

No.5

振動円柱後流中の渦列の Lock-in 帯域における形成過程

永田 拓、大橋 央、代田 幸平（岐阜大工）

Formation Processes of the Vortex Streets in the Wake of an Oscillating Cylinder in a Lock-in Range

H. Nagata, H. Ohashi and K. Shiota
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” and “P-type” vortex streets in the previous paper. These types of the 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. While “P-type” vortex streets have a stable 2D vortex structure. In this report the formation processes of the vortex streets in the lock-in range were studied by mean of flow visualization experiments. By comparing the flow patterns in the near wake to form “Net-type” and “P-type” vortex streets, we discuss the mechanism how to form the two different types vortex streets in a lock-in range.

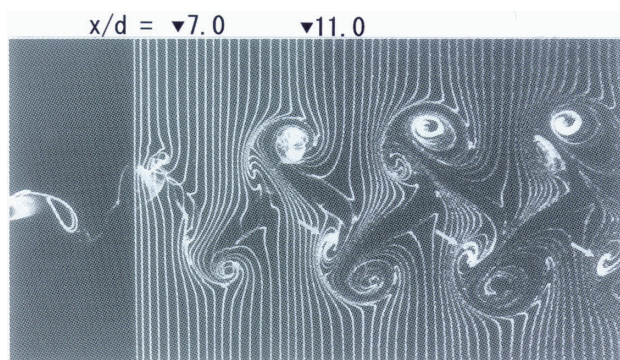
Key Words : vortex streets, circular cylinder, lock-in range, 3D vortex structure, flow visualization

1 はしがき

一様流中で円柱を流れ方向に振動すると、円柱の後流には、著しく多様な渦構造が形成される。前報¹⁾では、この場合の渦列の形態を詳細に観察し、整然として安定した渦列やカオス的な渦列を含む渦列の形態を7つの型に分類した。円柱の振動に同期して、渦が放出される Lock-in 帯域では、きわめて安定した「Net型」渦列と「P型」渦列が形成される。前報^{2,3)}で示したように、Net型渦列は、特異な安定した3次元渦構造を示す。これに対してP型渦列は、整然とした2次元な渦列である。本研究では、Near-Wakeの詳細な可視化実験を行い、この2つの型の渦列の形成機構を明らかにした。

2 実験の装置と方法

2.1 概略 回流水槽中で流れ方向に振動する円柱(直径 $d=8\text{mm}$)周りの流れの可視化実験を行った。前報^{2,3)}と同様に、渦核構造は電解沈殿法で可視化した。円柱の

図1 「Net型」渦列のLoop断面 ($Re=160$)

振動は、 x 変位 $x_c = A \sin \phi$, $\phi = \omega t$; ϕ : 振動位相、 $A/d=0.1$ 、レイノルズ数 $Re = Ud/\nu = 120 \sim 160$ (U : 一様流速、 ν : 動粘度)である。この場合のLock-in帯域は、 $1.45 < S_{cv} < 2.2$ 、(無次元振動数: $S_{cv} = fc/fv$; fc : 円柱の振動数、 fv : 円柱静止時の渦放出周波数)で、Net型渦列およびP型渦列は、それぞれ、このLock-in帯域の下限近くおよび上限近くで形成される。そこで、 $S_{cv}=1.5$ (「Net型」) および $S_{cv}=2.0$ (「P型」) の場合について実験を行い、両者を対比した。座標系は円柱軸を z 軸、円柱の後流軸を x 軸とする右手 xyz 系とする。

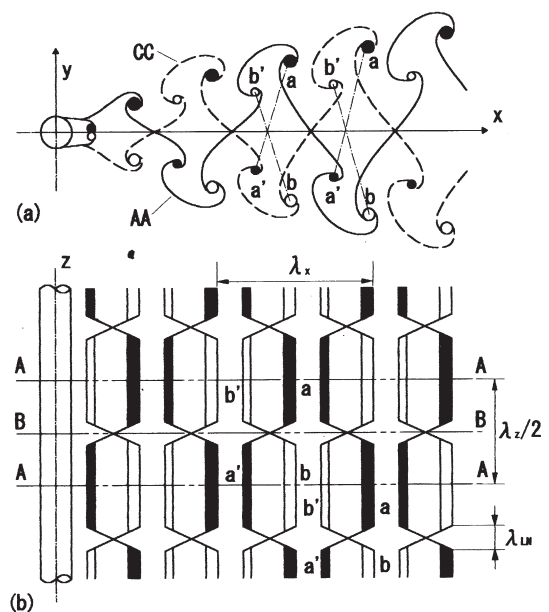


図2 「Net型」渦列の渦核モデル

2.2 Near-Wakeの渦核3D画像の創成方法 Near-Wake中のzを固定したxy面内の周期的に変化する流れをレーザーシート光で鋭く光切断し、この観察面内の一周期に亘る渦核模様をビデオ撮影する。ついで光切断面位置を Δz きざみで増やして、同様な撮影を繰り返す。こうして得られた一連のビデオ画像の中から円柱の振動位相 ϕ を特定した渦核模様を抽出し3D画像に合成した^{3,4)}。つまり、渦核のxy面断層写真を立体視画像に合成した「位相抽出画像」である。一例を後述の図5に示す。この図は、 $\Delta z=0.5\text{mm}$ 、120枚の断層写真から合成されている。

3 実験の結果と考察

3.1 Lock-in帯域 前報¹⁾で示したように、前述の実験条件においてLock-in帯域は、無次元円柱振動数 S_{CV} が、 $1.5 < S_{CV} < 2.2$ の範囲である。この範囲では、渦放出周期 T_v は円柱振動周期 T_c の2.0倍となり、きわめて安定した渦配列となる。しかし、この帯域の下限近くと上限近くで形成されるNet型渦列(前報²⁾参照)とP型渦列(後述)の形態は著しく異なる。Net型渦列とP型渦列の形成を分ける S_{CV} の値は明確ではなく、その形成には、強いヒステリシスが存在する。また、形成される渦列の型はスパン方向に異なり、Net型渦列とP型渦列が共存する S_{CV} の範囲は広い。

原理的に、 S_{CV} が1.0の場合は、渦放出と円柱の振動

は同期する。しかし、 S_{CV} が1.0近くにLock-in帯域は認められない。 S_{CV} が1.0近くでLock-in帯域が存在するためには、円柱が1回振動する間に一对の2つの渦を放出する必要がある。つまり、渦が交互放出されるためには、円柱振動位相差が 2π ではなく π で、円柱の振動が渦の放出を促す必要がある。本実験のように円柱が流れ方向に振動する場合には、円柱の振動は、上下2つの剥離点近傍の流れに同一の影響を及ぼす。この影響は、円柱振動位相差 2π で繰り返される。したがって、 $S_{CV}=1.0$ 近傍に交互放出型の渦列が形成されるLock-in帯域は存在しない。本実験で特定した円柱振動周期の2倍の渦放出周期を持つ S_{CV} の帯域： $1.5 < S_{CV} < 2.2$ が、 S_{CV} の最も小さいLock-in帯域である。

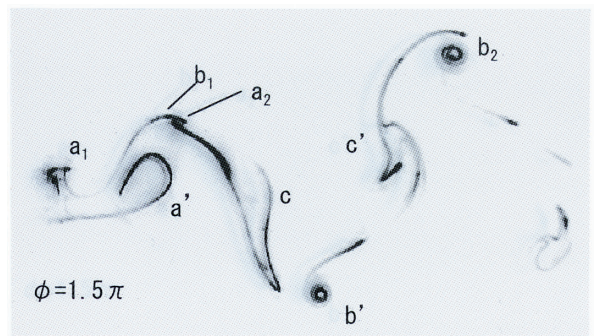


図3 「Net型」渦列のNear-Wake, Loop断面

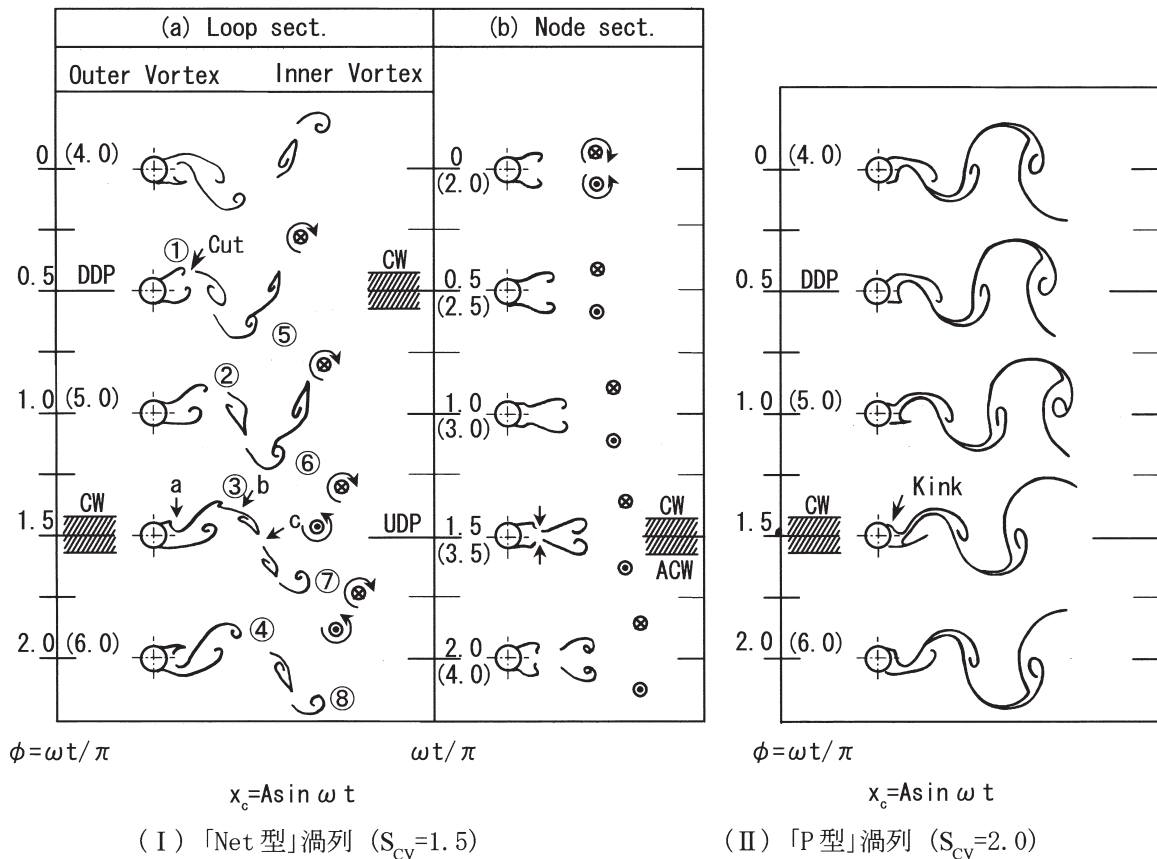


図4 渦列の形成過程のスケッチ図 (Re=160)

3.2 「Net 型」渦列の渦構造 図1は、Net型渦列の可視化写真を示す。円柱の下流に2組の渦列（4列の渦列）が形成されているように見える。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（図中矢印：CWに回転する内渦）。この渦列で注目すべきは、渦列のスパン方向にも明確な周期性があることである。

この渦列の渦核構造をモデル化して2面表示すると前報²⁾で示したように図2のようになる。図2(b)のAA断面及びCC断面の渦構造を、図(a)にそれぞれ実線及び破線で示す。黒丸表示の(白丸表示の)渦は、すべてCW回転(ACW回転)する。図2(b)のBB断面は、同方向に回転する外渦と内渦が繋がる断面であり、図(a)では、一点鎖線で示すように「外渦●a」は「外渦○b」は上流の「内渦●a'」に「内渦○b'」に繋がる。以後、AA断面およびBB断面を、それぞれLoop断面およびNode断面と呼ぶ。

3.3 「Net 型」渦列の形成機構 図3に、渦核模様の可視化写真の一例を示す。図4は、このような写真から円柱の振動位相 ϕ とNear-Wakeにおける渦核模様との関係をまとめたものである。図中、振動円柱の上流死点UDPは $\phi = 1.5\pi$ 、下流死点DDPは $\phi = 0.5\pi$ である。図4 I (a)はLoop断面（図2(b)のAA断面）、図4 I (b)はNode断面（図2(b)のBB断面）内の流れを示す。

渦核模様は、円柱の振動位相に完全に同期して周期

的に変化する。Node断面では、渦核模様は上下対称で、その周期は円柱の振動周期 T_C (ϕ の 2π 周期) に一致し、Loop断面ではその周期は円柱の振動周期の2倍、 $2T_C$ (ϕ の 4π 周期) である。

Near-Wake中の渦核模様を $F(x, y, z, \phi)$ とし、円柱の上面、及び下面からの剥離せん断層が形成する渦核模様は、それぞれUとLの添字を付して F_U 及び F_L と表す。 F_U 及び F_L は、周期性及対称性に注意すると次の関係がある。

Node断面; $F_L(x, y, z, \phi) = F_U(x, -y, z, \phi)$ (1)

$F_U(x, y, z, \phi) = F_U(x, y, z, \phi \pm 2\pi)$ (2)

Loop断面; $F_U(x, y, z, \phi) = F_U(x, y, z, \phi \pm 4\pi)$ (3)

$F_L(x, y, z, \phi) = F_U(x, -y, z, \phi \pm 2\pi)$ (4)

$F_U(x, y, z \pm \lambda_z/2, \phi) = F_U(x, y, z, \phi \pm 2\pi)$ (5)

したがって、Loop断面における $\phi = 2\pi \sim 4\pi$ の渦核模様は、位相 ϕ を 2π 進めて見れば $\phi = 0 \sim 2\pi$ の渦核模様から読み取ることができる。

図中のハッチングと矢印は、剥離せん断層が渦領域を形成して下流に放出される時期を示す。渦放出時期は、剥離せん断層を示す色素線の折れ曲がり(Kink)や途切れ(Cut)の出現によって判定した。 $\phi = 0.5\pi$ (下流死点)で、内渦への放出が始まり、 $\phi = 1.5\pi$ (上流死点)でCWの外渦への放出が始まる。この時点で、下方に長く伸びていた渦領域は、図中③で示す渦に巻き取られる部分(矢印b)と内渦(CW)を形成する部分(矢印c)に分断される。前掲の図3は、この場合の可視化写真である。



図5 円柱上面から溶出色素が示す渦核構造 (位相抽出3D合成画像)

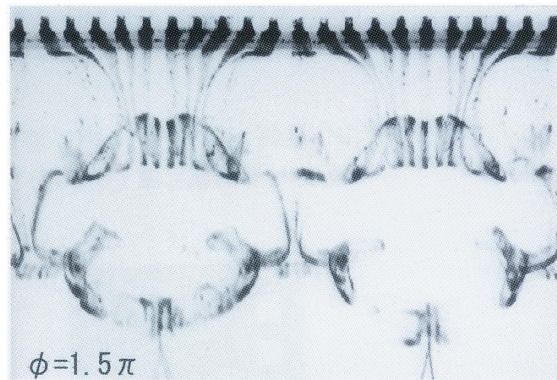
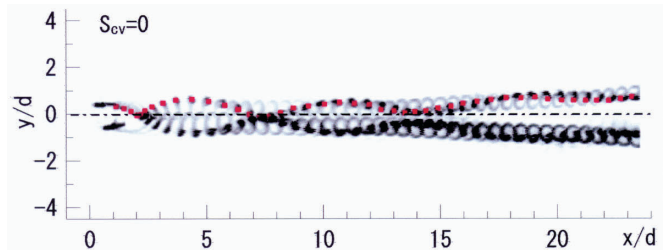
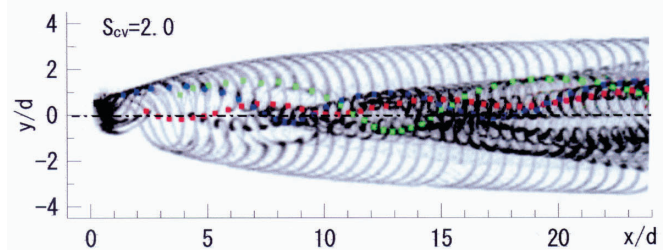


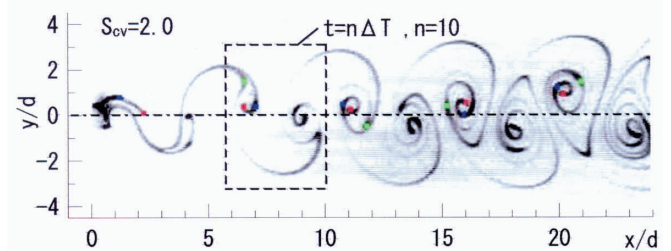
図6 円柱の上表面からの剥離せん断層の流出状況



(a) $\phi = n \Delta \phi$, $\Delta \phi = 0.5\pi$, $n = 0, 1, 2, \dots, 45$



(b) $\phi = n \Delta \phi$, $\Delta \phi = 0.5\pi$, $n = 0, 1, 2, \dots, 45$



(c) $\phi = 0.5\pi$, ---- :Lagrangian frame

図7 一对の渦列の重ね合せ画像, $Re=145$

Net 型渦列の著しい特徴は、上述のような Loop 断面 ($z=0$) における内渦の形成と、式 (4) と (5) で示すように、 $z=0$ と $z=\pm\lambda_z/2$ における渦核模様が x 軸に対して対称であることである。すなわち、 $z=0$ 断面で渦核が $y>0$ に在る時、 $z=\pm\lambda_z/2$ では $y<0$ に存在する。両断面における渦核は Node 断面を介して繋がっているため、円柱背後には、円柱軸に交差する渦核：渦度の x 成分と y 成分が大きい渦核が存在する。図 5 は $\phi=1.5\pi$ における渦核の 3D 構造を立体視したものである。この図は、円柱の上面から剥離するせん断層が作る上述の 3 次元的渦構造を視覚化しており、円柱軸に交差する渦核の存在が良く分かる。このような渦核の存在は、剥離点近傍の流れに強い影響を及ぼし、剥離せん断層の z 方向の偏向流出と、渦領域に供給される渦度流束の大きさに変化をもたらす。図 6 は、このような剥離せん断層の偏向流出状況を示す白黒反転画像の一例である。

3.4 「P型」渦列 この渦列は円柱軸に平行: Parallel に形成され、側壁近傍を除けば、きわめて安定した 2 次元的な渦列である。図 7 (b) は、下流に移行する一対の P 型渦列 (図 7 (c) 中破線で囲む) を Lagrange 的に見た形状を多重表示したものである。図 7 (a) は、静止円柱の渦列に対する同様な表示である。静止円柱の場合に比して P 型渦列の場合は、円柱表面からの色素の y 方向の広がりが著しく大きく、色素が示す渦中心位置は、むしろ後流軸 (x 軸) に近いことが分かる。

3.5 「Net 型」渦列と「P型」渦列の Near-Wake 図 8 は、Net 型渦列と P 型渦列を形成する円柱の Near-Wake を示す。図 8 (a) に、Net 型渦列の Node 断面と Loop 断面の流れ、図 8 (b) に P 型渦列と Net 型渦列の流れをそれぞれ重ねて表示している。この図から、円柱直後の剥離せん断層の形状は、「Net 型」の Loop 断面と P 型渦列の場合

とは良く類似していることが分かる。

渦列の移流速度が一定で、静止円柱の場合と同じ U_v として、静止円柱からの渦放出周期を T_v とすると、 $S_{cv}=1.5$ の Net 型渦列と $S_{cv}=2.0$ の P 型渦列の波長 λ_z は、それぞれ $(4/3)T_vU_v$ 、および $(2/2)T_vU_v$ となり、静止円柱の場合の渦列間隔は T_vU_v であるため、P 型渦列は、基本的に静止円柱の場合と同じ渦列間隔をとる。これに対して、Net 型渦列の渦列間隔は、より広い $(4/3)$ 倍ことになる。このような広い空間に、Net 型渦列は、スパン方向に周期性をもつ「内渦」と「外渦」から成る特異な渦配列をとるものと考えられる。

前掲の図 4 II は、P 型渦列の形成過程を、渦放出と剥離せん断層の形状に注目して、Net 型渦列の場合と対比したものである。Lock-in 帯域で形成される渦列の剥離せん断層 (渦層) の y 方向への広がりは、他の場合に比して広い。特に「Net 型」の場合は、一対の「内渦」と「外渦」の相互の誘導速度が後流軸の外側に向くので、この広がりは「P 型」よりも圧倒的に広がる。渦層の y 方向の移動は、前報^{3,4)} に記したように、円柱の抗力・推力と密接に関連する⁵⁾。このような渦領域の y 方向の広がりは、渦層の移動と関連し、円柱の振動に要する付加的な抗力・推力が Lock-in 帯域で特に大きいことを反映していると考えられる。

4 結 言

1. 円柱背後における剥離せん断層の形状は、静止円柱の場合と P 型渦列の場合には類似しているが、Net 型渦列の場合とは著しく異なる。
2. Net 型渦列を形成する剥離せん断層は、 x 軸に対称な Node 断面形状と、Loop 断面形状が一定間隔で現れる。Loop 断面では、Net 型渦列と P 型渦列との円柱直後の剥離せん断層の形状に顕著な差は見られない。しかし、「Net 型」の場合、Node 断面と Loop 断面の流れは、円柱振動位相 ϕ について、それぞれ 2π と 4π の周期を持つ。この周期の差が円柱からの剥離せん断層の放出方向を円柱軸方向に偏向させ、円柱背後に円柱軸に交差する渦核が生成される。
3. Lock-in 帯域における渦列の y 方向の広がりは、他の型の場合に比して広く、Net 型渦列が最も広い。Net 型渦列の渦放出周期は、「P 型」の場合に比して長く、より広い領域に渦列が形成される。
4. 上述の状況のもとに、内渦と外渦からなる特異な渦構造をもつ Net 型渦列が形成される。

文 献

- 1) 永田, 石丸, 航空宇宙技術研究所 SP-18 (1992), 91-95
- 2) 永田, 中山, 可視化情報, Suppl. 2 (1998), 79, CD-ROM 付
- 3) 永田, 橋本, 航空宇宙技術研究所 SP-47 (2000), 71-74
- 4) 永田, 橋本, 大橋, 理論応用力学講演論文集 (2001), 103
- 5) T. Sarpkaya, *Trans. ASME, Ser. E* (1963), 13-15

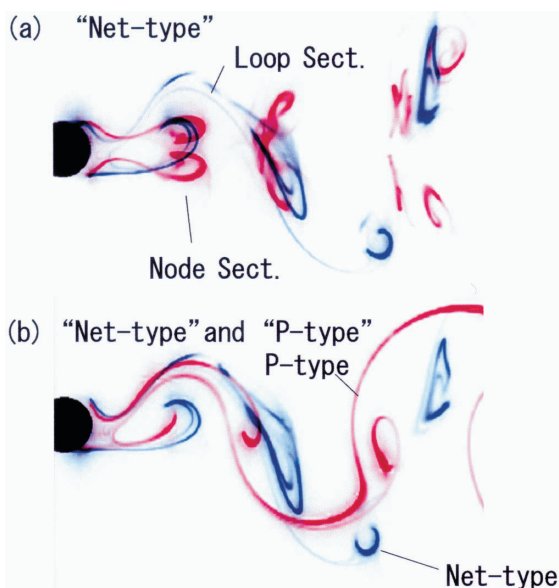


図 8 「Net 型」と「P 型」渦列の重ね合せ画像, $\phi=1.5\pi$