

加速あるいは減速時における物体の伴流

九大 応力研 種子田 定俊

§1. 緒言

非圧縮性粘性流体の中で種々の物体が色々の非定常運動を行なう場合の流れを実験的に調べた。

§2. 実験手法

実験はすべて試験水槽中で行われ、試験物体としては円柱、球および薄い平板が使用された。実験された物体の運動は、静止からの *impulsive start*、静止からの一様加速、一定速度からの加速、一定速度からの減速、静止からの回転振動などである。

流れの可視化は、アルミ粉法、電解白濁法、水素気泡法などによって行われた。特に電解白濁法は本実験で始めて使用された新しい手法であって、非定常流の可視化に極めて有効である。この手法は真鍮又は青銅で作られた試験物体を陽

極として、普通の水を単に電気分解するだけで試験物体の表面付近の水が白濁するのを利用するものである。試験物体としては真鍮や青銅よりも錫を使用した方がはるかに濃厚な白色を発するが、本実験では主として真鍮を用いた。

3. 実験結果

3-1. 静止からの加速

運動の最初の瞬間は常にポテンシャル流れが現れる。しかしすぐに円柱又は 90° 平板の後方に小さな双子渦が発生して時間とともに急激に増大する。円柱の場合にはさらに第2, 第3の渦が最初の双子渦の前方に形成されることがある。

双子渦の長さを s とすれば (第1回), $ut/d^2 < 0.1$ のとき,

$$\text{急加速円柱} : s/ut = 0.34$$

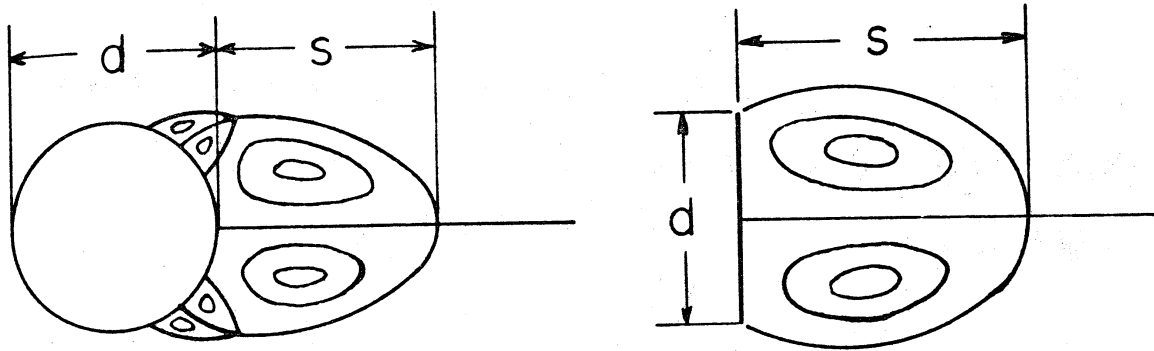
$$\text{一様加速円柱} : s/at^2 = 0.14$$

$$\text{急加速 } 90^\circ \text{ 平板} : s/d = 0.89 (ut/d)^{2/3}$$

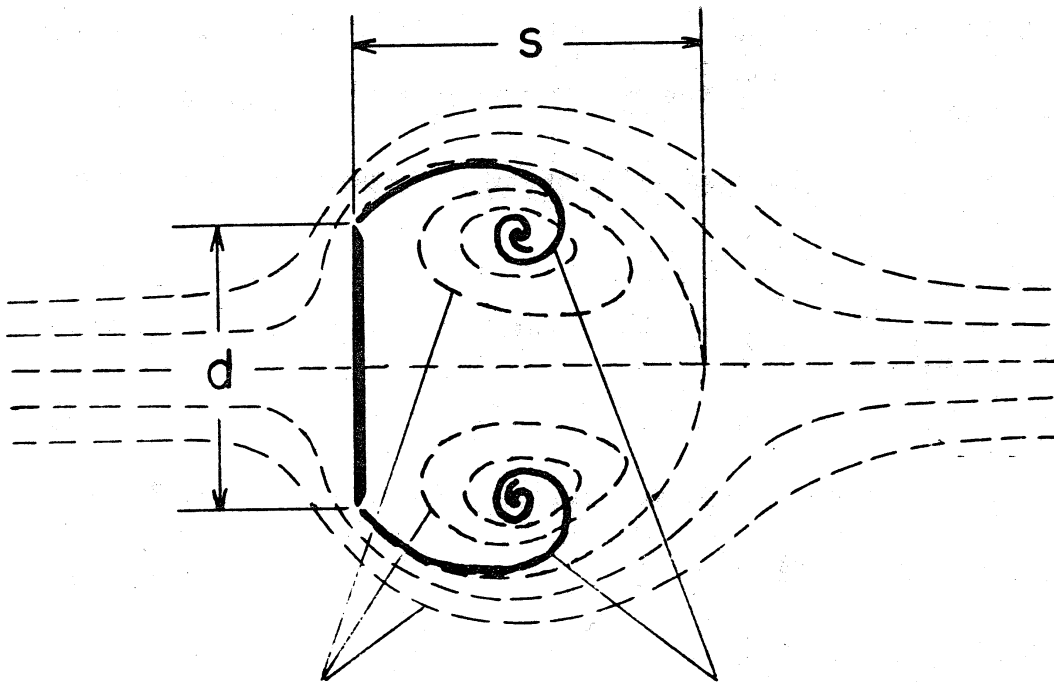
$$\text{一様加速 } 90^\circ \text{ 平板} : s/d = 0.48 (at^2/d)^{2/3}$$

が成立する。ここに、 U は物体の運動速度、 d は円柱直径又は 90° 平板の長さ、 a は一様加速度、 t は観測の時間である。

非定常流を支配する Navier-Stokes の運動方程式は無次元の形で、



第 1 図



STREAM LINES

STREAK LINES
(VORTEX SHEETS)

第 2 図

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \left(\frac{Ut}{d}\right)(\nabla \nabla) V = -\nabla p + \left(\frac{\nu t}{d^2}\right) \Delta V$$

と書かれる。ここに、 U 、 t 、 d はそれぞれ物体の運動速度、観測の時間、直径である。

運動の最初には $(Ut/d) \ll 1$ 、 $(\nu t/d^2) \ll 1$ であるから

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\nabla p$$

が成り立つ。これは運動の最初にはポテンシャル流れであることを示すものである。

しかし、時間が経つと (Ut/d) は次第に大きくなり $(\nabla \nabla) V$ の項は無視できなくなる。ところで、運動の初期には双子渦は、境界層が剥離して形成される薄い渦の層を除いて、ほとんど大部分が渦無し流れで構成されている。非定常性が強いとき、物体の表面から流出する色素の線は渦の層に一致するので、電解白濁法で渦層の形を見ることができる(第2図)。粘性は単に境界層が剥離するための引きがねの役目をするだけで、剥離した渦層の強さや形状には無関係である。(ただし渦層の厚みは $\sqrt{\nu t}$ の程度で、粘性によって支配される。) このことから $(\nu t/d^2)$ が小さいとき、双子渦の長さ (Ut/d) のみによって支配され、粘性に無関係であることが理解できる。

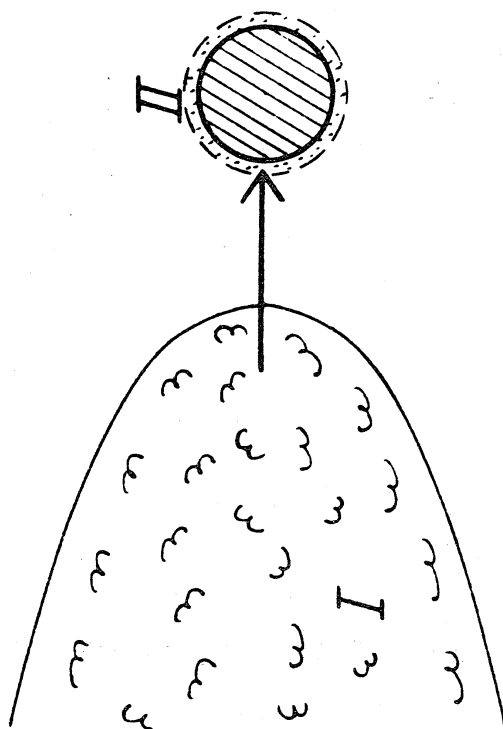
3-2. 一定速度からの加速又は減速

一定速度から物体の速度を変える場合、加速と減速とでは流れの様相がいちじるしく異なる。加速の場合には、加速と同時に後流渦が消滅して物体近傍はポテンシャル流れになる。そして時間とともに小さな双子渦が発生し、成長し、そして崩壊する。すなわち物体近傍に着目する限り、静止からの加速の場合とほとんど同じ流れの変化が現われる。一方減速の場合には、減速と同時に非常に大きな死水域が現われ、その後、流れ模様は複雑な変化を辿る。このことは、加速の場合には物体は最初の定常状態における伴流から前方へ飛び出して一様流の中へ入るのに反し、減速の場合には最初の伴流の中を後退してさらに深く入り込むと考えることが理解できる。すなわち、加速では加速によって新しく発生する第2の境界層は一様流の中で成長するのに対して、減速では第2の境界層は最初の複雑な伴流と干渉しながら成長しなければならないのである（第3図）。

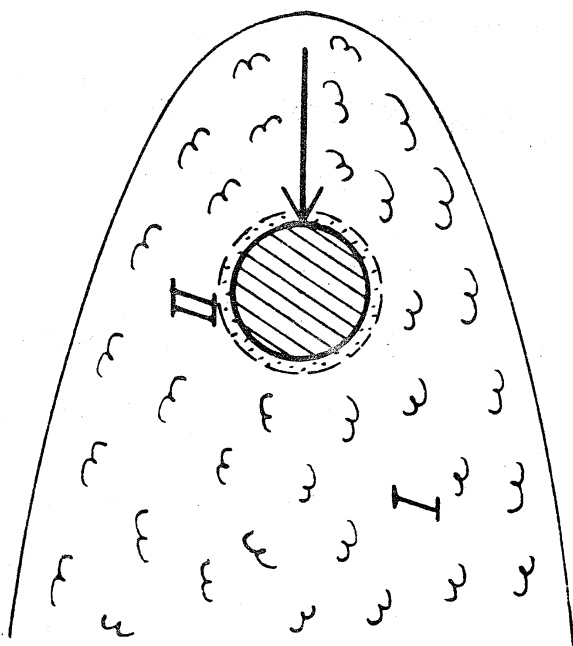
3-3. 静止からの回転又は回転振動

円柱が静止から回転又は回転振動を開始した場合には、円柱表面の境界層は時間とともに厚みを増し、やがて軸方向に沿って周期的変化が現われ、つづいて円柱を取り囲む渦輪の

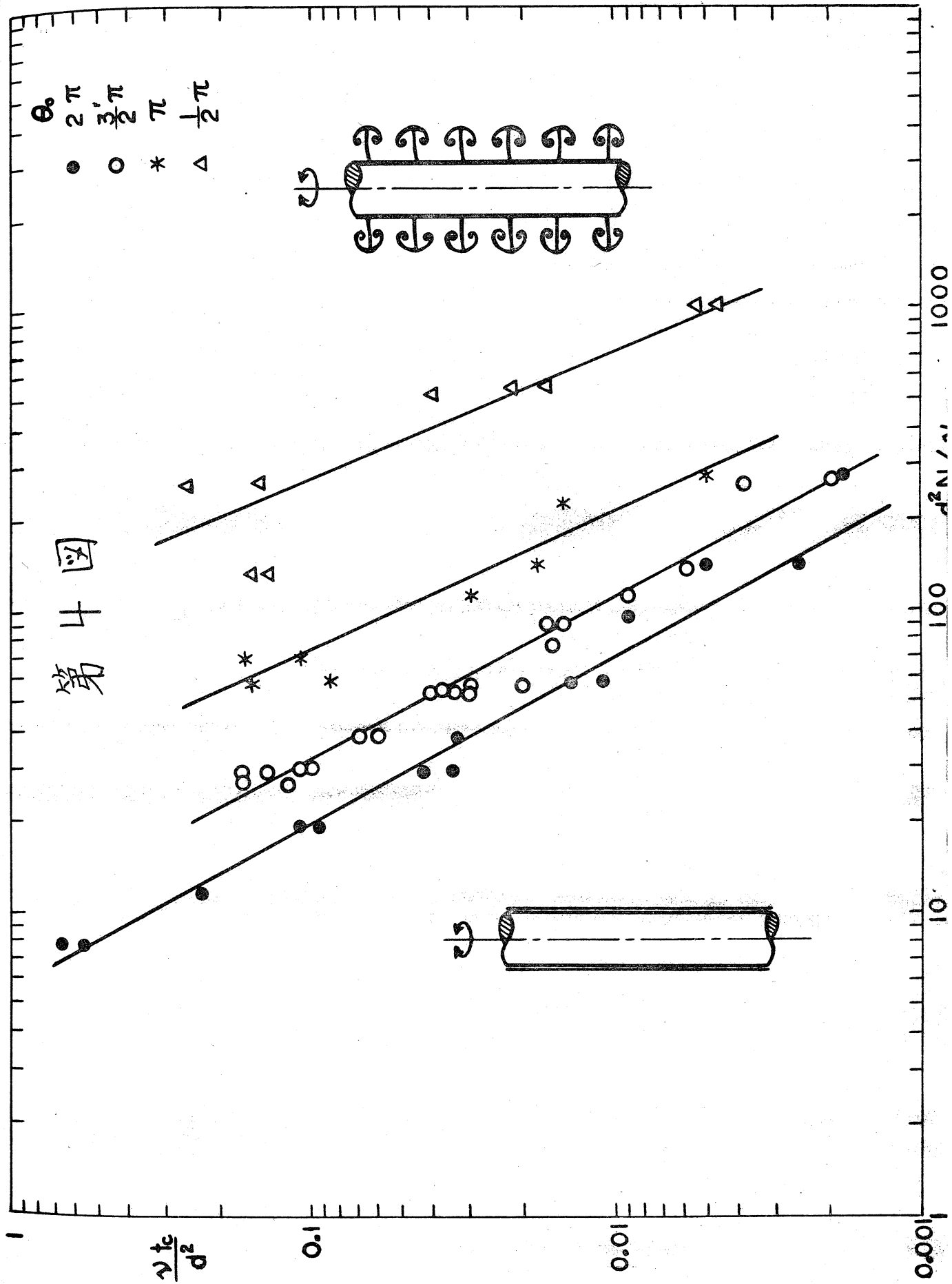
ACCELERATION

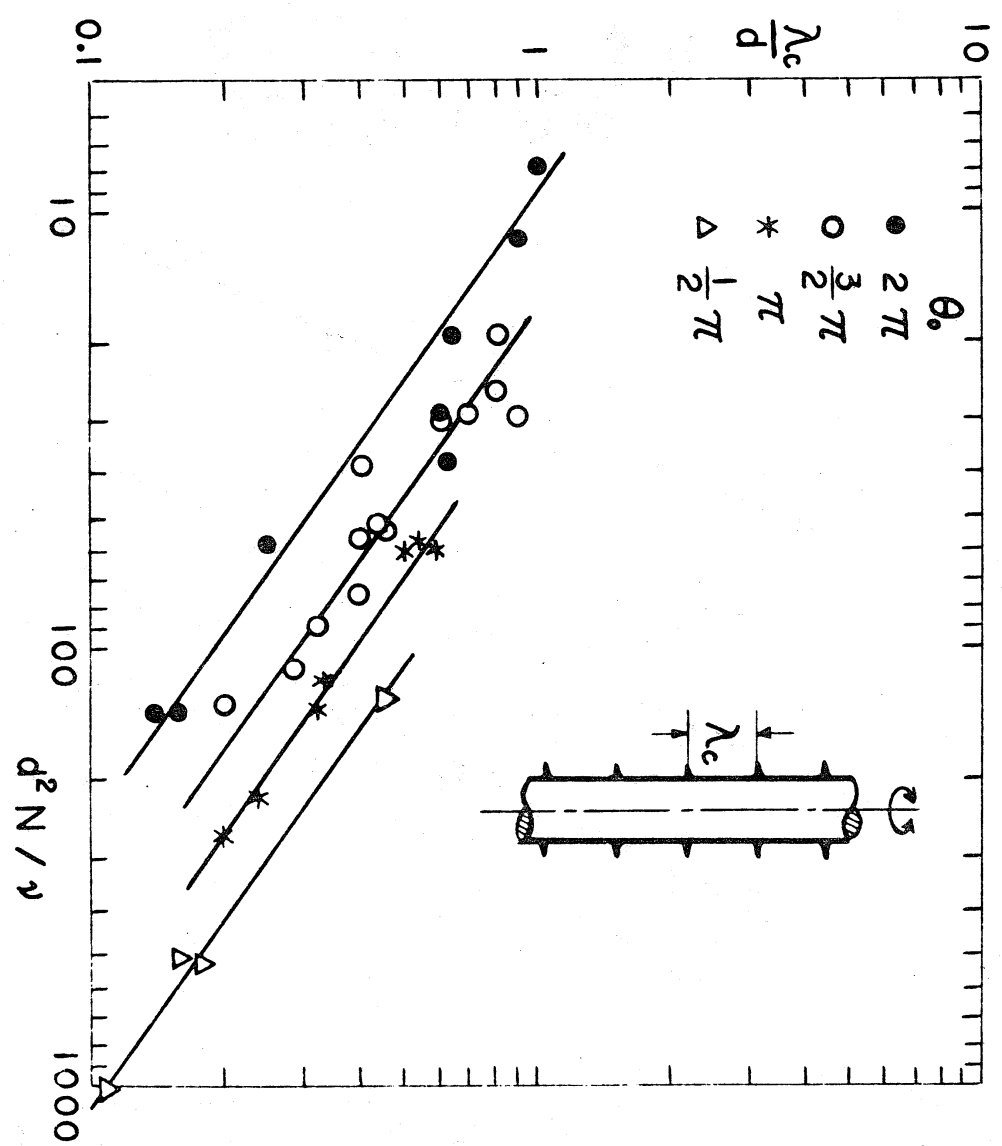


DECELERATION



第 3 圖





第 5 圖

列を形成する。しかし、これらの渦輪は一定の大きさのまま
で定常的に配列するとは言えず、次第に変形し遂には
乱れた流れになる。

第4図、第5図は円柱が回転振動を開始した場合の実験結
果で、 t_c は渦輪が発生するまでの時間、 λ_c はそのときの
渦輪の間隔である。このように完全に2次元の境界条件のも
とで3次元性が現われるのは、境界層の不安定性に基づくも
ので、不安定の原因は回転による遠心力の作用によるものと
考えられる。もし不安定性に基づく渦輪の発生がなければ、
回転振動する円柱表面の境界層の厚みは非常に薄く、 $3\sqrt{\nu/\omega}$
の程度をこえないことがわかっていて、ここには振動数で
ある。しかし、境界層内の流体は遠心力の作用で外側に出よ
うとして、遠心力を持たない外部の流体と入れ替わり、その
とき渦輪の列が形成される。このとき交換される流体部分の
層の厚みは境界層の厚みの10倍の程度である。

おわりに、本研究の実験に協力された本地弘之、辰野正和、
天本肇、石井幸治、若林大三の諸氏に対して感謝の意を表す
る。