

定常流中における水中トンネルの揚力低減方法 (空気放出型アクチュエータ) の開発

飯 島 徹*・近 藤 俣 郎**・佐 藤 靖 尚***・大 塚 夏 彦****

1. はじめに

今日, 都市の地方分散化に伴う交通体系整備と公共工事のコスト削減の要求が高まっている。海洋に囲まれる我が国では, 未利用空間が多い海洋開発の一貫としてメガフロート構想と共に海洋に挟まれた空間を結ぶ水中トンネル構想が, 水中トンネルハンドブック (1995) 等で広く議論されている。水中トンネルはフィヨルド横断の交通手段として 10 数世紀より着想され, 現在は日, 米, 欧で研究が活発化の傾向にある。このような水中トンネルはフィヨルドや海中を横断するシステムの関係上, 水中浮遊式円柱構造物及びその鉛直換気塔を加えた形態をとり (図-1 参照), またこれらは津波などの長周期波や定常流にさらされる場合がある。本研究は例えば Blevins ら (1990) の文献にもあるように, これら円柱構造物に定常直流が作用する場合を想定し, 換気塔からの剝離渦の交番発生によるロックイン現象で揚力方向振

動が発生する場合を対象とする。このような場合の円柱に加わる揚力の低減方法として, 円柱表面から気泡を放出するタイプのアクチュエータを考案し, その有効性を流体力により評価する。定常流は回流水槽によって実現し, 実際の円柱構造物の振動状態を加振装置によって再現した上で本アクチュエータを稼働し, その性能評価を実験的に St 数 (メカニカル St 数) ボイド率 α , 加振振幅比 γ_0 , 位相差 θ によって明らかにする。

2. 実験装置

2.1 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た。表面には周方向に 12 分割した 1 列当たり 20 個の空気放出孔が設けられている。またこの円柱の一端は自由端, 他端はアルミ弾性棒で片持ち支

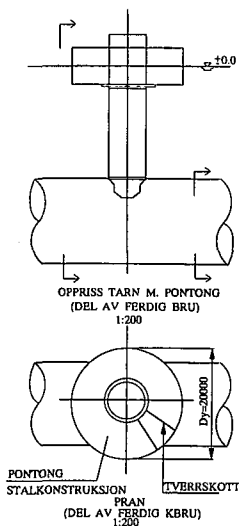


図-1 Selmer A. S. (1996) による水中トンネル及び鉛直換気塔例

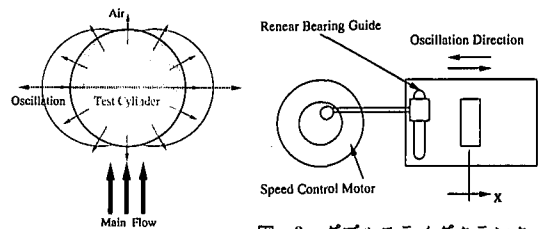


図-2 実験概念図

図-3 ダブルスライダクランクシステム

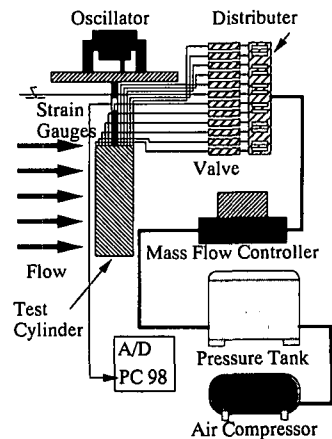


図-4 気泡放出型アクチュエータ

* 正 会 員 工博 室蘭工業大学 CRD センター 助教授
** フェロー 工博 室蘭工業大学 建設システム工学科 教授
*** 学生会員 室蘭工業大学大学院工学研究科
**** 正 会 員 北日本港湾コンサルタント(株)

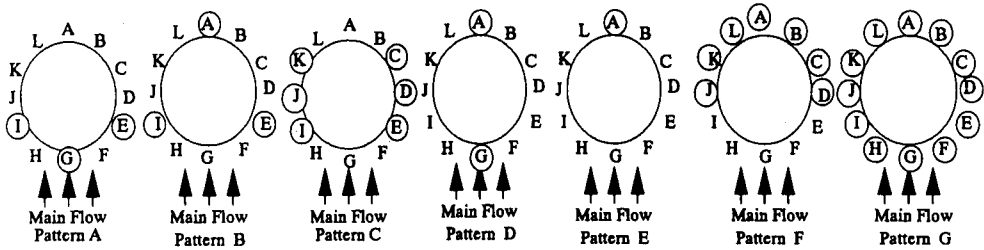


図-5 気泡放出パターン

持されていて、力計測用に歪ゲージが揚力、抗力の二方向が同時に計測されるよう互いに垂直に取り付けてある。また、実際的水中トンネル設計ハンドブックで設定されているテンションレグの固有振動数は1から3 Hzであるので、これと同振動数で加振し、振動状態を再現する(図-2参照)。この場合円柱支持部の剛性は力計測のために加振振動数の数倍以上に設計される必要があり、実測値として空気中の固有振動数は18.5 Hzである。また流速が0~1.5 m/sまで任意に設定可能な回流水槽(西日本流体技研 PERSONAL TANK PT-70)を使用して定常流を再現している。

2.2 正弦波加振装置

対象となる現象は渦によるロックイン振動のため、単一振動数の正弦波振動である。そこでその振動時の流体力特性を調べるためにダブルスライダクラック機構(図-3参照)の加振装置を用いて実現し、力を測定した。ここでダブルスライダクラック機構とは、一定回転数の運動をスピードコントロールモータによって制御し、その回転運動を一方向の厳密な正弦波直線運動に変換するシステムである。またその加振振幅は偏心と回転中心の距離で表現される。尚、高周波ノイズが生じぬように、スライダクラックは全てリニアベアリング等でガイドされている。

2.3 気泡放出型アクチュエータ

気泡放出型アクチュエータの構成については図-4に示す。まず圧縮機で加圧された空気を圧力タンクに蓄え、流量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水中に放出される。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、取り付けられ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。円柱からの空気放出パターンは図-5に示し、図中の○で囲まれた部位が放出される位置を示す。Aパターンは剝離点付近と前方淀み点、Bパターンは剝離点付近と後方淀み点、Cパターンは剝離領域全て、Dパターンは両淀み点、Eは後方淀み点、Fパターンは流れに対して円柱後方、Gパターンは円柱表面全体から、そ

れぞれ放出するものとする。なお、可視化実験による円柱近傍の気泡の平均径を測定した結果3 mm~6 mm程度で、実際に水中トンネル函体が10 mとして換算すると30 cm~60 cmとなる。

3. 実験パラメータおよび実験方法

3.1 実験パラメータ

- $St = fD/V$: メカニカルストローハル数
- $r_0 = r_1/D$: 加振振幅比
- $a = Q_1/(Q_1 + Q_2)$: ボイド率
- θ : 加振変位に対する位相角
- Cl, Cd : アクチュエータ稼働時の流体力係数
- C_{l0}, C_{d0} : アクチュエータ未使用時の流体力係数
- P : アクチュエータ稼働時の抗力パワースペクトル
- P_0 : アクチュエータ未稼働時の抗力パワースペクトル最大値

実験パラメータを以上に示す。ただし、 f : 加振振動数(Hz)、 D : 円柱直径、 Q_1 : 空気流量(m^3/s)、 Q_2 : 水流量、 V : 流速、 r_1 : 加振振幅($r_1=0.005$, $r_2=0.010$, $r_3=0.015$ (m))とし、揚力効果率を Cl_n とする($Cl_n = C_{l0}/Cl > 1$ の場合流体力の増大を意味し、 $Cl_n = C_{l0}/Cl < 1$ の場合流体力が減少する)。一方 θ に関しては、 $\theta > 0$ なら励振、 $\theta < 0$ なら制振力である。

3.2 実験方法

図-4で構成されるシステムで円柱に加わる非定常流体力を測定する。非定常流体力は次式(1)により算出される。

$$F(t) = k\delta(t) - m_a \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $F(t)$: 非定常流体力(N)、 k : 力の校正係数、 $\delta(t)$: 歪ゲージ出力、 m_a : 加振力とする。測定されたデータはA/D変換後FFTが施され、RMS処理、位相処理される。

4. 実験結果

4.1 アクチュエータ未稼働時の非定常流体力

単一円柱を流れ場において、流れ方向と直角方向に強

制加振した場合の流体力（アクチュエータ末稼働時）の特性として縦軸に揚力の RMS、横軸に St. 数をとった場合の関係を図-6 に示す。これによりあらゆる加振振動数において $St.=0.20$ 付近で最大の力を受けており、ロックイン現象がこの $St.=0.20$ 付近で引き起こされていることが確認されたので、本加振装置はロックイン現象を実現しているといえる。

4.2 気泡を放出した時の揚力特性 (Cl_n)

例として図-7 にそれぞれのパターンの $St.=0.20$, $r_0=0.429$ における α (%) と揚力効率率 Cl_n で表わしたグラフを示す ($\bigcirc$: $f=1$ Hz, $\triangle$: $f=2$ Hz, $\square$: $f=3$ Hz)。これより A, C, F, G パターンにおいて $f=2, 3$ Hz の場合最大で 50% 以上の Cl_n の低減が確認される。これらのパターンにおいて Cl_n が減少したのは剝離渦の交番発生要因となる剝離点の移動運動を破壊している（飯島ら, 1988）ためと思われる。淀み点付近のみから放出された気泡が剝離点付近の流れに及ぼす影響を調べたパターン D, E では Cl_n 低減効果はほとんど確認されず、そ

の影響は小さいと思われる。また全てのパターンにおいて、1 Hz で加振した場合は流体力が直線的に増加する傾

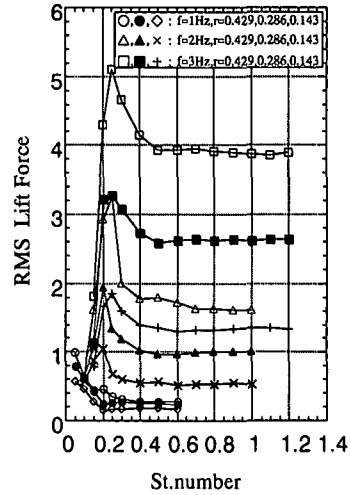


図-6 揚力と St. 数の関係

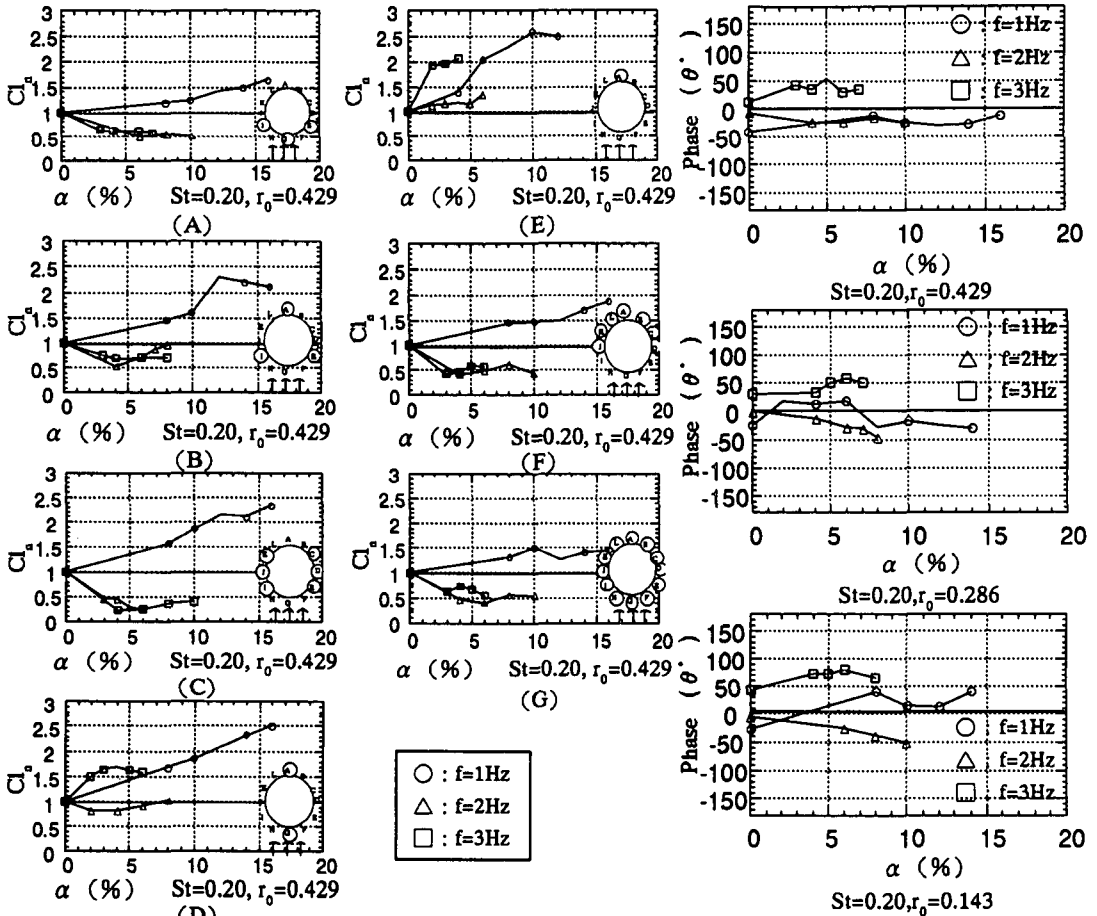


図-7 パターン別揚力効率率

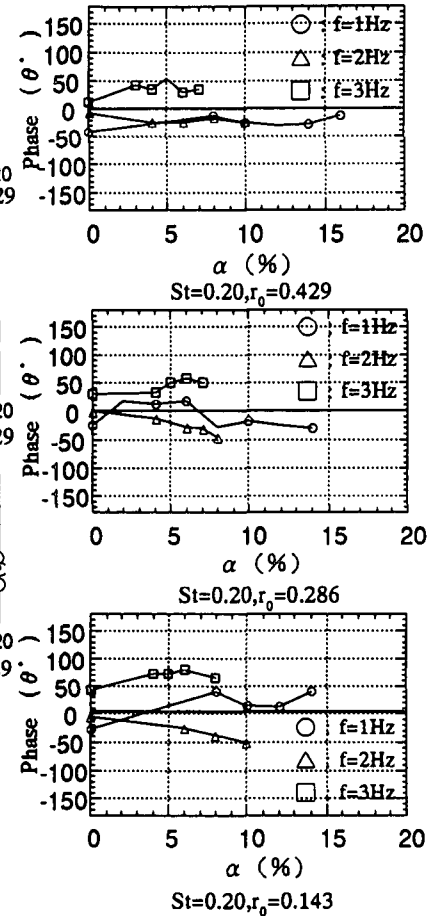
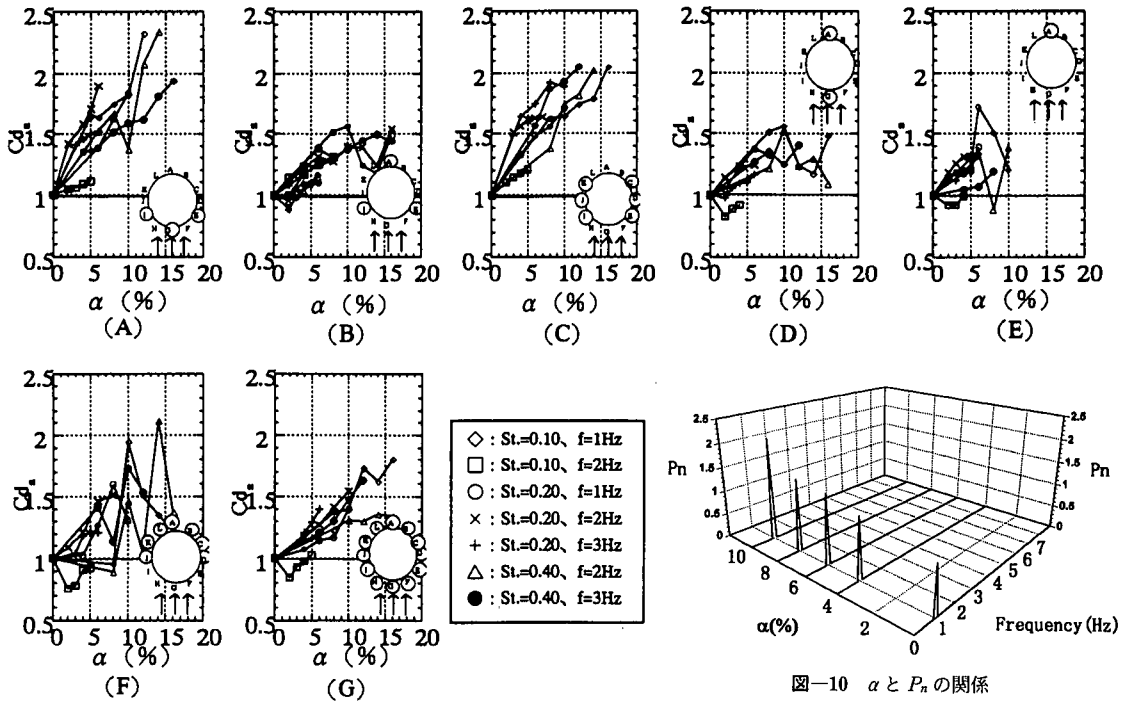


図-8 r_0 ごとの θ (パターン C)

図-9 (A)-(G), C_d と α の関係

向があり、 r_0 が小さくなるにつれ Cl_n は増大する。これは 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気泡を放出した場合それだけ周囲の流れを乱す効果が大きくなったためだと考えられる。これらの振動数、また振幅が小さい場合は構造物そのものが受ける力も小さいため図に示すように Cl_n を増大させる結果を得た。一方、最小の r_0 でわずかではあるが Cl_n 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。よって構造物が小振幅振動を受ける時にはアクチュエータ稼働の必要性はなく、大振幅振動を受ける時に本アクチュエータを稼働することは有効であるといえる。

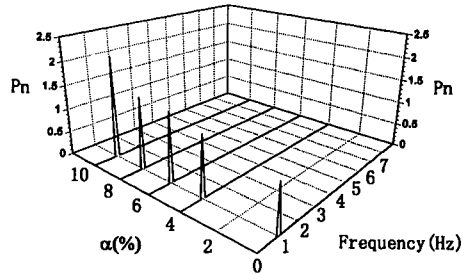
4.3 位相差による流体力の評価

流体力の性質を θ を考慮することで評価する。 $f=1\text{Hz}$ の場合は、いずれの r_0 でも $\alpha=0^\circ$ で $\theta<0$ であるが、 r_0 が小さい場合にはアクチュエータ稼働により $\theta>0$ となり励振力と判断される。一方 r_0 が大きくなるにしたがって、 $\theta<0$ となり制振されていることが判断される(図-8)。小振幅時には気泡が励振力として、大振幅振動時に気泡が減衰力として働くことから、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が引き起こされる場合があることが確認された。 $f=2\text{Hz}$ の場合は常に $\theta<0$ となっているので気泡が減衰力として働いていることが確認され、またこの場合 Cl_n も減少しているので流体力の低減に非常に有効であるといえる。 $f=3\text{Hz}$ の場合は $\alpha=0^\circ$ の場合を含

め全て $\theta>0$ となり、励振されているが Cl_n は低減する。以上より本アクチュエータを稼働するに当たり、低振動数では r_0 により励振、制振作用は変化し、中間振動数領域では制振作用、高振動数の場合は励振作用が表われることが確認されたので、低振動数の構造物である水中トンネルのテンションレグ部材の固有振動数が中間振動数領域($f=2\text{Hz}$ 程度)の場合、本アクチュエータは揚力低減に有効であることが明らかとなった。

4.4 気泡を放出した時の抗力特性 (C_{d_n})

図-9にそれぞれのパターンの C_{d_n} と α の関係を示す。B, D, Eパターンでは α の増加に伴い C_{d_n} が減少する傾向があるが、A, C, F, Gパターンにおいては α の増加に伴って増加する傾向がある。またパターンA, FはパターンC, Gと比較して増加の割合は高い。Aパターンでは α の増加に伴い、特に α が大きいときでは急激に C_{d_n} の増加し、Fパターンでは α の増加に伴い C_{d_n} は不安定となっている。例として図-10に、パターンF, 2Hz で加振した場合の各ボイド率ごとのP.S.Dをアクチュエータ未稼働時の P_0 の最大値でノルマライズしたものの(P_n)で示す。これよりアクチュエータを稼働することにより未稼働時の卓越振動数成分のみ急激に P_n が大きくなることが確認される。以上より Cl_n が減少する場合(A, C, F, Gパターン)でも、 α の増加に伴って C_{d_n} が増大する場合があることが確認され、逆に Cl_n の減少効果があまりないD, Eパターンにおいて C_{d_n} が減少する

図-10 α と P_n の関係

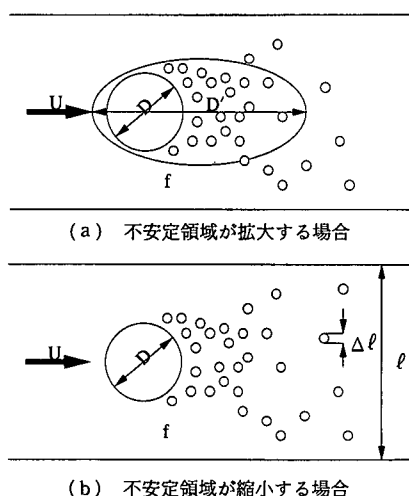
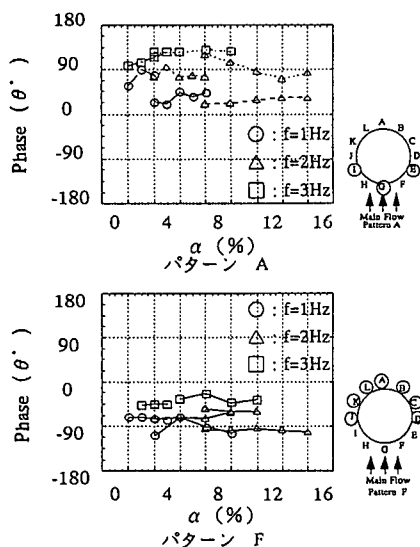


図-11 観測図

図-12 インライン強制加振時の α と θ の関係

という結果を得た。

4.5 インライン振動領域拡大，縮小について

流れ方向に関係するパターン(A, F)の観測図を図-11に示す。Blevinsらの文献にあるように、インライン振動の Ur の範囲 ($1.3 < Ur < 3.5$) に対し、本実験領域は $2.5 < Ur < 10$ とした。(a) の場合はFパターンで確認される、気泡放出によって代表長さが D から D' に変化することによって実際に見かけの流速が変化した(無次元流速にして、 $Ur = 1/St. = U/fD$ から $Ur' = U/fD'$ に変化した、 $Ur' < Ur$ となる)ため、インライン方向の不安定振動領域が拡大されると考察できる。(b) の場合はAパターンで確認され、流路幅を l とすると $l - \sum \Delta l$ となり気泡の放出により流速 U が大きくなって見かけ上 St 数が

小さくなる場合 ($St. = fD/U$ が $St.' = fD/(U + \Delta U)$ に変化した、 $St.' < St.$ となる)であり、インライン方向の不安定振動領域が縮小していると考えられる、そのため、 α の増加とともに Cd_n が単調増加したと考察される。

4.6 インライン時の位相差による流体力の評価

インライン方向に強制的に加振させた場合の α と θ の関係(パターンA, F)を図-12に示す。Fパターンの θ を見るとすべて負となっており、また高流速域では $Cd_n < 1$ となるのでこのパターンから放出される気泡は抗力方向についても制振力を持つことが確認される。そのため抗力に対するアクチュエータの効果が最良のパターンといえる。Fと同様にAパターンにおいても α の増加に伴い、特に高ポイド率では急激に Cd_n の増加が確認されるが、Aパターンでの θ をみるとすべてが正となっており、抗力方向に励振されていることが確認された。以上の結果は、流れの向きに対してパターンFの場合は推進力、パターンAの場合は逆流力の関係になっていることを考慮すると容易に理解される。

5. 結 論

結論として以下にまとめる。

(1) A, C, F, Gパターンにおいて最大で50%以上の Cd_n の低減効果が確認され特に $f = 2 \text{ Hz}$ において θ も常に負になることから、気泡が減衰力として働くことが確認された。

(2) 位相差の評価により低振動数では r_0 により励振、制振作用は変化し、中間振動数領域では制振作用、高振動数の場合は励振作用が表われることが確認されたので、低振動数の構造物である水中トンネルのテンションレグ部材の固有振動数が中間振動数領域 ($f = 2 \text{ Hz}$ 程度) の場合、本アクチュエータは揚力低減に有効であることが明らかとなった。

(3) 見かけの流速が変化することにより、インライン方向の不安定振動領域が拡大または縮小し、 Cd_n に影響を与えることが確認された。

(4) 抗力に外乱を与えず、揚力を低減するのに効果があるのはパターンC, F, Gであり、特にFでは抗力方向にも制振効果があることが確認されこのパターンが最適であるといえる。

参 考 文 献

- (社)水中トンネル研究調査会 (1995): 水中トンネルハンドブック。
- 飯島 徹・原文雄 (1988): 気液二相流における直列二円柱の振動特性に関する研究。機械学会論文集, 54-497 C (S 63), pp. 80-86.
- Selmer A. S (1996): International Conference on SFT pp. 173.
- Blevins R. D (1990): Flow Induced Vibration. pp. 50-58, Van Nostrand Reinhold.