

埼玉大学工学部 正員 浅枝 隆
 東京大学工学部 正員 玉井 信行
 日本道路公団 所部 文彦

1 はじめに

不連続境界面を通る diffusive type (下層の方が塩分濃度、温度ともに高い場合) の二重拡散現象に関しては、従来より Turner¹⁾, Crapper²⁾, Tamai and Asaeda³⁾ らにより、実験的な研究が行なわれているが、依然そのメカニズムについては不明である。筆者らは、先に水深 h の一様な流体層において、下方から加熱によって加わる熱による密度フラックス $\rho F_0/\rho c$ とそれによって生じる対流の代表速度 W との間に $W = 1.3 (\rho F_0/\rho c \cdot gh)^{1/3}$ の関係があることを報告した⁴⁾。今回は、熱塩二重拡散系において、上下層に生じる対流の代表流速が平均的な密度のフラックスによってどの様に定まるかについて論じた。

2 実験

実験には、断面形状 $90\text{ cm} \times 90\text{ cm}$ 、高さ 70 cm 、底に一定の熱フラックスを一樣に供給できるラバーヒーターを備えた水槽を用いた。側面および水面からの熱の損失を防止するために、壁内外面に発泡スチロール板を貼りつけ、水面については深さ 30 cm の位置に発泡スチロールのふたをとりつけ、すべての実験にわたって全水深を 30 cm に固定した。初期の密度分布は、上層の水深が $12 \sim 18\text{ cm}$ であり、 $2 \sim 3\text{ cm}$ の中間層をけさんで下層が存在している。流速の測定は、水中にアルミ粉を混入させておき、鉛直スリットで照射しながら写真を撮り、その軌跡から求めた。対流の代表流速は、一枚の写真中の最大流速を数枚にわたって平均しそれを代表流速とした。

3 対流の可視化

2 で述べた様に上下層の境界には中間層が存在し、加熱開始後しばらくの間は上層に熱が伝わって行かないために下層にのみ対流が生ずる。この状態での対流は、玉井・高橋⁵⁾ の報告している温度成層が存在する場合で底板を加熱した場合に類似の現象を示し、下層が次第にのびて行き中間層の厚さが小さくなって行く。中間層厚が小さくなると、上層にまで熱が伝わり始め、上層にも対流が形成される。こうして上層に生じた対流は、直接底板を加熱した際に生じた対流と比べ次の様な点で異なる。一般的に、熱対流は上昇するサーマルとそれを補償する流れで構成される。直接底板から一樣に熱せられる場合には流入熱フラックスが小さい場合でも頻繁にサーマルが発生するためにサーマルの強度が弱く、時間的にも場所的にも温度の変動幅は小さい。それに対し、上層に生じる対流の場合には、下層に生じているサーマルの影響を非常に強く受ける。すなわち、サーマルが境界面に到達すると、その熱が上層に伝わりそこから上層内にサーマルが発生する。従って、下層中のサーマル強度の非一様性が増幅された形で現われる。

4 対流の代表流速を規定する量

熱的な不安定によって生じた対流は Rayleigh 数が大きき場合には、常に一定速度で流動しているのではなく、連続的にくは間断的に発生するサーマルの集合といつてよい。しかも、ここで定めている代表速度はサーマルの最大速度の平均値であるから、加熱することによって生じたポテンシャルエネルギーの増分が、比較的高い割合で運動エネルギーに変換されたものといつてよいだろう。さらに、一度運動エネルギーに形を変えたものも、層内に熱を伝達させたり、粘性散逸によって再び熱エネルギーに変化する。従って、一様な密度をもつ流体層を下方から加熱した場合および熱塩安定二成層を下方から加熱した場合について次の様に考えることができる。

A: 一様な密度をもつ流体層の場合

Fig-1 に示す様に、下から流入する熱フラックスを F_0 、水面から放出する熱フラックスを F_c とし、流体層の温度

と \$T\$, 基準の温度を \$T_0\$, 体膨張係数を \$\alpha\$, 密度 \$\rho\$, 比熱 \$c\$, 流体層の水深を \$h\$ とす
 る。熱量の保存則, 質量の保存則および単位時間内に層内に蓄積したポテンシャル
 エネルギーの増分 \$dP/dt\$ は次の様に表わされる。

$$\frac{d}{dt} \{ (T - T_0) h \} = \frac{F_0}{\rho c} - \frac{F_1}{\rho c} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \{ [\rho_0 (1 - \alpha (T - T_0))] h \} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} P = \frac{d}{dt} \rho g \frac{h^2}{2} = \frac{d}{dt} \{ [\rho_0 (1 - \alpha (T - T_0))] g \frac{h^2}{2} \} \quad (3)$$

底板加熱によって加わったポテンシャルエネルギーが対流に変化し、さらに層内の
 温度上昇によって増したポテンシャルエネルギーおよび水面から放熱によって失わ
 れたエネルギーに変化したわけであるから、対流の運動エネルギー \$P_v\$ は、変換の比
 率を \$K_1\$ として

$$P_v = K_1 \left[\frac{\sigma F_0}{c} g h + \frac{dP}{dt} \right] \approx K_1 \left[\frac{\sigma F_0}{c} g h + \frac{\sigma F_1}{c} \right] \quad (4)$$

で表わされる。

B: = 重拡散系の場合

Fig. 2 に示す様に、水深 \$h\$, 水温 \$T\$, 塩分濃度 \$S\$ に関して上層, 下層の量にそれぞれ
 番号の 1, 2 を付す。さらに下層から上層への温度のフラックスを \$F_2\$, 塩分のフラク
 スを \$F_3\$, 塩分濃度の無次元密度への換算係数を \$\beta\$ とする。温度および塩分による密度変化は線型に付加されるこ
 と。塩分濃度による体積変化は無視できるものとする。あらかたの温度によるポテンシャルエネルギーの変化
 だけを考慮、対流によって重力に抗して塩分を上方向へ輸送されるのに要するエネルギーを差し引けば、対流の持
 つエネルギーを見積ることができる。こうした考えに基づいて、上下層について熱量の保存則, 質量の保存則、
 温度によるポテンシャルエネルギーの変化、対流の有する運動エネルギーは次の様に表わせる。

$$\text{上層} \quad \frac{d}{dt} \{ (T_2 - T_0) h_2 \} = \frac{F_2}{\rho c}, \quad \frac{d}{dt} \{ [\rho_0 (1 - \alpha (T_2 - T_0))] h_2 \} = 0, \quad \frac{d}{dt} P_2 = \frac{d}{dt} \{ [\rho_0 (1 - \alpha (T_2 - T_0))] g \frac{h_2^2}{2} \} \quad (5)$$

$$P_2 = K_1 \left[\frac{dP_2}{dt} - \frac{1}{2} \rho g h_2 \frac{\beta F_3}{c} \right]$$

$$\text{下層} \quad \frac{d}{dt} \{ (T_1 - T_0) h_1 \} = \frac{F_1}{\rho c} - \frac{F_2}{\rho c}, \quad \frac{d}{dt} \{ [\rho_0 (1 - \alpha (T_1 - T_0))] h_1 \} = 0, \quad \frac{d}{dt} P_1 = \frac{d}{dt} \{ [\rho_0 (1 - \alpha (T_1 - T_0))] g \frac{h_1^2}{2} \} \quad (6)$$

$$P_1 = K_1 \left[\frac{dP_1}{dt} + \rho g h_1 \frac{\sigma F_1}{c} - \frac{1}{2} \rho g h_1 \frac{\beta F_3}{c} \right]$$

$$\text{式(6)より} \quad P_v = K_1 \frac{1}{2} \rho g h_2 \left[\frac{\sigma F_2}{c} - \beta F_3 \right] \quad \text{式(6)より} \quad P_v = K_1 \frac{1}{2} \rho g h_1 \left[\frac{\sigma F_1}{c} + \frac{\sigma F_2}{c} - \beta F_3 \right] \quad (7)$$

が求まる。ここで簡単のために \$P_v, P_1, P_2\$ について \$K_1 \frac{\rho}{2} h_{1,2} F_2\$ (一様密度流体層では \$F_2 = \frac{\sigma F_1}{c} + \frac{\sigma F_2}{c}\$ = 重拡
 散系上層では \$F_2 = \frac{\sigma F_1}{c} - \beta F_3\$, 下層では \$F_2 = \frac{\sigma F_1}{c} + \frac{\sigma F_2}{c} - \beta F_3\$) と表わす。さらに流速を \$W\$ とすると、\$P_v = K_2 P W^3\$ と表
 われるために \$W = (K_1/2K_2)^{1/3} (g h F_2)^{1/3}\$ (8) が求まる。

5 実験結果との比較

Fig. 3 に実験より求めた対流速度と \$g h F_2\$ と
 の関係を示した。●が均質な流体層の場合で
 ■が重拡散系下層, ▲が上層の場合を示し
 ている。多少のばらつきはあるが、ほぼ上記
 の考察で示された関係を示しているといえる。

参考文献

- 1) Turner, J.S. Int. J. Heat Mass Transfer, 1965
- 2) Gapper, P.F. Deep-Sea Res., 1975
- 3) Tamai, N. and Asaeda, T. 2nd Int. Sympo. on Stratified Flow, 1980
- 4) 浅枝, 玉井, 高橋 第25回水講, 1981
- 5) 玉井, 高橋 第26回水講, 1981

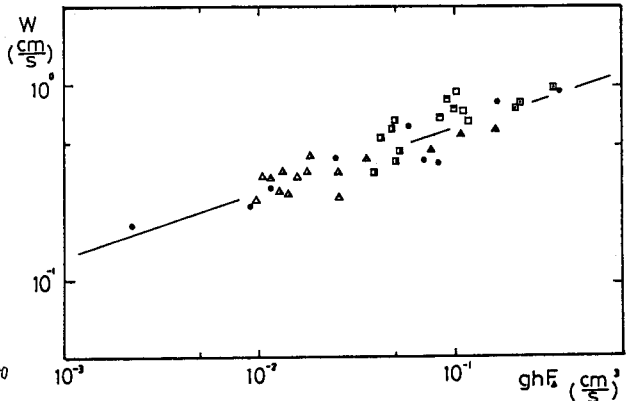


Fig. 3