諏訪湖の湖流について

信州大学大学院　渡辺秀明
工学部　正員　富所五郎
工学部　高田泰彦

1．はじめに　富栄養化などにより汚染された湖沼の浄化対策を検討するためには、その湖沼の持つ流動特性を知る必要がある。そこで本研究は、連続成層状態にある諏訪湖に三次元Galerkin有限要素法を用い、鉛直渦動粘性係数が密度変化に大きな影響を受けることを考慮し、風による湖水の流動（風成流）の解析を行い、鉛直渦動粘性係数が流れに及ぼす影響について調べる。

2．方程式　本解析に用いる方程式は以下のものである。[1),2)]

$$\frac{\partial u}{\partial t}+L\cdot u=-\frac{1}{\rho_o}\frac{\partial P}{\partial x}+D\cdot u+f\cdot v \qquad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+L\cdot v=-\frac{1}{\rho_o}\frac{\partial P}{\partial y}+D\cdot v-f\cdot u \qquad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+L\cdot w=-\frac{1}{\rho_o}\frac{\partial P}{\partial z}+D\cdot w-\frac{\rho}{\rho_o}g \qquad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+L\cdot T=D'\cdot T \qquad (5)$$

$$\rho=\rho_o-\rho_o\beta(T-T_o) \qquad (6)$$

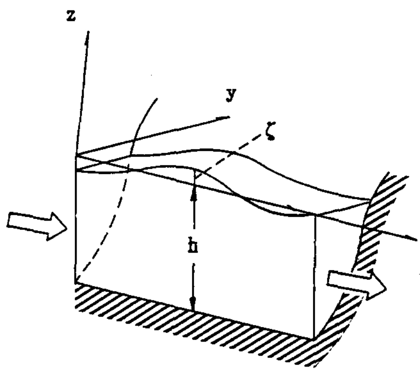


図-1 座標の定義

ただし、$L=u\frac{\partial}{\partial x}+v\frac{\partial}{\partial y}+w\frac{\partial}{\partial z}$，$D=\frac{\partial}{\partial x}(A_h\frac{\partial}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(A_h\frac{\partial}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(A_v\frac{\partial}{\partial z})$，$D'=\frac{\partial}{\partial x}(D_h\frac{\partial}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(D_h\frac{\partial}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(D_v\frac{\partial}{\partial z})$

ここに、u,v,w :x,y,z 軸方向（図-1参照）の風速成分、A_h,A_v :水平，鉛直の渦動粘性係数、D_h,D_v :水平，鉛直渦動拡散係数、t :時間、ρ :水の密度、ρ_o :平均水温 T_o における密度、P :圧力、f :コリオリ係数、g :重力加速度、T :水温、β :水の体積膨張係数である。

3．方程式の離散化　空間変数に対して離散化を行うために，次のような近似関数を考える。

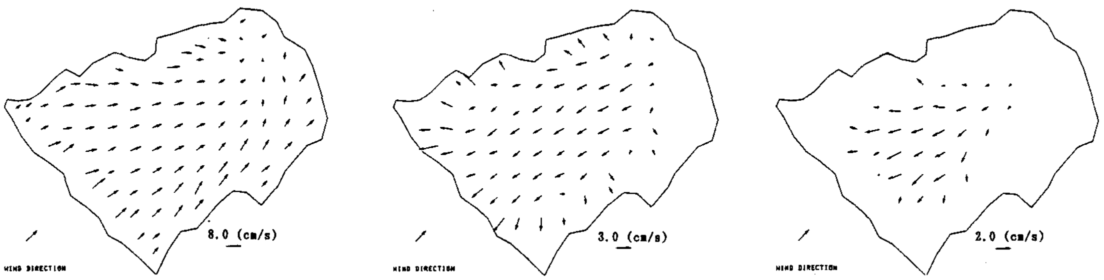
$$\left.\begin{array}{l} u=N_i\cos(A_p z)u_{pi}\ ,\ v=N_i\cos(A_p z)v_{pi} \\ \rho=N_i\cos(B_{p'}\cdot z)\rho_{pi}\ ,\ \zeta_i=N_i\zeta_i \end{array}\right\} \quad \begin{array}{l} A_p=\frac{2p-1}{2h}\pi\ ,\ B_p=\frac{p'-1}{h}\pi \\ (i=i,j,k)\ (p=1,2,\cdots,m)\ (p'=1,2,\cdots,m') \end{array} \qquad (7)$$

ここで，$N_i=N_i(x,y)$ は三角形一次要素の形状関数、m，m' はそれぞれ流速と密度の展開項数である。その他の空間変数も同様の近似を行う。時間変数については、two-step Lax-Wendroff 法により定式化する。

4．数値解析結果　本解析の対象である諏訪湖の夏の水温観測によると、湖心で最高の水温変化が生じ水面で29℃、水底で19℃その間はほぼ線形に変化していた。この水温分布で静止状態にある諏訪湖に突然 3 m/s の風が連吹する場合を想定する。また、湖への流出入を無視し全湖岸で流速を零とし、節点数 141，要素数 231，時間刻み 40s，$m=m'=4$ とする。A_h については、要素内で一定値(0.0323 cm^2/s)とし、A_v については、鉛直方向に一定の場合は2.296 cm^2/s、変化を考慮する場合は $A_v=22.55(z/h)(1-z/h)/(1+10R_i)^{0.5}$ [3)] とした。

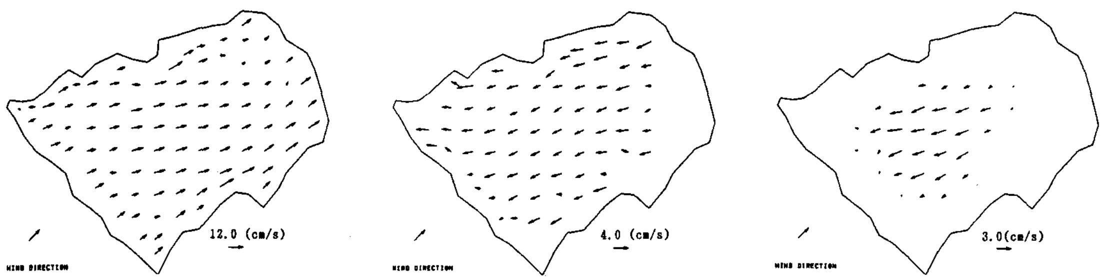
図-2，図-3は、15000s 経過後の各水深における流速であるが、これより流向の全般的な傾向は、A_v の与え方に依よらずほぼ一致しているが、流速には大きな違いが現れている。図-4よりも分かるように水面付近をはじめとし各水深で A_v を一定とした場合と変化を考慮した場合とで顕著な違いがみられる。また、図-5

の(a)，(b)を比較してみると A_v を一定とした場合は上下の混合により密度が水面から水底まで一定に近ずくのに対し、A_v の鉛直変化を考慮すると密度の一様化は、水面付近の混合により行われており、水底でわずかな一様化が進むものの水面付近以外の水深においては、密度の一様化はあまり進んでいない。



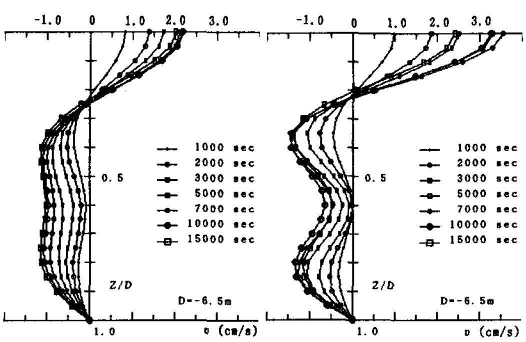
(a)表面流速　(b)水面下2.6mの流速　(c)水面下5.2mの流速

図－2　A_v=Const の各水深における水平流速



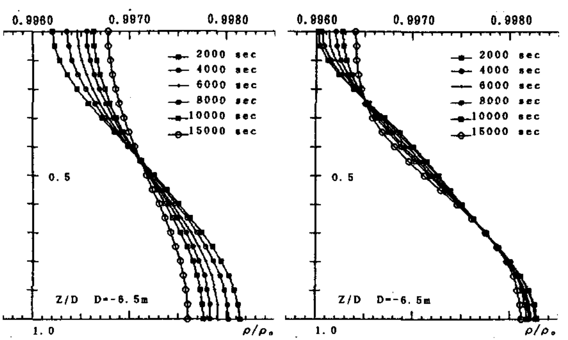
(a)表面流速　(b)水面下2.6mの流速　(c)水面下5.2mの流速

図－3　A_v≠Const の各水深における水平流速



(a)A_v=Const　(b)A_v≠Const

図－4　湖心の鉛直流速分布



(a)A_v=Const　(b)A_v≠Const

図－5　湖心の鉛直密度分布

5．おわりに　鉛直渦動粘性係数 A_v は、湖の風成流に対して影響を与えており、A_v を一定とした場合との比較より、密度の関数として鉛直方向の変化を考慮した A_v を与える必要があるといえる。今後は、A_v 以外の影響も考慮しながら、湖の流出入、湖面上の風の分布の非一様性などを取り入れた解析を検討したい。

【参考文献】

1）富所五郎：閉鎖水域における風成流の水理に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1984

2）岩佐義朗：湖沼工学，山海堂，pp. 115～129，1990

3）大久保賢治，村本嘉雄：浅水湖の吹送流と渦動粘性係数，第32回水理講演会論文集，pp. 335～340，1988