

数値シミュレーションを用いた湖沼の吹送流に関する基礎的研究

京都大学工学部 正 員 若佐義朗
熊 谷 組 正 員 福本育央

京都大学工学部 正 員 多田彰秀
京都大学大学院の学生員 木村一郎

1.はじめに; 本報は, 閉鎖性水域の吹送流による流動特性を数値解析によって解明する際に一般に用いられる解析モデル(基礎式)について, 基礎的な考察を行っている。すなわち, モデル湖の数値解析を通して, 数値解析上よく問題とされる基礎式の移流項, コリオリ力項及び鉛直渦動粘性係数が流れに与える影響について, 吹送流によって起こる現象の一つである水平循環流との関係から明らかにし, それぞれの項について評価するものである。

2.基礎式及び差分化; 本報で用いた基礎式について示す。

$$\text{運動方程式: } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + f v \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - f u \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (3), \quad \text{連続式: } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

尚, 記号は慣用に従っている。上式と導くにあたり, ①静水压近似, ②水の密度は一定, ③ A_h, A_v 及び f は定数, という仮定を用いている。また, 境界条件は以下の通りである。

$$\text{底面以外の固定境界; } u = v = w = 0 \quad (5)$$

$$\text{水面}(z=\zeta); w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad \frac{\tau_x}{\rho} = A_h \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \frac{\tau_y}{\rho} = A_h \frac{\partial v}{\partial z} \quad (6)$$

$$\text{底面}(z=-H); w = u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y}, \quad \frac{\tau_x}{\rho} = A_h \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \frac{\tau_y}{\rho} = A_h \frac{\partial v}{\partial z} \quad (7)$$

上式の差分化にあたって, 若佐ら⁽¹⁾に示すようなレベルモデルを対象とし, leap-frog法を用いて行った。また, 移流項の計算には上流差分を採用した。水面変動量 ζ , 圧力 p , 流速成分 u, v 及び w の定義位置は図-1に示す通りである。詳細な差分式の表記については割愛する。

3.計算条件; 解析結果と評価するために, ここでは十分に時間が経過した後の一定の時間内において平均化された状態を定常状態とみなし, 時間平均された流速ベクトル図について比較検討を行うことにする。定常と判断される一定時間の設定については, 前報⁽²⁾の諏訪湖の定常流解析結果を用いて行った。図-2は, 上述の差分式を用いて, 前報と同じ南西の風 3.0 m/sec の条件下で計算した諏訪湖湖心における表層の流速及び水面変動の時間変化図である。両者ともに, 一定値に収束しており, 計算開始後48時間から72時間の間では, 流れはほぼ定常状態になっているものと判断される。

さらに, 10分ごとにサンプリングし平均化して求められた流速ベクトル図についても, 前

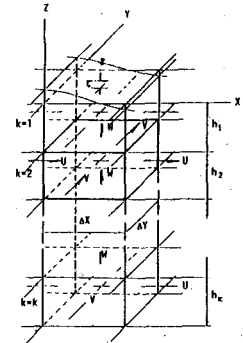


図-1

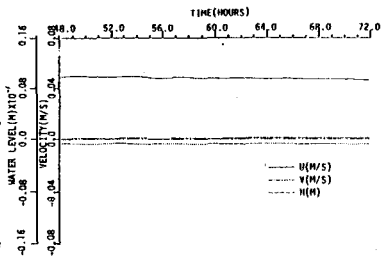
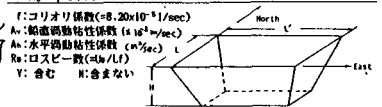


図-2

表-1

Case	1	2	3	4	5	6
TYPE	1	2	2	3	2	2
L (km)	24	24	24	24	24	24
L' (km)	40	40	40	40	40	40
H (m)	12	12	24	24	12	12
f	Y	Y	N	N	Y	Y
移流項	Y	N	N	Y	N	N
風速	10.0	10.0	3.0	3.0	3.0	3.0
A_h	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	5.0
A_v	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
R_b	0.10	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05



報の結果と定性的に良い一致を示しており、ここでの方法が妥当なものであると判断される。以下のモデル湖での数値解析結果に対しても、同じ時間平均法を用いることにする。

解析モデルについては、次の3つのTYPEを設けて解析する。

TYPE1:基礎式のすべての項を考慮したモデル。TYPE2:基礎式から移流項と水平渦動粘性項を省略したモデル。TYPE3:基礎式からコリオリ力項のみを省略したモデル。詳細な計算条件及びモデル湖の形状については、表-1に示した。なお、Case 1, 2 で移流項を、Case 3, 4 でコリオリ力項を、Case 5, 6 で鉛直渦動粘性係数についてそれぞれ評価を行っている。

4. 計算結果: ①移流項: 解析結果は示さないが、Case 1 及び Case 2 の条件下で、風速を 3.0 m/sec として行った数値解析結果(以後、解析結果と呼ぶ)は両者とも良い一致を示している。一方、図-3に示すように風速の大きい場合、湖心近傍の流向及び流速ともかなりの違いがみられる。一般にロスビー数($Ro = U/\beta L$)が1より小さい場合、移流項の流れに与える影響は小さく無視されると言われている。しかしながら、図-3のように $Ro < 1$ の場合でも、風速が大きい時には、移流項の有無による流れの相違が存存することが明らかになった。②コリオリ力項: 図-4からわかるように、コリオリ力項を含んだ Case 3 においては、風上及び風下において2つの明確な水平循環流が現れているのに対して、Case 4 ではそれが見られない。また、ここでは示さないが、 β を変化させて計算した結果より、 β が水深変化域に比べて大きくない場合には、水平循環流の湖流全体に与える影響が大きいこともわかっている。したがって、コリオリ力項は水平循環流の形成に関与しているものと言える。③鉛直渦動粘性係数: 富所³⁾の経験式を参考として $A_v = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ と Case 1 ~ Case 5 では用いて解析してきたが、Case 6 では $A_v = 5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ として計算した。図-5からわかるように、Case 5 に比較して Case 6 では風下側の水平循環流の規模が大きくなっており、それに伴って湖心近傍の流れにもかなりの違いがみられる。特に、この傾向は A_v が $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ から $5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ の間で変化させた場合著である。さらに、 A_v を大きくするに伴って湖心の流れが時計方向にずれていくことも明らかになった。したがって、 A_v の値の設定については、慎重に行う必要がある。(参考文献) 1) 岩佐, 井上, 劉, 阿部; 京都大学防災年報, 第26号, 1983, pp. 531-542. 2) 岩佐, 多田, 福本; 昭和62年土木学会関西支部年次学術講演会論文集, 1986, II-27. 3) 富所; 京都大学学位論文, 1984, pp. 104-107.

II-2-2

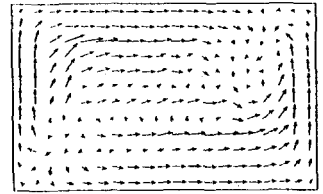


図-3 (a) Case-1

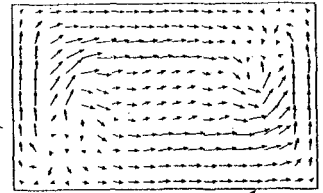


図-3 (b) Case 2

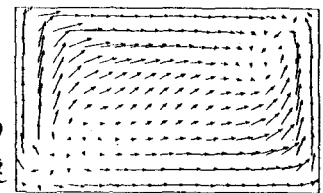


図-4 (a) Case 3

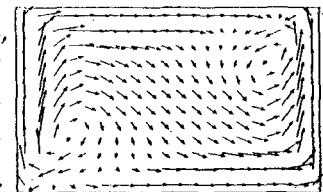


図-4 (b) Case 4

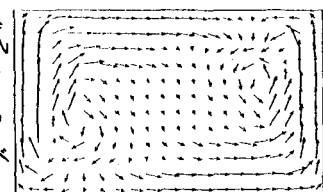


図-5 (a) Case 5

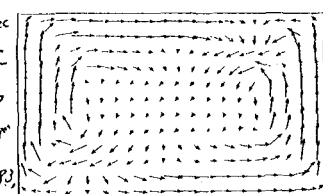


図-6 (b) Case 6