

## 直交気液二相流における直列二円柱の流力弾性振動

Fluid-induced-vibration characteristics of two-tandem-circular-cylinders  
subjected to two-phase cross bubble flow

- 代表研究者 東京理科大学工学部機械工学科助手 飯 島 徹  
Res. Assoc., Department of Mechanical Engineering,  
Science University of Tokyo  
Tohru IJIMA
- 協同研究者 東京理科大学工学部機械工学科教授 原 文 雄  
Prof., Department of Mechanical Engineering,  
Science University of Tokyo  
Fumio HARA
- 東京理科大学大学院工学専攻科修士過程2年 野 島 智 之  
Grad. Student, Grad. School of Science University of Tokyo  
Tomoyuki NOJIMA

Many works have been done to investigate the vibration response characteristics of two circular cylinders in tandem subjected to a single-phase cross flow. Recently, Zdravkovich and Chen individually reported reviews of the response of two tandem circular cylinders in various arrangements, subjected to an air or water cross flow, revealing that the vibrational response characteristics are not yet well understood and a systematic study is, thus, needed to quantify the response of two cylinders under different flow and structural conditions.

The two phase cross-flow-induced vibrations in tube arrays have recently become one of active research fields in flow-induced vibration problems, but the vibrations of two cylinders in tandem subjected to two-phase cross flow have not yet gained the attention of engineers or researchers due to the limited application in industry, but Iijima and Hara reported an interesting effects that a two-phase bubble flow has in suppressing the vortex-induced, in-line and cross flow vibrations for a single circular cylinder. The vibration response characteristics of two circular cylinders in tandem are thus considered to be influenced air bubbles in two-phase flow, and it is academically and partially interesting to clarify these air bubble effects on the vibration of the tandem cylinders and to discover industrial applications.

In this study, we experimentally examines the vibrational response characteristics of two circular cylinders in tandem, subjected to two-phase air-water bubble cross flow, with respect to reduced velocity and void fraction and compares the results obtained for both pitch-to-diameter ratio of 1.5 and 3.0, and both large and small bubble sizes. The experiments show that 1) for pitch-to-diameter ratios air bubbles cause a large-amplitude random vibration in the cylinder system when flow velocity is smaller that corresponding to the onset of vortex lock-in resonance, 2) they suppress the downstream cylinder's large vibration at the lock-in flow velocity for a large pitch-to-diameter ratio of 3, but the small  $P/D$ , 3) for both the pitch-to-diameter ratios the vibration excitation and reduction seem to be caused by air bubbles distributed in the region between the upstream and downstream cylinders, and 1) the smaller bubbles were less effective on the vibration response of the tandem-cylinder system with respect to the reduction and excitation of vibration. These seemed to be due to the condition of air bubble distribution in the region between the upstream and downstream cylinders.

---

## 研究目的

エネルギープラントや海洋構造物の中には、流体にさらされる柱状構造物が非常に多く、その流体力学振動問題がとりだされて久しい。それに対して幾多の研究結果が報告されているが、単相流中のものがほとんどであり、実際の機器は気泡を含む気液二相流にさらされる場合がある。その振動特性は複雑な様相を呈する<sup>1,2)</sup>。そこで最近になってようやく二相流の研究は活発化の傾向になってきた。しかし、まだ明確な理論解析はおろかその振動特性のメカニズムにも決定的な成果が現れていないのが現状である。そこで Zdravkovich *et al.*<sup>3)</sup>の単相流での最も単純な円柱配列である直列二円柱モデルにおける二円柱における研究成果をもとに、その振動様式で特徴的なピッチ直径比のものを選択し、直交気液二相流下での実験を行い、気泡が二円柱系の振動特性の励振効果、及び制振効果の基本的なメカニズムを明らかにすることを目的とする。

## 研究経過

昭和63年までの研究成果として Zdravkovich *et al.*らの研究を基に、ピッチ直径比3.0を有する直列二円柱の気液二相流中での振動応答特性を実験的に明らかにした。貴法人の助成金の援助により実験設備も充実し、気泡径及びピッチ直径比の相違による比較実験を行った。これらにより管群構造物の気液二相流下における振動特性に対する気泡の効果とピッチ直径比による効果の違いが実験的に明確化されるに至った。

## 研究成果

### 1. 記号

- $A$  : 流路断面積 [m<sup>2</sup>]
- $D$  : 円柱の直径 [m]
- $f_0$  : 円柱の固有振動数 (空气中)
- $f_w$  : 円柱の固有振動数 (水中)
- $m$  : 円柱の単位長さ当たりの質量 [kg/m]
- $P$  : 円柱配列のピッチ [m]
- $UX$  ( $UY$ ): 上流側揚力(抗力)方向
- $DX$  ( $DY$ ): 下流側揚力(抗力)方向
- $\sigma_0$  : 単相流での加速度応答の RMS [G]
- $\sigma_w$  : 二相流中での加速度応答の RMS [G]

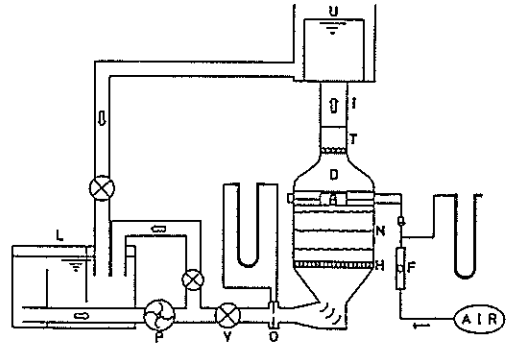


図1. 気液二相流ループ。

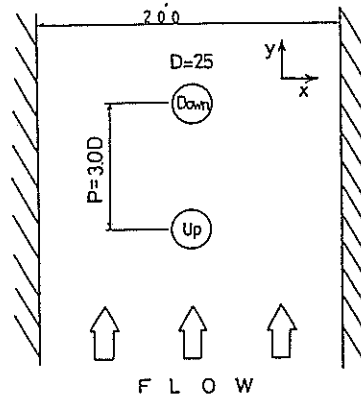


図2. 円柱配列。

$\sigma_a$  : 小気泡時の加速度応答の RMS [G]

$\sigma_B$  : 大気泡時の加速度応答の RMS [G]

$Q_0$  : 空気流量 [m<sup>3</sup>/s]

$Q_w$  : 水流量 [m<sup>3</sup>/s]

$U$  : 間隙流速 =  $U_\infty P / (P - D)$  [m/s]

$U_\infty$  : 近寄り流速 =  $Q_w / A$  [m/s]

$U_r$  : 無次元流速 =  $U_\infty / f_0 D$

$\alpha$  : ボイド率

$\beta$  : 励振度  $\sigma_w / \sigma_0$  (単相流における加速度 RMS に対する二相流での加速度 RMS の割合)

注  $\beta < 1$  … 気泡が円柱の振動応答に対して制振効果を示す

$\beta = 1$  … 気泡による円柱の振動応答に対する影響は無い

$\beta > 1$  … 気泡が円柱の振動応答に対して励振効果を示す

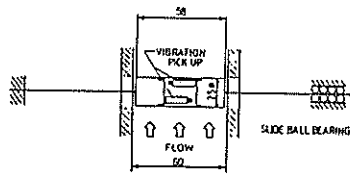


図 3. 円柱構造図.

表 1. 円柱諸特性

	Natural frequency	Damping ratio
In air	$f_0=7.0$ (Hz)	$\xi_0=2.0$ (%)
In water	$f_w=6.2$ (Hz)	$\xi_w=3.0$ (%)

表 2. 円柱相互の影響度 (流体連成の強さ)  
 $P/D=1.5$

Input cylinders	Output cylinders	
	Lift direction	Drag direction
Lift direction	34 (%)	13 (%)
Drag direction	13 (%)	25 (%)

表 3. 円柱相互の影響度 (流体連成の強さ)  
 $P/D=3.0$

Vibrating cylinder	Output cylinder	
	Lift direction	Drag direction
UX	4.00%	3.33%
UY	3.01%	1.90%
DX	6.61%	4.42%
DY	3.66%	2.50%

$\rho$  : 流体の密度 [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\xi_0$  : 円柱の減衰率 (空気中)

$\xi_w$  : 円柱の減衰率 (水中)

添え字 S: 小気泡

添え字 B: 大気泡

## 2. 実験装置

### 2.1 気液二相流ループ

図 1 に, 本実験に使用した気液二相流ループの概略図を示す。この最大間隙流速は, 1.4 m/s である。

### 2.2 テストセクション及び実験装置

図 2, 3 に円柱の配列図及び円柱構造図を示す。

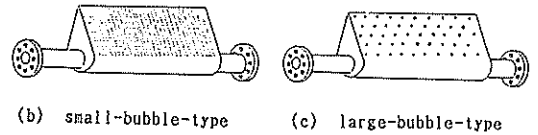


図 4. 気泡発生装置概略図.

表 4. 励振度パターン表  $P/D=1.5$

Ur		UX	UY	DX	DY
2.77	S	↗	↗	↗	↗
	B	↗	↗	↗	↗
3.69	S	—	↗	∩	↗
	B	∩	↗	↗	↗
4.65	S	∩	∪	↗	↘
	B	∩	↗	∩	∪
7.60	S	↘	↘	↗	—
	B	↗	—	↘	∪

テストセクションは 200 mm × 60 mm の矩形流路を用いている。また, 円柱の直径は 25 mm 長さ 58 mm のものを使用し, 一端固定, 多端滑り自由端のピアノ線貫通支持方法を取り, 振れ周り振動可能としてある。円柱には加速度ピックアップがそれぞれ 2 個取り付けてあり, 揚力, 及び抗力方向が同時に測定可能である。

また, 表 1 に円柱の諸特性 (固有振動数及び減衰率) を, 表 2, 3 にそれぞれピッチ直径比 1.5 と 3 の円柱相互の影響度を示す。ここでの円柱間の相互影響度というのは, 静水中において一方の円柱を一方向に自由振動させたときの加速度振動応答 RMS をもとに, 他方の円柱の振動を加速度振動応答 RMS の比で表したものである。 $(\sigma_w/\sigma_0)$  これより,  $P/D=1.5$  ではかなり流体連成が見られるが,  $P/D=3.0$  では, ほとんどみられず 5% 前後にとどまっている。

次に, 図 4 に気泡発生装置の概略図を, また表 4 にその気泡発生装置の性能表を示す。なお気泡

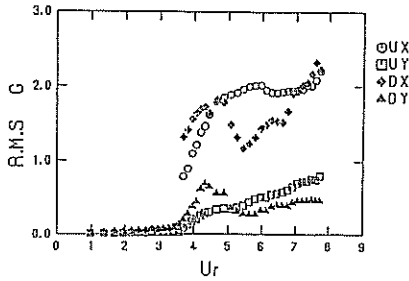


図5. 単相流における加速度振動応答図 ( $P/D=1.5$ ).

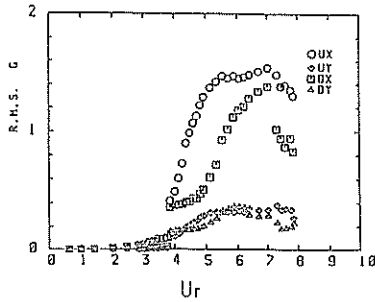


図6. 単相流における加速度振動応答図 ( $P/D=3.0$ ).

径はテストセクションに円柱を取り付けること無く二相流を流したときの可視化実験を通して、写真より測定したものであり、varianceは0.72-1.42であった。

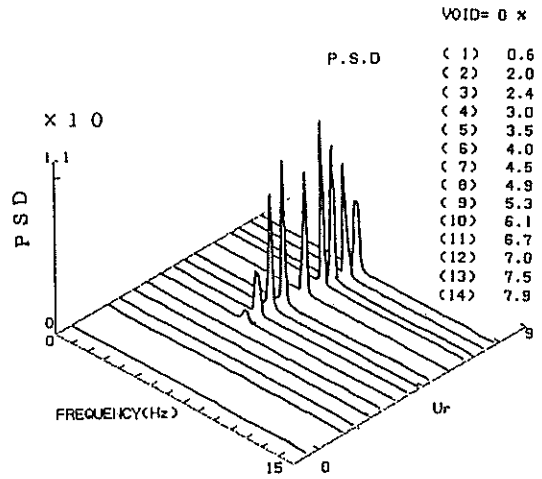
### 3. 実験方法

各無次元流速について、ボイド率 $\alpha$ を変化させ、各円柱のよう力方向抗力方向の振動加速度を測定する。測定した加速度のデータはA/D変換(データ点数2048点、サンプリングタイム10 msec)した後、FFTを施してデータ処理を行う。また上部タンクと流路側部より照明をあて、アルミ粉を流れに混入させて可視化実験を行う。

### 4. 実験結果

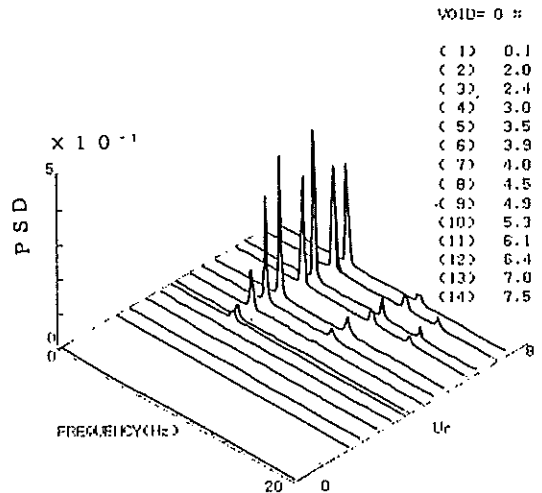
#### 4.1 単相流

単相流における無次元流速に対する加速度振動応答のRMSの関係を、図5と図6に示す。図5と図6は、それぞれ $P/D=1.5$ と $P/D=3.0$ である。これらの図より、 $P/D$ の大小にかかわらず $U_r=3.3$ 付近で各方向とも振動が急激に立ち上がる。さらに流速を増すと円柱の励振は続き、 $U_r=$



(a) 揚力方向

図7. 揚力方向の加速度 PSD ( $P/D=1.5$ ).



(b) 抗力方向

図8. 抗力方向の加速度 PSD ( $P/D=3.0$ ).

7.0付近でピークを迎える。これは単円柱の場合と同様な傾向を示す。ただし、流体連成の大きい $P/S$ の小さい場合は、中流速で下流側円柱の振動応答に極小値を持つ。ただし、流速の上げ下げによる履歴現象は存在しなかった。また、振動応答の加速度 PSD を図7、図8にそれぞれ揚力方向、抗力方向での卓越振動数は、全方向とも円柱の固有振動数に一致する。しかし、 $P/D=1.5$ の場合に

抗力方向の PSD の卓越振動数には  $2f_w$  に対応するものが見られる。これは効力方向に関して、高流速（渦放出によるロックイン状態以降の流速）で、揚力成分が、振動一周期に対して効力方向に2周期ぶん現れる。それゆえ、振子のような振動モードがリサージュ図形により確認された。

#### 4.2 気液二相流

単相流での振動応答結果での四つの特徴的な流

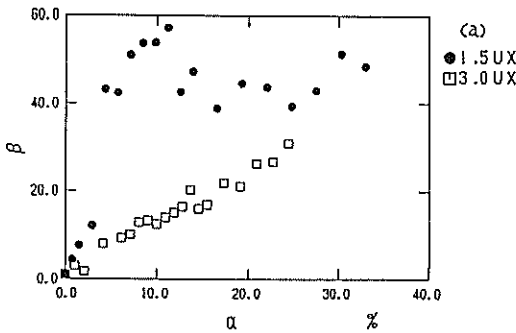


図9. ボイド率と励振度の関係（低流速）.

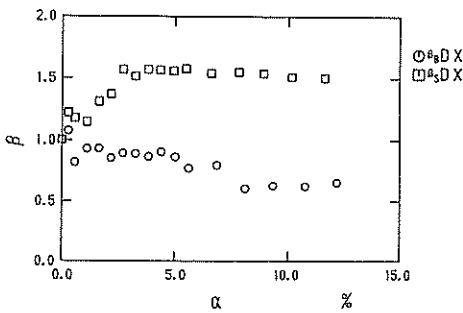


図10. ボイド率と励振度の関係（高流速）.

速 ( $U_r=2.77, 3.69, 4.65, 7.60$ ) におけるボイド率と振動加速度 RMS の関係を基に、気泡による振動応答に与える影響を励振及び制振効果の観点よりより分かりやすくするために、ボイド率と励振度の関係について大気泡と小気泡の場合の代表例を以下の図9, 10に示す。この励振度は記号の定義より1より大きければ励振効果を、1より小さければ制振効果を示すことができる。

#### 4.3 励振度-ボイド率

表4, 5に各無次元流速における気液二相流での各方向の加速度振動応答結果を基に、 $\alpha$ - $\beta$ の関係について、 $P/D$ 、気泡径による差、および円柱の振動方向の影響のようすをパターンとして示

表5. 励振度パターン表  $P/D=3.0$

$U_r$		UX	UY	DX	DY
1.95	S	↗	↗	↗	↗
	B	↗	↗	↗	↗
3.41	S	↗	↗	↗	↗
	B	↖	↗	↗	↗
4.43	S	↖	↖	↖	↖
	B	↖	↖	↖	↖
7.73	S	↖	↖	↖	↖
	B	↖	↖	↖	↖

表6. 励振度の変化の度合の大小

(a) $P/D=1.5$					(b) $P/D=3.0$				
$U_r$	UX	UY	DX	DY	$U_r$	UX	UY	DX	DY
2.77	○	○	○	○	1.95	○	○	○	○
3.69	○	○	△	○	3.41	○	○	○	○
4.65	△	○	○	△	4.43	□	□	△	○
7.60	○	○	□	□	7.73	○	○	□	□

○,  $\beta_S < \beta_B$ ; △,  $\beta_S = \beta_B$ ; □,  $\beta_S > \beta_B$ .

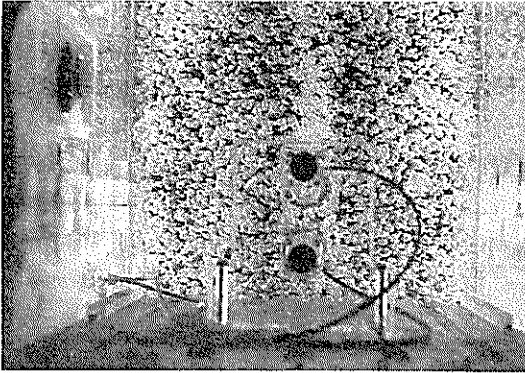


図 11. 可視化写真例 1, 低流速  
( $P/D=1.5$ , 小気泡).



図 13. 可視化写真例 3, 高流速  
( $P/D=1.5$ , 小気泡).



図 12. 可視化写真例 2, 低流速  
( $P/D=1.5$ , 大気泡).



図 14. 可視化写真例 4, 高流速  
( $P/D=1.5$ , 大気泡).

す。また励振度  $\beta_s, \beta_B$  の変化の割合の大小の関係を表 6 に示す。これにより、気泡径が大きいと直列二円柱の振動応答特性は基本的に、円柱間の流体連成が小さい ( $P/D=3.0$ ) 時には低流速時では励振、高流速時では制振される傾向が特に揚力方向で顕著にみられる。しかし、 $P/D$  が小さく流体連成が大きいと、高流速時の制振効果は小さくなるものの、全体的にみるとその効果の発現性は変わらない。また気泡径が小さくなると二円柱が单相流で lock-in に入った高無次元流速域において上流側揚力方向と下流側揚力方向において制振効果と励振効果が対になって現れる特徴を持つ。

#### 4.4 振動特性マップ

ここで励振度の割合まで詳しく見るために、横軸無次元流速  $U$ 、縦軸ボイド率、ダイアグラム中

の領域は励振度として表す。なお、気泡の効果が大きく、かつ顕著な方向である揚力方向に関して各円柱の場合を示す。

#### 5. 流れの可視化実験結果

可視化写真の一例を二円柱での可視化写真を図 11~14 に、また円柱を配置しなかった場合の正面部からのものと、側面部からの可視化写真を図 15, 16 に示す。これらより気泡の大小及び  $P/D$  の大小を問わず、励振効果を示す低流速域では流れの中で気泡は、円柱のまわりに均一に分布している。また制振効果を示す高速域では、気泡の塊が上流側円柱の後流部に偏在して流れているのが観察される。高流速域では制振効果が現れる状態のときには二円柱の後方や周りに気泡が寄り集

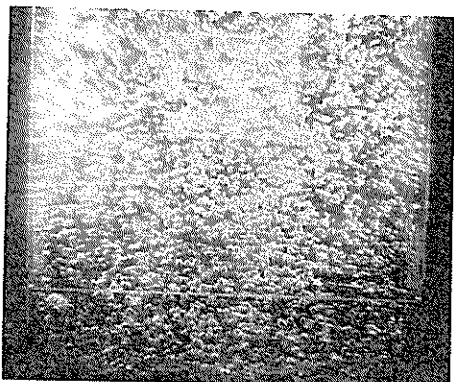


図 15. 可視化写真例 5.

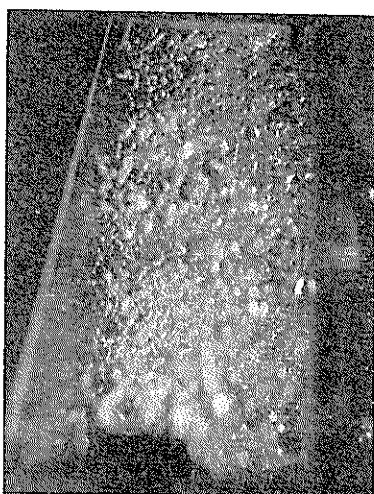


図 16. 可視化写真例 6.

まって流れていくようすが観察される。また円柱を配置せずにテストセクションに気液二相流をこの様な高流速で流した場合は、多少の中心部位への凝集が見られる。しかし、制振効果が現れる気泡の分布ほど顕著ではない。また、円柱の長手方向での気泡分布にも偏りは見られない。

## 6. 流れの観点（可視化実験）を考慮した考察

### 6.1 上流側円柱の後流の挙動と円柱の振動モード

#### i) $P/D$ が小さい時

静止流体中の流体連成が強い ( $P/D=1.5$  の場合が、この領域にはいる) 場合は、ロックインでの振動は、二円柱がほぼ同位相 (図 17)、もしくは

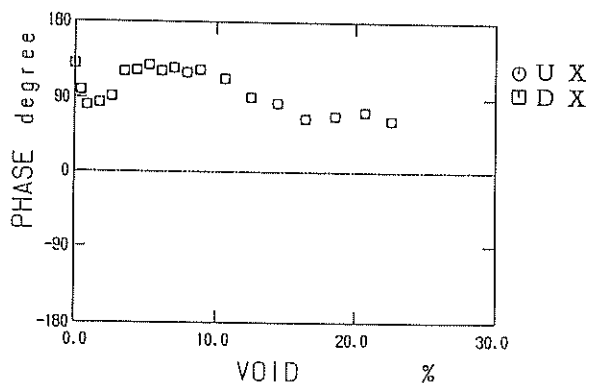


図 17. 位相角 (揚力方向  $P/D=1.5$ ).

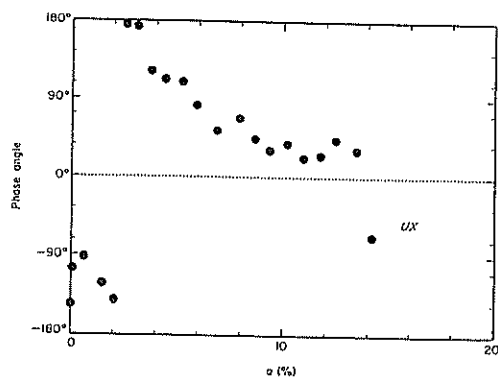


図 18. 位相角 (揚力方向  $P/D=1.5$ ).

は下流円柱がやや位相遅れで振れる。これは、上流側円柱まわりを通過する流れの境界層の剝離によって生じる、変動する後流の境界層の内部に完全に下流側円柱が、位置するような近接タンDEM二円柱の場合、あたかも一体の構造物のように同位相に振れ、また境界層の移動時にその後流部位に半分以上含まれる程度の隣接関係の場合、多少の位相遅れでロックイン振動を生じるためと考えられる。

#### ii) $P/D$ が大きい場合

静止流体中の流体連成が弱い ( $P/D=3.0$  の場合が、この領域にはいる) 場合は、ロックインでの振動は、二円柱が逆位相で振動する (図 18)。これは、上流側円柱まわりを通過する流れの境界層の剝離によって生じる後流に乱されることなく、独立に下流側円柱の剝離による後流が発生し

て、互いに逆位相に振動するためと考えられる。

## 6.2 気泡混入における振動特性

### i) 励振効果

気泡が混入することによる、円柱付近を通過する際に、その流れ場に大きな乱れを生じさせて励振効果を与え不規則な流体力を与える。

### ii) 制振効果

気泡がこの境界層の剝離点を乱すことによる渦連成を弱める。また気泡の密集によってダンピングは、気泡径が小さい方が気泡径の大きい場合に比べて同気泡流量における表面積が大きくなるため減衰は高まる。

ここで  $P/D$  が小さいと、二円柱間の間隔が狭く、気泡の混入が十分ではなく、ダンピングの上昇が余り得られない。また、気泡径小さいほど、剝離点を乱す効果は小さくなる。そのため気泡径の大きい場合の方が励振効果の割合は大きくなると考えられる。

## 7. まとめ

以上の結果より次のことが言える。

気泡は低流速では、円柱付近を通過する際に、その流れ場に大きな乱れを生じさせて励振効果を与える。また、高流速では円柱の後流部と二円柱間に気泡が局在して分布して流れ、円柱を制振する効果を示す。以上のことより、制振効果の現れる基本的なメカニズムは、周期的後流の発生を気泡による大きな乱れが抑えられ、かつ気泡が二円柱の間の圧力の低い部分に入り込んで減衰効果をも高めて制振効果が高まると考えられる。

この効果を両円柱の揚力方向についての振動応答結果にあてはめて以下のように考察する。上流側揚力方向については、 $P/D$  がより小さく、また気泡径が大きい方が制振効果が小さくなっている。これは、二円柱間の間隔が狭いと気泡が入りにくくなるためと、気泡径が大きいと気泡の表面積の総和が小さくなるので減衰が高まらないため、という二つの理由によりこれらの効果の度合が小さくなると考察される。次に下流側円柱の揚力方向に於ては、ピッチの間隔にかかわらず、気泡が大きい方が制振効果は大きい。これは、気泡が周期的な後流の発生を抑える効果を与えるの

で、大気泡の方が小気泡よりも流れを乱す効果が大きいので揚力方向の制振効果が大きくなっていると考えられる。

## 8. 結言

直交気液二相バブル流中の気泡径の違い、およびピッチ直径比の相違による直列二円柱まわりの流れと観点から、振動応答特性について励振及び制振機構を定性的に考察した。

### 今後の課題と発展

これらの実験的研究より、直交気液二相流中での円柱群の振動のメカニズムを定性的に解明したが、これらの考察を基に複雑な気液二相流の振動特性を理論解析によるアプローチに発展し、さらに理論解析シミュレーションへと発展させ、工学的非常に重要な知見として提供するためには以下の課題がある。一つは、ボイド率と気泡の分布特性そして、もう一つは、これらの気液二相流が円柱構造物に与える不規則な非定常流弾性力特性を明確にすることである。そのため、強制加振による気液二相流の非定常流体力測定実験は必要不可欠であると考えられる。

## 謝 辞

勤続年数が2年目ともあって、研究予算が少ない中、この度の日産科学技術の御助成によりこの研究が予期以上の成果1年というこの短期間に5偏にのぼる論文発表)を収めることになり研究意欲のさらなる向上にはかりしれない希望と援助を与えてくれました。ここに同財団、及び、推薦して下さった日本機械学会並びに同財団の選考委員の先生方に、深く感謝の意を表します。なお、この研究の成果を基に、さらに深く研究発展させて幾多の試みによる2相流中の構造物の流弾性振動の明確な理論的研究を成し遂げられるよう発展、努力していく覚悟であります。

なお、本研究にあたり、星野誠(平成元年度、東京理科大学工学部機械工学科卒業生)の実験及びデータ整理の補助とに深く感謝します。

## 文 献

- 1) 田中: 機論, 46-408. B (昭55), 1398.
- 2) Axisa, F., Villard, B., Gibert, R. J., Hestroni, G. and Sundheimer, P.: Vibration of Tube Bun-



dles Subjected to Air-Water and Stream-Water Cross Flow Preliminary Results on Fluid-elastic Instability, ASME Proc. Symp. Flow-induced Vib. 2, 269-284.

- 3) Zdravkovich, M. M.: Classification of Flow-induced Oscillations of Two Parallel Circular Cylinders in Various Arrangements, ASME Proc. Symp. Flow-induced Vibration. 2 (1984), 1-18.

#### 発表論文

- 1) 飯島・原：気液二相流におけるピッチ直径比 1.5 の直列二円柱の振動特性に関する研究，機論，No. 497-54 C (昭 63)，80.
- 2) 飯島・原・野島：気液二相流による直列二円柱の振動応答特性に関する研究（気泡径の相違の影響），機論，No. 525-56 C (平 2)，1.
- 3) 野島・原・飯島：気液二相流における直列二円

柱の振動応答に関する研究（気泡径とピッチ直径比の差による関連考察），機論，No. 89-1212 (掲載予定)

- 4) Effects on Bubble Size on Vibration Characteristics on Tandem Circular Cylinder Subjected to Two-Phase Cross Flows, ASME Proc. Symp. PVP Flow-induced Vib. (1990), 185-192.
- 5) Vibration Response Characteristics of a Tandem Circular Cylinder Subjected to a Two-phase Cross Flow (Effects of Pitch-to-Diameter-Ratio). ASME Proc. Symp. PVP Flow-induced Vib. (1990), 193-200.

1)~3) は日本機械学会で論文講演 (1), 2) は 1989 年 11 月, 3) は 1990 年 7 月) 4), 5) は ASME (アメリカ機械学会) の International Conference in Nashville で 1990 年 6 月に講演.