

II-218

湖沼の温度成層モデル

不 動 建 設 備 正 員 西田克司
長岡技術科学大学工学部 正 員 中村由行
長岡技術科学大学工学部 正 員 早川典生

1. 研究の目的 湖沼など、閉鎖性の強い水域における水質を予測するためには、鉛直方向の輸送過程を表現できるモデルが必要である。成層期においては、温度躍層が物質の輸送を支配するため、まず、温度成層の形成過程を再現する必要がある。季節的な温度成層をモデル化する試みが従来よりなされているが、大別して、混合層内を積分した形でエネルギー収支を議論する混合層型のアプローチと、乱流拡散型のアプローチとがある。後者のタイプは、鉛直方向の細かい水質の変化を記述するためには有利であるが、乱流拡散係数をどう推定するかという問題がある。本研究では、拡散係数を精度良く推定しうる、乱流拡散型の鉛直一次元温度成層モデルを構築する事を目的とする。

2. 熱輸送方程式と鉛直拡散係数の推定 鉛直一次元熱輸送方程式は、以下のように表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{A(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left(A(z) K_z(z, t) \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho C_p A(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left(A(z) q(z) \right) \quad (1)$$

ここで、 $A(z)$, T , t , K_z , ρ , C_p , q は、それぞれ、断面積、水温、時刻、鉛直拡散係数、密度、比熱、短波放射による熱フラックスである。 q については、Dake and Harleman (1969) に基づいて、 $q(z) = (1-\beta)Q_0 \exp(-\eta z)$ とおく。但し、 η は消散係数、 β は短波放射の内水表面近傍で吸収される割合、 Q_0 は正味の短波放射量である。

乱流拡散型のモデルにおいては、式 (1) における K_z の推定が重要である。この点に関して、著者らは以下のような推定式を提案している (中村ら、第36回海講)。

$$K_z = \kappa u_{*s} z \exp(-k_* z) f(Ri) \quad (2)$$

$$Ri = \frac{-1 + \{ 1 + 40 N^2 \kappa^2 z^2 / u_{*s}^2 \exp(-2k_* z) \}^{1/2}}{20} \quad (3)$$

ここで、 κ はカルマン定数、 Ri はリチャードソン数、 u_{*s} は水表面摩擦速度、 N はブルントバイセラ振動数である。また、 k_* は摩擦速度の減衰係数であり、図1に示すように、海洋混合層でのKondo ら(1979)研究成果を基に、 $k_* = 4.7 f / u_{*s}$ ($= 0.51 \sin \phi / U$) と表すことができる。但し、 f はコリオリ係数、 ϕ は緯度、 U は風速である。式 (2) において、安定度依存性を表す $f(Ri)$ については様々な経験式が提案されてきた。大阪湾において実測塩分分布からNishimura and Nakamura (1987) が推定した K_z の分布と、それらの提案式を式 (2) に用いて計算した結果を比較したところ、Munk-Anderson 式が K_z の分布を最も良く再現できることがわかった (図2)。

3. モデルの検証 本研究においては、中禅寺湖を対象として、モデルを検証する。水表面における熱交換量については、簡単のために全熱交換量 Q_1 を正味の短波放射量 Q_0 とそれ以外の熱フラックス Q_1 との和で表し、 Q_1 は1年間で積分すると熱交換量が0になるように正弦関数で与えた。図3にその概略を示す。底面における境界条件は、熱フラックスが無いものとした。簡単のために、風速及び消散係数は一定

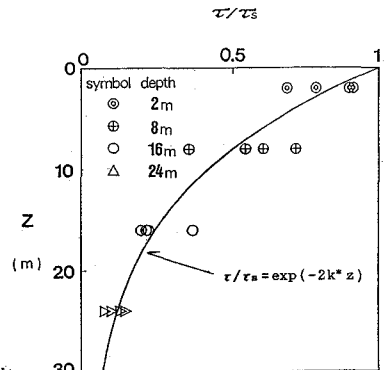


図1. せん断応力の鉛直分布 (記号はkondoら(1979)の結果)
 $K_z (\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1})$

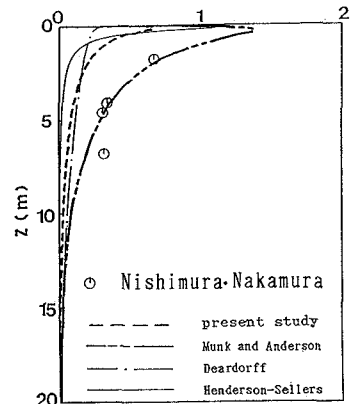


図2. K_z の鉛直分布計算結果と推定値との比較

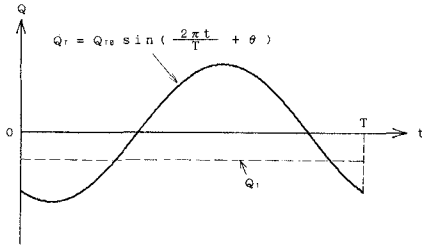


図3．表面熱フラックスの経年変化

値を与えた。また、計算の結果、密度が鉛直方向に不安定になった場合には、瞬間的に混合するものと考えた。初期条件は水温が一樣になる1月の実測水温を与えた(平田ら, 1984)。実測及び計算による温度分布を図4、5に示す。計算結果は、水温躍層の deepning、冬季における逆列成層など、季節変化を良く再現していると考えられる。

4．躍層形成に及ぼす透明度及び風速の影響

温度躍層の形成は、表面熱収支、混合のエネルギー源としての風速、湖沼内部の条件として、透明度などの影響を受ける。ここでは、風速及び透明度（光の消散係数）が、温度成層の形成に与える影響を調べるため、一種の感度解析を行った。図6及び7はその結果であり、夏期における最小の混合層厚、及び、最高水温が k_*^{-1} (U に比例する) 及び η^{-1} の関数として表されている。縦軸及び横軸の k_*^{-1} 及び η^{-1} はそれぞれ、風のもつ運動量及び日射量の代表的到達水深を示す。例えば最高水温についてみると、風速の低い場合には透明度の影響が強いが、ある程度以上の風速に対しては透明度の大小は敏感ではなくなる結果を与えている。

5．結論 鉛直一次元温度成層モデルを構築した。モデル中の鉛直拡散係数は、安定度に依存した関数として与えられ、大阪湾のKzの分布を良く説明する。本モデルを中禅寺湖に適用したところ、実測の季節的水温分布を良く再現でき、モデルの妥当性が示された。

参考文献

- Dake and Harleman: Water Resour. Res., vol. 5, 1969
 中村ら: 海岸工学論文集, vol. 36, 1989
 Kondo et al.: J. Physical Oceanogr., vol. 9, 1979
 Nishimura & Nakamura: Con. Shelf Res., vol. 7, 1987
 村上ら: 沿岸海洋研究ノート, vol. 15, 1978
 平田・村岡: 国立公害研究所研究報告, No. 62, 1984

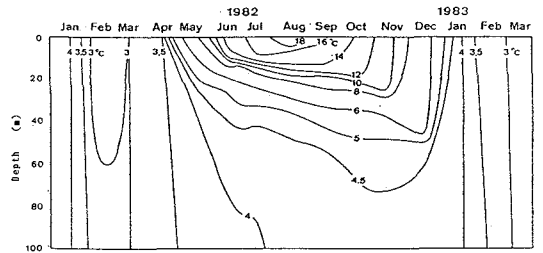


図4．中禅寺湖における水温観測値(平田・村岡, 1984)

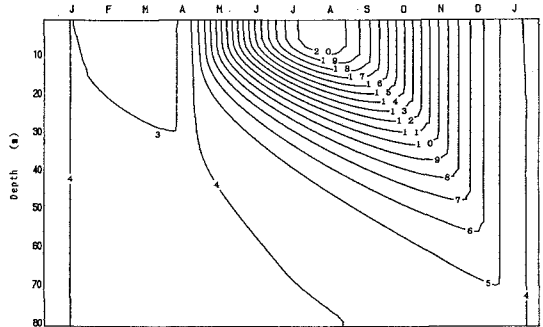


図5．数値計算結果

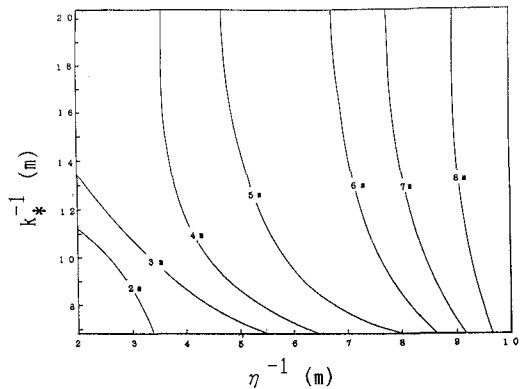


図6．夏期における最小混合層水深に与える k_*^{-1} 及び η^{-1} の影響

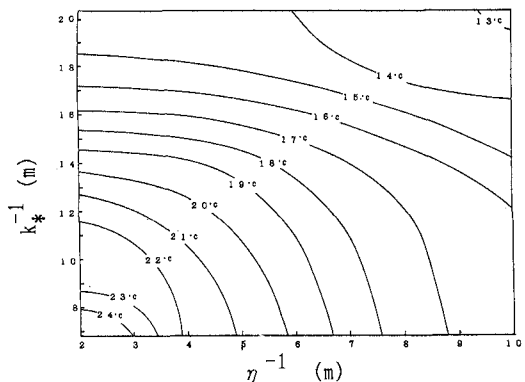


図7．表層最高水温に与える k_*^{-1} 及び η^{-1} の影響