

2次元はく離流れの可視化

水谷正和*

Visualization of Two-Dimensional Separating Flow

Masakazu MIZUTANI*

(Received September 8, 1975)

The three-dimensional boundary-layer separation is studied experimentally. In this experiment, the visual flow is observed directly by the use of smoke. Several ambiguous points concerning the smoke technique are clarified by comparing the results obtained through this experiment with the well-known results for the two-dimensional boundary-layer.

1. 緒言

2次元境界層は、よく研究されて実験理論ともにほとんど完ぺきであるが、3次元境界層となると理論的考察が不完全であるばかりでなく、実験的にも成功した実例が少ない。

そこで、なるべく簡易な方法で、しかも少ない予算の範囲内で3次元境界層の実験的研究にどれだけの業績がおさめられるか、という問題を提起し、とくに3次元はく離に照準をつけて研究することとしたが、その最初の処置は、実験技術の確立である。

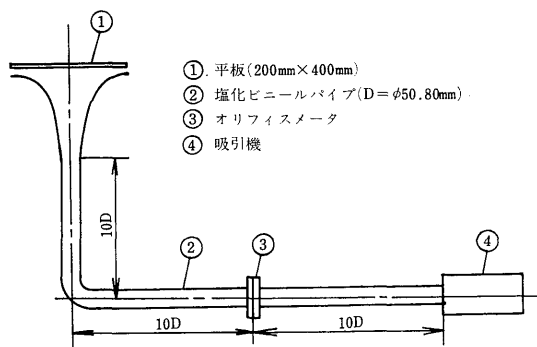
そこで、最初の報告として、実験方法を立ててそれをよく知られた2次元問題に適用して見て、十分使用に耐えることを示すとともに、気の付いた幾つかの注意事項を記したものが以下の記述である。

2. 実験装置

第1図に実験装置を示す。実験装置に示した平板と曲面との関係は、第2図に示すように、 r : O 点から r_0 までの間の任意点の距離、 r_0 : O 点から平板先端までの距離、 u_0 : 流入速度、 ν : 空気動粘性係数、 h_0 : 平板先端における吸込み口の幅、 h : r 点における曲面の高さとしたとき、この曲面の高さは、次の式で与えられる。

$$h(r) = \frac{r_0^2 h_0}{r^2}$$

そこで、任意の値 h_0 を10mm、 r_0 を164mmにとって実験



第1図 実験装置

装置をつくった。

可視化の方法としては、第3図に示すような煙発生装置を使用することとした。

3. 実験方法

3-1 気流の発生方法

気流の発生方法は、第1図に示す平板の下面に沿って、先端から流れ込むように微気流を吸引機によって起こさせる。吸引機には、市販されている掃除機を用い、電圧調整器で微気流とする。流量の測定は、オリフィスメータによることとし、圧力差が小さいために水の比重より小さな比重の液体（本実験には、トルエンを使用）を使用すると、容易に測定できる。

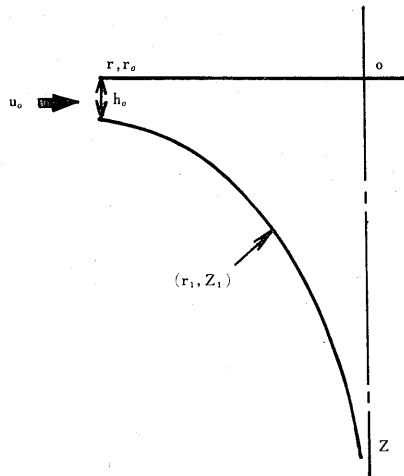
3-2 煙の発生方法

煙の発生には種子田外¹⁾の方法を用いる。第3図に示

*機械・生産機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

す煙発生装置のヒーター部に電力（600W）を加えて銅パイプ内の流動パラフィンを加熱すると、その蒸気が銅パイプ内に充満し、圧力が上昇する。数分後に銅パイプの小穴（ $\phi 0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$ ）から無色の気体が飛び出すから、そこへ冷風を吹きつけると、無色から白色の煙に変わって大気に放出される。放出された煙を広口瓶の中にためて煙の量を調節しながら実験に使用する。

3-3 煙の流入方法



r : o 点から r_o までの間の任意点の距離
 r_o : o 点から先端までの距離
 u_o : 流入速度
 ν : 空気の動粘性係数
 h_o : 平板先端における吸い込み口の幅
 壁曲面の方程式 : $h_o u_o = K r^2 Z_1$ ($K = u_o / r_o^2$)
 $r_o = 164 \text{ mm}$ ($= l$)

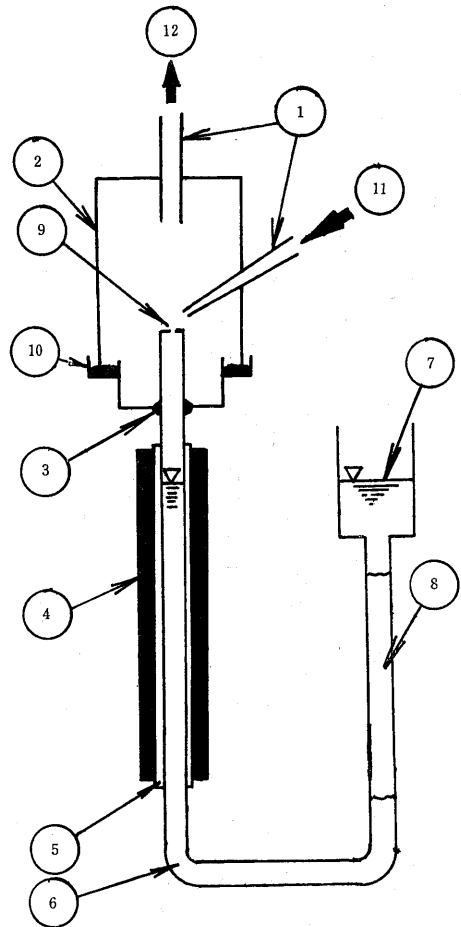
第2図 実験装置に取り付けた平板と曲面の関係

実験装置に煙を流入させるには、平板の上面に調節された煙をただよわせて、平板先端から気流に乗せる。煙は平板の下面に沿って流れ（くわしくは後述）、平板下面のある位置からはく離する。このはく離する位置とその近傍の流れの観察が我々の主目的である。

煙をただよわせる場合、煙の流入位置として平板の周りの如何なる位置が最適であるかを知ることがまず必要である。この位置を決めるためには、平板先端附近および平板上面で、煙パイプの出口の位置と方向を種々に変えて煙の流れる様子を詳細に調べる。

3-4 はく離点の観察

はく離点の観察は、平板上面に透明なスケールを立てて、煙の振舞を写真撮影によって観察する。スケールを取り付けたのは、はく離点を確認するためであり、透明にしたのは、煙の流入位置を確認するためである。



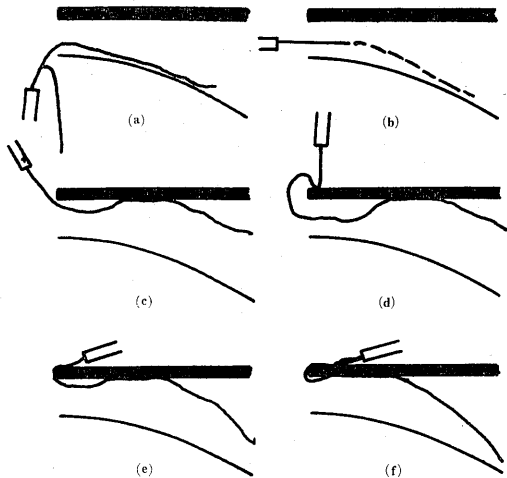
① 銅パイプ ($\phi 10 \text{ mm}$) ② 鉄製容器 ($\phi 60 \text{ mm}$)
 ③ 断熱材 ④ ヒーター (600W) ⑤ 絶縁材
 ⑥ 銅パイプ ($\phi 10 \text{ mm}$) ⑦ 流動パラフィン ⑧ ビニール管
 ⑨ ピンホール ($\phi 0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$) ⑩ 水を含んだ石綿
 ⑪ 冷風 ⑫ 煙

第3図 煙発生装置

4. 実験結果

まずはじめに、煙を流入する最適な位置について述べる。第4図に示すように、(a)の場合は、流動パラフィンの煙が、タバコの煙や線香の煙にくらべて重いために、平板先端に到達する以前に吸い込まれるか、下方に落ちてしまう欠点がある。(b)の場合は、煙の出口を前後させても流入口から流管が徐々に太くなる上に、次第に拡散することのために、煙は消滅してしまう。以上(a)(b)は、煙の重さの影響を見るために、実験の流れがどれほど層流状態を保っているかを知るために試みたものである。(c)の場合は、平板先端前方2～3 mm附近から流入をはじ

める。このとき煙は、平板下面に沿わず平板先端から20mm附近においてはじめて附着し、しばらくしてはく離する。(d)の場合は、煙を放出する圧力を極端に小さくして

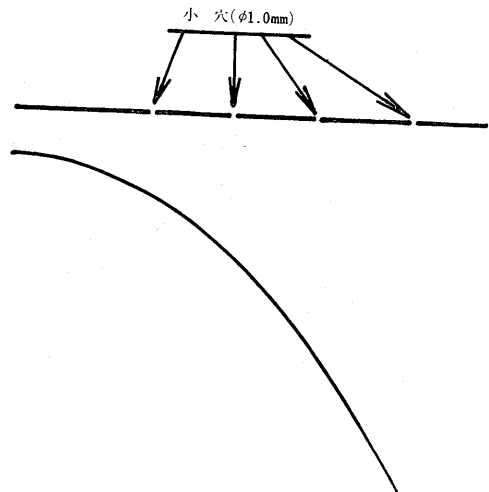


(a) 曲面先端45°下方20mm
(b) 流入口前方30mm
(c) 平板先端45°上方20mm
(d) 平板先端より5mm80°上方20mm
(e) 平板先端より10mm15°上方10mm
(f) 平板先端より20mm15°上方5mm

第4図 煙の流入位置

も平板上面に当たって、そこでジャンプし、図のように前方にふくれた後、平板先端から20mm附近に附着し、しばらくしてはく離する。(e)の場合は、(d)のようにジャンプすることなく平板上面に沿って流れるが、板面に密着しにくいいためか、平板先端から板を離れ先端から10mm附近の位置に再附着した後、25~30mm附近ではく離する。(f)の場合は、煙が平板上面に沿って十分の距離を流れるために、境界層の極限流線にまで浸透したものと考えられるが、煙の流れは、板端にはく離わずをかこんだ後、板端から2~3mm附近で再附着し、25mm附近ではく離する。(f)の位置より更に後方に設置すると、煙の押し出しに大きな圧力を加えないと平板先端にまで到着しないことと、到達しても平板先端附近において煙が乱れること、とのために実験に利用できる可視化を与えない。以上のことから、煙を流入する最適な位置は、(f) (平板先端より20mm, 15° 上方5mm) の位置であることが知られる。

第5図では平板上に小穴をあけて煙を流し込むことを試みた。この場合、流し込まれた煙は、気流が遅く境界層が非常に薄いために、その境界層をつきぬけ、層内気流に乗せることができない。また、はく離点が存在すると思われる位置より後方から流し込むと、平板に沿って



第5図 平板上の小穴から煙を流入する略図

はく離点近傍に近づくはずのものが、主流に支配されて我々の実験に必要とする振舞を得ることができない。この問題については、将来の課題としたい。

写真1(a)(b)は、この煙法によって、平板下面から流れがはく離する状態を可視化したものである。

写真1(a)は、流入速度 $U_0=7.71\text{cm/s}$ 、一般的なレイノルズ数 ($Re=U_0 l/\nu$, U_0 : 流入速度, l : 流れの代表距離 ($l=r_0$), ν : 空気動粘性係数) $Re=811$ で、はく離点は、平板先端から25.0mmの位置である。そのはく離点のレイノルズ数 ($Re_s=U_s l_s/\nu$, U_s : はく離点の流速, l_s : 平板先端からはく離点までの距離) $Re_s=94.7$ である。

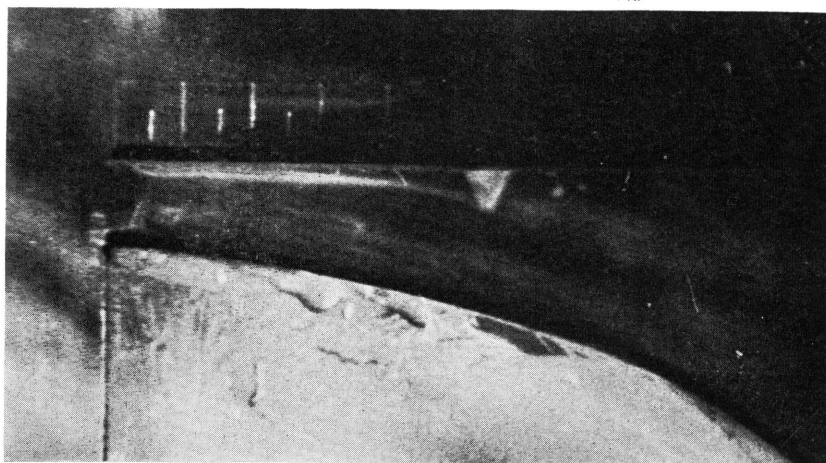
写真1(b)は、同じく流入速度 $U_0=7.71\text{cm/s}$, $Re=811$ で、はく離点は、平板先端から24.0mmであり、そのレイノルズ数 $Re_s=92.0$ である。(a)(b)で示したはく離点位置の相違は、流速分布の変動と煙の多少に原因するものと考えられ、我々の実験の精度を示唆するものであろう。

既に述べたように、写真1から平板先端に小さなバブルが存在するが、バブルが非常に小さいことから、そのはく離点位置への影響は小さくて、平行流の入射する場合とほとんど変りないものと考えてよいであろう。

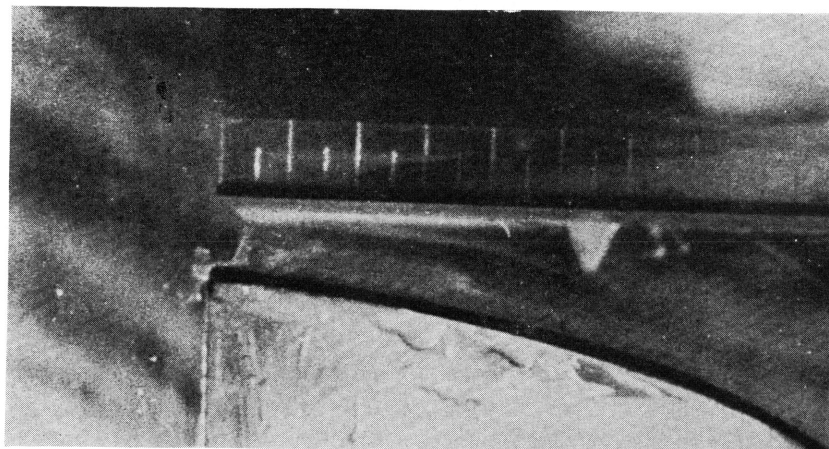
写真1(b)では、はく離した煙と、更に下流へ平板に沿って流れている煙と、二つの振舞があるように見えるが、下流まで平板に沿って見えるのは、平板の手前の方に煙が集まったものであって、流れの模様とは無関係である。

写真2は、煙の流入位置が最適な位置で、煙パイプの押し出し圧力一定のとき、コックによって煙の量を増減した場合、平板下面に如何なる影響があるかを示したものである。(a)の場合は、煙の通るパイプを全開した場合

写真1 (a), (b) 煙法による平板下面からのはく離



(a) $U_0 = 7.71 \text{ cm/sec}$ $Re = 811$
 はく離点 25.0 mm $Re_s = 94.7$



(b) $U_0 = 7.71 \text{ cm/sec}$ $Re = 811$
 はく離点 24.0 mm $Re_s = 92.0$

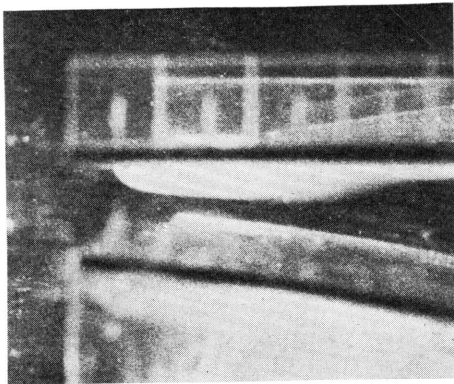
Re : 流入口のレイノルズ数, Re_s : はく離点のレイノルズ数
 気流の方向は, 左から右へ吸い込まれる。

で, 煙は流路のはば上半部分に拡がって層をなし, 平板下面に沿って流れるだけである。はく離点を見出すことは困難である。(b)の場合は, 煙のパイプを $\frac{1}{2}$ に閉じた場合であって, 写真に見られるように, 煙ははく離を与えるけれども, その位置は 30 mm 附近である。煙が帯状に厚いための影響が現われているわけであって, この位置をもとの空気流のはく離点と見なすことは早計である。(c)は, 煙の通るパイプを $\frac{1}{3}$ に閉じた場合であって, 煙は平板先端で小さいバブルを包んだ後, すぐ平板に沿って流れ始め, 25 mm 附近ではく離する。(d)の場合は, 煙の通るパイプを $\frac{1}{4}$ に閉じた場合であって, 煙は非常に少なくなり一本の流線のように振舞う。平板先端からジャンプ

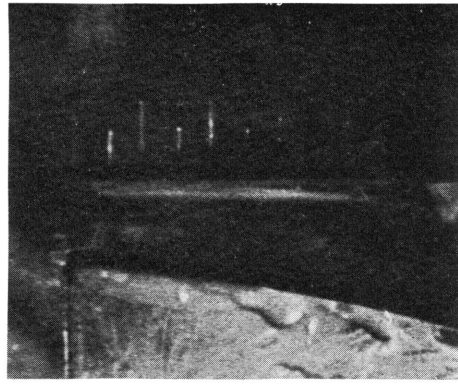
を起こし 23 mm 附近で附着し, 26 mm 附近ではく離したように見える。しかし, 煙量に対して圧力が大き過ぎて, 煙はかなりの速度をもって流出するため, 気流とは異なった軌跡を描いているようである。

以上のことから煙の量は, 我々の装置においてはパイプを $\frac{1}{3}$ に閉じた場合が最も良好な可視化を与えることが知られた。そしてこれを用いて, 実験上のはく離点は, 平板先端から $24 \sim 25 \text{ mm}$ 附近であることが見出された。この実験では主流の Re 数が小さい故に, はく離点は Re 数に依るところが大きいと思われる。

写真2 (a), (b), (c), (d) 煙量の影響



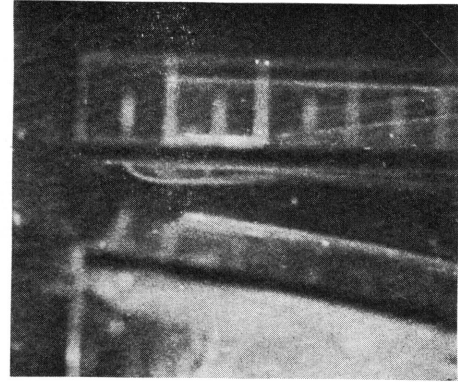
(a) 全開



(c) 1/3



(b) 1/2



(d) 1/4

パイプ (ビニール製) の内径は12.0mm

5. 結 言

煙法による可視化の精度を検証するために、それを2次元はく離問題に適用し、次の結論を得た。

(1)我々の簡単な装置によっても層流はく離の実験は可能であり、それを3次元はく離に適用する可能性が十分に期待される。

(2)煙の量の大小により、はく離点の位置が左右されるばかりでなく、その存在自身も変化をうけることから、煙法を用いる場合の煙量は注意深く吟味する必要がある。

(3)煙の適量を定め、それを一定に流入させることによって、はく離点を見出すことができる。

(4)煙による可視化を利用したはく離点決定は、定量的にはかなり正しいものと思われる。

(5)煙実験からの結論は、周囲からのかく乱に敏感であるから、かく乱のしゃ断については、細心の注意を必要

とする。

以上のことから、3次元境界層はく離の実験的研究にかなり期待を持つことができるので、現在我々はそれを手がけはじめている。

6. 謝 辞

本報告は、大学の特別研究費の援助をうけて開始した研究の序報であって、大学当局と、御指導下さった山田彦児教授に心からの感謝を申し上げる。また実験に協力された本学機械工学科卒業研究学生浅岡猛、古閑平和、須田高之、松本克己、伊藤秀樹、大橋健郎、堀居英雄、松永守雄の諸君に心から御礼を述べたい。

文 献

- 1) 種子田, 天本, 石井; 九大応用力学研究所所報, 第36号 (昭47) 57.
- 2) V.H. Arakeri; J. Fluid Mech 68-4 (1975) 779.