

# はく離抑制の最適化

石川 仁 (北大院工), 望月 修 (北大院工)

## Adequate Control for Suppression of Separation

Hitoshi ISHIKAWA\* and Osamu MOCHIZUKI\*

\* Hokkaido University, Division of Mechanical Science,  
Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, 060-8628 Japan

### ABSTRACT

An optimum condition for suppression of separation was investigated experimentally. A two-dimensional airfoil of NACA0015 with a large angle of attack was used to generate a separation. The flow near the surface was sucked in by four suction-cells independently. The cells were arranged in line at the center of the span. Several combinations of active cells and their suction volumes were tested to obtain the minimum power consumption of suction required for the suppression of separation. The extent of suppression was judged by the velocity profile obtained by flow visualization near the trailing edge. Each cell showed an optimum value of the suction volume for a specific angle of attack with separation. It was found that the suction performance of a cell was greatest if the cell was placed just in front of the separation point. A large saving in suction power was achieved when the cells were placed just in front of and at the separation point.

Key Words : Boundary Layer Suction, Separation, Control, Flow Visualization, Optimization

### 1. はじめに

本研究では, はく離発生領域と制御デバイス設置位置の関係, 制御のために消費する動力の省力化方法を見いだすことが目的である。これらを明らかにするために, はく離を確実に抑制できるあらかじめよくわかった手段を用いることが必要となる。なぜなら, その点に関する不確実性を取り除いておきたいからである。この意味で, 広く知られたはく離抑制の能動的な方法の一つである壁面からの吸い込み制御を採用した。この方法は境界層の概念が出されたときにすでに提唱されている歴史の長いものである<sup>①</sup>。これを翼の失速を防ぐために用いる場合, 翼前縁付近から吸い込む方法が一般的である<sup>②</sup>。また, 翼前縁からコード中央までの間に吸い込み口をつけるのが有効であることがわかっている<sup>③</sup>。また, 翼前縁におけるはく離せん断層の高さに応じた吸い込みをかける試みもなされているが<sup>④</sup>, 吸い込み口が固定されているために, それが最適位置とは限らないし, 吸い込み口がどの程度翼面をカバーするのがよいかといったことに対して答えを出

していない。

本研究では, 高迎角に設定された2次元翼のはく離を対象として, 翼負圧面側の一部分から境界層を吸い込むことによって制御を行った。はく離を伴う種々の迎角に対して, 吸い込み位置, 吸い込み口面積, 吸い込み流量などを種々に変化させて実験を行った。この結果, 最適はく離制御位置およびはく離を押さえるのに最小必要動力を明らかとした。また, はく離現象に対してどのように対処すればよいかを提案した。

### 2. 実験装置及び方法

吸い込みによる翼まわりの流れの変化を可視化によって調べるために, 試験部断面250mm×250mmの試験部を持つ循環式水路で実験を行った。実験条件は主流速度 $U=0.04$  m/s, 翼弦長 $c$ を基準とするレイノルズ数 $Re(=Uc/\nu)$ ,  $\nu$ : 動粘性係数)は3500であった。

実験に用いた翼の断面を図1に示す。翼断面形状はNACA0015翼形であり, 翼厚13.2mm, コード長 $c=88$ mm, 流れにさらされるスパン長さは178mmである。

翼前縁から対称線に沿って下流方向に測った距離を $x$ とし、これを翼弦長で除した無次元距離を $x/c$ と表す。迎角 $\alpha$ は対称線と主流とのなす角である。翼負圧面側にM40のメッシュで覆われた4つの吸い込み口(セル)が翼端面から78mmのスパン方向断面位置(水深に対して中央)で、セルの中心が $x/c=0.13, 0.36, 0.63, 0.85$ となる位置に設けられている。それらを前縁から後縁に向かって順にセル1~4と呼ぶことにする。セルの面形状はコード方向に長さ14mm、スパン方向に幅23mmの長方形である。

吸い込み装置の概略を図2に示す。吸い込みは吸い込みセルに接続された管の排水口と水面とのヘッド差を利用して行った。本実験ではヘッド差を4.5mとした。吸い込み流量を吸い出し管の途中に設けたニードルバルブにより微調整した。4つのセルのうちどれを作動させるかはニードルバルブの上流に設けた電磁弁

のON/OFFにより行った。1回の実験において、吸い出し管によって排出される流量は最大でも水路全体の流量の0.13%であったので、速度変化およびヘッド変化に大きな影響はないとみなし、吸い出しによって失われた水を実験の最中に補うことはしなかった。ただし、実験のはじめには失った分の水を補給し、初期値を同じにした。

翼負圧面側における速度分布を水素気泡法によって得た。翼負圧面上の吸い込みセルを含む面内において $x/c=0.06, 0.28, 0.53, 0.78, 0.94$ のそれぞれの位置に、翼面に垂直に直径50 $\mu$ m白金線を張ってある。これらの白金線から放出される水素気泡によって描かれるタイムラインをビデオカメラで撮影したのち、その画像から速度分布を読み取った。これにより、それぞれの位置における速度分布の時間変化を同時に得ることができる。また、白金線は一端を翼面、他端を翼と一体

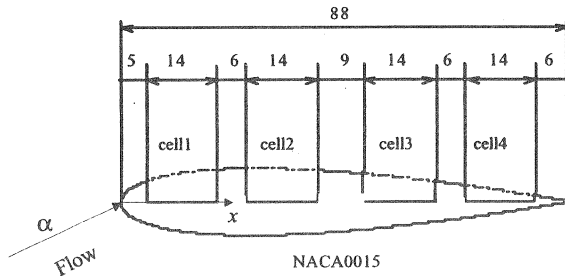


Fig. 1 Airfoil, suction cells and coordinates.

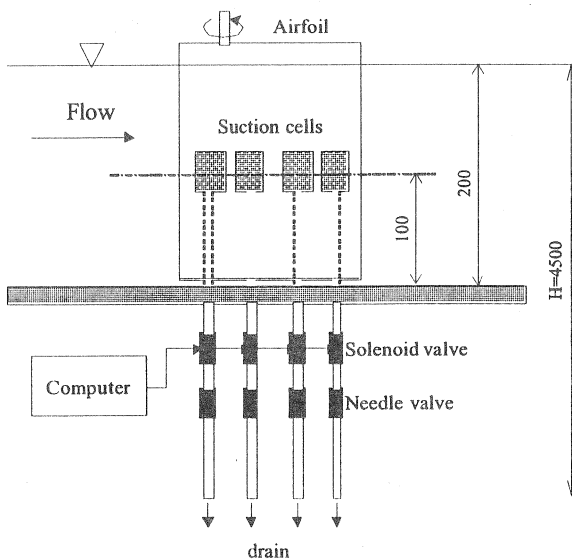


Fig.2 Experimental setup and suction system. (Side View)

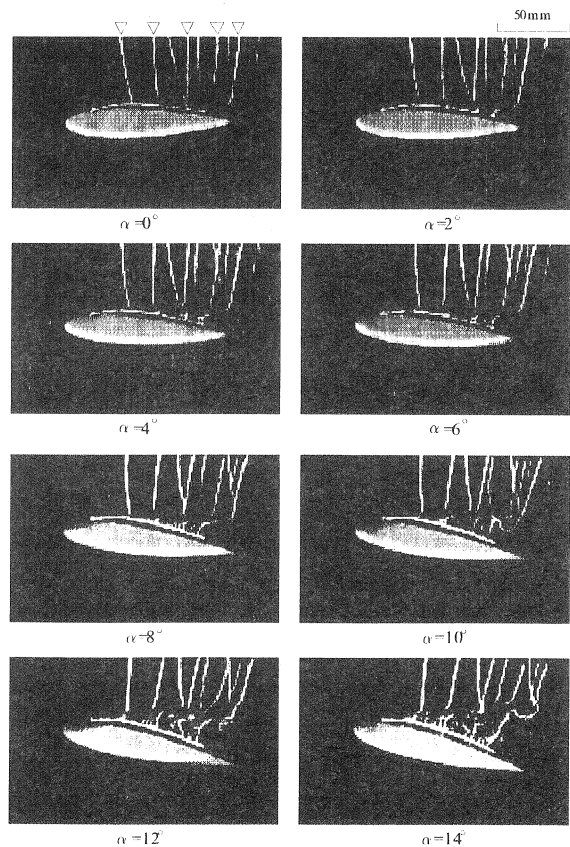


Fig.3 Flow at different angle of attack.  $\nabla$ : time line at 0.5 after generation.

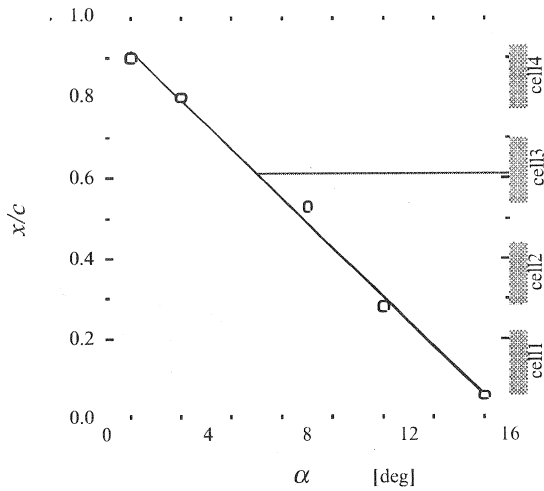


Fig.4 Separation point against angle of attack.

に動くサポートに固定されているので、翼の迎角を変えても翼と白金線の相対位置が変わらず、したがって翼と一緒に移動する座標における流れ場の変化を可視化することができる。

### 3. 結果及び考察

**3.1 吸い込みセル1つを用いた制御** 迎角に対する翼の負圧面側における流れ場の違いを図3に示す。 $\alpha=0^\circ$ では、後縁においても逆流は生じておらず、はく離は起こっていない。 $\alpha=2^\circ$ の場合には、 $x/c=0.94$ 位置に張られた白金線から放出された水素気泡のうち壁面近くのものの上流方向に向かっており、そこで逆流が生じていることがわかる。迎角を $\alpha=4^\circ$ まで増加させると、 $x/c=0.78$ において壁面のごく近傍に逆流が確認できる。 $\alpha=6^\circ, 8^\circ$ ではその事がより顕著になる。 $\alpha=10^\circ$ では、 $x/c=0.50$ においても逆流がみられる。 $\alpha=12^\circ$ では $x/c=0.28$ の位置で逆流が生じており、はく離せん断層から巻きあがった大きな渦が放出される。 $\alpha=14^\circ$ においては、ほぼ全面がはく離領域に入っていることなどがわかる。

迎角に対するはく離位置の関係を図4に示す。図3に示した可視化観測から予想されるように、迎角が大きくなるとはく離位置は前縁に近づくことがわかる。この結果から、前縁からはく離が起こる迎角を類推すると、変化傾向を示す線を延長することによって、 $\alpha \approx 16^\circ$ において翼負圧面の全体がはく離領域に入ると

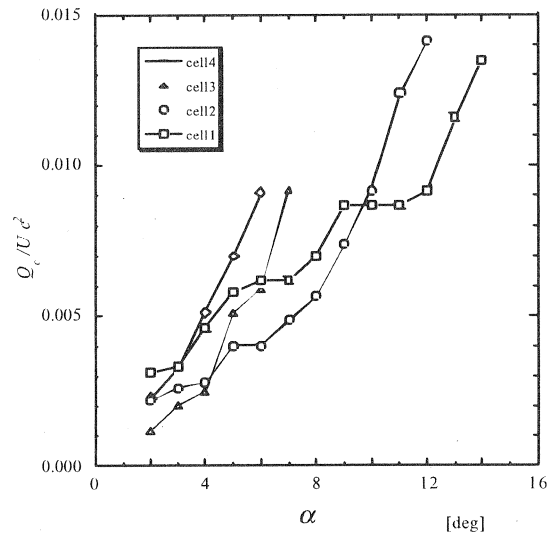


Fig. 5 Suction volume of each cell against angle attack.

考えられる。

異なる迎角に対して、4つのセルそれぞれにおいて、はく離抑制に必要な最適吸い込み流量 $Q_c$ を調べた。結果を図5に示す。図の横軸は迎角、縦軸は $Q_c$ を翼負圧面全体で主流流速の吸い込みを行ったとしたときの流量で無次元化したものである。どのセルにおいても迎角の増加に伴い $Q_c$ は増加する傾向であることがわかる。しかし、各セル間の $Q_c$ を比較すると、迎角が $\alpha=2^\circ \sim 4^\circ$ までの範囲では、セル3を用いると最も少ない $Q_c$ ではく離を抑制できることがわかる。また、迎角に対して最も少ない $Q_c$ を与えるセルを調べると、 $\alpha=4^\circ \sim 10^\circ$ の範囲ではセル2、 $\alpha=12^\circ$ 以上ではセル1が、それぞれの迎角範囲において、最も少ない $Q_c$ ではく離を抑制できることがわかる。

一方、最も後縁寄りに位置するセル4の $Q_c$ は、それを計測できた迎角範囲において他のセルのものより大きい。すなわち、後縁付近にセルを設けると他の位置のものより多くの吸い込み流量を必要とすることがわかる。

迎角が大きくなると最小 $Q_c$ を与えるセルの位置が前縁方向に移行する理由を、図4と図5の結果を比較することにより考察する。たとえば図5から、セル3が最も少ない $Q_c$ を与える迎角範囲が $\alpha=2^\circ \sim 4^\circ$ では、はく離点は図4から $x/c=0.75 \sim 0.85$ 、すなわちセル4上にあることがわかる。次に、セル2が最も少ない $Q_c$ を与える迎角範囲は $\alpha=4^\circ \sim 10^\circ$ であり、そのとき、

はく離点はセル3上にある。同様に、セル1が最も少ない $Q$ を与えるとき、はく離点はセル2上に存在することがわかる。すなわち、最も少ない $Q$ で、はく離を抑制できるセルは、はく離点よりも少し上流に位置するものであるといえる。

図5において、その迎角範囲におけるセル間の $Q$ を比較すると、はく離点から上流側に離れたセルほどその $Q$ が大きいことがわかる。すなわち、はく離を最も少ない吸い込み流量で制御するためには、はく離点直前のセルを用いることが有効であることがわかる。なお、セル4が最小の $Q$ を与えられる迎角範囲がなかった理由として、 $\alpha=2^\circ$ 以降においてセル4は常にはく離領域内に入っているためと考えられる。

3-2 吸い込みセルを2つ用いた制御 はく離点がセル3の上に位置するように、迎角を $\alpha=5^\circ$ に設定した。このときセル4ははく離領域内、セル3ははく離点位置、セル2ははく離点上流、セル1ははく離点から遠く離れた上流に位置するという関係にある。この迎角において単独セル使用の場合、最も少ない流量ではく離を抑制できるセルは図5からわかるようにセル2であり、 $Q/U\infty=0.004$ であった。これよりも流量を減らせるセルの組み合わせが存在するかを調べた。

次に示す2つのセルの組み合わせ(c1,c2),(c2,c3),(c2,c4),(c3,c4)において、2つのセルにおける流量の和を、セル2単独のものより最大で20%少なくできた。ここに、c2,c3,c4はそれぞれセル2,3,4を表す。ここで興味深いことは、これらの組み合わせにおいて、必ずはく離点かはく離点直前のセルが含まれていることである。このことから、はく離点近傍を含む領域で吸い込むことが効果的であることがわかる。

次式によって算出される吸い込み動力を比較してみよう。すなわち、

$$E_s = \frac{1}{2}(\rho A V_1) V_1^2 + \frac{1}{2}(\rho A V_2) V_2^2 \quad (1)$$

ここに、 $E_s$ :吸い込み動力、 $A$ :吸い込み口面積、 $\rho$ :水の密度、 $V_1$ :片方のセルの吸い込み流速、 $V_2$ :もう一方のセルの吸い込み流速である。

単独セルのものと2つのセルを用いたときの吸い込み動力の比較を図6に示す。図において一番左のカラムは単独セルの場合(セル2使用)における吸い込み動力である。これを100%として他のものを比較している。カラムの上に表示したたとえば(c3,c4)は、セ

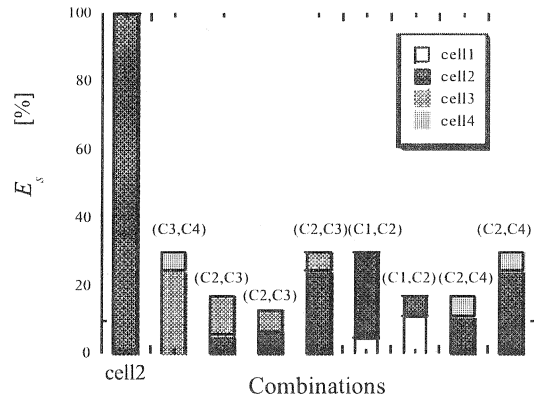


Fig. 6 Comparison of suction power between several combinations of cells.

ル3と4を用いたことを表し、そのカラム中の塗り分けはセル3とセル4の流量比を表している。これによると、流量の和が同じでも、動力比較をすると、(c2,c3)においてそれぞれの流量が同じときに吸い込み動力を最低にできることがわかる。このとき、動力は単独セル使用時の13%となっている。

#### 4. 結論

はく離領域とその制御装置設置位置の関係、および制御のために消費する動力の省力化の方法を見いだす目的で、吸い込みを用いたはく離制御実験を行い、次の結果を得た。

- (1) はく離点直前の位置から吸い込むのが効果的である。
- (2) はく離点手前とはく離点を含む領域に吸い込みを一樣に行うとはく離抑制に必要な動力を最低にできる。

#### 参考文献

- (1) Prandtl著, 橋 藤雄, 白倉 昌明 監訳, 流れ学(上), コロナ社(1978), 258-263.
- (2) Schlichting, H., Boundary Layer Theory, McGraw-Hill, (1960), 362-390.
- (3) Wuest, W., Theory of Boundary Layer Suction to Prevent Separation, Boundary Layer and Flow Control Vol. I, Edt. G. V. Lachmann, (1961), 196-208.
- (4) Karim, M. A. and Acharya, M., Suppression of Dynamic-Stall Vortices over Pitching Airfoils by Leading-Edge Suction, AIAA J. 32-8(1994), 1647-1655.