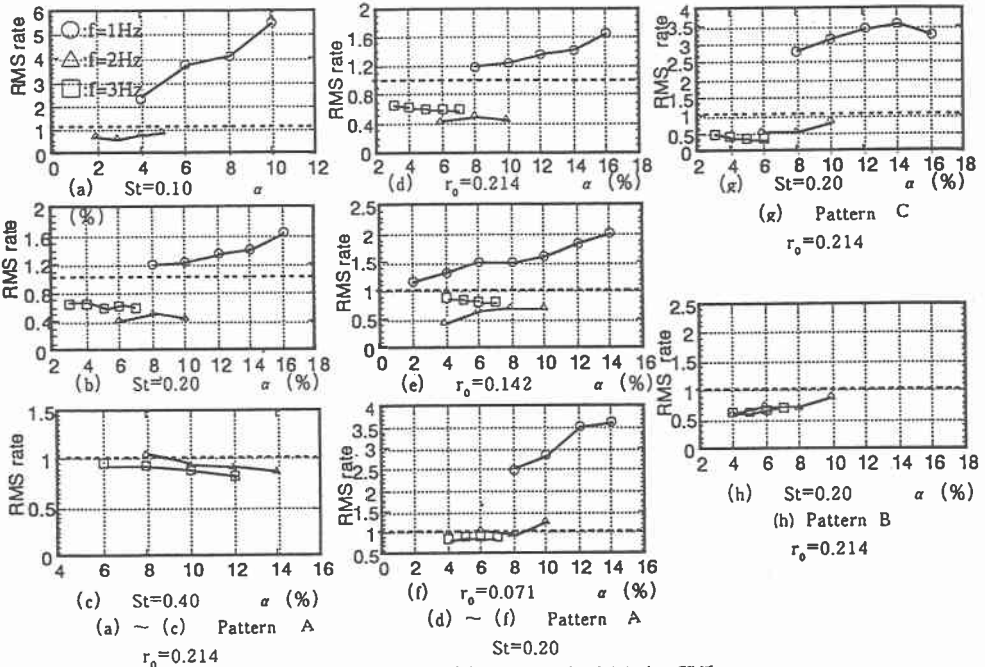


図7 (a) ~ (c) RMS比とボイド率の関係

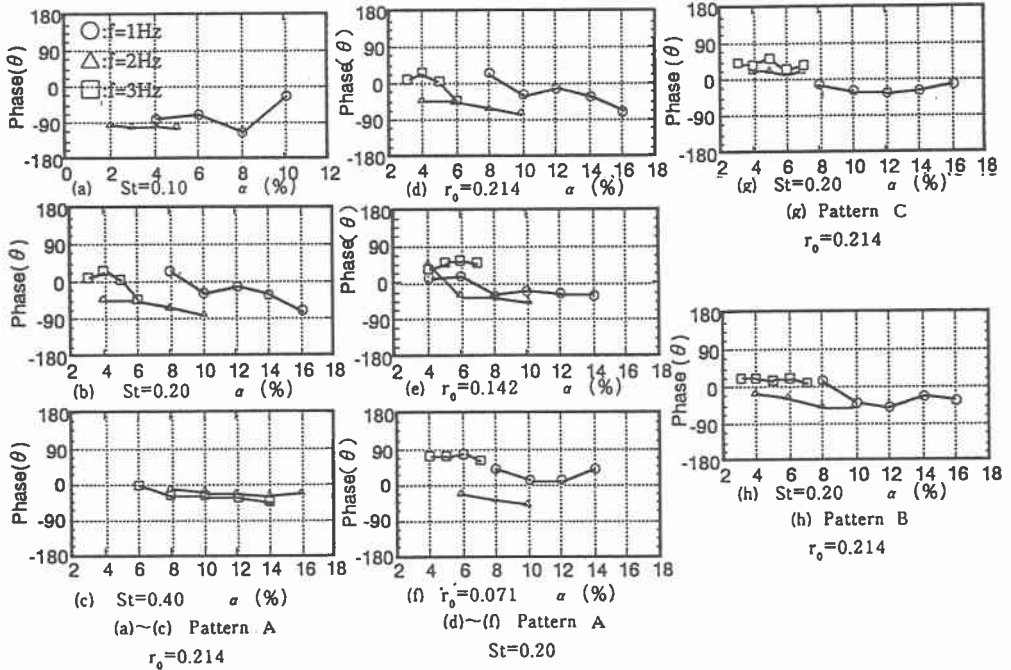


図8 (a) ~ (i) 位相差とボイド率の関係

### 4.3 揚力と加振変位との位相関係

#### 1) St数ごとによる比較

図8のパターンA、(a)(b)(c)に各St数ごとの加振変位に対する非定常流体力の位相角 $\theta$ のグラフを示す。全パターンを通じ加振振動数が1 Hzでは励振されていることは前述したが、この場合の $\theta$ は、St数の大小に関わらず小加振振幅の場合を除いて全ての場合に位相遅れであった。よってこの場合に非定常流体力が減衰力として働き、流体力が増加するためこの振幅がより制振させるパラメーターであると確認された。制振効果が顕著に確認される $St=0.20$ では加振振動数が3 Hzの場合を除いて90度までの範囲内での位相遅れが確認された。空気を放出しない場合には揚力の位相は正のため、空気放出により流体力は励振力として働いていると判断できる。

#### 2) 空気放出パターン別による比較

図8の(b)(e)(h)に $St=0.20$ におけるパターン別の位相関係のグラフを示す。パターンAとCの制振効果が同程度であることは前述したが、 $\theta$ もほぼ同じ値をとる。ただ、 $St=0.20$ 、 $f=2\text{Hz}$ でパターンAにおいて $\theta=25^\circ$ の位相進みになっている。

#### 3) 加振振幅比( $r_0$ )ごとによる比較

ここでも $St=0.20$ を代表に比較する。パターンAとCでは $r_0$ の低下に伴い各加振振動数ごとに位相遅れから進みへととなり、 $r_0=0.005$ では両パターンとも、すべて位相進みとなる。しかし、パターンBでは、A、Cで確認されたような傾向はなく $f=3\text{Hz}$ の場合を除いて位相の遅れが確認される。このことからロックイン振動を引き起こす流速域で、低振動振幅では同ボイド率であっても励振効果を引き起こす場合があるということが確認された。

#### 4) $\alpha$ による制振と励振の特性

図8の(b)(e)(h)などにみられるように、 $\alpha$ の増加に伴って $\theta$ が正から負になる場合が確認される。特に低加振振動数の場合 $\alpha=8\%$ 付近を境に、高加振振動数の場合 $\alpha=5\%$ 程度を境に位相遅れとなる。これより、ある $\alpha$ に達することにより制振効果が得られるパラメーターが確認された。

### 5.まとめ

以上の結果以下のようにまとめられる

- 1) 本研究にあたり空気放出型アクチュエータおよび非定常流体力測定実験装置を製作した。
- 2) パターンAとCにおいて最大で50%流体力を低減させるパラメーターを発見した。また加振振動数が3 Hzの場合は、常に流体力の低減効果が確認された。
- 3) 低振動振幅では高振動振幅と同ボイド率であっても励振効果を引き起こす場合があることが確認された。
- 4)  $\alpha$ による制振と励振の特性が明らかとなった。

以上より、水中トンネルを円柱にモデル化し、本研究で考案した空気放出型アクチュエータを用いた場合に作用する、渦によるロックイン振動揚力を効果的に低減する十分な能力があることを実験的に確かめた。又、その際の流体力特性からそのメカニズムを考究した。

### 参考文献

- 水中トンネルハンドブック；(社)水中トンネル研究 調査会発行、(1995)  
日本機械工学便覧；流体工学編  
Flow Induced Vibration；Blevins, Van Nostrand Reinhold, (1990)