10 平行平板流路内に設置された 円柱周辺の流れ

原 研 秋野 詔夫、功刀 資彰[○]、高瀬 和之、岡本 芳三
山梨大工 一宮 浩市

OBSERVATION OF FLOW AROUND A VERTICAL CYLINDER IN A PARALLEL CHANNEL

Norio AKINO^{*}, Tomoaki KUNUGI^{*}, Kazuyuki TAKASE^{*}, Yoshizo OKAMOTO^{*}, Koichi ICHIMIYA^{**}

Three dimensional flow around a cylinder settled vertically between walls in a parallel channel was studied using pearl pigment as flow visualization additive in water flow. Horseshoe vortex around the cylinder was observed, and a new periodical vortex system was found at high Reynolds number. Downstream the cylinder, alternating vortexes were found, but this vortex shedding Reynolds number was higher by 2 decades than well-known Karman vortex.

1. まえがき

原子炉燃料要素は、出力密度が大きいため多数の棒や板等で構成されており、それらの間にスパーサリブ等の突起物を取り付けて、冷却材流路を所定の寸法に保持する構造となっている。このような突起物は伝熱を促進する一方、ホットスポットの発生、圧力損失の増大及び流体振動の原因となる可能性があるため、原子炉の熱構造設計を行う上で十分な検討が必要である。

Photo.1 は、突起物周辺の温度分布を知る目的で、平行平板流路（幅 230mm，高さ H 10mm）中央に円柱（直径，高さ共に 10mm）を取り付け感温液晶により可視化した例である。¹⁾ 上よりレイノルズ数 $Re (= 2HU/\nu)$ ，U；平均流速， ν ；動粘性係数）は 1000, 2000, 10000 である。 Re によって分布形状が変化している。このような伝熱特性を解明するためには、その流動機構を把握する必要がある。

突起物周辺の三次元的な流れについての研究は、境界層の中に置かれた柱状物体周辺に

Re = 1,000

Re = 2,000

Re = 10,000

Photo.1 Isotherms around a vertical cylinder visualized by liquid crystal

* Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-Mura, Ibaraki, 319-11, Japan

** Faculty of Engineering, University of Yamanashi, Kofu, Yamanashi, 400, Japan

関するものが多く、流路内に置かれた突起物に関しては極めて少ない。

本報告は、平行平板流路中央に置かれた円柱周辺の流れを実験的に研究した結果について述べたものである。実験は主として水流で行い、パール顔料による可視化技術を懸濁法、壁面トレース法及び注人流脈法のいずれにも適用できるように工夫した。また比較のため、油膜法による可視化も行った。実験の結果、流れの三次元的構造を解明し、新しい馬蹄渦系と交番渦を見出した。

2. 実験装置

2-1 回流水槽

Fig.1 に回流水槽を示す。測定部は、幅 300 mm、長さ 2,000 mm、可変高さ H (~ 140 mm) の平行平板流路であり、上流部分に整流格子、金網、縮流部を有し、0.04-5. l/s の流量範囲で安定な水流を得る事ができる。流路の中央に直径高さ共に 20 mm の円柱を設置し、その周辺の流れを観察した。なお、流路の入口には上下の壁面の全幅に渡り研磨紙(# 80, 長さ 35 mm) と針金(直径 1 mm) を取り付け、乱流トリップとした。

Fig.1 Experimental Apparatus

2-2 パール顔料

可視化トレーサとして使用したパール顔料は、雲母(マイカ)の微粒子を酸化チタンで被覆した銀白色の粉末であり、水に分散し易く、装置に付着しても簡単に洗浄する事ができる。さらに、光を良く反射する上に、粒子形状が鱗片状であるためアルミ粉と同様に流れのせん断(Shear)方向を検知する事ができる等、水流の可視化に適した特性を有している²⁾。今回の実験では、粒度(メディアン径) 30 μ m、比重 約 3 の粒子を使用し、約 1 wt% の水溶液として水流中に混入した。流線の可視化に当たっては、このトレーサ液を水流中に均一に懸濁させた。また、流脈と下壁面上に沈積する粒子の模様の観察に当たっては、水槽の金網の上流側からトレーサ液を適量供給した。

パール顔料を混入した水流は、通常の照明下では単に白濁して見えるだけであるが、適切な照明によって流れの様子を鮮明に可視化する事ができる。流線及び流脈の可視化には、ハロゲンランプを組み込んだスリット光源(幅 500 mm, スリット幅 2-40 mm)を使用し、下壁面上の沈積粒子模様の撮影にはハロゲンランプの分散光も併用した。

2-3 油膜法

油膜法による実験は、別の平行平板流路(測定部: 幅 200 mm, 長さ 600 mm, 高さ 10 mm)で空気を用いて行った。円柱としては、高さ h 10 mm で直径 d 10 mm ($d/h=1$) と 20 mm ($d/h=2$) の 2 種類を用いた。油膜法による可視化は、円柱を設置した流路下壁面上に油膜材を塗布して行い、油膜パターンの生成過程を観察、撮影した。油膜材としては種々の組み合わせを試みたが、今回はシリコンオイル(粘度 1.5 cp)に顔料(酸化亜鉛)及び添加剤(オレイン酸)を混合したものをを使用した。混合比は実験条件に応じて鮮明な油膜パターンが得られるように調整し、流速 2.5 m/s まで適用可能とした。

3. 実験結果及び考察

Photos. 2, 5 は流路の中央、Photo. 3 は流路の下壁を水平方向よりスリット光で照明し

て撮影したものである。またPhoto. 4は分散光によって照明したものである。さらに円柱周辺の流れの詳細な観察は長焦点顕微鏡を用いて行い、流れの様子をスケッチした。

3-1 主流

Photo. 2は、パール顔料を水流中に懸濁して流線を可視化したものであり、主流の Re が1000, 2000, 4000, 10000の場合を示している。いずれの場合にも、上流岐点流れ、円柱側面のはく離流れ及び後流が認められ、長い円柱周辺の流れと定性的に類似している。後流は Re に強く依存し、円柱直後の淀み領域と下流のウェーク領域とに分けられる。 $Re=1500$ 程度までは、淀み領域に安定な双子渦が存在し、その末尾は長く伸び、ウェーク領域は認められない。 Re が1500を越えると、双子渦の末尾に変動が現われ始める。 Re が増大するに従って淀み領域の中の流れが不規則となり、領域も減小する。 $Re=2000$ を越えると淀み領域の下流に乱れたウェーク領域が現われ、領域の幅が下流に向かって拡大し始める。さらに Re が増大し4000を越えると、次節に述べる交番渦が生ずるため流れは不安定となる。

3-2 交番渦

Photo. 5は、パール顔料水溶液を注入して流脈を可視化したものであり、主流の Re が4000, 6000, 8000, 15000の場合を示している。 $Re=4000-5000$ を越えるとカルマン渦に類似した交番渦が発生し始める。 $Re=6000$ 前後では数個の交番渦が発生するが、下流のウェーク領域の中で消滅した。 $Re=8000$ 以上では、明瞭な交番渦が下流まで観察された。さらに Re を増大しても流れの様子は変化しなかった。ここで見出された交番渦は、通常のカルマン渦と比べて2桁程度大きな Re で発生し始めており、その3次元構造物も今の所明らかではない。

3-3 壁面トレース

Photo. 3は主流と同様のパール顔料懸濁法によって下壁面の直上を可視化したものであり、Photo. 4は下壁面上に沈積したパール顔料粒子の模様を撮影したものであるが、両者は良く一致している。したがって、以下では壁面上の模様を総称して壁面トレースと呼ぶ事にする。写真は、共に主流 Re が1000, 2000, 4000, 10000の場合を示している。壁面トレースの黒い部分は粒子の沈積が少ない所であり、筋状の模様は油膜法との類似性から壁面のせん断応力の方向を表しているものと考えられる。

壁面トレースは円柱周辺と下流部分とに分けられる。円柱周辺の壁面トレース形状は、 Re の増加に従って涙滴形から円形へ変化する。この模様は、次節で述べる馬蹄渦に起因するものである。下流部分の壁面トレース形状は、円柱直後で一度縮小し、その後ほぼ一定幅の帯状を示す。

3-4 馬蹄渦

円柱の周辺を壁面に沿って取り巻く馬蹄渦が観測された。

層流境界層の中に置かれた物体の周辺に生ずる馬蹄渦についてはBaker³⁾、大坂⁴⁾ によって詳細に研究されており、『物体前方に生じる逆圧力勾配のため境界層が三次元的にはく離し、その領域の流体を巻き込んで渦系を形成しながら物体側面を流下していく流れである』⁴⁾。しかしながら、管内流や乱流の場合の馬蹄渦に関する研究は、著者の知る範囲では行われていない。ここでは、流路上方からスリット光を垂直に照明し、側方から円柱周辺を長焦点顕微鏡で詳細に観察した。 $Re=1000-2000$ では、常に円柱周辺を取り巻く渦が存在しており、その流動状態は Fig. 2 に示す4パターンに分類できた。状態Aは $Re=2500$

以下で生じ、主流が巻き込まれた渦（以後、順渦）2個と、順渦の間に生ずる逆向きの1つの随伴渦から構成される安定した流れ場であり、Bakerの4渦系に相当する。但し、Bakerの記述にある円柱基部に生ずる微小な渦は稀にしか観察されなかった。また、円柱から数えて3番目の渦の上流に、渦を形成してはいないが上流からの流れと渦系からの流れが衝突している領域が観察された。状態Bは $Re=3000$ で生じ、3個の順渦と2個の随伴渦から構成される安定な流れ場であり、Bakerの6渦系に相当する。さらに Re が増加すると、円柱から数えて2番目の順渦が不安定となり、壁に沿って移動する状態Cが出現する。この際、3番目の順渦は発生消滅を繰り返し間欠的となる。これは、Bakerの非定常渦系に相当すると考えられるが、Bakerは1番目の順渦が不安定になるとしている点で本観察の結果と異なる。 $Re=6000$ を越えると全く発生機構の異なった渦系（状態D）が新たに見出された。この渦系の発生機構は、以下のものであった。上流からの壁に沿う流れは円柱基部前方に出現する淀み領域に堰止められ、高速の主流と干渉して周期的に渦を放出ようになる。発生した渦は流下し、消滅する。壁面近傍をスリット光で照明し流路上方から観察すると、馬蹄渦は円柱前方で発生し、次々と波状に打ち寄せて来るように見える。

3-5 油膜法による結果

Photos. 6 (a)-(c) は、 $d/h=1$, $Re=7000$ の場合であり、空気を流し始めてからの経過時間がそれぞれ20sec, 2min, 10min後の油膜パターンの変化を示したものである（油膜混合比：シリコンオイル 75ml, 酸化亜鉛 1.5g, オレイン酸 15ml）。実験開始直後、流路下壁の油膜表面に流線模様が現われるが、同時に、突起状の横波も発生する（Photo. 6 (a)参照）。時間の経過と共に油膜は下流へ移動し、流線の軌跡が明確になる（Photo. 6 (b)参照）。その後横波は消滅し、最終的な油膜パターンが得られる（Photo. 6 (c)参照）。円柱の周辺には馬蹄渦のトレースが見られ、円柱の両側面からはく離線と干渉する様子が見られる。さらに、円柱後方にはパール顔料による壁面トレースと類似したウェーク領域が認められる。また、円柱直後の白い部分にはオイルが吹き溜っており、パール顔料で観察された淀み領域に対応している。

しかし、 $Re=7000$ より低い Re にした場合には明瞭な油膜パターンが得られず、パール顔料と比べて細部の情報が得られなかった。そのため、直径20mmの円柱を用いた所、以下に示す様な明瞭な油膜パターンを得る事ができた。Photo. 7に、 $d/h=2$, $Re=7000$, 経過時間10min後の場合の油膜パターンを示す（油膜混合比：シリコンオイル 75ml, 酸化亜鉛 1.5g, オレイン酸 15ml）。流れのはく離及び円柱後流の淀み領域等の油膜パターンは、Photo. 6の場合とほぼ同様であったが、円柱後流にくさび状の模様が新たに出現した。こ

Fig.2 Horse-shoe-vortex mechanisms observed by a long focus microscope.
(A) : Steady 3 vortex system.
(B) : Steady 5 vortex system.
(C) : Unsteady vortex system.
(D) : Periodic 3 tearing system.

Re = 1,000

Re = 1,000

Re = 1,000

Re = 4,000

Re = 2,000

Re = 2,000

Re = 2,000

Re = 6,000

Re = 4,000

Re = 4,000

Re = 4,000

Re = 8,000

Re = 10,000

Re = 10,000

Re = 10,000

Re = 15,000

Photo.2 Stream lines of main flow on middle plane ($y=H/2$) visualized by pearl pigment and slit light.

Photo.3 Particle traces near the bottom plate illuminated tangentially by a slit light.

Photo.4 Patterns on the bottom plate made by deposited particles of pearl pigment.

Photo.5 Alternating vortices visualized by streak patterns of injected pearl pigment.

れは、油膜パターンが円柱のアスペクト比 (d/h)等に強く影響される可能性を示している。

Photo. 8は、 $d/h=2$, $Re=3500$, 経過時間 10min 後の場合の油膜パターンを示したものである (油膜混合比: シリコンオイル 100ml, 酸化亜鉛 1.2g, オレイン酸 10ml)。 Re を低下させた場合、円柱直後の淀み領域に双子渦のパターンが明瞭に観察された。

油膜法は、油膜の塗布方法及び油膜の混合比等が適切でない場合には明瞭な油膜パターンを得る事ができないが、比較的大きい Re では微細な油膜パターンが得られ、パール顔料による方法と同程度の情報を得る事ができた。

4. 結論

平行平板流路中央に置かれた垂直円柱周辺の流れを、パール顔料、及び、油膜法を用いて可視化し、以下の結論を得た。

(1) パール顔料を水流に適用し、懸濁法、壁面トレース法、さらに、注入流脈法のいずれにも使用できる事を示した。油膜法については、成分と混合比率に改良を加え、低速の空気流にも適用できるようにした。

(2) 懸濁法によって、円柱下流に生じる淀み領域とウェーク領域の特性を明らかにした。

(3) 円柱周辺の馬蹄渦については、大きなレイノルズ数で新たな渦系と発生機構が存在する事を見い出した。

(4) 注入流脈法により円柱の下流にカルマン渦と定性的に類似した交番渦が発生する事を見出した。

終わりに、パール顔料をご提供いただいた三菱金属中央研究所 古住素彦氏、及び、帝国化工(株) 岩根信雄氏にお礼申し上げます。

文献: (1)一宮浩市、秋野詔夫、功刀資彰、光城浩二: 投稿中 (2)Calson, D.R., Windall, S.E., J. Fluid Mech., vol.121, pp.48(1982) (3)Baker, C.J., J. Fluid Mech., vol.95, part2, pp.347(1979) (4)大坂英雄、山田英己、影山芳郎: 流れの可視化、vol. 2, no.4, pp.44(1982)

(a) time = 20 sec.

(b) time = 2 min.

(c) time = 10 min.

Photo.6 Oil flow patterns around a cylinder (diameter:10 mm) at $Re=7,000$ after three time durations.

Photo.7 Oil flow pattern around a cylinder (diameter:20 mm) at $Re=7,000$ after 10 minutes.

Photo.8 Oil flow pattern around a cylinder (diameter:20 mm) at $Re=3,500$ after 10 minutes.