

円柱伴流内の渦列の再配列

名城大・理工 奥出宗重、松井辰彌

1. まえがき

円柱伴流の渦列は、 $Re \leq 160$ の場合、円柱直後で安定で規則的であるが、下流にゆくに従い不規則性が現われその形を崩す。さらに下流で上流の渦列より規模の大きい第二の渦列に再配列される。この現象は最初 Taneda¹⁾ によって発見された。その後、筆者ら²⁾ は上流の第一の渦列から第二の渦列に至る速度変動のスペクトルの変化を調べ、第二の渦列の周波数を求めている。さらに、円柱上流から導入した一本の煙線で可視化した流れ模様を接写撮影した結果、流れ模様は第二の渦列が第一の渦列内の二つずつの渦の融合によって起こることを示していた³⁾。最近、Cimbala ら⁴⁾ は、第一の渦列が変形する範囲にスモーク・ワイヤを置き、その後の流れを観察している。この流れ模様は、スモーク・ワイヤの直後で、煙の条線が渦の輪郭を示さず波状を呈し、やがて下流でカルマン渦列の形になっている。このことから、彼らは、第一の渦列の変形する範囲で、第一の渦列内の渦は消滅し、第二の

渦列は伴流内の速度分布の不安定性による波が発達して形成されると考えているようである。彼らは、筆者らの可視化の方法による流れ模様の解釈に誤りがあると述べている。

本研究の目的は、第一の渦列から第二の渦列への遷移の範囲で第一の渦列内の渦が消滅してしまっているかどうかを調べることに、第二の渦列が第一の渦列内の渦の融合によって起こるかどうかを調べることにある。

2. 実験結果

図1は第一の渦列から第二の渦列に至る流れ模様を示す。円柱上流から一本の煙線を導入し、これを円柱上流の淀み点に導き伴流内の渦列を可視化したものである。白い煙の塊は渦を示すと思われる。

$x/d < 50$ で、第一の渦列が観察される。白い煙の塊が千鳥状に規則的に並んでいる。第一の渦列内の渦の流れ方向の間隔は、 $x/d = 70$ 近くで変化が現われる。この下流の

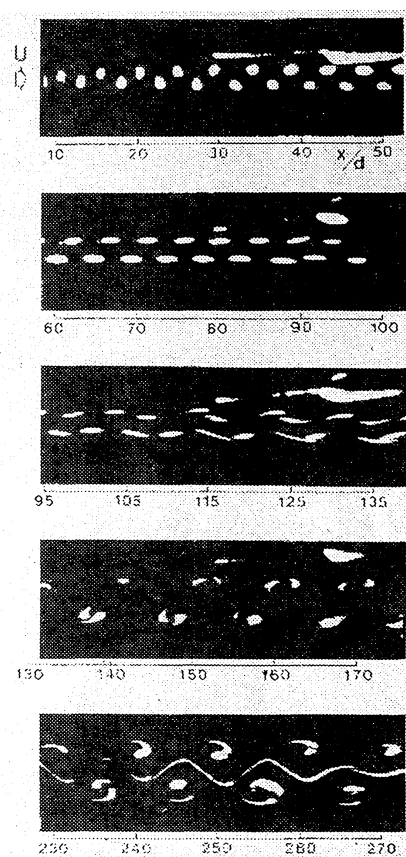


図1 円柱上流から一本の煙線を流した場合の流れ模様。 $Re = 140$

$x/d = 100$ で二つの渦の融合しつつあるのが観察される。さらに下流で二つの渦が融合し、第二の渦列は $x/d = 250$ 前後で完成しているように見える。

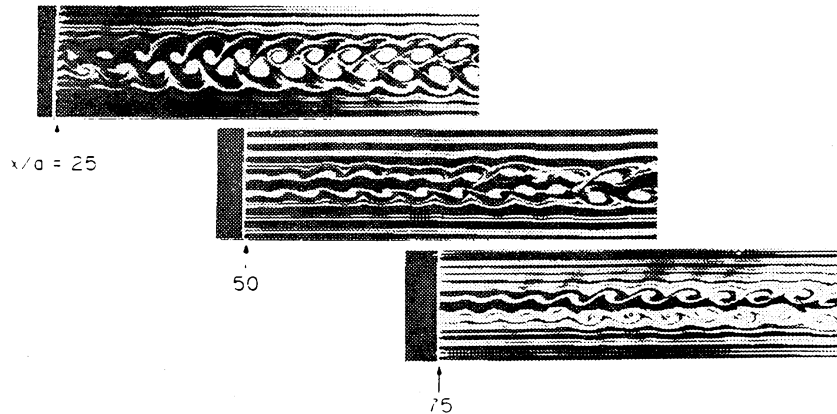


図2 円柱下流の伴流断面内にスモーク・ワイヤを置いた場合の流れ模様。 $Re = 140$

図2は Cimbala らと同じ方法で可視化した流れ模様を示す。すなわち、スモーク・ワイヤを $x/d = 25, 50$ および 75 に置いた場合のその下流の流れ模様を示す。

円柱直後の $x/d = 25$ 場合、条線の示す流れ模様の中に第一の渦列が観察される。この場合は、煙を円柱上流から導入した場合とよく似た流れ模様が現われる。下流の $x/d = 50$ の場合、 $x/d = 25$ の場合より小規模ではあるが、第一の渦列を示す条線が現われている。さらに下流の $x/d = 75$ の場合、条線はスモーク・ワイヤ直後で波状を呈しているのみで、 $x/d = 25$ の場合に現われていた渦を示す条線は観察されな

い。このような流れ模様から、Cimbala らはこの位置では渦が消滅していると思っているようである。このように、同じ断面であってもスモーク・ワイヤの位置によって、条線の示す流れ模様の異なることが分かる。図1の場合、 $x/d = 75$ で第一の渦列内の渦の流れ方向の間隔に変化が現われていた。次に、Cimbala らが言うように、 $x/d = 75$ で渦は消滅していて、筆者らの可視化の方法による図1の流れ模様に現われた $x/d = 75$ 近くの煙の塊は渦ではないのかどうか確かめる。

図3は図1の $x/d = 75$ で見られる煙の塊を二本の熱線で挟み渦列の外側 ($y/d = 2.63$) にある熱線の波形の山でストロボを発光して撮影した流れ模様を示す。ストロボの発光の瞬間は時間軸上に示されている。熱線の位置を ∇ および $\triangleleft$ で示す。白い煙の塊は、二本の熱線の間にある。

熱線が渦列の外側に置かれている場合、流れ方向の同じ断面を渦が通過すると熱線の信

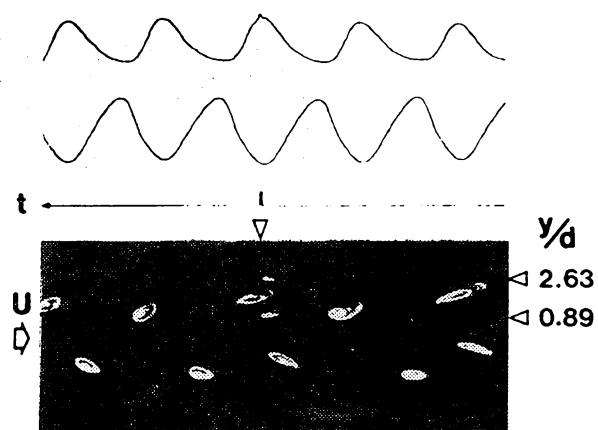


図3 流れ模様に現われた煙の塊と速度変動の関係。 $Re = 140$

号は、山を示すことが分かっている⁵⁾。また、図3の内側 ($y/d = 0.89$)、すなわち、白い煙の塊の下にある熱線の信号は、このとき谷を示している。したがって、白い煙の塊は時計方向に回転する渦であることを示す。 $x/d = 75$ において、第一の渦列内の渦は消滅していないことが分かる。

図4は条線によりカルマン渦列を可視化する実験を数値シミュレーションした福西⁶⁾らの結果を示す。カルマン渦列内の点渦モデルを有限な大きさの渦核を持つ渦に置き換え、循環値を一定として、下流に行くほど渦核が大きくなる場合について計算したものである。

渦核の小さい上流断面に煙を導入したと仮定した場合、渦

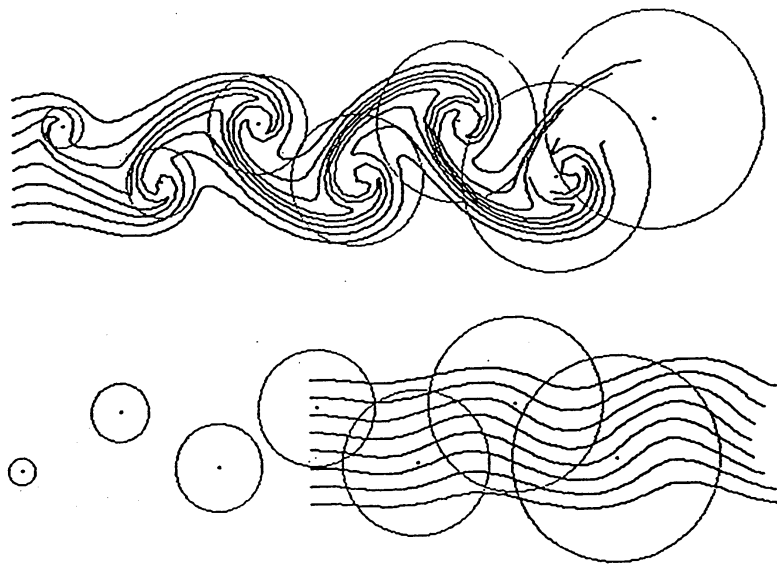


図4 カルマン渦列を可視化する実験の数値シミュレーションした結果(福西)。

列の存在を示す流れ模様が現われている。円柱上流から煙を導入した実際の流れの流れ模様によく似ている。一方、渦核が比較的大きくなった断面に煙を導入したと仮定した場合、図から分かるように、渦列内の渦の輪郭を示す流れ模様が現われていない。条線は波打つのみである。この結果は

Cimbala らの行なった可視化の方法で得た流れ模様と非常によく似ている。Cimbala らの実験のように渦による速度変動が小さくなった領域および渦核がかなり大きくなった断面にスモーク・ワイヤを置いて可視化した場合、渦列の輪郭を示す条線の流れ模様は現われない。Cimbala らは筆者らの可視化の方法による流れ模様の解釈に誤りがあると述べているが、むしろ彼らの可視化の方法による流れ模様のほうが流れを忠実に表していないことが分かる。

図 5 は筆者らの図 1 の方法で可視化した流れ模様のなかで、二つずつの白い煙の塊が融合しつつある断面で求

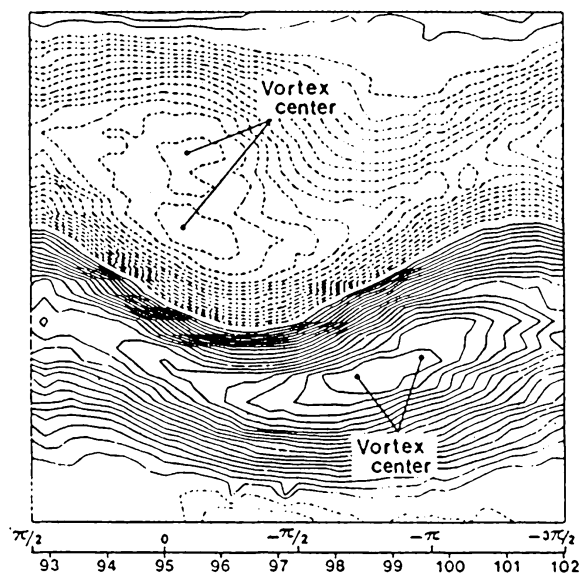


図 5 等渦度線図。 $Re = 140$,

$$x/d = 95$$

めた等渦度線を示す。渦度は、断面内の速度 u および v を流れの中に固定した熱線の信号で条件付抽出し、テイラー仮設を利用して求められた。自然流の場合、第一の渦列の下流断面で速度変動が多少不規則になるので、流れに第一の渦列の周波数の $1/2$ の周波数の擾乱をかけて、速度変動を規則的にして求められた。擾乱を加えると、流れ模様の中に現われる白い煙の塊の融合の位置は、多少上流に移動する。破線と実線はそれぞれ渦度の正負を示す。

$y/d < 0$ の範囲に渦中心を示す渦度の値の絶対値の最大値が二つある。これらの二つの渦は、それぞれ閉じた等渦度線で囲まれ、さらにこれらを同時に囲む等渦度線の中にある。すなわち、二つの渦の融合しつつあることを示す。等渦度線の輪郭は、筆者らの可視化した流れ模様によく似ている。

図 6 は閉じた等渦度線内について図式積分して求めた渦の循環値の下流方向への変化を示す。

循環値は下流に行にしたがって小さくなる。 $x/d = 75$ 程度から下流で渦の融合が起こり、その値は急に大きくなっている。 $x/d > 75$ の範囲の破線は、渦が融合しないとした場合の上流からの延長線であるが、この破線の二倍の値を実線で示すと、 $x/d > 75$ の範囲の循環値は、この近くに現われる。すなわち、二つの渦が融合して一つの渦を形成したと考

えられる。第二の渦列は第一の渦列内の渦の融合によって起こる。

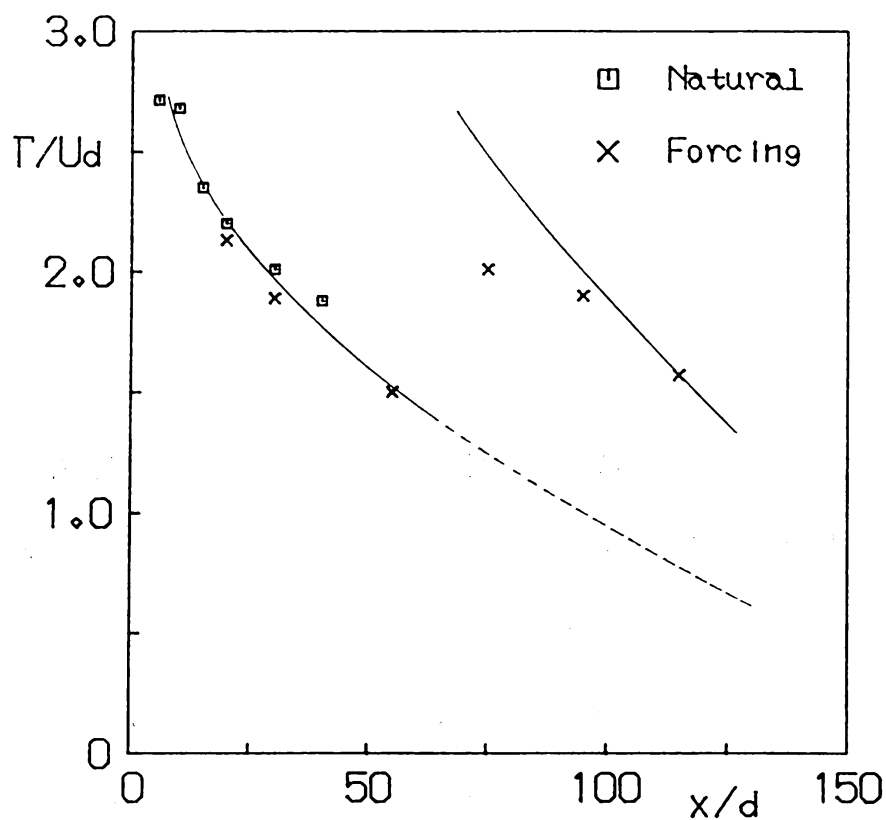


図 6 渦列内の渦の循環値の下流方向への変化。Re = 140

3. むすび

以上の結果から次のことが分かった。

- 1) 比較的下流の伴流内の渦列を可視化する場合、伴流内にスモーク・ワイヤを置くよりも上流断面に置いて可視化したほうが渦の輪郭が明瞭に現われる。
- 2) 第一の渦列から第二の渦列への遷移領域で、渦は消滅していない。
- 3) 第二の渦列は、第一の渦列内の渦の融合によって起こる。

参考文献

- 1) Taneda, S.: Downstream development of the wake behind cylinders, J. Phys. Soc. Japan, Vol.14, No.6, 1959, 843-848.
- 2) Okude, M.: Rearrangement of the Karman vortex street, Trans. Jpn. Soc. Aero. Space Sci., Vol.24, No.64, 1981, 95-105.
- 3) 奥出宗重、松井辰彌 : 円柱伴流の渦列内の渦の融合、日本航空学会誌、第36巻、第413号、1988, 291-297.
- 4) Cimbala, J. M., Nagib, H. M. and Roshko, A. : Large Structure in the far wakes of two-dimensional bluff bodies, J. Fluid Mech., Vol.190, 1988, 265-298.
- 5) Okude, M. and Matsui, T : Correspondence of velocity fluctuations to flow patterns in a Karman vortex street at low Reynolds numbers, Trans. Jpn. Soc. Aero. Space Sci., Vol.30, No.88, 1987, 80-90.
- 6) 福西 祐、小川隆申 : 流れの可視化実験の数値シミュレーションによる検証、第20回乱流シンポジウム講演論文集、1988, 46-50.