

二次元物体伴流渦の変形モードについて

○大藏信之、奥出宗重（名城大・理工）

Deformation Mode of Vortices in the Wake behind a Two Dimensional Body

Nobuyuki OKURA* and Muneshige OKUDE*

* Faculty of Science and Technology, Meijo University

ABSTRACT

The three-dimensional deformation of the vortices behind a two dimensional body was investigated by using flow visualization technique. In the case of a flat plate perpendicular to the uniform flow, the wavy deformation of the vortex filament was observed in the far wake. In the case of a inclined plate, the rib structures appeared in regular intervals to the axial direction in a vortex filament at the near wake. The ribs generate around a pair of vortex filaments which are shedding alternately from a plate. The absolute value of circulation of alternate vortex was different from each other in a pair of vortices in the case of a inclined plate. It seems that three dimensional deformation of vortex in the near wake is caused by difference of circulation of alternate vortex. The similar phenomenon was observed in the wake behind a circular cylinder oscillating in the streamwise direction.

Key Words : wake, vortex flow, laminar-turbulent transition, flow visualization

1. まえがき

二次元物体伴流の渦列内の渦は、その遷移過程で、物体の直ぐ下流で二次元的であったものが、渦軸方向に規則的に乱れが現れ、やがて流れは複雑化し乱流となる。このような遷移初期の渦の三次元化は、伴流のみならず、二次元噴流や平板境界層の流れを始め、多くの場合に共通して観察され、遷移過程で重要な役割を果たしている。

Saric ら¹⁾は、平板境界層の遷移過程で、T-S 波の後、直線渦が渦軸方向に波状変形する過程を調査し、波の山と谷が下流方向に直線的に並ぶ場合と、千鳥状に並ぶ場合を観察している。すなわち、幾つかの渦の変形モードが存在することを述べている。

Williamson²⁾は円柱伴流の場合について、伴流渦の渦軸方向に規則的に形成された乱れ（リブ構造）の間隔が、遷移初期の $Re=180$ の場合と、 Re 数を増加した $Re=230$ の場合とで大きく異なることを示し、前者を A モード、後者を B モードとして区別している。

また、永田ら^{3,4)}は、円柱を流れ方向に振動させた場合、ある特定の振動数で、伴流内に極めて

規則的な流れ模様の現れることを示している。

上述の通り、直線渦が三次元化する過程で、幾つかの変形モードが確認されているが、何故モードの違いが現れるか明らかにされていない。

そこで、本研究では、二次元物体の代表として、迎角を持つ平板伴流と、振動円柱伴流の流れ模様を観察し、渦列内の渦の変形モードについて調査した結果を報告する。

2. 実験装置および方法

実験には回流型水槽を用いた。流速範囲は、1 ~ 3cm/s である。流れの可視化は、蛍光染料（フルオレセイン）を供試物体に塗布し行われた。撮影はデジタルカメラで行われた。伴流の速度変動の測定は風洞で行われた。供試物体として、主たる調査を行った平板（幅： $h=5\text{mm}$ ）の他に、円柱（直径： $d=4.7\text{mm}$ ）および四角柱（対角線長さ： $h=5\text{mm}$ ）が用いられた。 Re 数は、物体を流れ方向に投影した幅を代表長さとした。座標系は物体中心を原点とし、流れ方向を x 、物体軸方向を z 、両者に垂直な方向を y とされた。

3. 実験結果および考察

3.1 平板伴流の流れ模様

図1および2に、 $Re=95$ の場合の平板伴流の x - z 断面の流れ模様を示す。図1に、平板平面が一樣流に直角に置かれた場合(90deg 平板)、図2に、45deg 傾けて置かれた場合(45deg 平板)の流れ模様を示す。流れは図の左から右方向で、下流 $x/h=20$ の範囲が示されている。

図1の90deg 平板の場合、伴流内の渦の渦糸は、 $x/h=10$ 付近までほぼ直線的であるが、さらに下流で渦軸方向に規則的な波打ちが観察される。いわゆる、伴流の遷移初期の段階の状態を示す。流れ模様の特徴として、いずれの渦糸も軸方向に波打ち、波の山と谷のそれぞれが、下流方向に直線的(Cascade 型)に並ぶ。

一方、図2の45deg 平板の場合、90deg 平板の場合と比較して、平板直後から早期に渦の三次元化が観察される。渦糸は、平板直後から波打ち始め、その渦糸まわりに、軸方向に規則的な間隔でリブ構造が観察される。その間隔は、上記図1の渦糸の波長と比較して短く、概ね $1/2$ 程度である。また、リブ構造は、平板から交互に放出された隣り合う一対の渦糸を取り囲んでいるように見える。その下流の渦糸対では、リブ構造は、渦軸方向に半周期ずれて現れ、流れ方向に千鳥状(Staggered 型)に並ぶ。上記90deg 平板の場合、乱れが流れ方向へ Cascade 型(C 型)に配置されたのに対し、この45deg 平板の場合 Staggered 型(S 型)に配列される。なお、上記のリブ構造については、流れ模様に見られる通り、組織構造を成しており、その構造に興味を持たれる。しかし、その構造は極めて複雑で、今のところ明らかでない。今後、この構造を画像処理によって立体的に観察し調査する予定である。

同じ平板伴流であっても、その迎角によって、伴流渦の三次元化に、C 型と S 型の二種の変形モードのあることが分かった。

次に、これらの変形モードについて、さらに詳細に調査するために、平板の迎角を 90 から 45deg の範囲で変化させ、流れ模様を調査した。図3に、 $\alpha=58deg$ の場合の結果を示す。

図から分かるように、平板の z 方向の一方(図の下側)では、図1のような C 型の流れ模様が、他方(図の上側)では図2のような S 型の流れ模様が観察される。 $\alpha=90deg$ の上下対称の流れの状態から迎角を小さくするとき、それまで平板の z 方向の全てに渡って C 型であったものが、 $62 \geq \alpha \geq 55deg$ の範囲では、図に示す通り、同じ伴流内で C 型と S 型が同時に現れる。さらに迎角を小さくし、平板まわりの流れの非対称性を大きくすると、S 型の流れ模様のみが形成され上記図2の $\alpha=45deg$ の流れ模様に至る。

概ね $\alpha = 60deg$ を境に、平板まわりの流れが対称な場合の C 型、非対称な場合の S 型が現れることが分かった。

続いて、上記と同様な結果が、平板以外の他の二次元物体についても得られるかどうか調査した。具体的には、円柱単体の場合と円柱の片側にトリッピング・ワイヤを取り付けた場合について調査した。さらに、角柱を水平に置いた場合(一樣流と角柱の対角線のなす角は 45deg)と、それから一樣流に対し 20deg 傾けた場合の流れ模様を観察した。その結果、図に示していないが、円柱および角柱のいずれの場合も、流れに対称に置かれた場合 C 型、非対称に置かれた場合 S 型の流れ模様が観察され、二次元物体まわりの流れの対称性と、伴流渦の変形モードに一定の相関があることが分かった。

3.2 振動円柱伴流の流れ模様

冒頭で述べた通り、永田らは振動円柱伴流内で、剥離渦の規則的な変形を観察している。以下に、この振動円柱伴流渦の流れ模様を観察し、前節の平板伴流と比較する。

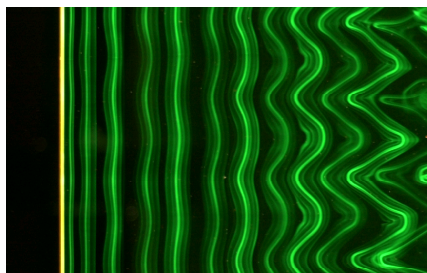


図1 平板伴流の流れ模様
($\alpha=90deg$ の場合)

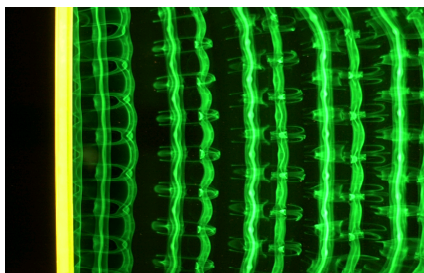


図2 平板伴流の流れ模様
($\alpha=45deg$ の場合)

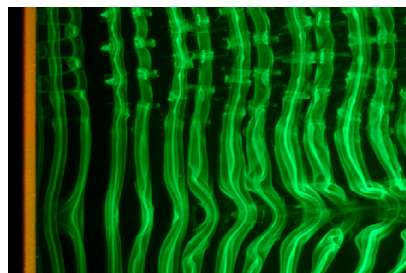


図3 平板伴流の流れ模様
($\alpha=58deg$ の場合)

図4に、円柱を流れ方向に振動させた場合の x - z 断面の流れ模様を示す。円柱の振幅を $A/d = 0.1$ (A : 円柱の振幅、 d : 円柱直径) に固定し、振動数 F ($= fc/f_0$ 、 fc : 円柱の振動数、 f_0 : 静止円柱からの渦放出周波数) を変化させた場合の流れ模様を示す。 $Re=130$ の結果を示す。

$F=0$ の場合、すなわち、静止円柱の場合、よく知られているように、渦糸は、円柱軸に対して傾いているが、互いに平行で直線的である。

$F=1.0$ の場合、上述の図2の 45deg 平板の場合と非常に良く似た S 型の流れ模様が観察される。振動円柱と平板とでは、供試物体の形状や振動の有無など異なるのに、非常によく似た流れ模様が観察される。

さらに振動数を増加した $F=1.5$ の場合、 $F=1.0$ の場合と比べ、流れ模様は、より複雑ではあるが、きわめて規則的である。また、流れ模様はきわめて安定していた。

実験を行った $F \leq 1.5$ の範囲では、 $F=1.0$ および 1.5 の場合以外では、このような規則的な流れ模様は観察されない。永田らは、 $F=1.5$ の場合に渦糸の規則的な変形を観察しているが、 $F=1.0$ については観察していない。 $F=1.0$ の場合、この振幅 $A/d=0.1$ では、上述の 45deg 平板の場合と同様に、伴流の渦軸方向に規則的な S 型の流れ模様の現れることが分かった。

続いて、円柱の振動数を $F=1.0$ に固定し、振幅 A/d を変化させた場合の流れ模様を図5に示す。 $Re=160$ の結果を示す。

まず、 $A/d=0$ (静止円柱) の場合、この $Re=160$ で

は、円柱直後から既に伴流渦が三次元化しており、渦糸軸方向に規則的に波打つ。図1の平板伴流と良く似た C 型の流れ模様が観察される。 $A/d < 0.1$ の範囲では、この様な C 型の模様が観察される。

次に、 $A/d=0.1$ の場合、 $A/d=0$ の場合に見られた渦糸の波打は治まり、渦糸は、ほぼ直線的である。振幅を増加させることで、渦の三次元化、言い換えると、伴流の乱流遷移が抑制されている。

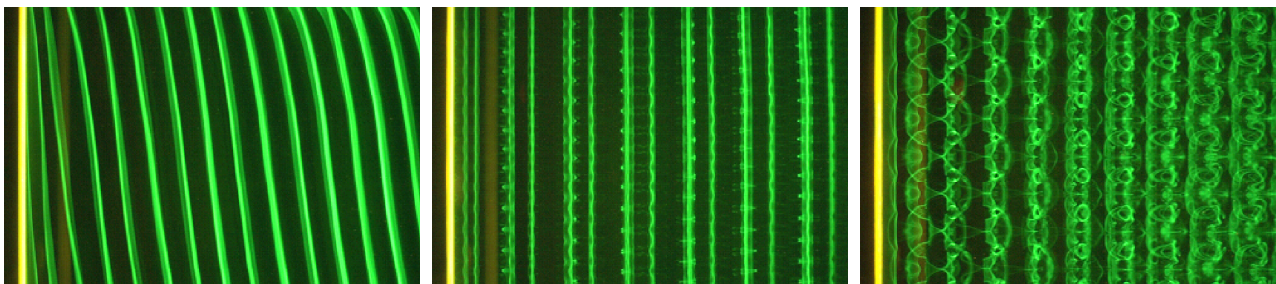
さらに振幅を増加した $A/d=0.2$ の場合、再び渦糸軸方向に規則的な乱れが生じているが、 $A/d < 0.1$ の場合と異なり、 S 型の流れ模様が観察される。

この $Re=160$ の場合、振幅の小さい範囲では C 型が現れ、振幅を大きくすると S 型の流れ模様が現れることが分かった。

3.3 伴流の渦列内の渦の循環値

平板伴流と振動円柱 ($F=1.0$) の場合とでは、物体形状や振動の有無が異なるのに、いずれの場合にも、非常に良く似た C 型と S 型の2つの渦の変形モードが現れた。以下に、この一つの理由を考える。

まず、平板の場合、迎角を $\alpha=90\text{deg}$ から 45deg に近づけると、平板の上下で流れは非対称となる。上述の片側にトリップソグワリヤを付けた円柱や、迎角を持つ角柱など、他の二次元物体についても同様で、流れに非対称な物体の場合、物体から交互に放出される渦の強さ、すなわち、循環値が異なる可能性がある。これを確かめるために、3つの物体の中で最も伴流渦の三次元化が顕著で安定していた 45deg 平板について、伴流の速度分布を測定し、その分布から渦の渦度分布を求め、循環値を調べた。

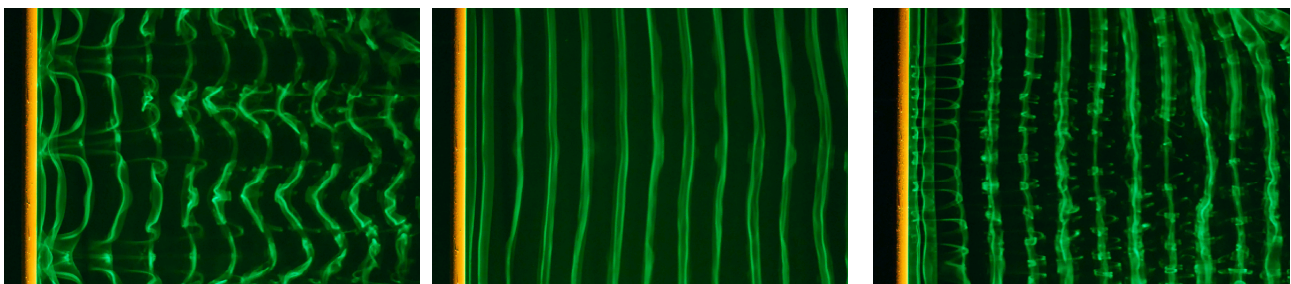


(a) $F=0$ (静止円柱) の場合

(b) $F=1.0$ の場合

(c) $F=1.5$ の場合

図4 振動数 F に対する振動円柱伴流の流れ模様



(a) $A/d=0$ (静止円柱) の場合

(b) $A/d=0.1$ の場合

(c) $A/d=0.2$ の場合

図5 振幅 A/d に対する振動円柱伴流の流れ模様

図 6 に、45deg 平板伴流の渦の等渦度線図を示す。測定位置は $x/h=10$ の位置である。等渦度線は、35(1/s) 刻みの間隔で描かれている。図中の等渦度線図に、楕円状の閉曲線が観察される。その閉曲線の中心が渦中心に相当する。渦中心の渦度は、上側の渦で $\omega = -405(1/s)$ 、下側の渦で $\omega = 512(1/s)$ であった。また、渦度分布を積分して求めた渦の循環値は、上側の渦で $\Gamma = -27.65(\text{cm}^2/\text{s})$ 、下側の渦で $\Gamma = 32.73(\text{cm}^2/\text{s})$ であった。渦度および循環値のいずれも、その絶対値は、下側の渦の場合、上側の渦のそれと比較して大きい。すなわち、流れに非対称な物体の場合、伴流内に交互に放出される渦の強さが異なることが確認された。この時、剥離渦に S 型の変形モードが現れる。

一方、物体が流れに対称な場合、当然、その物体からの剥離渦の強さは、上下同じである。この時、剥離渦に C 型の変形モードが現れる。

次に、振動円柱の $F=1.0$ の場合、物体形状は流れに対称であるが、その振幅によって、C 型と S 型の変形モードが観察された。円柱の振動の強さと放出される剥離渦との関係について考察する。

振動数が $F=1.0$ で、振幅がある一定値以上(図 5 (c)、 $A/d \geq 0.2$) の場合について、円柱の振動と渦放出の関係を考える。図 7 に、渦放出過程の模式図を示す。この $F=1.0$ の場合、円柱の振動と渦放出周波数は同じで、両者は同期している。今、図 7 (a) のように、円柱が上流に移動する時、円柱上側から渦放出する場合を考える。この場合、図 7 (b) のように、円柱が半周期移動して下流側に向かう時、下側から渦放出する。さらに半周期後、再び図 7 (a) と同じ状態に戻り、これが繰り返される。従って、常に上側の渦は、円柱が上流に移動する時に放出され、下側の渦は、円柱が下流に移動する時に放出される。円柱表面からの剥離剪断層の速度勾配は、円柱が上流に移動する時の方が大きい。従って、上側の渦の循環値は、下側の渦のそれと比較して常に大きくなる。円柱の振動と渦放出の位相関係を半周期ずらした場合、これと逆になるが、上側と下側の渦で循環値に差が現れることは同じで、これは、45deg 平板のように非対称な物体の伴流と同じである。その結果、同じ S 型の流れ模様が観察されることが分かった。

一方、振動数は同じ $F=1.0$ でも、振幅が小さい場合(図 5 (a)、 $A/d < 0.1$)、上述の考察から、円柱上側と下側から放出される剥離渦の強弱の差は、小さくなる。言い換えると、振動円柱まわりおよび伴流の流れは、対称な物体のそれに近づく。その結果、同じ C 型の流れ模様が観察されることが分かった。

4. まとめ

以上の結果をまとめると、次のようになる。

- 1) 平板伴流の渦列内の渦は、その遷移過程で、渦軸方向に規則的に変形する。その変形を見ると、90deg 平板のように上下対称な場合 C 型、45deg 平板のように非対称な場合 S 型の 2 つの変形モードが観察された。
- 2) 円柱を流れ方向に振動させると、 $F=1.0$ および 1.5 の場合、きわめて周期的で規則的な流れ模様が現れた。特に $F=1.0$ の場合、その振幅によって、上記 1) の平板とよく似た S 型と C 型の変形モードが観察された。
- 3) 45deg 平板の場合および、 $F=1.0$ の振動円柱で振幅が大きい場合、物体から交互に放出される渦の強さが異なる。この時、S 型の変形モードが現れた。
- 4) 一方、90deg 平板の場合および、振動円柱の振幅が小さい場合、物体両側面からの渦の強さは等しくなる。この時、C 型の変形モードの現れることが分かった。

参考文献

- 1) W. S. Saric and A. S. W. Thomas : Turbulence and Chaotic Phenomena in Fluids (North-Holland, Amsterdam, 1984), pp.117-122.
- 2) C. H. K. Williamson : J. Fluid Mech., 1996, No.328, pp.345-407.
- 3) 永田, 池田 : 第 22 回乱流シンポジウム, 1990, pp.262-269.
- 4) 永田, 石丸 : 第 23 回乱流シンポジウム, 1991, pp.409-416.

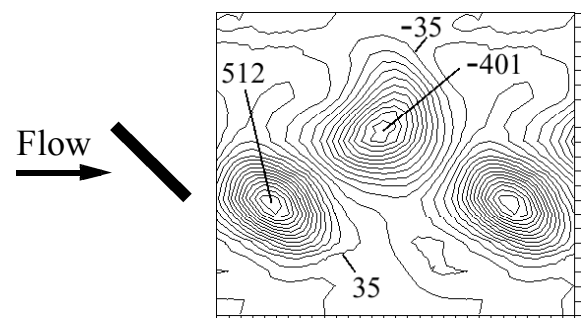


図 6 振動円柱伴流の渦度分布

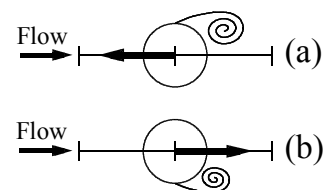


図 7 $F=1.0$ で振動する円柱からの渦放出過程の模式図