32 平行平板によって拘束された渦対 による流れ (煙可視化法による実験的研究)

名古屋工業大学 山田日出夫, 小田拓嗣(院)*

FLOW DUE TO A VORTEX PAIR CONFINED BY PARALLEL FLAT PLATES
(Experimental Study By Smoke Visualization)

Hideo YAMADA, Takuji ODA

We investigated a flow due to a vortex pair confined by parallel flat plates by smoke visualization. In this paper we focused our attention particularly to the effects of aspect ratio of a rectangular nozzle, through which air was puffed, as well as the Reynolds number on the flowfield. Some new facts were found concerning temporary change of visualized flow patterns, distortions of a vortex pair, and behaviors of an induced vortex near the plates.

§ 1. 序論 実験室で渦対を発生させるには、長方形ノズルから短時間だけ流体を平行平板間に噴出させる方法が用いられている。このような装置では、渦対の安定性を考慮してノズルのアスペクト比、 AR 、が 1 から 2 程度のものが比較的良好に採用されている。

ところで、渦対を構成する 2 本の渦管は、平行平板によってその端部を拘束されるが、壁面での粘性の影響について考察した報告は見当らなかった。そこで、前報(1)においては、 $AR = 5/3$ の長方形ノズルを用い、 $Re = \Gamma / \nu = 2\pi l U / \nu = 4500$ (ここでは、 U は渦対の並進速度、 l は渦対間隔) の条件のもとで壁面近傍に着目し、流れの可視化を行ったところ、はからずも渦対が誘起する特有な流れ場によって壁面からの剥離剪断層にもとずく誘起渦が発生することが見出された。本報告では、 Re 数のみならず、アスペクト比の影響にも留意し、流れ場の様子を煙可視化法によって詳しく調べることにする。

§ 2. 実験装置と方法 装置の概要を図 1 に示す。渦対の発生にはラウドスピーカを用いた。実験には 2 種類のノズルを用いた。その横幅は 30 mm で一定に保ち、高さ(平行平板間隔に等しい)は、25 mm と 100 mm のものである。可視化のトレーサとして線香の煙を用いた。写真用ストロボの前方に集光レンズ系を取り付け、かつスリットをその内部に挿入し、観測領域で厚さ 3 ~ 4 mm 程度の平行光線を得た。そのスリット光により瞬間的な流れ場の断面の様子を 35 mm 一眼レフカメラで撮影した。任意の時刻における流れの様子を観察するために、スピーカへの印加電圧の立上り時刻を基準時刻とし、そのトリガーパルスが遅延回路にいれ、ストロボを発光させた。

§ 3. 実験結果と考察 実験結果の説明に必要な座標系が図 1 に示されている。ノズル

Department of System Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, 466, JAPAN

出口断面の中心を原点とし、渦対の並進方向に x 軸、平行壁に垂直に y 軸、ノズル幅の方向に z 軸をとった。

3. 1 $h = 25 \text{ mm}$ の場合 この場合、 $AR = h / d = 5 / 6$ であり、1 より小さい。図 2 に xz 平面、即ち $y = 0 \text{ mm}$ の面での可視化写真を示す。図の (a) は $y = 0 \text{ mm}$ の断面（実際には、 $y = 0 \pm 2 \text{ mm}$ の厚さを持った領域を意味する。又、以降の説明では、領域の中心面のみを指定し、 $\pm 2 \text{ mm}$ は省略する。）での時間と共に変化する一連の写真であり、(b) 図は $y = 8 \text{ mm}$ の断面、即ち壁面から 4.5 mm 離れた面での様子である。さて、 $t = 800 \text{ ms}$ では、煙によって可視化された領域の輪郭は、理想的な渦対の循環領域を示す流線に似ており、 z 方向にいくらか長い卵形である。しかしながら、その後急速に先端がすばまったような形状を呈し、 x 方向に長くなる。次に、壁面に近い $y = 8 \text{ mm}$ の断面の様子を見ると、太くて白い筋が渦領域を隔どっている。これは、 $y = 0 \text{ mm}$ の断面では見られなかったものである。この白い筋は壁面からの誘起渦を予想させる。そこで、この筋を観察するために、上述した面に垂直な xy 面、即ち $z = 0 \text{ mm}$ の面にスリット光を入れ、その様子を可視化した。図 2 (c)。丁度、白い筋に対応する位置に渦核断面が可視化されており、誘起された渦であることが判る。この誘起渦は、下流に進むにつれて次第に中心面に接近し、両方の壁面からの誘起渦が対になって可視化されている。次に、渦対の渦管が通過するあたりの $z = 16 \text{ mm}$ の断面での様子を見たものが図 2 (d) である。矢印で示す所に煙の抜けた筋が可視化されている。この筋は渦管背後の煙の抜けた部分に対応する。この筋が y 方向に曲がっていることから、渦管自身も同じように曲がっていることが想像される。ところで上述の実験条件下での渦レイノルズ数は、 $t = 400 \text{ ms}$ あたりでは 870 である。しかし、 $t = 2000 \text{ ms}$ あたりになると、粘性による減衰が著しく、その値は $1/4$ 程度にまで減少する。

次に、同じ AR のもとで、 Re 数を充分大きくした場合の流れの様子を調べる。この場合の Γ / ν は $t = 60 \sim 90 \text{ ms}$ では約 13000 である。図 3 (a) に $y = 0 \text{ mm}$ の断面での各時刻に対応する可視化写真を示す。 $t = 180 \text{ ms}$ で渦領域の外形の輪郭を示す煙線に乱れ模様が現れ始める。このあと $t = 240 \text{ ms}$ で見られるように急速に乱れが拡がる。ここで留意すべき特徴は、煙によって可視化された渦領域の外形が前すばまりからむしろ後すばまりに変形していることである。この形状をカプトガニ形状と名ずけておく。この形状の先端部は円弧状で、後部の渦とは分離して白い筋が観察される。次に、 $y = 12 \text{ mm}$ の断面、即ち壁面のごく近傍での様子を (b) 図に示す。 $t = 120 \text{ ms}$ で渦核の前方の横方向に白い筋が 3、4 本見られる。これは対応する $y = 0 \text{ mm}$ の断面では見られない。(c) 図は xy 断面、即ち $z = 0 \text{ mm}$ の面での可視化写真である。興味深いのは $t = 240 \text{ ms}$ で先端部に見られる誘起渦が後方の渦構造から明らかに離脱していることである。これは、カプトガニ構造での先端部の分離した太い筋の断面を示すものである。

3. 2 $h = 100 \text{ mm}$ の場合 この場合、 $AR = 10 / 3$ である。図 4 に xz 面に平行な $y = 0, 20, 40, 49 \text{ mm}$ の四つの断面での時間的に変化する渦対の可視化写真を示す。この流れ場を代表する Γ / ν の値は約 6700 である。 $y = 40 \text{ mm}$ の断面、図

(c) の 3, で乱れが最も早く始まり, それが平行壁間の中心面の方に伝播して行くように見える. 誘起渦と推定される煙の太い筋が図(c)の 4 と, 図(9)の 3, 4で見られる. ところで, 図 4 の一連の写真より乱れは渦核付近から始まり, 周辺に次第に伝播するように観察される. なお, 壁面のごく近傍, $y = 49 \text{ mm}$ の断面では煙の乱れ方は $y = 40 \text{ mm}$ の所よりも明らかに小さい. $h = 25 \text{ mm}$ の場合に比べ, $h = 100 \text{ mm}$ の場合は煙によって可視化された渦領域の外形は理想的な渦対の循環領域を示す流線形状に一層似かよっている. (このことは, 渦対を実験室で発生させる場合, 前者の場合よりも後者の $AR = 10/3$ に対応する $h = 100 \text{ mm}$ の場合の方が適切であることを煙りのパターンの面でも示唆しているように思われる.) xy 面, 即ち $z = 0 \text{ mm}$ の断面での可視化写真によれば, 誘起された渦は 240 ms までは徐々に壁面から離れていく. しかし, $t = 320 \text{ ms}$ では急にスケールが大きくなっており, 壁面からより一層はなれる. 図(e). この渦には, これと逆向きに回転する対の渦が可視化されている. さらに, 平行平板の中心面付近にもう一对の渦のパターンが可視化されている. これらは微弱な流れによって形成されたものと想像されるが詳細は不明である.

XZ 面並びに XY 面に平行な数枚の断面写真から渦対の渦管の近似的な空間的構造が判る. 又, 誘起渦の運動についても紙数の制限のため本報告では割愛した. これらの事柄については講演会において触れることにする.

§ 4. 結論 煙可視化法によって得られた主要な結果を以下に示す. (1) ノズルのアスペクト比が小さく, かつ渦対の渦レイノルズ数が小さいとき, 渦対の渦管は並進方向に大きく変形する. (2) 壁面近傍に誘起された渦は, 形成過程とその後しばらくの間は, AR に関係しないように見える. (3) 誘起渦は, 最初, 渦対構造と共に移動するが, それは発達するとついには渦対構造から離脱する場合がある.

文献: (1) 物理学会第 43 回年会講演予稿集第 4 分冊, 1988 年, P. 70

Fig.1 Schematic of experimental apparatus.

Fig.2 Successive photos. of a vortex pair when $AR = 5/6$ and $\Gamma/\nu = 870$; 1: $t = 800$ ms, 2: 1200 ms, 3: 1600 ms, 4: 2000 ms.

Fig.3 Successive photos. of a vortex pair when $AR=5/6$ and $\Gamma/\nu=13000$; 1: $t=60$ ms, 2: 120 ms, 3: 180 ms, 4: 240 ms.

(a) plan views of a vortex pair in $y = 0$ plane.

(b) plan views of a vortex pair in $y = 20$ plane.

(c) plan views of a vortex pair in $y = 40$ plane.

(d) plan views of a vortex pair in $y = 49$ plane.

(e) side views showing induced vortex.

Fig.4 Successive photos. of a vortex pair when $AR = 10/3$ and $\Gamma/\nu = 6700$; 1: $t = 80$ ms, 2: 160 ms, 3: 240 ms, 4: 320 ms.