

# 乱流剥離・再付着流れの能動制御

木谷 勝\*

## Active Control of a Turbulent Separated Flow

Masaru KIYA

Department of Mechanical Engineering, Hokkaido University

### ABSTRACT

The leading-edge separation zone of a blunt circular cylinder is forced by a sinusoidal disturbance introduced at the separation edge. Reynolds number is of the order of  $10^4-10^5$ . For the forcing amplitude less than 10% of the main-flow velocity, the reattachment length attains a sharp minimum at a particular forcing frequency. A model is presented to successfully interpret this frequency and the minimum reattachment length. For the forcing amplitude of 14–20%, the separation zone is almost eliminated in a range of the forcing frequency.

Key Words : active control, separation bubble, periodic forcing, reattachment length, large-scale structure

### 1. はしがき

固体表面からの流れの剥離を防ぐことは、大迎角における航空機翼の空力性能の向上、流体を取り扱う機器・装置の性能向上に不可欠のことである。剥離の避けられない場合には、いったん生成された剥離領域をできるだけ縮小する必要がある。本論文はこの第2の場合の基礎研究として、鈍頭円柱の前縁乱流剥離泡を、剥離線に沿って導入された正弦波速度攪乱によって制御することを試みたものである。剥離の制御には受動的制御と能動的制御があり、*Gad-el Hak & Bushnell*<sup>1)</sup>による解説、日本機械学会分科会報<sup>2)</sup>などがある。剥離流れの能動制御については木谷<sup>3)</sup>による展望がある。

### 2. 実験装置および方法

図1に流れの概念図、座標系  $(x, y)$  および主な記号の

定義を示してある。実験は横幅1.5m、高さ1.2m、長さ6mの矩形断面試験部をもつ還流風洞内を用いて行った。風洞内の乱れは主流速度  $U_\infty = 5-15\text{m/s}$  において0.3%、試験部後端に設けられたブリーザーで計測された騒音レベルは80dB (A) であった。速度変動および圧力変動のスペクトルには顕著なピークは認められない。供試円柱は直径  $d = 0.200\text{m}$ 、長さ2.0mの亚克力樹脂製であり、10本のピアノ線で風洞試験部中央に固定された。円柱の前縁に沿って周方向に一様に幅  $2.75 \pm 0.10\text{mm}$  のスリットを設け、円柱内部に組み込んだスピーカーによって剥離せん断層に正弦波の速度変動を導入した。前縁における境界層の外縁よりやや外側の位置を基準点として、この位置における速度変動にもとづいて攪乱の強さと周波数を定義した。基準点における速度変動は良好な正弦波であり、攪乱周波数  $f_c$  はスピーカの周波数と同一であった。攪乱の強さは振幅の実効値  $q_r'$  で表すことにする。

剥離せん断層の時間平均再付着点は、円柱の表面近く

\* 北海道大学工学部

(表面から1mmの高さ)における逆流時間割合 $I$ が0.5の値をとる位置と定義した。このように定義される再付着点は、表面摩擦応力が0となる点として定義される再付着点にちかい (Ruderich & Fernholz<sup>4)</sup>)。剥離点と再付着点の距離を再付着長さ $x_R$ とする。順流と逆流の識別は、*Split-film probe*によって行った。なお、剥離領域の速度は $xy$ 面に垂直な $I$ 形熱線プローブによって測定した。このプローブでは順流と逆流が不規則に転換する領域の速度は正しく求められないが、攪乱による速度の大きさの変化を見積もるうえでは有用である。攪乱による剥離せん断層の構造変化を調べるために、*Smoke wire*および*Tuft probe*による流れの可視化も併用した。

本実験における、主流速度 $U_\infty$ と円柱直径 $d$ にもとづくレイノルズ数 $Re$ は $10^4 - 10^5$ の程度である。

### 3. 実験結果および考察

制御の効果をあらわす尺度として再付着長さ $x_R$ を採用する。図2は主流速度の10%以下の攪乱強さに $x_{R0}$ における再付着長さ $x_R$ と攪乱周波数の関係を示す。再付着長さは攪乱がないときの値 $x_{R0}$  ( $=1.60d$ ) によって無次元化されており、攪乱周波数は円柱直径と主流速度によって無次元化されている。図2から再付着長さは $f_{ex} d / U_\infty = 1.6 - 2.1$ の攪乱周波数において極小値 $x_{Rm}$ をとることがわかる。極小値は図3に示すように攪乱強さの対数関係でよく近似できる。

極小値を与える攪乱周波数 $f_m$ は、つぎの二つの仮定：  
(i) この剥離再付着流れがフィードバック機構によって維持される自動振動系である (Mabey<sup>5)</sup>)；  
(ii) 再付着点が攪乱によって巻き上がったせん断層の渦の $n$ 回目の合体位置に一致するとき、再付着長さの極小値が実現される；  
をおくことによって導くことができる。ただし $n$ の値は攪乱強さの関数であり、実験によって決定しなければならない。なお、仮定 (ii) では $n$ 回目の合体によってつくられた渦の中心が再付着点に一致するものと考えている。

仮定 (i) から、音速を $a$ 、せん断層の渦の移動速度を $U$ 、とすれば

$$\frac{x_k}{a} + \frac{x_R}{U} = \frac{N}{f_i} \quad (1)$$

である。ここに、 $f_i$ はこのフィードバック系の基本周波数であり、再付着領域から大規模な渦が放出される周波数と解釈することができる。また $N$ は正整数である。本研究では主流速度は音速に比較してはるかに小さいから、式 (1) は $N=1$ のとき

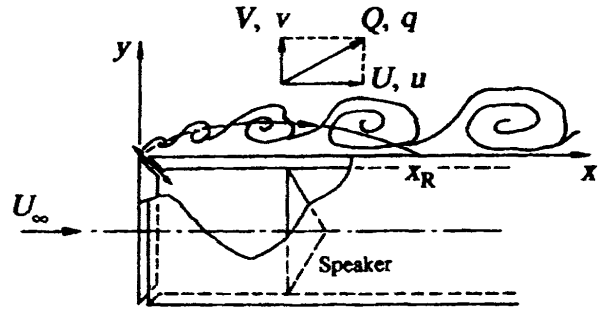


図1 流の概念図および主な記号の定義

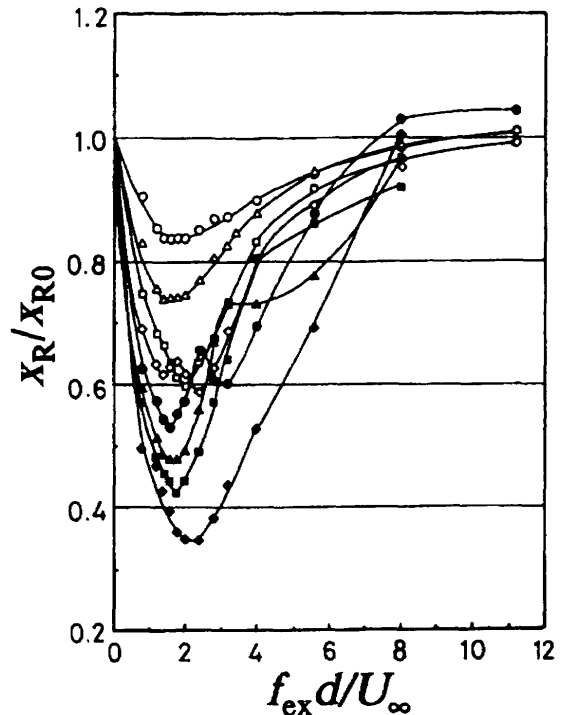


図2 再付着長さと攪乱周波数の関係 ( $q_f' / U_\infty \leq 0.10$ ).  
○,  $q_f' / U_\infty = 0.005$ ; △, 0.01; □, 0.02; ◇, 0.03; ●, 0.04; ▲, 0.05; ■, 0.06; ◆, 0.10.

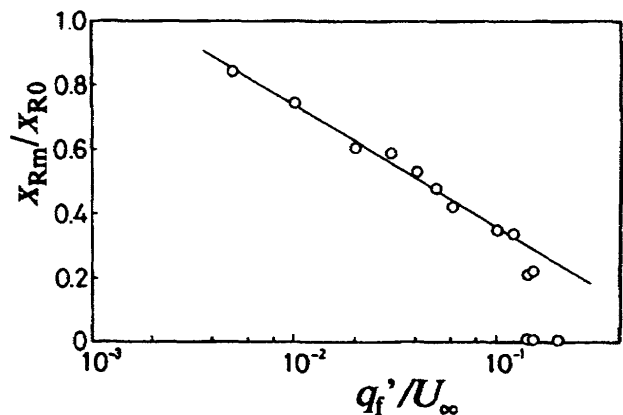


図3 再付着長さと極小値と攪乱強さの関係。実線は10%以下の攪乱強さに対する実験式： $x_{Rm} / x_{R0} = -0.371 \log_{10} (q_f' / U_\infty) - 0.007$ .

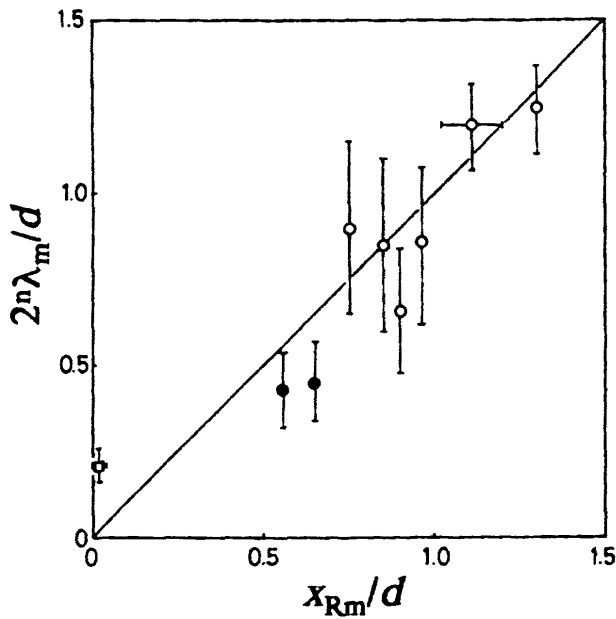


図4 再付着長さの極小値に対する理論モデルと実験の比較. ○, n=1; ●, n=2; □, n=2.

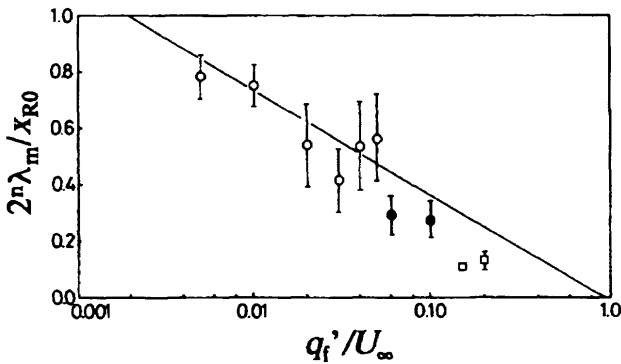


図5 再付着長さの極小値と攪乱強さの関係に対する理論モデルと実験の比較. ○, n=1; ●, n=2; □, n=2.

$$\frac{f_i x_R}{U_\infty} = \frac{U_c}{U_\infty} \quad (2)$$

となる。渦の移動速度は主流速度のほぼ1/2であるから、式(2)の右辺は0.5に近い。実際、広い範囲の剥離再付着流れにおいて、 $f_i x_R / U_\infty$ は0.5程度の値をとることが知られている(Mabey<sup>5</sup>)。このことは主流に乱れがあるときも同様である(Cherry et al.<sup>6</sup>)。したがって、フィードバック機構の存在は確実のようである。

仮定(ii)は、再付着長さの極小値と攪乱の波長との関係を与える。すなわち、剥離点に与えられた周波数 $f_m$ の周期的速度変動は、剥離せん断層に波長 $\lambda_m = U_c / f_m$ の攪乱を与えるから、一度に2個の渦が合体するものとすれば、 $n$ 回目の合体の起こる主流方向位置は $2^n \lambda_m$ である。したがって

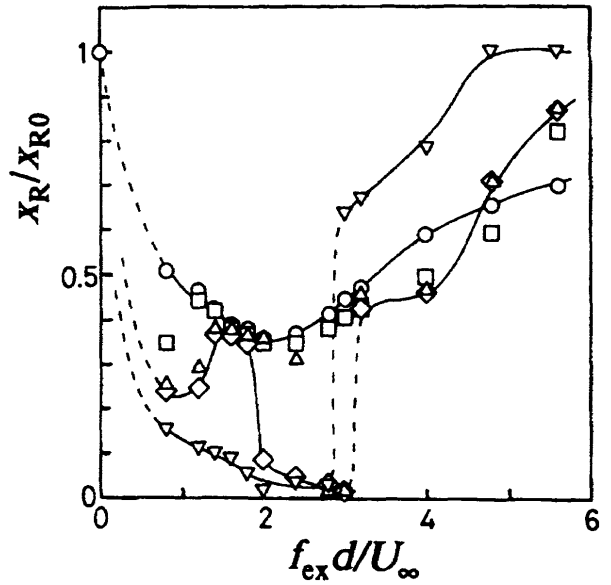


図6 再付着長さの極小値と攪乱周波数の関係. (0.10 ≤ q\_t' / U\_infinity ≤ 0.10). ○, q\_t' / U\_infinity = 0.10; □, 0.12; ◇, 0.14; △, 0.15; ▽, 0.20.

$$x_{Rm} = 2^n \lambda_m \quad (3)$$

あるいは

$$\frac{f_m x_{Rm}}{U_\infty} = \frac{2' U_c}{U_\infty} \quad (4)$$

図4は式(3)の関係を実験結果と比較したものである。両者の間にはよい対応があるので、仮定(ii)は妥当なものと考えられる。式(2)の $x_R$ を $x_{Rm}$ に置き換え、式(4)と組み合わせれば

$$\frac{f_m}{f_i} = 2' \quad (5)$$

の関係がえられる。すなわち、再付着長さの極小値を与える攪乱周波数は、再付着点から大規模な渦が放出される周波数に比例するのである。実験結果によれば0.5–5.0%の攪乱強さにおいて $f_m / f_i = 5.0 \pm 1.3$ 、6–12%の攪乱強さにおいて $f_m / f_i = 2.6 \pm 0.3$ であり、これらの比の値は式(5)においてそれぞれ $n=2$ および $n=1$ とおいたときの値に近い。また式(3)から計算される再付着長さの極小値と攪乱強さの関係は図5のようになり、10%以下の攪乱強さにおいては予測と実験の一致はわるくない。したがって、再付着長さの極小値が現れる機構について一つの説明が与えられたことになる。

図6は10%以上の強い攪乱における攪乱周波数と再付着

長さの関係を示す。攪乱強さが14-20%のとき、剥離領域は $f_c d / U_\infty \approx 2-3$ の攪乱周波数の範囲でほぼ消滅することがわかる。この現象を上述のモデルにもとづいて説明することは困難である。すなわち、極めて小さな再付着長さについては、式(5)の指数 $n$ としては $n=0$ を選ばざるをえない。しかしこれに対応する再付着長さの極小値の予測値は、 $f_c d / U_\infty \approx 2-3$ の範囲で $x_{rm} / x_{ro} = 0.1-0.2$ であり実験値よりもかなり大きい。この原因は、巻き上がった渦の中心が時間平均の再付着点に一致すると仮定したことにある。すなわち、両者の差は再付着点が前縁に近いほど相対的に大きいということである。

強い攪乱(20%)における円柱表面近傍( $y=1\text{mm}$ )の逆流時間割合 $I_r$ と主流方向速度成分 $U$ の分布は図7のようになる。剥離領域がほぼ消滅する攪乱周波数においては(図7b), 前縁近くに $I_r \approx 0.5$ すなわち $U \approx 0$ となる狭い領域があり, その下流ではつねに順流( $I_r < 0.5$ )である。攪乱周波数が増加すると(図7c), 逆流時間割合の下流側の極大値が増大し, さらに大きな攪乱周波数においては(図7d), この極大値が0.5を越えて再び広い逆流領域が現われる。図7cから図7dへの逆流時間割合分布の変化が, 図6の $f_c d / U_\infty \approx 3$ における再付着長さの急激な変化に対応している。

#### 4. 結言

本論文では鈍頭円柱の前縁における乱流剥離流れを正弦波速度攪乱によって制御した結果について述べた。適当な強さと周波数をもつ攪乱を採用すれば, 剥離領域を大幅に減少できることがわかった。この方法は翼の剥離の能動制御に応用可能と思われる。

#### 参考文献

- 1) Gad-el Hak, M. and Bushnell, D. M. : Separation control : Review, ASME J. Fluid Engineering, 113 (1991), 5-30.
- 2) せん断乱流の制御調査研究分科会成果報告書, 日本機械学会, (1994).
- 3) 木谷 : 剥離流れの能動制御, ターボ機械, 22 (1994), 262-268.
- 4) Ruderich, R. and Fernholz, H. H. : An experimental investigation of a turbulent shear flow with separation, reverse flow, and reattachment, J. Fluid Mech. 163, 283-322.
- 5) Mabey, D. G. : Pressure fluctuations caused by separated bubble flow at subsonic speeds, RAE Tech. Rep. 71160 ref. Aero. 3204, August 1971.
- 6) Cherry, N. J., Hillier, R. and Latour, M. E. M. P. : Unsteady measurements in a separated and reattaching flow, J. Fluid Mech. 144 (1994), 13-46.

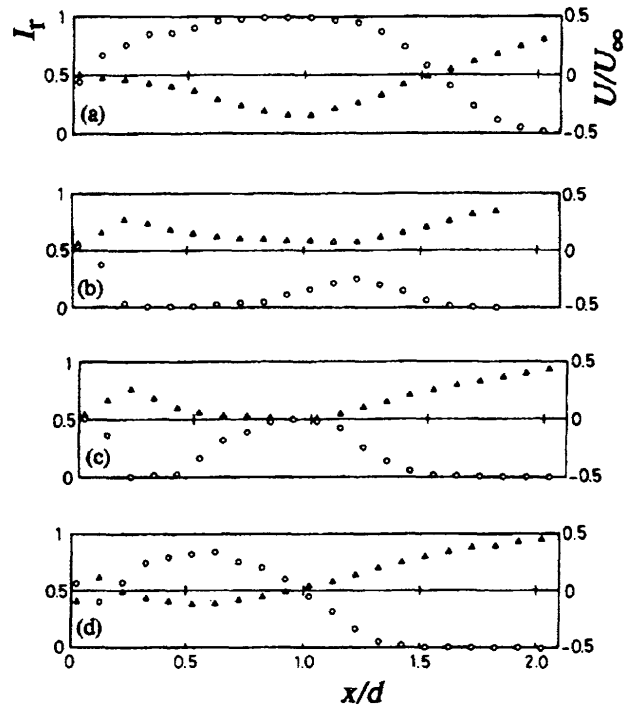


図7 攪乱による表面近くの逆流時間割合および主流方向速度成分の変化(測定位置: $y=1\text{mm}$ ).  $\circ$ ,  $I_r$ ;  $\triangle$ ,  $U$ . (a) 攪乱なし; (b)  $(q_c' / U_\infty, f_c d / U_\infty) = (0.20, 2.40)$ ; (c)  $(0.20, 2.8)$ ; (d)  $(0.20, 3.0)$ .