

京都大学工学部 正員 村本 嘉雄

岡山大学環境理工学部 正員 大久保賢治

京都大学大学院 学生員○江 副 哲

京都大学大学院 学生員 森川 浩

1. はじめに 琵琶湖北湖における観測中に水温躍層直上の濁水貫入層で特徴的な水温変動がみられた。これが水温と微細土砂濃度（僅かに沈降性のある粘土鉱物粒子）による二重拡散対流に伴うものと考え、海洋でよく知られた熱塩二重拡散対流に関する結果を参考に、水温・濁度の二重拡散対流過程について系統的な実験を行った。その結果、本過程が湖の重要な輸送機構のひとつであるとともに、定量的にもソルトフィンガーに対応することを明らかにした。

2. 実験の概要 内径 9cm、全長 100cm のアクリル円筒水槽を上層水深が 20cm になるように厚さ 1 mm のプラスチック板で仕切り、仕切板上方 10 cm から下方 36 cm までの部分に 1 cm 間隔で水温鉛直分布を測定する48本のサーミスタを取付けた。仕切板の上方 5 cm の位置には蛍光光度計の採水管と濁度計感知部を置いた。濁質を不安定成層因子とする場合、粒子沈降速度を考慮する必要があるが、用いた粘土粒子（カオリン）の粒径は10  $\mu\text{m}$  以下で、その影響は小さいと考えられた。実験では、水槽に水道水を満たしてから仕切板を挿入し、分離した上層に拡散物質を含む温水を加えて上層水温と濁度を調節した。一部の実験では濃度 1 mg/l の蛍光染料（ウラニン）も加えた。設定後、数分間おき仕切板を引抜いて、実験を開始し、水温・濁度・蛍光濃度の変化を連続測定した。表1に実験条件を示すが、 $\Delta T$ 、 $\Delta S$ は上層と下層の温度及び濁度差を表す。Aシリーズは水温のみ、Bシリーズは水温と蛍光濃度、Cシリーズの実験では、濁度の時間変化も記録した。各シリーズとも1つの Run の実験時間は約100分とした。

表1 実験条件

|       | $\Delta T$<br>温度差<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | $\Delta S$<br>濁度差<br>(mg/l) | S<br>拡散<br>物質 | U<br>蛍光<br>染料 | 濁度<br>測定 |
|-------|---------------------------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|----------|
| Aシリーズ |                                             |                             |               |               |          |
| RUN 1 | 4.88                                        | 793                         | 粘土            | 無             | 無        |
| RUN 2 | 4.77                                        | 786                         | 粘土            | 無             | 無        |
| RUN 3 | 4.28                                        | 786                         | 砂糖            | 無             | 無        |
| Bシリーズ |                                             |                             |               |               |          |
| RUN 1 | 5.66                                        | 0                           | なし            | 有             | 無        |
| RUN 2 | 5.61                                        | 393                         | 粘土            | 有             | 無        |
| RUN 3 | 5.4                                         | 94                          | 粘土            | 有             | 無        |
| Cシリーズ |                                             |                             |               |               |          |
| RUN 1 | 6.09                                        | 189                         | 粘土            | 有             | 有        |
| RUN 2 | 7.67                                        | 189                         | 塩分            | 有             | 有        |
| RUN 3 | 5.42                                        | 472                         | 粘土            | 有             | 有        |

3. 実験結果 水温、蛍光濃度及び濁度の各積分量について、初期値に対する相対値を上層残存率とし、それらの時間変化及び水温・濁度の残存率から求めた浮力フラックス比の時間変化を、図1、2に示す。Bシリーズ（図1）では水温と蛍光染料濃度、Cシリーズ（図2）では濁度も示しており、いずれも上から各シリーズの Run1、2、3 の結果を並べてある。躍層を下向きに通過した相対量として通過率（＝1－残存率）を考え、水温と濁度の通過率の比より浮力フラックス比を評価した。ただし、上層濁度を測定していないBシリーズでは、上層濁度の減少が沈降によるものとし、初期濃度  $C_0$  に対する残存率が  $C/C_0 = \exp(-w_s t/h)$  (1) で表せるとした。ここで、 $w_s$  は Stokes式による  $7 \mu\text{m}$  鉱物粒子の沈降速度、0.005 cm/s、 $t$  は時間、 $h$  は上層深さ20cmである。一方、濁度も測定したCシリーズでは、測定した通過率の比よりフラックス比を求めた。図は示していないが、Aシリーズでは、粘土と砂糖で拡散物質の違いはほとんどなく、また、浮力フラックス比は0.91に近い値を示した。Aシリーズの初期安定密度比  $\alpha \Delta T / \beta \Delta S$  は1～2であって、この値は安定度の比較的低い熱塩二重拡散の結果と同じである。一方、B、Cシリーズの実験は、初期の安定密度比2～10に対し、浮力フラックス比は0.56付近でまとり、こちらは安定度が比較的高い熱塩二重拡散の結果と一致する。粘土を入れずに行ったB1の結果では、熱による浮力フラックスが約  $10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-3}$  であって、この量は分子熱拡散でよく説明される。この実験では蛍光染料の輸送も小さくフィンガーを駆動していないことから1 mg/l 程度の蛍光染料なら粒子や塩分の拡散にも影響しないことがわかった。B3 の温度差の時間変化は B1より若干減少率が大きく、この差は熱拡散にフィンガーによる輸送が加わったためと考えられる。B2 では密度比の初期値3.44に対して浮力フラックス比は0.56程度で落着いていた。一方、Cシリーズの濁度変化は、最初30分くらいまでは上向きのフィンガーによる急激な濃度低下を伴う変動が持続するが、後半になると次第に変動は緩やかになっていく。これは温度差、濁度差ともに小さくなり、フィンガーの発生限界に近い安定した

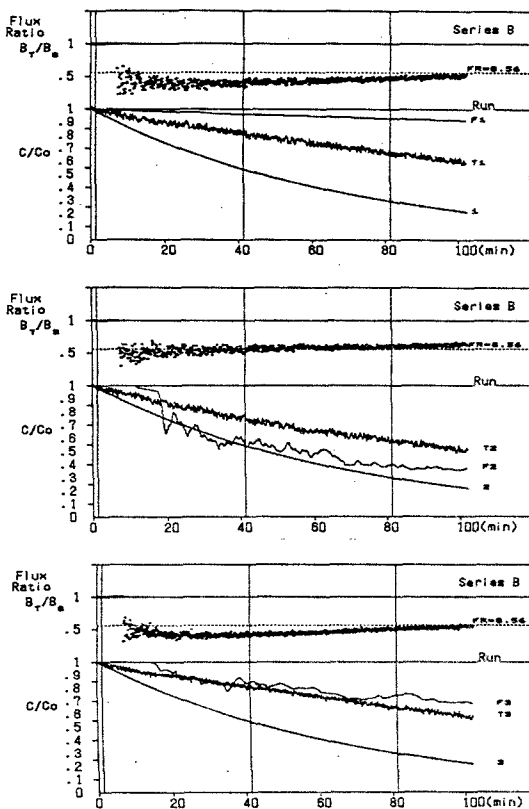


図1 上層残存率とフラックス比の変化  
Bシリーズ (濁度変化は(1)式)

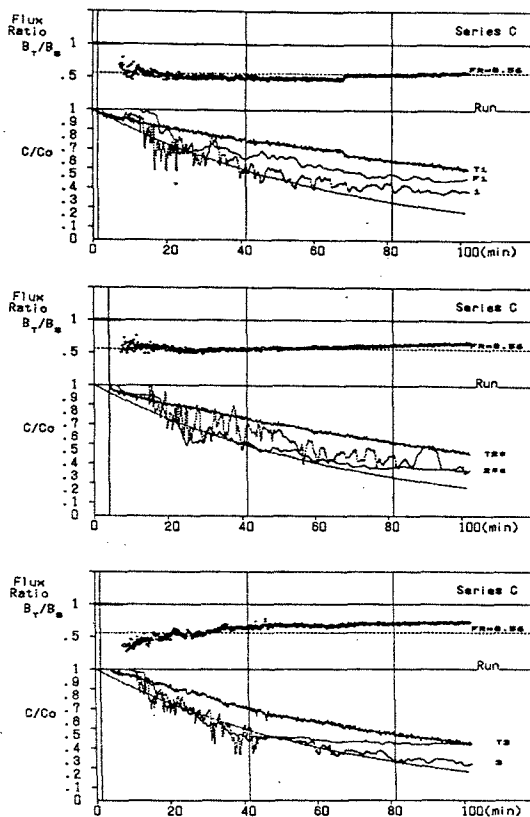


図2 上層残存率とフラックス比の変化  
Cシリーズ (濁度は測定値)

状態になるためであると考えられる。

$\Delta T$ を縦軸、 $\Delta S$ を横軸にとって実験値の時間的な経過をプロットしたものを図3に示す。各実験とも6つの時点について温度差と濁度差を示したものであり、実験の初期条件が近いものは実験点の経路もよく類似している。塩・砂糖を用いたものと粘土を用いた実験では、密度差の条件が近いと同じようにまとまっている。図には、琵琶湖北湖の観測結果もプロットされており、これは初期の水温差が約  $4^{\circ}\text{C}$ 、濁度差約  $100\text{mg/l}$  に始まって、数時間後には、水温差  $3^{\circ}\text{C}$  に対し、濁度差が  $30\text{mg/l}$  まで減少した結果である。初期値は実験でいえばB2とC1の初期条件の中間にあり、観測値は2つのデータ群の間を移動し安定領域に至ったと考えられる。これより実験でみられたフィンガーが琵琶湖でも発生しうると考えられる。ただし、実験の水温変動は現地より小さいようである。

#### 4. まとめ ソルトフィンガーと類似の粒子性フィンガー

が発生し、その浮力フラックス比を求めると熱塩二重拡散の場合と同程度になることからこれらは同種の現象と考えられる。つまり、海洋で塩分が果たす役割と同じ役割を湖では濁質が果たしており、したがって、水温と濁度をまとめて解析することが重要であるといえる。研究の契機となった観測は1993年の琵琶湖国際共同観測の一環として行われた。また、実験は日生財団の助成（懸濁物を媒介とする湖の水質変動機構の解明と弱成層モデルによる数値予測）を受けたことを付記する。

参考文献 1) Turner, J. S.: Buoyancy Effects in Fluids, 1973.

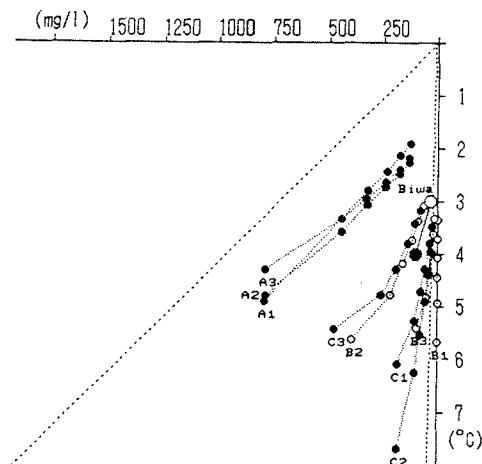


図3  $\Delta T$ と $\Delta S$ の変化 (●と○は観測値)