

風浪の淡水湖塩分鉛直混入速度に与える影響

南

勲*

淡水湖計画では、図-1の淡水層部分が有効貯水量となり、この淡水層に対する塩分収支を解析する必要がある。その塩分濃度を解析するために、風浪によって発生する下層塩分の上層淡水層への鉛直混入速度 VK m/sec が必要である。本文では、この VK を風速データから数値的に推定することを試みた。

解析方法は、筆者がかつて実験¹⁾を行ない、拡散の微分方程式を求めていたが、今回その微分方程式を中心にして電子計算機を用いて種々の条件のもとに数値解を求め、さらに安定成層状に塩分濃度が分布しているところの鉛直拡散について、その考察を行なったものである。

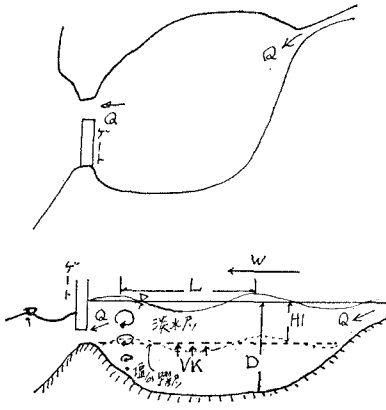


図-1 標準型淡水湖モデル

1. 淡水湖に発生する波

標準型淡水湖では、その水深が深く、Fetch も相当長いものがあり、下層が密度 1.03 程度の塩水で、中間に塩分躍層が存在し、その上が淡水層であるという一般的な特徴をもっている。実験結果によれば、浅海波による水中水分子の動きは、底層塩分濃度 0.03 程度の塩水層は、均一密度の水の波による水分子の運動と特別に異なった運動は見られなかった。すなわち、淡水層も塩分層も、均一密度の場合の水面波によって誘起される運動にしたがうものとして近似的な取扱いが許される。しかし、正確には両層の間に多少の時間的ずれが存在するようであるが、本論文の目的に対しては、近似的取扱いで

よいものと考えた。波高、波長、周期の推定に対しては、SMB 法を用いた。

2. 波の水面下の運動と渦

浅海波の存在している状態において、各水深ごとに熱線流速計を入れ、瞬間流速を測定して見ると明らかに水面波と同じ周期をもつ正弦の変動と同時に、それより短い波長の流速乱れ成分が観測される。この乱れは、完全なせん断乱流としての乱れではないが、しかし渦による塩分輸送の存在を意味することには間違いないであろう。この乱れは、水面の近くで著しく水深の深い部分で小さくなっている。

この渦の代表直径とその分布について、信頼性のある決め方が現在まで提案されていないので、代表寸法を考え、これは水分子軌道の平均的な直径に関係すると見なした。

$$DI = \frac{A}{4 \sinh \frac{2\pi D}{L}} \times \left\{ \cosh \frac{2\pi(Z+D)}{L} + \sinh \frac{2\pi(Z+D)}{L} \right\} \dots (1)$$

ここに、 A : 波高、 DI : 躍層位置における水分子軌道の平均直径、 L : 波長、 D : 水深、 HI : 躍層の水面からの水深。

渦は、下層塩分の濃度を保持したまま、淡水層中に鉛直分散するものとすれば、それ自身の相対的な水中重量のために、鉛直拡散が抑制されるという特性が考えられ、寸法の大なる渦は、寸法の小なる渦より著しく抑制されることがわかる。渦の分布型については、正確な観測値がなく、しかもこれは波高、周期、波長によって変化すると考えられるから、今後実験的継続が必要であるが、解析においては適当な形を仮定して行なうことになる。

3. 下層塩分の鉛直分散の機構

下層塩水、上層淡水の2層状態のところ、波が発生し、下層の塩水が上層に拡散されていく機構は、下層からその塩分を保持したままの渦が上層中に分散し、この上層に移動した塩水塊は、時間とともに周辺の水中に分子拡散し、その塩水塊が実質上消滅してしまうモデルを考える。このように、下層塩水を保持した状態の渦は、境界層からとび出した後の短時間の間のみ一種の粒子と

* 正会員 京都大学教授 農学部農業工学科

しての性質をもつものとする。塩水塊の静水中の相対的沈降速度は、次の Stokes の公式で与えるものとする。

$$V = \frac{1}{18} \frac{(D_2 - D_1) \cdot g \cdot D I^2}{\nu} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 V ：渦の相対的沈降速度、 D_2 ：塩水密度、 D_1 ：淡水密度、 g ：重力加速度、 ν ：水の分子動粘性係数。

4. 塩鉛直拡散の微分方程式

〔A法〕

安定な重力勾配のあるところで、下層塩水が渦状で上方に分散するとした場合の拡散方程式は、次式で表わしうるものと考えた。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(BM \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \right) + V \frac{\partial c}{\partial z} \dots\dots\dots (3)$$

初期条件 $t=0, c=0$
境界条件 $\left\{ \begin{array}{l} z=0 \quad \partial c / \partial z = 0 \\ z=D \quad \partial c / \partial z = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4)$

ここに、 c ： z, t における塩分濃度、 t ：時間、 z ：躍層面からの距離、 BM ：塩分拡散係数、 V ：塩水塊の相対的沈降速度。

なお、本微分方程式は、代表的な渦に対してのものであり、渦が分布をもつ場合には、それぞれの渦の寸法に対する拡散の合計によって、平均的な塩分濃度が決定されることになる。

〔B法〕

筆者¹⁾は、鉛直塩分拡散の実験を実験水路で行ない、初期条件として種々の鉛直塩分濃度、種々の波長、波高、周期を与えて、求めた塩分拡散の結果を、次元解析を用いて整理し、次の微分方程式を求めた。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \beta_s \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta_s = 6.0 \cdot \left(1 + \frac{z}{D} \right)^{-2.2} \cdot \left(\frac{A}{L} \right)^{2.6} \cdot BM \dots\dots\dots (6)$$

$$BM = 0.636 \times k^2 \times \frac{L \cdot A}{2 T} \times \frac{\sinh \frac{2 \pi}{L} (Z+D)}{\sinh \frac{2 \pi D}{L}} \tanh \frac{2 \pi}{L} (Z+D) \dots\dots\dots (7)$$

初期条件 $t=0, c=0$
境界条件 $\left\{ \begin{array}{l} z=0, \partial c / \partial Z = 0 \\ z=D, \partial c / \partial Z = 0 \end{array} \right.$

ここに、 β_s ：成層密度分布中の鉛直塩分拡散係数、 A ：波高、 L ：波長、 T ：周期。

しかし、本微分方程式は、塩分拡散係数中に密度分布の影響を含ませてあるため、実用的な意味では、近似値を与えることができるものとする。

5. 下層塩水の上層淡水中への混入速度

淡水化解析において、混入速度 VK を求めることは重要な意義がある。

拡散によって、一般に排水ゲートとほぼ等しい高さに発生する塩分躍層を基準面と考え、その基準面より上層の塩分濃度が増加すれば、見かけ上の塩分混入速度 VK を次式によって定義することができる。

$$VK = \frac{\int_0^{H_1} \Delta C \cdot dz}{C_2 \cdot \Delta T} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 H_1 ：塩分躍層上の水深、 ΔC ： z の水深において、 ΔT 時間内における塩分濃度の増加量、 ΔT ：解析時間、 C_2 ：下層塩分の初期濃度、 z ：躍層からの距離。

6. 解析的検討 (B法)

標準型淡水湖のように、その容量が大きいものに対し、風浪の下層塩分巻き上げに対する諸特性を数値的に検討して見よう。

(1) 条 件

- Fetch=10 000 m
- 水深=7 m
- 初期塩分躍層水深 $HI=4.9$ m (図-2)、2.1 m (図-3)
- 湖底塩分濃度 $C_2=0.03$ t/m³
- 初期淡水層塩分濃度 $C_1=0.0$ t/m³

a) 塩分濃度の鉛直分布

図-2、図-3 に示すように、2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 m/sec の風速がそれぞれ1時間継続した場合の淡水湖内塩分濃度の時間的变化は、特徴的な傾向を示している。すなわち、波による混合は、躍層付近の濃度

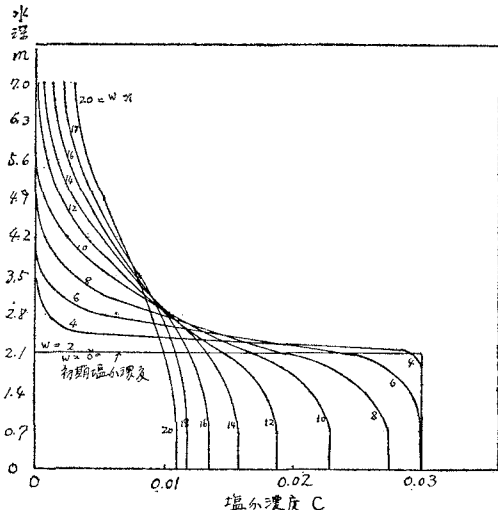
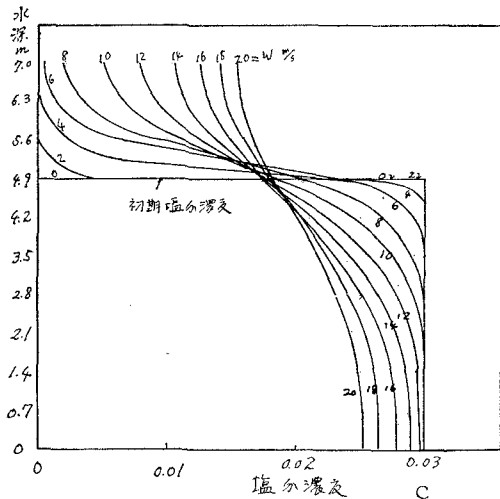


図-2 風速 (1 時間) と塩分濃度変化 (躍層水深 4.9 m)

表-1 VK (上段は 図-2, 下段は 図-3 に対応)

風 速 m/sec	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
混入速度 VK m/sec	2.6×10^{-8} 6.5×10^{-7}	5.5×10^{-6} 6.6×10^{-6}	4.4×10^{-5} 2.4×10^{-5}	1.3×10^{-4} 6.3×10^{-5}	2.6×10^{-4} 1.3×10^{-4}	4.4×10^{-4} 2.1×10^{-4}	6.8×10^{-4} 3.1×10^{-4}	8.9×10^{-4} 4.3×10^{-4}	1.1×10^{-3} 5.5×10^{-4}	1.4×10^{-3} 7×10^{-4}

図-3 風速 (1時間) と塩分濃度変化
(躍層水深 2.1 m)

変化が大きくて、水面まで塩分の拡散が行なわれるためには、長時間継続して波が存在する必要がある。

- ① 瞬間風速が大であっても、吹送時間の短い場合は表層塩分濃度の変化は少ない。
- ② 塩分躍層の深さをできるだけ深くすることは、風による塩分濃度の変化を防止するうえで最も重要である。
- ③ 淡水湖の Fetch が大なる場合には、波による塩分鉛直拡散は、無視し得ない。

図-2 は初期塩分躍層が水面下 4.9 m の場合、図-3 は同躍層水深が 2.1 m の場合である。

b) 下層塩分の鉛直混入速度 VK

式 (8) で示される鉛直混入速度は、塩分拡散が非定常的であるので、初期条件、境界条件および時間によっても変化するはずである。しかし、一応本計算例で求められた混入速度 VK は表-1 のようである。

参 考 文 献

- 1) Isao Minami : On the Vertical Diffusion of Salinity due to Wave Action, Coastal Engineering in Japan Vol. 10, 1967.

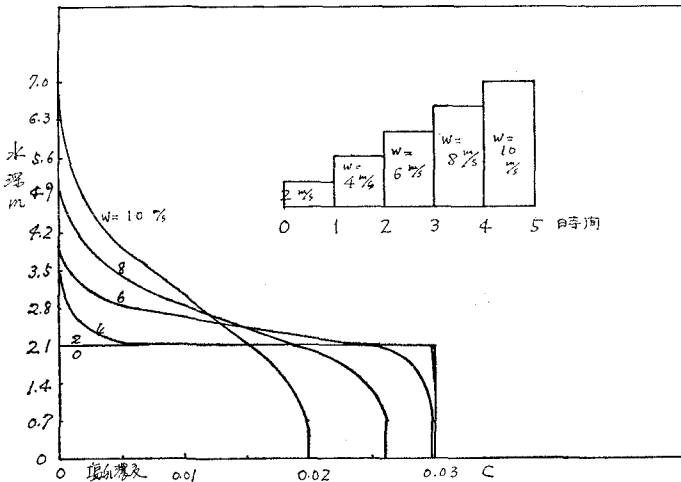


図-4 波と鉛直塩分濃度