

流路内に挿入された円管列の流力振動

環境・エネルギー研究領域 次世代動力研究グループ *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関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は1991年の美浜2号PWRでの蒸気発生器伝熱管の破断事故、1995年の高速増殖炉「もんじゅ」での2次系温度計の疲労破壊等これまでに幾つか報告されており、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関する知見の蓄積が望まれる。本研究では流路内に挿入された円管列の体系を対象として流力振動実験を行ったので、その結果について報告する。

2. 実験装置と実験方法

図1に本実験に用いた測定部の概略を示す。測定部の断面は幅： $W=25\text{mm}$ 、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： $p=20\text{mm}$ で5本、各々の位置で着脱可能な構造となっている。このとき、円管による流路の閉そく比： d/W は0.548とかなり大きくなっている。測定部は回流水槽の途中に設置され、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いる。また、下流側も長さ565mmに

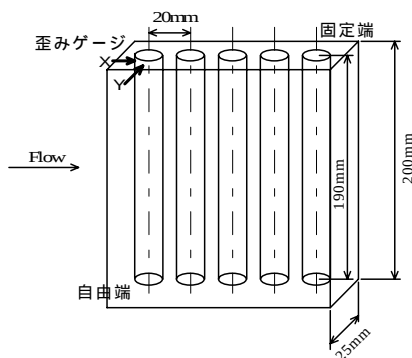


図1 測定部概略

亘って測定部と同一の断面形状が維持されている。インコネル円管は測定部上壁でボルトにより固定されており、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。また、これとは別に、軸方向の4ヶ所に歪みゲージを（x方向に）貼付した円管を用いて予備実験を行い、軸方向の曲げモードを検討した。本研究では、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、ピッチをパラメータとする流力振動実験を行った。なお、歪み、流量、温度等のデータは、流量を所定の値に保持した状態で、高速AD変換器によりサンプリング周波数：2.5（または2）kHzで4秒間収録した。

3. 実験結果及び考察

本実験の測定部に円管を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

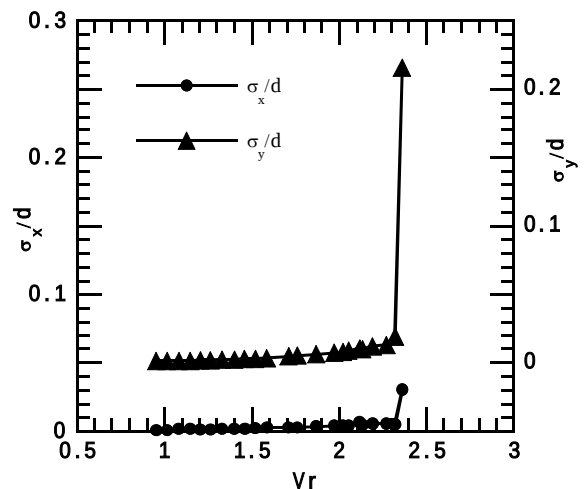


図2 単一円管先端部の変動振幅

速: U_c と円管の基本固有振動数: f_0 から定まる換

算流速: $V_r = U_c / f_0 d$ を、縦軸は歪みデータから

求めた円管先端部の変位の x 方向、 y 方向の標準

偏差: σ_x , σ_y を示す。但し、片持ち梁の式より

本実験では $f_0 = 292.8$ Hz と見積もられる。円管先端部の変位は梁の曲げ振動の方程式の解[1]

$$w(L, t) = \frac{2\varepsilon_m L^2}{d_i \lambda_1^2} [\cosh \lambda_1 - \cos \lambda_1 - K \{ \sinh \lambda_1 - \sin \lambda_1 \}]$$

$$\left/ \left\{ \cosh \frac{\lambda_1 x_m}{L} + \cos \frac{\lambda_1 x_m}{L} - K \left(\sinh \frac{\lambda_1 x_m}{L} + \sin \frac{\lambda_1 x_m}{L} \right) \right\} \right.$$

$$\therefore K \equiv [\cosh \lambda_1 + \cos \lambda_1] / [\sinh \lambda_1 + \sin \lambda_1]$$

に歪みデータ: ε_m を代入して求めた。但し、 x_m は

管軸方向の歪みゲージ貼付位置 (= 5mm) であり、

円管の振動が 1 次の固有モードの場合、 $\lambda_1 =$

1.875 である (円管の振動が 1 次の固有モードであることは予備実験で確認した)。図より、

$V_r \leq 2.32$ のときには円管先端部は殆ど変動しな

いが、 $V_r = 2.36$ では円管先端部の変動が急増し流

力振動が発生すること、 y 方向の増加が顕著であることから、このときの流力振動は揚力方向の振動であることが分かる。なお、流速をそれ以上増加させると、振動によって円管を固定するボルトが計測の途中で緩むため、データの取得を断念した。

図 3 に $V_r = 2.36$ のときの円管先端部位置のリサージュ曲線を示す。リサージュ曲線は扁平な双葉のような形状をしており、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 周期変化す

ることが分かる。抗力方向 (x 方向) の変動周波数が揚力方向 (y 方向) の変動周波数の 2 倍となるのは交互渦の特徴であり、このときの流力振動が円管から放出される交互渦による揚力方向の振動であることが明らかとなった。

図 4 に $V_r = 2.36$ のときの円管先端部の x 方向、 y 方向の変位信号のパワースペクトルを示す。 x 方向の変位信号は 295.7 Hz でピークを示しているが、これは円管の基本固有振動数とほぼ等しい。また、その 2 分の 1 の 147.9 Hz においてもピークを示している。一方、 y 方向の変位信号は 147.9

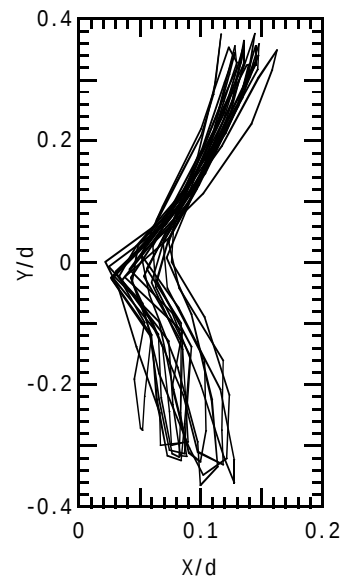


図 3 円管先端部のリサージュ曲線

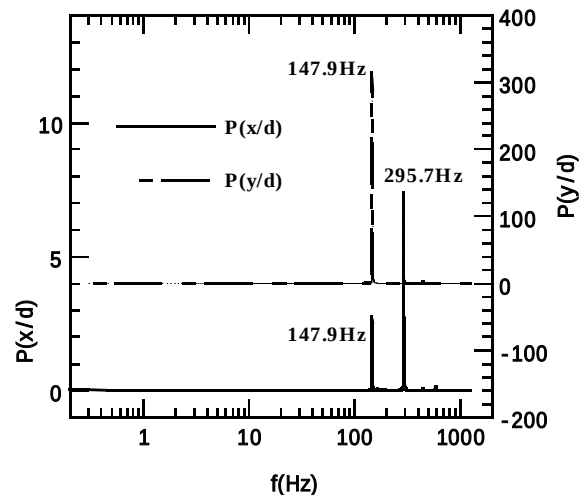


図 4 変位信号のパワースペクトル

Hz でピークを示している。交互渦の放出周波数は y 方向の変動周波数と等しいので、 $V_r = 2.36$ における交互渦の放出周波数は基本固有振動数の 2 分の 1 であることが分かる。

一様流中に挿入された単一円管については、機械学会により流力振動回避のための評価指針[1]が作成されている。一様流中の円管の流力振動は換算流速と換算減衰率： $C_n = 2m\delta/\rho d^2$ (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) とによって整理され、流力振動が発生する領域は、対称渦による抗力方向の振動領域 ($1.25 < V_r < 2.5$, $C_n \leq 2.5$) 交互渦による抗力方向の振動領域 ($2.5 < V_r < 3.8$, $C_n \leq 2.5$) 交互渦による揚力方向の振動領域 ($V_r > 4$, $C_n \leq 64$) の 3 種類に分類される。

本実験結果を一様流中の円管における流力振動と比較するため、一様流中に円管を挿入した岡島らの実験結果[2]のうち、本実験の換算減衰率 (= 5.3) とほぼ等しいケースを図 5 に示す。横軸は換算流速、縦軸は y 方向の変動の標準偏差を示す。一様流中に円管を挿入した岡島らの場合、揚力方

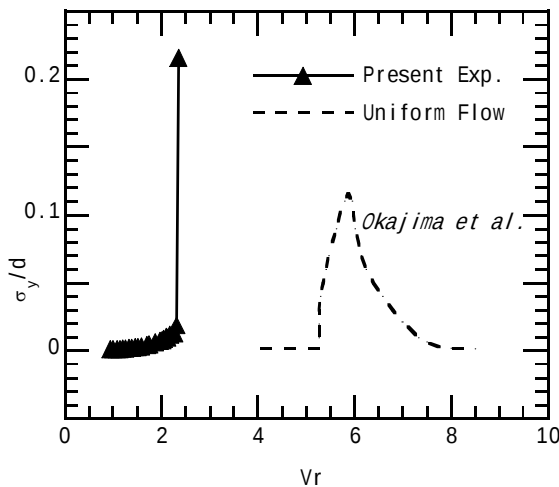


図 5 一様流中の流力振動との比較

向の流力振動は $V_r \geq 5.26$ で発生しており、本実験では一様流中に挿入された場合に比べて遥かに低い換算流速で揚力方向の流力振動が発生していることが分かる。

この原因を検討するため、交互渦の放出周波数と換算流速の係数に注目する。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)。

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

岡島らの実験では、右辺の流路閉塞による効果を表す項: $(1 - dL/WH) = 1$ であり、ストローハル数は 0.19 と報告されている。また、彼らの実験では交互渦の放出周波数は基本固有振動数と等しいので、 $f_s/f_0 = 1$ である。これより流力振動が発生する換算流速は 5.26 となる (図 5 参照)。

一方、本実験では $(1 - dL/WH) = 0.4794$,

$f_s/f_0 = 0.5$ である。本実験ではストローハル数を測定していないので、岡島らの実験値 $St = 0.19$ を用いて流力振動が発生する換算流速を推定すると、5.48 と本実験結果よりもかなり大きな値になってしまう。しかし、円柱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[3]は、ストローハル数が閉そく比の増加に伴って顕著に増大することを報告しており、本実験のレイノルズ数範囲: $4 \times 10^4 \leq Re \equiv Ud/\nu \leq 8 \times 10^4$ では $d/H = 0.51$ のとき $St = 0.36$ としている。本実験において流力振動が発生する換算流速から逆にストローハル数を推定すると、 $St = 0.45$ となる。この値は鈴木らの実験結果とは約 20 パーセントもの差があるが、本実験のストローハル数は一様流中の値に比べると相当大きいものと推察される。以上のことから、本実験で揚力方向の流力振動が発生する換算流速が一様流の場合に比べてかなり低

いのは、交互渦の放出周波数が基本固有振動数ではなく、その2分の1であること、ストローハル数が一様流中の場合に比べて顕著に増大することによると考えられる。

図6に測定部に円管を2本挿入した場合の揚力方向の変動振幅を示す。図中の矢印を付した数字は、各々のケースで流力振動が発生する換算流速を表す。円管ピッチ: $p/d = 5.84$ の場合、流力振動が発生する換算流速は単一管の場合よりも大きい。しかし、 $p/d = 4.38$ では単一管の場合よりも小さい換算流速で流力振動が発生することが分かる。なお、各々の円管先端のリサージュ曲線は、何れのケースも単一管の場合と同様であった。

最後に、測定部に円管を3本以上挿入した場合の結果について述べる。円管ピッチ: $p/d = 2.92$ で挿入する円管を2本から3本に増やしても、流力振動が発生する換算流速に顕著な変化は認められなかった(図省略)。しかし、挿入する円管が

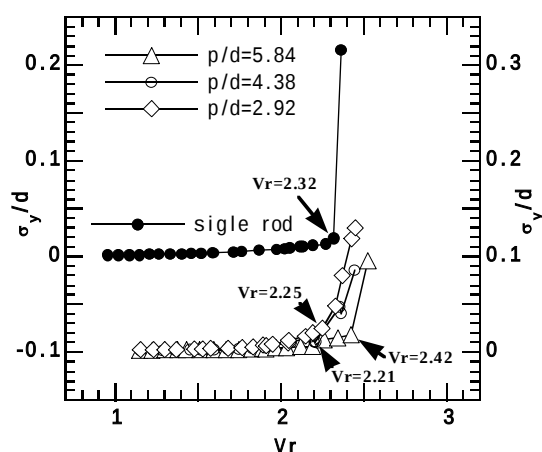


図6 円管を2本挿入した場合の変動振幅

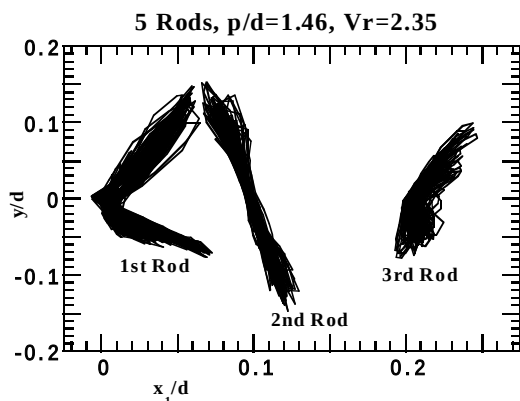


図7 円管が5本の場合のリサージュ曲線

3本以上の場合には、円管先端のリサージュ曲線は全ての円管で同一とはならない。 $p/d = 1.46$ で円管を5本挿入したケースの上流側3本の円管のリサージュ曲線を図7(各々の円管の結果をx方向に0.1ずつずらして表示する)に示す。1番目と3番目の円管のリサージュ曲線は単一管の結果と類似しているが、2番目の円管のリサージュ曲線は単一管の結果とは明らかに違っており、振動様式が他の円管とは異なることが分かる。

4. まとめ

矩形流路中に閉そく比の高い円管を挿入し、挿入する円管の本数、ピッチをパラメータとする流力振動実験を行った。その結果、単一管を挿入した場合には、一様流中に挿入した場合よりもはるかに低い流速で揚力方向の流力振動が発生すること、その時の振動周波数が基本固有振動数の2分の1であることが明らかとなった。また、円管を流れ方向に2本挿入した場合、揚力方向の流力振動が発生する換算流速は $p/d = 5.84$ では単一管の場合よりも若干大きい、 $p/d = 4.38$ では単一管の場合に比べて小さくなることが分かった。さらに、円管を3本以上挿入した場合、流力振動が発生する換算流速は同一ピッチで円管を2本挿入した場合とほぼ同じであるが、円管先端のリサージュ曲線が全ての円管で同一にはなることが分かった。

本実験は円管の閉そく比がかなり高いため、一様流中に挿入された場合の結果とは顕著な違いが認められたが、閉そく比の及ぼす影響については今後も検討することが必要と考えている。なお、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] 日本機械学会, 「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」, JSME S 012 (1998)
- [2] 岡島, 杉谷, 「一様流中で種々な振動方向に振動する円柱」, 九大応力研所報, 第57号(1982), pp. 229-245
- [3] 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)」, 日本機械学会論文集, 第44巻 385号(昭53-9), pp. 3044-3051