



円柱列背後のカルマン渦列の研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 北海道教育大学 公開日: 2012-11-07 キーワード: 作成者: 山形, 積治, 沢田, 孝士 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.32150/00001644

円柱列背後のカルマン渦列の研究

山形 積治・沢田 孝士

北海道教育大学旭川分校物理学教室

Photographic Study on Kármán Vortex Trails behind
Several Circular Cylinders

Sekiji YAMAGATA and Takashi SAWADA

Department of Physics, Asahikawa Branch, Hokkaido University of Education

Summary

It is well known that an asymmetric vortex trail is seen behind a cylinder if the Reynolds' number is increased above 20. The authors studied photographically the vortex trails behind several parallel cylinders. When the distance between cylinders is smaller than the width of the vortex trails, the vortex trails interfere with each other and some interesting patterns of the vortex trails are seen.

In the case of the two cylinders, there are the well-known Kármán vortex trails behind each cylinder, but in almost every observed case the phase of the alternating vortices of each cylinder differs as much as a half cycle. Therefore the inside vortices interfere with each other and then fade away. On the other hand the outside vortices lie symmetrically to the plane passing through the center of the line connecting the two cylinders. So the lateral forces by Kármán vortex trails will be weakened.

Such symmetric patterns are also seen in the case of the three parallel cylinders, and behind the middle cylinder are not seen any vortices. In the case of the four parallel cylinders the pattern of the vortex trails is complicated and is likely seen not to be determined uniquely.

1. 研究の目的

細い線や棒に早い気流が当たると音が発生する。この現象は古くから知られ、風神の音、すなわちエオルス音 (*Aeolian Tone*) と言われた。

1906年 *H. Benard* は流体中を運動する円柱の背後には交互に規則正しく2列に並ぶ渦が発生する事を確かめた。そして先に *Strouhal* (1878年) によって導びかれたエオルス音の考えと関連のある事を明らかにした。

1911年 *Von Kármán* は理想流体に基づいて2列に並ぶ渦列の理論計算を行ない、安定性を論じた。

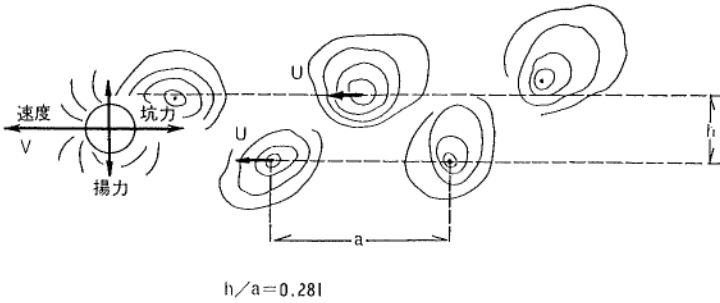


図1 円柱の背後に発生する渦

彼の理論によれば図1に示すように非対称的な配列の渦について渦の間隔 a 、幅 h との比が次式を満足するときに安定であると言う結論を得た。

$$h/a = 0.281 \dots \dots \dots (1)$$

そして、もし2列の渦が対称的に並ぶならば不安定であ

ると言う結果となった。

実際に観測される渦列は(1)式を満足しているものが多い。このような渦の配列をカルマン渦列 (*Kármán Vortex Street or Trail*) と言う。

理論が明らかとなっている単独に存在する円柱については多数の実験、研究^{1,2)}がみられるが、円柱数が2本あるいは数本が接近して存在する円柱列の背後の渦列がどのようになるかを研究した報告は未だなされていないように思われる。

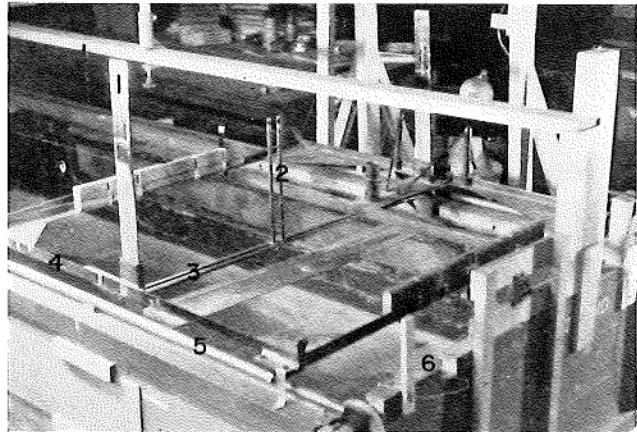
本論文は複数本の円柱が平行に並んで存在する場合のカルマン渦列を写真に撮り現象論的に考察を加え、若干の興味ある事実を知ったのでその結果を報告するものである。

2. 実験の方法と装置

水槽に水を満たし半日位放置し内部の水流が完全になくなった時に水面にアルミの微粉を散布しその中で円柱を走らせた。カメラは水槽に対して固定されている。

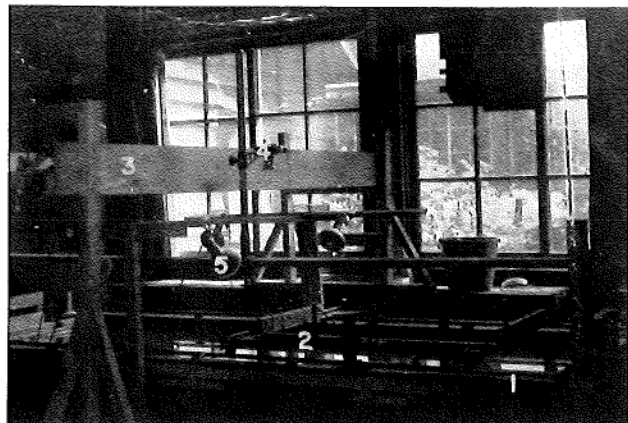
用いた水槽は縦が271cm、横107cm、高さが40cmである。水深は *over flow* の装置によって35cmに保たれている。水槽の脇にはレールが敷かれていて、円柱を取りつけた台車がなめらかに走るようになっている。台車には綱がつけられていて変速プリーに連結され、モーターの回転によって0~35 cm/sec の速度範囲で連続変速できる。

用いた円柱の寸方は図2に示す通りである。同一の円柱が10本用意されている。円柱は写真1のように梁に取り



①流線形の側柱, ②円柱列, ③円柱列基台, ④台車, ⑤レール, ⑥水槽

写真1 円柱を水槽より引き上げた時



①水槽, ②台車, ③撮影台, ④カメラ, ⑤照明用ライト

写真2 実験装置全景

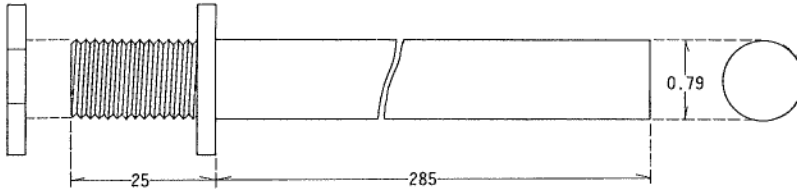
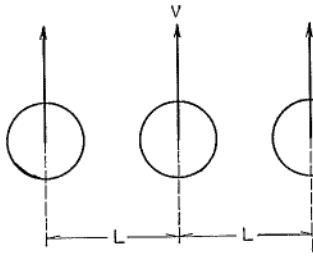


図2 円柱の寸法(単位はmm)

つけられている。梁の両端には流線形の柱がついていて、任意の高さで台車に固定される。実験装置の全景は写真2に示してある。



$Re = \frac{Vd}{\nu} \cdot n = 3$
図3 円柱の配列

3. 結 果

実験は円柱数 $n=1, 2, 3, 4$ について、円柱間隔 $L=2.20\text{ cm}, 3.30\text{ cm}, 4.40\text{ cm}, 6.60\text{ cm}, 8.80\text{ cm}$ として種々の Re について行なった。用いられる記号は図3に示す。

レイノルズ数 Re は次のように定義したものである。

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \dots\dots\dots(2)$$

(2) 式で V, d, ν は各々円柱の速度、直径、流体の動粘性係数を示す。撮影した写真の縮尺は写真3に示してある。

3・1 円柱数1本の場合(写真4)

円柱数1本の場合について h/a を計算してみた。写真4(a)では $a=1.0\text{ cm}, h=3.3\text{ cm}$ で写真4(b)については $a=1.4\text{ cm}, h=4.6\text{ cm}$ で $h/a=0.3$ となるから円柱直後においてはカルマンの理論に近い値が得られた。円柱からかなり遠ざかった渦については h の値が大きくなる傾向にあるので h/a は理論値よりも大きくなる。

3・2 円柱数2本の場合(写真5, 6, 7)

前述したように単独の円柱についての背後渦列の研究報告は多数みられる。2本の円柱を接近させて並べた場合にカルマン渦の配列がどのようになるかを予想する事は困難であるが一般に図4に示すような3種類の配列が可能であろう。図4(a)は2本の円柱から隔れる渦の位相差が零の場合、図4(b)は 180° の場合、図4(c)はその他の場合である。実験の結果、円柱間隔が狭いと殆どが図4(b)の形の配列となる。しかもこの場合、内側の渦列は相互干渉によって弱め合う結果、外側の渦列のみが残る。

この様子を図5に示した。

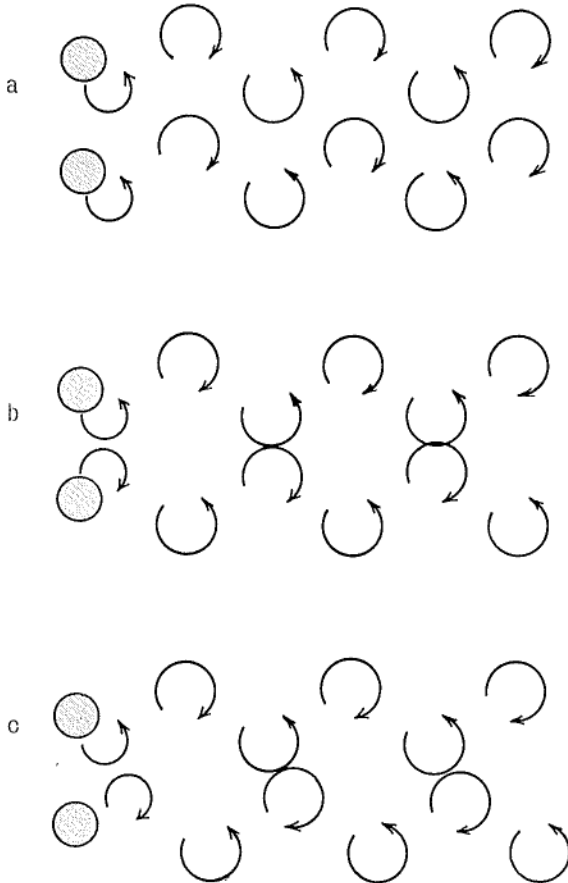


図4 (a)は位相差ゼロ, (b)は位相差 180° , (c)はその他の位相

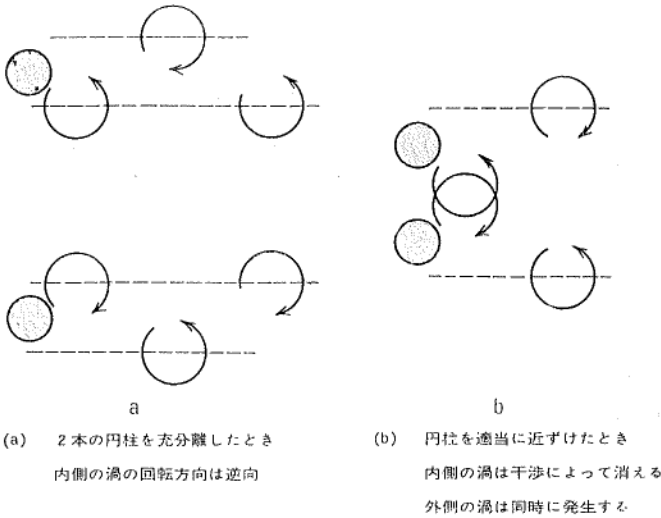


図5 渦の干渉

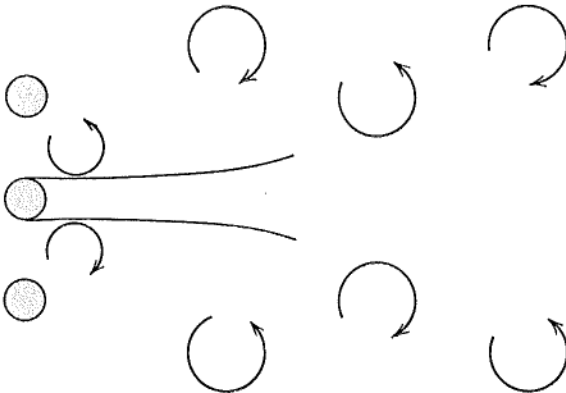


図6 $n=3$ の場合、中央の円柱に渦がない

を1つの系としてみた場合、渦列は対称的である。これは前述したように不安定となるので外側の渦列の幅は増大していく。

$L=3.30\text{ cm}$ について撮影した結果を写真9に示した。比較的低速な場合(写真9(a))は図6に示したような結果が得られたが、早い速度(写真9(b))では中央の円柱による渦の発生がみられる。

さらに円柱間隔を広げ $L=4.40\text{ cm}$ にした場合を写真10(a), (b)に示した。各々の円柱の背後に独立なカルマン渦列が生ずる。位相は3本とも一致している場合、2本が一致し他の本が 180° 違っている場合などが観測された。

3・4 円柱数4本の場合(写真11)

$L=2.20\text{ cm}$ についての観測結果を写真11に示した。渦列はほぼ対称性を示し内側の2本の円柱によって生ずるはずの渦列は相互干渉によって消えている。

円柱間隔 $L=3.30\text{ cm}$, 4.40 cm についても観測したが種々の組合せが生じ一般的傾向は認めがたい。

尚、円柱間隔 $L=6.60\text{ cm}$, 8.80 cm についての観測では n が何本であっても、個々が独立な円柱としてのみ働いて特別な現象が認められなかった。

外側の渦列のみが残った結果、2本の円柱列を1つの系としてみると渦列は対称になっている。カルマンが指摘しているように対称的な渦列は不安定であるので次第に幅が増大していく様子が写真5(a)~(e), 写真6(b),(c)等にみられる。写真6(a)は非対称的な配列をしているので他に比較して安定である。

円柱の間隔が $L=4.40\text{ cm}$ になると内側渦列の相互干渉は殆ど認められなくなる。しかし4列の渦は図4(a), (b)のような配列にはなるが図4(c)のような配列をとることはなく規則正しい渦列が長く続く。

カルマン渦列の内側の列が干渉によって消される場合、2本を1つの系としてみると渦の発生によって受ける円柱の揚力の向きが正反対であるために互いに弱め合う。

3・3 円柱数3本の場合(写真8, 9, 10)

円柱間隔が狭い場合にどのような渦の配列を示すかを予想する事は2本の場合の配列を考えるよりも困難である。 $L=2.20\text{ cm}$ の場合について撮影したのが写真8であって、中央の円柱による渦列は発生していない。これを図式化すると図6となる。3本

4. 結 論

円柱列背後のカルマン渦列を観測した結果、一般に円柱間隔が狭い場合は中心線に関して対称的な渦の発生を示す。カルマンの理論で明らかなようにこれらの渦列は不安定であるから次第にその幅を増大していく。このように対称的な渦の配列になる場合、渦の発生から受ける物体の揚力（横方向に受ける力）はお互いに抑圧する方向に働くので渦の振動数と物体の固有振動数とが一致した時に生ずる共振現象を防ぐことができる。

参 考 文 献

- 1) 池森亀鶴：水力学（コロナ社，1959）p. 292-299.
- 2) 谷 一郎：流れ学（岩波書店，1959）p. 86.

円柱列背後のカルマン渦列の研究

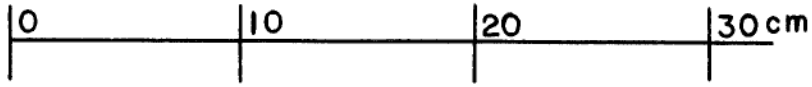
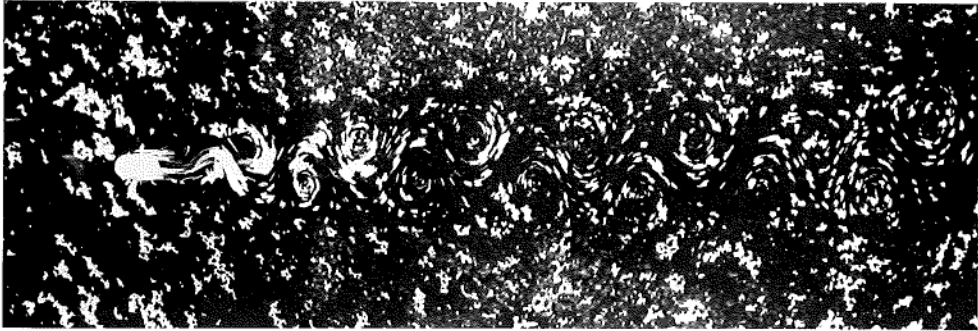
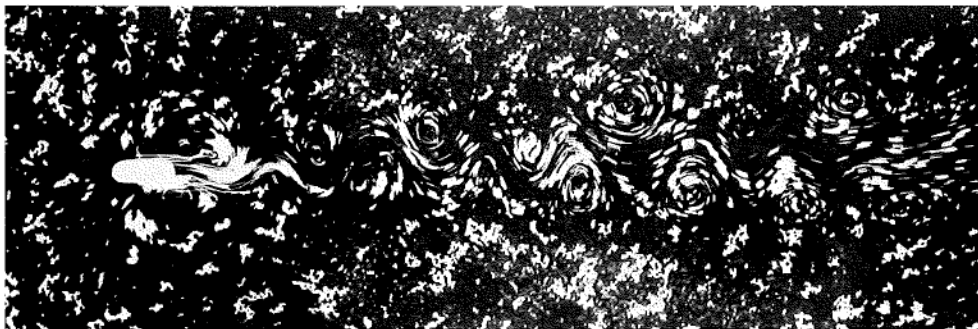


写真3 縮尺 実際の物指を水面に置いて撮影

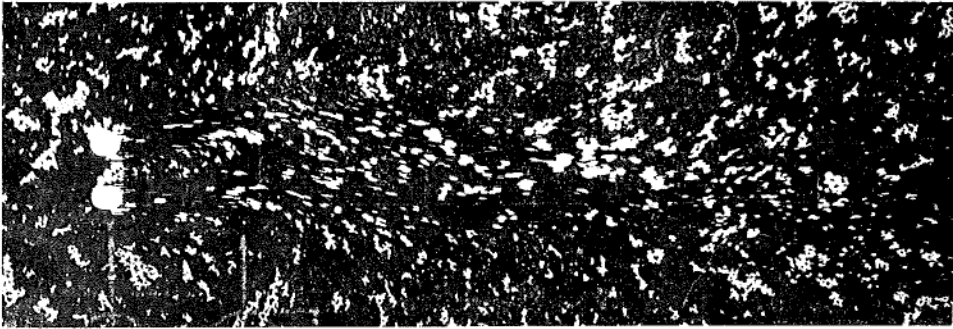


(a) 水温 20°C , $V=1.19\text{ cm/sec}$, $Re=116$, 絞り $f11$, シャッター 1 秒

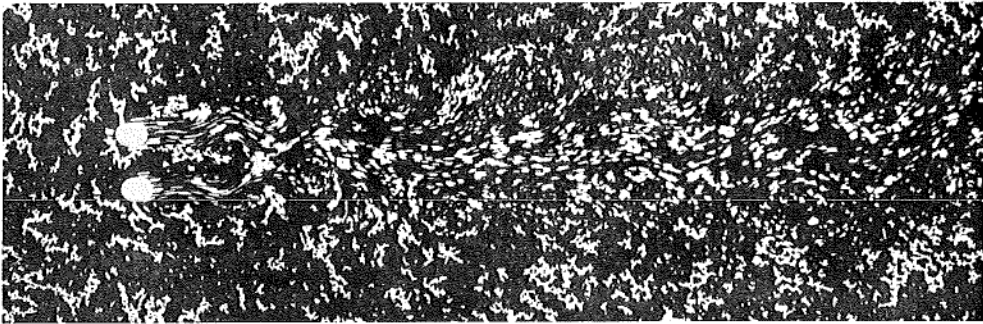


(b) 水温 19.7°C , $V=2.37\text{ cm/sec}$, $Re=198$, 絞り $f11$, シャッター 1 秒

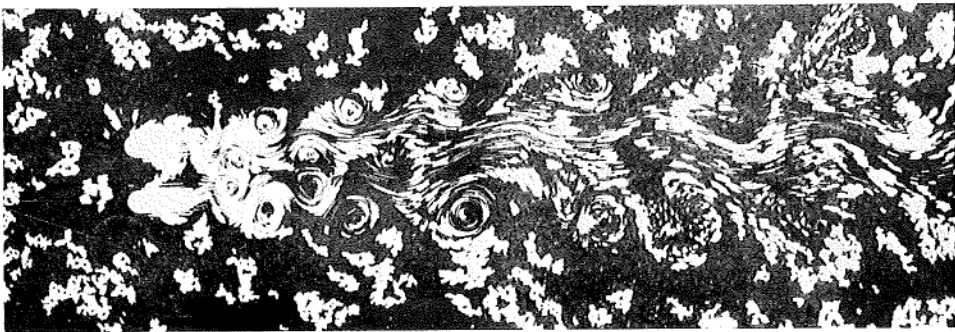
写真4 円柱数 $n=1$



(a) 水温 18.9°C , $V=0.53\text{ cm/sec}$, $Re=51$, 絞り $f11$, シャッター-1秒



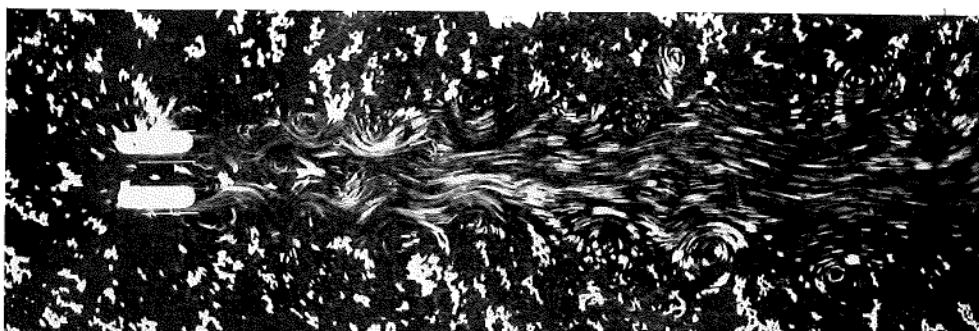
(b) 水温 13.8°C , $V=1.02\text{ cm/sec}$, $Re=34$, 絞り $f16$, シャッター-1秒



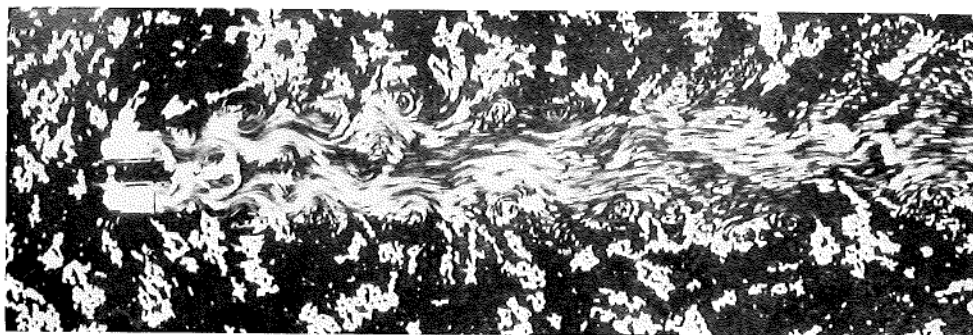
(c) 水温 13.4°C , $V=4.02\text{ cm/sec}$, $Re=341$, 絞り $f11$, シャッター-1/2秒

写真5 円柱数 $n=2$, 円柱間隔 $L=2.20\text{ cm}$

円柱列背後のカルマン渦列の研究

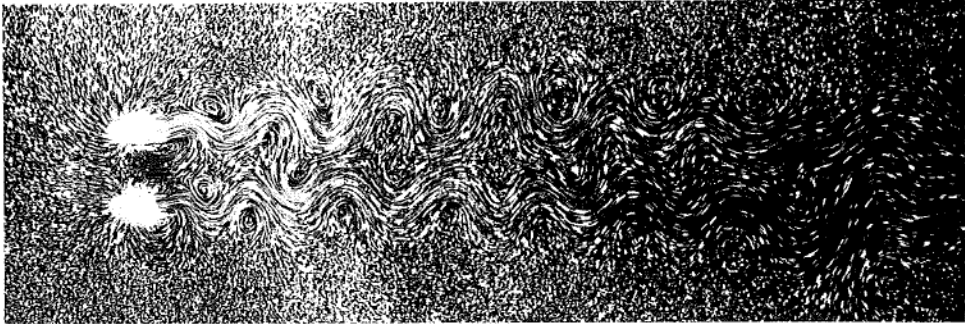


(d) 水温 19.2°C , $V=6.22\text{ cm/sec}$, $Re=589$, 絞り $f11$, シャッター $1/2$ 秒

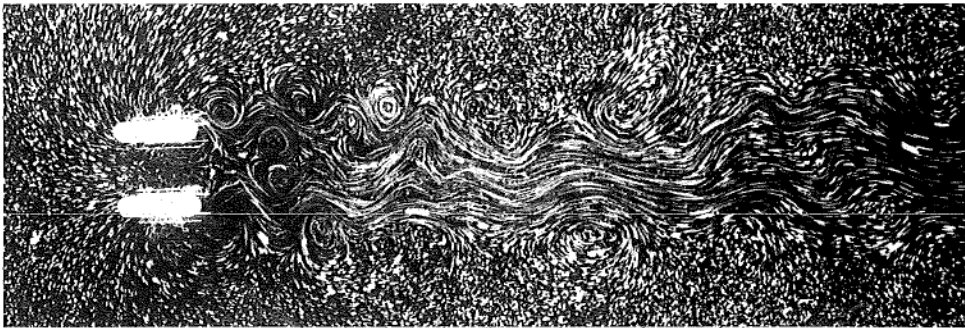


(e) 水温 16.0°C , $V=7.62\text{ cm/sec}$, $Re=663$, 絞り $f8$, シャッター $1/2$ 秒

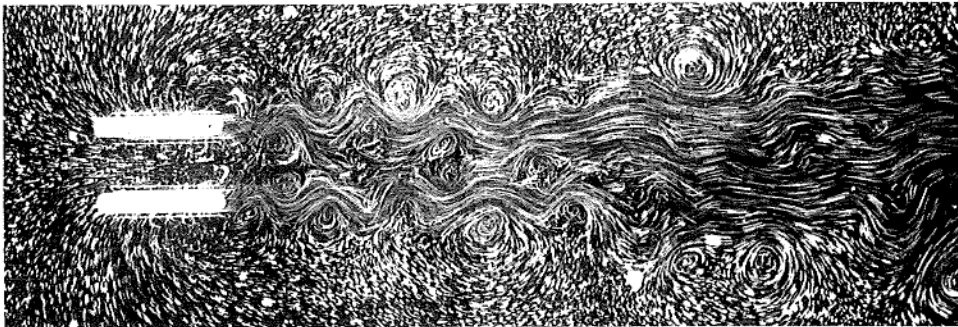
写真5 円柱数 $n=2$, 円柱間隔 $L=2.20\text{ cm}$



(a) 水温 22.5°C , $V=1.54\text{ cm/sec}$, $Re=158$, 絞り $f16$, シャッター 1 秒



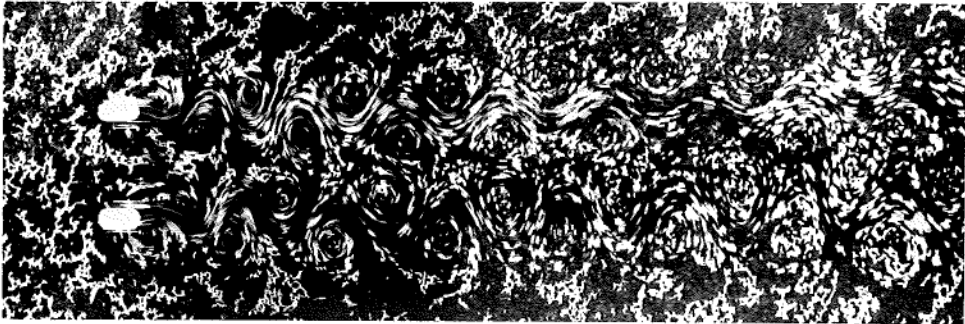
(b) 水温 22.5°C , $V=3.88\text{ cm/sec}$, $Re=376$, 絞り $f16$, シャッター 1 秒



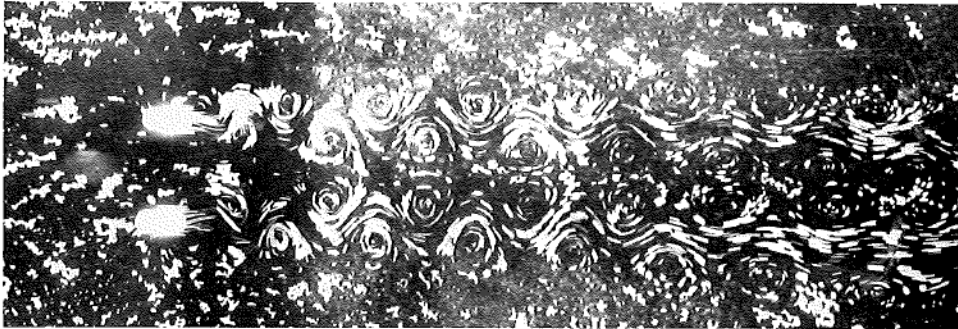
(c) 水温 22.5°C , $V=12.13\text{ cm/sec}$, $Re=1240$, 絞り $f8$, シャッター $1/2\text{ 秒}$

写真6 円柱数 $n=2$, 円柱間隔 $L=3.30\text{ cm}$

円柱列背後のカルマン渦列の研究



(a) 水温 17.3°C , $V=1.31\text{ cm/sec}$, $Re=118$, 絞り $f16$, シャッター-1秒

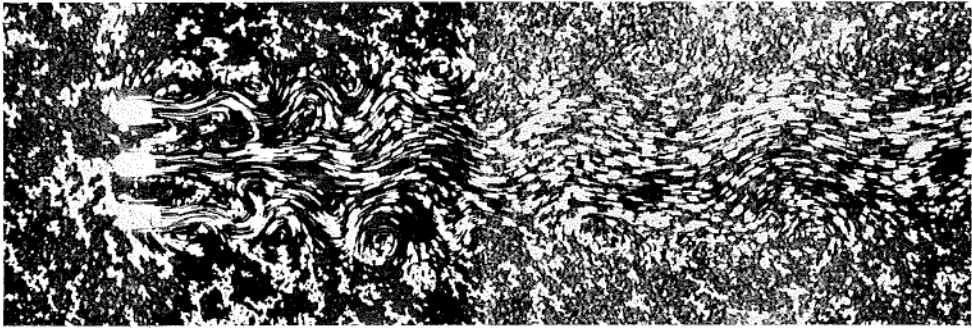


(b) 水温 17.0°C , $V=1.78\text{ cm/sec}$, $Re=159$, 絞り $f11$, シャッター-1秒

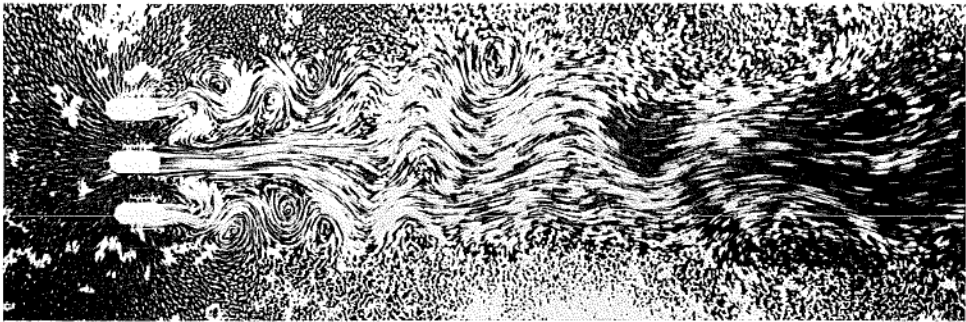


(c) 水温 17.0°C , $V=18.11\text{ cm/sec}$, $Re=1615$, 絞り $f8$, シャッター-1/4秒

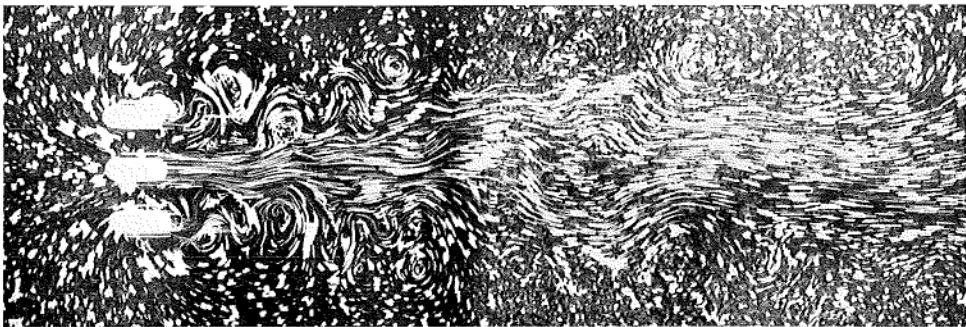
写真7 円柱数 $n=3$, 円柱間隔 $L=4.40\text{ cm}$



(a) 水温 14.1°C , $V=1.10\text{ cm/sec}$, $Re=93$, 絞り $f11$, シャッター 1 秒



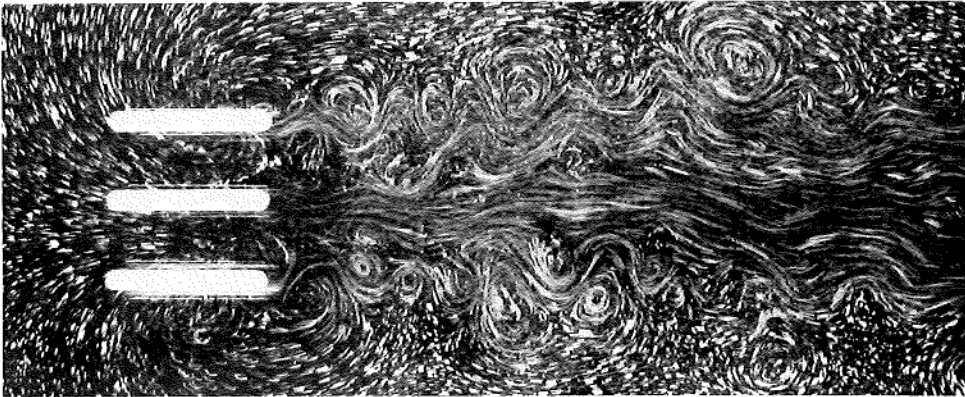
(b) 水温 14.1°C , $V=1.86\text{ cm/sec}$, $Re=158$, 絞り $f16$, シャッター 1 秒



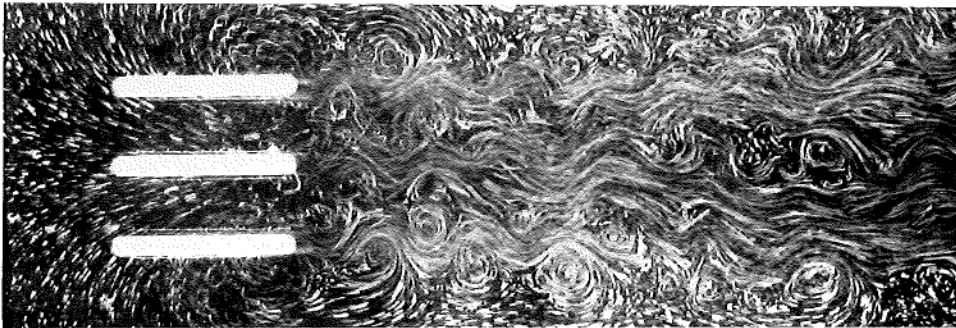
(c) 水温 14.6°C , $V=4.37\text{ cm/sec}$, $Re=366$, 絞り $f11$, シャッター $1/2$ 秒

写真 8 円柱数 $n=3$, 円柱間隔 $L=2.20\text{ cm}$

円柱列背後のマルカン渦列の研究

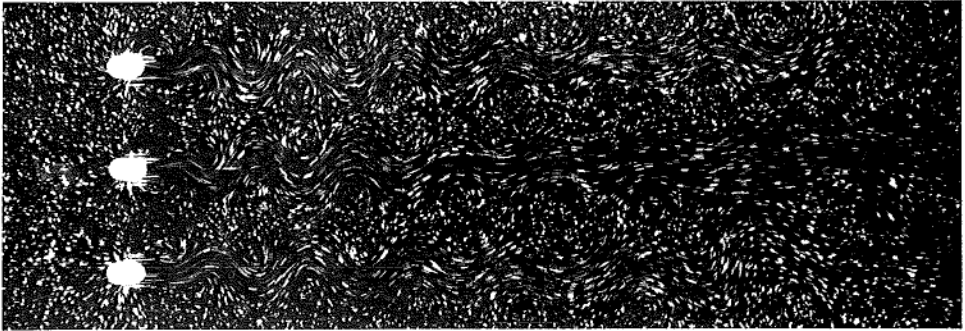


(a) 水温 22.5°C , $V=8.17\text{ cm/sec}$, $Re=835$, 絞り $f16$, シャッター 1 秒

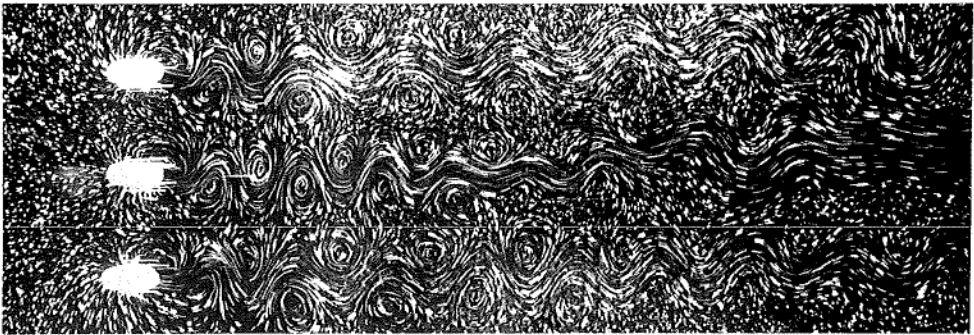


(b) 水温 22.4°C , $V=17.49\text{ cm/sec}$, $Re=1784$, 絞り $f11$, シャッター $1/2$ 秒

写真 9 円柱数 $n=3$, 円柱間隔 $L=3.30\text{ cm}$

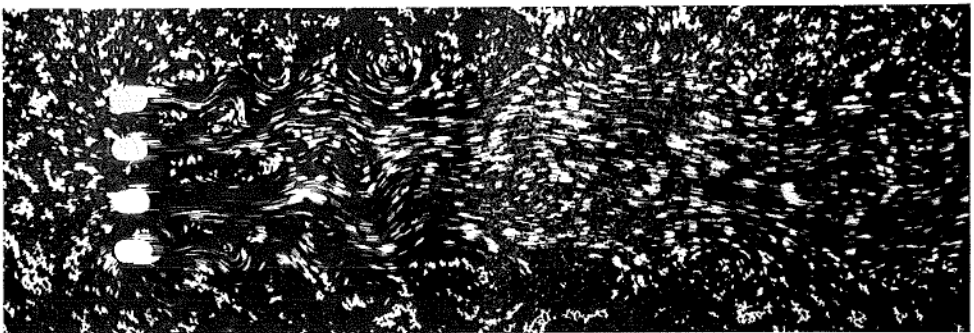


(a) 水温 20.7°C , $V=1.04\text{ cm/sec}$, $Re=102$, 絞り $f16$, シャッター-1秒



(b) 水温 20.7°C , $V=2.10\text{ cm/sec}$, $Re=205$, 絞り $f11$, シャッター-1秒

写真 10 円柱数 $n=3$, 円柱間隔 $L=4.40\text{ cm}$



(a) 水温 14.8°C , $V=2.20\text{ cm/sec}$, $Re=82$, 絞り $f16$, シャッター-1秒

写真 11 円柱数 $n=4$, 円柱間隔 $L=2.20\text{ cm}$