

## 減速流中の鈍頭物体後流の観察

辰野, 正和  
九州大学応用力学研究所 : 助教授

呼和, 数徳

石井, 幸治  
九州大学応用力学研究所 : 技官

<https://doi.org/10.15017/4743722>

---

出版情報 : 應用力學研究所所報. 60, pp.23-37, 1984-09. 九州大学応用力学研究所  
バージョン :  
権利関係 :



## 減速流中の鈍頭物体後流の観察

辰 野 正 和\*  
呼 和 数 徳†  
石 井 幸 治‡

## 概 要

大型風洞中にモデルとして、円柱又は台形断面柱を設置した。まず、風洞中の風速を 6m/s とし、一樣な流れを作った後、より低い第二の一定風速又は、風速 0 まで、出来るだけなめらかに減速する。その過程でのモデル背後の流れの非定常な変化の様子をスモーク・ワイヤー法、タフトグリッド法によって観察した。

実験結果によると、減速度が小さい場合、後流の幅は漸次小さくなっていくが、減速度が大きい場合、第二の風速又は、風速 0 直前で、後流幅は非常に大きくなり、逆流が観察される。また、モデル背後から左右交互に放出される渦の周期性が、減速過程で何度か崩れることがある。

**Key words:** Decelerated flow, Unsteady flow, Wakes, Vortex streets

## 1. ま え が き

物体まわりの非定常な流れに関する研究は、物体の impulsive な出発運動、一樣な加速運動、あるいは、一樣流中での物体の振動運動、回転運動、回転振動運動等色々調べられている。しかし、流体中で物体が減速運動する場合、あるいは、減速流中に物体が置かれた場合の物体まわりの流れに関する研究はほとんどなされていない。わずかに、辰野・種子田<sup>1)</sup>が、低レイノルズ数流れの領域で、一樣に減速する円柱、平板まわりの流れの変化の様子を流れの可視化手法を用いて調べている。それによると、減速度が非常に小さければ、物体背後の双子渦の大きさは単調に小さくなっていく。一方、減速度が大きければ、双子渦は減速とともに大きくなっていく。また、レイノルズ数が 70~100 で、カルマン渦が形成されている状態から減速すると、左右渦列の間隔は、減速とともに大きくなる。

ところで、各種建造物あるいは飛翔物体が減速流にさらされた場合の流れの様子を知ることは、実用的な意味で重要であると思われるが、いまだ良く調べられていない。本研究は、こうした流れ場に関する基礎的知見を得ることを目的として行われたものである。実際の建造物のレイノルズ数は一般に大

\* 九州大学助教授，応用力学研究所

† 中国科学院 力学研究所 助理研究員  
中国 北京市

‡ 文部技官，九州大学応用力学研究所

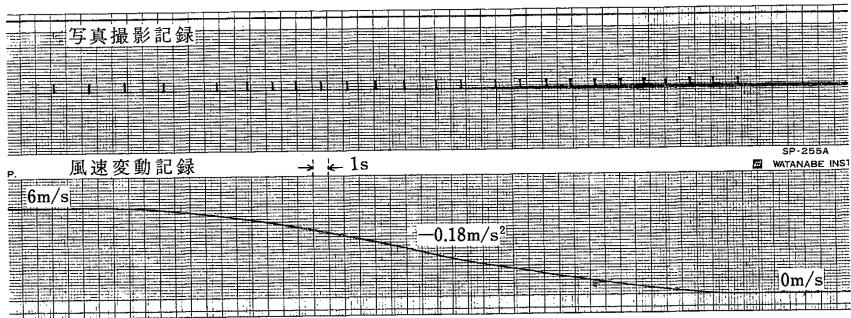
きい。そこで、本研究では、大型風洞を利用し、二次元柱状物体の基本的なモデルとして円柱および剝離点の固定される台形柱を使った。ここでは、減速過程でのこれらモデルの後流の変化の様子を流れの可視化手法を使って調べた。減速前の一様流でのレイノルズ数は  $10^4$  のオーダーであった。

## 2. 実験方法

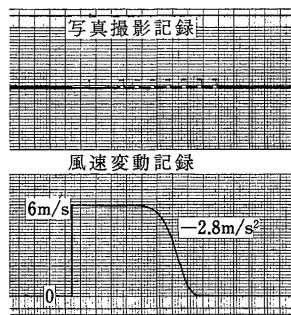
実験は、応用力学研究所の大型風洞を使用して行われた。測定部断面は、高さ 2 m、幅 4 m である。気流の減速は、風洞測定部の後方に設置されたダンパーを適当な角速度で閉じると同時に、プロペラの回転数を減じて行った。実験では、減速前の一様な風速を 6 m/s と固定し、これから種々の減速度で、より低い一定の風速まで、あるいは風速 0 まで減速させた。

二次元柱状物体のモデルとして使用した円柱は、直径 15 cm、長さ 2 m の塩化ビニール製であった。また長さ 2 m の木製台形柱の断面は、平行な二辺の短辺が 5 cm、長辺が 10 cm、厚み 5 cm であり、長辺の面を流れに向けている。これらのモデルは、風洞測定部のほぼ中央に垂直に固定された。

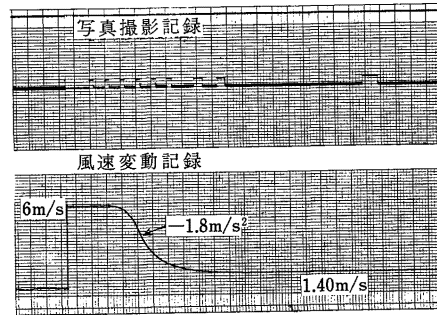
モデルの後流の観察は、スモーク・ワイヤー法とタフトグリッド法によった。前者は、アスベストの細い紐を巻きつけたニクロム線を一本、モデルの直前、風洞測定部の床から 1 m の高さに水平に、流



(a)

(a)  $U_1 = 6 \text{ m/s} \rightarrow 0$ 

(b)

(b)  $U_1 = 6 \text{ m/s} \rightarrow 0$ 

(c)

(c)  $U_1 = 6 \text{ m/s} \rightarrow U_2 = 1.4 \text{ m/s}$ 

写真1 主流風速変動及写真撮影記録 濃い1目盛が1秒間隔

れを横切るように張ってある。アスベストに流動パラフィンをしみ込ませて、ニクロム線に 50~70 V で通電すると、数十秒間煙の発生が持続する。後者の方法は、風洞測定部床面から 1 m の水平面内に、絹糸でグリッドを作り、これらの動きで流れを調べようとするものである。そこで、モデルの直後から後方へ 5 cm の間隔で細いピアノ線を張り、これらのピアノ線に 5 cm 間隔で長さ 3~4 cm の細い絹糸を結びつけ、結び目とピアノ線は接着剤で固定している。可視化のための照明は、数台のスライドプロジェクターを使用し、カメラは、モータードライブ付 35 mm カメラであった。モデル中央部の水平面内での二次元的流れの観察は、風洞測定部の透明な天井をとおして行った。

減速という非定常流であるので、気流の風速は、モデルの斜め前方に設置された熱線流速計で連続的に計測し、記録計で記録する。また、カメラの X 接点からの信号を利用して、流れの撮影時刻を風速記録と同時に記録する。

写真 1 に、気流の風速と写真撮影時刻の記録の例を示す。(a) は、減速度が小さい場合であるが、(b), (c) は、減速度が大きい場合である。いずれの場合も、減速開始後の気流の風速の変化がシャープでない。また、特に、減速度が大きい場合、第二の風速に達する直前の風速変化もゆるやかとなり、直線的でない。それゆえ、各実験での減速度は、風速変化の前後を除いた中央部の平均的な値で表示することにした。

### 3. 実験結果

各物理量を次のように定義する。

$d$  : 物体の代表長さ, 円柱直径, 台形柱の長辺

$\nu$  : 気流の動粘性係数

$U_1$  : 減速に入る前の一様風速

$R_1$  :  $dU_1/\nu$ , 減速に入る前のレイノルズ数

$a$  : 減速度の絶対値

$U_2$  : 減速終了後の気流の一様風速

$R_2$  :  $dU_2/\nu$ , 減速後のレイノルズ数

$T$  : 各写真の露光時間

$t$  : 減速開始からの時間経過

#### 3.1. 円柱の場合

写真 2 は、気流風速を小さい減速度で速度 0 まで減速させていった時の各瞬間の流れ模様をスモーク・ワイヤー法で観察した例である。(a) は、減速前の一定風速での流れ模様である。レイノルズ数  $R_1$  は  $6.8 \times 10^4$  であって、円柱の左右からほぼ規則正しい渦の放出がある。減速開始後もしばらくは、同様な流れ模様が観察される。しかし、途中で、(b) に示すように、規則正しい渦放出が崩れ、渦列の形成も崩壊する事がある。但し、こうしたパターンは一瞬間観察されるのであって、次には、(c) の写真で明らかなように、再び左右から交互の渦の放出と渦列の形成が観察される。(d), (e) は、さらに主流の風速が減速されていった時の流れ模様であり、(f) は風速 0 直前の流れ模様である。

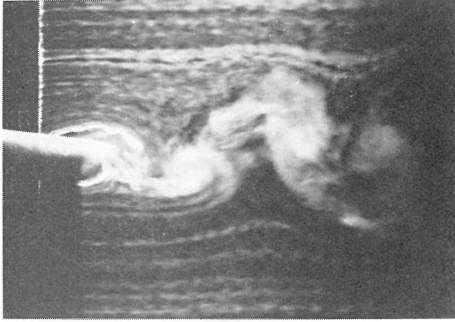
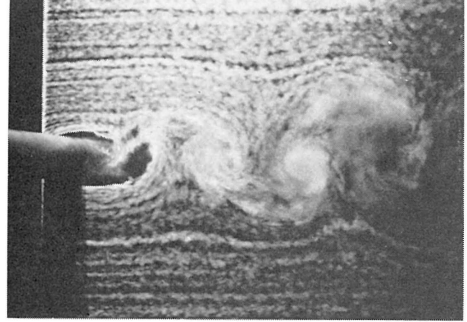
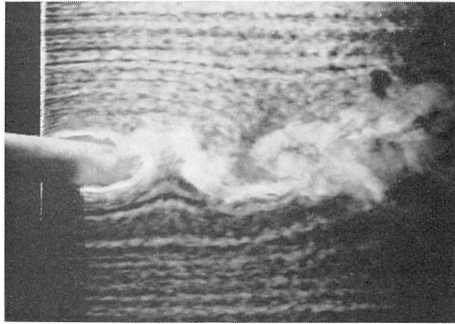
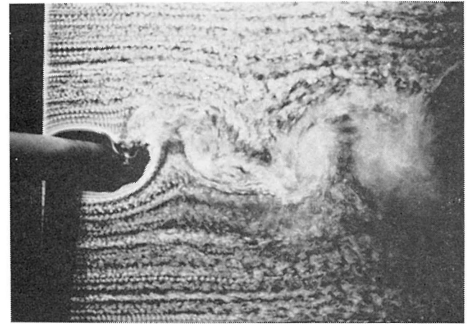
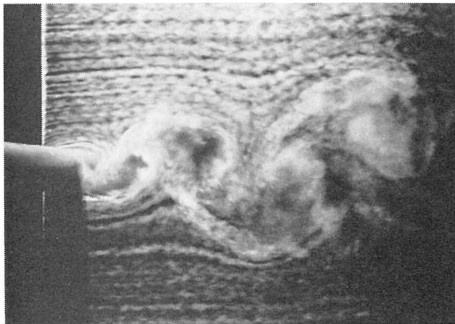
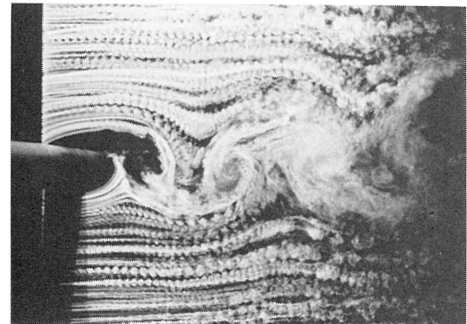
(a) 一定風速,  $U_1=6$  m/s(d) 減速中,  $t=23.5$  s(b) 減速中,  $t=11$  s(e) 減速中,  $t=33.6$  s(c) 減速中,  $t=15.8$  s(f) 減速中,  $t=37.3$  s

写真2 一定風速から風速0までゆっくり減速する場合

円柱, スモーク・ワイヤー法,  $d=15$  cm,  $U_1=6$  m/s,  $R_1=6.5 \times 10^4$ ,  
 $a=0.18$  m/s<sup>2</sup>, 風速0到達  $t=41$  s,  $T=1/250$  s

減速過程で形成される渦列の渦間隔, 渦列間隔は, 不規則な場合が多い. なお, (b) のような周期的な渦放出の崩れは, 長い減速過程の間には数回現れる.

写真3は, 同様の流れを円柱後方に格子状に配置した絹糸の動きで調べたものである. この場合, カメラの露出時間は1/1000秒であって, 瞬間の糸の動きをとらえている. (a)は, 減速前の一定風速の

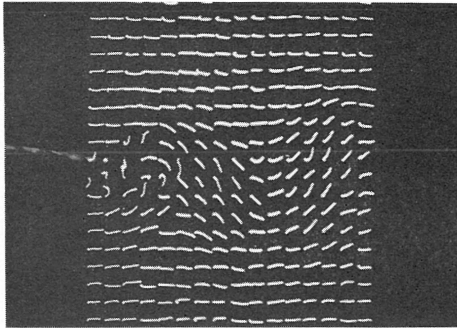
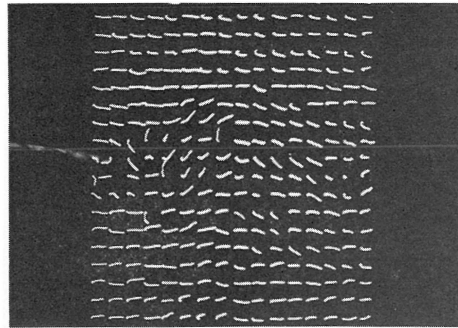
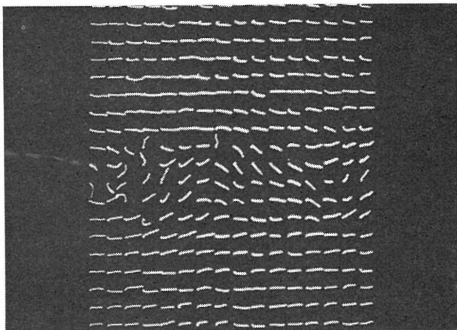
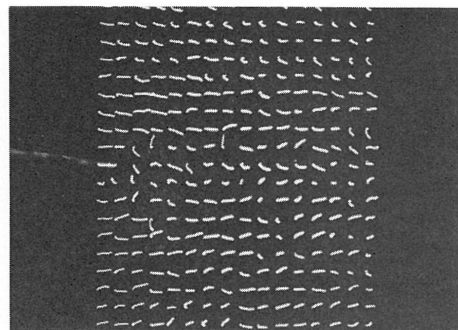
(a) 一定風速,  $U_1=6$  m/s(c) 減速中,  $t=19$  s(b) 減速中,  $t=8$  s(d) 減速中,  $t=26.6$  s

写真3 一定風速から風速0までゆっくり減速する場合  
円柱, タフトグリッド法,  $d=15$  cm,  $U_1=6$  m/s,  $R_1=6.8 \times 10^4$ ,  
 $a=0.18$  m/s<sup>2</sup>, 風速0到達  $t=36.5$  s,  $T=1/1000$  s.

場合であって, 円柱の後流が蛇行しているのがわかる. (b) は, 減速途中であるが, 円柱の後流に周期的な蛇行が消えている. これは, 写真2 (b) の周期的な渦放出の崩れ現象に対応するパターンである. その後は, (c) に示すように, 再び後流は蛇行している. (d) は, 主流風速がかなり小さくなった時であって, 糸のふれが小さく, 後流の構造は不明確である. このように, タフトグリッド法には, 重力の影響と, 主流がある程度大きくなければならないという制限がある.

写真4 は, タフトグリッド法により長い時間の露出によって平均的な後流の大きさを調べたものである. (a) は, 一定風速での平均的な後流を示し, (b), (c), (d) は, 減速過程での平均的な後流を示す. この例のように, 減速度が小さい場合には, 後流の幅は, 主流の減速とともに徐々に小さくなっていく. なお, この場合, 一定時間内の糸の運動が積分されているので, 写真2 (b) のような渦列の崩れ現象は陰蔽されてしまう.

写真5, 6, 7 に, 減速度が大きい場合の円柱後流をそれぞれの方法で観察した例を示す. これらの場合,  $U_1=6$  m/s から, より低い  $U_2$  の風速まで数秒間で減速させ, その後は  $U_2$  の一定風速である.

写真5 は, スモーク・ワイヤー法で観察したものである. 平均的減速度は  $2.7$  m/s<sup>2</sup> であるが, 写真1 に示したように, 減速開始直後と  $U_2$  到達直前には減速度が弱くなるので, この場合, 減速開始より

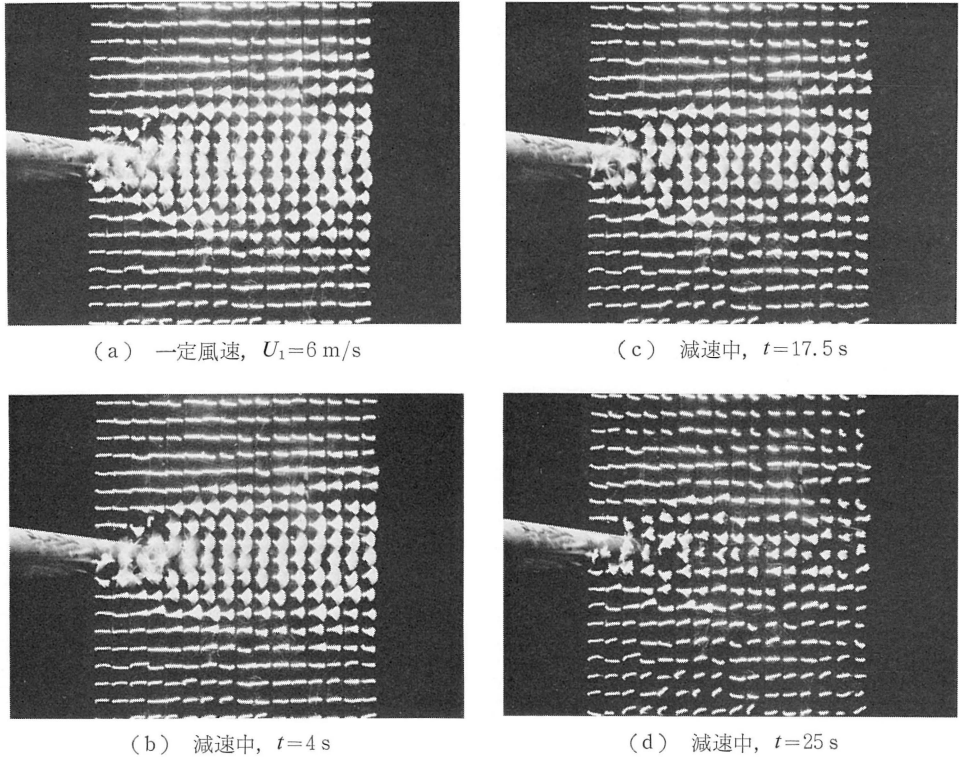
(a) 一定風速,  $U_1=6$  m/s(c) 減速中,  $t=17.5$  s(b) 減速中,  $t=4$  s(d) 減速中,  $t=25$  s

写真4 一定風速から風速0までゆっくり減速する場合

円柱, タフトグリッド法,  $d=15$  cm,  $U_1=6$  m/s,  $R_1=6.8 \times 10^4$ ,  $a=0.19$  m/s<sup>2</sup>, 風速0到達  $t=36.5$  s,  $T=1$  s.

$U_2$  に到達するまで約5秒を要している。この場合にも、(c) に示すように、渦放出と渦列形成の崩れが観察された。その後は交互の渦列が形成されるが、減速度が大きい場合の特徴は、(e) に見られるように、主流風速が小さくなるに従って、後流幅が極端に横に広がることである。(f) は、 $U_2$  到達後であり、大きく広がった後流は後に押し流されていく。

写真6は、同様な流れの中のタフトグリッドの瞬間的な動きをとらえたものである。(c)、(d) は、減速後半の段階であるが、糸の動きは小さい。これらの写真と写真5の(f)とを対応させて考えると、煙で観察すると後流は横に大きく広がるけれども、流体力はそれ程強くないことがわかる。

写真7は、タフトグリッド法による長時間露出によって平均的な後流の大きさを観察したものである。(a)と(b)とを比較すると、主流風速を大きい減速度で減速した場合、後流の幅は下流の側でやや広がっているようである。

### 3.2. 台形柱の場合

写真8, 9, 10は、主流風速  $U_1=6$  m/s から  $U_2$  の風速まで比較的小さい減速度で減速した場合の台形柱後流の振舞を三つの方法で観察したものである。基本的には、円柱の場合と同様であるが、台形柱は剥離点が固定されており、後流の幅はより広がっている。写真8(b), 9(b)で見られるよう

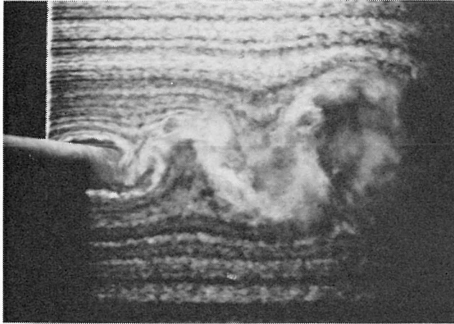
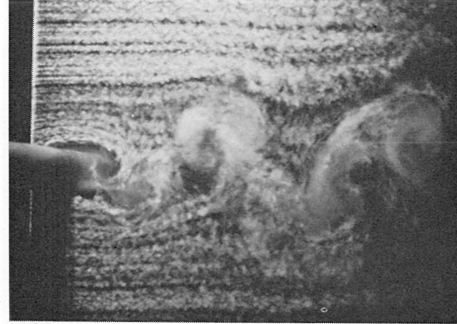
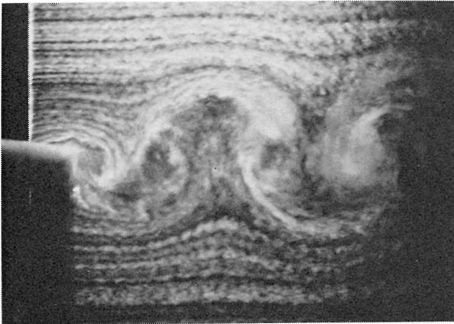
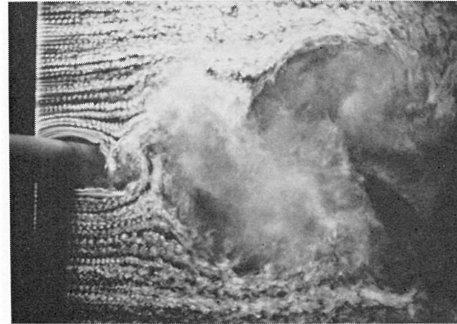
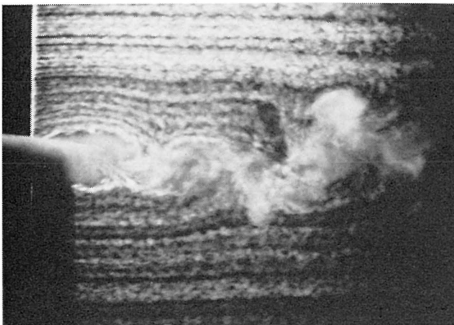
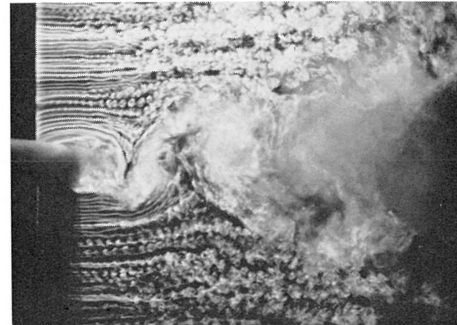
(a) 一定風速,  $U_1=6$  m/s(d) 減速中,  $t=2.7$  s(b) 減速中,  $t=0.5$  s(e) 減速中  $t=3.7$  s(c) 減速中,  $t=1.1$  s(f)  $U_2$  到達後,  $t=5.7$  s

写真5 一定風速から低い一定風速まで急激に減速する場合

円柱, スモーク・ワイヤー法,  $d=15$  cm,  $U_1=6$  m/s,  $R_1=6.5 \times 10^4$ ,  
 $a=2.7$  m/s<sup>2</sup>,  $U_2=0.4$  m/s,  $R_2=4.3 \times 10^3$ ,  $U_2$  到達  $t=5$  s,  $T=1/500$  s

に, この場合も渦列の崩れが観察される. また,  $U_2$  に達する直前には, 後流の幅も広がる. 写真8 (d) は, 主流風速が  $U_2$  に達した後である.

写真10は, 一定時間内の平均的後流を示しているが, 円柱の場合よりもやや広い.

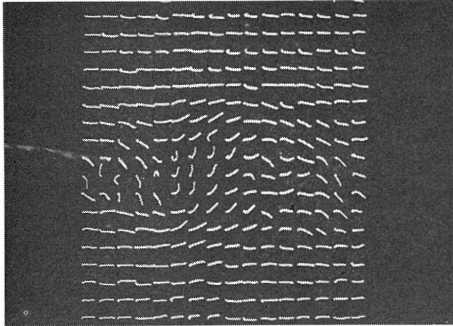
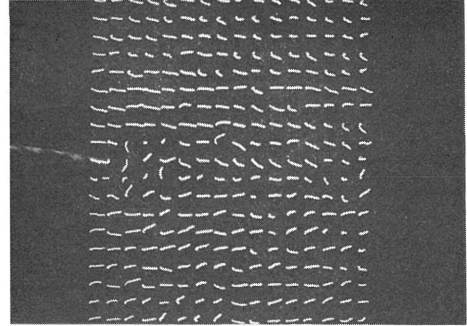
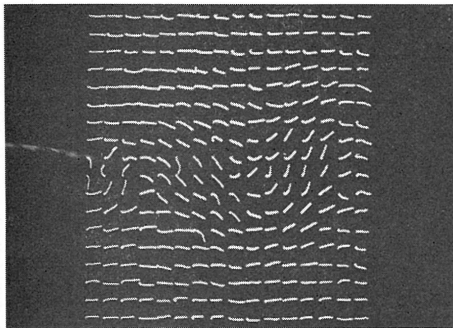
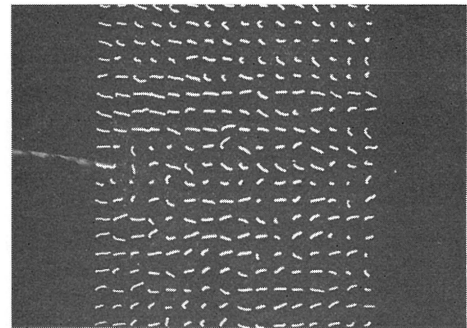
(a) 一定風速,  $U_1=6$  m/s(c) 減速中,  $t=2.9$  s(b) 減速中,  $t=1.3$  s(d) 減速中,  $t=4.4$  s

写真6 一定風速から低い一定風速まで急激に減速する場合

円柱, タフトグリッド法,  $d=15$  cm,  $U_1=6$  m/s,  $R_1=6.8 \times 10^4$ ,  $a=2.8$  m/s<sup>2</sup>,  $U_2=0.5$  m/s,  $R_2=5.6 \times 10^3$ ,  $U_2$  到達  $t=4.6$  s,  $T=1/1000$  s.

写真11, 12, 13は, 大きい減速度で, 主流風速を  $U_1=6$  m/s から風速0まで減速させた時の例である.

写真11で明らかのように, 減速とともに後流中の流れ方向の渦間隔はつまり, 渦列の形も不規則となる. さらに後流は左右に大きく広がっていき, ついには, (d)で見られるように, 逆流も観察される.

写真12は, タフトグリッドの糸の瞬間的な動きであり, (b)は渦列が崩れた状態に対応している.

写真13は, タフトグリッドの糸の動きの長時間記録であるが, 台形柱の場合, 強い逆流が生じるために, この方法でも後流の広がりが良くわかる.

#### 4. 結 論

鈍頭物体が減速する流れの中にさらされた場合, その後流のパターンの変化は, 減速度の大きさによって大別される. 減速度が小さい場合, 後流の幅は減速に応じて徐々に小さくなっていく. 減速度が大きい場合, 減速後半で後流の幅は横に大きく広がる. 台形柱の場合, 逆流も生じる.

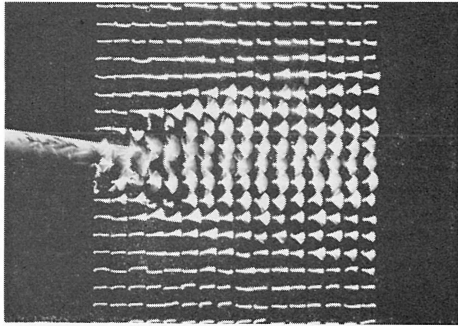
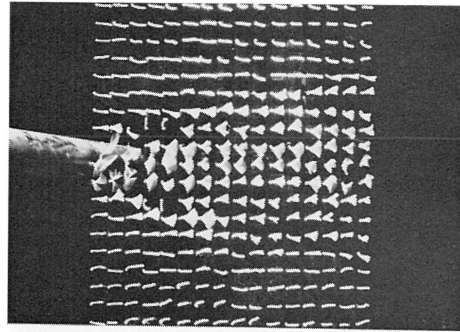
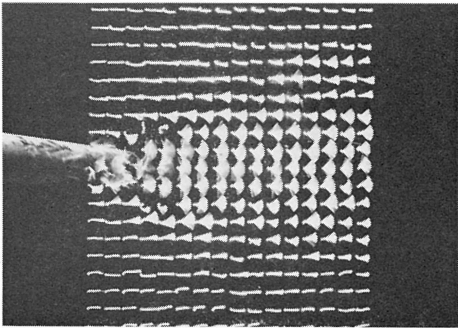
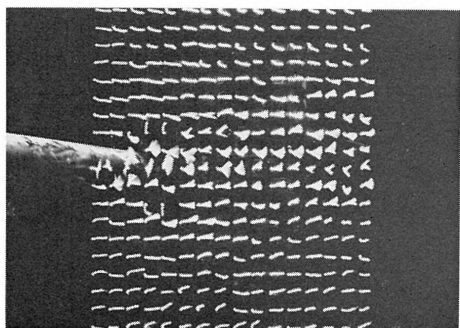
(a) 一定風速,  $U_1=6$  m/s(c) 減速中,  $t=3$  s(b) 減速中,  $t=1$  s(d) 減速中,  $t=4.1$  s

写真7 一定風速から低い一定風速まで急激に減速する場合

円柱, タフトグリッド法,  $d=15$  cm,  $U_1=6$  m/s,  $R_1=6.8 \times 10^4$ ,  $a=1.8$  m/s<sup>2</sup>,  $U_2=1.4$  m/s,  $R_2=1.6 \times 10^4$ ,  $U_2$  到達  $t=7.4$  s,  $T=1/4$  s.

モデル背後から交互の渦の放出があり, 渦列が形成されている場合に, その風速を減速していくと, 減速途中で渦列の崩れ現象が見られる.

最後に, 風洞の風速制御に御工夫いただいた深町信尊技官と, 実験を終始御援助いただいた永野明氏に厚く御礼申し上げます.

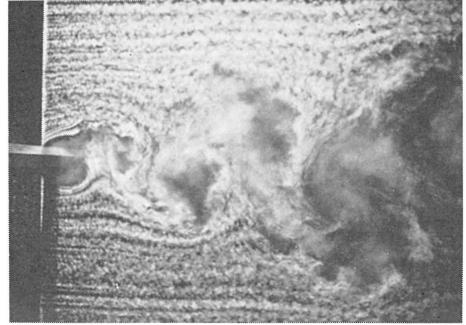
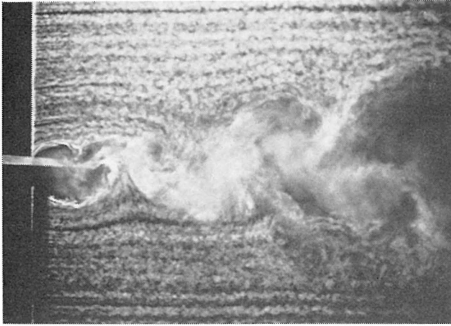
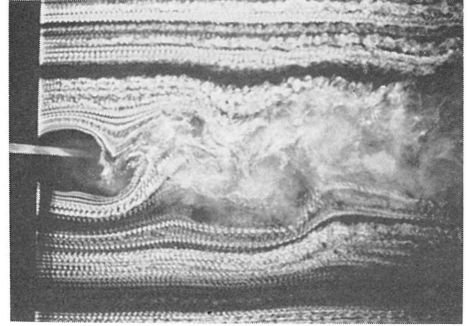
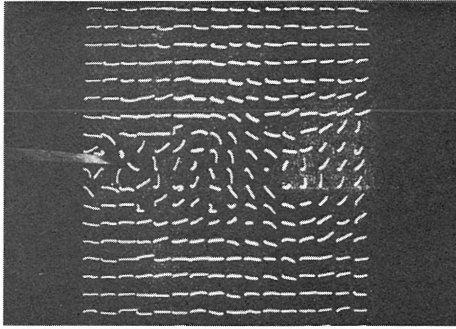
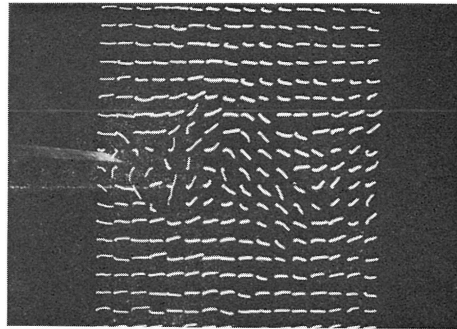
(a) 一定風速,  $U_1=6$  m/s(c) 減速中,  $t=8.6$  s(b) 減速中,  $t=5.5$  s(d)  $U_2$  到達後,  $t=22.4$  s

写真8 一定風速から低い一定風速までゆっくり減速する場合

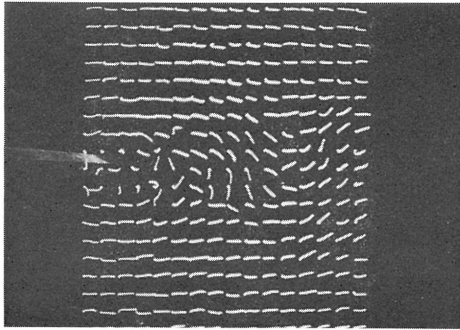
台形柱, スモーク・ワイヤー法,  $d=10$  cm,  $U_1=6$  m/s,  $R_1=4.3 \times 10^4$ ,  
 $a=0.55$  m/s<sup>2</sup>,  $U_2=0.8$  m/s,  $R_2=5.7 \times 10^3$ ,  $U_2$  到達  $t=14$  s,  $T=$   
 $1/500$  s.



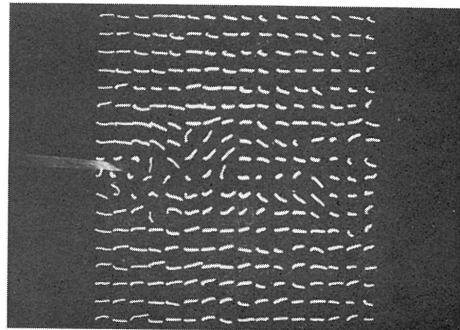
(a) 一定風速,  $U_1=6$  m/s



(c) 減速中,  $t=9$  s



(b) 減速中,  $t=3.5$  s



(d) 減速中,  $t=11.4$  s

写真9 一定風速から低い一定風速までゆっくり減速する場合

台形柱, タフトグリッド法,  $d=10$  cm,  $U_1=6$  m/s,  $R_1=4.5 \times 10^4$ ,  $a=0.43$  m/s<sup>2</sup>,  $U_2=1$  m/s,  $R_2=7.5 \times 10^3$ ,  $U_2$  到達  $t=15$  s,  $T=1/1000$  s.

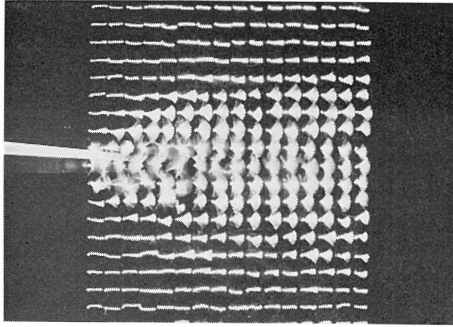
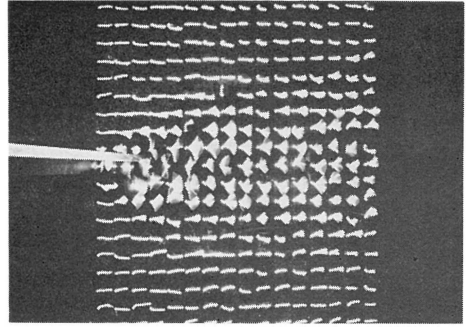
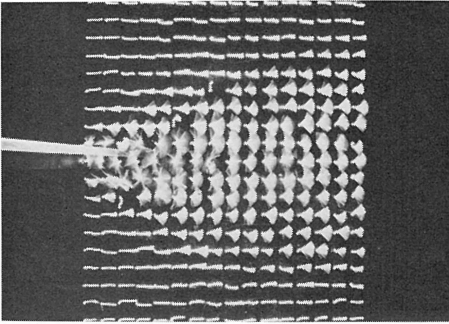
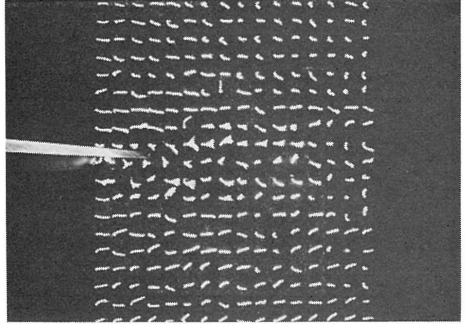
(a) 一定風速,  $U_1=6$  m/s(c) 減速中,  $t=11.2$  s(b) 減速中,  $t=4.5$  s(d)  $U_2$  到達後,  $t=19.1$  s

写真 10 一定風速から低い一定風速までゆっくり減速する場合

台形柱, タフトグリッド法,  $d=10$  cm,  $U_1=6$  m/s,  $R_1=4.5 \times 10^4$ ,  $a=0.43$  m/s<sup>2</sup>,  $U_2=0.9$  m/s,  $R_2=6.8 \times 10^3$ ,  $U_2$  到達  $t=15$  s,  $T=1/2$  s.

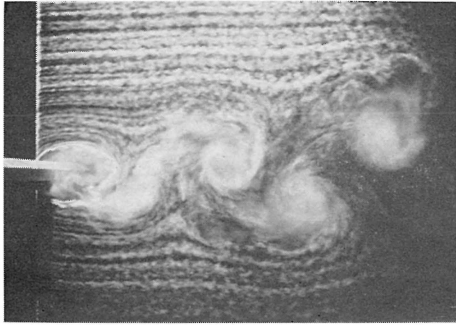
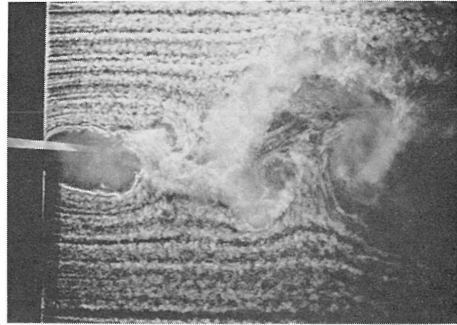
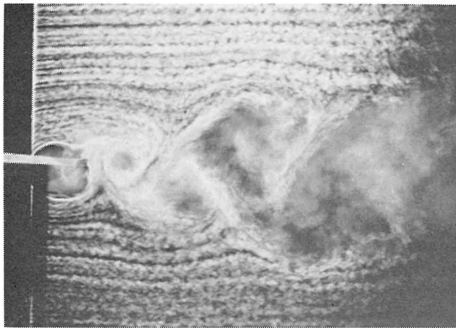
(a) 一定風速,  $U_1=6$  m/s(c) 減速中,  $t=2.5$  s(b) 減速中,  $t=1.7$  s(d) 風速0直前,  $t=4.2$  s

写真 11 一定風速から風速0まで急激に減速する場合

台形柱, スモーク・ワイヤー法,  $d=10$  cm,  $U_1=6$  m/s,  $R_1=4.3 \times 10^4$ ,  
 $a=2.3$  m/s<sup>2</sup>, 風速0到達  $t=4.3$  s,  $T=1/500$  s.

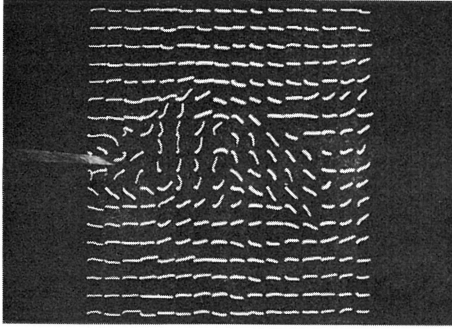
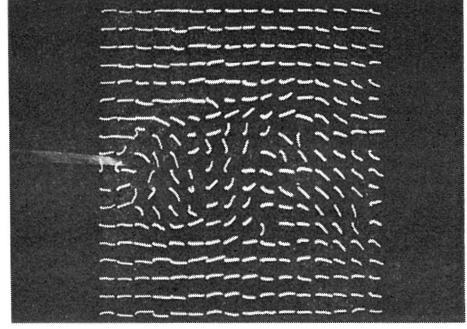
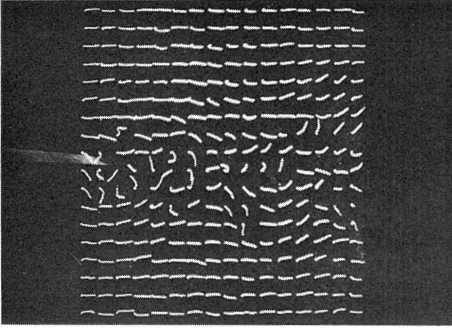
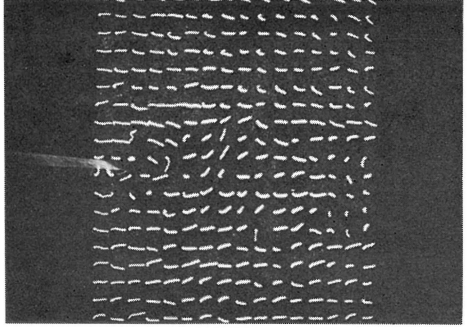
(a) 一定風速,  $U_1=6$  m/s(c) 減速中,  $t=2$  s(b) 減速中,  $t=0.5$  s(d) 減速中,  $t=3.4$  s

写真 12 一定風速から風速 0 まで急激に減速する場合

台形柱, タフトグリッド法,  $d=10$  cm,  $U_1=6$  m/s,  $R_1=4.5 \times 10^4$ ,  $a=2.4$  m/s<sup>2</sup>, 風速 0 到達  $t=4.5$  s,  $T=1/1000$  s.

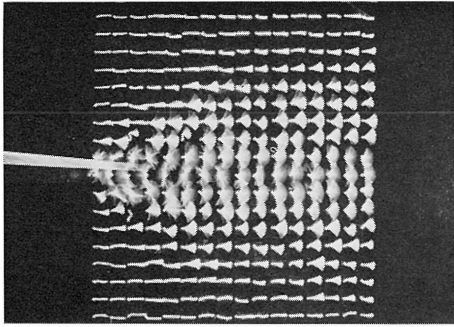
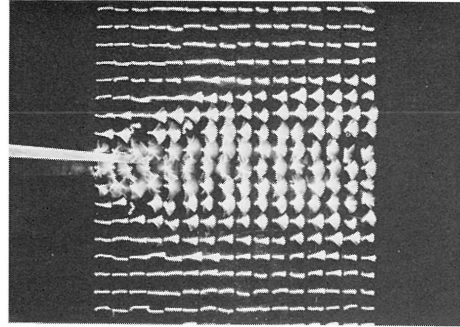
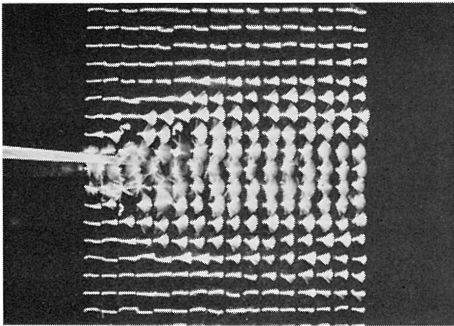
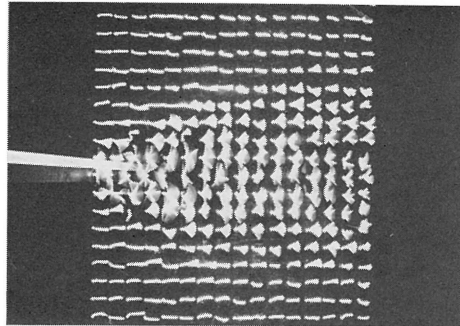
(a) 一定風速,  $U_1=6$  m/s(c) 減速中,  $t=1.9$  s(b) 減速中,  $t=0.5$  s(d) 減速中,  $t=3.2$  s

写真 13 一定風速から風速 0 まで急激に減速する場合

台形柱, タフトグリッド法,  $d=10$  cm,  $U_1=6$  m/s,  $R_1=4.5 \times 10^4$ ,  $a=2.4$  m/s<sup>2</sup>, 風速 0 到達  $t=4.5$  s,  $T=1/2$  s.

#### 参 考 文 献

- 1) Tatsuno, M. and Taneda, S.: *Visualization of the unsteady flow past cylinders and plates decelerated from a steady speed*, J. Phys. Soc. Jpn, **31**, No. 4 (1971), 1266.
- 2) Batchelor, G. K.: *An Introduction to Fluid Dynamics*, (Cambridge University Press, Great Britain, 1967) Chap. 5.

(昭和 59 年 5 月 25 日 受理)