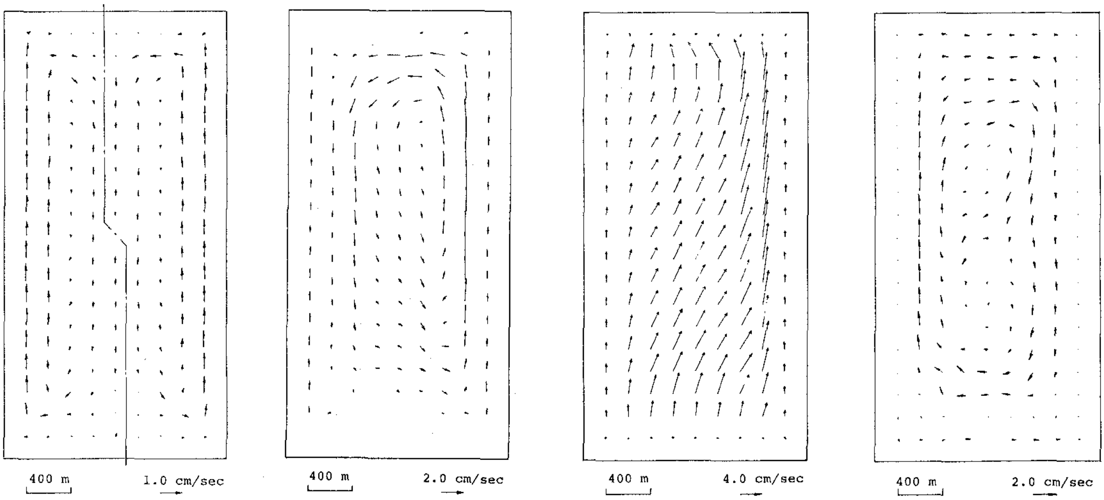
II-156 湖の流動に及ぼす各種因子の影響について

信州大学工学部 正 ○富所 五郎
信州大学大学院 学 野口 均

1．まえがき　湖水は種々の原因により流動するが、湖への流出入の影響の小さい場合の流動は主として風によって生ずる。また、風による流動は湖の水深・その変化・湖岸形状・風速・風向・流れの基礎方程式の各項などの各種因子により複雑に変化し、実在の湖に対して数値解析を行なうのではどの因子が流動に対して影響があるのか明確にならない。そこで本研究では、単純な形にモデル化した湖で流動の因子を換え解析を行ない、流動のメカニズムを明確にしようとするものであり、これにより実在の湖の流動の把握が容易になり、また数値解析において除ける因子があらかじめわかれば解析も容易となり、計算時間が短縮できるなどの利点がある。数値解析には鉛直方向の余弦関数と水平方向の区分的多項式の積である近似関数を用いるGalerkin 有限要素法を用いたが、詳細は文献1)を参照されたい。

2．流れの基礎式と対象とした湖　浅水域の流れを支配する無次元化した基礎式は[1] $\partial u_i/\partial t + R_o u_i \partial u_j/\partial x_j = -R_o/F_r^2 \cdot \partial \eta/\partial x_j + \partial(E_j \cdot \partial u_i/\partial x_j)/\partial x_j + \delta_{i1} \cdot u_2 - \delta_{i2} \cdot u_1$ ……(1)，$\partial u_j/\partial x_j = 0$ ……(2) であり、境界条件は水面 $x_3 = \eta$ で $\partial u_i/\partial x_3 = \tau_i$，水底 $x_3 = -h$ で $u_j = 0$ である。ここに $i=1,2$，$j=1,2,3$ で総和規約を用いており、u_j は x_j 方向の流速，x_1, x_2 は静水面内に、x_3 はそれらに直角上向きを正とした。τ_i は x_i 軸方向の風による剪断応力，R_o は Rossby数，F_r は Froude数，E_j は Ekman数，δ_{ij} はクロネッカーの δ で、各変数は湖の水深，水平拡がり，流速の代表量 D, L, U などにより無次元化されている。この後の上式のGalerkin 有限要素法による離散式の誘導は文献1)を参照されたい。なお、非線形方程式の解法は線形解を第一近似としてNewton－Laphson 法によった。つぎに、単純な形にモデル化した湖として図-1，2 の横2km，縦4kmの矩形のものと図－3 に示す直径4kmの円形を選んだ。水深は岸が0.1m，岸より一つ内側の節点で1.0m，それ以外は図-1は5.0m，図-2は上半分が5.0m，下半分が10.0m，また図-3，図-4(a)は5.0m，図-4(b)は20.0mである。

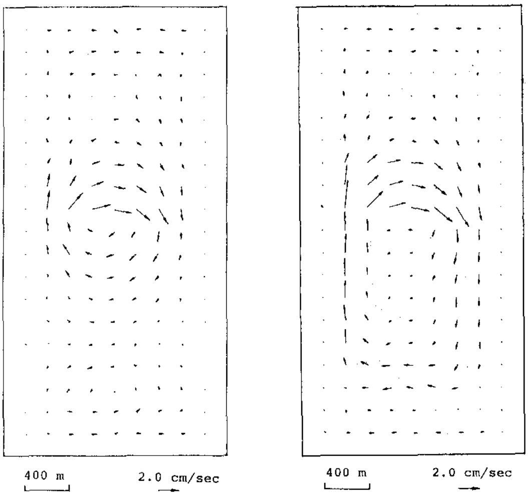
3．数値解析結果と考察　解析結果は全て、湖面全体に風速3m/sの一様な風が吹いた時のもので、湖への流出入はないものとし、風による剪断応力，鉛直渦動粘性係数は文献2)と同様に求めた。また水平渦動粘性係



(a)平均流速（左 $f\neq0.0$，$R_o=0.0$ / 右 $f=0.0$，$R_o\neq0.0$）　(b)平均流速（$f\neq0.0$，$R_o\neq0.0$）　(c)表面流速（$f\neq0.0$，$R_o\neq0.0$）　(d)平均流速（$f\neq0.0$，$R_o\neq0.0$）

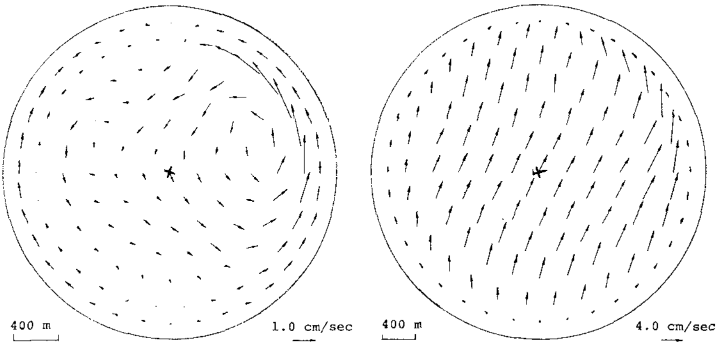
図-1 コリオリ項 f と非線形項 R_o による流速の変化（風向は(a)(b)(c)が上向き、(d)が右向き）

数A_Hは要素の大きさを考慮し$A_H=0.01\ell^{4/3}$(cm, sec単位, ℓは要素の最小寸法)より求めた。図−1は基礎方程式のコリオリ項, 非線形項, つまり(1)式の右辺3,4項と左辺オ2項の有無(以下図ではこれらをf, R_0で示す)による流速変化を調べたものである。図−1(a)の左半分は$f=0.0$, $R_0=0.0$の解(ここには示してない)に対しほとんど変化がなく、縦の中央線に対しほぼ対称な水平環流を示している。また$f=0.0$の時、$R_0\neq0.0$としても(a)の右半分に見られるように流れのパターンはほとんど変化しない。しかし、$f\neq0.0$の時は図−1(b)に見られるように大きな反時計廻り方向の水平環流が生ずる。これは(c)に見られるように、コリオリ力により時計廻り方向に偏った表面流が岸に当り、その付近の流れを加速し、この場合には横方向より縦方向の岸が長いためこの力が強く反時計廻り方向の環流を起こしているものと思える。事実、同じ湖に右向きの風を吹かせた時には(d)に示すように時計廻りの水平環流が生ずる。つぎに図−2は風向に直角に水深変化のある場合で、水深の変化する中央付近で強い水平環流が生じており、$R_0=0.0$と$R_0\neq0.0$の解に大きな差がみられない。これは風向に直角な水深変化が水平環流に大きな影響を持つことを示し、既に指摘されていることである。図−3は湖の形状の影響を除くための円形湖の結果で、反時計回りの水平環流が生じている。また表面流速は岸付近を除くと図−1(c)とほぼ同じ値で、風向に対し時計回り方向に偏っている。この偏りはコリオリ力によるもので、図−4に見られるように水深が大きい方がより大きくなる。以上より湖水の風による流動はこれに影響を及ぼす各種因子により全く違ったパターンを示すこともある。したがって解析モデルは全ての因子を考慮し、しかもこれらをできる限り正確に表現する方法が望ましい。



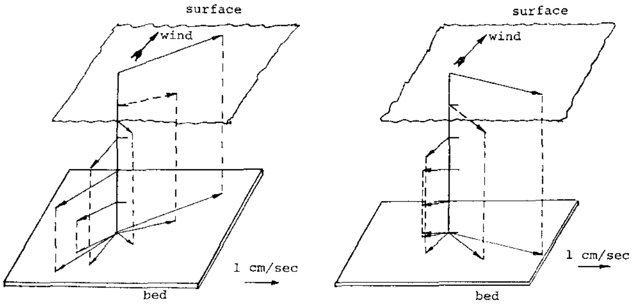
(a) $f\neq0.0$, $R_0=0.0$　(b) $f\neq0.0$, $R_0\neq0.0$

図−2 水深変化がある場合の平均流速(風向右向き)



(a) 平均流速　(b) 表面流速

図−3 円形湖の流速(風向は上向き, 水深 5.0 m, $f\neq0.0$, $R_0\neq0.0$)



(a) 水深 5.0 m (図−3と同じ)　(b) 水深 20.0 m

図−4 流速ベクトル(図−3 ×印点)

参考文献

1) 富所 五郎; FEMによる浅水域における三次元流動解析法, 第27回海岸工学講演会論文集, 1980

2) 余越 正一郎・富所 五郎; 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