

円柱の Near Wake における Fingers 状二次渦を伴う渦列の渦構造

永田 拓、中山 仁、福島千晴 (岐阜大工)

Vortex structure of the vortex streets with “Fingers-like” secondary vortices in the near wake of a circular cylinder

by

H. Nagata, J. Nakayama, and C. Fukushima

Faculty of Engineering, Gifu University

Fingers-like vortices formed in Karman vortex streets, which are called “Fingers”, were studied by means of flow visualization experiments. The formation mechanism of the “Fingers” induced artificially by a piece of fine wire set to perturb the flow is clarified in the wake of a circular cylinder. The “Fingers” are induced at the both locations outside of the axis of the wire-wake, where the phase of the vortex shedding locally differ from the phase at the other part of the cylinder. The vortex streets shedding from the near wake of the cylinder show extremely stable configuration in the near region of the axis of the wire-wake. The “Fingers” are consecutively formed in self-sustained manner since the local discrepancy of the phase propagates perpendicular to the vortex axis toward the next shedding vortices. The spanwise variation of the phase was observed successfully during a long period in the Taylor hypothesis images and the influences of the “Fingers” induced in the near wake on the vortex structure in the far wake were discussed.

Keywords: Karman vortex street, “Fingers-like” secondary vortex, vortex shedding, Taylor hypothesis.

1 はしがき

カルマン渦列に、二次的に形成される縦渦 : Fingers⁽¹⁾ について詳細な可視化実験を行った。

前報⁽²⁾⁻⁽⁴⁾では、円柱の上流に針金を設置し渦列に攪乱を与えることによって、自然発生では発生位置が定まらない Fingers の発生位置を特定して、流れの可視化実験を行い、その生成機構を明らかにし、円柱の Near Wake における Fingers の発生状況が円柱背後の渦列に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。本研究は、前報の研究目的を継続し、円柱近傍の流れをより詳細に、より長時間に亘って観察した。

実験は、水素気泡法と、円柱表面を発色電極とする電解沈殿法によって円柱まわりの流れを可視化し、ビデオカメラによって撮影した。実験条件は、 $Re=Ud/\nu=140 \sim 160$ (U :速度、 d :直径(主として 8mm)、 ν :動粘度)、円柱の長さ $l=50d$ 、円柱には端板 ($280^H \times 500^L$ mm) が取り付けられている。座標系は、円柱の中心を原点として、円柱軸方向を z 、主流方向を x とする xyz 系とする。

2 実験の結果と考察

2. 1. 円柱近傍の流れと Fingers の発生機構

Fingers の発生臨界値 $Re \approx 150$ より小さい $Re=145$ の流れに、攪乱源としての針金 ($d_w/d=0.1$, d_w :針金直径) を円柱の上流 ($x/d=-3.0$) に設置し、Fingers を人為

的に発生させた。この場合注目すべきは、Fingers は針金の後流軸を挟んでその両側に発生し、針金の後流軸上には決して発生しないことである。図1は、この流れを、水素気泡法と円柱の上半面を発色電極とした電解沈殿法により可視化した写真である。円柱の表面を過ぎる流れの方向を知るために、円柱表面は軸方向に一定間隔でマスキングされている。円柱表面から溶出する色素と水素気泡の流れから、流れは針金の後流軸に引き寄せられていることが分かる。このため円柱表面からはく離する境界層外縁の速度は、針金が無い場合に比して、針金後流軸近傍で大きくなり、針金後流軸の両外側で小さくなる。

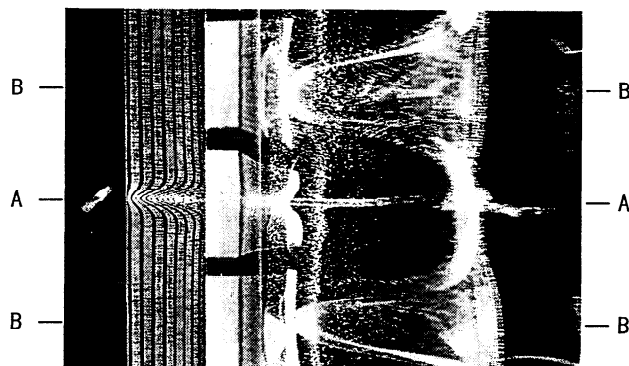


図1 上流に針金を設置した場合の円柱背後の流れ
($x_w/d=-3.0$, $Re=150$)

そのため、針金後流軸の両側で円柱背後からの渦放出位相が遅れ、この位置に Fingers が形成される。

この Fingers の形成機構は、針金の後流に生ずる渦糸が円柱の前方よどみ点に向かう流れで引き伸ばされ、よどみ点近傍に 2 本の首飾り渦が形成されるモデルによって説明できる^{(3),(4)}。この首飾り渦の存在を確かめるために、水素気泡法により円柱まわりの流れを可視化した。電極細線を、円柱の上流よどみ点近く ($x/d \approx -0.5$) の yz 面内に、円柱軸に垂直に 3 本 [針金後流軸 ($z=0$) とその両側 ($z = \pm 2\text{mm}$)], 円柱軸に平行に 1 本 [$y=0$] 設置して、これらの電極細線から流下する気泡が、鋭く光切断した円柱直後 ($x/d=0.5$) の yz 面を通過する様子 (流脈群の切断面) を、水中に設置したビデオカメラで撮影した。図 2(a)(b)は、これらのビデオ画像を示す。このような画像から、この間の y, z 方向の速度成分 v, w の存在と速度分布の概略が検知できる。この場合、流れは y 軸に対称で、速度成分 v と w の存在領域は広く、図 2(c)に示すように、この領域に円柱に巻き付く 2 本の首飾り状の縦渦が存在し、比較的広い領域の流れを針金後流軸に誘引していることが分かる。

2. 2. Fingers 周辺の渦構造

図 3 は、Fingers 周辺の xy 面内における渦列の色素パターンを示す。パターンは、渦列模様を $1/8T$ (T : 渦放出周期) の時間間隔で撮影した 4 枚のビデオ画像を重ねて表示したものである。図(c)は針金の後流軸断面 (図 1 中 AA)、図(b)は Fingers の発生断面 (図 1 中 BB)、および図(a)は Fingers の発生が無い断面内の渦列パターンを示す。この図から、針金後流軸断面 (図(c)) で、色素が示す渦の形は最も円形に近く (Rod 状渦⁽⁵⁾)、渦

列の放出は際だって明確な周期性を示し、渦列の安定配列は下流に至るまで持続する。これは、上流設置の針金の後流軸に流れが引き寄せられるので、円柱表面に沿う流れが加速され円柱表面で生成されたより大きな渦度が、円柱背後の狭い領域に供給されるためと考えられる。また、この領域の明確な周期的渦放出が、Fingers の外側の渦列に対しても明確な周期的放出を促し、この周辺の流れの周期性を強め流れを安定化しているように見える。

このように、上流設置の 1 本の針金によって針金後流軸断面周辺の流れが安定化されることは、円柱スパン方向に適切な間隔で針金を多数本設置すれば、円柱の全スパン方向に亘って、円柱の後流を安定化できることを示唆している。図 4 は、針金の設置間隔 $\Delta z/d$ を示し、縦軸は Fingers の発生位置 (図中○印) と針金の設置位置 (図中●印) を示す z/d である。針金を多数本設置する場合も、Fingers はそれぞれの針金後流軸の両外側に発生する。そのため、Fingers の発生位置

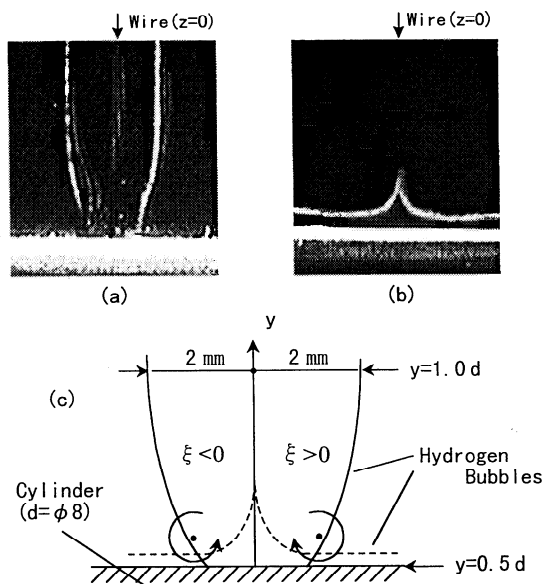


図 2 円柱直後の $x/d=0.5$ の yz 面を通過する気泡群
($x_w/d = -3.0$, $Re=145$)

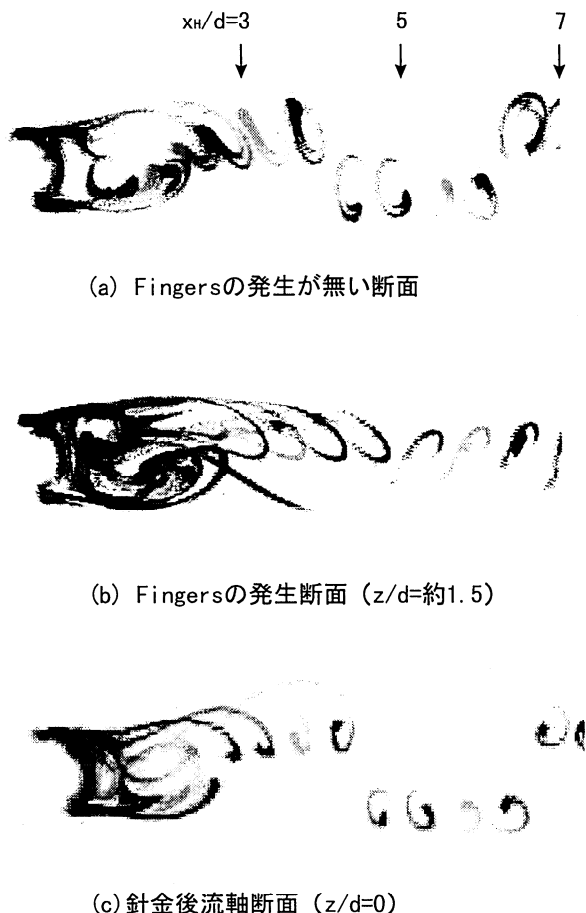


図 3 円柱背後の xy 面内の流れ
($x_w/d = -3.0$, $Re=145$, $\Delta t/T = 1/8$)

が、2本の針金後流軸のちょうど中間位置に一致する場合に、この図では、 $\Delta z_w/d$ が 3.1 の場合に、Fingers は最も安定して形成される。また、この条件が満たされない図中の網掛け領域 ($\Delta z_w/d = 4.8$ から 5.7 の領域) では、Fingers の発生位置は変動し発生位置を特定できない。

図5は、Fingers が最も安定して形成される間隔で、14本の針金を設置した場合の流れを示す。円柱端板近傍の流れを除いて、円柱後流の広い領域に亘って渦配列は整然とし、流れが安定化されていることが分かる。

2. 3. Fingers の発生状況の時間経過

前述したように、Fingers の発生は、円柱を過ぎる流速の円柱軸方向の局所の変化が、渦列の放出位相の変化をもたらすことに起因する。上流設置の針金が無い場合でも、この局所的な流速変化は、流れのゆらぎ、円柱の端板の影響、さらに、下流の渦列からの影響によって生じる。そのため、Fingers の発生状況は時間的にも空間的にも広い範囲に亘って変化する。

本研究では、この変化を知るために、円柱から溶出する色素によって可視化した渦列のビデオ画像から Taylor 仮説画像⁽⁶⁾を構成した。図6は、その一例で、円柱直後 $x/d = 2.0$ 断面を通過する色素輝度の z 分布の時系列データから Taylor 仮説を用いて輝度の $x-z$ 分布に構成した画像で、円柱直後の渦列の形状と放出位相の 60 周期の長時間に及ぶスパン方向変化を示している。画像の上端と下端は円柱端 (側壁) に対応している。

図6(a)は、円柱の上流に針金を設置して Fingers を人為的に発生させた場合 ($Re=145$) の Taylor 仮説画像である。画像の中央に設置されている針金の両側に Fingers が、ほぼ同じ位置に繰り返し形成され、これらの Fingers の他に、円柱端板近くにも、Fingers がほぼ一定間隔で発生していることが分かる。

Fingers の先端は放出渦列軸の垂直上流方向に向かい、次に放出される渦列の Fingers の発生位置を特定するので、Fingers は自己維持的に形成される。円柱端近傍では、渦列は円柱軸に対して傾斜し、渦放出周波数が中央部より低い。そのため、円柱端近くにおける Fingers の先端 (伝搬方向) は画像の中央部に向かい、その発生は渦列のつなぎ変えを伴い、渦列放出位相のスパン方向差異を一時的に解消する⁽⁴⁾。この領域で Fingers がほぼ一定間隔で発生するのはこのためである。

水槽の中央に設置した針金によって発生する Fingers の発生点は、渦列に垂直上流方向に伝搬するので、この中央部分で渦列が円柱軸にほぼ平行な場合には、Fingers の生成位置はほぼ同位置に固定され、下流移行の渦列も安定な配列をとる。しかし、円柱軸に対して放出渦列が傾斜したり湾曲したりすると、Fingers の生成位置は変動し、渦列のつなぎ変えが起こる。渦列のつな

ぎ変えは、円柱背後には対称渦 (双子渦) が形成され⁽⁴⁾、渦放出の一時的中断が起こるので、この部分の下流の渦列は欠落する (Vortex-dislocation)。

図6(b)は、Fingers が自然発生する場合 ($Re=160$) の Taylor 仮説画像である。この図に見られるように、自然発生の場合の円柱端板近くの Fingers の発生状況は、前掲の図6(a)に示す人為発生の場合と同様である。これは、この領域の Fingers の発生が、図(a)の場合と同様に、円柱端板の存在に起因していることを示す。また、端板から遠い領域では、Fingers の発生はまばらで発生場所も固定されないが、自然発生の場合も、基本的な流れは人為発生の場合と変わらない。すなわち、Fingers の発生位置での渦列のつなぎ変えや、下流移行の渦列の欠落など、図6(a)の人為発生の場合と同様な現象が認められる。

2. 4. Fingers の発生と消滅

円柱の上流に3本の針金を設置 (設置位置: $x/d = -3$, $z/d = 0, \pm 3$) し、Fingers を人為的に発生させた。この間隔で針金を設置すると、Fingers が安定して形成され

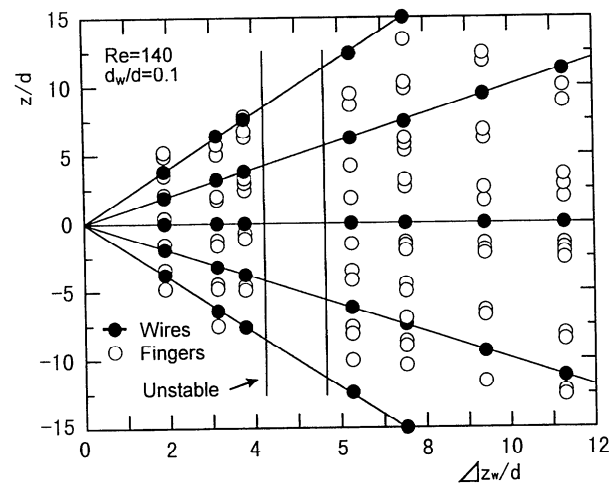


図4 針金の設置間隔 $\Delta z_w/d$ と Fingers の発生状況

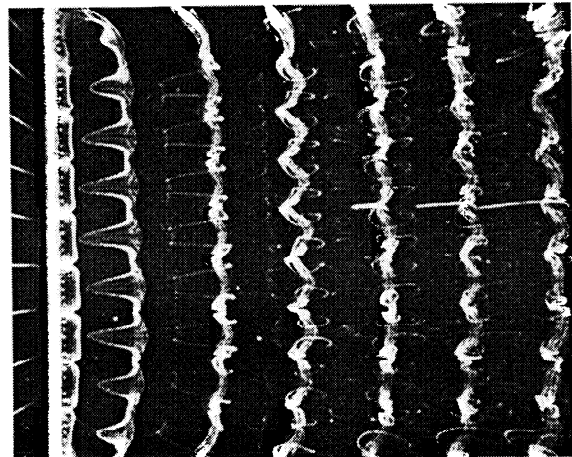


図5 針金をN本設置した場合の円柱背後の流れ
($x_w/d = -3.0$, $z_w/d = 3.1$, $N=14$, $Re=150$)

る(図4参照)。このようにして Fingers が形成された状態のもとで、突然3本の針金を鉛直上方に抜き去り、Fingers が消滅する経過を観察した。この場合針金を除去しても、しばらくは Fingers の発生が持続する。図7(a)は、この経過を知るために、円柱の下流の $x/d=3.0$, $y/d=1.0$ における速度変動の時間変化を熱線で測定した結果を示す。横軸は無次元時間 t/T (T : 渦放出周期)、図中の記号「▲B」は針金除去の時刻を示し、速度変動の振幅の急増は Fingers の消滅を示す。この図から、針金を除去してから Fingers の発生が消滅するまで約 $10T$ の時間を要し、この間上流の攪乱源がなくても、Fingers は自己維持的に形成されることが分かる。つまり、渦放出位相の局所的な遅れは、次いで放出される渦列に伝搬することを示す。

図7(b)は、Fingers の発生がない流れに、前述の3本の針金を突然挿入した場合の速度変動の時間変化を示す。図中の記号「▲B」は針金の挿入時刻を示し、その後の変動速度の振幅の急減は、Fingers の発生に対応している。この図が示すように、針金挿入後 Fingers が発生するまでに約 $6T$ の過渡的な時間を要する。

3. 結 言

1. Fingers の発生は、渦列の放出位相の局所的な遅れに起因する。この位相遅れは放出渦列の中心軸の垂直上流方向に伝搬し、Fingers は自己維持的に形成される。この放出位相遅れの伝搬機構によって、円柱軸に対して傾斜配列の渦列に Fingers が発生する場合には、Fingers を介して渦列のつなぎ換えが起こり、渦放出位相のスパン方向変化が一時的に解消する。この場合、Fingers 発生断面において渦列は途切れ、下流

における渦列の Dislocation の要因となる。円柱軸に平行な渦列に Fingers が形成される場合には、渦列は安定な配列を示す。

2. 上流設置の針金によって Fingers が生成される時、針金後流軸断面で渦列はきわめて安定な配列をとる。針金を一定間隔で多数本設置する場合、針金設置間隔と、Fingers の発生状況および渦列の安定配列との関連が明らかにされた。
3. Fingers の自己維持的生成機構は、上流設置の針金の挿入と除去によって確認できた (挿入から約 $6T$ 後に形成、除去から $12T$ 後に消失)。
4. 円柱表面から溶出する色素が示す流脈模様の Taylor 仮説画像から、渦列の放出位相の長時間にわたる円柱軸方向の変化を簡便に知ることができた。

文 献

- 1) Gerrard, J.H., *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 288 (1978), 351
- 2) 永田, 池田, ながれ, 9 巻別冊(1990), 262
- 3) 永田, 洞山, ながれ, 12 巻別冊(1993), 14
- 4) 永田, 洞山, 航空宇宙技術研究所 SP-21(1993), 79
- 5) 永田, 他 3 名, ながれ, 17 巻別冊(1998), 145
- 6) 永田, 他 3 名, 可視化情報, 18(1998)79, CD-ROM 付

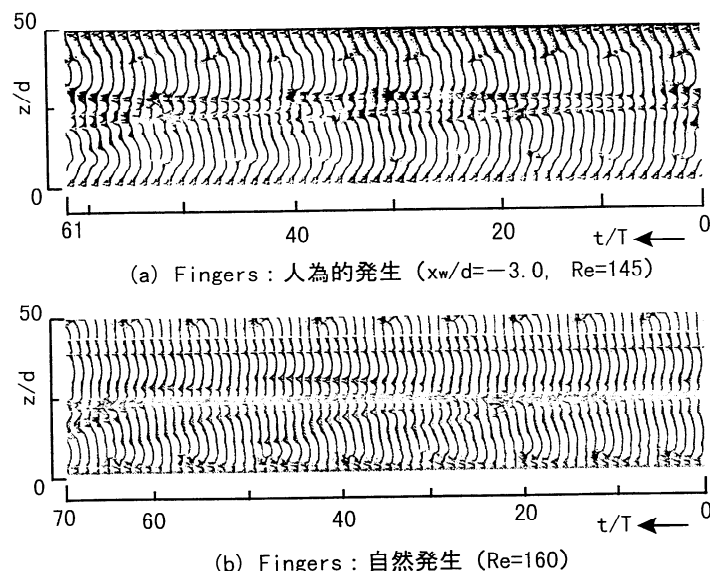


図6 Taylor 仮説画像で示す渦列の放出位相変化

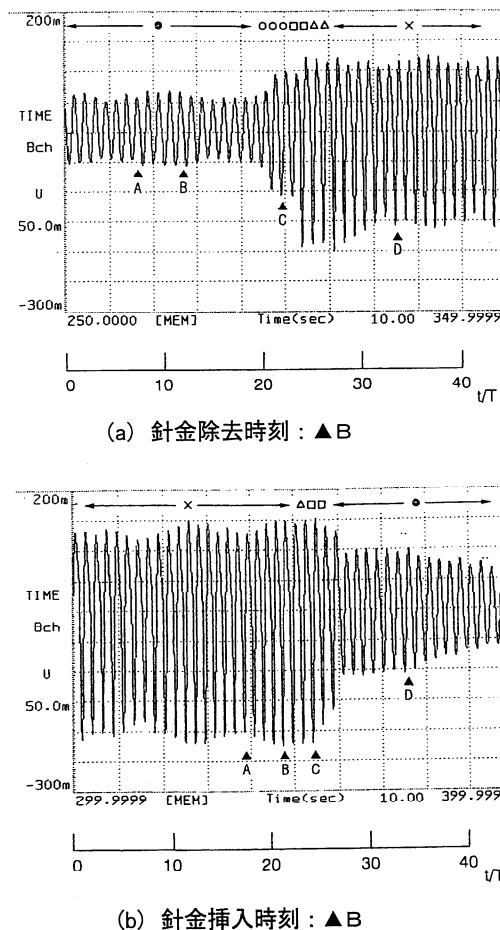


図7 円柱後流中の速度変動波形 ($x/d=3$, $y/d=1$)