

流路内に挿入された円管列の流力振動（続報）

海上安全研究領域 * 村田裕幸、稲坂富士夫、安達雅樹

1. まえがき

原子力プラントの損傷に關与する熱流動現象のうち、流力弾性振動が原因とされる原子炉事故がこれまでに幾つか報告されており [1], [2]、既存軽水炉の供用期間延長とも関連して流力振動現象に關する知見の蓄積が望まれる。本研究は流路内に挿入された円管列体系における流力振動を対象にしており、前報 [3] では流路閉そく比が 0.548 と比較的大きい場合の実験結果について報告した。本報では測定部流路幅を拡大して閉そく比を下げた場合の実験結果について報告する。

2. 実験装置と実験方法

図 1 に流力振動実験装置測定部の概略を示す。測定部の断面は幅: $W = 50\text{mm}$ 、高さ: $H = 200\text{mm}$ の矩形であり、外径: $d = 13.7\text{mm}$ 、内径: $d_i = 9.22\text{mm}$ 、長さ: $L = 190\text{mm}$ のインコネル 600 円管がピッチ 20mm で 5 本、各々の位置で着脱可能な構造となっている。インコネル円管は測定部上壁でボルトにより固定され、下端は自由端となっている。円管の内側壁面には測定部上壁から下向きに 5mm の位置に歪みゲージが貼付されており、円管の受ける抗力方向 (x 方向) 及び揚力方向 (y 方向) の曲げ歪みが計測できるようになっている。本実験

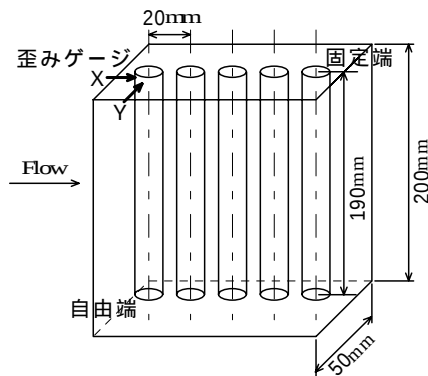


図 1 測定部概略

の流路閉そく比: d/W は 0.274 であり、前報の 2 分の 1 となっている。なお、測定部入口で十分発達した速度分布が得られるよう、測定部上流側には十分な長さ (= 915mm) の助走区間が設けられており、下流側も長さ 565mm に亘って測定部と同一の断面形状が保たれている。本報では、流路内に挿入された円管列について、挿入する円管の本数、間隔: p をパラメータとする流力振動実験を行った。

なお、円管の流力振動挙動を支配するパラメータである換算減衰率: $C_n = 2m\delta/\rho d^2$ (m : 付加質量を含む円管の単位長さ当たり質量、 δ : 空気中における円管の対数減衰率) を打振試験により求めたところ、 $C_n = 4.4$ が得られた。一様流中の単一円管に關する流力振動の評価指針 [4] によれば、本実験では前報と同様、交互渦による揚力方向の流力振動のみが発生することになる。

3. 実験結果及び考察

本実験装置測定部に円管を 1 本挿入した場合の流速と円管先端部の x 方向、y 方向の変動振幅との関係を図 2 に示す。横軸は流路閉そく部の平均流速: U_c と円管の基本固有振動数: f_0 (= 292.8 Hz) から定まる換算流速: $V_r = U_c/f_0 d$ を、縦軸は円管先端部の x 方向、y 方向変位の標準偏差: σ_x , σ_y を示す。なお、円管先端部の変位は前報 [3] と同様、はりの曲げ振動方程式の解を用いて曲げ歪みの測定データから推算した。前報 ($d/W = 0.548$) では $V_r > 2.32$ で円管先端部の y 方向

変動が急増して流力振動が発生したのに対し、本実験（ $d/W=0.274$ ）では実施可能な流速範囲：

$V_r \leq 2.47$ で流力振動は発生しなかった。これより、

流路閉そく比の低下に伴って流力振動発生下限値が増大することが分かる。

本実験では流力振動の発生が確認できなかったので、本実験体系で流力振動が発生する換算流速を公開データから推定することにする。換算流速及びストローハル数： St の定義から次式が成り立つ（但し、 f_s は交互渦の放出周波数）。

$$V_r = \frac{1}{(1-dL/WH) \cdot St} \left(\frac{f_s}{f_0} \right)$$

ここで、 $(1-dL/WH)$ は流路閉塞による効果を表す項であり、交互渦の放出周波数と基本固有振動数との比： f_s/f_0 は本研究では 0.5 となる。円管周りの流れに及ぼす閉そく比の影響を実験的に検討した鈴木ら[5]の結果から、本実験のレイノルズ数範囲： $3 \times 10^4 \leq Re \equiv Ud/\nu \leq 1.4 \times 10^5$ では本実験の閉そく比： $d/H=0.274$ に対して $St = 0.232$ が得られる。これより、本実験で揚力方向の流力振動が発生する換算流速は $V_r = 2.91$ と推

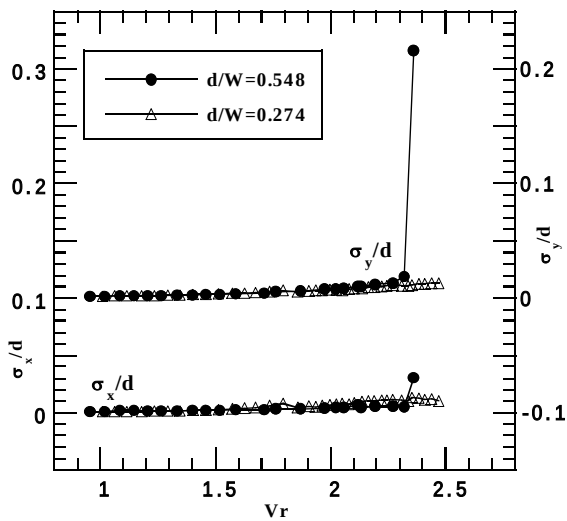


図2 単一管を挿入した場合の変動振幅

定される。

次に、測定部に円管を2本挿入した場合の円管先端部の変動振幅を図3に示す。縦軸は各円管先端部のy方向変位の標準偏差： $\sigma_{y,1}$ 、 $\sigma_{y,2}$ である。

比較のため、単一円管の実験結果を黒マルで示す。上流側円管では、円管間隔： p/d が短い場合には変動振幅が若干大きくなるものの、単一円管の場合との顕著な違いは見出せない。一方、下流側円管では何れの円管間隔においても、変動振幅は換算流速の増加に伴って次第に増大しており、単一円管の結果とは明瞭な違いが認められる。このように、円管間隔によらず下流側円管のみで流力振動が発生するのは、上流側円管の後流による乱れによって下流側円管周りの流れ場が攪乱されるためと考えられる。

一様流中に2本の円管を流れ方向に前後して挿入した場合の流動特性について実験的に検討した岡島[6]は、本実験のレイノルズ数範囲を含む亜臨界域では、円管間隔の狭い $p/d < 2.8$ では2本円管流れは死水領域で継がれた一つの物体周りの流れの挙動を呈しており、下流側円管の抗力係数が負となること、 $p/d \geq 2.8$ では流れが変化し抗力係数及びストローハル数がステップ状に急増することを報告している。本実験は閉そく比が大きいため一様流と見なすことは出来ないが、図3に示す下流側円管の変動振幅は $p/d = 1.46$ とそれ以

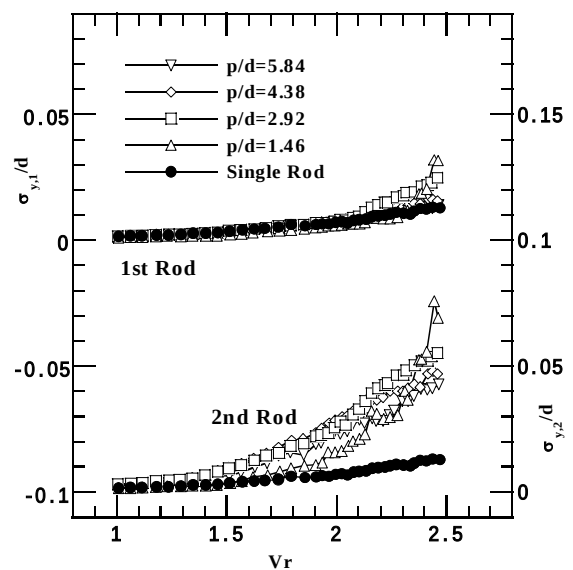


図3 円管を2本挿入した場合の変動振幅

外のケース ($p/d \geq 2.92$) では傾向が若干異なっている。そこで、本実験においても円管間隔による流動挙動の違いがあるか検討する。

図 4 (a) に $p/d = 2.92$, $V_r = 2.46$ における各々の円管先端部のリサージュ曲線を示す。座標原点は流体静止時の各円管の先端部位置を示す。図より、上流側円管先端部が小さく振動していることが分かる。一方、下流側円管は y 方向に顕著な変動を示し、円管先端部が y 方向に 1 周期変化する間に x 方向には 2 周期分変化している。このとき

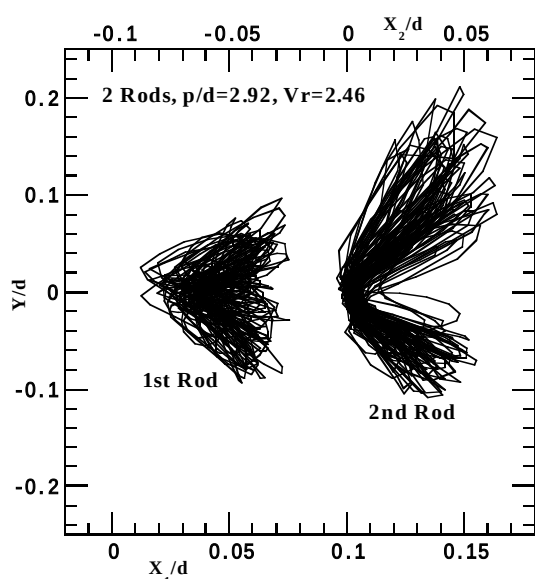


図 4 (a) $p/d = 2.92$ のリサージュ曲線

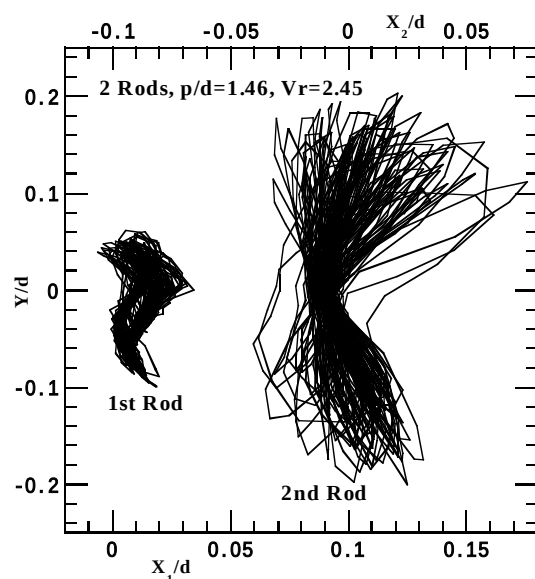


図 4 (b) $p/d = 1.46$ のリサージュ曲線

の x 方向の周波数は円管の基本固有振動数とほぼ等しく、 y 方向の周波数がそのほぼ 2 分の 1 であることが、歪み信号のパワースペクトル密度より明らかとなった。これらの特徴は前報 [3] で報告した流力振動の特徴と同一であり、下流側円管の流力振動が交互渦による揚力方向の振動であることが分かる。また、流れ方向に抗力を受けるため (抗力係数は正) 下流側円管の先端部は静止時位置よりも下流側で振動している。

これに対して $p/d = 1.46$, $V_r = 2.45$ の場合 (図 4 (b) 参照)、下流側円管のリサージュ曲線は図 4 (a) と類似した挙動を示すものの、下流側円管先端部は静止時位置よりも上流側にシフトして振動しており、岡島 [6] が報告した通り、このときの下流側円管の抗力係数は負になっていることが分かる。これより、本実験においても、ある円管間隔を境にした円管周りの流れの急激な変化が起こっていることが分かる。以下では、円管の振動挙動を $p/d = 1.46$ とそれ以外の場合とに分けて検討する。

円管間隔: $p/d = 1.46$ で測定部に円管を 3 本挿入したときの各円管先端部の変動振幅を図 5 に示す。円管を 2 本挿入した場合、下流側 (2 本目) の円管は y 方向に大きく変動したが、挿入本数が 3 本の場合には 2 本目、3 本目円管の変動振幅は単一円管の結果と殆ど変わらず、挿入する円管の

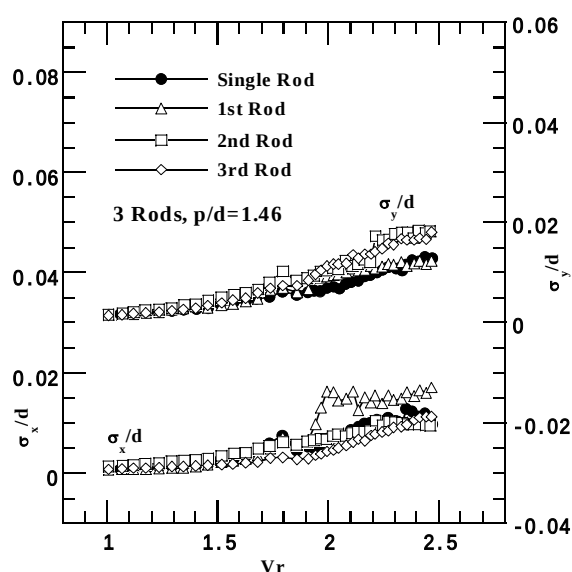


図 5 円管を 3 本挿入した場合の変動振幅 (1)

本数を3本にすると下流側円管の変動振幅が顕著に減少することが分かる。 $p/d=1.46$ のまま、円管の挿入本数をさらに増やした場合の2本目の円管の変動振幅を図6に示す。挿入本数が3本以上の場合には、2本目の円管の変動振幅はx方向、y方向とも殆ど変化しないことが分かる。

一方、 $p/d=2.92$ で測定部に円管を3本挿入した場合(図7参照)、2本目、3本目の円管はy方向に顕著な流力振動を示しており、同一の円管間隔で挿入本数が2本の場合の結果(図3参照)と比べて殆ど違いは認められなかった。これより、

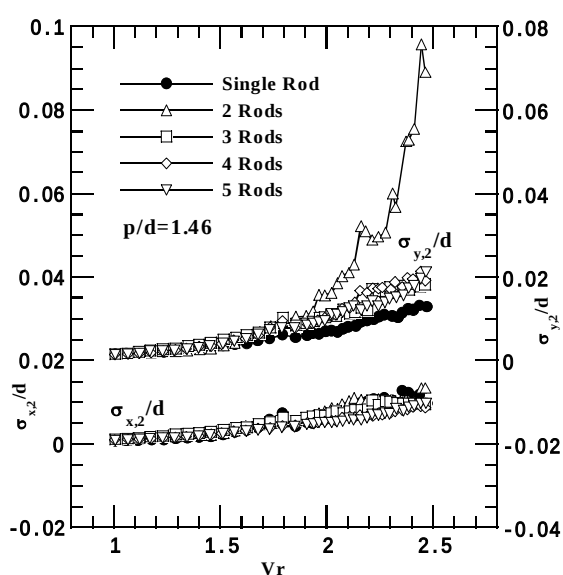


図6 挿入本数による2本目の変動振幅の変化

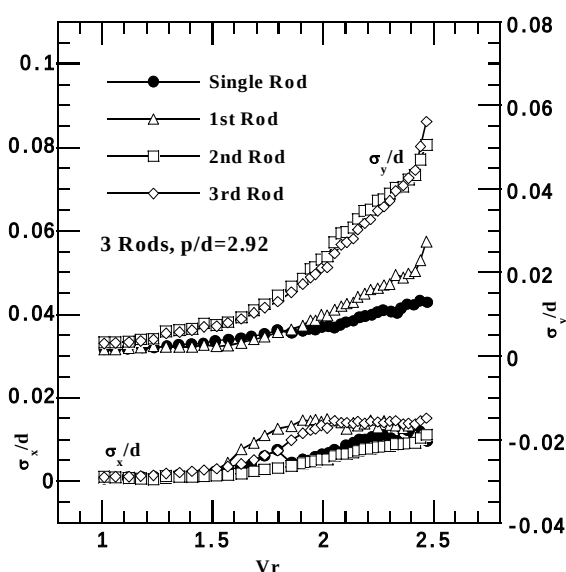


図7 円管を3本挿入した場合の変動振幅(2)

$p/d=2.92$ の場合には円管の挿入本数を2本から3本に増やしても、下流側円管の挙動に殆ど変化はないことが分かる。

4. まとめ

流路幅を前報の2倍にした矩形断面流路にインコネル円管を挿入し、挿入する円管の本数、円管間隔をパラメータとする流力振動実験を行った。測定部に単一円管を挿入した場合、本実験範囲: $V_r \leq 2.47$ では明瞭な流力振動が発生せず、流路閉そく比の低下に伴って流力振動が発生する換算流速下限値が増大することが確認された。また、円管を流れ方向に2本挿入した場合、上流側円管の振動が比較的小さいのに対し、下流側円管では何れの円管間隔でも揚力方向に顕著な流力振動が発生した。円管間隔: $p/d=1.46$ で円管を3本挿入した場合、2本目以降の円管の変動振幅は円管を2本挿入したときの変動振幅に比べて著しく小さくなった。また、挿入する円管の数をさらに増やしても、2本目の円管の変動振幅に殆ど変化はなかった。一方、 $p/d=2.92$ で円管を3本挿入した場合には、2本目以降の円管は揚力方向に顕著な振動を示し、挿入本数の増加が振動挙動に及ぼす影響は認められなかった。

本研究は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁,「関西電力(株)美浜発電所2号機蒸気発生器伝熱管損傷事象について」(平3-11)
- [2] 伊藤ほか10名,「『もんじゅ』ナトリウム漏えい事故に関する技術報告」,原子力学会誌 39-9(1997), pp.704-732
- [3] 村田ほか2名,「流路内に挿入された円柱列の流力振動」,海技研講演集,(2003-6),pp.291-294
- [4] 日本機械学会,「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」(1998)
- [5] 鈴木,平野,「円柱まわりの流れに及ぼす流路幅の影響(臨界付近について)」,機論,44-385(昭53),pp.3044-3051
- [6] 岡島,「高レイノルズ数における直列2円柱まわりの流れ」,機論,44-384(昭53),pp.2663-2671