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)

野島 智之^{*1}, 原文 雄^{*2}, 飯島 徹^{*2}

Vibration Response Characteristics of Tandem Circular Cylinders Subjected to a Two-Phase Cross-Flow (Effects of Bubble Size)

Tomoyuki NOJIMA, Fumio HARA, and Tohru IJIMA

We examined the vibration response characteristics of two circular cylinders in tandem, with a pitch-to-diameter (p/d) ratio of 1.5, subjected to two-phase cross-flows. The average bubble size was from 3.0 mm to 4.0 mm for a small-bubble two-phase flow and from 6.0 mm to 7.0 mm for a large one. Experiments were carried out to obtain the vibrational response of the circular cylinders for both bubble sizes, changing the void fraction from 0% to about 30% at various velocities ranging from 2 to 8. The experiments showed the following major results: 1) In tandem cylinders with $p/d=1.5$, air bubbles caused the cylinder system to excite vibrantly when the flow velocity was smaller than that producing the lock-in state in the two-cylinder system; 2) the response characteristic map in terms of void fraction and reduced velocity was made to investigate the effects of air bubble size on the tandem-cylinder's vibration; and 3) the smaller bubbles had less effect on the vibration response of the tandem cylinder system with respect to the reduction and excitation of vibration.

Key Words: Vibration, Tandem Cylinder System, Two-Phase Cross-Flow, Air Bubble, Void Fraction, Reduced Velocity, Lock-In

1. 緒 言

今日、エネルギープラントなどの蒸気発生器や熱交換器の管群の部位で見られる流体による流れ誘起振動が、問題となっている。このため田中⁽¹⁾、Chen⁽²⁾、Paidoussis⁽³⁾、Zdravkovich⁽⁴⁾など、円柱群の単相流下における研究は数多く報告されている。実際の機器では液体の高温高流速の単相流のみならず二相流状態も存在し、これに関して Axisa⁽⁵⁾、原⁽⁶⁾⁽⁷⁾、Pettigrew⁽⁸⁾、中村ら⁽⁹⁾の研究はあるものの、二相流による管群の振動に関する研究はまだ十分でない。

本報では、流れに直交して配置した 2 円柱間の流体連成が強く発現するピッチ直径比 $P/D=1.5$ とする場合について、大小 2 種類の気泡径の気液二相流に対し、円柱系の振動特性を実験的に明らかにする。その結果、気泡の大きさの相違による振動特性の差異を実験的に比較し、気液二相流中での直列二円柱系の振動現象の基本的なメカニズムを解明する。

2. 記 号

A : 流路断面積 m^2
 D : 円柱直径 m
 f_w : 円柱の固有振動数 (水中) Hz
 P : 円柱配列のピッチ m
 $U_x(U_y)$: 上流側円柱の揚力 (抗力) 方向
 $D_x(D_y)$: 下流側円柱の揚力 (抗力) 方向
 Q_a : 空気流量 m^3/s
 Q_w : 水流量 m^3/s
 U_∞ : 近寄り流速 $= Q_w/A$ m/s
 U_r : 無次元流速 $= U_\infty/f_w D$
 α : ボイド率 $= Q_a/(Q_w + Q_a)$
 β : 励振度 $= \sigma_2/\sigma_1$
 σ_1 : 単相流時の加速度応答の RMS G
 σ_2 : 二相流時の加速度応答の RMS G
 σ_s : 小気泡流時の加速度応答の RMS G
 σ_B : 大気泡流時の加速度応答の RMS G

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置

(1) テストセクション 図 1 は、本実験で使用した直列二円柱の配列図である。テスト流路は 200

* 原稿受付 平成元年 9 月 21 日。

^{*1} 学生員、東京理科大学工学部 (〒162 東京都新宿区神楽坂 1-3)。^{*2} 正員、東京理科大学工学部。

mm×60 mm で、流れは鉛直上向きである。ピッチ直径比 $P/D=1.5$ で、円柱は流れに直交し 2 本直列に配置されている。

(2) テスト円柱 図 2 は、テスト円柱の構造図である。円柱は直径 25 mm、長さ 58 mm で、中心部には直径 1.4 mm のピアノ線が貫通している。ピアノ線の一端は円柱の振動変位によるピアノ線の張力、摩擦の影響を減らすために、スライドボールベアリングによってすべりが自由となる支持、また他端は固定端となっている。円柱の内部には、二つの加速度ピックアップが互いに直交して取付けてあり、揚力と抗力方向の円柱の振動加速度が同時に測定可能である。

(3) 気泡発生器 気泡発生器は平均気泡径 3~4 mm の気泡を発生するものと平均気泡径 6~7 mm の気泡を発生するものの 2 種類を用いる。

3・2 実験方法 前報⁽⁷⁾で行った実験をもとにして代表的な無次元流速を四つ ($U_r=2.77, 3.69, 4.65, 7.60$) 選定し、それぞれの無次元流速 U_r についてボイド率 α を変化させ、各円柱の揚力、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 (データ数: 2048 点, サンプルングタイム: 10 ms) した後 FFT を施し、RMS 値、PSD、揚力と抗力方向の振動加速度波形の位相角、リサージュなどを求める。また、データをとると同時に可視化実験も行う。以上の実験結果を小気泡の気液二相流について実施し、前報⁽⁷⁾での大気泡の気液二相流での実験結果と比較する。

図 1 円柱配列図

図 2 円柱構造図

4. 実験結果

4・1 振動応答特性 3・2 節で示した四つの無次元流速 ($U_r=2.77, 3.69, 4.65, 7.60$) におけるボイド率と振動加速度 RMS の関係について小気泡の場合と大気泡の場合の代表的な比較を図 3 に $U_r=2.77$ で下流側円柱の揚力方向について、図 4 には $U_r=3.69$ で上流側円柱の揚力方向について、図 5 には $U_r=4.65$ で上流側円柱の揚力方向の場合について示す。図 6 中○印は大気泡流時の振動応答を示し、□印は小気泡流時の振動応答を示す。また図 7, 8 に小気泡流時における、 $U_r=2.77$ で上流側円柱の揚力方向と、 $U_r=3.69$ で下流側円柱の抗力方向の PSD を示す。以上のような実験結果を上流側円柱 U と下流側円柱 D のそれぞれについて、揚力方向 X と抗力方向 Y の振動

図 3 $U_r=2.77$ 加速度応答 RMS [G]
(下流側円柱・揚力方向)

図 4 $U_r=3.69$ 加速度応答 RMS [G]
(上流側円柱・揚力方向)

応答に関して求め、整理すると表1のようになる。表1ではボイド率に対する振動応答の変化の特徴を以下に示す六つのパターンに分類する。

- (1) 単調増加 (2) 増加後一定 (3) 減少後一定
- (4) 上に凸 (極大値を持つ)
- (5) 下に凸 (極小値を持つ) (6) 一定値

ただし、(6)の一定値に関しては、単相流の加速度RMS 応答値の $\pm 20\%$ 以内を二相流の振動応答が変化するなら一定値とすることにした。また表2に、振動の大きさ(加速度RMS値)と気泡径の大小との関係を示す。以上の結果から各円柱の各方向の振動応答の特徴と気泡径の大小との関係を以下にまとめる。

(1) $U_r=2.77$ の場合 小気泡の二相流、大気泡の二相流のいずれにおいても各円柱の各方向の振動加速度がボイド率とともに増加していることより二円柱系が気液二相流において励振されていることがわか

る。表1の応答変化のパターンを見ると、大気泡二相流時の U_x のみ、増加後一定のパターンをとる以外はすべて単調増加のパターンをとっている。また、ボイド率の増加に伴う振動応答の増加の度合は各円柱の各方向とも小気泡時が小さい(図3)。ゆえに、気泡を小さくすることによって二円柱系が気泡より受ける正味の励振力は小さくなると考えられる。小気泡時の振動応答のPSDの卓越振動数は大気泡の場合と同様に円柱の固有振動数付近に存在する。

(2) $U_r=3.69$ の場合 表1より、揚力方向の応答については、上流側円柱で大気泡流の場合にボイド率が10%付近まで励振され、その後振動の大きさが小さくなり制振されていくのに対し、小気泡流時の応答値は変わらず一定のままである。また下流側円柱では小気泡流時のほうが10%付近まで励振され、その後徐々に制振されていく。

さらに、大気泡流時は応答値が上下にばらついているもののボイド率が上がるに従い励振されている。抗力方向の応答に関しては、気泡径の違い、上流側円柱、下流側円柱にかかわらずボイド率に対して単調増加傾向を持つ。また各方向の振動について大気泡流時の振動応答が大きい(表2参照)。PSDに関して、大気泡流時と同じく、その卓越振動数は固有振動数に一致する。特に抗力方向成分については固有振動数の2倍付

図5 $U_r=4.65$ 加速度応答RMS [G]
(上流側円柱・揚力方向)

図6 $U_r=7.60$ 加速度応答RMS [G]
(上流側円柱・揚力方向)

図7 $U_r=2.77$ 上流側円柱・揚力方向のPSD

図8 $U_r=3.69$ 下流側円柱・抗力方向のPSD

近にもう一つ小さなピークも両者に見られ、このピークはボイド率の上昇により固有振動数付近のピークが大きくなり、すそが広がるにつれて小さくなっていく(図8参照)。

(3) $U_r=4.65$ の場合 表1より、応答変化のパターンが一致しているのは U_x のみであり残りの三つ(U_y, D_x, D_y)の振動応答に関してはそれぞれ違ったパターンとなっている。 U_x については大気泡流時、小気泡流時ともに $\alpha=10\%$ 付近まで励振され、それ以降は気泡により制振されていく。また D_x は小気泡流時で単調増加の傾向を示すのに対し、大気泡流時は $\alpha=10\%$ 付近までは励振されるもののそれを超えると気泡により徐々に制振されていく。 U_y, D_y は先に述

べたとおり応答変化のパターンこそ異なるものの振動応答の大きさは気泡の大小によって大きな差は見られていない。PSD は $U_r=3.69$ と同様にして気泡の大小による振動特性に相違はあまり見られない。

(4) $U_r=7.60$ の場合 表1より上流側円柱の各方向の振動応答は小気泡流時に制振効果(ここでの制振効果は単相流時の振動応答値より小さくなることを示す)が発現するのに対し、大気泡流時は U_x で励振後一定、また U_y ではほぼ単相流時の応答に等しい値を示している。逆に下流側円柱では大気泡流時のほうが制振効果がよく見られ(特に揚力方向)、小気泡流時には D_x で励振され、 D_y では無効果となる。

PSD の卓越ピークやその卓越振動数については、大気泡流時と小気泡流時で特に大きな差は見られない。

表1 振動応答パターン

U_r		U_x	U_y	D_x	D_y
2.77	S				
	B				
3.69	S				
	B				
4.65	S				
	B				
7.60	S				
	B				

S : 気泡径小 B : 気泡径大⁽⁷⁾

横軸 : ボイド率 縦軸 : 加速度振動応答

表2 振動応答値の比較

U_r	U_x	U_y	D_x	D_y
2.77	○	○	○	○
3.69	○	○	△	○
4.65	△	○	○	△
7.60	○	○	□	□

○... $\sigma_c < \sigma_s$

△... $\sigma_c \approx \sigma_s$

□... $\sigma_c > \sigma_s$

4・2 励振度マップ 気泡径の振動応答への影響が大きいと判断される揚力方向の振動について、励振度 β を計算し横軸に無次元流速、縦軸にボイド率の励振度マップを作成した。図9と図10に小気泡流時の結果を、図11と図12に大気泡流時の結果をそれぞれ上流側円柱と下流側円柱について示す⁽⁷⁾。

これらの励振度マップを見て次のことがわかる。二円柱系が大きく振動し始める前($U_r < 3.6$)は小気泡流、大気泡流を問わず二円柱系は励振されるが、ボイド率の増加に伴う振動応答の増加の度合は、大気泡流のほうが大きい。ロックイン以後($U_r > 4$)は部分的に励振度 β に差異は見られるものの、マップの性質は似ている。また、気泡径が小さくなると励振度マップは高流速側にシフトする。

以上のことより、気泡径の大きさにかかわらず二円柱系の振動応答の特性は主要において類似していると考えられる。

4・3 位相関係 上流側と下流側の円柱の振動応答のボイド率に対する位相変化を見るために、位相関係の性質がよく現れる揚力方向について図13(a), (b)に $U_r=2.77$ の小気泡流と大気泡流の場合の位相角を、図14(a), (b)に $U_r=3.69$ の小気泡流と大気泡流の場合の位相角を、図15には $U_r=7.60$ の小気泡流の場合の位相角を示す。各図は、注目円柱の卓越振動数における上流側円柱に対する下流側円柱の位相角として評価されている。図14, 15中○印は、上流側円柱の卓越振動数における位相角を示し、□印は下流側円柱の卓越振動数における位相角を示す。また、図16($U_r=2.77, \alpha=26.8\%$)、図17($U_r=7.60, \alpha=6.57\%$)には、上流側と下流側の各円柱の揚力方向と抗力方向の加速度のリサージュを示す。図17中Uは上流側円柱、

図 9 励振度マップ 小気泡流 (上流側円柱・揚力方向)

図 12 励振度マップ 大気泡流 (下流側円柱・揚力方向)

図 10 励振度マップ 小気泡流 (下流側円柱・揚力方向)

(a) $U_r = 2.77$ 小気泡流
ボイド率-位相角

図 11 励振度マップ 大気泡流 (上流側円柱・揚力方向)

(b) $U_r = 2.77$ 大気泡流
ボイド率-位相角

図 13

(a) $U_r=3.69$ 小気泡流
ボイド率-位相角

(b) $U_r=3.69$ 大気泡流
ボイド率-位相角

図 14

図 15 $U_r=7.60$ 小気泡流
ボイド率-位相角

Dは下流側円柱を示す。これらの結果より次のことがわかる。

(1) $U_r=2.77$ の場合 小気泡流時には、位相角とボイド率の間に相関は見られない。また、大気泡流時にはボイド率が17%付近まで位相角は -90° 程度で一定となっている。しかし、ボイド率が17%を超えると小気泡流時の結果と同様に位相角とボイド率の間に相関性はなくなる。位相角がばらついているのは、たくさんの気泡が二円柱系に一樣にランダムに衝突し、不規則な力が加わったためであると考えられ、このことは図16のリサージュ図からも確認できる。

(2) $U_r=3.69$ の場合 小気泡流時での位相角は -90° で一定であるが〔図14(a)〕, 大気泡流時には位相角が次第に遅れていく〔図14(b)〕。

(3) $U_r=7.60$ 気泡が大きいときには、下流側円柱の振動は制振され振動の大きさが異なっていて卓越振動数もずれているのに対して⁽⁷⁾, 気泡が小さいと二円柱振動応答はボイド率3%付近より二つの円柱の

($U_r=2.77, \alpha=26.8\%$)

図 16 リサージュ図形

($U_r=7.60, \alpha=6.57\%$)

図 17 リサージュ図形

振動の大きさが同じになり、2円柱はほぼ同位相で振動するようになる(図15)。生波形からも2円柱はあたかも一体のようになり、振動の大きさが等しく、ほぼ同位相で振動していることがわかる(図17)。

5. 流れの可視化と考察

以上の振動応答の結果より、その特徴的な場合について、2円柱周りの気液二相流の流動パターンを撮影した。それらの結果を図18から図20に示す。各図の無次元流速とボイド率、気泡の大きさを表3にまとめ

U…上流側円柱 D…下流側円柱
(a) 小気泡流 ($U_r=2.77, \alpha=11.07\%$) (b) 大気泡流 ($U_r=2.77, \alpha=9.84\%$)
図18 可視化写真

る。

これらの可視化写真より、気泡の流動状態の概略は、大気泡流、小気泡流とにおいてほぼ同様であり、以下のようなになる。

低流速時：流路内を均等に気泡が分布しながら流れている。

高流速時：2円柱の後流に気泡が集中しながら流れ、円柱外周に付着している。

さて、各流速について詳細に検討すると次のようになる。

(1) $U_r=2.77$ の場合 図18(a)の小気泡流時の写真を見ると低流速時には下流側円柱の後ろに、大気泡流時〔図18(b)〕では見られなかったまっすぐな後流が観察される。この後流は二円柱系がほとんど励振されないボイド率20%付近まで常に観察される。

(2) $U_r=3.69$ の場合 この流速では、小気泡流時に $\alpha=10\%$ 付近まで、下流側円柱の後方にほぼ等間隔で左右交互に気泡群が存在している〔図19(a)〕。図19(b)より大気泡流の場合も気泡群ははく離点付近に存在するが、気泡が流路全体に分布せず円柱の近辺に集中していることに注意する。

(3) $U_r=7.60$ の場合 小気泡流の図20の写真を見ると、大気泡流時と同様に、高流速時には2円柱の間に大量の気泡が集まり、気泡が円柱の外周に付着することにより、はく離点付近の流れを乱す。上流側円柱における制振効果は、小気泡流時に比べると大気泡流時のほうが小さい。これは、大気泡流時には、気泡が円柱に衝突することにより与える励振力の効果が相対的に強くなり、はく離点付近の流れの乱れによる制

U…上流側円柱 D…下流側円柱
(a) 小気泡流 ($U_r=3.69, \alpha=8.56\%$) (b) 大気泡流 ($U_r=3.69, \alpha=10.86\%$)

図19 可視化写真

U…上流側円柱 D…下流側円柱
小気泡流 ($U_r=7.60, \alpha=11.07\%$)

図20 可視化写真

表 3 可視化写真パラメータ

FIGURE NUMBER	U_r	BUBBLE SIZE	α %
18 (a)	2.77	SMALL	11.07
18 (b)	2.77	BIG	9.84
19 (a)	3.69	SMALL	8.56
19 (b)	3.69	BIG	10.86
20	7.60	SMALL	11.07

振効果を上まわるためと考えられる。

6. 結 言

本論文では、ピッチ直径比が1.5の直列二円柱の直交気液二相流中における振動応答特性について、気泡径の違い、ボイド率、無次元流速の三つのパラメータから実験的に明らかにし、以下の結果を得た。

(1) 単相水流時に、二円柱系が大きく振動し始める前の低流速のとき ($U_r < 3.6$) は、円柱の振動応答は気泡の大小にかかわらず上流、下流の円柱ともにボイド率上昇に従って各方向とも増大する。しかし、ボイド率の上昇に伴う振動応答の増加の度合は気泡の大小に依存し、気泡径が小さいほど小さい。

(2) 単相水流時に、円柱からの渦放出がロックイン状態 ($U_r > 4$) になってからは前報⁽⁷⁾で述べたとおり気泡には制振効果と励振効果の両者が起こる。全般的に、気泡の二円柱系の振動に対する影響としては類似しており、気泡による励振メカニズムと制振メカニズ

ムは気泡の大小に関しては差異がないと考えられる。

(3) 励振度マップは気泡径が小さくなると高流速側にシフトする。

(4) 高流速の二相流では、気泡の径が小さいと2円柱と気泡があたかも一体になっているように見え、2円柱間の相関を強める効果が大きく、2円柱が一つの振動体ようになって同相で振動する。

なお、本研究にあたり、日産学術研究助成金と、福田明浩君(昭和63年度、東京理科大学工学部機械工学科卒業生)、星野誠君(同平成元年度4年生)の実験およびデータ整理の補助に深く感謝する。

文 献

- (1) 田中, 機論, 46-408, B(1980), 1398.
- (2) Chen, S. S., *Nucl. Eng. Des.*, 75(1982), 351.
- (3) Paidoussis, M. S., Price, S. J. and Mavriplis, D., A Semi-Potential Flow Theory for the Dynamics of Cylinders in Cross Flow, *Proc. Symp. Flow-Induced Vib.*, ASME, 2(1984), 67-82.
- (4) Zdravkovich, M. M., Classification of Flow-Induced Oscillations of Two Parallel Circular Cylinders in Various Arrangement, *Proc. Sym. Flow-Induced Vib.*, ASME, 2(1984), 1-18.
- (5) Axisa, F., Villard, B., Gibert, R. J., Hestroni, G. and Sundheimer, P., Vibration of Tube Bundles Subjected to Air-Water and Stream-Water Cross Flow Preliminary Results on Fluid-elastic Instability, *Proc. Symp. Flow-Induced Vib.*, ASME, 2(1984), 269-284.
- (6) 飯島・原, 機論, 54-497, C(1988), 80.
- (7) 飯島・原・野島, 56-525, C(1990), 1087.
- (8) Pettigrew, M. J., Tromp, J. H., Taylor, C. E. and Kim, B. S., Vibration of Tube Bundles in Two-Phase Cross-Flow: Part 2-Fluidelastic Instability, *ASME, Symp. FIVN.*, 3(1988), 159-179.
- (9) 中村, 機論, 52-473, C(1986), 252.