

京都大学大学院 学生員 宮川 勇二
 京都大学工学部 正 員 岩佐 義朗
 京都大学工学部 正 員 井上 和也

1.はじめに: 本報は、鉛直方向に24層に分割した準三次元モデルを琵琶湖に適用し、湖流の水理特性を解析したものである。従来では基礎方程式の差分式をimplicit法によって解析してきたが、本報ではさらにexplicit法による差分解析法も開発し、両者の比較検討をもあわせて行なった。数値計算については、成層場における吹送流の特徴をみるため、初期条件として水面を基準水位で静止させ、水温分布としては各層ごとに一定の値を与えた成層状態を設定し、これに全湖一様に5m/secの南西風を12時間吹かせた場合の水位および躍層面の挙動の解析を行なった。

2.基礎方程式: x, y, z 軸はそれぞれ東北、鉛直上向きを正にとる。基礎方程式は右の(1)~(5)式で記号は慣用に従っている。境界条件は、湖面($z=5$)では、 $w_5 = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u_5 \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v_5 \frac{\partial \zeta}{\partial y}$, $R_A u_5 (\frac{\partial \zeta}{\partial x}, \frac{\partial \zeta}{\partial y}) = (\tau_x, \tau_y)$ で τ_x, τ_y は風の応力の x, y 方向成分である。湖底($z=z_b$)では、 $w_b = u_b \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v_b \frac{\partial \zeta}{\partial y}$, $R_B u_b (\frac{\partial \zeta}{\partial x}, \frac{\partial \zeta}{\partial y}) = (\tau_x^b, \tau_y^b)$ で τ_x^b, τ_y^b は湖底のせん断応力の x, y 方向成分である。

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

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

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

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

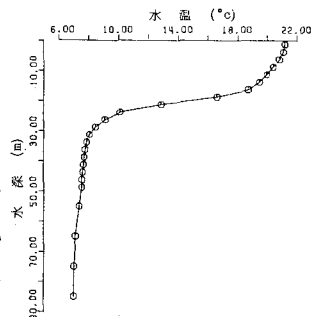
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

3.計算手順: 時間軸方向の差分については、 $t = n\Delta t$ と $t = (n+1)\Delta t$ の水理量を既知として、 $t = (n+2)\Delta t$ の水理量を求める leap-frog 法を用いた(以下、記号の右肩に付した赤字により、 n 時間を表す)。<Implicit法> (3)式より静水圧分布式として $p = \rho g \zeta - \int_0^z \rho g dz$ (6) が得られる。(6)式中の ζ を第二項は ζ^{n+1} で、第一項は $\zeta = (1-\theta)\zeta^n + \theta\zeta^{n+1}$ (7) (θ :加重平均のパラメータ)のように評価すると、運動方程式(1),(2)中の未知量 u^{n+1}, v^{n+1} はそれぞれ未知量 ζ^{n+1} で表わされる。ここで連続式を column (水平面の分割で得られた水深と高さとする水柱)を control volume として積分し、湖面での境界条件を用いると、 $\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{g}{\rho} \left(\int_0^5 u dz - \int_0^5 v dz \right)$ (8) が導かれる。この(8)式中の u, v に(7)式同様の加重平均を用い、その u^{n+1}, v^{n+1} に運動方程式(1),(2)中の u^{n+1}, v^{n+1} を代入すれば(8)式は未知量 ζ^{n+1} のみに関する方程式となり、 ζ^{n+1} に関する連立一次方程式が得られる。この方程式を S.O.R.法を用いて ζ^{n+1} について解き、その結果を(1),(2)式中に代入して u^{n+1}, v^{n+1} を求め、さらにそれらを(4),(5)式中に代入して w^{n+1}, ρ^{n+1} を求める。以上の計算を繰り返して行なう解析法が implicit 法である。<Explicit法> (6)式中の第一項を、 $\zeta = (1-\theta)\zeta^n + \theta\zeta^{n+1}$ と評価することにより、運動方程式(1),(2)は u^{n+1}, v^{n+1} について explicit に解くことができる。得られた u^{n+1}, v^{n+1} を(8)式に代入すれば ζ^{n+1} が計算される。計算の他の部分は implicit 法の場合と同じである。

4.計算条件: 琵琶湖全域を対象とし、水平格子間隔 1km、鉛直方向には最大24層に分割し、時間ステップ Δt は implicit 法で $\Delta t = 300 \text{ sec}$ 、explicit 法で $\Delta t = 10 \text{ sec}$ とした。条件を単純にするために、河川からの流入・流出や湖面での熱収支および湖中での熱生成といった他の水理および気象条件はすべてなしとした。また A_h, K_h については一定値を与え、 A_v, K_v については勾配型のリチャードソン数 $Ri = -(g \frac{\partial \zeta}{\partial z}) / \{ \rho_0 (\frac{\partial u}{\partial z})^2 \}$ の関数として右表の形で与えることにした。初期における成層状態は、図1の水温分布を各層ごとに与えた。

	$0 \leq Ri < 1$	$Ri \geq 1$
A_v	$A_{v0} \exp(-1.5 Ri)$	A_{v1}
K_v	$K_{v0} \exp(-3.0 Ri)$	K_{v1}

5.結果: 図2は琵琶湖南端の浪大津沖での implicit 法、explicit 法両者による風停止後の水位変動の比較図である。この図より explicit 法による水位変動の振幅が implicit 法の約1.5~2倍になっており、また explicit 法の方が implicit 法に比べ非常に減衰が遅いことがわかる。implicit 法では従来より水位変動が極めて小さくしか現れ



れていないという問題点が指摘されている³⁾。explicit法の開発によりこの点は少し改善されるようであるが、鳥居⁴⁾観測値等と比較するとそれでもまだ小さ過ぎるようである。しかし、本報に図は掲載していないが、北湖においてはimplicit法では見られない半分周期の水位変動が確認されることなどから、比較的時間の短い現象に対してはexplicit法が有効であるといえよう。

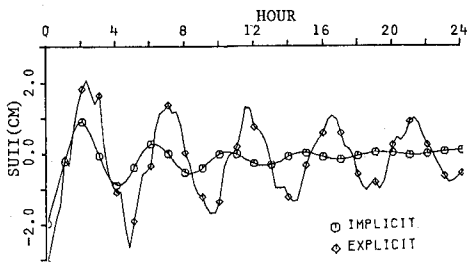
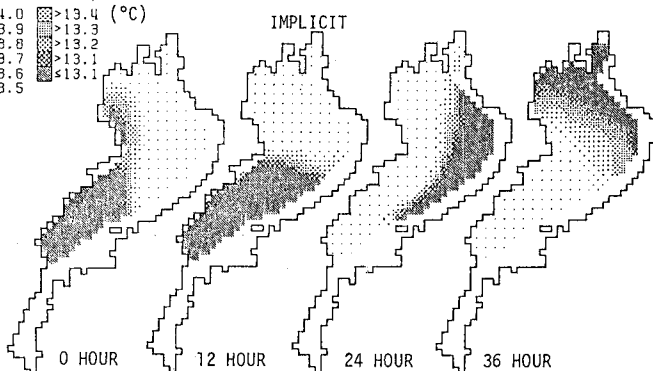


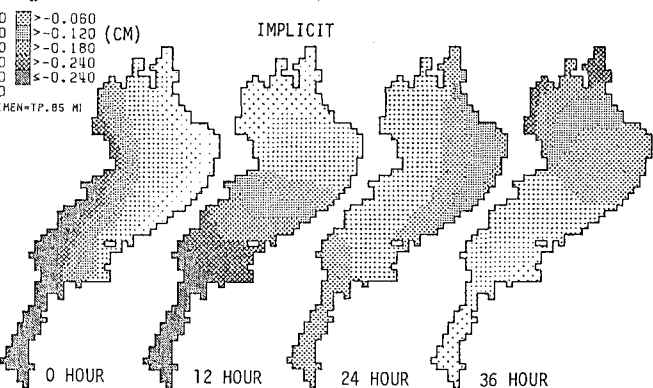
図3,4はimplicit法による風停止後0,12,24,36時間後の初期に与え

た水温躍層(水深21.5mとる)の位置での水温の平面的な分布および湖面の水位の平面的な分布を示したものである。図3にお

いて、低水温域はその時刻での躍層面が初期より上昇している部分を表わしている。この図から、風の吹送により風上側で上昇し風下側で低下した長軸方向の勾配をもった躍層面が、時間の経過とともに反時計回りに回転していることがわかる。なおこの躍層面の回転に



はimplicit法, explicit法とも結果がほぼ一致している。この躍層面の回転周期は、



北湖周辺における躍層面の水温変化の位相より約36時間と推定された。傾斜した躍層面の回転に伴ないこの付近で水温が5~6℃も変化することがあること、さらにはこの躍層面の変化は水位の変化に比べて極めて持続性が高いことも示された。Csanadyらは二層モデルを用いて回転性の内部波(内部ケルビン波)の周期を理論的に導いており、これを琵琶湖に適用すれば周期は約36時間が得られ、上述の計算から求められた周期とほぼ一致することがわかる。琵琶湖におけるこのような内部波の存在は、金成らの観測によって見出されており、内部ケルビン波によるものとされている。今回の計算でみられた躍層面の回転も、同様にケルビン波とみることができよう。また図4では、北湖において水位の低下域も時間とともに反時計回りに回転している。図3と比較すると各時間においてこの水位低下域は躍層の上昇域とほぼ一致している。したがって、北湖でみられるこのような水位の変化は躍層面の変動によって励起されたものと考えられよう。

6.今後の研究課題: explicit法の開発により、 α を小さくとらなければならぬという欠点はあるものの、implicit法では再現されない短周期の静振が確認されるなど、琵琶湖の基本的な水理特性を定性的に十分把握できるモデルになってきたと承えている。今後は、琵琶湖の水理の種々の特性や定現象を定量的にも再現し得るモデルへと改良していく必要がある。また、鉛直拡散係数が計算結果に与える影響が小さくないということもわかり、この値を含めて粘性係数・摩擦係数といったモデル中のパラメータの詳細な検討も必要と考える。

(参考文献)

- 1) 大西行雄: 数値解析(その手法), 環境科学としての海洋学2, 第15章, 堀部純男編, 東大出版会, 昭和53年
- 2) 岩佐, 井上, 劉, 阿部: 琵琶湖湖流の三次元的な解析, 京都大学防災研究所年報第28号
- 3) 阿部 徹: 琵琶湖の湖流と水温成層の三次元的数値解析法に関する基礎的研究, 京都大学大学院修士論文, 昭和59年
- 4) 金成誠一: 琵琶湖の長周期内部波, 水温の研究, 第17巻, 第5号