

33 複雑流路における脈動流の流動特性

原子力技術部 * 澤田健一、村田裕幸、小林道幸

1. まえがき

近年、周期的変動を伴う流れ中におかれた物体周りの流れが伝熱効率促進の可能性の観点から注目を集めており、工学的な観点からも特に船用炉において自然循環炉心冷却時に船体の動揺に起因する脈動流が伝熱効果に影響を与える可能性が指摘されている¹⁾。脈動流が単一円柱周りの流れに与える影響に関しては、いくつかの研究が行われている^{2), 3)}。しかしながら、実際の原子炉に見られるような熱交換機等においては、流路幅の影響や複数配列された円柱列などにより、より複雑な流れとなっている。工学上の観点からこのような複雑流路において脈動流が渦の生成や伝熱にどのような影響をあたえるかを明らかにすることは重要である。そこで本研究では、複雑流路において脈動流が、伝熱効果にも強い関係があると思われる渦の生成にどのような影響を及ぼすかを明らかにするために、二次元チャンネル流路中に等間隔に円柱を配列し、特にレイノルズ数が低い領域における脈動流の振幅や周波数の影響を明らかにした。

2. 実験装置および方法

実験は、回流式の脈動流実験装置を用いて行われた(図1)。装置は主に観測部と観測部上流に設置された脈動流発生装置、および一定流量で流れ(動作流体: 水)を循環させるためのポンプからなる。脈動流発生装置には、スコッチ・ヨーク機構を採用した。これによってモーターの回転をピストンの往復運動に変換し、定常流に周期的な変動を添加することで次式で表されるような脈動流を発生させた。

$$U = U_1 + U_2 \sin(2\pi t/T)$$

ただし、 U : 断面平均流速、 U_1 : 時間平均流速、 U_2 : 速度変動成分、 t : 時間、 T : 脈動周期である。

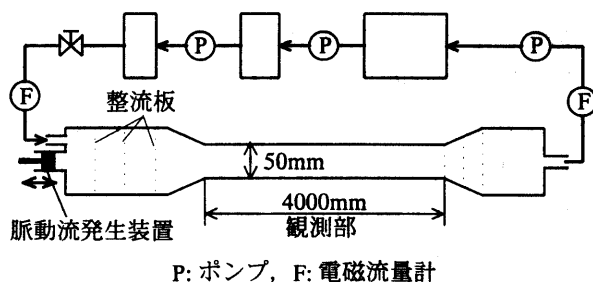


図1. 実験装置概略図

測定部は、断面が幅 400mm×高さ 50mm の二次元チャンネル流路である。またチャンネルの長さは十分に発達した流れ場を観測するために 4000mm とした。観測部には、円柱(直径 $d=15.4\text{mm}$) が流路高さ中心・等間隔に、観測部全体にわたって流れに直行するように配置されている(図2)。座標系は、任意の円柱中心を原点とし、流れ方向を x 軸、垂直下向きを y 軸とした。観測部側面および上面は可視化のために透明なアクリル板を使用している。

流れ場の可視化及び速度場の計測には、3時刻パターンマッチング・アルゴリズムを用いた二次元 PTV (Particle Tracking Velocimetry: 粒子追跡流速計) を採用した。トレーサとしては、微量のナイロン 12 粒子(直径 $30\mu\text{m}$ 、比重 1.02) を水中に混濁した。ナイロン 12 粒子は非常に小さいため流れの追従性に問題はなく、沈降速度も 10^{-2}mm/s のオーダーであるため、実験の行われた断面平均流速と比較して 1% 以下であり、無視できるほど小さい。このトレーサを、測定部上方より厚さ約 3mm のスリット光源によって照射し、

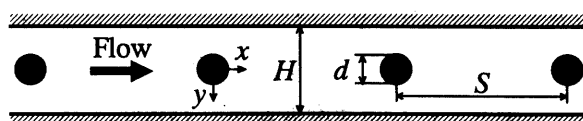


図2. 観測部概略(側面図)

観測部側面よりCCDカメラ（NTSC、白黒）によって撮影することで流れ場の可視化を行った。また、撮影した映像は、パソコンへ送られPTVによって画像処理を行うことで速度場を求めた。流速の測定精度は $\pm 1\text{mm/s}$ 以下である。撮影は、十分に発達した流れを観察するために流路入り口から2.5m程度下流で行った。

実験は、レイノルズ数 $Re=160$ で行った。ただし、代表速度は時間平均流速 U_1 、代表長さは円柱直径 d である。断面平均流速と温度は、観測部の入り口および出口に設置された電磁流量計と白金線温度計によって測定した。測定精度はそれぞれ $0.02\text{m}^3/\text{h}$ と 0.1K である。

3. 実験結果

3. 1 定常流

はじめに、定常流において円柱ピッチを $S/d=3.25, 6.5, 13.0$ と変化させたときの影響を考える。図3(a)~(c)は、それぞれの円柱ピッチにおける y 方向速度変動 u_y を示している。速度変動の測定点は特に断らない限り $x/d=1.7, y/d=0$ である。また、データのサンプリング周波数は 3.7Hz でありカルマン渦の放出周波数に比べて十分に短い。い

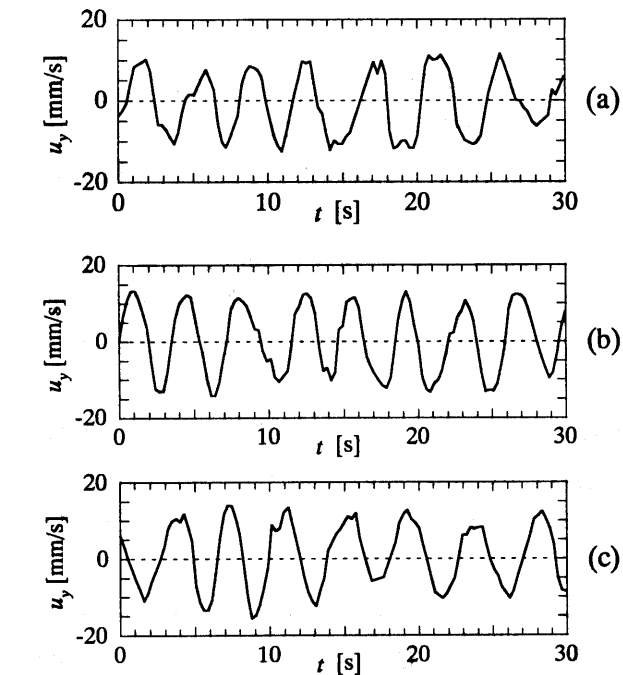


図3. y 方向速度変動 u_y . (a) $S/d=3.25$, (b) $S/d=6.5$, (c) $S/d=13.0$

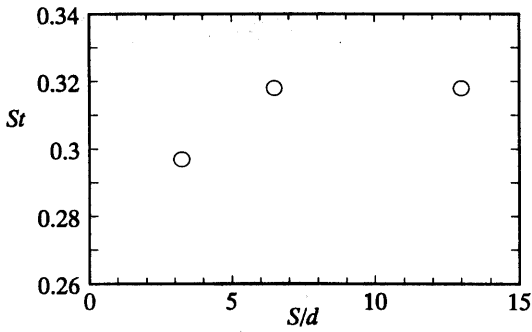


図4. ストローハル数の変化

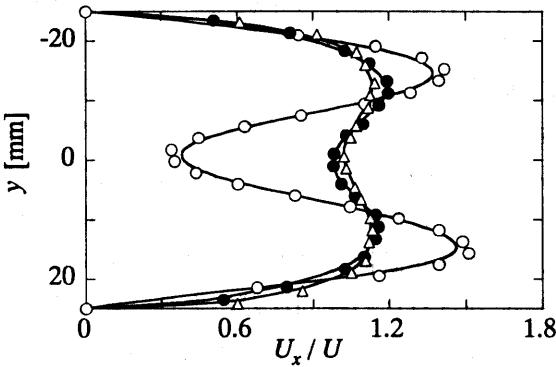


図5. x 方向平均速度分布 U_x ; $\circ: S/d=3.25$, $\bullet: S/d=6.5$, $\triangle: S/d=13.0$

ずれの円柱ピッチにおいても円柱上下面からの周期的なカルマン渦の発生を示す正弦波状の波形が観察できる。図4は、カルマン渦の放出周波数を基にしたストローハル数 St の変化を示したものである。カルマン渦の放出周波数は、可視化映像より通過するカルマン渦の数と時間を測定することで求めた。ストローハル数の値は円柱ピッチが6.5と13.0の間では有意な差異はなく、 $St \approx 0.32$ である。しかし、円柱ピッチが $S/d=3.25$ になると、ストローハル数は $S/d>6.5$ に比べて小さくなり $St \approx 0.3$ となる。これは、円柱ピッチが短くなると、上流側の円柱により発生した速度欠損が十分に回復しないうちに次の円柱に到達してしまうためと考えられる。図5に、 $S/d=3.25, 6.5, 13.0$ での円柱への接近流 ($x/d=-1.2$) の x 方向平均速度分布 U_x を示す。ただし横軸は断面平均流速 U で無次元化している。これより、 $S/d=3.25$ では、接近流の速度欠損が $S/d=6.5, 13.0$ に比べて著しく大きいことがわかる。

また、円柱ピッチにかかわらずストローハル数

が、一様流中における円柱からのカルマン渦放出のストローハル数 ($St \approx 0.2$) と比較して明らかに大きい、これは流路のブロックage比 d/H が 0.308 と非常に大きいことと⁴⁾、また接近流が一様流ではないことなどが原因であると考えられる。

3. 2 脈動流

脈動流に関しては、定常流において明確な差異が認められた $S/d=3.25$ および $S/d=6.5$ に関して、それぞれ脈動振幅および脈動周期を変化させたときの結果を示す。脈動振幅および脈動周期をあらわす無次元数として、それぞれ脈動のレイノルズ数 $\Delta Re = U_2 d / \nu$ 、脈動のストローハル数 $St^* = d / U_1 T$

を定義する。今回は、 $\Delta Re=30, 95$ および $St^*=0.08, 0.12, 0.25$ のケースについて考察する。

まず、脈動振幅が比較的小さい $\Delta Re=30$ のときについて考える。図 6 および図 7 に、それぞれ $S/d=3.25, 6.5$ における y 方向速度変動 u_y を示す。いずれのケースにおいても速度波形は定常流時と同様に正弦波状の変動をしており、脈動による明確な影響はみられない。また、それぞれのケースにおいてストローハル数を求めたところ、脈動周期によらず定常流時のストローハル数と一致した。

次に、脈動振幅が比較的大きい $\Delta Re=95$ の場合について考える。図 8 および図 9 は、それぞれ $S/d=3.25, 6.5$ において、脈動周期を $St^*=0.08, 0.12, 0.25$ と変化させたときの y 方向速度変動 u_y である。横軸は脈動周期で無次元化した時間であり、 $t/T=0$ を脈動振幅の下死点と一致させている。いずれのケースにおいても $\Delta Re=30$ の場合と異なり、明らかに脈動の影響がみられる。脈動周期が、定常流時のカルマン渦放出周期 ($\approx 3.8\text{sec}$) に比べて比較的に長いときには ($St^*=0.08, T=15\text{sec}$)、 $S/d=3.25, 6.5$ ともに流れの脈動に伴って y 方向速度変動の振幅・周期が変化している。脈動振幅は、流れ場が加速フェーズの時に小さくなり、減速フェーズの時には逆に大きくなっている。しかしながら、ストローハル数に関しては定常流時と一致しており、カルマン渦の放出周期はレイノルズ数 (流速) の変化に対して準静的に変化するという。 $St^*=0.12$ ($T=10\text{sec}$) になると、 $S/d=3.25$ においては若干周期性が乱れているが、 $St^*=0.08$ と同様の傾向を示している。一方、 $S/d=6.5$ では減速フェーズ時に速度変動の振幅が大きくなる傾向は同じであるが、常に脈動の 1 周期中に 2 対のカルマン渦が発生しており、脈動周期にカルマン渦の放出周期が支配されていることがわかる。脈動周期が定常流時のカルマン渦放出周期に近い $St^*=0.24$ ($T=5\text{sec}$) になると、 $S/d=3.25, 6.5$ ともに、流れの脈動の 1 周期中に 1 対のカルマン渦が放出されており、脈動周期とカルマン渦の放出周期が完全に一致している。なお、カルマン渦の放出周期が $St^*=0.08$ の時のような状態から、脈動周期に同期するまでの移行過程については今後さらに詳細な検討が必要である。

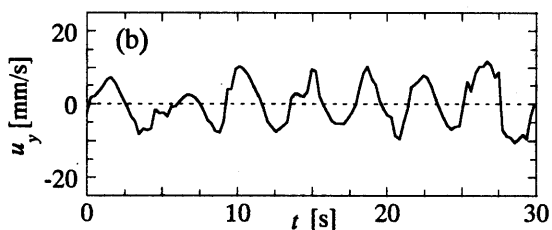
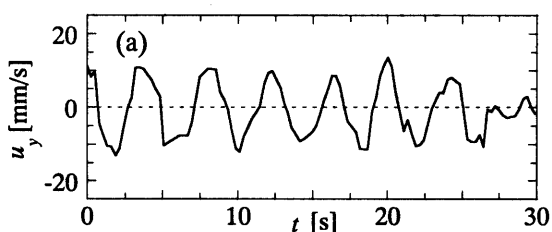


図 6. y 方向速度変動 u_y , $S/d=3.25$, $\Delta Re=30$
(a) $St^*=0.08$, (b) $St^*=0.25$

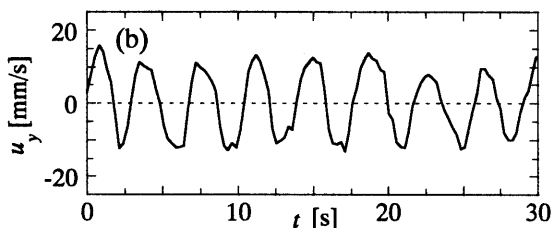
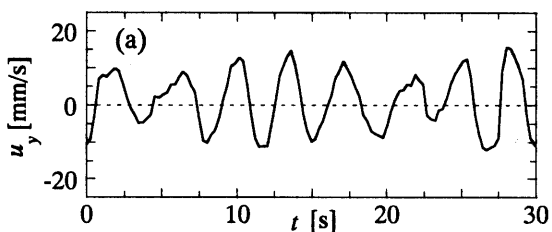


図 7. y 方向速度変動 u_y , $S/d=6.5$, $\Delta Re=30$
(a) $St^*=0.08$, (b) $St^*=0.25$

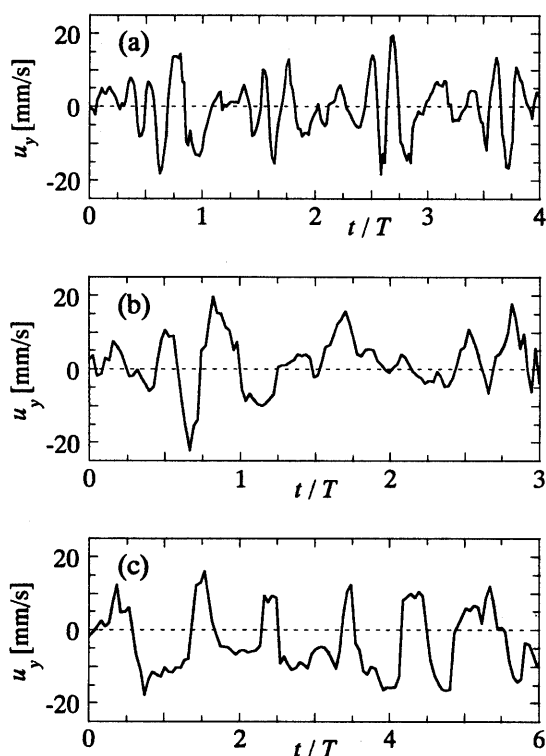


図 8. y 方向速度変動 u_y , $S/d=3.25$, $\Delta Re=95$
(a) $St^*=0.08$, (b) $St^*=0.12$, (c) $St^*=0.25$

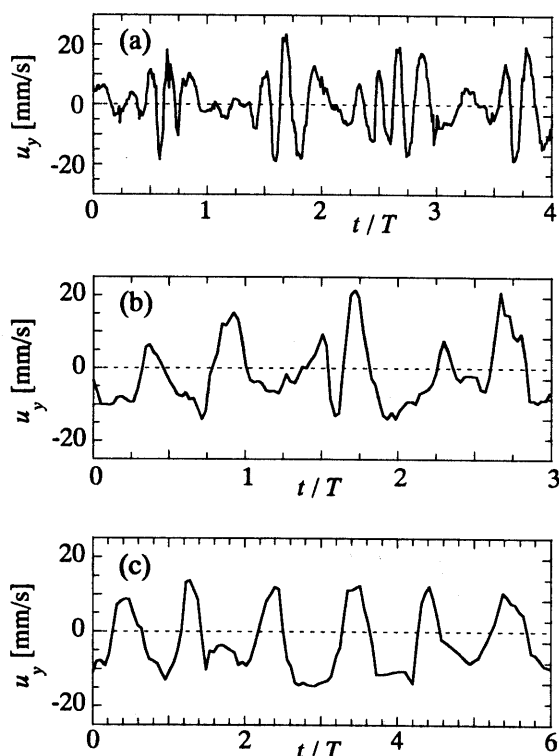


図 9. y 方向速度変動 u_y , $S/d=6.5$, $\Delta Re=95$
(a) $St^*=0.08$, (b) $St^*=0.12$, (c) $St^*=0.25$

4. まとめ

円柱ピッチ、脈動振幅、脈動周期などのパラメータを変化させることで、円柱列を過ぎる脈動流の流動特性を実験的に明らかにした。主な結果は以下の通りである。

- (1) 定常流 ($Re=160$) では、実験を行った $S/d=3.25 \sim 13.0$ で周期的なカルマン渦の放出が確認できた。 $S/d=6.5 \sim 13.0$ ではカルマン渦放出のストローハル数に大きな変化はないが、 $S/d=3.25$ になると上流側の円柱により発生した速度欠損が十分に回復しないため、ストローハル数は大きく減少する。
- (2) 脈動流において、脈動振幅が $\Delta Re=30$ と比較的に小さいときには、脈動振幅・円柱ピッチによらずカルマン渦の放出特性に変化はみられず非常に周期的であり、ストローハル数は定常流時のそれと一致する。
- (3) 脈動振幅が $\Delta Re=95$ になると、カルマン渦の放出は流れの脈動に大きく影響される。脈動周期が定常流時のカルマン渦放出周期に比べて長いときには、ストローハル数はそれぞれの円柱ピッチにおける定常流時の値と一致する。しかし、速度変

動の振幅は一定でなく、脈動の加速時に小さく、減速時に大きくなる。脈動周期が定常流時のカルマン渦放出周期に近づくと、円柱ピッチに関係なくカルマン渦の放出周期と脈動周期は完全に一致する。この同期に至るまでの移行過程については今後詳細な検討が必要である。

参考文献

- 1) Murata, H. *et al.*, M., Nucl Eng. Des., 118, 1990, pp.141-154
- 2) Barbi, C. *et al.*, J. Fluid Mech., Vol.170, 1986, pp.527-544.
- 3) 石井、その他, 京都大学大学院修士論文, 1996
- 4) 桧和田、その他, 日本機械学会論文集, 42 巻 360 号, 1976, pp.2481-2491