湖山池における循環流特性

鳥取大学工学部　正員　道上　正規
〃　〃　鈴木　幸一
〃　〃　○檜谷　治

1．はじめに

近年，我が国では湖の富栄養化という水質汚濁が問題になってきており，年々その状態は悪化しつつある。本研究はこのような現状を踏まえ，湖底の細粒土砂(ヘドロ)の浮上やそれに伴う水質特性を明らかにする上で基本的な問題となる風による湖の流動特性を湖山池(図-1)をモデルにして数値解析するとともに，実測値との比較検討を行なったものである。

2．解析方法

本研究では，湖山池が平均水深約3.5mで非常に浅いということを考慮してLiggett[1]らが提案した「浅い湖」の解析モデルを用いたが，解析に用いた基礎式および境界条件は以下のとおりである。

運動方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \varepsilon\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \varepsilon\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2)$$

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

連続式：

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

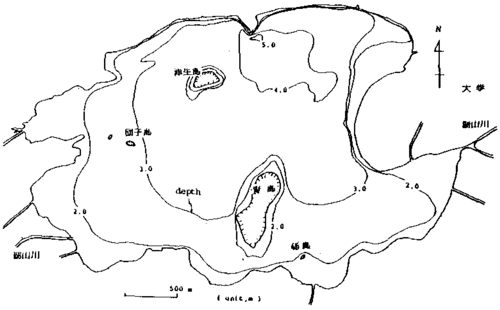


図-1　湖山池付近の概略図

ここに，tは時間，x, yおよびzは座標軸でxは東方向に正，yは北方向に正であって，zは鉛直上方に正で平均水面を$z=0$とおく。また，流速のx, yおよびz方向の成分をそれぞれu, vおよびwとする。pは圧力，ρは水の密度，gは重力加速度，fはコリオリ係数(0.0000845)，εは鉛直渦動粘性係数である。

境界条件：　湖底面　$z=-H$で　$u=v=w=0$，水面　$z=\zeta(=0)$で　$\varepsilon\frac{\partial u}{\partial z}=\tau_x$，$\varepsilon\frac{\partial v}{\partial z}=\tau_y$　(5)

ここに，Hは水深，ζは水位変化，τ_x, τ_yは風による水面のせん断応力を湖水の密度ρで割ったものである。

ここで，式(1)～(5)の無次元化を行なった後，簡単のために運動方程式時間項を省略すると，式(1),(2)および(5)からu, vをzに関して解くことができる。その後，連続式(4)を満足する流れ関数ψを導入し式を変形すると最終的に次式が得られる。

$$g_1\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial g_2}{\partial y} + \frac{\partial g_1}{\partial x}\right)\frac{\partial\psi}{\partial y} + \left(\frac{\partial g_1}{\partial y} - \frac{\partial g_2}{\partial x}\right)\frac{\partial\psi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}(g_4\Gamma - g_3\Delta) + \frac{\partial}{\partial x}(g_3\Gamma + g_4\Delta) = 0 \quad (6)$$

ここに，g_1, g_2, g_3およびg_4はx, y, Hの関数，ΓおよびΔはτ_x, τ_yの関数である。

数値計算法としては，図-1に示したように湖山池の地形が複雑であるということを考え有限要素法を用いており，その解析メッシュは図-2に示すように三角形要素を用いて分割した。また，境界条件としては全湖岸でスリップ条件を考え，$\psi=const$という条件とし，河川の流入流出は無視している。

また，風による水面のせん断応力τは湖全体で一様であるとし，その評価はBeacon and Webbの提案式を用いて行なった。鉛直渦動粘性係数εについては，鉛直方向に一定と仮定し，余越・富所の推定式[2]から評価した。

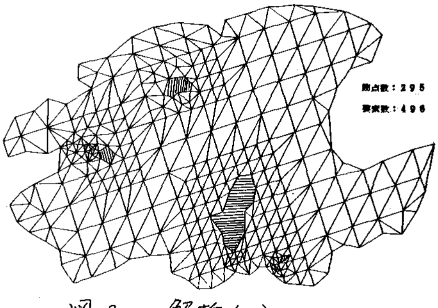
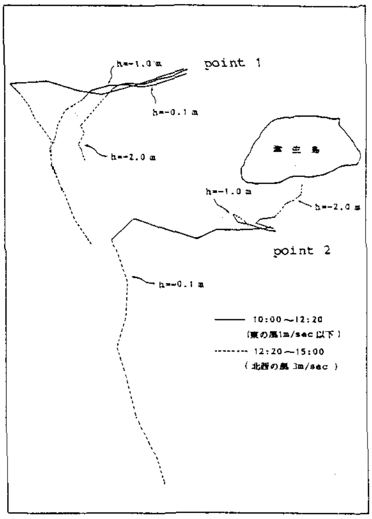


図-2　解析メッシュ

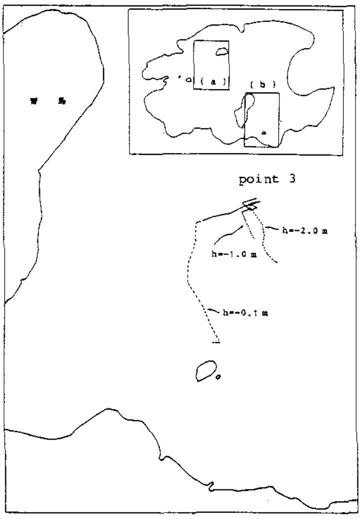
最終的には式(6)を有限要素法を用いて数値計算を行ないψを求め，その後その他の未知数u, v, wなどはψから逆に計算を行って求められる。

3．観測結果及び解析結果

本研究では，解析結果の検討を行なうために昭和58年1月27日に湖山池において湖流観測を実施した。その結果を示したものが図-3(a),(b)である。観測は水面付近の流速と水面下1mおよび2m付近の流速を測定したが，図からわかるように水面の流れはほぼ吹送方向と同方向で流速は北西3m/secの風が継続的に吹いた午後で約7cm/secであり，風速との比は約0.23程度である。一方，水面下1mおよび2m付近での流速は表面付近よりも遅くなっており，その流向も異っている。

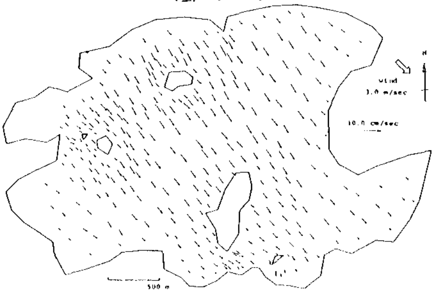


図－3 (a)

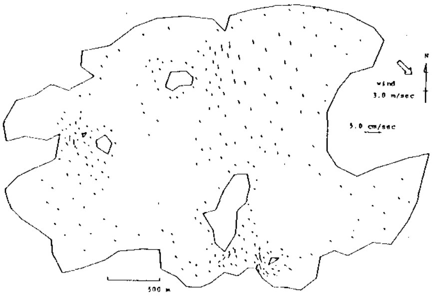


図－3 (b)

次に，午後の風の条件(北西3m/sec)に対しての解析結果を示したものが図-4(a),(b)および(c)である。水面での流速は約6cm/secで，流向はコリオリカにより吹送方向に対してわずかに時計回り方向にずれている。鉛直方向の流速分布はエクマンスパイラルの特性を呈し，水深の約34%で水面の流向と逆になっている。また，この結果と観測結果を比較したものが図-5であるが，観測結果については解析結果が定常解であることを考慮し風が継続的に吹きはじめた約1時間半後の値をとり，その値とその地点付近の解析結果と比較を行った。風の非定常性や風に対する地形の影響，あるいは午前中の風の影響などを考えると，表面流速は比較的実測値を表現しており，その他の水深の場合もオーダー的にはほぼ等しい値をとっていると思われる。



図－4 (a) 水表面での流速分布



図－4 (b) 静水面下1mでの流速分布

4．おわりに

本研究は，風による湖の流動特性を湖山池をモデルにして定常状態での数値解析を試みたわけであるが，オーダー的には実測の流動特性を再現することができた。今後，より正確な湖流を再現するためには非定常解析が必要であるとともに，詳細かつ広範囲の湖流観測およびその際の湖面上での風の分布などの測定が必要であると思われる。

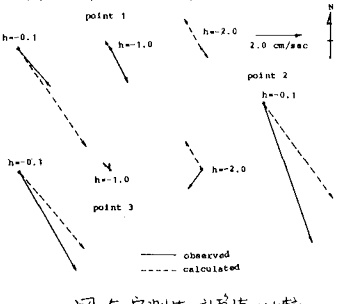
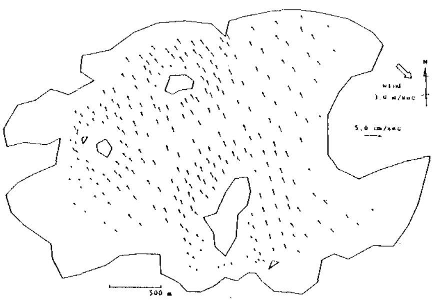


図-5 実測値と計算値の比較



図－4 (c) 静水面下2mでの流速分布

（参考文献）

1) Lee and Liggett: Computation for circuration in stratified lake, Proc. ASCE, HY96, 1970.

2) 余越・富所：風による諏訪湖の流動特性，土木学会論文報告集，第276号，1978.