1 平板上の半球周りの流れに対する 成層度の影響

東大工 田中規夫^{*}、玉井信行、廣沢佑喃

The effect of stratification on the flow around a hemispheric obstacle
on a flat plate

Norio TANAKA^{*}, Nobuyuki TAMAI^{*} and Yuusuke HIROSAWA^{*}

The stratified flow around a hemispheric obstacle on a flat plate has been studied. The flows were produced by towing an inverted body through saline-water solutions with stable density gradients and were visualized by dye-injection method. The study demonstrated that three types of the flow structures were formed depending on the stratification. Two types of them are similar to the neutral cases but are strongly affected by the three-dimensional lee wave. In case of strongly stratified flow, most of the fluid cannot surpasses the hemisphere but passes around it and forms Karman vortex street behind the hemisphere. The change of the flow structure is closely related to the K-H instability in front of and behind a hemisphere.

1 はじめに

山や建物等の平板上の三次元物体周りの流れは、汚染物質の拡散等に関連して重要な流れである。大気は多くの場合成層をなしているので、汚染物質を貯めるあるいは輸送する流れ場の成層度による変化を解明することは非常に重要であるが、環境工学上重要な底面付近の流れについては、不明の点が多く残されている。

そこで、本研究では中立層の時に確認されてきた平板上の半球周りの流れの構造¹⁾の成層度による変化を特に底面付近に形成される渦に着目して解明することを試みた。

2 実験装置及び実験方法

実験にはFig.1に示すようなTowing tank systemを用いた。すなわち水槽C(長さ10m、幅50cm、深さ60cm)にFig.2に示すような密度分布(Zは水面から鉛直下向きに計った距離)の成層を食塩水で作っておき、半球を接着した平板D(長さ1m)を水槽をはさんでコの字型をした移動台車Aから吊し、水表面上を動かすことにより成層流を得た。流れ場は移動台車Aに乗せられた染料タンクと染料放出口との間

Fig.1 Towing tank system

^{*} Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan

にわずかに水頭差を与えることによって、流れ場を乱さないように染料を放出して可視化し、移動台車 (A, B) に乗せられたビデオカメラまたは35mmカメラにおさめた。半球後方の剝離渦の放出周期はビデオより求めた。

3 実験結果及び考察

(1) Re と Fd による領域区分: 本実験に使用する無次元数 (レイノルズ数 Re と密度フルード数 Fd) を式 (1), (2) のように定義する。

$$Re = UR/\nu \quad \dots (1), \quad Fd = U/NR \quad \dots (2)$$

ここで、 U : towing speed、 R : 半球の半径、 ν : 水の動粘性係数、 N : プラント・バイサラ振動数

($N = -g/\rho \, d\rho/dz$; g : 重力加速度、 $\rho \, z = 0.5R$ での密度、 $d\rho/dz$: 底面から半球の高さまでの密度分布を直線勾配と見なしたときの密度勾配)

このように定義した Re と Fd に対して、Fig. 3に示す領域で実験を行った結果、半球周辺の流れ場は大きく3つの領域に分けられることが明らかになった。(斜線はBrighton²⁾の実験領域。)

(2) Region I: 成層度が強いことにより、上流側の流体はそのほとんどが半球を越えることができず、半球を回り込む流れとなる。半球を越える流れは、わずかにLee waveを形成するが、それが底面付近の流れに重要な影響を与えるほど強くはなく、中立層の時に物体前面部に底面付近の急な速度勾配のために巻いていた馬蹄型状の渦も明瞭には形成されず、半球を回り込む2次元的な流れとなる。ここで、3次元物体を越える流れと回り込む流れの境界流線は、HuntとSnyder³⁾により、dividing streamline として注目され、その高さ(h_0)は一様流で安定度一定の場合には、

$$h_0/R = 1 - Fd \quad \dots (3)$$

のように求められている。Fig. 4は、実験値と(3)式を比較したもので、 Fd が0.5付近まではほぼ直線上に乗っているのがわかる。半球を回り込む流れによってwake領域に形成される渦構造は、Fig. 5、Fig. 6にそれぞれ示すように、Region I-(a)とRegion I-(b)の2つに分類できる。Region I-(a)のときは、Fig. 5に示すように半球後方には

Fig. 2 Density profiles

Fig. 3 The classification of the flow structure vs Re and Fd

Fig. 4 Dividing streamline height vs Fd

Fig. 5 Visualized structure of Region I-(a) ($Fd=0.18, Re=370$)

Fig. 6 Visualized structure of Region I-(b) ($Fd=0.32, Re=370$)

明瞭なカルマン渦の放出がみられる（矢印部分が交互に放出される渦である。）。Region I -(b)においては、Fig.6に示すように半球の背後に双子状の渦が形成され、その下流側に正弦波状の振動が発生している（下流部分が矢印のような振動をおこなう。）。

（3）Region II：Fig.7,8に示すように、半球前面部には中立層の時に類似した半球を取り囲む馬蹄形状の渦(A)が形成される。また半球を越える流れによって半球後方に3次元的なLee wave(C)が形成される。wake領域内部には、前面部で生じた馬蹄型渦とは逆向きの一对の渦管(B)が形成され、それがLee waveによって変形されながら下流に対して引き延ばされるという複雑な構造をしている。Fig.9に渦管の変形される位置を Fd に対して示す。ここで、点線は2次元の場合の解析値⁴⁾を示す。wake内の渦管の変形される位置は、2次元の解析値とほぼ同じ値であり、中立層の時の Re が200よりも小さいときの流れにLee waveを重ね合わせたものがRegion IIの流れに対応するものといえる。

（4）Region III：Fig.10, 11に示すように半球を越える流れによっても剝離が生じ、剝離線を取り囲むようにしてアーチ状の渦が形成され、それがLee waveを変形しながら、Lee waveによって運ばれていく（Fig.11において矢印が放出される剝離渦である。）。中立層の時の Re が200から2000のときに観察された現象に対応する。中立層の時は、この剝離渦は斜め上方に引き延ばされるようにして放出されたのに対し、成層がある場合には、Lee waveの波長に関係した放出形態をとる。Fig.12(a)は Fd が大きく、底面をはうように放出される場合で、(b)は Fd が小さく、一度底面付近に抑えられてから斜め上方に引き延ばされる場合である。Fig.13は、この剝離渦の放出ストローハル数 $Sl(=fR/U, f$:剝離渦の放出周波数)を示したもの（実線は中立の時の実験値）で、成層度の強い方（強い順に $S6, S1, S5, S2, S4, S3$ ）が高い Re になってから

Fig.7 Illustration of the flow structure of Region II

Fig.8 Visualized structure of Region II ($Fd=0.46, Re=610$)

Fig.9 Inflection point of vortex tubes behind the hemisphere vs Fd

Fig.10 Illustration of the flow structure of Region III

Fig.11 Visualized structure of Region III ($Fd=1.90, Re=770$)

(a) $Fd=1.90$

(b) $Fd=0.95$

Fig.12 Visualized vortex tubes behind the hemisphere

剥離を生じ、しかも、高周期で渦を放出するが、やがて、 Re が大きくなるにつれて中立の時の値に漸近していくことがわかる。(点線はCASE S3の傾向を示す。)

(5) 半球前面部の流れについて：成層がある場合にも半球前面部には半球を取り囲んで、複数個の渦が形成される。Fig.14は半球前面部に生じる渦の数を Re と Fd により分類したものである。ここで、Region-A、B、Cはそれぞれ、渦を生じない場合、1つ生じる場合、2つ生じる場合を表す。Region-AとBの境界は、Region I、IIの境界にほぼ一致しており、半球前面部で渦が形成されることが、Region I、IIの構造の変化に重要な影響をもたらしていたということがこの図からもわかる。またRegion-BとCの境界はRegion IIIの間にはいるが、このとき後ろの剥離渦の構造には変化はなく、半球前面部の渦の数の変化は半球後方の剥離渦の構造に大きな影響を及ぼさないということがいえる。また、中立層の時に渦の数が1つから2つに変動するのは Re がほぼ500の時であったのに対し、成層があるときは成層度が強いほど高レイノルズ数まで変動しない。渦が1つ形成されるときも同様の傾向がみられる。これは密度成層による安定度が、接近流の流速勾配による不安定度に打ち勝って安定限界を引き上げているためと思われる。

4 まとめ

成層度を変化させると半球周辺の渦構造は大きく3つに分けられる。そのうちの2つは中立層の時の現象に半球を越える流れにより形成されるLee waveを重ね合わせたような構造になっている。また密度成層効果が強い場合には、半球を回り込む流れにより円柱背後のカルマン渦や双子渦に類似した渦構造が形成される。これらの渦構造の変化には半球前面部で密度成層効果に打ち勝って渦が形成されるか、あるいは、半球を越える流れによって剥離渦が形成されるかということが大きく関わっている。

参考文献

- 1) Tamai, N., Asaeda, T. and Tanaka, N.: 1987, Boundary-Layer Meteorol. 39 pp. 301-314.
- 2) Brighton, P. W. M.: 1978, Q. J. R. Met. Soc. 104 pp. 289-307.
- 3) Hunt, J. C. R. and Snyder, W. H.: 1980, J. Fluid Mech. 96 pp. 671-704.
- 4) Castro, I. P., Snyder, W. H. and Marsh, G. L.: 1983, J. Fluid Mech. 135 pp. 261-282.

Fig.13 Strouhal number for shedding from the recirculation zone vs Re

Fig.14 Number of vortex tubes in front of the hemisphere vs Re and Fd . N denotes the number of vortex tubes.