

神戸大学工学部 正会員 道奥 康治

清水建設 正会員 安田 篤司

神戸大学大学院 学生員 ○松下 研一・高橋 俊之

1. はじめに：いくつかの貯水池では、底層で逆転水温成層が形成されている。その原因として、力学的に不安定な水温勾配を補償できる以上に高濃度の溶存物質が集積していることが考えられる。おそらく、富栄養化した貯水池の底層が貧酸素状態となることにより、池底から塩分が溶出してその重力により傾斜ブルームを駆動し、高温水塊が底層部分へ連行されることによって、このような熱塩成層が形成されると考えられる。本報では、この熱塩サーマルサイフンの発生機構について、二次元数値モデルと水理実験から考察を行う。

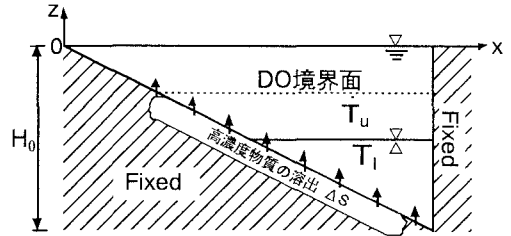


図-1 対象とする二次元貯水池系

2. 数値解析手法：図-1のような二次元水域を対象とする。

関連物理量は、 H_0 ：最大水深、 I ：床勾配、 T_u 、 T_l ：初期における上・下層水の水温、 ΔS ：底面の塩分濃度差、 κ_T ：熱拡散係数、 κ_S ：塩分拡散係数、 α ：熱膨張係数、 β ：塩分-密度換算係数、 g ：重力加速度である。各物理量の代表スケール

として以下を用いる。長さ：

$$L_{ref} = H_0, \text{ 速度: } U_{ref} = (\beta g \Delta S H_0)^{1/2},$$

$$\text{温度: } T_{ref} = T_u - T_l, \text{ 塩分濃度:}$$

$$S_{ref} = \Delta S, \text{ 時間: } t_{ref} = L_{ref} / U_{ref}.$$

これらを用いて諸量を次のように無次元化する。

$$(\tilde{x}, \tilde{z}) = (x, z) / L_{ref},$$

$$(\tilde{U}, \tilde{W}) = (U, W) / U_{ref}, \tilde{t} = t / t_{ref},$$

$$\tilde{T} = T / T_{ref}, \tilde{S} = S / S_{ref}, \tilde{k} = k / U^2,$$

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon L_{ref}^3 / U_{ref}^3 \text{ (ここで } k: \text{ 乱流エネルギー}$$

ギ一, ε : 乱流エネルギー散逸率)。

無次元支配パラメーターは①レイノルズ数：

$$Re = U_{ref} L_{ref} / \nu,$$

$$\text{②リチャードソン数: } Ri = \alpha g L_{ref} T_{ref} / U_{ref}^2, \text{ ③}$$

$$\text{塩分-温度密度比: } R_\rho = \beta S_{ref} / \alpha T_{ref}, \text{ ④}$$

$$\text{プラントル数: } Pr = \nu / \kappa_T, \text{ ⑤レイ}$$

$$\text{ス数: } \tau = \kappa_S / \kappa_T \text{ である。解析には標準型 } k-\varepsilon \text{ モデルを用いる。固定境界}$$

面は断熱で non-slip, 水表面は rigid-

lid とし、図-1のように斜面に沿う濃

度 ΔS が一様として境界条件を与え

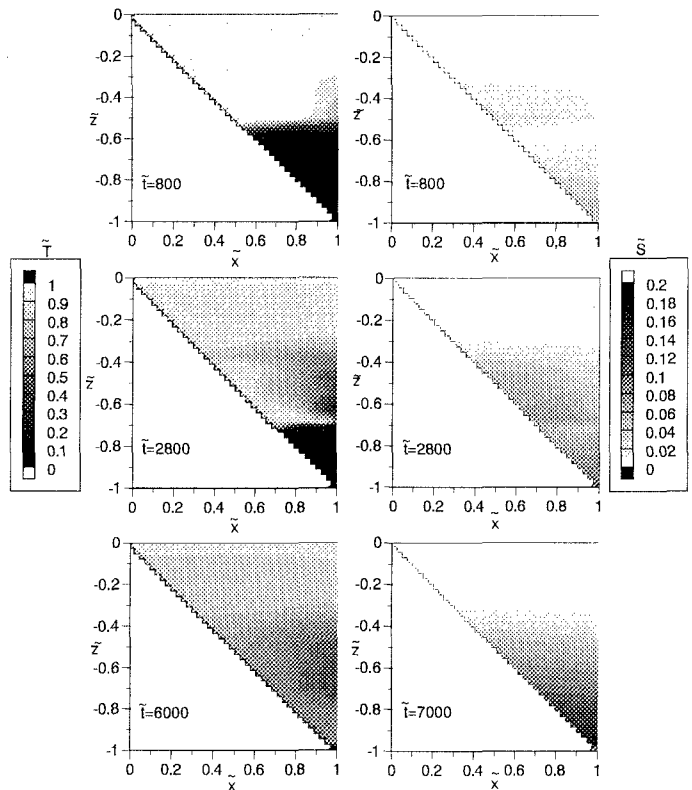


図-2 水温分布の時間変化

図-3 塩分濃度分布の時間変化

Kohji MICHIOKU, Atsushi YASUDA, Kenichi MATSUSHITA, Toshiyuki TAKAHASHI

る。初期において、上層・下層の水温はそれぞれ T_u 、 T_l 、塩分濃度は全層 $S=0$ である。

3. 解析結果と考察：斜面からの塩分溶出によって傾斜ブルームが発生し、熱と塩分が底層へ移流され、時間とともに高温・高塩分水が蓄積される。図-2、図-3はそれぞれ無次元水温および無次元塩分濃度

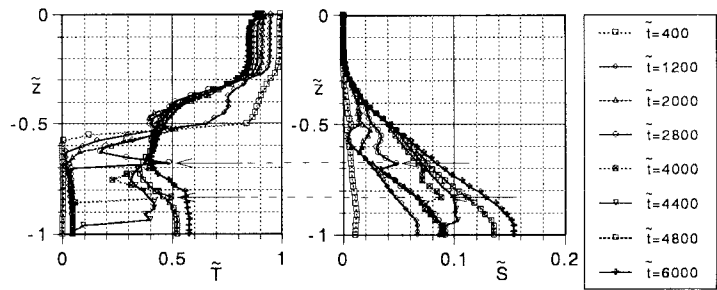


図-4 最大水深部における温度・塩分濃度の鉛直分布

度の経時変化をコンターで示したものである。このケースは、初期の水溫躍層における水溫差が $\Delta T = 7 [^{\circ}\text{C}]$ 、貯水池底での塩分濃度が $\Delta S = 40 [\%]$ 程度を想定している。これらは、対象貯水池において観測される典型的な躍層での水溫差、ならびに底泥に含まれるT-Fe、T-Mnの総重量におおよそ相当する。 $\tilde{t} = 800$ の初期の段階においては、上層の高温水が僅かに下層へと連行されている様子が確認できる。塩分濃度の分布から判断して、初期の段階においては、塩分供給による傾斜ブルームの大部分が躍層界面に沿って水平に貫入していくが、一部は分岐して躍層より下方へ進行し、高温水を連行していることが確認される。しかしながら、下層へ連行された高温水は拡散され一様に混合される。その後、躍層界面に蓄積された塩分が躍層の浮力安定効果を上回り、下層への高温水の連行量が増加する。傾斜ブルームは浮力的に釣り合ったところで水平に貫入するため、躍層界面を低下させながら高温水を徐々に貯水池最深部へ連行していく。以上のような過程を経て逆転水溫成層が形成される。これらの現象は図-4に示す水溫と塩分濃度の最大水深部における鉛直分布からも確認される。図において矢印で示すように水溫と塩分濃度の分布の急変点が一致しているが、これは高温・高塩分の傾斜ブルームが水平貫入していく位置に相当する。

4. 実験方法と実験結果：熱塩サーマルサイフォン現象を実験的に再現する目的で、図-5のような装置を用いて実験を行った。実験では、水溫成層の代わりに塩分成層を作成し、池底斜面からの塩分溶出の代わりに斜面部分から一定の熱フラックスを供給することで、現象を再現した。図-6のように、塩水塊が傾斜ブルームとして上層部に連行される様子が確認された。しかし、上層部に連行された塩水塊は長時間上端に滞留せず、やがてソルトフィンガーの発生によって淡水層全体に一様に拡散し、実現象とは少し異なる挙動を示す。実験モデルと実際の貯水池の状況の違いを認識した上で、現象を理解する必要がある。

5. まとめ：今後の課題として、実現象に極力類似したモデルにより、解析と実験を行うことが課題である。

参考文献 1)道奥，神田他：土木学会論文集，No.572/II-40,33-48,1997年

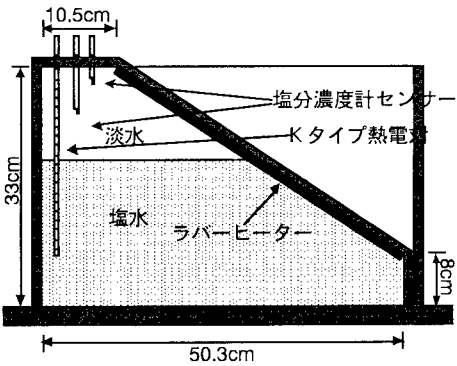


図-5 実験装置の概略図

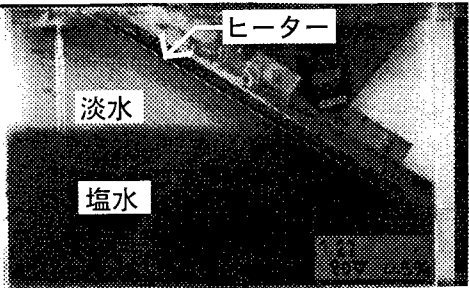


図-6 傾斜ブルームによって塩水が遡上する様子($t=100\text{s}$)