

No.22

振動円柱後流中の Net 型渦列の渦構造

永田 拓、橋本武彰（岐阜大工）

Vortex structure of the “Net-type” vortex streets formed in the wake of an oscillating cylinder

H. Nagata, T. Hashimoto

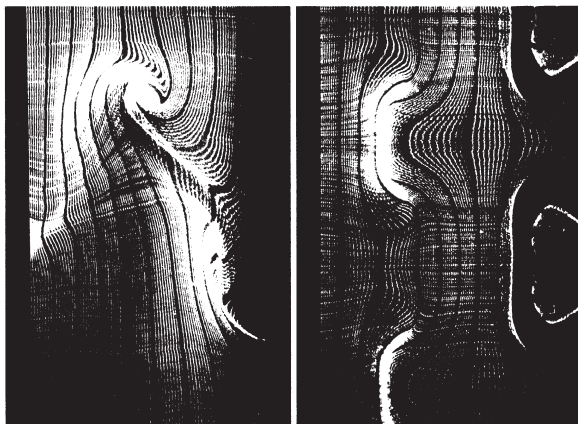
Faculty of Engineering, Gifu University

Various types of vortex streets are formed behind a circular cylinder oscillated streamwise in a uniform flow. We classified the vortex streets behind the cylinder into seven types including “Net-type” vortex streets in the previous paper. The “Net-type” vortex streets appear in the lock-in range referring to the frequency of the oscillating cylinder and that of vortex shedding. The “Net-type” vortex streets have a peculiar but a stable 3D vortex structure. In this report the “Net type” vortex streets were studied by means of flow visualization experiments in order to clarify the detail of the 3D vortex structures i.e. configuration of the vortex skeleton, and kinematical vortex structures of the “Net-type” vortex streets. The 3D vortex structures of the vortex streets were shown in the 3D images composed from a series of video pictures of the vortex streets passing through a sheet of illuminated layer of laser light.

Keywords: Vortex streets, Oscillating cylinder, 3D vortex structure, Taylor hypothesis, Velocity gradient tensor, Flow visualization

1 はしがき

一様流中で円柱を流れ方向に振動すると、円柱の後流に形成される渦列は、振動条件によって著しく変化する多様な渦構造を示す。前報⁽¹⁾では、この場合の渦列の形態を詳細に観察し、安定した渦列やカオス的な渦列を含む渦列の形態を7つの型に区分した。その1つである「Net 型」渦列は、円柱の振動と同期放出されるきわめて安定な3次元渦構造を示す渦列である。本研究は、可視化実験によって、この「Net 型」渦列の渦構造（渦核の形状と渦の運動学的特性）を明らかにした。前報⁽¹⁾で示したように、「Net 型」渦列は、円柱の振動に同期して渦列が放出される区間の下限に近い振動数、すなわち $S_{cv}=f_c/f_v=1.5$ 近くで形成される（ f_c ：円柱振動数、 f_v ：円柱静止時の渦放出周波数）。

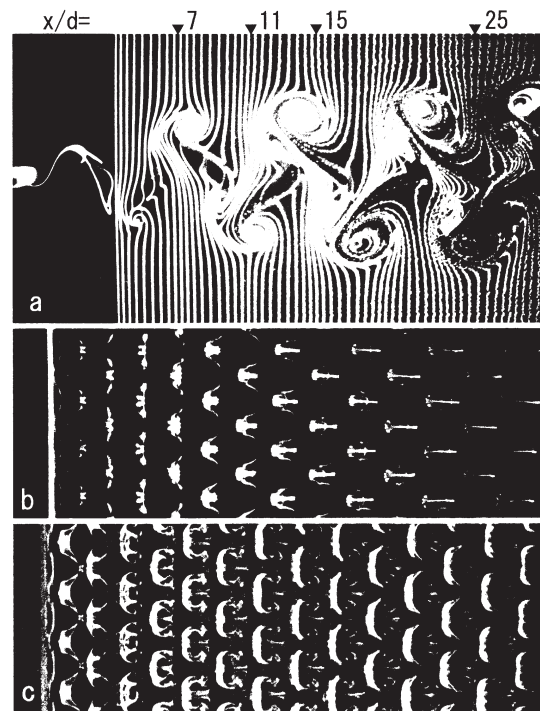


(a) xy断面 (図3 (b) AA) (b) xz断面 (図3 (c) DD)

図1 可視化写真の一例

2 実験の装置と方法

2. 1. 装置の概略 スコッチヨーク機構によって振動する円柱（直径 $d=8\text{mm}$ 、長さ 400mm ）を回流水槽中に設置し、電解沈殿法と水素気泡法による流れの可視化実験を行った。円柱の振動は、 x 変位； $x_c = A \sin \omega t$ （ ωt ：振動位相）、 $A/d=0.1$ とした。レイノルズ数 $Re=Ud/\nu=120$



(a) xy断面 (b) 外渦 (c) 内渦

図2 「Net 型」渦列の可視化写真、 $Re=160$

~160 (U: 一様流速、 ν : 動粘度)。座標系は円柱軸を z 軸、円柱後流軸を x 軸とする xyz 系とする。

2. 2. 速度場の測定方法 前報⁽²⁾の方法を適用して速度場を測定した。その概略は、円柱後流に設置した電極細線からパルスの発生する水素気泡によって、電極細線を過ぎる流れの速度を測定し、Taylor 仮説を用いて時間と空間を読み替えて速度場を求める方法である。速度測定に用いた写真の一例を図1に示す。

2. 3. 「Taylor 仮説 3D 画像」の創成方法 一連のビデオ画像(数秒間の時系列画像)の特定なライン上の画像を抽出し合成して、Taylor 仮説画像を創成する前報⁽³⁾の方法を、以下のように3次元流に拡張した。x/d を定めた yz 面をレーザーシート光(幅約1mm)で鋭く光切断し観察断面とした。この yz 観察断面(x/d で表す)を通過する渦列の数秒間に亘る一連のビデオ画像(渦列の断層写真、30コマ/秒)を抽出し、Taylor 仮説に基づき、時間を x 座標に読み替え3D画像に合成した。つまり、渦列の yz 面断層写真を立体視画像に合成した。以後、この画像を「Taylor 仮説 3D 画像」と呼ぶ。渦列は、円柱表面から溶出する色素によって可視化されており、渦度は円柱表面だけで生成されるので、可視化された色素模様(円柱表面を始点とする流脈)は、渦列の渦核構造を近似的に表している⁽³⁾。

3 実験の結果と考察

3. 1. 「Net 型」渦列の幾何学的渦構造

(a) 渦核の形態 図2は、円柱表面から溶出する色素と、円柱の下流に設置した電極細線からパルスの発生する水素気泡によって可視化した「Net 型」渦列を示す。円柱の下流に4列の渦列が形成されているように見える。この渦配列は、流れ方向に明確な周期性をもつ安定配列

であり、静止円柱の場合に比してはるか下流まで安定継続する。以後、この渦列の外側の渦を「外渦」と呼び、円柱後流軸に近い内側の渦を「内渦」と呼ぶ。図2(b)と(c)は、それぞれ「外渦」と「内渦」の span 方向の渦構造を示す。これらの図に示すように、この渦列は、渦列の span 方向にも明確な周期性をもつ。

図3は、可視化写真や流れの観察に基づいて、この渦列の渦核構造をモデル化し、3面図表示したものである。図3(b)の AA 断面の渦構造を、図(a)に実線で示す。図3(a)中の「外渦●」と「内渦●」を結ぶ渦構造を、位置(x, y)と円柱の振動位相 $\Phi = \omega t$ の関数; $F(x, y, \Phi)$ で表すと、この渦列の渦放出周期が円柱振動周期の2倍であることに注意すると、AA 断面のもう一方の渦、すなわち図(a)中「外渦○」と「内渦○」を結ぶ渦構造は、 $F(x, -y, \Phi + 2\pi)$ となる。同様に、図(b)の CC 断面の渦構造は、図(a)の「破線」で示すように、 $F(x, y, \Phi + 2\pi)$ となる。ここで、渦の回転方向は、丸印の黒と白で区分し、黒丸はすべて時計方向、白丸はすべて反時計方向回転を示す。

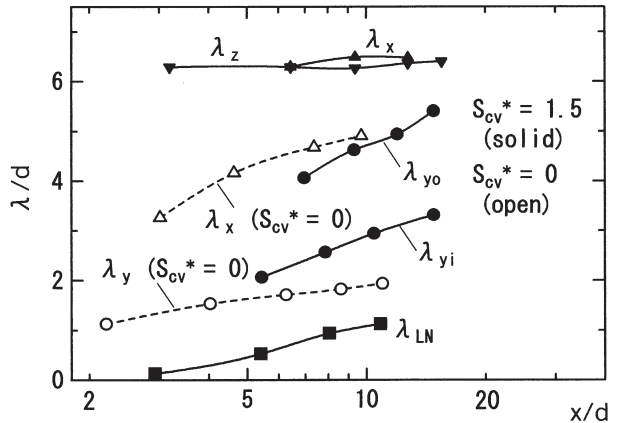


図4 渦配列の波長、Re=160

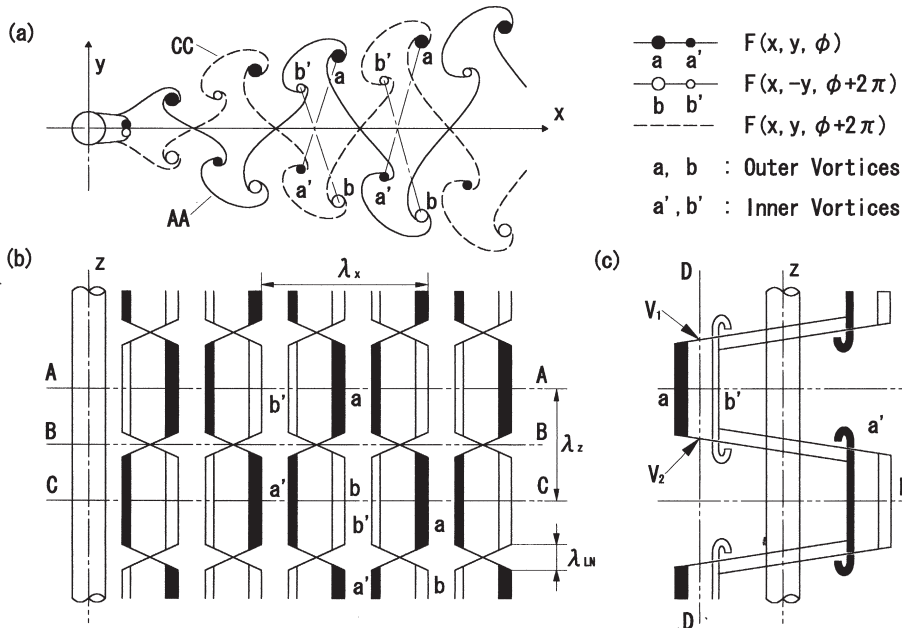


図3 「Net 型」渦列の渦核モデル

図3 (b)のBB断面は、外渦と内渦が繋がる断面であり、図3 (a)中「一点鎖線」で示すように、「外渦●a」は上流の「内渦●a'」に繋がり、「外渦●b」は「内渦●b'」に繋がる。yz面の渦核構造を図(c)に示す。

図3 (a)のそれぞれの「外渦」と下流の「内渦」を結ぶ実線や破線は、braidと呼ばれる渦領域を縁取る曲線で、ここに渦度の集積は無く「渦核」ではない。

図4は、Net型渦列の渦配列の波長 λ/d と円柱からの距離 x/d との関係を、静止円柱の場合と対比して示す。図中、波長 λ の添え字は、図3に示すように、波長の測定方向と外渦・内渦を示す。「Net型」渦列の静止円柱の渦列に対する著しい特徴は、1) 外渦の y 間隔 λ_{yo} が静止円柱の λ_y の数倍にも及び、 λ_{yo} と λ_{yi} の差、すなわち外渦と内渦との y 間隔が、ほぼ静止円柱の渦列の y 間隔に等しい、2) 渦列の x 間隔 λ_x も4/3倍程度大きい、3) 「Net型」渦列にだけ存在する λ_z は、渦列が下流に移行しても一定値を保つことである。

外渦の y 間隔 λ_{yo} は、他のどの型の渦列に比しても著しく広い。円柱直後の渦の移動状況と円柱に作用する力は密接に関連し、渦列が円柱後流軸に近づけば円柱は推力を受け、逆に外側に移動すれば抗力を受ける⁽⁴⁾。

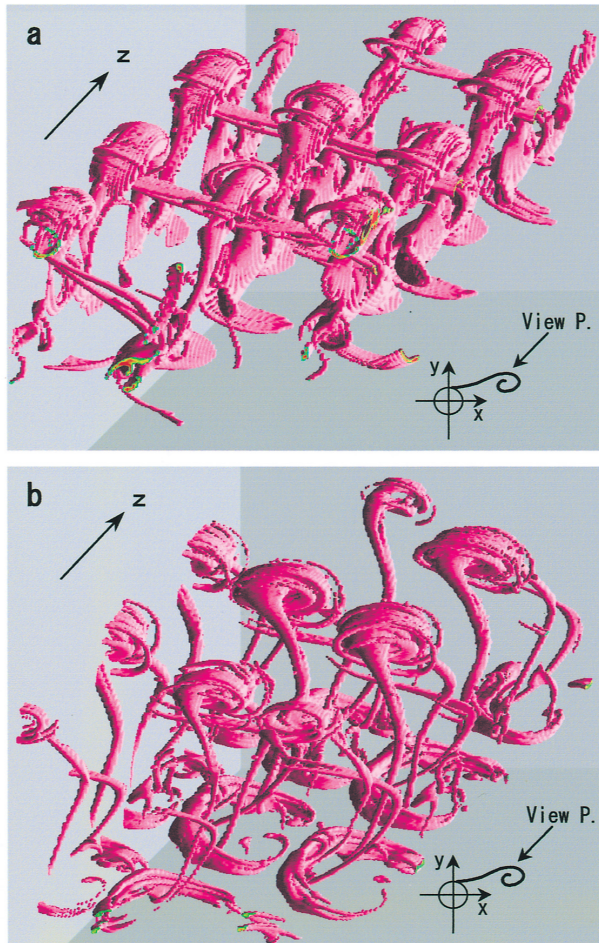


図5 Taylor 仮説 3D 画像 (a) $x/d=11$ (b) $x/d=25$

流れ方向に円柱を振動させるには、付加的な抗力と推力を要するので、静止円柱の場合に比して、振動円柱の渦列の y 方向移動は大きくなる可能性がある。特に、「Net型」渦列でその移動が最大になる理由は、振動円柱背後からの渦放出と関連して興味ある課題である。

(b) 「Taylor 仮説 3D 画像」表示 図5は、観察断面 $x/d=11$ (図(a)) および $x/d=25$ (図(b)) を通過する渦列のTaylor 仮説 3D 画像を示す。渦列は、円柱表面の上表面だけから溶出する色素によって可視化されているので、色素分布は時計方向に回転する渦度の分布状況を示す。したがって、これらのTaylor 仮説画像は、時計方向に回転する渦の渦核構造を立体表示している。これらの画像が表示する3D 渦構造は、渦列の可視化写真(図2)や渦核モデル(図3)と良く対応しており、前述の渦核モデルが妥当であることが確認できる。

3. 2. 「Net 型」渦列の運動学的渦構造

(a) 渦度分布 図6は、前報⁽²⁾の方法を用いて求めた $x/d=11.0$ を通過する渦列の渦度の等値線図である。図(a)は xy 断面、図(b)は xz 断面($y/d=1.5$: 図3 (c) DD断面、渦 V_1, V_2)の渦度を示す。この図から、 xy 面内の外渦、内渦、および xz 断面内の渦として観察された渦領域は、いずれも、渦度の集中領域であり、渦度分布は前掲の可視化写真(図2)が示す渦構造と良く対応している

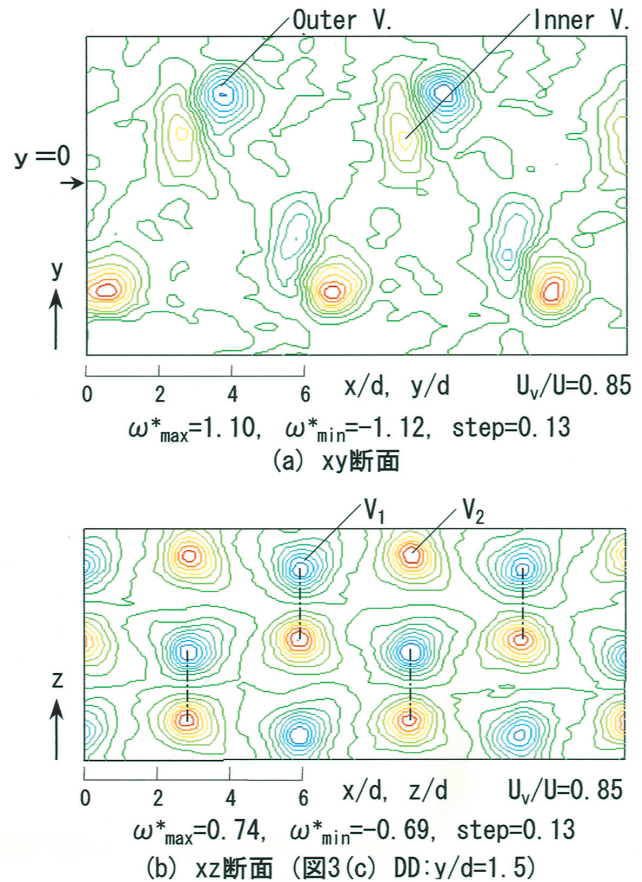


図6 渦度分布、 $x/d=11.0$

ことが分かる。これは、Taylor 仮説に基づく速度場の測定結果が妥当であり、円柱表面を始点とする流脈模様を渦核構造と見なすことが妥当であることを示す。

(b) 渦の特性値 σ Taylor 仮説速度場の速度勾配テンソル F の不変量: $p = -\text{trace } F$, $q = \det F$, 渦度 ω を用いて、渦領域の渦特性を定量化した。図7は、縦軸: $4q - p^2$ と横軸 ω^2 の位相面上のプロット点と渦特性の関係を示す説明図である。流体粒子の軌道の旋回角速度を Ω とすると、縦軸 $4q - p^2 > 0$ は $(2\Omega)^2$, 横軸は ω^2 であるので、傾き 1.0 の直線上のプロット点は、流体粒子の旋回角速度と自転角速度が一致 ($2\Omega = \omega$) する、すなわち剛体回転に対応し、Rod 状渦特性が最も強い。また、主変形速度を γ とすると、図中の距離 AB_1 ; AB_2 は、いずれも $(2\gamma)^2$ である。したがって、プロット点が直線: $(2\Omega)^2 = \omega^2$ から離れる程、渦特性は、Rod 状渦 (剛体回転) 特性が弱く、Sheet 状渦 (せん断変形速度が大) 特性が強くなる⁽⁶⁾。なお、図中の W_k は渦度数である。

図8は、「Net 型」渦列の特性値を、 $4q - p^2$ と ω^2 の位相面上に表示した一例である。外渦と内渦の特性値と対比するために、 xy 断面における内渦の ω^2 に負号を付している。これらのプロット点の分布状況から、「Net 型」渦列を構成するそれぞれの渦の特性が分かる。

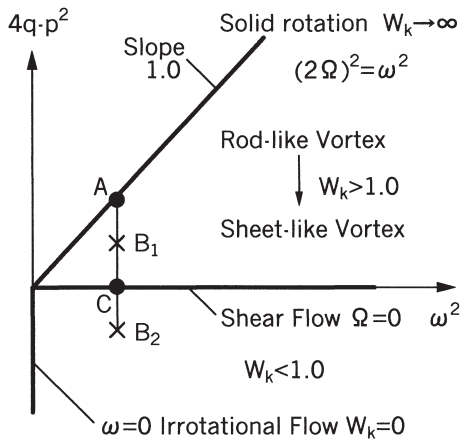


図7 渦特性の位相面プロット説明図

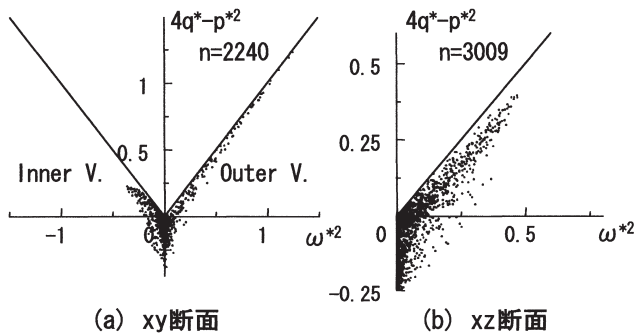


図8 渦特性の位相面プロット、 $x/d=11.0$

渦領域の平均的な渦特性を数値化するために、この位相面上の $\omega > \omega_c$ のプロット点に対して、特性値 σ を次式により算出した⁽⁶⁾。 σ の値は、Rod 状特性が最大の剛体回転の時ゼロで、Sheet 状特性が強い程大きくなる。

$$\sigma \equiv 1 - \{ \langle 4q - p^2 \rangle / \langle \omega^2 \rangle \} = \langle (2\gamma)^2 \rangle / \langle \omega^2 \rangle$$

ここで記号 $\langle \rangle$ は平均値を表す。図9に、 $\omega_c = \omega_{max}/8$ の場合の特性値 σ と x/d の関係を示す。「Net 型」渦列の外渦の σ は、図中破線で結ぶ静止円柱の場合の測定値に一致し、外渦は Rod 状の渦特性が強いことを示す。これに対して内渦と xz 断面の渦は Sheet 状特性が強いことが分かる。内渦の σ の値は、 $x/d=7$ の場合より $x/d=11$ の場合のほうが小さい。これは、 $x/d=7$ では剥離せん断層の巻き込みが不十分で、 $x/d=11$ では、巻き込みが進み、より明確な渦領域を形成していることを示す。

4 結 言

1. 円柱表面を始点とする流脈を詳細に観察することによって、「Net 型」渦列の 3D 渦核構造を渦核モデルとして 3 面図表示した。そして、 yz 面を通過する渦列の数秒間に亘る一連のビデオ画像を 1 枚の画像に合成することによって、渦核の 3D 形状を Taylor 仮説 3D 画像に表示し、上述の渦核モデルの妥当性を確認した。
2. 円柱後流に設置した電極細線を通過する流速の測定値から、Taylor 仮説を用いて「速度勾配テンソル F 」を算出し、渦列の xy 面内の外渦と内渦および外渦の xz 断面内の渦特性 (渦度分布、Rod 状渦と Sheet 状渦の強弱を示す特性値 σ) を明らかにした。

文 献

- 1) 永田,石丸, 航技研 SP-18 (1992), 91-95
- 2) 森, 福島, 永田, 航技研 SP-28 (1995), 65-72
- 3) 永田,中山,可視化情報, Suppl.2(1998),79,CD-ROM 付
- 4) Sarpkaya, T., Trans. ASME, Ser.E, (1963), 13-15
- 5) 永田, 成田, 航技研 SP-36 (1997), 129-132
- 6) 永田, 成田, ながれ, 17 別冊 (1998), 145-146

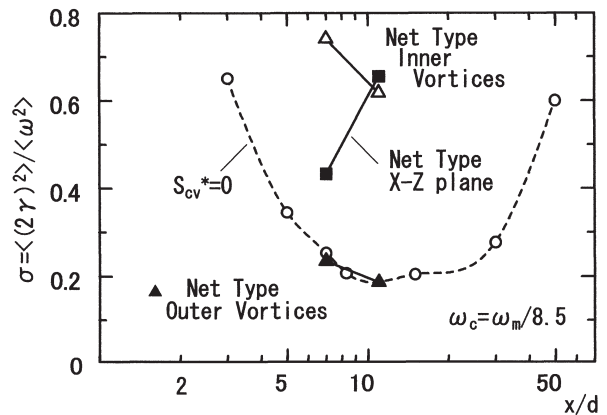


図9 渦の特性値 σ と x/d の関係