

中立層及び安定躍層中の円錐まわりの流れに関する実験的研究

Experimental Investigation of the Flow past a Cone in a Neutrally and Stably Stratified Fluid

運輸省

岸 弘之 Eiroyuki KISHI

東京工業大学・工学部

正 員 日野 幹雄 Mikio HINO

東京工業大学・大学院

学生員 小川 隆申 Takano OGAWA

東京工業大学・大学院

学生員 日向 博文 Eiroyumi HINATA

The two-layered stratified flow past a cone is studied experimentally. The aim of this paper is to investigate the dependence of the flow on the Reynolds number and the Richardson number, the effect of the level of the interface on the flow and the spatial distribution of the internal wave. The result is that the flow does not change when Re number and Ri number change within $800 < Re < 1800$, $20 < Ri < 100$, but that the level of the interface greatly affect it. And the internal wave is measured by an electric conduction meter and is found to be boomerang-shaped.

Keywords: cone, two-layered stratified flow, internal wave

1. はじめに

大気、海洋などの流れは多くの場合成層流であり、成層流に関する問題は実用上の意義が大きい。また、そればかりでなく内部波、グラビティフローなど成層流に特有の現象があり流体力学的にも興味深いところが多い。特に、成層流体中の孤立峰を過ぎる流れについては、山越え気流や山岳波、海山を越える流れ、また、富士山頂上付近にできる傘雲、そして最近では汚染物質の移流拡散など様々なトピックを含んでいる。現象の素過程についても孤立峰の後ろに形成される渦と内部波やそれらの相互干渉、孤立峰を越える流線とその側面を通り過ぎる流線の境界や剥離領域の大きさなどが成層の強さによってどの様な影響を受けるかなどの問題がある。本研究では孤立峰まわりの流れについて調べることを目的とした。

孤立峰後流に形成される渦構造に関して、泉ら¹⁾は中立層において頂角30度の円錐まわりの流れを可視化によっていろいろなレイノルズ数に対して調べ、レイノルズ数の変化に対して円錐後流の渦構造がどのように変化するかを調べた。その結果、 $Re \geq 400$ において魚の尾びれ型の渦を定期的に放出することを明らかにした。また、佐藤ら²⁾は風洞実験によって円錐まわりの流れの流速を測定し、円錐背後の渦は形成されては放出するというプロセスを繰り返し、時間平均的にみると円錐の麓に足を持つアーチ型の渦が得られるとしている。本研究ではこのような円錐後方に形成される渦構造が流れ場の中に密度変化の存在することによってどの様な影響を受けるのかを調べることを目的とした。三次元物体後流に放出される渦が成層によって受ける影響については田中ら³⁾が半球について連続成層中で行った実験があるが、この実験では円錐について安定な密度躍層中で実験を行った。密度躍層中の剥離渦に関しては、渦管が二層にわたって存在する可能性があり、その場合の渦の挙動や渦のつなぎ替え、また渦と内部波の相互干渉など調べるべき対象は多い。また、連続成層に較べて密度躍層で実験を行う場合、円錐の高さに対する密度躍層の位置というパラメータが一つふえるが、本研究では最初に密度躍層の位置を固定し、流れのレイノルズ数とリチャードソン数に対する依存性を調べ、その後、レイノルズ数とリチャードソン数を固定し、円錐に対する密度界面の位置を色々変えて、おもに可視化を中心に実験を行った。

2. 実験装置及び実験条件

実験は図1に示すアクリル製の水槽を用いて静止水中で円錐を曳航させる方法で行った。水槽は長さ3.0m、幅1.0mで、その上部にレールを取り付け、そこを円錐を固定した平板を取り付けた台車がモーターによって移動する。水深は全ての場合について30.0cmで行った。図2に円錐および円錐を取り付けた平板の寸法を示す。円錐は高さ $H=7.5\text{cm}$ 、頂角90度で、平板は移動方向つまり主流方向の長さ80.0cm、幅60.0cmのアクリル製で、円錐は平板の先端から15.0cm($=2H$)の所に固定されている。また、座標は円錐底面の中心に原点をとし、以降用いられる長さは円錐の高さ H を用いて無次元化した値を用いる。

密度躍層は真水と塩水を用い、塩水の上に静かに真水を流す方法で作製、どの場合についても躍層厚さは $0.14H$ となった。但し、躍層厚さ h_i は次式によって求めた。

$$h_i = \frac{\rho - \rho_0}{(d\rho/dz)_{\max}}$$

なお、台車の移動速度 U 、円錐の高さ H を代表長さとしたレイノルズ数 Re とリチャードソン数 Ri をそれぞれ

$$Re = \frac{U \cdot H}{\nu}, \quad Ri = g \frac{(\rho - \rho_0) / \rho_0}{(U^2 / H)} \quad \text{として計算した。}$$

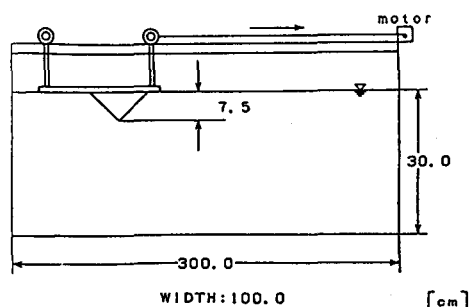


図1：実験装置

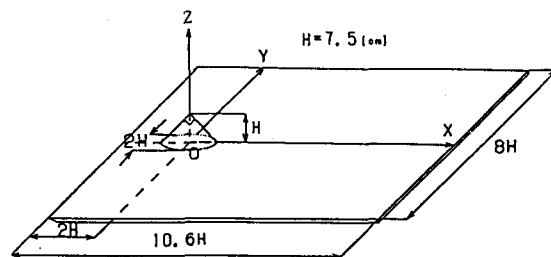


図2：実験に用いた円錐及び平板

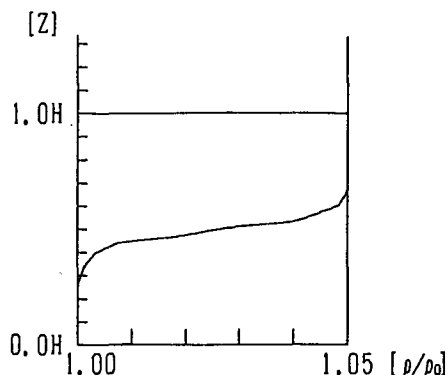


図3：密度分布

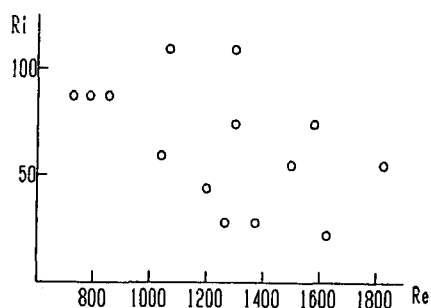


図4：実験を行った Re 数と Ri 数

3. 実験結果および考察

(1) Re 数と Ri 数を変化させた場合

まず、初めに円錐に対する密度界面の位置 h/H を0.5に固定して、現象の Re 数と Ri 数に対する依存性を調べた。このときの密度分布を図3に示す。実験を行った全ての場合の Re 数と Ri 数を図4にプロットした。この領域でみられる現象は、だいたいどの領域においても同じであり、この領域において流れは Re 数と Ri 数に余り依存しないことが分かった。図5はこのうちの $Re=1300$ 、 $Ri=73.6$ において上層と下層での渦の放出をそれぞれ色素塗布法によって可視化したものである。これを見ると、上下層共に左右交互に渦が放出されカル

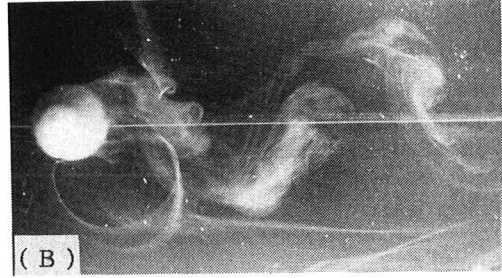
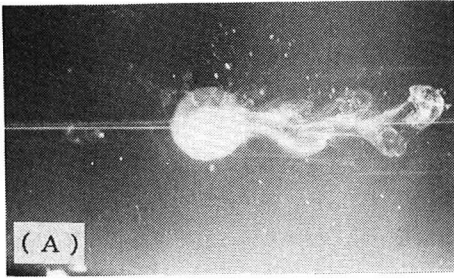


図 5 : $Re=1300, Ri=73.6$ における可視化結果
(A) : 上層 (B) : 下層

マン渦状のパターンとなっている。ここで注意すべきことは、上層と下層では渦の放出の周期が異なっていることである。このことから密度界面が流体力学的な境界となっており、渦が界面によって分断されているのではないかと考えられる。岸ら⁴⁾は下層における渦の放出周波数を、図6に示すような円錐の下層の中の部分の平均的な直径を代表長さにとることによってストローハル数を計算し、それをレイノルズ数に対してプロット

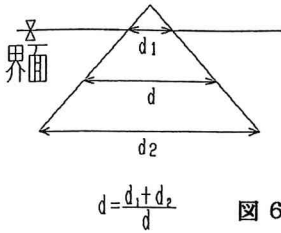


図 6

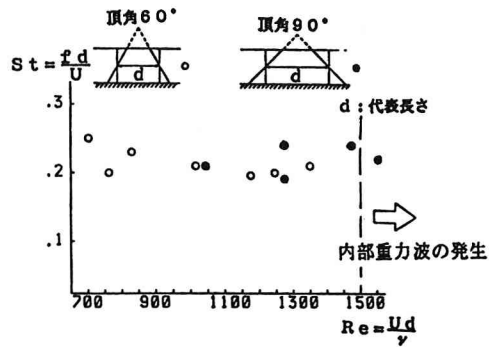


図 7 : Re 数と St 数の関係 (岸⁴⁾)

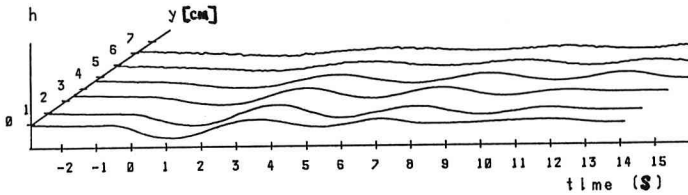


図 8 : 導電率計によって計測された内部波

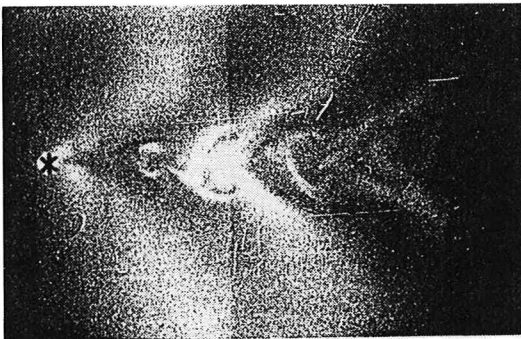


図 9 : 可視化によって得られた内部波の空間的パターン
(* は円錐頂点)

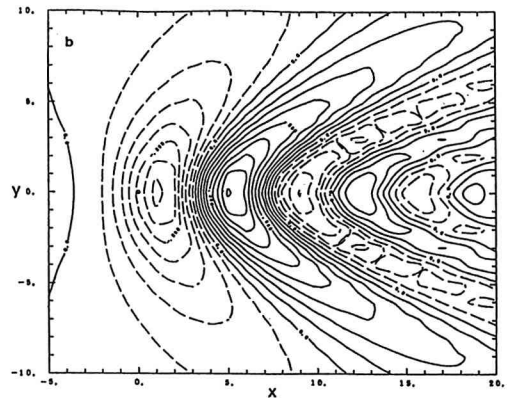


図 10: lee waveパターン (Umeki, M⁴⁾)

トした(図7)。図は頂角60度の円錐の場合も含んでいるがどのRe数に対してもほぼ0.21という均質流体中での一様な円柱の場合のストローハル数の値に近く、二次元的な強い流れであることがこのことから示される。また、導電率計によって内部波の三次元形状を定量的に測定した結果が図8である。導電率計プローブは密度界面の高さに固定し円錐を移動させて、その点での密度の時間的変化を $Y=0.0\sim6.0$ [cm]において計測することによって、内部波の空間的形状をとらえた。円錐の頂点がプローブを通過する時点をと0としている。この図から、円錐が通過した直後に密度界面の落ち込み振幅が最大になっており、その落ち込んだ界面が浮力により復元しXY平面に伝播していく様子がみられる。また、下層を着色し横からスリット光を当てて内部波の空間的な広がりを可視化した結果が図9である。図において*印は円錐の頂点を示し、暗い部分は波高が小さい部分である。円錐の後ろ側にブーメラン型に内部波が形成されており、その範囲は後流域全体に広がっている。図10はM. Umekiら⁵⁾により、成層流中の孤立峰周りの流れを解析的に解くことによって得られた lee waveのパターンであるが、条件が異なるにもかかわらず図9とよく似ているパターンである。

(2) h/H を変化させた場合

$Re=1690$, $Ri=22.3$ において円錐の位置に対する密度界面の位置 h を $h/H=0.5, 0.8, 1.0, 1.2$ の4つの場合について行い、それぞれの場合を case: A, B, C, D とし、中立層の場合も含め5つの場合について実験を行った。case: A, B, C, D のそれぞれの密度分布を図11に示す。この場合も躍層厚さは $0.14H$ となった。実験は円錐の背面の頂上と底面付近にそれぞれ色素注入用の穴を設けそこから色素を放出して、円錐背後の流れを可視化した。

[中立層]

中立層の場合における可視化の結果を図12に示す。円錐の頂点の背後に形成される渦列が明確に可視化されており、これらの渦構造は流下方向に行くに連れてその大きさを増していることが分かるが、これは平板混合層にみられるような大規模渦構造、いわゆるBrown-Roshko構造として知られているものと酷似している。また、そればかりでなく図13に示した一連の写真を見ると、矢印で示した2つの渦は時間と共に合体し最終的に写真③では1つの渦になっており、それによって流下方向にそのスケールを増加させていることが分かる。これも平板混合層において報告されている渦の合体による渦構造の空間スケールの増大と同じメカニズムである。

[case: A ($h/H=0.5$)]

図14は、躍層の密度界面の高さ $h=0.5H$ の場合に円錐頂点近傍より色素を流し、円錐頂点背後の渦構造を可視化した写真である。中立層においては円錐頂点のすぐ後ろではその空間的なスケールの小さかった渦が流下方向に移動するにつれて渦の合体によって大きくなっていったが、このケースにおいては円錐のすぐ後ろ側に円錐の高さ H の3割程の大きさの渦が形成され、それが流下方向に放出される様子が分かる。また、渦の合併はこのケースではみられなかった。図15は円錐の頂点と底面近くの両方から同時に色素を噴出させた写真である。ここで注目すべきことは、頂点付近から流された色素と底面付近から流された色素が写真中に示した密度界面の辺りではっきり分かれていることである。泉ら¹⁾や佐藤ら²⁾が報告しているような中立層において円錐背面を底面から頂点付近まで駆け上がる流れが、この場合には底面から0.

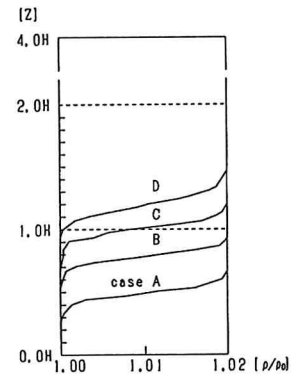


図11: 密度分布

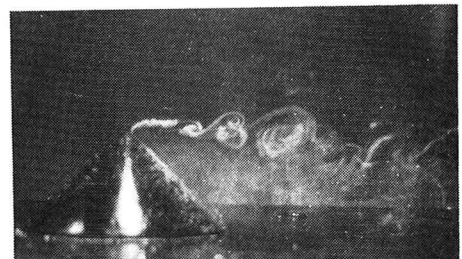


図12: 中立層

5Hの高さにある密度界面までしか昇らないことがわかる。そして、密度界面まで昇った流れはそこで左右に別れたのち円錐背面に沿って流れ、剥離点に達したのち図5に見られるように剥離して流下方向に流される。

[case : B ($h/H=0.8$)]

密度界面の位置が0.8Hの高さにおいて円錐の頂点近傍と底面近傍の両方から同時に色素を流して可視化した結果が図16である。頂点から流された色素は、そのまままっすぐ流下方向に流されており、上層においては可視化によって姿を現すような大規模な渦は形成されていないことを示している。下層において流された色素はcase : Aに説明したのと同じように円錐背面に広がって剥離点に達し、そこで剥離して流下方向に流れている。

[case : C ($h/H=1.0$)]

図17は密度界面が円錐の高さに一致する場合に円錐の頂点近傍より色素を流したときの可視化結果である。流れは頂点を過ぎたところで一度沈み込み（矢印①）、その後再び上昇したのち矢印②においてhydraulic jumpが起きており、流れを強く取り込んだのち左右に広がっている。このことは矢印②の後方では色素が広く拡散していることから分かる。なお、この強く渦巻く部分は円錐に対して常に同じ位置にあり、Brigh-ton⁶⁾が強い成層中の物体を過ぎる流れの中で可視化によって観察したcowhorn eddyと呼んでいる現象と同じ現象であると考えられる。

[case : D ($h/H=1.2$)]

図18は密度界面の高さhが1.2Hの場合に、円錐の頂点背後の渦を可視化した写真である。図12と比較すると中立層の場合に形成される渦列によく似ているが、この場合は密度界面によって渦列が拘束され、流下方向とともに渦径は下側のみ成長していることが分かる。なお、この場合にも渦の合併する様子はみられた。

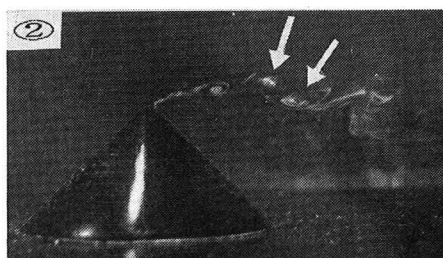
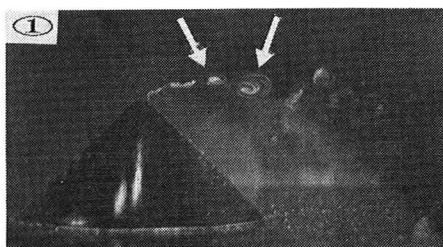


図13：円錐背後の渦のマーキング（中立層）



図14：CASE (A)



図15：CASE (A)

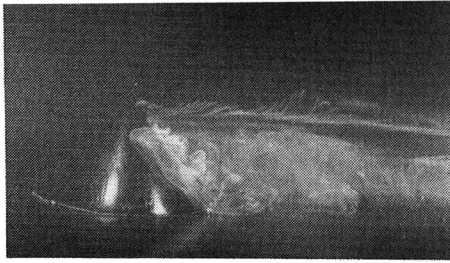


図 16 : CASE (B)

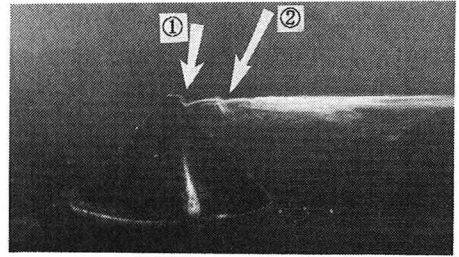


図 17 : CASE (C)

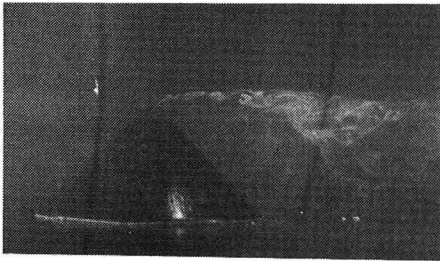


図 18 : CASE (D)

4. まとめ

二層の密度躍層中の円錐まわりの流れにおいて実験を行った結果、 Re 数が800~1800、 Ri 数が20~100の間では流れはそれほど変化せず、むしろ、密度界面の円錐に対する位置によって大きく影響される。また、円錐の移動によって内部波は円錐の後流域全体に形成され、ブーメラン型のパターンを作ることが可視化と定量的な測定によって明らかになった。

参考文献

- 1) 泉 耕二、種子田 定俊：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所報第42号（昭和50年）
- 2) 佐藤 浩、恩田 善雄：富士山周辺の流れの風洞実験、気象研究ノート118号、pp.55-64（1974）
- 3) 田中規夫、玉井信行、廣沢祐：平板状の半球周りの流れに対する成層度の影響、流れの可視化 Vol.8 No.30（1988）
- 4) 岸 弘之、福西 祐、日野幹雄：密度躍層中の3次元物体の後流、土木学会第42回年次学術講演会（昭和62年9月）
- 5) Umeki, M and Kanbe, T : Stram patterns of an isothermal atmospheres over an isolated mountain, Fluid Dynamics Research 5(1989), pp91-109
- 6) Brighton, P.W.M. : Strongly stratified flow past three-dimensional obstacles, Quart. J. Roy. Met. Soc. 104