3 2 9 角柱列を挿入した脈動流の P T V による可視化

村田裕幸* (船研), 澤田健一 (船研), 小林道幸 (船研)

Flow Visualization of Pulsating Flow Obstructed by an Array of Square Rods with PTV

Hiroyuki Murata, Ken-ichi Sawada and Michiyuki Kobayashi

ABSTRACT

A series of flow visualization experiments of pulsating flow obstructed by an array of square rods was carried out to investigate its flow characteristics. In the experiments, the Reynolds number, pulsating period, amplitude and pitch of rod arrangement were varied at several values. In order to investigate the flow quantitatively, PTV method was applied. When the pulsation is absent and the pitch ranges from 2 to 4, it is observed that Karman vortices shed regularly from each rod, and the Strouhal number is about 0.3. When the pulsating period is relatively long compared with the shedding period and its amplitude is large, flow acceleration stabilizes the flow. On the other hand, the flow deceleration destabilizes the flow and Karman vortices break down. When the pulsating period is shorter than shedding period and its amplitude is large, the flow pulsation controls the generation and breakdown of the Karman vortices.

Keywords: PTV, pulsating flow, square rods

1. 緒 言

船舶用原子炉が自然循環により炉心冷却を行う場合、横揺れ等の船体運動を受けると一次冷却水流は脈動流となって時間的に変動する¹⁾ことが知られている。受動安全性の概念を取り入れた次世代型船用炉²⁾では、事故時の炉心冷却を静的機器と炉内冷却水の自然循環だけで行うことが要求されるため、脈動流の及ぼす影響を明らかにすることは次世代型船用炉の安全性評価にとって重要である。

本研究は、次世代型船用炉の蒸気発生器のような複雑流路における脈動流の熱水力挙動を明らかにすることを目的として行っているものである。今回、二次元チャンネルに角柱列を周期的に挿入した系における脈動流を対象として流れの可視化実験を実施したので、その結果について報告する。

2. 実験装置及び実験方法

Fig. 1 に本実験に使用した脈動流実験装置の概略を示す。本装置は、可変ピストン方式の脈動流発生装置^{3)~5)}を上流端に接続した回流式流水槽である。脈動流発生装置はシリンダー及びピストンから構成され、スコッチ・ヨーク機構を介して駆動モーターの回転がピストンの往復運動に変換される構造となっている。

実験装置本体には貯水タンクから一定流量: Q_1 が流入するが、脈動流発生装置からの流入流量はシリンダー容積の変化に応じて増減する。その結果、測定部の流量: Q は次式に示すような脈動流となる。

$$Q = Q_1 + Q_2 \sin \omega t \quad \cdots (1)$$

脈動振幅: Q_2 及び脈動周期: $\tau = 2\pi / \omega$ はピストンのストローク及び駆動モーターの回転数を変化させることによって、 $Q_2 = 0 \sim 1.5 [\text{m}^3/\text{h}]$, $\tau = 2.5 \sim 15 [\text{sec}]$ の範囲で任意に設定することが出来る。

Fig. 1 Test Apparatus

Fig. 2 に測定部の概略を示す。測定部はスパン方向の 2 次元性が確保されるよう、断面寸法を高さ: $H = 5 [\text{cm}]$, 幅: $W = 40 [\text{cm}]$ とし、流れが発達するのに十分な長さ ($= 4 [\text{m}]$) をとっている。また、両側壁及び上壁が透明壁となっている。測定部には、アクリル製の正方形角柱 ($d = 15 [\text{mm}]$) が流路高さの中心面上に流れ

に直行して配置されている。角柱は4種類の配列ピッチ: L/H で測定部全体にわたって配置されるが、いずれの場合でも最も上流の角柱は測定部入口から5 [cm] 下流に位置する。

Fig. 2 Test Section

脈動流発生装置による脈動波形は、 $\tau=2.49$ [sec]の場合にはほぼ正弦波状に変動している。しかし、脈動周期が長くなり $\tau=9.95$ [sec] となると、脈動波形には高調波成分が含まれるようになり、 $\tau=14.82$ [sec] のときこの傾向は一層顕著となる。これは、脈動流発生装置では脈動周期が長くなりピストンの移動速度が低下すると、ピストンの移動が次第に滑らかでなくなることによる。すなわち、本方式ではピストン変位の時間微分が流量変動となるため、ピストン変位が滑らかでなくなると、流量波形に高調波成分が含まれるようになる。なお、ピストン変位と流量変動の位相は脈動周期によって若干変化している。

本実験では、実験装置の循環水に界面活性剤を添加したナイロン12粒子（商品名：オルガソール，粒径：30ミクロン，比重：1.02）をごく微量懸濁させ、測定部の上壁からストロボ・スリット光を照射して流れ場の観察を行った。さらに、CCDカメラで撮影した可視化画像を3時刻パターン・マッチング法を用いたPTV装置（nexus社製PTV）によって画像処理した。なお、PTVの画像は各々のケースについて、ピストンが上死点及び下死点に達した瞬間から1/15秒間隔で6時刻収録し、ベクトル線図を求めた。ナイロン粒子は十分小さく、その比重も水と殆ど等しいため、流れの追随性に問題はない（静止した水中におけるナイロン粒子の沈降速度の実測値は 10^{-3} [cm/sec]のオーダーであり、流れ場の流速（ ~ 1 [cm/sec]）に比べて無視できるほど小さい）。なお、流れが十分発達した状態で流れ場を観察するため、いずれの場合でも撮影は測定部入口から2.2～2.85 [m] 下流で行った。また、測定部における流量・温度は、入口・出口配管中に設置した電磁流量計及び白金線温度計により測定した。

Table 1 Test Conditions

Re	1000, 2000
Q_2/Q_1	0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.75
τ [sec]	2.5, 5.0, 7.5, 10, 15
L/H	1.0, 2.0, 3.0, 4.0

本実験では、脈動流の流動特性を明らかにするため、①流路レイノルズ数、②脈動振幅、③脈動周期、④角

柱の配列ピッチを変化させて測定を行った。実験条件をTable 1に示す。但し、測定後に電磁流量計の信号変換回路の増幅率及び位相遅れの補正を行ったため、実際の脈動振幅は脈動周期が短い場合ほど公称値よりも大きくなっている。

3. 実験結果と考察

脈動流の検討に先立って、まず脈動がない場合の流れ場の観察を行った。その結果、角柱列が周期的に挿入された二次元チャンネルでは、 $L/H=2.0, 3.0, 4.0$ の場合には、各々の角柱からはカルマン渦がほぼ一定の周期で角柱の上下から交互に放出されることが分かった。これは、筆者らが本実験と同一の体系について行った、二次元非定常の数値解析結果⁶⁾と一致している。

Fig. 3(a) Velocity Vectors ($L/H=2.0$, $Q_2/Q_1=0$)

Fig. 3(b) Velocity Vectors ($L/H=1.0$, $Q_2/Q_1=0$)

Fig. 3 (a)に $L/H=2.0$, $Re=998$ の場合の定常流をPTVにより画像処理した例を示す。この図は連続した6時刻の可視化画像から求めたベクトル線図を重ねて表示している。図は、角柱上面から放出された時計方向

回転の渦が下流に移動した後に、角柱下面から角柱の背面に回り込む反時計方向回転の流れが次第に発達する様子を示している。一方、 $L/H=1.0$ の場合には、角柱間距離が短いため、角柱上側あるいは下側の主流部から角柱背後に回り込む流れが減少する結果、カルマン渦は角柱から周期的に放出されなくなり、流れは不安定となった (Fig. 3 (b) 参照)。図では、角柱後流域の流速が非常に小さく、淀み領域となっている様子を示している。

Fig. 4 に定常流におけるストローハル数と配列ピッチとの関係を示す。図より、 $Re=1,000$ の場合、 $L/H=2.0 \sim 4.0$ のストローハル数は $0.31 \sim 0.33$ となっていることが分かる。なお、ストローハル数は $Re=1,000$ の場合、配列ピッチの増加に伴って増大するのに対し、 $Re=2,000$ の場合には配列ピッチの増加に伴い減少しているが、データの分散 ($L/H=2.0$ で $\pm 3\%$, $L/H=3.0$ で $\pm 5\%$, $L/H=4.0$ で $\pm 10\%$ 程度) を考慮すると、この傾向は明瞭ではない。しかし、同一ピッチのストローハル数がレイノルズ数の増加に伴って減少する傾向はデータの分散よりも大きく、その変化は有意である。

Fig. 4 Change of Strouhal Number

西村ら⁷⁾は、脈動周期がカルマン渦放出周期よりも1桁大きい、比較的周期の長い脈動流中に置かれた単一角柱 ($d/H=0.05$, $Re=1,000$, $Q_2/Q_1=0.1 \sim 0.75$) の数値解析を行い、角柱からの渦放出様式は脈動振幅がかなり大きい場合、脈動接近流のレイノルズ数変化に対して準静的に変化せず、流れの加速、減速は角柱近傍の流れの安定化、不安定化に影響すること、脈動流の加速時には角柱背後の流れの y 方向動揺が小さくなって角柱後流を安定化させ、逆に減速時には y 方向動揺が大きくなって角柱後流を不安定化させることを報告している。

本実験の場合、脈動周期はカルマン渦放出周期の $0.6 \sim 0.7$ 倍程度と、西村らの場合と比較すると脈動周期が相対的に短くなっている。そこで、本稿では、脈動周期がカルマン渦放出周期に比較してかなり長い場合と、カルマン渦放出周期に比べて短い場合とに注目し、

脈動流の及ぼす効果を検討することにする。

① 脈動周期が長い場合

この場合、脈動流の加速・減速位相の持続時間がカルマン渦放出周期に比較して長いため、西村らの流れに比較的近い。Fig. 5 に脈動振幅が大きい、 $L/H=2.0$, $Re=1,012$, $Q_2/Q_1=0.88$, $\tau=14.87[\text{sec}]$ の場合のベクトル線図を示す。この場合、西村らが指摘したような脈動流の効果が顕著であり、脈動流の加速時には角柱後流が安定化してカルマン渦が放出され、減速時には角柱後流が不安定化する結果、カルマン渦が上流方向に逆流し、相互の位置関係が崩れて双子渦のようになり、最後には渦が殆ど消失する様子が観察された。一方、脈動振幅の小さい場合には脈動流の加速・減速による効果は顕著ではなく、減速位相において僅かに y 方向の動揺が大きくなったのみで、流れは定常流と殆ど差がなかった。

Fig. 5 (a) Velocity Vectors ($\tau=14.87[\text{sec}]$, $Q_2/Q_1=0.88$, accelerated)

Fig. 5 (b) Velocity Vectors ($\tau=14.87[\text{sec}]$, $Q_2/Q_1=0.88$, decelerated)

②脈動周期が短い場合

この場合には、カルマン渦放出周期よりも短い脈動流の速度変動が角柱後流に作用するため、脈動振幅が大きい場合、加速位相でカルマン渦列が十分形成されないまま減速位相に入ってしまう、加速時にいったん形成された流れ場が減速時の流れの不安定化作用によって崩壊してしまい、カルマン渦の形成・崩壊が脈動周期と同一の周期で繰り返される流れとなった。Fig. 6に $L/H=2.0$, $Re=1,012$, $Q_2/Q_1=0.91$, $\tau=2.49[\text{sec}]$ の場合のベクトル線図を示す。図より、加速位相で角柱背面下部に時計方向回転の渦が形成され、減速位相で渦が不安定化して双子渦のようにになっているのが分かる。本実験で脈動振幅が最も小さい場合 ($L/H=2.0$, $Re=1,010$, $Q_2/Q_1=0.43$, $\tau=2.49[\text{sec}]$) にもこの図とほぼ同様の流れとなった。

Fig. 6 (a) Velocity Vectors ($\tau=2.49[\text{sec}]$, $Q_2/Q_1=0.91$, accelerated)

Fig. 6 (b) Velocity Vectors ($\tau=2.49[\text{sec}]$, $Q_2/Q_1=0.91$, decelerated)

4. 結 論

角柱が周期的に挿入された脈動流の流動特性を検討するため、流れの可視化実験を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

①脈動がない場合、 $L/H=2.0\sim4.0$ では各々の角柱からはカルマン渦がほぼ一定周期で放出され、そのストローハル数は約0.3である。また、流路レイノルズ数の増大により、ストローハル数は減少する。一方、 $L/H=1.0$ の場合には、カルマン渦が周期的に放出されない、不安定な流れとなる。

②脈動周期がカルマン渦放出周期よりもかなり長い場合、脈動振幅が大きいと、西村らが指摘したように加速時には角柱後流が安定化し、減速時には不安定化する。しかし、脈動振幅が小さくなると、定常流との顕著な差は見いだせない。

③脈動周期がカルマン渦放出周期よりも短い場合、脈動振幅が大きいと、脈動流の加速・減速によってカルマン渦が形成・崩壊する脈動流支配の流れとなった。

本稿では、脈動流の及ぼす影響について、脈動周期がかなり長い場合と短い場合とに注目して検討を行ったが、それ以外の場合、流れの様相はさらに複雑となる。また、カルマン渦発生周期と脈動周期とは一致していないので、流れ場の様相は脈動流の位相が同一であっても周期ごとに変化する。このため、脈動流の特徴をさらに詳細に検討するには、画像データを長時間にわたって収録し、統計的にデータを解析する必要がある、今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) H. Murata, I. Iyori, and M. Kobayashi, "Natural Circulation Characteristics of a Marine Reactor in Rolling Motion", *Nuclear Engineering and Design*, 118, (1990), pp.141-154
- 2) 日本原子力研究所, 「原子力船研究開発の現状(1995)」, p. 51
- 3) 井口学, 近江宗一, 田中滋, 「円管内脈動流れの乱れに関する実験的研究」, *日本機械学会論文集*, 51-464 B, (1985), pp. 1139-1146
- 4) 角田勝, 須藤浩三, 「く形断面曲り管内の脈動流」, *日本機械学会論文集*, 53-486 B, (1987), pp. 341-348
- 5) 中村稔, 鈴木学, 石野洋二郎, 竹内重男, 大岩紀生, 山口誉起, 「管内脈動流の流動および伝熱特性」, *日本機械学会講演論文集*, No.922-1 (1992-9), pp. 163-165
- 6) H. Murata, K. Suzuki, and M. Kobayashi, "A Numerical Investigation of Flow in a Channel obstructed by an Array of Square Rods", *Proceedings of 3rd KSME/JSME Thermal Engineering Conference*, Oct. 1996, Kyongju, Korea, I-31
- 7) 西村俊彦, 石井淳治, 鈴木健二郎, 「脈動流中の角柱周りの流動及び伝熱特性に関する数値解析」, 第31回日本伝熱シンポジウム, (1994-5), pp. 496-498