

熱塩循環による貯水池底層での 熱と栄養塩の集積機構

ACCUMULATION OF HEAT AND NUTRIENTS IN A RESERVOIR BOTTOM DUE TO HEAT-SALT CONVECTION

道奥康治¹・安田篤司²・松下研一³・高橋俊之³

Kohji MICHIOKU, Atsushi YASUDA, Ken-ichi MATSUSHITA and Toshiyuki TAKAHASHI

¹正会員 工博 神戸大学工学部建設学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 工修 清水建設(株)東北支店

³学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科 (同上)

A reservoir under investigation has very characteristic structures of density and water quality; nutrients and dissolved materials are highly concentrated in a bottom layer and water temperature is inversely stratified. A fundamental study is carried out in order to examine how thermosolutal convection is involved in producing the water quality structure and in reservoir eutrophication. A governing process is assumed as follows. Organic matters in the bed materials are reduced under anaerobic condition and dissolved into impounded water. Heavy water mass containing dissolved materials or salinity is then produced along the reservoir bed, which generates inclined plume along the reservoir bed slope. The plume transports heat and dissolved materials from shallow to deep regions along the slope. Heat and salinity are finally accumulated in the deepest region to build up a very stable heat-salt stratification. In order to verify the assumed mechanism heat-salt convection is experimentally and numerically examined in a two-dimensional reservoir model. A buoyancy flux is imposed on the bed surface for simulating the anaerobic plume generation. The inclined plume promotes heat and mass transportation along the bed and finally produces high concentration of heat and salt complex there. The heat-salt convection is found to be much responsible in bottom water contamination in a highly eutrophic reservoir.

Key Words : *nutrients accumulation, reservoir eutrophication, heat -salt convection, double-density stratification, , anaerobic bed materials.*

1. はじめに

交換率が非常に低い閉鎖水域においては、流域からの栄養塩負荷などの外的条件よりも流れや生物・化学過程などの内的条件の方が富栄養化現象に対して支配的に影響する場合が多い。すなわち、流域条件が類似であっても、湖盆地形や流れの特性により水質構成が多様に異なる。

「栄養塩供給にともなう一次生産→有機物の分解・沈降→溶存酸素の消費と底層物質の嫌氣的な溶出」という一連の富栄養化機構は、しばしば鉛直一次的に考えられがちである。しかし、成層化した湖沼や貯水池では、特定の時期や場所に淡水赤潮や水の華が発生したり、従来考えられていた機構だけでは説明できない奇異な水質構造が形成されることがある。成層水域においては、密度差が水質輸送過程に大きく影響するため、水質解析で見過ごされる程度に微弱な熱循環が支配的な

役割を果たしている可能性がある。

著者らが水質観測を実施している貯水池では、底層に高濃度の溶解物質—すなわち広義の塩分—が含有され、逆転水温層が安定的に維持されている¹⁾。これは汽水湖の熱塩成層と類似の特徴であるが、火山帯など特殊な立地条件の水域を除き、内陸部の貯水池にはこのような熱・塩分の供給源はない。よって、汽水湖とは異なる特殊な機構が働いていると推定できる。

そこで著者らは、底質からの嫌氣的溶出により生産された高濃度水塊が湖底の傾斜面に沿ってブルームを発進し、底層へ熱・塩分(栄養塩を含む)を集積させるという仮説を立てた。このように微弱で局所的な循環流を現地観測で検出することは困難である。本論では、二次元貯水池モデルによる熱塩循環の数値解析と水理実験を遂行し、ここで提唱する栄養塩集積機構を実証する。

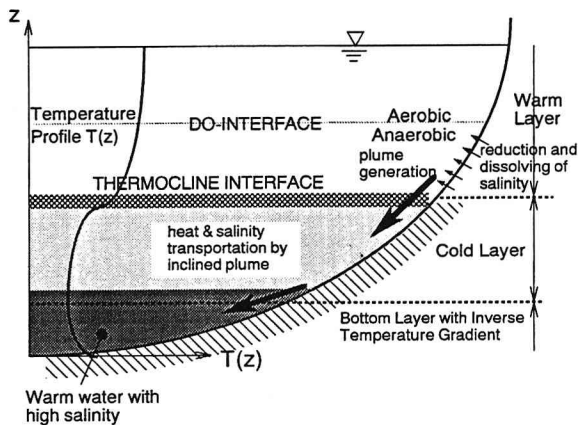


図-1 富栄養貯水池における底層への熱・栄養塩の集積過程の概念

2. 熱・栄養塩の集積機構に関する仮説

富栄養化が進行した成層貯水池では、表層で生産された有機物が分解・沈降し、深水層の溶存酸素を消費する。嫌気化した底質からは栄養塩を含む様々な塩分が水中へ溶出し、水中の電気伝導度と密度を増加させる。真夏から秋にかけては、図-1に示すように貧酸素層が拡大し、暖い浅水域までが酸欠状態になる。湖盆が急峻な場合、湖底から嫌気的に溶出する重い塩分が湖底沿いの傾斜プルームを発進し、栄養塩のみならず熱も連行加入して貯水池の最深部へ輸送する。この場合の熱・物質輸送量は、沈降や混合などによる鉛直一次元的輸送量よりもはるかに大きく、底層水への熱・物質の蓄積が大きくなる。その結果、底層はより高温・高密度になり、安定な逆転水温層が形成される。

3. 熱塩循環の数値解析

(1) 貯水池の二次元モデル

図-2のように底勾配 I が一定で最大水深が H_0 の二次元水域における熱塩循環を考える。初期条件としては、上下層水温が各々 $\Delta T=T_w-T_l$ 、塩分濃度は $S=0$ で一樣、上下層厚は $H_0/2$ の二層状態を想定する。本解析モデルはすでに、成層貯水池に侵入する表層密度流や傾斜プルームの再現に適用されており、過去の実験結果との比較からモデルの妥当性が検証済みである²⁾。

図-2の点線の高さに溶存酸素の境界面が位置し、これより下層の底面から塩分が溶出すると考える。本解析では、底面に沿って $S=\Delta S$ の一定濃度境界条件を与え、底面境界での濃度勾配に比例するように塩分溶出フラックスが分子拡散により与えられる。DO境界面は $z=H_0/4$ の位置とする。その他の境界は固定で熱・物質の出入りはない。

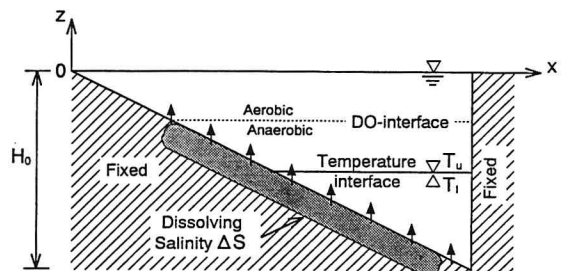


図-2 貯水池の二次元モデル

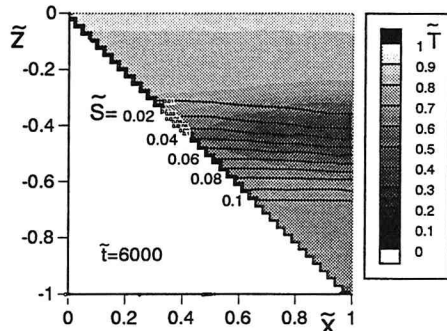
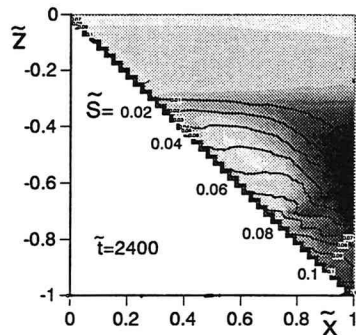
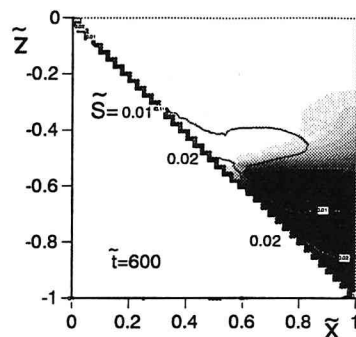
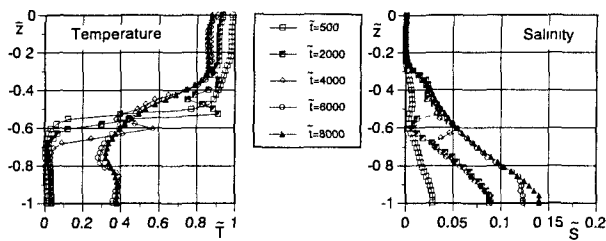


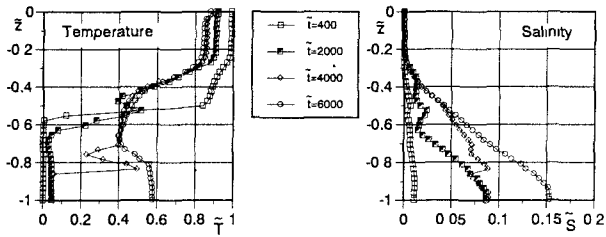
図-3 熱塩分布の経時変化例($\Delta T=5^\circ\text{C}$, $\Delta S=40\%$, $R_e=1.7 \times 10^7$, $R_i=0.03$, $R_\rho=30$, $I=1$)

(2) 解析方法と条件

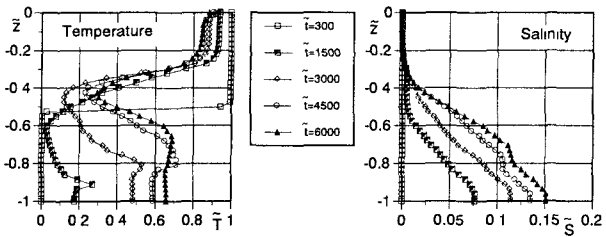
$L_0=H_0$: 高さ (最大水深), $U_0=(\beta g \Delta S H_0)^{1/2}$: プルーム速度, $T_0=\Delta T=T_w-T_l$: 躍層面での水温差, $S_0=\Delta S$: 底面の塩分濃度, $t_0=L_0/U_0$: 時間を代表スケールにとり, $k-\epsilon$ 乱流モデルの方程式²⁾を無次元化する。これより, $R_e=U_0 H_0/\nu$: Reynolds 数, $R_i=\alpha g \Delta T H_0/U_0^2$: Richardson 数, $R_\rho=\beta \Delta S/\Delta T$: 塩分と水温の密度比, I : 底勾配がパラメーターとして定義される。



(a) $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ ($R_i=0.065$, $R_p=15$)



(b) $\Delta T=7^{\circ}\text{C}$ ($R_i=0.045$, $R_p=22$)



(c) $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ ($R_i=0.03$, $R_p=30$)

図-4 熱塩分布におよぼす躍層強さ ΔT の影響

($R_e=1.7 \times 10^7$, $\Delta S=40\%$, $l=1$)

著者らの観測によれば、対象貯水池の底泥には全鉄T-Feと全マンガンT-Mnがそれぞれ約35,000～39,000mg/kgと約800～900mg/kg含まれている¹⁾。底質からの溶出塩分は、これら金属イオンを主成分として傾斜ブルームを発進する。海水とは異なる成分から構成されるので、密度など物性定数の性格な評価は困難である。ここでは、水理実験を考慮して、 $\Delta S=20 \sim 50\%$ の塩水濃度を考える。躍層での水温差は、 $\Delta T=T_b-T_i=5 \sim 10^{\circ}\text{C}$ とする。最大水深は $H_0=10\text{m}$ とする。以上より、パラメーターを次の範囲に設定する。

$$R_e=(1 \sim 2) \times 10^7, R_p=5 \sim 30, R_i=0.02 \sim 0.1$$

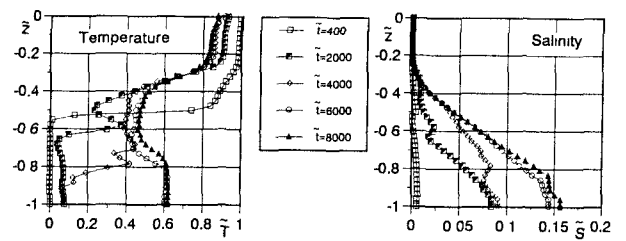
一方、傾斜ブルームの輸送力は底勾配 l に支配され、対象貯水池の湖盆は急峻であるので、地形を考慮して $l=1/10 \sim 2$ の範囲を考える。

現時点で傾斜ブルームが層流・乱流のいずれであるかを判別する術はないが、 $k-\epsilon$ モデルには層流項が含まれており、いずれの場合も問題なく再現される。

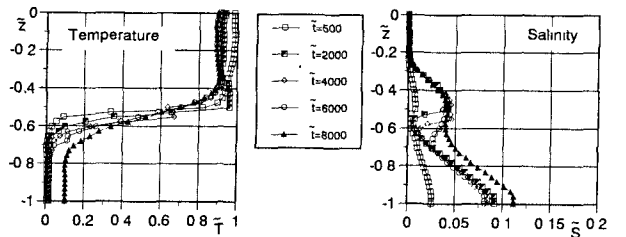
(3) 解析結果

(a) 熱塩循環構造の経時変化

図-3に解析から得られた熱塩分布の時間変化を



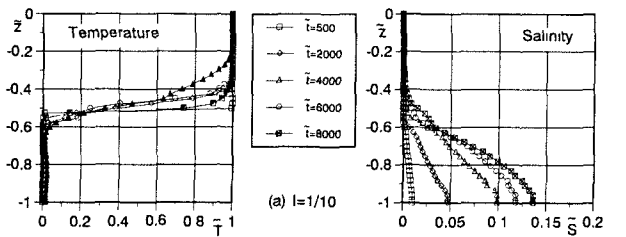
(a) $\Delta S=50\%$ ($R_e=2.0 \times 10^7$, $R_i=0.035$, $R_p=27$)



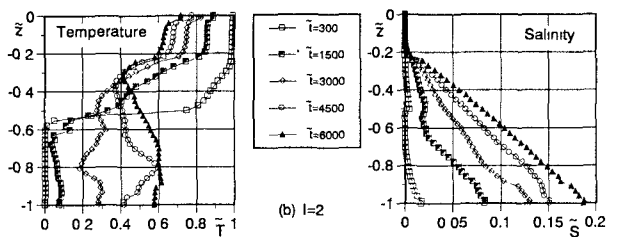
(b) $\Delta S=20\%$ ($R_e=1.2 \times 10^7$, $R_i=0.09$, $R_p=10$)

図-5 熱塩分布におよぼす底質濃度 ΔS の影響

($\Delta T=7^{\circ}\text{C}$, $l=1$)



(a) $l=1/10$



(b) $l=2$

図-6 熱塩分布におよぼす河床勾配 l の影響

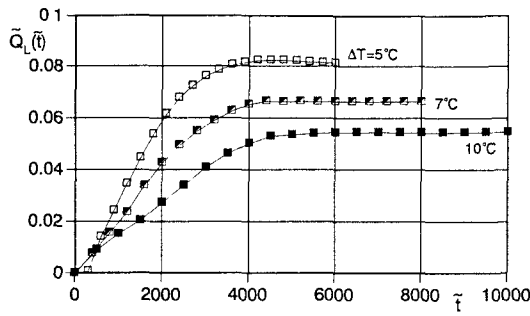
($R_e=1.7 \times 10^7$, $R_i=0.045$, $R_p=22$, $\Delta T=7^{\circ}\text{C}$, $\Delta S=40\%$)

示す。濃淡は温度差を、等値線は濃度をあらわす。この例では、 $t=600$ において、底面から溶出した塩水の大部分は傾斜面に沿って底層へと侵入し、一部が水温躍層面に水平貫入する。 $t=2400$ に至ると傾斜ブルームがさらに発達し、塩分が底層へと蓄積される。 $t=6000$ では塩水層が厚く高濃度になるので、塩分溶出は抑制されブルームが減衰する。

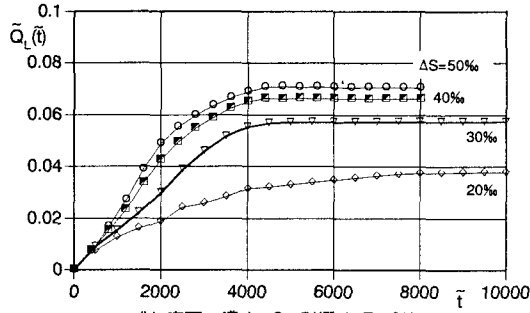
一方、上層の高温水は傾斜ブルームによって底層へと連行され、底層の水温が上昇する。最終的に中層が高温、表層と底層が低温の逆転水温勾配が形成される。

(b) 水温躍層の強さ ΔT の影響

図-4は最深部の断面における熱塩分布の経時変化を $\Delta T=5, 7, 10^{\circ}\text{C}$ の場合について比較したものである。いずれのケースも傾斜面の塩分濃度は



(a) 水温躍層強度 ΔT の影響 ($\Delta S=40\%$)



(b) 底面の濃度 ΔS の影響 ($\Delta T=7^\circ\text{C}$)

図-7 下層の無次元貯熱量 $\tilde{Q}_L(t)$ の時間変化
におよぼす $(\Delta T, \Delta S)$ の影響

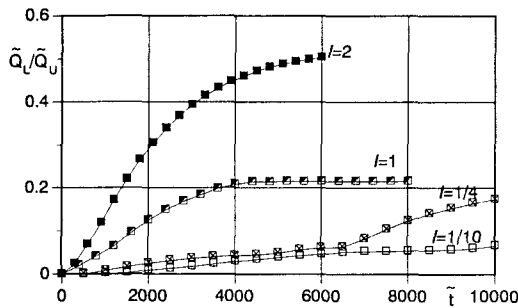


図-8 上下層の貯熱量比 Q_L/Q_U の時間変化と
河床勾配 I の関係

$\Delta S=40\%$, $I=1$ である。躍層強度 ΔT が小さいほど、発達したブルームは躍層を突き破って、より多くの熱と塩分を底層へ供給する。

(c) 底質の塩分濃度 ΔS の影響

図-5は底質塩分が $\Delta S=50, 20\%$ の場合についての、最深部断面における熱塩分布である。いずれの場合も $\Delta T=7^\circ\text{C}$ である。図-5および図-4(b)の間の比較から、 ΔS が大きいほどブルームによって底層への熱塩輸送が促進され、高温高塩分の底層水塊が形成されている。

(d) 河床勾配の I 影響

河床勾配が異なる $I=1/10, 2$ の熱塩分布を図-6に示す。勾配がゆるやかな $I=1/10$ の場合には下層への塩水侵入は見られるものの熱輸送量は小さく、逆転水温層はほとんど認められない。図-6、図-4(b)の比較から、 I の増加とともに傾斜ブルームの輸送量

表-1 実験条件

Case No.	1	2	3	4	5	6
$F_s [^\circ\text{C} \cdot \text{cm}/\text{sec}]$	0.08	0.11	0.06	0.08	0.11	0.06
$S_0 [\%]$	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5

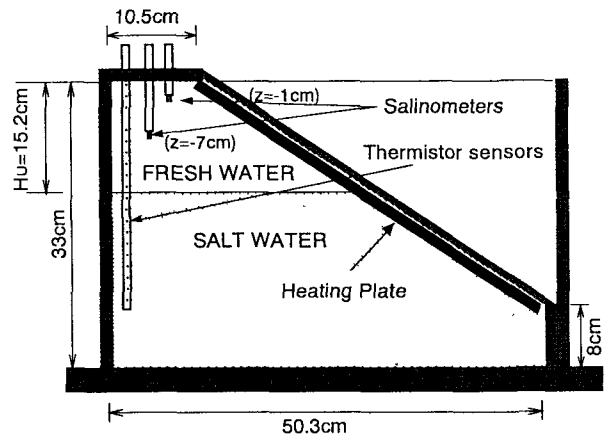


図-9 実験モデル

が増加し、逆転水温層はより顕著になることがわかる。

(c) 下層への熱集積量と $(\Delta T, \Delta S, I)$ の関係

三つの因子 $(\Delta T, \Delta S, I)$ と熱集積量との関係を考察する。ここでは、熱集積量をあらわす指標として、初期躍層面の高さ $z=H_0/2$ 以深の貯熱量 $Q_L(t) = \int_{V_L} T(x, z, t) dV_L$ を算定する。ここで、 V_L は下層体積である。

図-7は無次元貯熱量 $\tilde{Q}_L(t)$ と $(\Delta T, \Delta S)$ の関係である。 ΔT が小さいほど、 ΔS が大きいほど、より多量の熱がより早く底層へ蓄積され、逆転水温層が形成されやすい。河床勾配 I を変化させた場合については、ケース間で上下層の体積が異なるので、ここでは、下層と上層の貯熱量比 Q_L/Q_U によって下層の熱蓄積量をあらわす。 Q_L/Q_U の時間変化と I との関係を図-8に示す。河床勾配の増加とともに底層への熱集積量が增大している。

3. 熱塩循環の水理実験

(1) 実験モデル

数値解析で記述された熱塩循環を確認するために、図-9のようなモデルによる水理実験を実施した。この系では、対象とする熱塩系と幾何学的に上下逆で、「熱-塩」浮力が「塩-熱」浮力に置換されている。これは、底面からの塩分溶出を再現できるような実験装置の製作が困難であり、面的な浮力供給は加熱による方が容易であることによる。実現象へ換算するためには、システムを上下逆にして、塩分浮力を熱浮力に、水温成層を塩分濃度成層により、それぞ

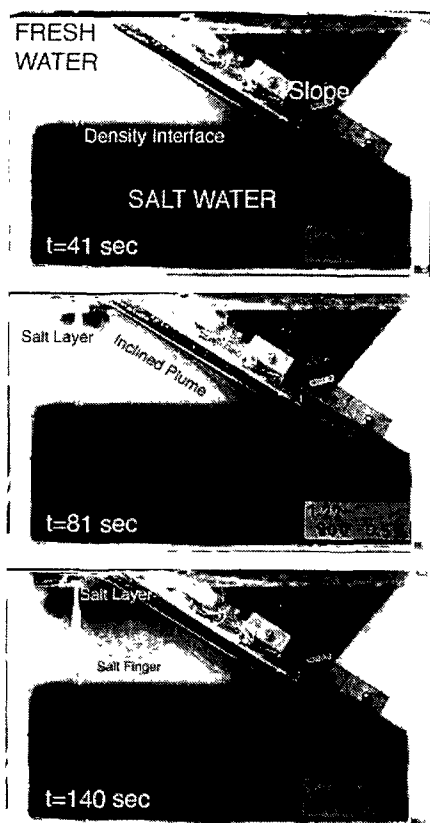


写真-1 傾斜面に沿った塩水遡上の様子(Case-1)

れ代替しなければならない。後述のように二重拡散が顕著になると、このような流体物性の交換が現象を歪めることになるが、ここでは熱塩循環の浮力過程の再現に重点をおく。

水槽内に塩分二層系を作成し、斜面部に設置したヒーターを一定出力で加熱する。プルームは傾斜面に沿って上昇し、熱と塩分が上層へと連行される。

「水面－密度境界面」間の距離 $H_0'=H_0$ 、塩分層の初期濃度 S_0' 、 $T_0'=F_S/U_0'$ 、 $U_0'=(\alpha g F_S H_0')^{1/3}$ 、 $t_0'=H_0'/U_0'$ 、をそれぞれ(長さ、濃度、温度、速度、時間)の代表スケールとする。ここで、 F_S は底面の熱フラックスである。以上では、数値解析の場合と区別するために“prime”を諸量に付している。無次元量の定義は先と同様である。例えば、リチャードソン数は、 $R_1'=\epsilon g H_0'/U_0'^2$ ($\epsilon=\beta S_0'$ は塩分成層の初期相対密度差)である。

表-1のように、塩水層の初期濃度が $S_0'=0.5, 1.0\%$ 、傾斜底面での熱フラックスが $F_S=0.06, 0.08, 0.11$ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm/s}$ について実験を行った。傾斜勾配は $I=0.63$ である。水温は熱電対により1.2cm間隔で20点計測した。塩分濃度は水面より1.0cm下方($z'=-1.0\text{cm}$)と淡水層の中央付近($z'=-7\text{cm}$)の二点で計測した。

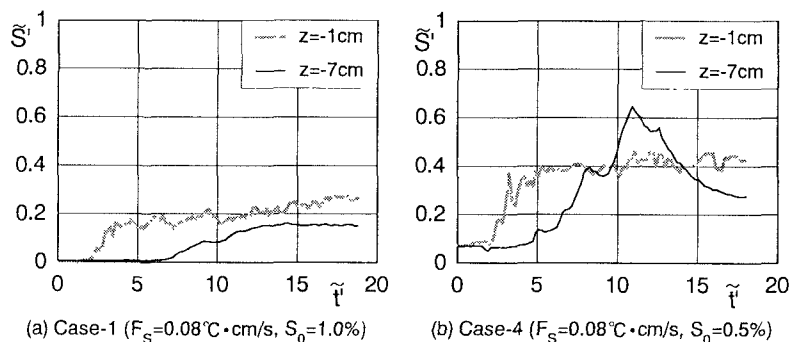


図-10 塩分濃度の時間変化

(2) 実験結果

熱塩循環の様子を写真-1に示す。斜面に沿って塩水が遡上し始め、やがて上端まで達する。これは、数値解析で再現された現象と定性的に類似しているが、モデルのスケールが小さいために熱塩二重拡散の影響があらわれる。すなわち、 $t=140\text{sec}$ に見るように、塩水が上端に集積した後はソルトフィンガーが発生し、^{すたれ} 簾状に塩水塊が下方へ落下している。

図-10は、 $z'=-1\text{cm}$ 、 -7cm の二点における塩分濃度の経時変化である。 $(\bar{S}', \bar{t}')$ は塩分濃度と時間の無次元量をあらわす。Case-1では、 $\bar{t}'=10$ が実時間の $t=307\text{sec}$ に相当する。傾斜プルームによって塩水が輸送され、まず水面下 $z'=-1\text{cm}$ での塩分濃度が上昇する。その後、淡水層内へ塩水が蓄積すると、さらに $z'=-7\text{cm}$ における塩分濃度が上昇する。これは、貯水池の傾斜底面で溶出した塩水が温水層の熱を連行しながら貯水池底へ蓄積する現象に対応している。また、塩分成層の初期濃度差が小さいCase-4の方がCase-1よりも早く塩水が上昇し、高濃度に上端へ蓄積している。これは、躍層の初期水温差が大きい時にプルームが躍層界面を強く突き破ってより多くの熱塩を集積させるという数値解析結果と一致している。

図-11は水温分布の経時変化を示す。上端部に於いて水温上昇が著しく、淡塩境界面より下方の水温変化は少ない。躍層の初期濃度差 S_0' の熱蓄積量におよぼす影響は塩分の場合ほど顕著にはあらわれていない。

次に、上層への熱・塩分の集積量と水理条件との関連性を考察する。ここでは、熱塩集積の程度をあらわす水理量として、熱塩輸送がある程度平衡に達し上端での水温と塩分濃度がほとんど変化しなくなった段階での水温と塩分濃度 T_{∞}' 、 S_{∞}' を考える。これらの無次元量 $\bar{T}_{\infty}'$ 、 $\bar{S}_{\infty}'$ とリチャードソン数 R_1' との関係を $z'=-1\text{cm}$ 、 -7cm について示せば図-12、13のようである。

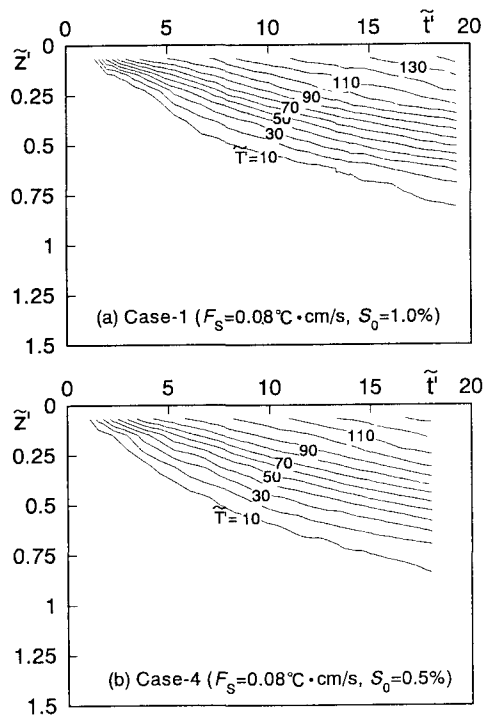


図-11 水温分布の時間変化

$\bar{T}_\infty$ はリチャードソン数と無関係にほぼ一定値をとるのに対し、 $\bar{S}'_\infty$ はリチャードソン数とともに減少する。これより、リチャードソン数が増加するほどすなわち傾斜プルームの駆動力に比べて躍層強度が大きいほど塩分集積量が減少するのに対し、熱集積量はリチャードソン数に関係なく一定に保たれる。これを貯水池の現象に読み替えれば、底面からの塩分溶出が大きいあるいは成層度が大きいほど、水温逆転度が弱くなるが、塩分蓄積量はそれほど変化しないということになる。数値解析における境界条件やRichardson数の定義は実験と同一ではないので、両者の直接比較によってこの傾向を確認することはできない。しかし、図-7におい

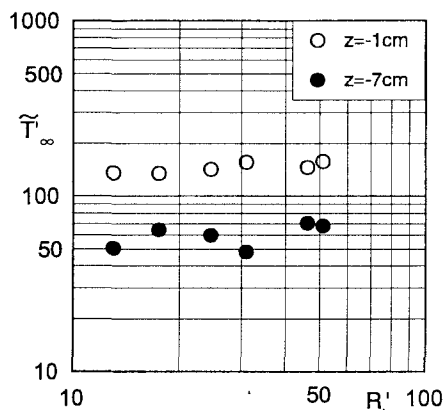


図-12 最終段階の無次元水温 $\bar{T}_\infty$ とリチャードソン数 R_i' の関係 ($z' = -1\text{cm}, -7\text{cm}$)

て躍層強度 ΔT が小さいほど、また溶出をもたらす底面濃度 ΔS が大きいほど、底層に熱が蓄えられ逆転水温が大きくなる傾向は、図-13の結果と一致している。

ここで得られた知見を検証するためには、このような熱塩構造を有する複数の貯水池の水質データを整備する必要がある。

5. むすび

富栄養化した貯水池では、底質から嫌氣的な塩分溶出が生じて底面に沿って高密度水塊が生産される。傾斜した底面から発達するプルームは、熱塩循環を駆動して熱や塩分を底層へと集積し、特異な水質構造を生成する。本研究では、この熱塩循環をモデル化し、熱・塩分の集積過程を実験的・解析的に明らかにした。解析より、水温躍層が弱いほど、底質塩分が高濃度であるほど、また河床勾配が大きいほど、底層への熱と塩分の集積が顕著になることがわかった。水理実験では、傾斜面から発達するプルームが熱・塩分を対流輸送し、逆転水温層に相当する熱塩二重成層の形成が再現された。現段階では、解析・実験とも定性的な検証に限定されているが、今後、底質からの溶出フラックスを評価し、熱塩輸送量をより定量的に見積もる必要がある。

本研究を遂行するにあたり平成10年度文部省科学研究費補助金基盤研究(C) (課題番号: 10650505, 代表者: 道奥康治) の助成を得た。

参考文献

- 1) 道奥・神田・伊藤・西川・石川・東野: 底部に逆転水温層を有する部分循環貯水池の水質構成に関する研究, 土木学会論文集, 第572号/II-40, pp.33-48, 1997.
- 2) 道奥・藤川・不二: 貯水池内に流入する浮力水塊の挙動解析, 水工学論文集, 第40巻, pp 561-566, 1996.

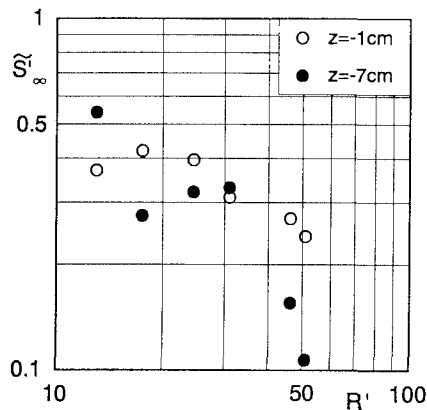


図-13 最終段階の無次元塩分濃度 $\bar{S}'_\infty$ とリチャードソン数 R_i' の関係 ($z' = -1\text{cm}, -7\text{cm}$)

(1998. 9.30受付)