

空気放出型アクチュエータによる水中トンネルに作用する 非定常流体力低減効果

Reducing unsteady fluid force of S.F.T by using air spouting type actuator

飯島徹*, 近藤俣郎**, 大塚夏彦***, 佐藤靖尚****

Toru Iijima, Hideo Kondo, Natuhiko Otuka, Yasuhisa Sato

Recently we have to spread traffic system in the background of expansion of community to local area. It is useful to develop S.F.T from a view of effective using of ocean space. In this paper, we suggest air spouting type actuator to reduce the unsteady fluid force of S.F.T subjected cross flow.

We researched for unsteady characteristic fluid force of S.F.T and the effect of this actuator by using parameters, void rate, oscillation rate, St. number, oscillation frequency.

Keywords: air spouting type actuator, void rate, St number

1. 緒言

近年、我が国では大都市集中から地方分散型社会への移行を進めていくなかで陸海空においても交通システムの拡張が必要不可欠である。将来的には海洋の豊富な資源、海洋空間の有効利用が期待されるなど海洋開発が求められている。水中トンネルはそういったニーズに応うべく計画するものであり、海洋空間の有効利用といった観点からも非常に多くの機能、たとえば人員、貨物輸送機能はもちろんのこと、流水制御機能や水理実験室の利用などを有している。本研究では実際の海洋事象によるトンネル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。潮流の再現方法としては回流水槽を用い、またトンネルに加わる揚力の低減方法として模型(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、ボイド率、加振振動数、加振振幅比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

対象となる水中トンネル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。ここでトンネルを円柱でモデル化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。)して、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する。またその力から加振力を差し引いて流体力を算出する。また非定常流体力考慮する上で、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、空気の放出システム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

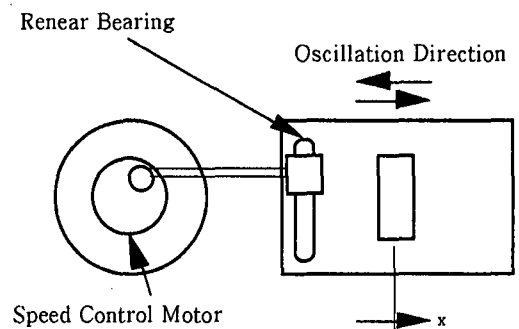


図1 ダブルスライダクランクシステム

* 正会員 室蘭工業大学CRDセンター

** 正会員 室蘭工業大学工学部建設システム工学科

*** 正会員 (株)北日本港湾コンサルタント

**** 学生員 室蘭工業大学大学院

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。

2.2 円柱の設計

円柱を加振機から吊り下げて振動実験を行う場合、円柱と加振機とをつなぐ支柱の寸法は、十分に検討する必要がある。本実験で行う加振は1から3Hzであるので、力計測を行うためにはこれと共振を避けるため、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固有振動数のモデルは図4に示す。

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、1ライン当たり20分割し深さに応じた断面積を求め、これにより12方向に孔を開けていく。放出口の直径は1.5mmである。

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/cm²程度まで加圧し、ストローハル数により決定

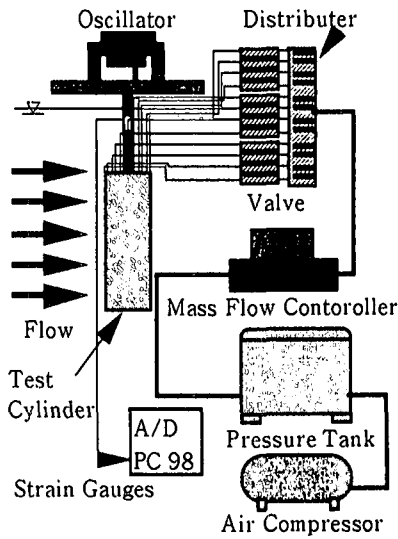


図2 空気放出システム

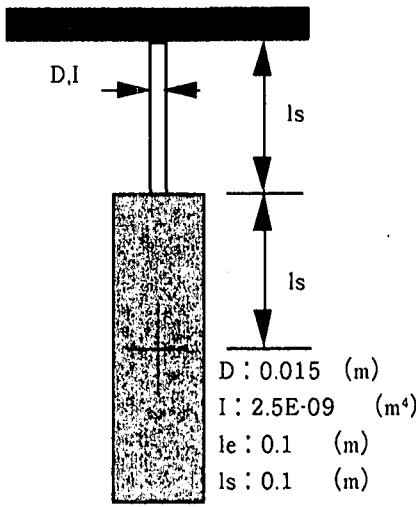


図4 固有振動数のモデル

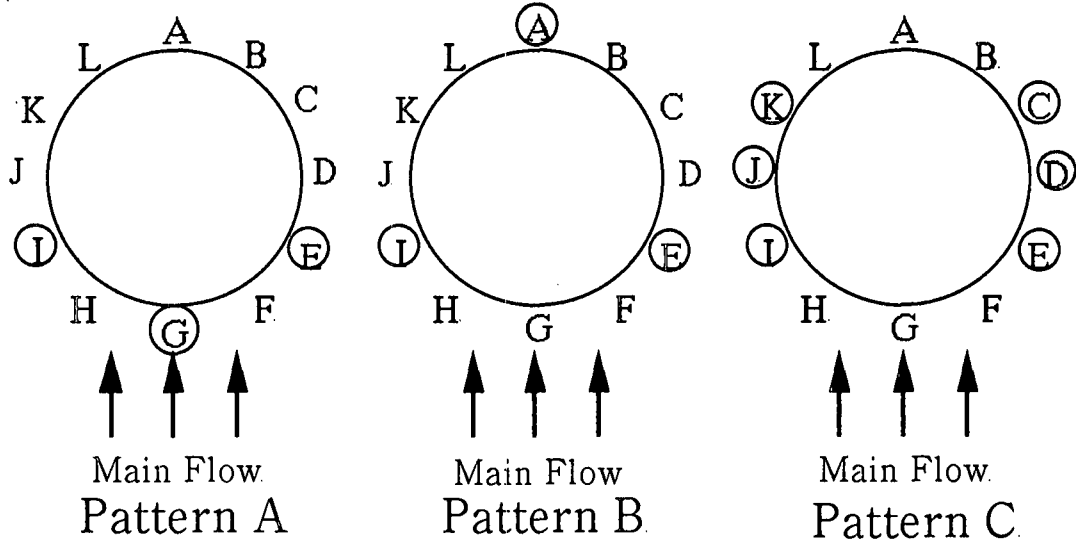


図3 空気の放出パターン

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
各実験パラメーターについて次の様に定義する。

$$St=fD/V$$
$$\alpha = Q_1 / (Q_2 + Q_1) \times 100 \%$$
$$r_o=r_i/D$$

ストローハル数
ボイド率
加振振幅比

但し、 f : 加振振動数 (Hz) ,
 D : 円柱直径 (m) ,
 Q_1 : 空気流量 (m³/s) ,
 Q_2 : 水流量 (m³/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)

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。各パラメーター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(2)により求める。

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

(1)

但し、 $F(t)$: 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)

とする。力の評価方法としては、RMSを用いる。
 $\beta 1$: 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
とすると、
 $\beta 2 / \beta 1 > 1$ ……流体力が増大する
 $\beta 2 / \beta 1 < 1$ ……流体力が減少する
として評価する。

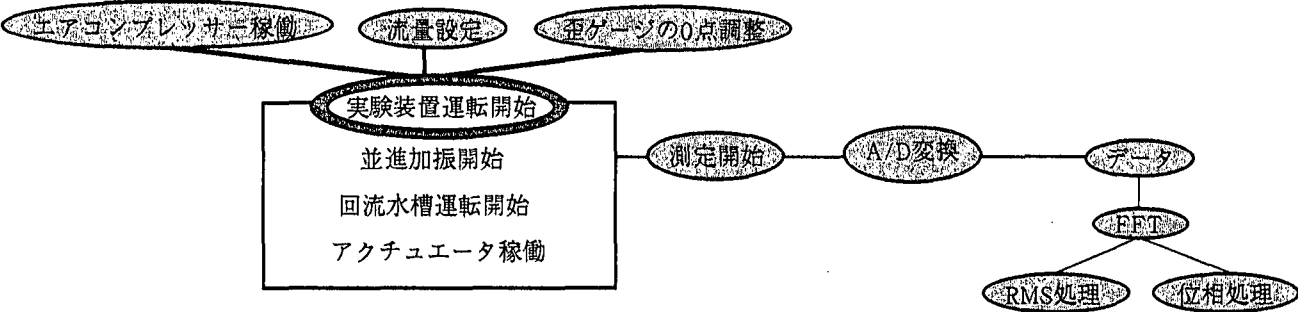


図5 データ収集処理システム

St	V (m/s)	α (%) 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	120	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

表1 各パラメーターに対する空気流量

4. 実験結果

4.1 空気を放出しない場合の非定常流体力

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1Hz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 $St=0.15$ 付近であった。また、このように励振される場合では直線的に流体力が増加する傾向がある。

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増減ができ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、加振振動数が低い場合(本実験では $f=1\text{ Hz}$)では r_0 の減少に伴い流体力増加の割合は大きくなり、これより加振振動数が大きくなるとRMS比は1に収束するようになる。 r_0 が小さい場合は、 r_0 が大きい場合と比較して、同量の空気を放出した時、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、 $r_0=0.071$ で幾分ではあるが流体力の減少が確認されたのは、全パターンを通じ $f=3\text{ Hz}$ の場合に限られていた。

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数ごとの位相関係のグラフを示す。全パターンを通じ加振振動数が1Hzでは励振されていることは前述したが、この場合の加振変位に対する揚力の位相関係は、St数の大小に関わらずほとんどの場合位相遅れであり、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3Hz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。またこれよりSt数が大きくなると制振効果は薄れるが、ボイド率のにもそれほど影響されず30度前後の安定した位相遅れとなっている。空気を放出しない場合には揚力の位相は進んでいるため、空気放出による流体力は振動を抑制する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、位相関係もほぼ同じである。ただ、 $St=0.20$ 、 $f=2\text{ Hz}$ でパターンAにおいて25度前後の位相進みになっている。また、

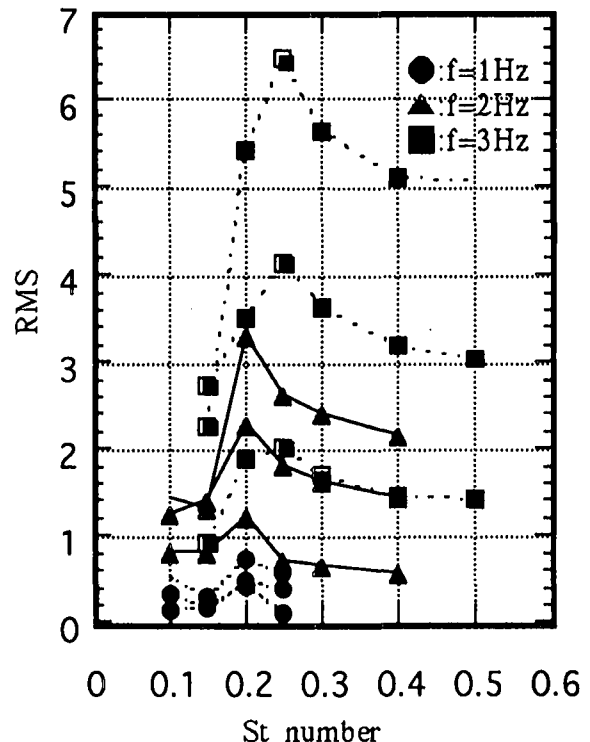


図6 St数と揚力の関係

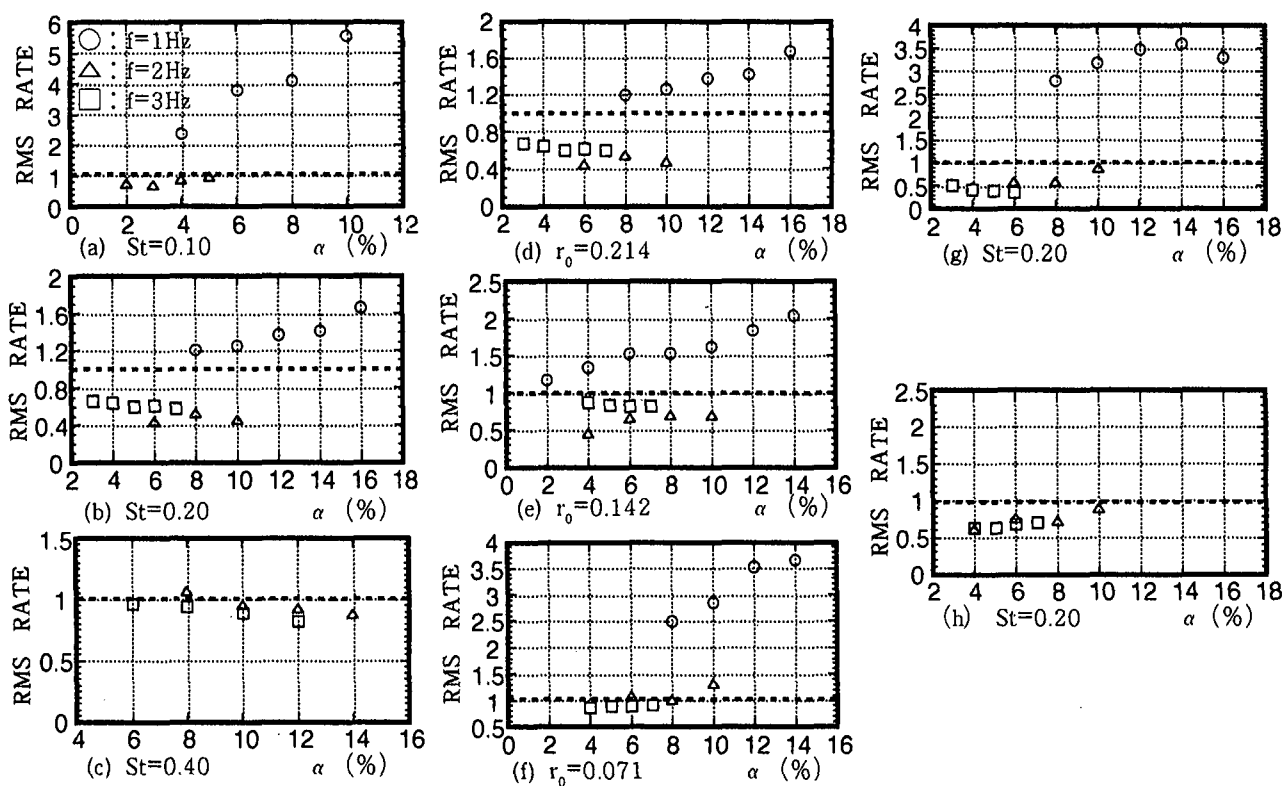


図7 RMS比とボイド率の関係

但し(a)~(c)はパターンA, $r_0=0.214$, (d)~(f)はパターンA, $St=0.20$, (g)はパターンC, $r_0=0.214$, (h)はパターンB, $r_0=0.214$

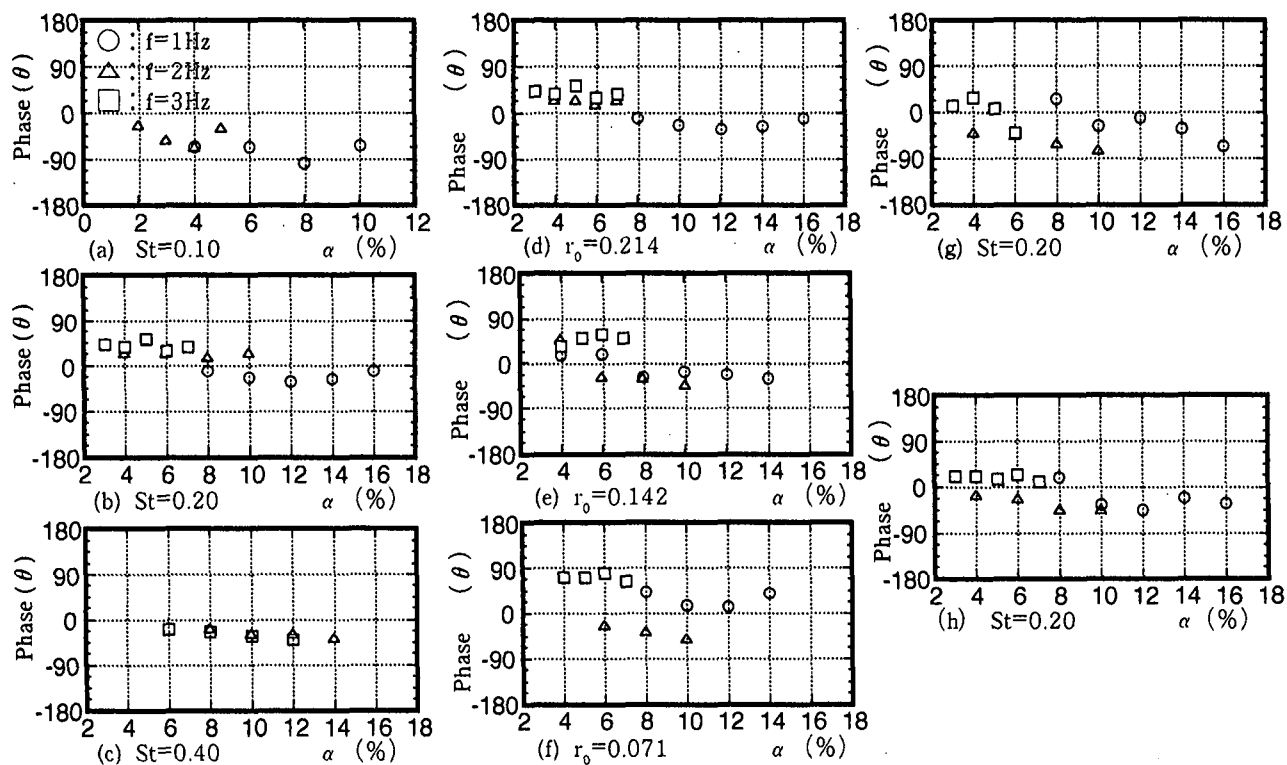


図8 位相差とボイド率の関係

但し(a)~(c)はパターンA, $r_0=0.214$, (d)~(f)はパターンA, $St=0.20$, (g)はパターンC, $r_0=0.214$, (h)はパターンB, $r_0=0.214$

図9に示したBパターンでの位相関係をみると、 $f=1\text{Hz}$ での位相遅れが大きい(120度前後)ため、この時最も制振力として非定常流体力が働くことがわかる。

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なり、 $r_0=0.005$ では両パターンとも、す

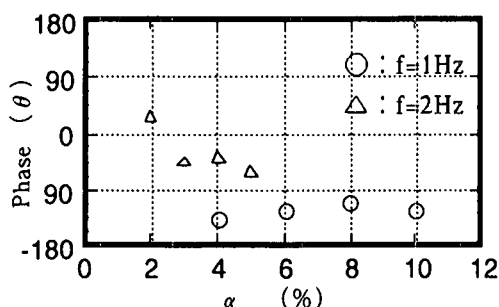


図9 パターンB $St=0.10, r_0=0.214$

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 $f=3\text{Hz}$ の場合を除いて安定し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。

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3Hzの場合は、常に流体力の低減効果が確認された。
- 3) 非定常流体力が減衰力(位相角にして120度の遅れ)として働くパラメーターを発見した。また減衰力が最も安定して働くのは本研究におけるBパターンであった。
- 4) 加振振幅比の減少に伴うボイド率の適用性が明らかとなった。

6. 結言

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, (1977)