

神戸大学工学部 正 員 神田 徹 神戸大学工学部 正 員 道奥 康治
 兵庫県土木部 正 員 西川 孝晴 (株)アイエー 正 員 伊藤 達平
 神戸大学大学院 学生員 石川 勝久 東洋建設(株) 正 員○金谷 恵輔

1. はじめに

貯水池の表層では放熱期に自然対流が発生し、その擾乱効果によって鉛直混合が促進される。自然対流は日成層や季節躍層を浸食し底層水を混合拡散させるなど、水質輸送に支配的な役割を果たすが、現地観測に基づく自然対流機構の研究はこれまでほとんどなされていない。本研究では、サーミスタチェーンによる水温の24時間連続観測を行い、水温構造の周日変化、夜間冷却時の自然対流機構を実証的に明らかにする。

2. 貯水池の観測の概要

観測を行った兵庫県のA貯水池の総貯水量は $1.95 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、最大水深は31mで、冬期寒冷期においても底層水が滞留する部分循環湖である。貯水池最深部にサーミスタチェーンを係留し、水深0～5mでは0.5m間隔、5m以深では1m間隔で水温を測り、水面上0.5mで気温を測った。サンプリング間隔は10.5secで、22～24時間の連続観測を行った。各季節毎に合計7回の観測を実施したが、本文では、夜間の冷却が顕著であった10月11日～12日の観測データに基づいて自然対流の構造を考察する。

3. 観測結果

図-1に10月11日～12日の気温と表層水温の時系列、水温、水温の鉛直勾配、水温変動量の等値線を示す。水温の鉛直勾配は水温時系列の生データを鉛直方向に3次のスプライン関数で補間したものから算出し、水温が鉛直下方に増加する場合を正としている。これらの図において、表層付近に形成されていた日成層が夜間に消滅していることがわかる。これは水面の冷却にともなって発生した自然対流によるものと考えられる。しかし、取水口が位置する水深12～13m付近の季節躍層は安定に維持されている。また、水深25mより下方では水温勾配が正となる逆列水温層が形成されている。

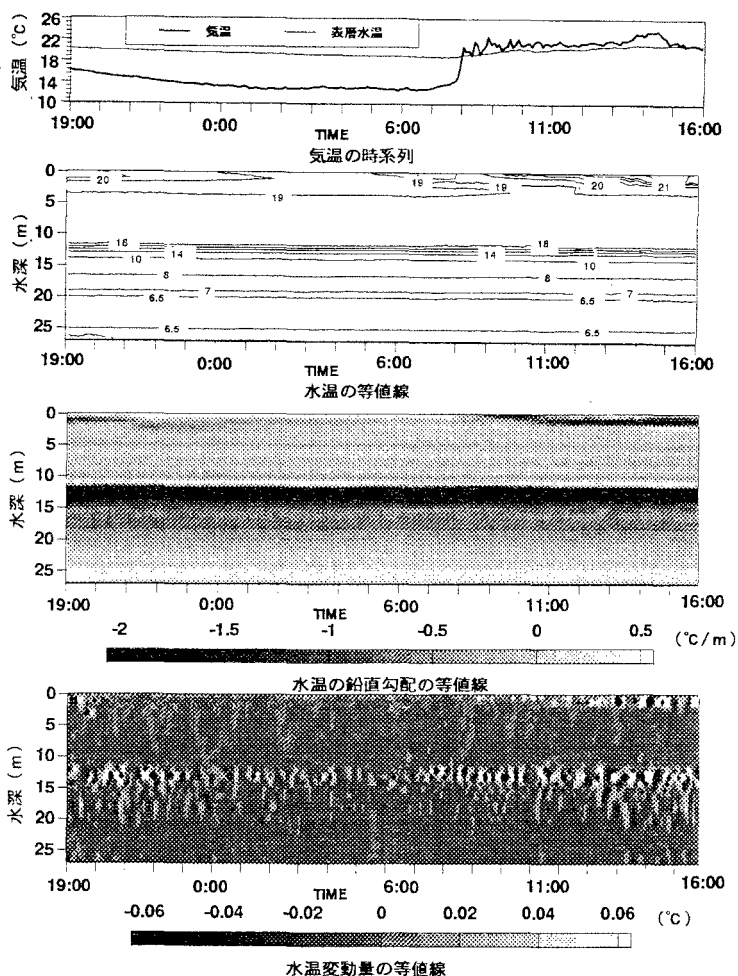


図-1 10月11日～12日の観測結果

4. 水面熱収支量の推算

水温分布 $T(z,t)$ の水深方向積分値を単位面積あたりの水柱に含まれる貯熱量 S と定義して、その経時変化を求める。

$$S(t) = \int_0^H T(z,t) dz$$

ここに、 H : 全水深 (m), $T(z,t)$: 時刻 t に

おける水温の鉛直分布である。図-2に10月11日～12日の貯熱量の時間変化を示す。夜間の冷却時には、水面から大気へ熱が放出され、翌朝の11:00頃からは日射と大気輻射によって大気から水面への熱輸送が生じている。熱の移動が鉛直一次的であると仮定して、単位水面積・単位時間あたりの水面での熱輸送量、すなわち熱フラックスを貯熱量 S から次式のように求める。

$$H_s = dS/dt \quad (^\circ\text{C m/sec})$$

熱フラックス H_s を用いて自然対流の速度スケール U_i は次式のように求められる¹⁾。

$$U_i = (\alpha g H_s h_m)^{1/3} \quad \text{ここに、} \alpha: \text{水の体積膨張係数 (} 1/^\circ\text{C)}, h_m: \text{混合層の厚さ (m) である。}$$

熱フラックス H_s は、 dS/dt がほぼ一定と考えられる0:00～6:00の観測値より上述の方法で求めた。これより $H_s = 6.8 \times 10^{-5} (^\circ\text{C m/sec})$ を得た。 α は観測時の水温に対応する値を水の状態方程式より算出し、 $\alpha = 1.98 \times 10^{-4} (1/^\circ\text{C})$ を得た。 h_m については水温分布から特定するのが困難であるので変数とみなし、 $h_m = 1\text{m}$ から季節躍層の水深に相当する $h_m = 13\text{m}$ の範囲で変化させた。これより、鉛直対流の速度スケールは $U_i = 0.5 \sim 1.2 \times 10^{-2} (\text{m/s})$ となった。

5. 水温変動の時空間相関

水温観測値から対流構造を抽出するために多点で観測された時系列データの時空間相関解析を行う。解析対象は10月12日24:00～1:00、2:00～3:00の観測値である。ここで、混合層の厚さ h_m が1～10mのオーダーであり、上記のごとく対流速度スケールが $U_i = 1.0 \times 10^{-2} (\text{m/s})$ のオーダーであることから、対流の時間スケールは $t_r = h_m/U_i = 3 \sim 20\text{min.}$ の範囲にあると考えられる。高周波の雑音成分ならびに内部波など自然対流より時間スケールの大きな変動成分を除去し対流運動を条件抽出するために、前処理として3～20min.のバンドパスフィルターを生データに施す。水面の水温時系列 $T(0,t)$ とある水深 z の水温時系列 $T(z,t)$ より相互相関係数を算出する。これを図-3のように (z, τ) 平面上に示す。この図より、例えば図中の走時曲線で表される熱輸送が生じていることが示唆される。この水温変動が自然対流によるものと考えた場合、図中の直線から推定される水塊の移動速度は各々 $0.5 \times 10^{-2} (\text{m/s}), 0.6 \times 10^{-2} (\text{m/s})$ である。この値は上述の水面熱収支量から求めた対流速度スケール U_i と同じオーダーにある。以上のように多点での水温連続観測と相互相関解析から対流速度スケールを求めることができる。対流速度スケールが求めれば、自然対流による仕事量や躍層の連行量などが評価され、日成層の破壊過程、季節躍層の形成・維持機構などの解明に役立つと考えられる。

謝辞：本研究の貯水池観測に際し御助力を得た神戸大学工学部 前田浩之技官に謝意を表す。

参考文献：1) Fischer, H.B. et al. : Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, pp.148～228, 1979

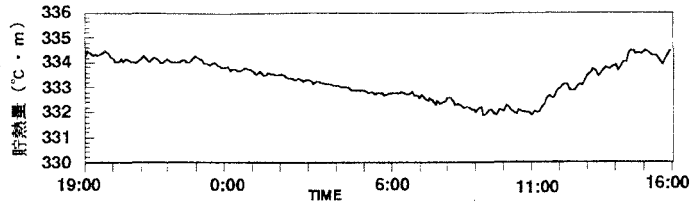


図-2 貯熱量の時間変化 (10月11日～12日)

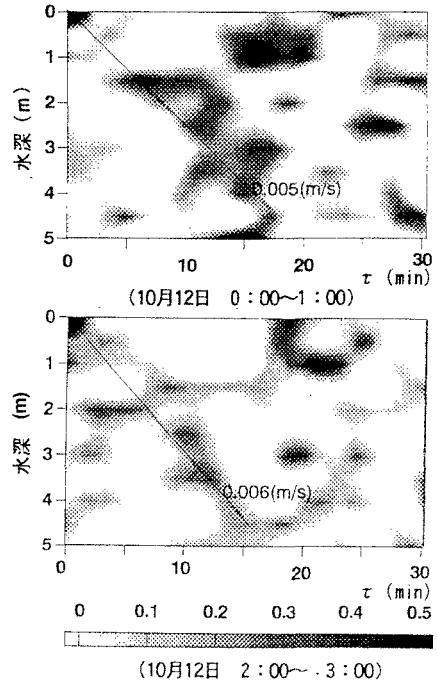


図-3 表層水温と各水深の水温との相互相関係数