

II-211 熱対流によって誘起される二層間の連行について

東京大学工学部 正員 玉井 信行
東京電力 正員 O高橋 由多加

1. はじめに

温度成層が形成されている場合に熱対流が生ずると、成層間に移流型の混合 (penetration) が発生する可能性がある。現在の貯水地環境予測では鉛直1次元の拡散方程式を用いる方式が多く、penetration の効果は考慮されていない。しかし、現実の水域においても penetration が観測されており¹⁾、その評価法を確立することが必要と思われる。本報告は、安定成層を下方から加熱したときに生ずる連行を定量的に見積るものである。

2. 実験の概要

底板にシリコンラバーヒーターを密着した水槽 (90×90×70 cm) に安定な温度成層を作る。その底板から一定の熱流束を加え、水平面内に配置した3本のサーミスタの平均値より温度を知る。鉛直分布はトラバースにより計測する。計測結果の1例を図-1に示す。加熱を開始すると、下層は一樣な分布を保ちつつ水温が徐々に上昇し、その上に位置する温度勾配のある領域が全体的に上昇しているのが分かる。その結果、下方から加熱するにも拘らず水温が減少する領域が全く現われることになる。このような温度分布の変化は、分子拡散による伝導型の熱移動のみでは説明することができず、対流という流体塊の移動が発生していることを示している。

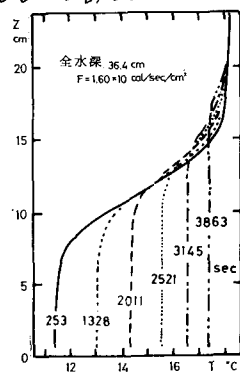


図-1 温度分布の変化

3. 成層場における熱対流の特性

下層内の熱対流について運動エネルギー K 、ポテンシャルエネルギー P 、粘性速度率 α の変化率を求めたものが図-2である。図に明らかなように、運動エネルギーの変化率 $\frac{dK}{dt}$ は他に比べ1割にも満たず、エネルギー式として $\frac{dP}{dt} = -P\alpha$ が近似的に成立する。さらに本実験の範囲では、下層厚の増加速度が最大対流速度の1/100程度であること、下層内のフラックス型レイリー数 ($= \frac{\alpha F_H g d^4}{\rho C \nu \kappa}$) は10程度以上であることから、下層内の対流は乱流状態の定常対流と見なせる。したがって、その最大速度 w_c 、セルスケール l は

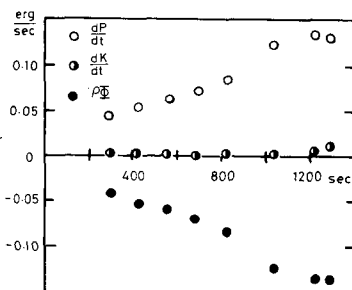


図-2 下層内エネルギーの変化率

$$w_c = 1.3 \left(\frac{\alpha F_H g d}{\rho C} \right)^{1/3} \quad (1), \quad l = 7.1 \left(\frac{\alpha F_H g d^4}{\rho C \nu^3} \right)^{-1/5} d \quad (2)$$

と表わされる²⁾。 α は体膨張率、 F_H は底板熱流束、 g は重力加速度、 d は下層厚、 ρ は密度、 C は比熱、 ν は動粘性係数、 κ は熱拡散係数である。

4. 連行係数とリチャードソン数

従来、機械的な攪乱による混合量に関しては、連行係数とリチャードソン数の関数として表わす手法が一般的に用いられてきた。本論文ではこの手法を熱対流の実験結果に対し拡張する。温度の分布形が時刻 $t_0 \sim t_1$ の間に図3のように変化する場合の連行量と交のように定義する。 t_0 での水温が T_0 以上の部分の分布形をそのまま上昇させ、 $z=d$ において負の最大熱フラックス F_N を生じさせるよう移動する。このとき両時刻での温度分布が主要な領域で一致するような移動距離 d_e を求める。このとき、連行速度 w_e 、分子拡散を除いた対流の変動分のみによる連

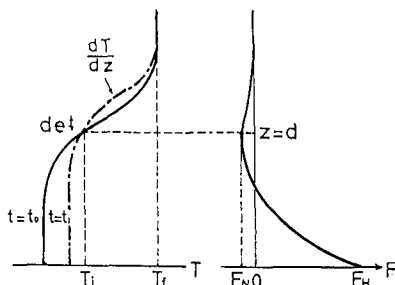


図-3 連行速度の決定

行速度 $w_e^{(m)}$ は、それゆゑ次のように表わされる。

$$w_e = \frac{de}{t_f - t_0} = \frac{FN}{\rho C(T_f - T_i)(t_f - t_0)} \quad (3)$$

$$w_e^{(m)} = w_e - \kappa \left(\frac{dT_i}{dz} - \frac{dT_f}{dz} \right) \frac{1}{T_f - T_i} \quad (4)$$

連行が生じている部分は温度勾配が存在するために、連行量にはこの部分の平均的な温度勾配 $\frac{dT}{dz}$ が密接に関係する。下層の運動の特性量は、速度スケールとして式(1)の w_{ce} 、長さスケールは式(2)のセルの大きさ l 、あるいは下層厚さ d である。こうした量で無次元化を行うと共に、2つの型式のリーチャードソン数を定義する。

$$E^{(m)} = \frac{w_e^{(m)}}{w_{ce}}, \quad E = \frac{w_e}{w_{ce}}, \quad Ri_0 = \frac{\Delta \rho \cdot g d}{\rho w_{ce}^2}, \quad Ri = \frac{\alpha \frac{dT}{dz} g l d}{\rho w_{ce}^2} \quad (5)$$

これらの量を用いて実験値を整理したものが図-4, 5 である。内部波のために資料の散乱は大きい、分子拡散を除いた対流型連行係数 $E^{(m)}$ については Ri_0 と Ri の $-\frac{2}{3}$ 乗にほぼ比例し、振動板、剪断流により攪乱するに依る実験結果^{3), 4)} と一致する。本実験の範囲内で全連行量および対流型連行量と Ri の関係を求めると次式となる。

$$E = (1 \times 10^{-2} \sim 3 \times 10^{-2}) Ri^{-1} \quad (6)$$

$$E^{(m)} = (2 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}) Ri^{-\frac{2}{3}} \quad (7)$$

5. 観測例への適用

実際の貯水池において penetration が温度分布形に表われている例として、Wellington 貯水池の場合(図-6)がある¹⁾。この場合には連行量の内容を分離することが精度良くはできないので、全連行量に対して式(6)を用いて得られる値を予測値とする。表-1 に示すように今回得られた実験式は妥当なものと考えられる。しかし、この他には観測例が入手できず、現地への適用性の確認は今後の課題である。

6. 結論

成層場において熱対流という運動により penetration が生ずることが明らかにされた。その大きさは連行という概念で表現することができ、代表尺度は定常対流の最大速度、対流セルの大きさである。実験結果も実際の貯水池の水温観測例に適用した結果も妥当な予測を与えた。

<謝辞>

この研究の一部は文部省科学研究費一般(C)の補助を受けた。

<参考文献>

- 1) Imberger, J.: *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Chap. 6, ed. Fischer, Academic Press, 1979.
- 2) 浅枝 隆・玉井 信行・高橋 由多加: 表層対流時の対流形成に関する研究, 第25回水講演文集, 643-649, 1981.
- 3) Turner, J.S.: *Buoyancy Effects in Fluids*, Cambridge Univ. Press, 288-299, 1973.
- 4) 浅枝 隆・玉井 信行: 成層界面における混合の特性について, 第23回水講演文集, 381-386, 1979.

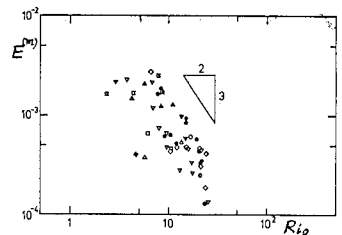


図-4 $E^{(m)}$ と Ri_0 の関係

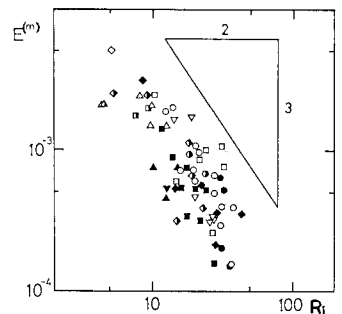


図-5 $E^{(m)}$ と Ri の関係

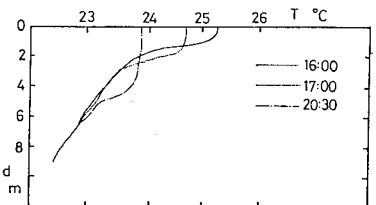


図-6 Penetrative Convection の観測例 (Imberger¹⁾による)

表-1 観測値と予測値との比較

時刻	16:00~17:00	17:00~20:00
時間差(sec)	3600	9000
放熱flux(cal/s/cm)	5.6×10^{-3}	1.5×10^{-2}
上層下部温度勾配(°C/cm)	7.8×10^{-3}	2.5×10^{-3}
上層水深(cm)	110	240
連行距離de(cm)	45	135
w_{ce} (cm/s)	0.70	1.23
セルの大きさl(cm)	9.9	10.9
Ri	2.2	1.0
E (観測値)	0.019	0.012
E (式(6))	$0.0045 \sim 0.014$	$0.01 \sim 0.03$