

東京大学大学院	学生員	尾崎 晴男
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

1. はじめに 貯水池等では、冬期水面からの冷却により、大循環と呼ばれる、水深スケールの大きい対流が見られると言われている。このような水深の大きな水系の対流は下方から加熱しても見られ、サーマルと呼ばれる上昇水塊に端を発する。このサーマルの単位時間、単位面積当りの発生頻度は水深に依らず、与えられる熱フラックスに比例する、と報告されている¹⁾。本報文はこの報告を検証し、更に密度成層界面における混合機構を輸送の直接の担い手であるサーマルに着目して、論じたものである。

2. 実験の概要

25×25×50 cm の水槽に、塩水と淡水とによって安定な成層を作る。この2層水系に底板からラバーヒーターによって、一定かつ一様の熱フラックスを与える。水槽側面、及び水面には、熱損失を極力減らす為に発泡スチロール板を取り付ける。ヒーターにより底板から加熱を開始すると、底板付近からサーマルが上昇し始める。しかし淡水である上層にまでは達せず、下層の塩水層でまず対流が起こされる。下層の温度が上昇すると、上層との境界面からもサーマルが発生し、上層においても対流が出現する。予め懸濁しておいたアルミニウム粉を、側方から幅10 mm の鉛直スリット光を照射する方法で可視化し、上昇するサーマルの個数を数える。水温はサーミスタ温度計、塩分濃度は電導度計で測定する。

3. 底板からのサーマルの発生頻度

水深の大きな対流においては、加熱によって対流層の境界に温度勾配をもつ境界層が生成すると考えられる。この温度境界層の鉛直温度分布を線型と仮定して、境界層の安定性が崩れた時にサーマルが発生すると考えた。その結果、単位時間、単位面積当りのサーマル発生頻度 f は、鉛直スケールを対流層厚 d にとると、

$$f d^4 / \kappa = 0.39 \text{ Ra}_f / \text{Ra}_{fc} \quad (1)$$

と表わされる。ここに $\text{Ra}_f = \alpha F_H g d^4 / \rho c \nu \kappa^2$ はフラックス型レイリー数、 Ra_{fc} はその中立安定時の値である。 κ は熱拡散係数、 α は体膨張係数、 F_H は熱フラックス、 g は重力加速度、 ρ は密度、 c は比熱、 ν は動粘性係数である。この理論式をもとに実験結果を整理すると、図-1 のようになり、実験式として、

$$f d^4 / \kappa = 1.0 \times 10^{-4} \text{ Ra}_f \quad (2)$$

が得られ、見かけの限界レイリー数は3900となった。式(2)は1)の報告する式と極めて良い一致をみた。

4. 界面からのサーマルの発生頻度

この種の現象では下層内の対流に伴い、界面の密度分布はほとんど不連続に近くなる。界面のモデルとして、最も現実的と考えられる Linden & Shirtcliffe²⁾ のモデルを用い、同様の取扱いを行うと、対流層厚を d として、

$$f d^4 / \kappa = 0.14 \{ (1 - \tau^{1/2} R_p) (R_a / R_{ac}) \}^{4/3} \quad (3)$$

と表わされる。ここに $\tau = \kappa_s / \kappa$ で、 κ_s は塩の拡散係数、 $R_p = \beta \Delta S / \alpha \Delta T$ で上下層の塩分、及び温度による、

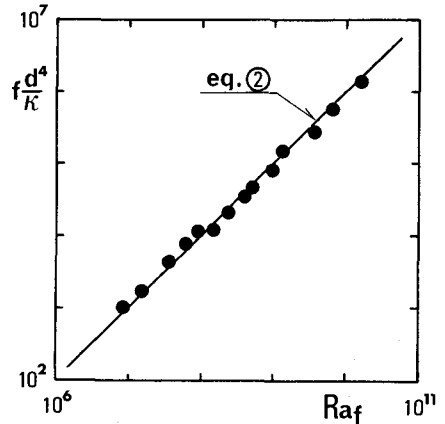


図-1 底板からのサーマル発生頻度

密度差の比で界面安定度, $Ra = \alpha \Delta T g d^3 / \nu \kappa$ はレイリー数, Ra_c はその中立安定時の値である。この理論式をもとに整理した結果を図-2に示す。実験式として,

$$f d^4 / \kappa = 8.0 \times 10^{-6} \{ (1 - \tau^{1/2} R_p) Ra \}^{4/3} \quad (4)$$

が得られ, 見かけの限界レイリー数は1600となった。

式②, ④はそれぞれ両辺に鉛直スケール d の4乗を含むので, これを消去できる。即ち, サーマルの発生頻度は水深に依らないこと, 界面加熱と底板加熱とでは, 類似した対流現象が起っていること, 以上2点が確かめられた。

5. サーマルの熱・塩輸送量

対流の端緒をなすサーマルの発生は熱境界層の崩壊という組織的構造をなす。従ってサーマル個々の性格は, 1個当りの平均値で代表し得ると考えられる。温度境界層の安定解析から求めたサーマル1個当りの平均的な熱輸送量は, 観測されたレイリー数の限界値を用いると,

$$\text{底板加熱で } \text{約 } 0.8 \text{ cal}, \quad \text{界面加熱で } \text{約 } 0.5 \text{ cal} \quad (5)$$

となった。界面加熱の場合, 塩分による密度勾配が存在するのにも拘らず, 1個当りの平均熱輸送量が小さい。これは境界層の両端が自由端に相当し, 底板加熱の場合の片端固定との相違と考えられる。

界面上約10mmにサーミスタと電導度計のプローブを極く近付けて設置し, サーマルの上昇によって感知された過剰塩分と過剰温度との密度比を界面の安定度に対して整理したものが図-3である。界面安定度 R_p が小さくなると, 塩分を含む比率の大きなサーマルが出現することがわかる。

6. 界面の変動

界面が不安定になると, 乱れが大きくなり, 界面から上昇するサーマルを数える事が困難になる。界面の鉛直方向の変動量を電位差式の水位計で測定した結果を図-4に示す。変動量は5分間の最大変動量をとってある。 $R_p < 2$ で変動量が急速に大きくなるのがわかる。この界面変動が, 下層で生成した上昇サーマルの衝突によって生ずると仮定して周期を比較したのが図-5である。下層内にサーミスタを固定し, 出力温度変動から測定したサーマル上昇の平均周期と, 水位計で測定した界面変動の平均周期とは比例せず, 仮説は成立していない。測定法の改良による確認, 及び他の要因の考慮を要すると思われる。

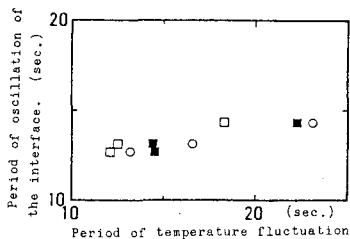


図-5 界面変動とサーマル発生との周期の比較。

温度変動の低限の測定高さ: ○ 5mm;

□ 30mm; ■ 50mm。

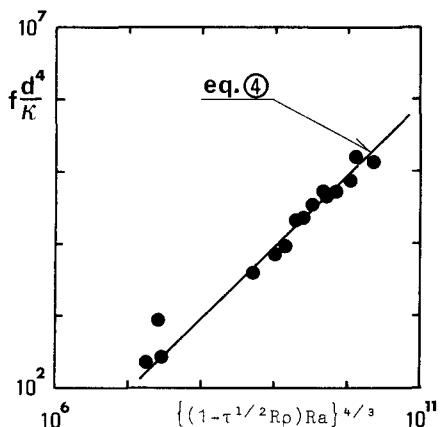


図-2 界面からのサーマル発生頻度。

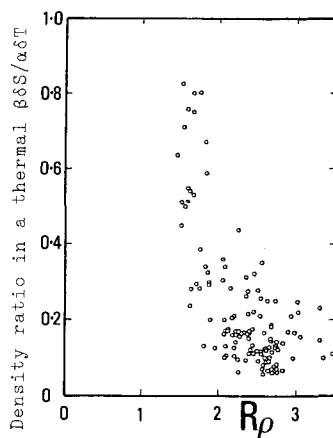


図-3 サーマル中の密度比。

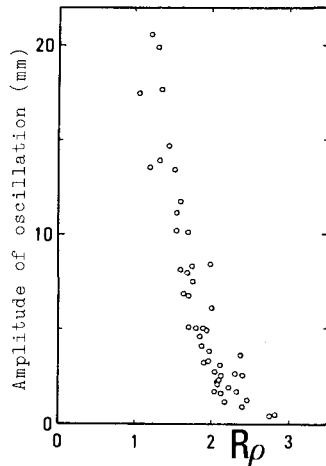


図-4 界面変動の大きさ。

<参考文献> 1) 浅枝・池田・二宮: 熱対流における組織的構造について, 第26回水講演文集, 447, 1982。

2) Linden・Shirtcliffe: The diffusive interface in double-diffusive convection, J. Fluid Mech., 87, 477, 1978。