

アイ・エヌ・エー	正会員	伊藤 達平
神戸大学工学部	正会員	神田 徹・道奥 康治
鹿島建設	正会員	石川 勝久
神戸大学工学部	学生員	近藤 善紀
神戸大学大学院	学生員	東野 誠

1. はじめに

底層で水温成層が逆転し、物質が高濃度に集積している貯水池において、水質観測を実施した。冬季の寒冷期においても、底層水は循環されずに高温を保ち、熱塩成層化した汽水湖のように部分循環状態を維持している。種々の水質項目を分析した結果、底層では、水温逆転層を力学的に補償できる以上に十分な濃度の栄養塩や溶存物質が蓄積していることが明らかとなった¹⁾。海水侵入や湖底からの温泉湧水などの要因で底部に高温層が形成される例はあるが²⁾、富栄養化した貯水池で観測されるこのような水温構造の形成要因は明らかにされていない。本報では、逆転水温層の形成機構に着目して、熱-物質多重成層の構成要因を考察する。

2. 水温、EC、溶存酸素量の湖内分布

対象とした貯水池は、底層水が1年を通して滞留し続ける部分循環湖である。図-1~3に例示するように、循環期においても、底層水は相対的に高温に保たれて逆転水温層（「異常水温成層²⁾」）を形成し、その電気伝導度ECは高い。図-2のように、貧酸素層は8~10月にかけて最も厚くなり、冬季において縮小するが底部はなお嫌気状態に保たれる。底層では、鉄、マンガン、栄養塩、有機物質、SSなどが密度を増加させており、水温逆転による不安定浮力勾配を十分に補償し、安定な多重成層を構成する程度に高濃度の物質が含まれている。このような底層での物質集積は、一般の富栄養化水域と同様に、嫌気状態下での水底からの物質溶出に起因していると考えられる。図-1~3のように、水温とDOに関しては、いずれの季節においてもこれらのコンターがほぼ水平に保たれ、鉛直一次元的な成層構造を有している。これに対し、ECは、貧酸素層が最も拡大した10月に浅水部の底層付近にまで高い値が検出され、三次元的な成層を呈している。水質分析に基づけば、 $EC=200\mu S/cm$ はおおよそ $150mg/l$ の相対密度差に相当し、図-3のようなECの空間分布は、物質濃度による浮力勾配が湖底に沿う傾斜ブルームを発生させる可能性を示唆している。

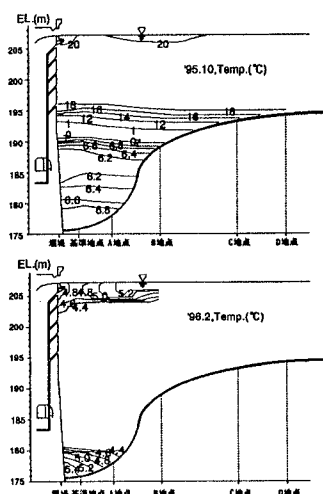


図-1 水温の池内分布

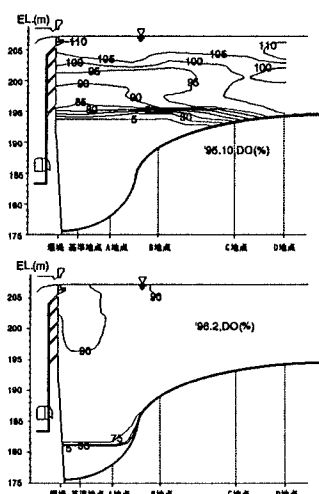


図-2 溶存酸素 DO の池内分布

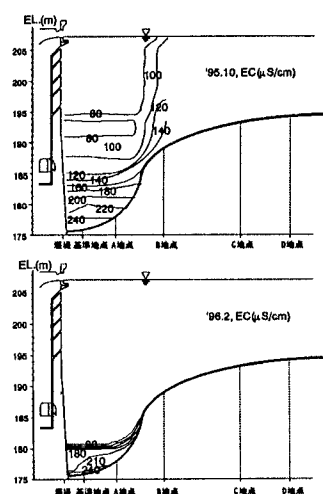


図-3 電気伝導度 EC の池内分布

キーワード：貯水池の水質、富栄養化、逆転水温層、傾斜ブルーム、熱塩対流

連絡先（〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1, TEL(078)803-1044, FAX(078)803-1050

3. 逆転水温層の形成と物質集積のメカニズム

貧酸素層が拡大し、貯水池底に沿って高濃度層が形成された状態を模式的に示せば、図4のようである。DO-境界面の標高より貯水池底が低いところでは、湖底が嫌気状態になり、底質からの溶出によって、EC-すなわち広義の塩分が増加する。塩分の重力効果は貯水池底に沿う傾斜ブルームを発生し、浅水部から深水部への物質輸送を駆動する。水温構造はほぼ水平であるので、浅水部の水温 T_b は貯水池底の水温 T_b より高く、ブルームによって深水層へ移流される熱フラックスは正である ($u'T_b > 0$)。よって傾斜ブルームは、浅水部の高温・高塩分水を深水部へと輸送し、底層に高濃度の逆転水温層を形成させる。傾斜ブルームの駆動力を概算するために、底面の高濃度水塊と周辺水との密度差 $\Delta\rho_b$ を推定する。今、貧酸素領域の底面上では、基準点の最深部と等しい電気伝導度 EC_{max} が一様に分布すると仮定する。周辺水の密度として基準点での密度分布を用いる。水温は水平方向に一様であるので、ある標高 Y における浅水部湖底と基準点の水との密度差は、物質濃度差—すなわちECの差、($EC_{max}-EC_s$)、のみに依存し、 $\Delta\rho_b = \beta(EC_{max}-EC_s)$ となる。ここに、 EC_s は基準点における湖底標高 Y での電気伝導度 $EC_s = EC(Y)$ である。'96年10月の観測値に基づく $\Delta\rho_b$ の平面分布を図-5にあらわす。深水部を囲むように浅水部で密度の大きい水塊が分布し、重力効果によって高濃度水が深水部へ流下することが予想される。傾斜ブルームの速度は、おおよそ $u_f = o(\sqrt{(\Delta\rho_b g \delta l) / \rho_s})$ で与えられる。ここで、 ρ_s : 規準密度、 δ : 高濃度層の厚さ、 l : 湖底の勾配、である。傾斜ブルームによる移流熱フラックスに対応する量として、 $\sqrt{\Delta\rho_b}(T_b - T_b)$ の平面分布を図-6に示す。浅水領域で、 $\sqrt{\Delta\rho_b}(T_b - T_b) > 0$ であり、浅水部から深水部に向かう熱輸送の存在を示唆している。

傾斜ブルームは、浅水部の高温・高塩分水を深水部へと輸送し、底層に高濃度の逆転水温層を形成させる。傾斜ブルームの駆動力を概算するために、底面の高濃度水塊と周辺水との密度差 $\Delta\rho_b$ を推定する。今、貧酸素領域の底面上では、基準点の最深部と等しい電気伝導度 EC_{max} が一様に分布すると仮定する。周辺水の密度として基準点での密度分布を用いる。水温は水平方向に一様であるので、ある標高 Y における浅水部湖底と基準点の水との密度差は、物質濃度差—すなわちECの差、($EC_{max}-EC_s$)、のみに依存し、 $\Delta\rho_b = \beta(EC_{max}-EC_s)$ となる。ここに、 EC_s は基準点における湖底標高 Y での電気伝導度 $EC_s = EC(Y)$ である。'96年10月の観測値に基づく $\Delta\rho_b$ の平面分布を図-5にあらわす。深水部を囲むように浅水部で密度の大きい水塊が分布し、重力効果によって高濃度水が深水部へ流下することが予想される。傾斜ブルームの速度は、おおよそ $u_f = o(\sqrt{(\Delta\rho_b g \delta l) / \rho_s})$ で与えられる。ここで、 ρ_s : 規準密度、 δ : 高濃度層の厚さ、 l : 湖底の勾配、である。傾斜ブルームによる移流熱フラックスに対応する量として、 $\sqrt{\Delta\rho_b}(T_b - T_b)$ の平面分布を図-6に示す。浅水領域で、 $\sqrt{\Delta\rho_b}(T_b - T_b) > 0$ であり、浅水部から深水部に向かう熱輸送の存在を示唆している。

4. まとめ

底層における高温底層水の存在は、水質障害の直接的な要因ではないが、逆転水温層の不安定浮力勾配に打ち勝つ程度に大きな物質負荷が、傾斜ブルームによって駆動されることを暗示している。これまでの観測事例によると、逆転水温層が形成される貯水池では、溪谷で険しい湖盆地形に立地し貧酸素層が形成されることが共通点として見られるようである。貯水池における新たな栄養塩集積のメカニズムとして底面からの塩分負荷によって発生する湖底面上の密度流を捉える必要がある。

参考文献：

- 1) 神田他：底部に不安定成層を有する貯水池の水温・水質解析，水工学論文集，第40巻，pp.601-606, 1996.
- 2) 吉村：日本の湖水の夏期深層水温（第4報），海と空，第17巻，pp.451-473, 1994.

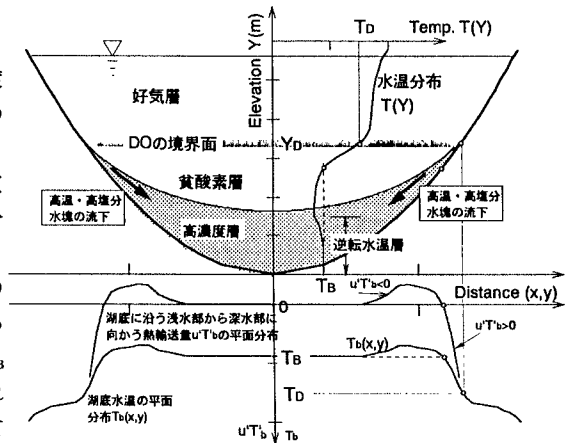


図-4 逆転水温層の形成機構

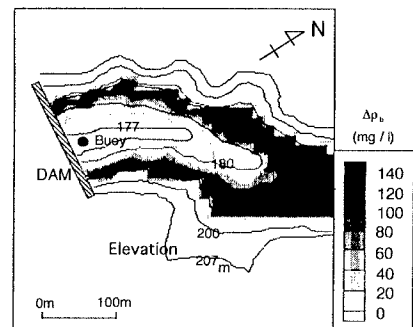


図-5 湖底の密度差 $\Delta\rho_b$ の平面分布

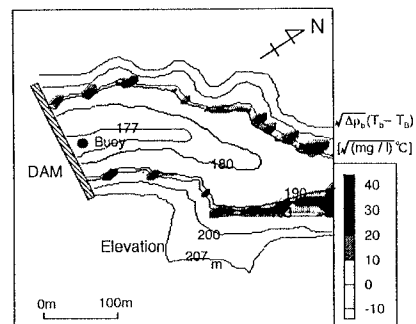


図-6 湖底水の $\sqrt{\Delta\rho_b}(T_b - T_b)$ の平面分布