

3次元モデルによる琵琶湖の潮流解析

京都大学工学部 正員 岩佐義朗
京都大学大学院 学生員 宮川勇二

大井組 正員 松岡隆之
京都大学大学院 学生員 〇添 康裕

1.はじめに; 筆者らは、従来より鉛直方向に24層に分割した準3次元モデルを琵琶湖に適用し、潮流の数値解析を行ってきた。本報では、とくに成層が発達している場合での吹送流の特徴を知るため、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想定し、これに5%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implicit法およびexplicit法を用いて行った。

2.基礎方程式; x, y, z 軸はそれぞれ東, 北, 鉛直上向きを $\frac{\partial u}{\partial t} + Lu - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + Av \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + A_h \nabla^2 u$ (1)
正にとる。基礎式は右のとおりで記号は慣用に従っている。 $\frac{\partial v}{\partial t} + Lv + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + Av \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + A_h \nabla^2 v$ (2)

3.計算手順; 時間差分については、 $t=n\Delta t$ と $t=(n+1)\Delta t$ での水理量 $0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$ (3)
を既知として、 $t=(n+2)\Delta t$ の水理量を求めることにする。 $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$ (4)

(以下、記号の右肩に付した添字は時間を表わす。) $\frac{\partial (4p)}{\partial x} + L(4p) = Ku \frac{\partial^2 (4p)}{\partial z^2} + K_h \nabla^2 (4p)$ (5)

<Implicit法> (3)式より、静水圧分布式として $P = \rho g z - \int_z^0 \rho g dz$ (6)

が得られる。(6)式の右辺第一項を $z = (1-\theta)z^n + \theta z^{n+2}$ (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)中の未知量はそれぞれ、 u, z^n および v, z^{n+2} となる。ここで、連続

式をcolumn(水平面の分割で得られた水深を高さとする水柱)をcontrol volumeとして積分し、湖面での境

界条件を用いて、 $\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_z^0 u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_z^0 v dz \right)$ (8)を導く。この式中の u, v に(7)式同様の加重平均

を用いれば、(8)式中の未知量は z^{n+2} のみとなり、 z^{n+2} に関する連立一次方程式が得られる。こ

れを z^{n+2} について解き、その結果を(1),(2)式に代入して u^{n+2}, v^{n+2} を求め、それらを(4),(5)式に代入

し $w^{n+2}, 4p^{n+2}$ を求める。以上の計算を繰り返して行う解析がimplicit法である。<Explicit法>(6)式

中の z を $z = (1-\theta)z^n + \theta z^{n+1}$ と評価することにより、(1),(2)式中の未知量は各々 u, v のみとなりex-

PLICITに解くことができる。得られた u^{n+2}, v^{n+2} を(8)式に代入すれば z^{n+2} が計算される。計算の他

の部分implicit法の場合と同じである。

4.計算条件; 琵琶湖全域を水平面内で x, y 軸方向に1kmごとに、鉛直方向には最大24層に分割した。

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。条件を単純化するために、河川による

流入・流出や湖面での熱収支および湖中での熱生成といふ、 T に他の水理および気象条件はすべて $T=1$ とした。

$T=1$ 、 A_h, K_h については一定値を与え、 A_v, K_v についてはこう西型のリチャードソン数 $Ri = (-g \frac{dT}{dz}) / \left\{ \rho_0 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \right\}$ の関数とし

て右表の形で与えることにした。

5.結果; 図1に示したA, B, Cの3地点における水位の時間変化をimplicit法

およびexplicit法で解析した結果が図2および図3である。両図において、これら

3地点で4~5時間周期の水位変動が見られる。その位相はB, C地点で同位相でありA地点ではこれらの地点

と逆位相になっている。この静振は、従来より南湖で顕著に観見測られている。B地点付近に節をもつ、長軸

方向の単振動を表わしていると考えられる。Explicit法(図3)では、北湖において73分周期の水位変動

が顕著に表われている。本報には図を掲載していないが、この周期の水位変動は、北湖北部短軸由

および南部短軸上ではそれぞれ位相が同じであるが、北湖北部と南部とでは、位相が逆になっていた。また、図1に示した北湖長軸方向の8地点における水位の時間変動を表わした図4から、74地点と54地点の間で位相が反転しており、74地点での振幅は極めて小さいものであることがわかる。これより、節は図1に示した点線上付近に存在するものと考えられる。周期および推定した節の位置より、この静振は、従来より北湖の卓越周期である約70分周期の長軸方向の3節振動を示していると考えられる。他の2つの節は南湖に存在するといわれるが、南湖では4時間周期、静振がきわまっており、節の位置を確認することはできない。

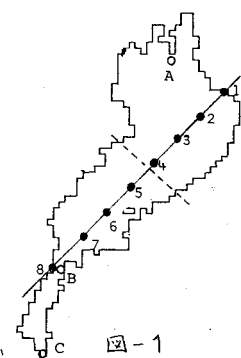


図5は、風停止後、0, 12, 24, 36時間後の初期に与えた水温躍層(水深21.5m)での水温の平面的な分布を示している。この図において低水温域は、躍層面が初期より上昇している部分を表わしている。これらの図より、風の吹送により、風上側で上昇し、風下側で低下し、長軸方向の勾配をもっている躍層面が、時間の経過とともに、その傾斜を保ちながら反時計回りに回転しているのがわかる。また、北湖周辺における躍層面での水温変化の位相より周期は56時間であることがわかった。この静振はCsanadyらが理論的に導いた回転性の内部波(内部ケルビン波)の周期とほぼ一致している。琵琶湖においてこのような内部波が存在することが、金成²⁾に見出されているが、今回の計算でそれが確認されたことになる。

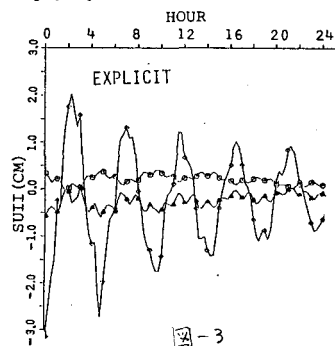
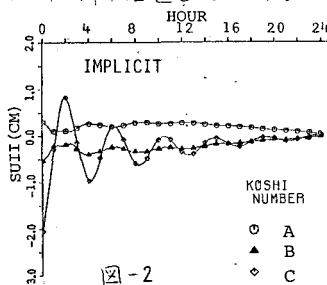


図-2

図-3

図-4

図-5

図-6

図-7

図-8

図-9

図-10

図-11

図-12

図-13

図-14

図-15

図-16

図-17

図-18

図-19

図-20

図-21

図-22

図-23

図-24

図-25

図-26

図-27

図-28

図-29

図-30

図-31

図-32

図-33

図-34

図-35

図-36

図-37

図-38

図-39

図-40

図-41

図-42

図-43

図-44

図-45

図-46

図-47

図-48

図-49

図-50

図-51

図-52

図-53

図-54

図-55

図-56

図-57

図-58

図-59

図-60

図-61

図-62

図-63

図-64

図-65

図-66

図-67

図-68

図-69

図-70

図-71

図-72

図-73

図-74

図-75

図-76

図-77

図-78

図-79

図-80

図-81

図-82

図-83

図-84

図-85

図-86

図-87

図-88

図-89

図-90

図-91

図-92

図-93

図-94

図-95

図-96

図-97

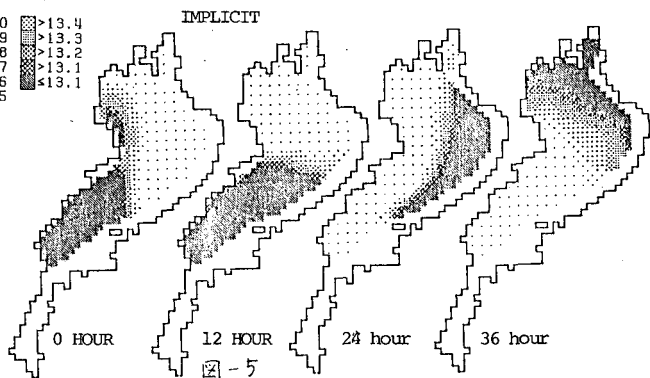
図-98

図-99

図-100

5. 今後の研究課題; Explicit法により、implicit法では再現

できない短周期の静振の再現が可能になったものの、explicit法ではΔtを小さくするため、implicit法と同時刻の解析を行うと、計算時間がかかりすぎるという欠点がある。今後、実現象に近い条件下で現象とある程度定量的に把握でき、計算時間の少なくて済むモデルへと改良する必要がある。



<参考文献> 1) 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26号

2) 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、PP 3162~3174.