

報 文

孤立峰まわりの流れに関する実験

泉 耕 二

I はじめに

孤立峰まわりの流れ、例えば富士山のような山のまわりの三次元的な流れについては多くの事が未知のまま残されている。

山越え気流に関する大半の研究は“山岳波”や“おろし”に関するものであり(荒川, 1975。大西, 1975。古川, 1975。Alaka, 1960), 大気境界層内で、山の風下に“はくり”(separation)が生ずるような流れに関する研究は少ない、特に、孤立峰に“はくり”が生ずるような流れについては全く未知とってよい。

相馬(1969, 1971)は富士山における気流観測から、風速が強い時に“はくり”が生ずる事を示し、一方で孤立峰の模型を用いて密度成層風洞実験をおこない、風速を増すと、はくり型の気流系に移行する事を報告した。

佐藤・恩田(1973・1974)は円錐模型を用いて風洞実験を行ない、任意の風速分布のもとでの乱れの強さ、風向、風速分布を得ており、後流中にはくり領域とはくり渦が形成される事を示した。

荒川(1973, 1975)は準2層流系のもとでの数値実験をおこない、孤立峰のまわりの流れのパターンを得ており、流れが山を迂回する効果について次のように説明している。Froude数が小さい時、流れは山を回る効果が強く、Froude数が大きくなると流れは山を回る効果が弱くなる事を示した。

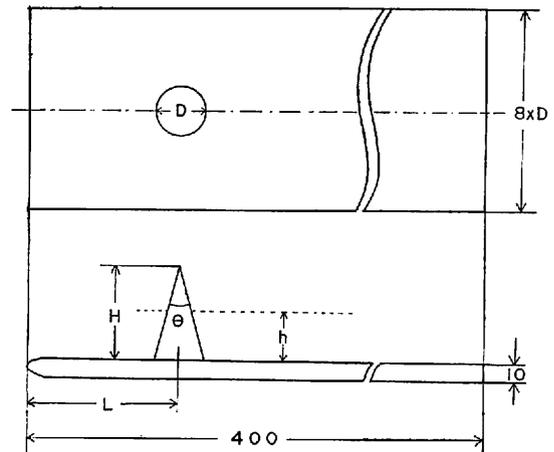


図1 平板と円錐の配置図

本研究では、最も基礎的な実験として、平板上に置かれた円錐まわりの流れについて、特に“はくり渦”の構造と円錐表面の流れについて水槽実験をおこなったので、その結果をここに報告する。

II 実験装置および実験方法

実験は水槽(幅 45.5 cm, 水深 40 cm, 長さ 600 cm)を使用して、静止水中でモデルを曳行する方法で行なわれた。

実験に用いた平板と円錐は図1に示される通りである。円錐はしんちゅう製で、底円の直径が 3 cm で頂角が 30° , 90° , 120° と異なる3種類と底円の直径 9.0 cm 頂角 120° のものの計4種類

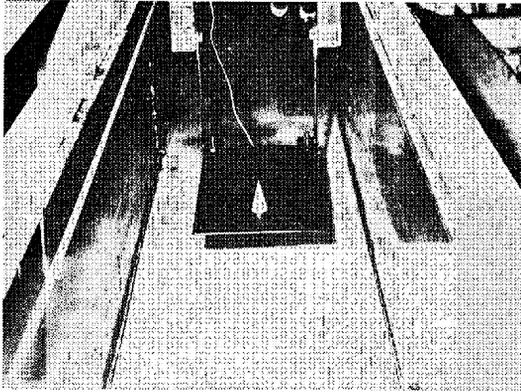


図 2 水槽と実験装置の配置
前方斜め上方より

である。平板はアクリル製で幅 24.0 cm, 主流方向の長さ 40.0 cm, 厚さ 1.0 cm である。また平板上の境界層の厚みを左右する平板前縁から円錐までの距離 L は今回 $L=9.0$ cm に固定した。

実験は図 2 に示した様に, 平板と円錐を配置し自走式の電車により水槽中を水平に曳行して行なった。

なお, 平板前縁からのはくりを防ぐために, 平板は 1/100 の勾配で前下りに取り付けてある。

流れの可視化には, 電解沈澱法と電解腐食法を目的に応じて使いわけた。

また, 円錐後方に生ずる渦の周波数の計測は, Hot Wire 流速形によって測定した速度変動の波形から求めた。なお Hot Wire の位置は, 円錐後方 $3 \times D=9.0$ cm, 平板からの高さ $h=1.5$ cm と 3.0 cm の 2 箇所である。

III 実験結果

記号表示

θ : 円錐の頂角

D : 円錐の底円の直径 (cm)

U : 主流の速度 (cm/s)

ν : 水の動粘性係数 (cm²/s)

R : Reynolds 数

$$R = \frac{UD}{\nu} \quad \left(\begin{array}{l} \text{代表的な長さを底円の} \\ \text{直径 } D \text{ とした} \end{array} \right)$$

H : 円錐の高さ (cm)

h : 平板からの任意の高さ (cm)

f : 円錐後方に生ずる渦の周波数 (c/s)

L : 平板前縁から円錐までの距離 (cm)

1 頂角 $\theta=90^\circ$ の場合の流れ模様

図 3 は $\theta=90^\circ$ の場合の流れ模様である。流れの可視化には, 電解沈澱法を用い, 円錐モデル表面より電解色素が流出している。電解色素は流脈 (streak-line) で渦度 (vorticity) の分布を示す。

次に流速変化にともなう流れ模様の変化を順に説明する。

(a) は $R=200$ の場合で, 真上より観察しており, 流れは左から右へ流れている。

はくり開始の位置は, 円錐背面上で逆ハート型のはくり線が観察される。はくりした渦層は円錐後方で巻始め, スパイラル状の渦層を形成している。渦層の主流方向の渦度はほとんどこの部分に集中し, 一对の主流方向の軸をもつ渦糸に成長する。この渦糸を“後ひき渦” (trailing-vortex) という。後ひき渦は端を円錐背面に発しており, 定常的に形成されている。一对の後ひき渦の間隔は狭く, 後方からみて右側の渦糸が時計まわりの回転を, 左側の渦糸が反時計まわりの回転をしている。

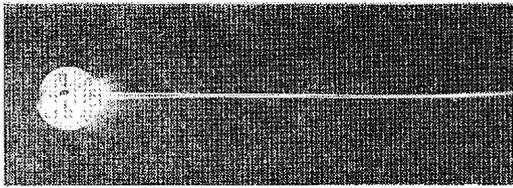
(c)(d) はいずれも $R=400$ の場合で, (c) は真上から, (d) は真横からの観察である。 $R=200$ の場合と同様に, 円錐背面に端をもつ後ひき渦が存在し, へら状のはくり渦が観察される。

(f)(e) は $R=600$ の場合で, 円錐の後方で一对の後ひき渦が干渉し始め, “half-ring 状の渦” が形成される。

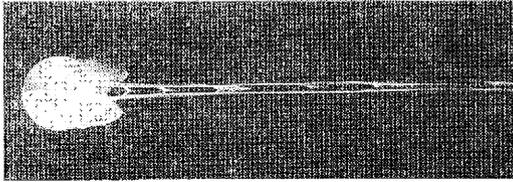
(g)(h) は $R=800$ の場合で, より明瞭なはくり渦の振動が観察され, half-ring 状の渦はチェーン状のつながりをもつ。

(i)(j) は $R=1000$ の場合で, 渦の波長は短く, 振動数は増加しているが振動数にさほど明瞭な規則性は認められない。

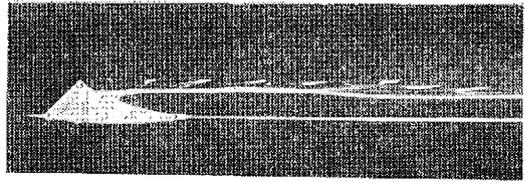
(k)(l) は $R=1200$ の場合であり, はくり渦はこの流速以上では乱れ始める。



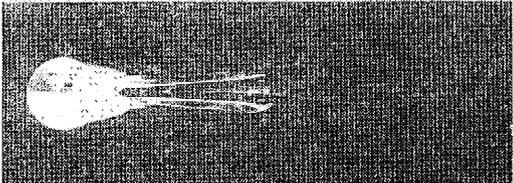
a



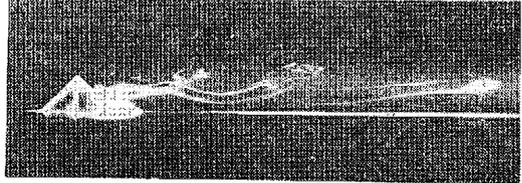
c



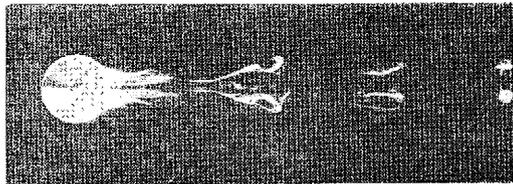
d



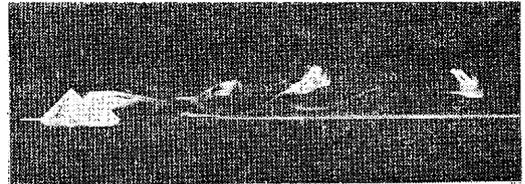
e



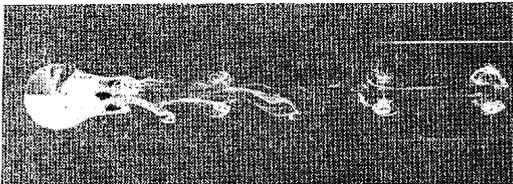
f



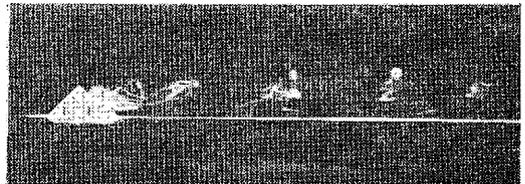
g



h



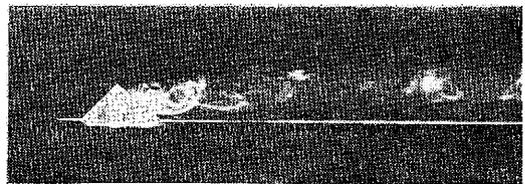
i



j



k



l

図 3 頂角 $\theta=90^\circ$ の場合

流速変化にともなう流れ模様の変化, (電解沈澱法) 流れは左から右へ

(a) $R=200$, (c)(d) $R=400$ (e)(f) $R=600$, (g)(h) $R=800$ (i)(j) $R=1000$, (k)(l) $R=1200$

(a)(c)(e)(g)(i)(k) は真上より (d)(f)(h)(j)(l) は真横より

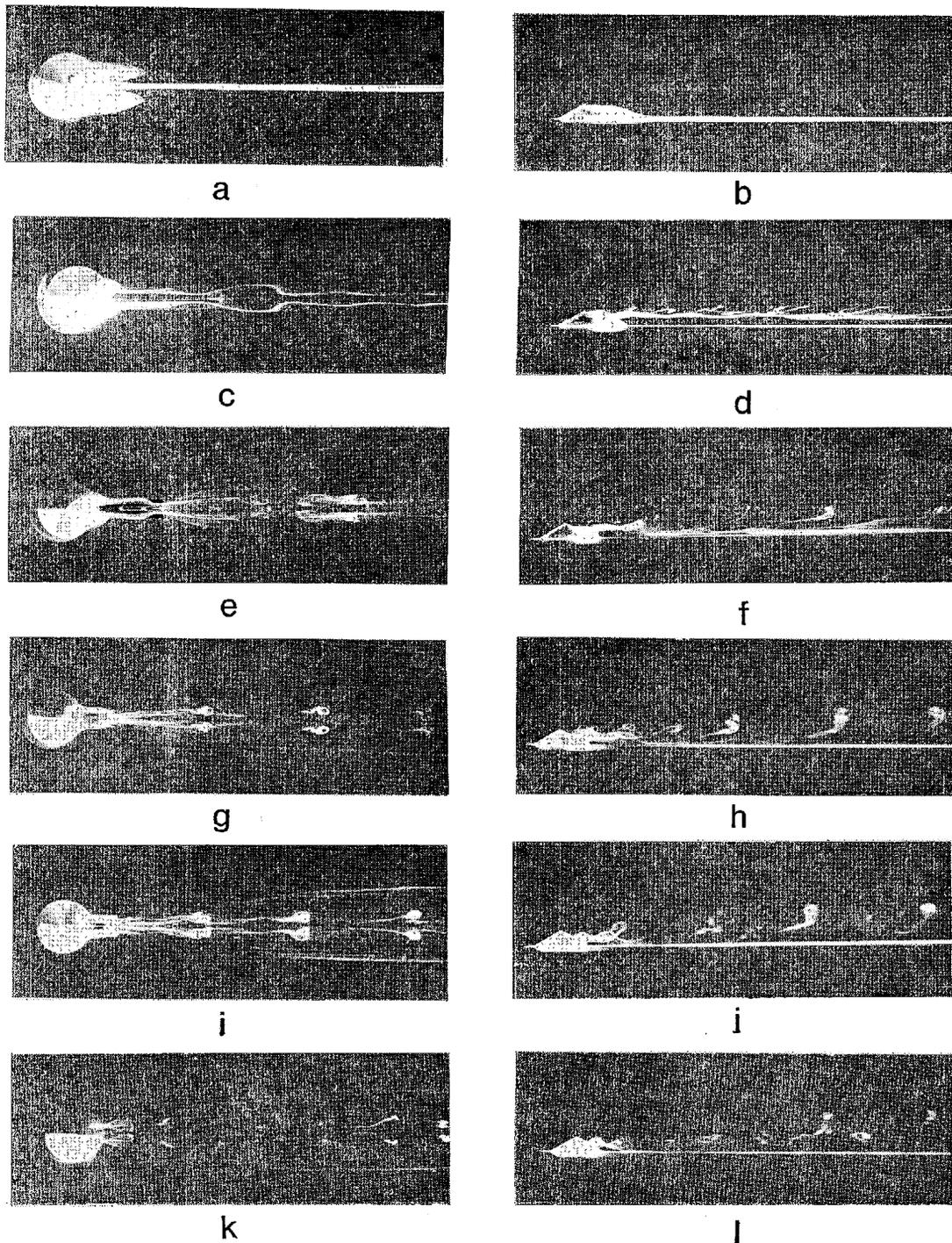


図 4 頂角 $\theta=120^\circ$ の場合

流速変化にともなう流れ模様の変化 (電解沈澱法)

(a)(b) $R=600$, (c)(d) $R=800$ (e)(f) $R=1000$, (g)(h) $R=1200$ (i)(j) $R=1400$, (k)(l) $R=1600$

(a)(c)(e)(g)(i)(k) は真上より (b)(d)(f)(h)(j)(l) は真横より

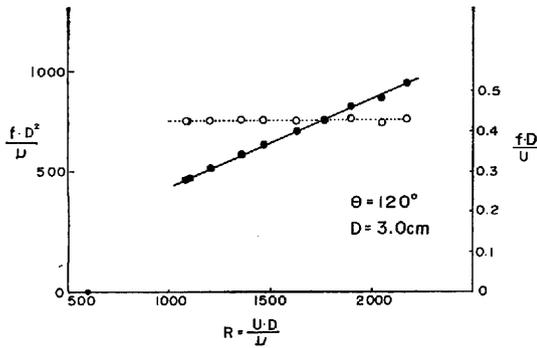


図5 はくり渦の振動数と Reynolds 数の関係 $\theta=120^\circ$ の場合
黒丸は $f \cdot D^2/\nu$, 白丸は $f \cdot D/U$ を示す

2 頂角 $\theta=120^\circ$ の場合の流れ模様

図4は $\theta=120^\circ$ の場合の流れ模様である。

(a)(b)は $R=600$ の場合で、 $R=400$ の場合でも同様のパターンを示す。即ち一对の“後ひき渦”が形成されている。また後ひき渦の間隔はせまい。

(c)(d)は $R=800$ の場合で、一对の後ひき渦が干渉し始め“へら状のはくり渦”が形成される。

(e)(f)は $R=1000$, (g)(h)は $R=1200$, (i)(j) $R=1400$, (k)(l)は $R=1600$ の場合で、チェーン状のつながりをもった“half-ring 状の渦”が形成される。はくり渦の放出は非常に周期的で、流速が増すにつれて、波長は短く、振動数は増加する。 R 数が1800以上になると流れの可視化による流れ模様の観察が困難であった。また、 R 数が2300より大きくなると後流は乱れ始める。

3 頂角 $\theta=120^\circ$ の場合のはくり渦の振動数

図5は $\theta=120^\circ$, $D=3.0$ cm の円錐後流中に生ずるはくり渦の振動数の計測結果である。横軸に Reynolds 数 ($R=V \cdot D/\nu$), 縦軸には、渦の振動数 f [c/s] の無次元数 $f \cdot D^2/\nu$ (図中の黒丸) と無次元数 $f \cdot D/U$ (図中の白丸) を表わした。

$R \leq 600$ では、はくり渦は振動せず、後流は“後ひき渦”の形成領域である。

$800 \leq R \leq 2300$ では、はくり渦は振動し明瞭な周期性がある、即ち“half-ring 状の渦”の形成領域である。この領域で、振動数の無次元数

$f \cdot D^2/\nu$ と R 数との関係を求めると、

$$\frac{f \cdot D^2}{\nu} = \frac{7}{16} R + 300$$

が得られた。

また無次元数 $f \cdot D/U$ は約 0.43 と一定値が得られた。即ち円錐後方に生ずる渦列(カルマン渦列)と同様に $\theta=120^\circ$ の場合には、 $800 \leq R \leq 2300$ ではくり渦の振動数 f は、 D と U の関数で示される。

$$f = 0.43 \frac{U}{D} \text{ [c/s]}$$

また $R > 2300$ では、速度変動の波形から振動数を読み取る事は困難であった。

4 馬蹄渦 (horse-shoe vortex) について

流速や円錐の頂角に関係なく、平板表面近傍に円錐前方をとり囲んで定常的に馬蹄渦が形成される。

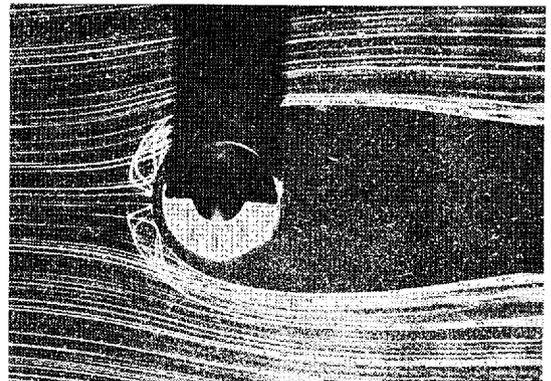


図6 円錐をとり囲む馬蹄渦 (Horse-shoe Vortex)

$\theta=30^\circ$, $R=300$, 電解沈澱法

図6は $\theta=30^\circ$, $D=3.0$ cm, $R=300$ の場合で、円錐の前方 $L=7.0$ cm, 高さ $h=0.5$ cm の位置に、平板と平行に 0.3 mm のヒューズ線をはり、電解沈澱法により可視化した写真である。U字型の明瞭な馬蹄渦が観察される。一般に、境界層内に孤立した突起物が存在する場合には、突起物の形状や Reynolds 数には無関係に常に突起物を取り囲んで馬蹄型の渦が形成される (Belik, 1973)。

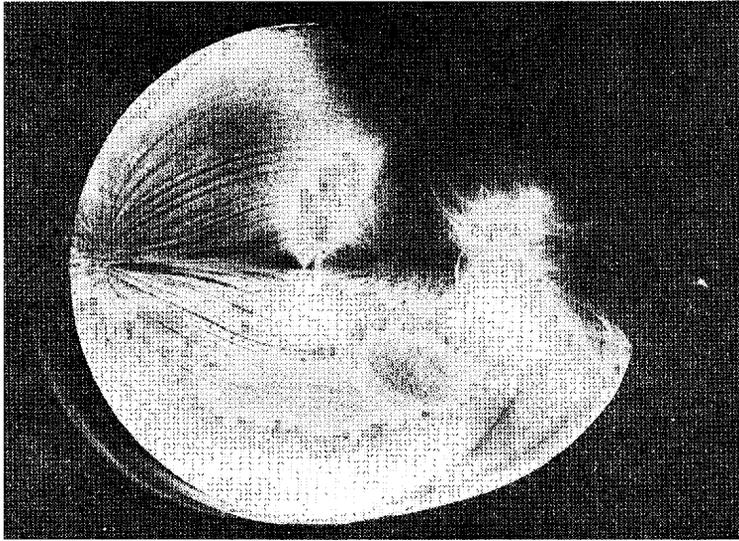


図 7 円錐の表面流線 $\theta=120^\circ$, $R=1100$, $D=9.0$ cm
(電解腐食法)

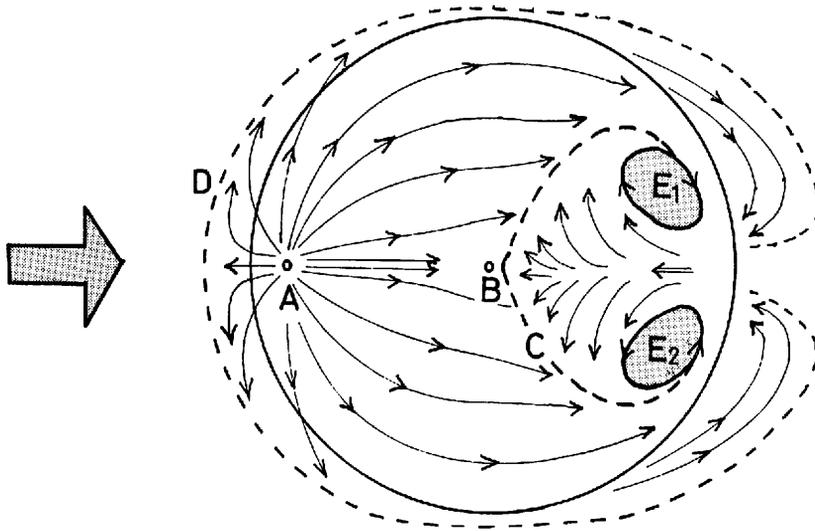


図 8 円錐の表面流線と流向図

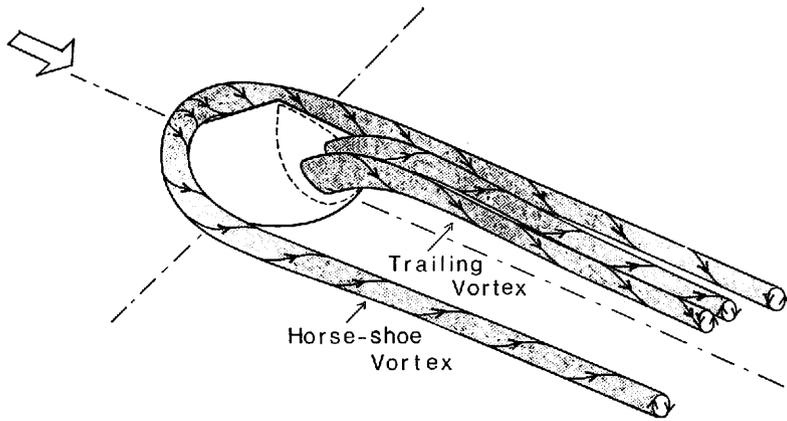
$\theta=120^\circ$, $R=1100$, $D=9.0$ cm

A : よどみ点 (stagnation point), B : 円錐の頂点, C (破線) : はくり線 (separation line),
D (破線) : 平板上のはくり線, E_1 , E_2 : 渦の端

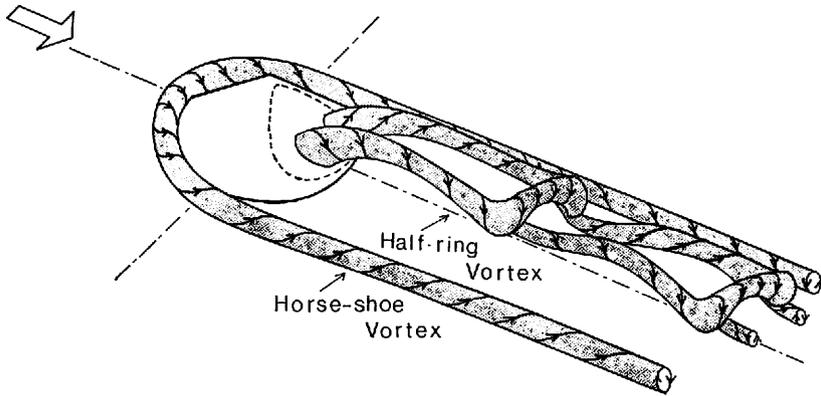
5 平板上円錐の表面流線について

図 7 は円錐の表面流線を電解腐食法で可視化したもので、 $\theta=120^\circ$, $D=9.0$ cm, $R=1100$ の場合である。

図 8 は図 7 の場合の流線をトレースし、表面流向を示した。点 (A) は“よどみ点” (stagnation point) で、よどみ点の位置は $h/H=0.18$ である。円錐前面での流線の特徴的な事は、 $h/H < 0.18$



(a) 馬蹄渦 (Horse shoe Vortex) と後引き渦 (Trailing Vortex) 系比較的流速の遅い場合, $R \leq 600$ (破線は、はくり線を示す)



(b) 馬蹄渦 (Horse-shoe Vortex) とチェーン状につらなる (Half-ring Vortex) 渦系流速の速い場合, $R \geq 800$ (破線は、はくり線を示す)

図 9 $\theta = 120^\circ$ 円錐のはくり渦

では流線は下向きで、円錐を下る様な流れを形成する。また円錐の前縁より前方平板上に色素が流出しており、主流とは逆向きの流れで、破線 (D) は平板上の三次元的はくり線 (separation-line) である。このはくり線内で $h/H < 0.18$ の領域は馬蹄型の渦の形成領域である。

$h/H = 0.18$ では平板にほぼ平行な流線を示す。

$h/H > 0.18$ では上向きの流線で円錐斜面を吹き上げる様な流れを形成している。

次に円錐背面では、逆流域が存在し、破線 (C) ははくり線を示し、円錐の頂点 (B) よりわずかに下流側ではくりしている。(C) 線内のはくり領

域では主流とは逆向きの流線で、円錐斜面をはい上る様な流れであり、流速は円錐前面の流れに比較して非常に遅い。

また、はくり領域内に後流の一对の渦端が存在する (E_1), (E_2), 回転の向きは (E_1) が時計まわり, (E_2) が反時計まわりの回転をおこなっている。

なお、(A) (C) (D) (E_1) (E_2) それぞれの位置は、頂角や Reynolds 数、平板の境界層の厚み等によって変わる (Belik, 1973. 佐藤・恩田, 1974)。

IV 実験結果の検討

以上の実験結果にもとづき、平板上に置かれた比較的頂角の大きな円錐のまわりのはくり渦を、図9(a)(b)に示した。

流れ模様は大別して2種類のものが認められる。

(a)は比較的流速が遅い場合で、“馬蹄渦”(Horse-shoe Vortex)と後流に一对の“後ひき渦”(Trailing Vortex)が形成されている。破線で示した“はくり線”からはくりした渦層はスパイラル状の渦層を形成し、主流方向の渦度(vorticity)はほとんどこの部分に集中しており、回転の向き異なる一对の渦糸(vortex filament)に成長している。

(b)は流速が速い場合で“馬蹄渦”と、チェーン状のつながりをもつ“Half-ring 状の渦”(Half-ring Vortex)が周期的に放出される。

前述の(a)で示した“後ひき渦”は三次元的な渦糸であり、主流に対して斜めの渦度をもっている。そこで流速が増加すると、渦糸は干渉し始め、ついに“Half-ring 状の渦”に成長する。

三次元的な渦層の不安定は、主流方向の軸に直角な2方向(この場合上下、左右)が同時におこり“Half-ring 状の渦”に成長するのである。即ち主流方向とそれに直角な成分の渦度が集中した結果形成されたものである。

また更に流速が速くなると後流は乱れた流れになる。

V おわりに

本実験では、一様な流れの中で、平板上に置かれた円錐まわりの流れを可視化し、その観察を行なった。

今後、密度成層を付加した上で実験を進める予定である。

なお、現在、富士山周辺の偏形樹から卓越風向の分布を得る作業を進めている。

本研究が自然大気の流れの“なぞ”を少しでも解く“かぎ”となれば幸である。

本実験を行なうにあたり終始御指導いただいた、九州大学応用力学研究所 種子田 定俊 教授に深く感謝の意を表します。

また、数々の助言と援助をいただいた九州大学応用力学研究所計測流体力学部門の皆様にも深く感謝いたします。

参考文献

- 荒川正一(1975): おろしを中心とした山越え気流論. 気象研究ノート第125号, 115—148.
- 泉 耕二・種子田定俊(1975): 平板上円錐まわりの流れの観察. 九州大学応用力学研究所報告第42号, 63—71.
- 大西外史(1975): 山越え気流の力学(I). 気象研究ノート第125号, 149—196.
- 佐藤 浩・恩田善雄・斎藤隆雄(1973): 大気乱流の風洞実験. 東京大学宇宙航空研究所報告第9巻2号, 675—687.
- 佐藤 浩・恩田善雄(1974): 富士山周辺の流れの風洞実験. 気象研究ノート第118号, 55—64.
- 相馬清二(1969): 地形、地物による気流しょう乱について. 乱流シンポジウム報告第3回, 44—51.
- Alaka, M.A. (1960): The airflow over mountains. W. M. O. Tech. Note 34, 135 p.
- Arakawa, S. (1973): Numerical experiments of the local strong winds, Bora and Föhn. Climatological Notes 14, 1-20.
- Belik, L. (1973): The secondary flow about circular cylinders mounted normal to a flat plate. The Aeronautical Quarterly 24, 47-54.
- Soma, S. (1969): Dissolution of separation in the turbulent boundary layer and its applications to natural winds. Pap. Met. Geoph. 20 (2), 11-1174.