

物体後流渦の種類とその遷移について

服部直三・八田桂三・小竹進

On the shedding modes of vortices behind bodies and its transition.

By

Naozo HATTORI, Keizo HATTA and Susumu KOTAKE

Abstract: The behavior of vortices, shed behind bodies placed in uniform flow, has been examined in detail with a hot-wire anemometer and also that of flow separation on the surface of bodies has been investigated by means of a visualization technique and a heating wire method. By using circular, rectangular, triangular cylinders and a thin flat plate as a body, experiments were performed over a range of Reynolds numbers from 30 to 350 (based on width of a body) to obtain the relationship between the process of transition in shedding mode of vortices and the location of the separation point on the surface of a body.

概 要

一様流中におかれた物体の後方に放出される渦の様相をホットワイヤを用いて詳しく調べ、それと同時に物体表面上のはく離点の位置を流れの可視化および細線加熱法により測定した。物体としては、円柱、四角柱、二等辺三角柱および薄板などを用い、レイノルズ数およそ 30~350 の範囲にわたる実験をおこなった。これらの結果、比較的低レイノルズ数における物体後流渦の遷移過程と物体表面上のはく離点の位置との関連性について明らかにすることができた。

1. ま え が き

物体の後流渦に関する問題は、流体力学の重要な課題の一つであって、かなり古くから実験および理論的に追求されている。物体のうちでも円柱に対するものは、幾何学的形状の単純さ、および機械工学的な応用面の重要さから、その数も多い。しかしながら、従来の数多くの研究にもかかわらず後流渦に関してはいまだに多くの未知点が残されており、それらの解明は今後に待たなければならない。

先に、著者らは、比較的低レイノルズ数 ($R \approx 300$ 以下) における円柱の後流渦につき詳細な研究をおこない、後流渦に二種類の渦、“安定渦”および“不規則渦”が存在することを示した [1]。安定渦は一定周期間隔をもち、かなり下流まで規則正しい配列を示す。これに対し、不規則渦は周期および強さに不規則性を有し、きわめて早く崩壊してしまう特長をもつ。

また著者らは、円柱以外の物体の後流渦について同様な研究をおこない、円柱の場合にみられたのと全く同様な二種類の渦が存在することを実証し、安定渦は“Slender body”に、また不規則渦は“Bluff body”において比較的起りやすいことを指摘した[2].

これらの結果、比較的低レイノルズ数において物体後方に形成される安定渦および不規則渦の示すそれぞれの特徴的性質がかなり明白になった。

そこで本報告では、安定渦から不規則渦への遷移過程と物体表面上のはく離点の位置との関連性について詳しく調べてみた。

2. 実験装置および実験方法

実験装置としては、幅 200 mm 深さ 100 mm の流路断面ならびに自由表面を有する回流水槽を使用した。この装置および流路の流速測定方法についての詳細は、すでに他のところ[1]に記述してあるので、ここではそれ以外の点について簡単に述べる。

2.1 試験用 2 次元物体

図 1 に本実験に使用した 2 次元物体の形状を示す。(4)は四角柱の先端に半円柱を付加した形状の物体(アルミニウム)で、幅 b は 15.9 mm、長さ L は 23.9, 31.8 および 47.7 である。(2)は直径 $d=12.6$ mm の円柱(黄銅)で、その表面上には直径 $d=1.2$ mm の細いステンレス・パイプが円柱軸に平行にとりつけてある。これは円柱表面上のはく離点の位置を強制的に変える目的の実験に使用した。(3)の円柱($d=12.6$ mm)は、はく離点の位置を精密に測定するためのもので、電気および熱的絶縁を保持するため全体がベークライトからできている。円柱の中央部には直径約 10μ の白金線が長さ 7 mm にわたって円柱軸に平行に、しかも円柱表面と同一表面上に埋め込んである。白金線はリード線を通し定温度型熱線流速計のブリッジ回路の一辺をなしている。定温度型熱線流速計からの出力電圧は 5 桁の精度を有するデジタル・ボルトメーター(分解能 $10\mu\text{V}$)で読まれる。

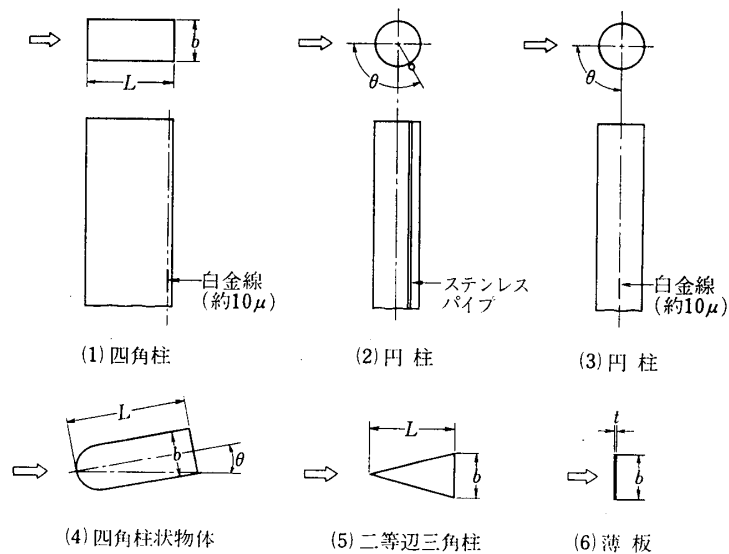


図 1 試験用二次元物体

以上述べた(2)(3)(4)の物体は、それぞれ微動装置 ($1/20^\circ$ の角度変化まで読みとることができる)に取り付けられ、柱軸のまわりに回軸される。

(1)は(3)と同様にはく離点の位置を調べるために使用した四角柱 ($b=15.9$ mm, $L=15.9, 31.8, 47.7$ mm) で、円柱と同様に全体がベークライトからなる。物体の後縁から前方 1.5 mm の位置に柱軸と平行に直径約 10μ の白金線が長さ 7 mm にわたって埋め込んでいる。白金線は円柱の場合と同様に、定温度型熱線流速計のブリッジ回路に接続される。(5)は二等辺三角柱 (アルミニウム) で、幅 b は 15.9 mm, 長さ L は $15.9, 31.8$ および 47.7 mm である。(6)は厚さ $t=0.4$ mm, 幅 $b=15.9$ mm の薄板 (ステンレス) である。

2.2 はく離点の測定方法

円柱のはく離点は比較的低レイノズル数 $R(R<400)$ において, Thom [3], Homan [4] および Grove [5] らがそれぞれ測定しているが, これらの全ては流れの可視化によるもので, あまり信頼度の高いものではない。

最近になって Son [6] らは円柱からの物質伝達とその表面における速度勾配の関係からおよそ 1° の角度差まで円柱のはく離点を精密に測定できると述べている。また Bellhouse [7] らは熱膜面からの放熱量とその表面におけるせん断応力との関係より円柱表面上におけるはく離点の位置を決定することができる指摘している。

ここでは, Bellhouse らと同じ方法を用いて円柱および四角柱のはく離点の位置を決定した。すなわち層流境界層において, (1)温度境界層が速度境界層に比較して十分小さく, (2)熱膜面の基盤を通しての熱伝導がなく, かつ(3)膜面温度と主流温度との差 ΔT が一定の場合, 熱膜面に流れる電流 i とその表面におけるせん断応力 τ_w との間には,

$$\tau_w^{1/3} = A(i^2 R / \Delta T) + B$$

の関係が成立する。ここに, A, B は定数で, R は熱膜面の電気抵抗を表わす。せん断応力 $\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0}$ は, はく離点において 0 であるので, この点において熱膜面を流れる電流は

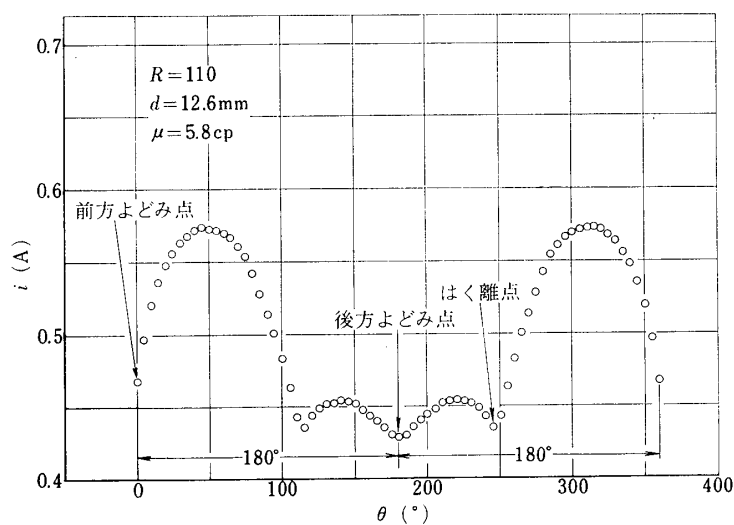


図2 角度に対する電流値の変化

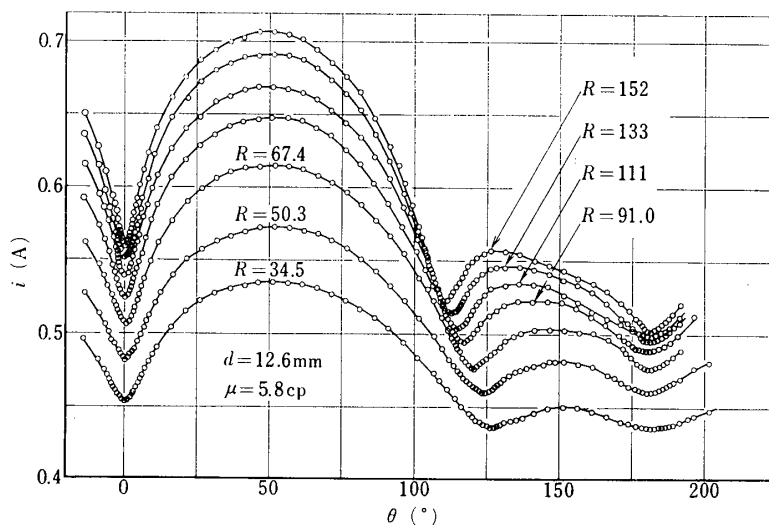


図3 角度に対する電流値の変化

極小値を示す。実際に Bellhouse らは円柱および平板の場合について実験を行い、電流の極小値と圧力ゲージから求めたはく離点の位置が層流境界層の場合一致することを確認し、この方法の妥当性を明らかにしている。

図2は上述の方法による測定結果の一例で、白金線に流れる電流 i と円柱前方よどみ点から測った白金線の角度 θ との関係およびはく離点の位置を示す。図から電流値がよどみ点に対して左右対称であることがわかり、流れの左右対称性が証明される。このような性質はレイノルズ数 R を変えた場合にも全く失われることはない。

図3に種々のレイノルズ数 $R(=\rho U d/\mu)$ における電流 i と角度 θ との関係を示す。ここに ρ は流体(砂糖水)の密度、 U および μ はそれぞれ主流速度、流体の粘性係数を表わす。

ここで電流値の変動にふれると、はく離点より前方では安定渦および不規則渦のいずれの場合にも、この変動はほとんど認められなかった。しかしはく離点より後方では、安定渦の場合はそれほど大きくないが、不規則渦になるとかなり顕著になる。図に示した値はこれらの時間的平均値である。

3. 実験結果および考察

3.1 はく離点が2個所に移動できる物体

a) 迎え角のある物体 図1(4)に示す形状をした物体の迎え角 $\theta(0\sim\pm 16^\circ)$ を変えた場合の渦の様相については、すでに他のところ[2]において述べた。この場合、主流速度 U を一定にして迎え角を大きくしていくと、最初のうちは安定渦がみられはく離点は後縁にあるが、迎え角がある大ききになると不規則渦に変わる。この変化に伴い、物体の後縁における一方のはく離点は前縁に移動する。

b) 四角柱 図4は四角柱の後縁から前方 1.5 mm の位置に取り付けた白金線に流れる電流 i とレイノルズ数 $R(=\rho U b/\mu)$ 、 b は四角柱の幅)との関係である。図の上半分は渦の

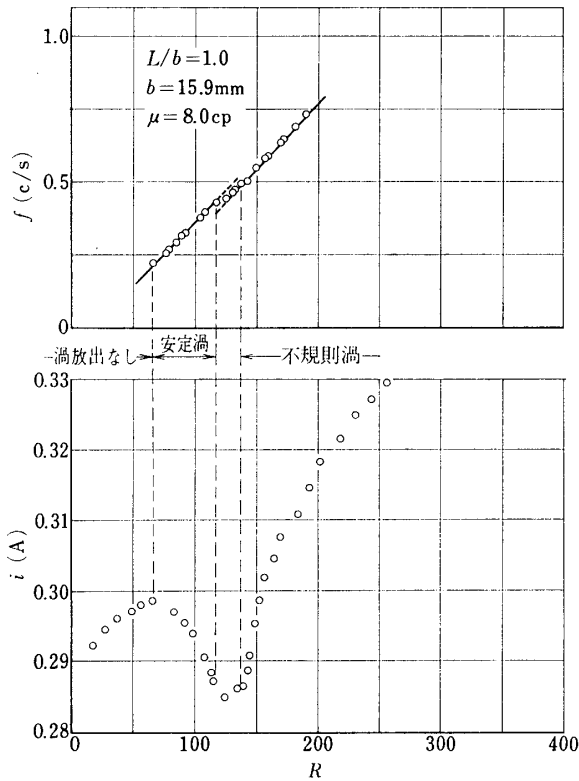


図 4 (1) 後流渦の遷移による電流値の変化

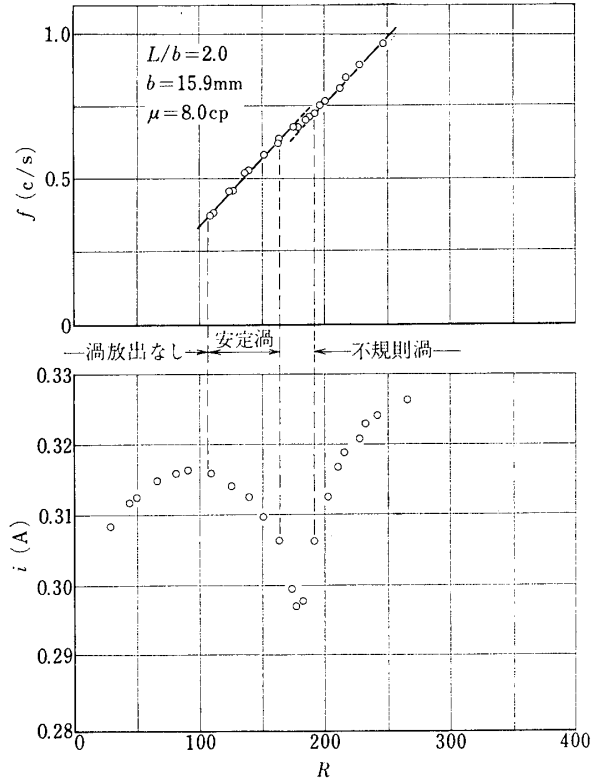


図 4 (2) 後流渦の遷移による電流値の変化

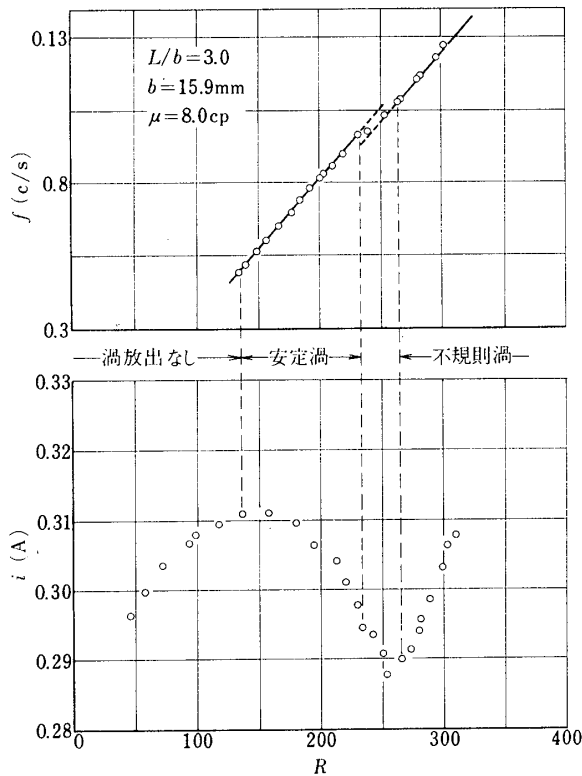
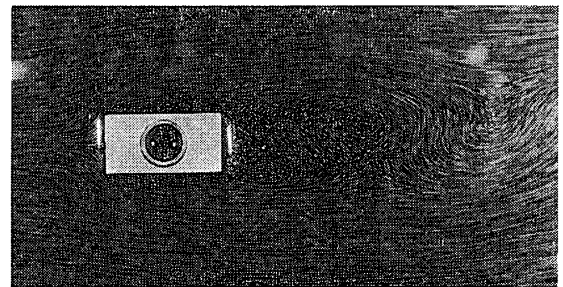
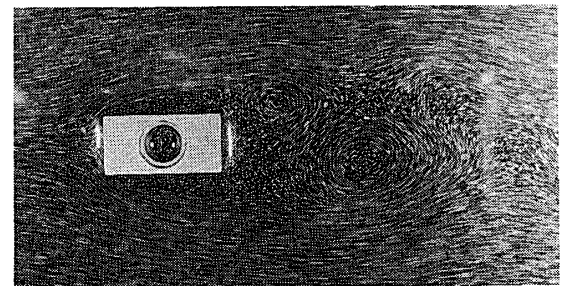


図 4 (3) 後流渦の遷移による電流値の変化



R = 126



R = 262

図 5 四角柱のまわりの流れの模様
 $L/b=2.0$, $R=126$: 安定渦
 $R=262$: 不規則渦

周波数 f とレイノルズ数 R との関係を表わし、安定渦および不規則渦の発生する範囲が示してある。

白金線に流れる電流は最初レイノルズ数（流速）の増加に伴い次第に増加し、渦が発生し始める点で極大値に達する。その後レイノルズ数の増加にしたがい減少し、安定渦から不規則渦に移る点で極小値をもち、さらにレイノルズ数が増加すると電流は再び増加するようになる。不規則渦になると境界層はく離の位置が物体の後縁から前縁に移動し、物体の後縁付近では物体表面に沿って逆流が生じる。逆流はレイノルズ数の増加に伴い次第に大きくなり、したがってそれに伴って電流値も増加する。これらの様子は図5に示した四角柱のまわりの流れの模様から理解できる。以上のことから安定渦の状態では、はく離が後縁で起り、不規則渦になるとこれが後縁から前縁に移ることがわかる。

3.2 はく離点が連続的に移動する物体

円柱および楕円柱のように表面が曲面をなす物体ではレイノルズ数の変化に伴いはく離点は連続的に移動する。ここでは、円柱の場合におけるはく離点の位置と後流渦の様相との関係について調べてみた。

a) 自由移動 前述の方法を用いて求めたはく離角 θ_s （円柱後方よどみ点とはく離点とのなす角度）とレイノルズ数 R との関係の一例を示したものが図6である。図中に Kawaguti & Jain [8], Hamielec & Raal [9] そして Dennis & Chang [10] らの計算結果も示してある。これらの値はレイノルズ数の低いところで、著者らの実験値とかなり良く一致している。図の上半分には、渦の周波数 f とレイノルズ数 R との関係が示してある。

レイノルズ数の増加に伴って、はく離角は次第に大きくなりあるはく離角に達したところで後流渦は安定渦から不規則渦へと遷移する。遷移後は遷移前に比較して、レイノルズ数の増加に伴うはく離角の増加は緩慢になる。

b) 強制的移動 次に図1(2)の円柱を用いて半ば強制的にはく離点の位置を変えた場合の後流渦の様相について述べる。

図7はその一例を示したもので、(1)(2)(3)はそれぞれ円柱にパイプをつけない場合の安定渦、遷移渦および不規則渦状態（図8）に対応する。ここで角度 θ は円柱前方よどみ点とパイプのなす角度を、また θ_s はパイプのない場合にお

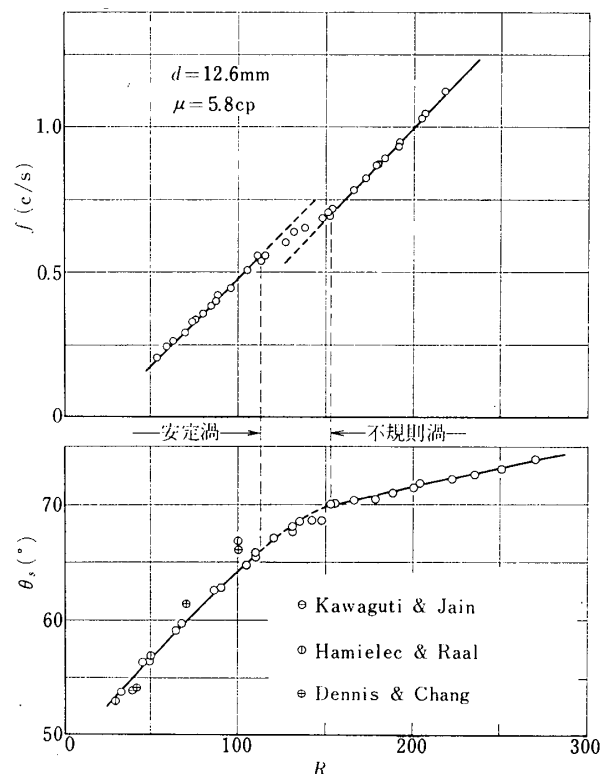


図6 後流渦の遷移とはく離角

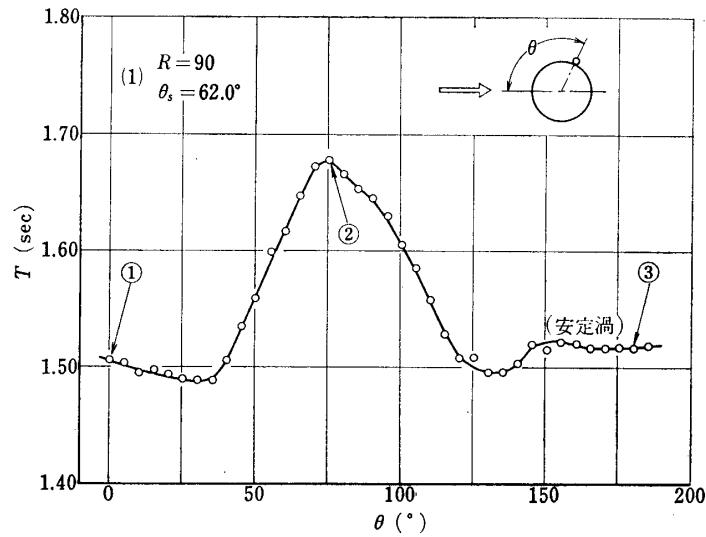


図 7 (1) はく離点の強制移動による渦の様相変化 (様相変化なし)

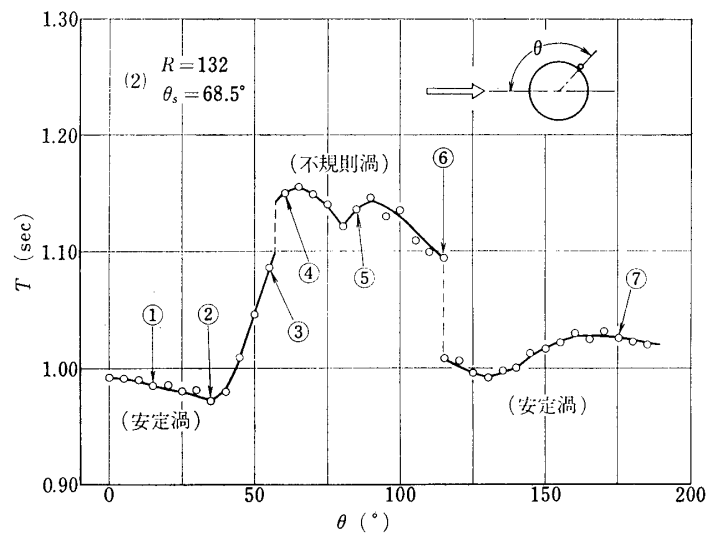


図 7 (2) はく離点の強制移動による渦の様相変化 (安定渦→不規則渦)

けるはく離角を表わしている。

図 9 は図 7 に対応する熱線流速計の出力波形で、 x および y はそれぞれ円柱中心から熱線流速計までの主流および直角方向の距離を表わす。

図 7 (1) は図 8 で安定渦に対応する場合で、パイプが円柱前面および後面付近にある場合は放出される渦の周期 T はほとんど変わらないが、 $\theta \doteq 75^\circ$ (2) を中心にかなりの周期の増加がみられる。しかしながら図 9 (1) の熱線流速計の出力波形をみると、渦は安定渦が持続していることがわかる。

図 7 (2) は図 8 で遷移状態にある場合で、 $\theta \doteq 57^\circ$ (3, 4) および $\theta \doteq 115^\circ$ (6) で周期は急激に変化し、図 9 (2) によると $\theta \doteq 57^\circ \sim 115^\circ$ の範囲で渦は不規則渦であることがわかる。

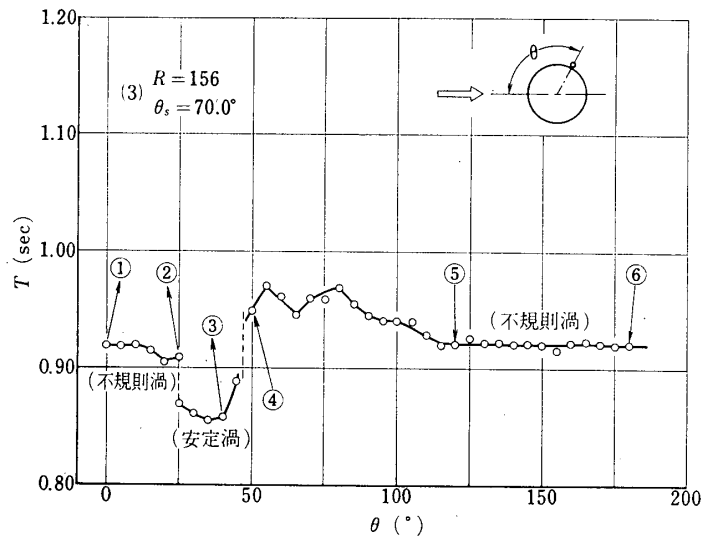


図 7 (3) はく離点の強制移動による渦の様相変化(不規則渦→安定渦)

このときの流れのはく離状態を観察すると、この θ 範囲ではパイプによりはく離点の位置が自由はく離点 θ_s より前方に強制的に移動している。しかし、さらに前方にパイプが置かれると一度はく離した境界層が下流で再び円柱表面上に付着し、パイプのない場合とほとんど同様のはく離状態を示すようになる。

図 7 (3) および図 9 (3) は図 8 で不規則渦に対応するものについて示したものであり、この場合は、逆に $\theta \approx 25^\circ \sim 45^\circ$ (③) で安定渦がみられる。この θ 範囲ではく離点を観察すると、流れは θ で一度はく離するが、下流で再び円柱表面上に再付着し、再度はく離する場合のはく離点の位置は θ_s よりも後方になっている。このため渦は安定渦になるものと思われる。

上述のことから後流渦の遷移の起る近傍において、はく離点の位置を強制的に変えてやることにより、本来安定渦であるものを不規則渦あるいは不規則渦であるものを安定渦へと変えることが可能であることがわかる。

3.3 はく離点が 1 個所に固定される物体

これまで述べたおのおの場合、いずれもはく離点が物体表面上を移動できる場合であるが、物体が図 1 (5) および図 1 (6) のような形状をした場合、はく離点の位置は 1 点に固定され移動することはできない。以下このような物体の場合について述べる。

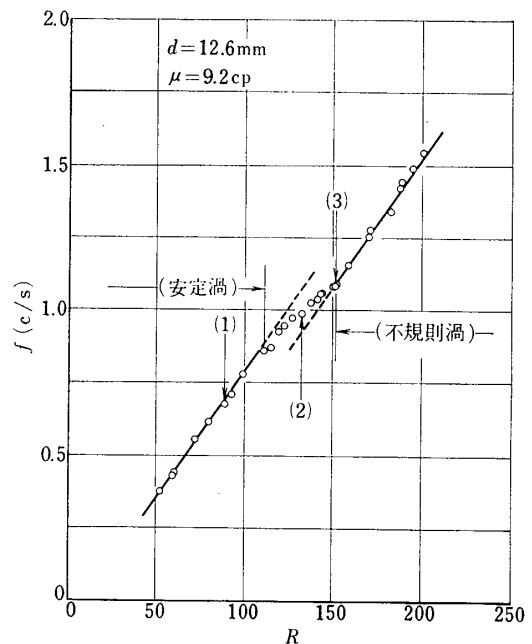


図 8 渦の周波数とレイノルズ数との関係

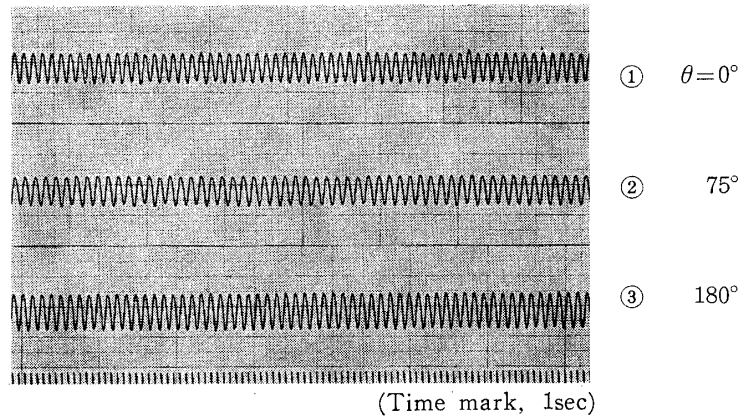


図 9 (1) 熱線流速計の出力波形 $x/d=4.0$
 $y/d=0.8$ ①②③: 安定渦

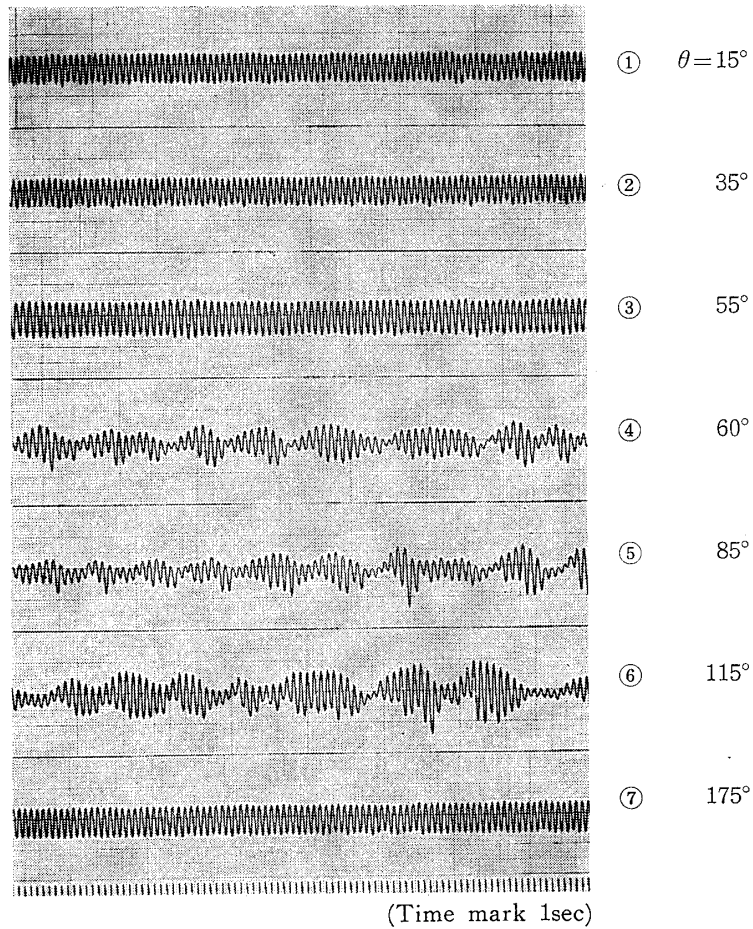


図 9 (2) 熱線流速計の出力波形 $x/d=4.0$, $y/d=0.8$ ①②③⑦: 安定渦, ④⑤⑥: 不規則渦

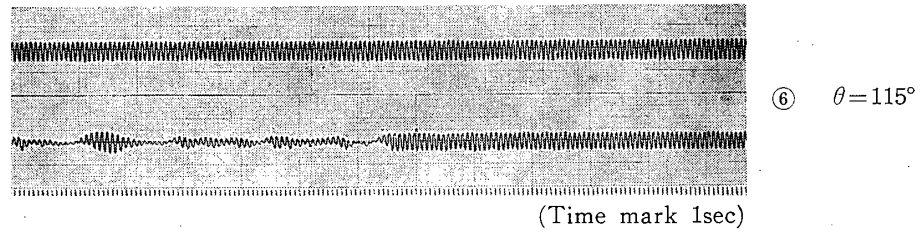


図9(2) 熱線流速計の出力波形 $x/d=4.0, y/d=0.8$ 安定渦から不規則渦への変化の様子

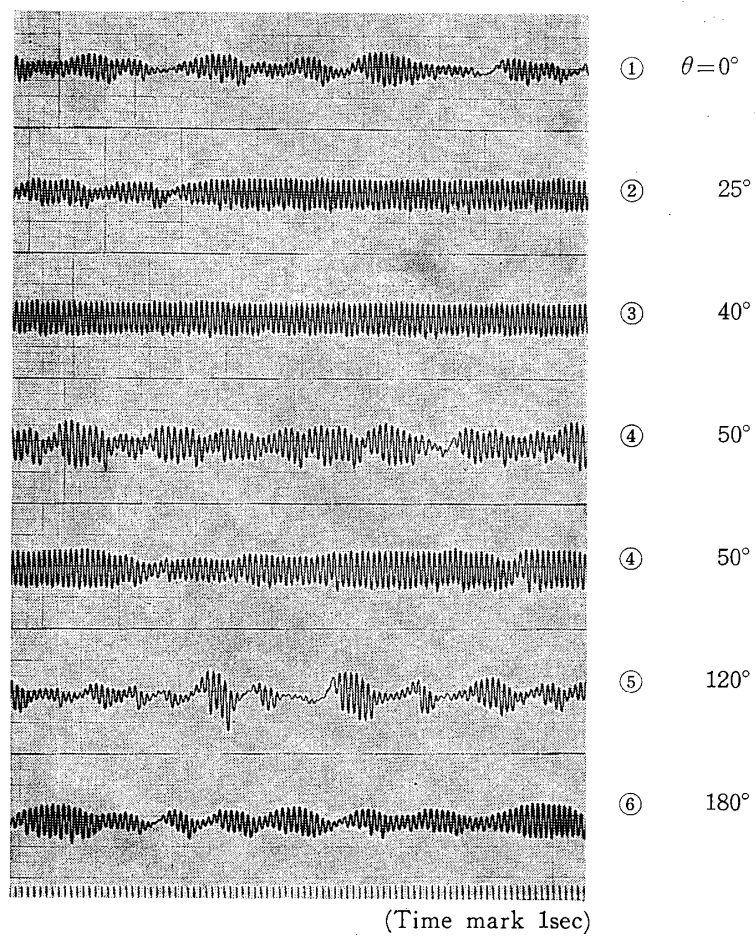


図9(3) 熱線流速計の出力波形 $x/d=4.0, y/d=0.8$ ③: 安定渦, ②④: 遷移渦, ①⑤⑥: 不規則渦

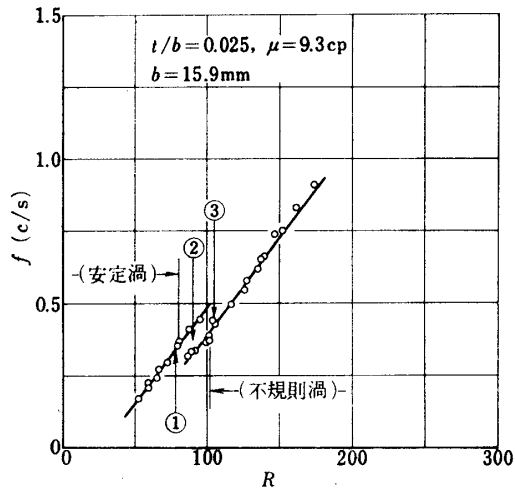


図 10 渦の周波数とレイノルズ数との関係

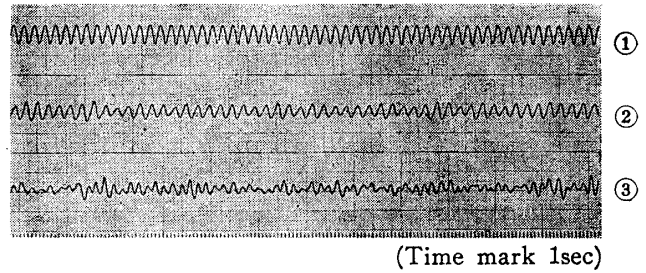


図 11 熱線流速計の出力波形 $t/b=0.025, x/b=3.0, y/b=0.75$ ①: 安定渦, ②: 遷移渦, ③: 不規則渦

- ① $R=78$
- ② $R=87$
- ③ $R=105$

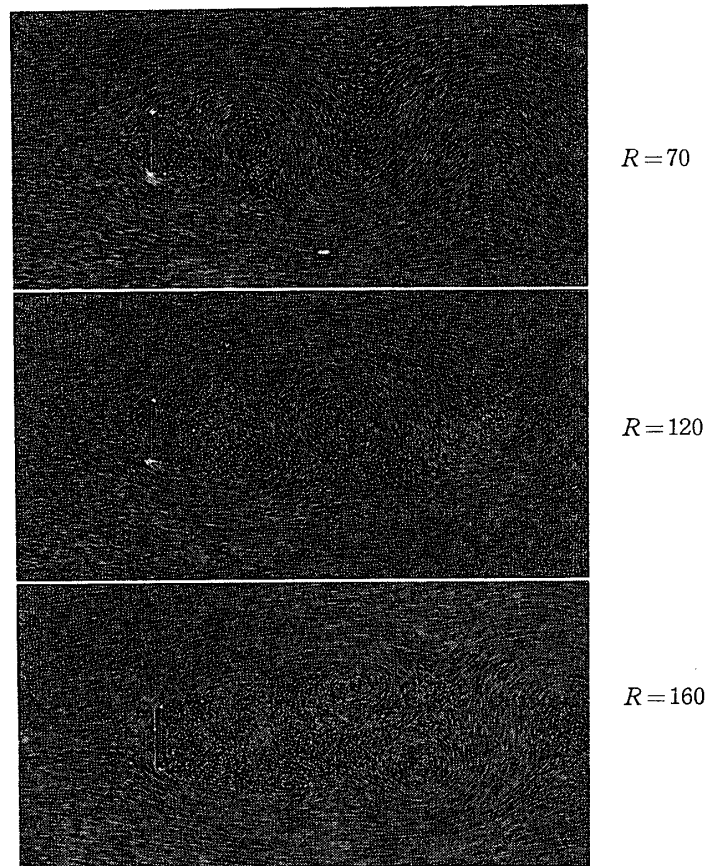


図 12 薄板のまわりの流れの様子 $R=70$: 安定渦, $R=120, 160$: 不規則渦

a) 薄板 図 10 は流れに対し直角に置かれた薄板における後流渦の $f-R$ 関係を表わし、また図 11 は図 10 に対応する熱線流速計の出力波形を示したものである。これらの結果から、薄板の場合も他の物体と同様にレイノルズ数 $R(=\rho Ub/\mu)$ の増加に伴い安定渦および不規則渦の起ることがわかる。しかしながら、安定渦の持続するレイノルズ数範囲は他の物体（たとえば円柱）と比較してかなり小さく、ほとんど不規則渦が支配的に起る。

図 12 は薄板のまわりの流れの模様を表わしたもので安定渦ではく離点からのせん断層は物体の中心線を越えて対向する渦の側に交互に深く巻き込むような形をしているが、レイノルズ数の増加に伴いせん断層の中心線を越えての巻き込みは次第に浅くなり、不規則渦に変わることがわかる。

b) 二等辺三角柱 図 1(5) に示した二等辺三角柱の場合も、レイノルズ数の増加に伴い安定渦および不規則渦が現われる。薄板の場合と同様に、安定渦ではく離点からのせん断層は物体の中心線を越えて対向する渦の側に深く巻き込んでいるが、不規則渦になると中心線を越えての巻き込みは起らなくなる。

これに対し、上述の二等辺三角柱が流れに対し反対向きに置かれるとレイノルズ数の比較的低いところから不規則渦が現われるようになる。このことは、このような物体では、はく離点からのせん断層が物体の中心線を越えて対向する渦の側に深く巻き込むことを妨げられることに関係するものと思われる。

以上述べたことから、はく離点の固定した物体の場合でも安定渦および不規則渦が現われることがわかり、これははく離点からの相対するせん断層の巻き込みの干渉度合に大きく関係するようと思われる。

4. 結 論

以上の実験結果から、各種の形状を異にした物体の後流渦の様相とはく離点との関係について次のことがわかる。

1) 円柱の場合、はく離点が円柱後方から流れの上流方向に向かって移動し、ある点において安定渦から不規則渦に変わる。このとき、遷移近傍においては、はく離点の位置を強制的に移動させることにより、安定渦から不規則渦へ反対に不規則渦から安定渦に変えることができる。

2) 四角柱のようにはく離点が前縁と後縁の 2 個所にある物体では後縁ではく離する場合が安定渦で、これが前縁からおこなわれると不規則渦となる。

3) 薄板や二等辺三角柱のようにはく離点の固定した物体の場合は、渦形成領域におけるせん断層の巻き込み状態により安定渦および不規則渦が形成される。

1973 年 12 月 6 日 原動機部

参 考 文 献

- [1] 服部, 八田, 小竹: 機械学会論文集, 39-318 (昭 48), 665
- [2] 服部, 八田, 小竹: 機械学会論文集, 39-318 (昭 48), 674
- [3] Thom, A.: Proc. Roy. Soc., A, 141 (1933), 651

- [4] Homan, F.: *Forsch. Ing.-Wes.*, **7** (1936), 1
- [5] Grove, A. S., Shair, F. H., Petersen, E. E. and Acrivos, A.: *J. Fluid Mech.*, **19** (1964), 60
- [6] Son, J. S. and Hanratty, T. J.: *J. Fluid Mech.*, **35** (1969), 353
- [7] Bellhouse, B. J. and Schultz, D. L.: *J. Fluid Mech.*, **24** (1966), 379
- [8] Kawaguti, M. and Jain, P.: *J. Phys. Soc. Japan*, **21** (1966), 2055
- [9] Hamielec, A. E. and Raal, J. D.: *Phys. Fluid*, **12** (1969), 11
- [10] Dennis, S. C. R. and Chang, G. Z.: *J. Fluid Mech.*, **42** (1970), 471