

びわ湖の水の流動に関する数値実験的研究

——主として1層2次元モデルについて——

今里 哲久・金成 誠一・國司 秀明

A NUMERICAL EXPERIMENT OF WATER MOTION IN LAKE BIWA-KO

——On the Two-Dimensional One-Layer Model——

By Norihisa IMASATO, Seiichi KANARI and Hideaki KUNISHI

Synopsis

In order to understand the water motion in Lake Biwa-ko, numerical experiments have been performed. Lake Biwa-ko is divided into 25×65 square meshes of which intervals are 1 km. Nonlinear hydrodynamic equations for this two-dimensional one-layer model are numerically integrated by giving the wind stress as the external force, the effects of the bottom stress and the Coriolis' force being taken into account.

The south-west wind blowing uniformly over the whole lake with the speed of 5 m/sec has been given, and the elevations of water surface and velocities at 30 points in the lake have been punched out at every 5 minutes. The frequency spectra of amplitude and velocity obtained by Fourier analysis about these 296 digital data at each point give the characters of longitudinal seiches in Lake Biwa-ko. The periods of these seiches thus obtained are of 255.5, 79.8 and 69.1 minutes, and these oscillations correspond uni-, bi- and tri-nodal seiches in Lake Biwa-ko respectively. On the other hand, it is shown that the cyclonic lake currents appear in the north basin in the case of the southerly wind. Some results about the distribution of the elevation of water surface and about the effects of the nonlinear terms and the Coriolis' term are also mentioned.

1. ま え が き

湖に加えられる種々の力によって湖水がどの様に運動するか、その詳細は現在でも十分には理解されていない。湖水の運動が海洋に較べてはるかに小規模であることも、湖沼の生物、化学の研究に較べて、湖沼の物理学的な研究が見過されて来た一つの要因であつたろうと思われる。しかしながら、湖沼におこる風浪、湖流、風による吹き寄せによる水位変化、静振或いは内部波のような物理現象が人間生活や生物環境に対して持つ意味は決して小さくはない。また今日人間活動の規模が拡大し、それが結果的に生物環境を破壊したり、水資源的な観点からいっても、それが汚染によって失なわれようとさえしている現状にあっては、その規模の如何にかかわらず、流れや振動に伴う物質や熱の移動、或いは拡散というような現象も物理的に十分に把握し、外的な要因の変化に対応して湖水がどの様に応答するかを予測することが、人間をも含めた生物環境にとって、きわめて重要な問題となつてきている。

このような観点を含んで、われわれはこれまでびわ湖を主な対象にとりあげ、観測によって湖水の運動を検討してきたが、びわ湖の様な大きなしかも複雑な形をした湖では、湖水の運動機構を観測だけから理解しつくすことは、現在の段階にあってはむづかしいことが痛感されていた。そこで数値実験の立場からこの問

題への接近を試みることにした。

湖水の運動をひき起す要因は風や気圧の変化, 輻射, 河川水の流入・流出, 降雨等さまざまなものが考えられる。われわれはこれらの要素のそれぞれがどの程度に湖水の運動に寄与するのかを詳細に研究していくつもりであるが, まず第一に風による湖水の運動を検討することから始めることにした。即ち非線形 1 層 2 次元モデルと 2 層 2 次元モデルとによって湖流, Seiche, 内部波, 風による吹き寄せによる水位変化を主対象とした検討をおこなっているが, 今回は非線形 1 層 2 次元モデルによる Seiche, 湖流, 風による吹き寄せについて現在までに得られている若干の結果について述べることにする。

2. 基礎方程式と境界条件

湖水の運動を考える場合, 湖岸近くや南湖の様な浅い部分では, 水底摩擦項や慣性項は無視出来ないであろうし, 湖流に対してはコリオリ力が大きな役割を担うと考えられる。ごく普通の気象条件のもとで吹く風を対象とするので, 気圧勾配による水位変化の項を無視して考えると, 考えるべき運動方程式と連続の式は次の様に書くことができる。

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = -g(h+\eta) \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_x, \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} = -g(h+\eta) \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_y, \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial Q_x}{\partial x} - \frac{\partial Q_y}{\partial y}, \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで

$$A_x = \frac{\tau_{sx}}{\rho_w} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} + f \cdot Q_y + \varepsilon \cdot (h+\eta) \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} \right), \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$A_y = \frac{\tau_{sy}}{\rho_w} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} - f \cdot Q_x + \varepsilon \cdot (h+\eta) \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} \right). \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし, x, y を水平方向にとり, z を鉛直下方に正にとり, u, v を夫々流速の x 成分, y 成分として, Q_x, Q_y は

$$Q_x = \int_{-\eta}^h u \cdot dz, \quad Q_y = \int_{-\eta}^h v \cdot dz \quad \dots\dots\dots (6)$$

で定義される積分流量をあらわす。また $h \equiv h(x, y)$ は水深, $\eta \equiv \eta(x, y, t)$ は水位変化, τ_s は水面摩擦力, τ_b は水底摩擦力, f はコリオリのパラメーター, ε は慣性項の係数である。

実際に計算を進めるにあたってはどのような風の場合を与えるかが問題となる。現実には湖面上を吹く風は, 時間的にも, 季節的にも, さらに空間的にもその大きさと向きを変えている。しかしながらびわ湖における風速・風向の空間分布に関する情報がほとんどなく, わずかに兎玉¹⁾の風系の分類に関する研究や, 田平²⁾の模型実験による研究があるだけである。そこで, まず, 風の場合に対するびわ湖の水の基本的な応答特性を知るという目的で, 最初静止していた湖に, 一様な風速・風向を持った風が長時間吹き続けるといった単純な場合を考えてみることにした。

湖面における風の摩擦応力 τ_s は, 平均風速 $\bar{W}$, 空気の密度 $\rho_a = 1.2 \times 10^{-3}$, 抵抗係数を γ_a^2 として, よく用いられる

$$\tau_s = \rho_a \gamma_a^2 \bar{W}^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

なる関係によって与える。彦根における月平均の風向・風速の変化をみると各月を通じて NW~N 風, 及び S~SE 風がよく出現し, 平均風速は 2~4 m/sec 位である。しかし, 春から夏にかけて SW~SE 風が, また冬期には NW 風がしばしば 15 m/sec という強さで吹くことがある様である³⁾。彦根における風向・風速でびわ湖でびわ湖全体の風の場合を代表させるにはかなり問題があるけれども, 現在のわれわれの目的に対してはびわ湖における風の場合の一つの測度と考えてもよいだろう。そこでまず今回は 5 m/sec の SW 風の

場合を考えてみることにする。 r_a^2 についてはこれまでに多くの観測値や実験値が報告されていて⁴⁾、この値は風速と共に変化しているといわれている。われわれの水槽実験の結果も同様で、国司の実験値⁵⁾によれば、5 m/sec の風速で $r_a^2=0.0013$ であり、この計算にはこの値を用いることとした。

水底摩擦応力 τ_b は宮崎によれば

$$\tau_b = \rho_w r_a^2 \bar{W} \cdot |\bar{W}| - \beta \tau_s, \dots\dots\dots (8)$$

で与えられる⁶⁾。ここで r_b^2 は水底摩擦係数、 $\bar{W}$ は平均流速、 ρ_w は水の密度である。台風に伴う高潮を扱う場合には、 r_b^2 として Hansen が潮流観測から求めた値⁷⁾ 0.0026 を用いて計算値が潮位記録に合う様に β を適当にえらぶのが普通おこなわれる方法である。一般に $r_a^2 > r_b^2$ であるから $0.25 < \beta < 0.5$ と考えられている。宮崎は鉛直うず粘性係数 ν が深さによって変化し、かつ $|\bar{W}|$ に比例すると仮定すると (8) 式の β は $0.5r_a^2/r_b^2$ となることを導いている⁶⁾。この考え方によれば、現在のモデルでは $\beta=1.0$ となって高潮の場合の様に風速が非常に大きい時と事情が異なっていることがうかがえる。これらの値をどの様にえらぶのが最適かは、観測結果との対比を通じて改めて検討する必要があるが、現在のところ一応 $r_b^2=0.0026$, $\beta=1.0$ として計算を進めることにした。慣性項の効果は南湖を除けばあまり大きくはないと予想されるので、係数 $\varepsilon=1.0$ とえらんでおくことにした。コリオリの係数は $f=0.00008$ である。

3. 差分方程式と計算の手続き

方程式 (1)～(5) を差分形に変えて、数値計算を進めていく手続きについては、潮流や高潮の計算に関連して既にいくつかの方法が発表されている^{6) 8)}。周囲が壁でかこまれている湖水の運動を扱うには壁に直角な流れの成分を零とおくことのできる宇野木の方法⁹⁾ が最適であると考えられる。この方法によれば格子の組方は Fig. 1 に示した如くに与えられる。図から分る様に与えられる水深点 (○印)、水位点 (●印)、流量点 (→印) が夫々異なっている点に特徴がある。この様な格子系で方程式 (1)～(5) の数値計算を Δt 時間ステップ毎に進めていくために、

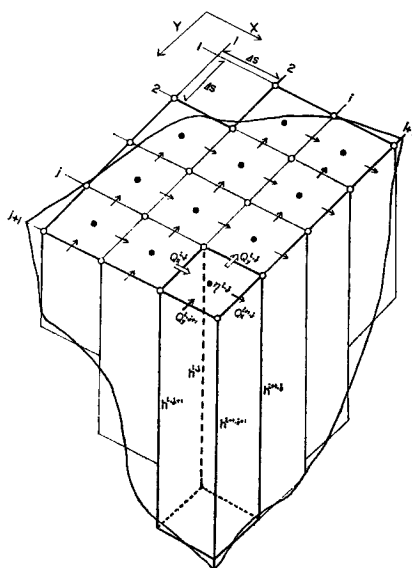


Fig. 1 Arrangement of mesh points.

$$S_x \equiv Q_x \cdot \frac{\Delta t}{\Delta s} = (h + \eta) u \cdot \frac{\Delta t}{\Delta s} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$S_y \equiv Q_y \cdot \frac{\Delta t}{\Delta s} = (h + \eta) v \cdot \frac{\Delta t}{\Delta s} \quad \dots\dots\dots (10)$$

とにおいて式 (1)～(5) を中央差分を用いて書きかえると、式 (11)～(15) となる。

$$S_x^{i,j}(t + \Delta t) = S_x^{i,j}(t) - \frac{g}{2} \left(\frac{\Delta t}{\Delta s} \right)^2 \cdot \left\{ \eta^{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) + \eta^{i-1,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) + h^{i,j} + h^{i,j+1} \right\} \\ \times \left\{ \eta^{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \eta^{i-1,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} + A_x^{i,j}, \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$S_y^{i,j}(t + \Delta t) = S_y^{i,j}(t) - \frac{g}{2} \left(\frac{\Delta t}{\Delta s} \right)^2 \cdot \left\{ \eta^{i,j-1} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) + \eta^{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) + h^{i,j} + h^{i+1,j} \right\} \\ \times \left\{ \eta^{i,j-1} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \eta^{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} + A_y^{i,j}, \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\eta^{i,j}(t + \Delta t) = \eta^{i,j}(t) - S_x^{i+1,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) + S_x^{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) - S_y^{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \\ + S_y^{i,j+1} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right), \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、

$$A_x^{i,j} \equiv \frac{\rho_a \gamma \alpha^2 (1 + \beta)}{\rho_w} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{\Delta s} \cdot \sqrt{(W_x^{i,j})^2 + (W_y^{i,j})^2} \cdot W_x^{i,j} \\ - \gamma_b^2 \cdot \frac{(\Delta t)^2}{\Delta s} \cdot \bar{u}^{i,j} \sqrt{(\bar{u}^{i,j})^2 + (v^{i,j} + v^{i-1,j} + v^{i-1,j+1} + v^{i,j+1})^2 / 16} \\ + f \cdot \frac{\Delta t}{4} \cdot (S_y^{i,j} + S_y^{i-1,j} + S_y^{i-1,j+1} + S_y^{i,j+1}) - \frac{\varepsilon}{8} \left(\frac{\Delta t}{\Delta s} \right)^2 \cdot (\eta^{i,j} + \eta^{i-1,j} \\ + h^{i,j} + h^{i,j+1}) \cdot \{ (u^{i+1,j} - u^{i-1,j}) \cdot (u^{i+1,j} + 2u^{i,j} + u^{i-1,j}) + (u^{i,j-1} + u^{i,j}) \\ \cdot (v^{i,j} + v^{i-1,j}) - (u^{i,j} + u^{i+1,j}) \cdot (v^{i,j+1} + v^{i-1,j+1}) \}, \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$A_y^{i,j} \equiv \frac{\rho_a \gamma \alpha^2 (1 + \beta)}{\rho_w} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{\Delta s} \cdot \sqrt{(W_x^{i,j})^2 + (W_y^{i,j})^2} \cdot W_y^{i,j} \\ - \gamma_b^2 \cdot \frac{(\Delta t)^2}{\Delta s} \cdot v^{i,j} \sqrt{(v^{i,j})^2 + (u^{i+1,j-1} + u^{i,j-1} + u^{i,j} + u^{i+1,j})^2 / 16} \\ - f \cdot \Delta t \cdot (S_x^{i+1,j-1} + S_x^{i,j-1} + S_x^{i,j} + S_x^{i+1,j}) / 4 \\ - \frac{\varepsilon}{8} \left(\frac{\Delta t}{\Delta s} \right)^2 \cdot (\eta^{i,j-1} + \eta^{i,j} + h^{i,j} + h^{i+1,j}) \cdot \{ (u^{i+1,j-1} + u^{i+1,j}) \cdot (v^{i+1,j} + v^{i,j}) \\ - (u^{i,j-1} + u^{i,j}) \cdot (v^{i,j} + v^{i-1,j}) + (v^{i,j-1} - v^{i,j+1}) \cdot (v^{i,j-1} + 2v^{i,j} + v^{i,j+1}) \}. \quad \dots\dots\dots (15)$$

びわ湖を Fig. 2 に示した様な 25×62 個の $\Delta s = 1$ km の正方格子に分割し、計算を安定に進めるためにプリミティブの原理に従って時間ステップ $\Delta t = 10$ 秒ととる。しかし差分形による計算には誤差が入り込むことが避けられないので、いわゆる平滑化をおこなって見掛けの変動を消去しなければならない。宮崎は平滑化による振動エネルギーの減少を水平混合による実際の減少量と合わせる方法を採用した⁶⁾。この考えに従って5分毎に平滑化の操作をおこなうものとするれば、 $\Delta s = 1$ km の現在のモデルでは平滑化の係数は、粘性係数を μ として、

$$D = \left(1 - \frac{\mu \times 5 \times 60}{\rho_w \times 10^{10}} \right) \doteq 0.97 \quad \dots\dots\dots (16)$$

となるから、例えば $S_x^{i,j}(t)$ についてみると

$$D \cdot S_x^{i,j}(t) + \frac{(1-D)}{4} \cdot \{ S_x^{i+1,j}(t) + S_x^{i,j+1}(t) + S_x^{i-1,j}(t) + S_x^{i,j-1}(t) \} \quad \dots\dots\dots (17)$$

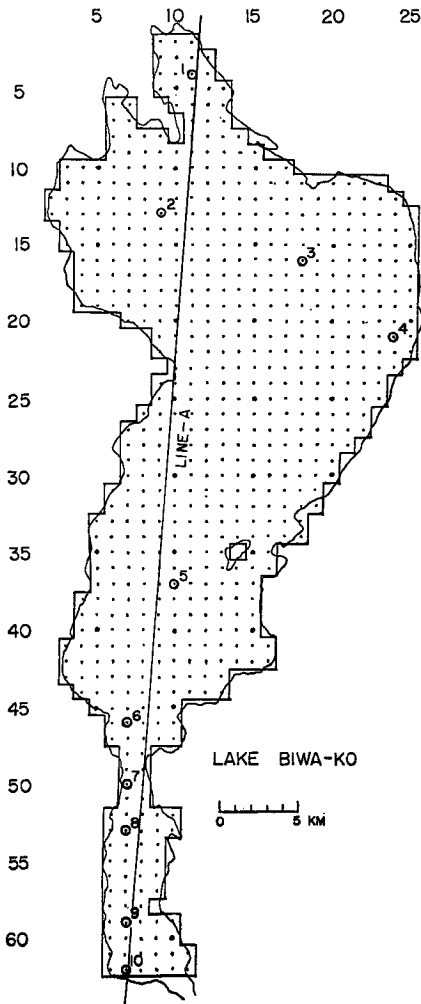


Fig. 2 Computed area of Lake Biwa-ko and arrangement of elevation points.(black points)

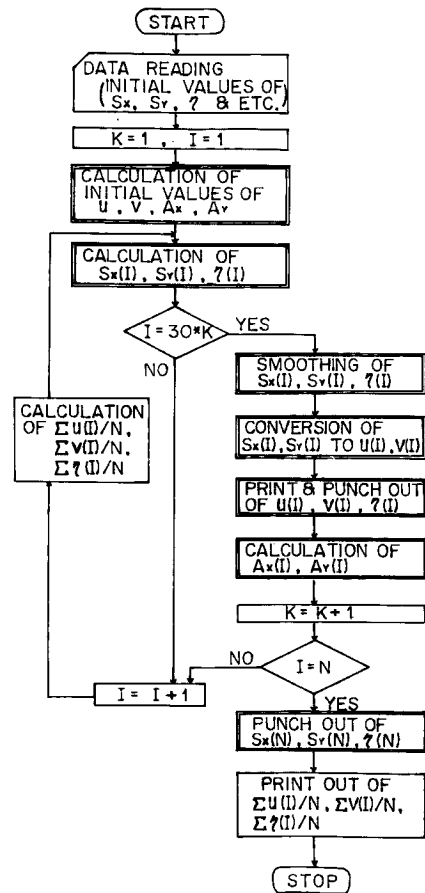


Fig. 3 Flow chart of the computation program.

を計算し、改めてこれを $S_x^{i,j}(t)$ とみなすことになる。この方法による操作では平滑の効果はそれ程大きくないことが指摘されている⁹⁾ ので、われわれは流量 S_x, S_y に関してはこの考えに従って 0.97 を用い、水位 η に関しては 0.8 を用いた。

計算手続きを示すフローチャートは Fig. 3 の様で (14), (15) 式の $A_x^{i,j}, A_y^{i,j}$ は 30 ステップ (5 分) 毎に計算し直し、その間は一定値とみなすという方法をとっている。なお、Fig. 2 中の黒点は水位点の位置を示している。

4. 計算結果

Fig. 2 の中に 1 から 10 までの数字をつけ 2 重丸で示した北湖 6 点、南湖 4 点における 5 分毎の水位と流

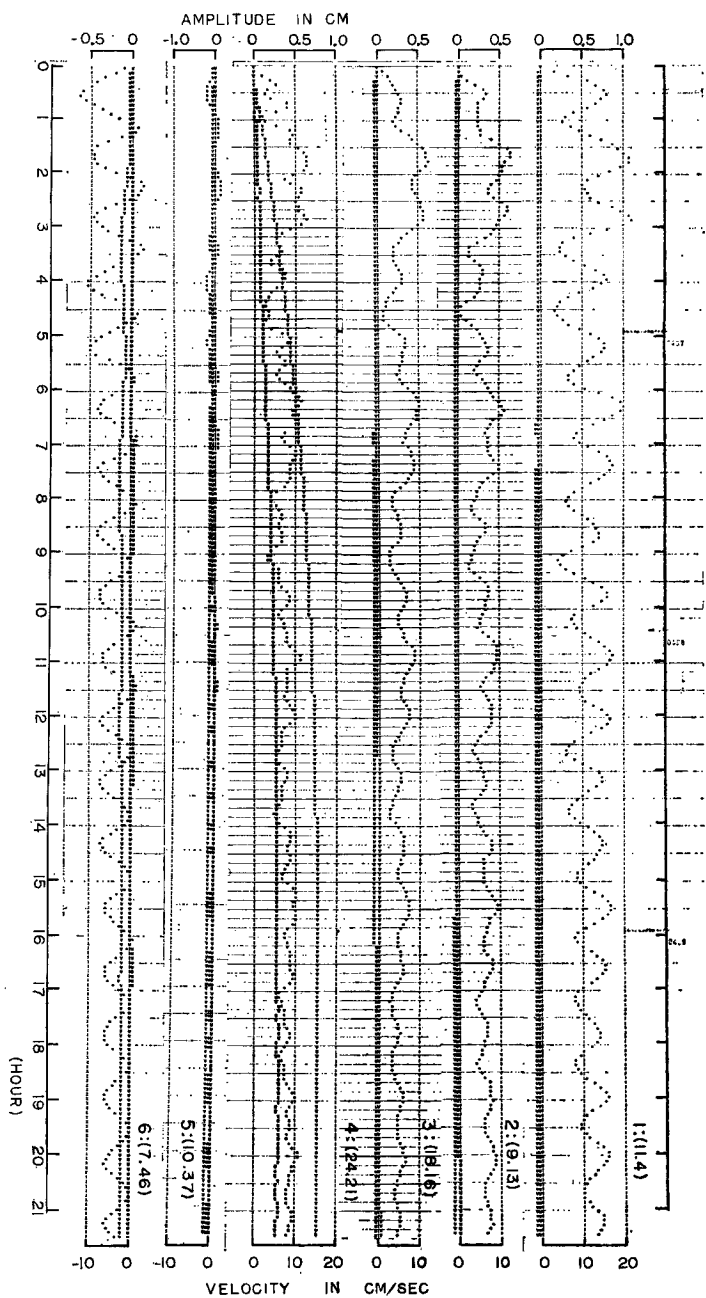


Fig. 4(a) Computed variations of vertical displacement of water surface (mark*),
x- and y- component of velocity (mark $\circ$ and $\triangle$).

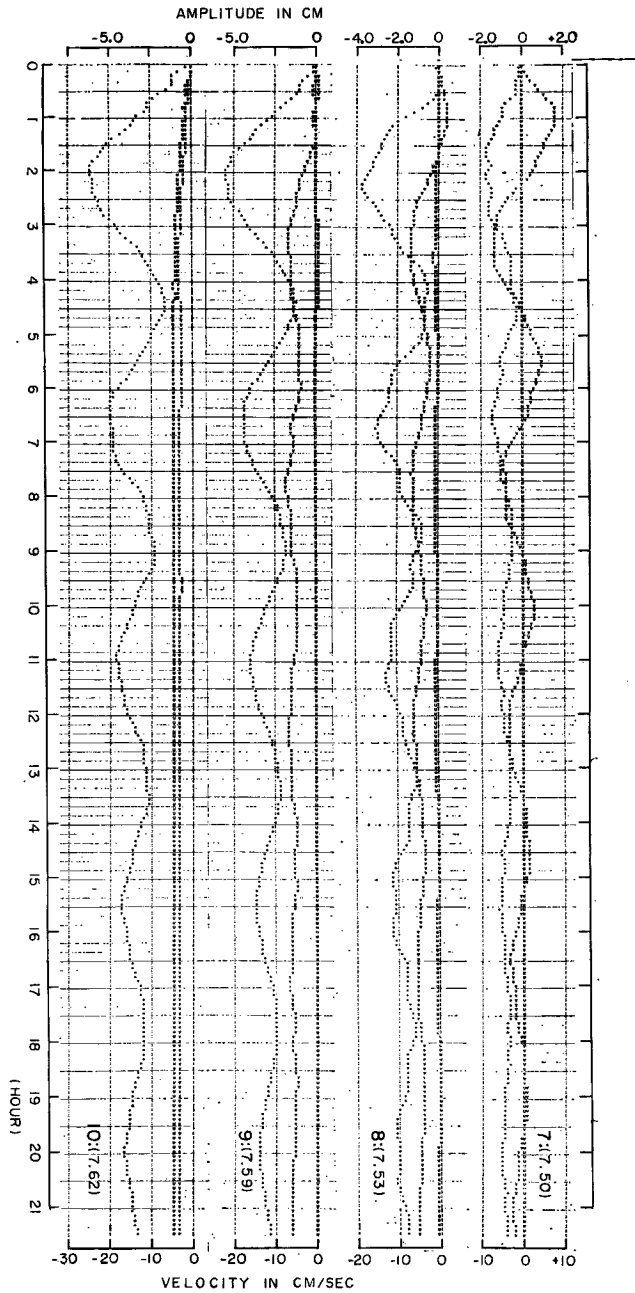


Fig. 4 (b) Computed variations of vertical displacement of water surface (mark*),
 x - and y - component of velocity (mark $\triangleright$ and $\triangleright$).

速の x 成分, y 成分の時間変化を, 風が吹き出してから約 21 時間にわたって示したのが Fig. 4 である。
 *印で示した水位の変化についてみると北湖では 70 分位の振動が卓越しており, 南湖では 255 分位の振動が卓越し, これに 70 分位の振動が重なっている。これらの振動は Seiche であって, 風による吹き寄せのまわりに時間と共に減衰しながら振動していることがわかる。この吹き寄せによる水位は, 風が吹き出してからほぼ 80 分から 120 分位で定常になる様であるが, これに伴う流れの場合は例えば (24, 21) の地点 4 で >印で示した流速の y 成分の変化からもわかる様に, 定常状態となるのはほぼ 12 時間位を必要とする様である。以下計算で得られた Seiche と湖流について順に検討を加えることにしよう。

5. Seiche について

得られた 5 分毎の計算値から吹き寄せのまわりの振動成分のみを取り出し, 相続く 296 個の値を使って調和分解によって Seiche の振巾と流速のスペクトルを求めた。その振巾スペクトルの 1 例を示したのが Fig. 5 で, 上側は Fig. 2 の地点 2(9, 13) におけるスペクトル, 下側は地点 7(7, 50) におけるスペクトルで, いずれも実線で示したのがそれである。図中の +印は位相を示している。このスペクトルの図から 255.5 分, 79.8 分, 69.1 分を周期とする振動が存在していることがわかる。全湖で約 30 点をえらんで, この様な振巾と位相のスペクトルを求め, これら 3 つの周期を持つ成分波の振巾の空間分布を作ってみたのが Fig. 6 である。実線で節線を示し, 点線で適当な間隔でひいた等高線を示してある。Fig. 6 (a) の 255.5 分周期の振動をみると, この周期の振動はびわ湖大橋から北へ 1.5 km 位のあたりで東西にのびる節線を 1 つもつ全湖の基本振動を構成していることがわかる。Fig. 6 (b) の 79.8 分周期の振動は, 南湖の阪本の南附近から東にのびる線と, 北湖中央部を舟木崎から宇曾川川口に至る線を節線とする全湖の 2 節振動である。Fig. 6 (c) の 69.1 分周期の振動は南湖の唐崎附近を東にのびる線, びわ湖大橋附近を東西に走る線, 及び北湖中央部を安曇川の南から柳川に至る線を節線とする全湖の 3 節振動となっている。これら 3 つの振動はびわ湖の長軸方向に振動していることがわかる。そこでこれら 3 つの振動の振巾分布とそれに伴う流速分布を, もっと見やすくする為に, Fig. 2 の中に LINE-A で示したびわ湖の長軸方向にとった線に沿う水位変化と

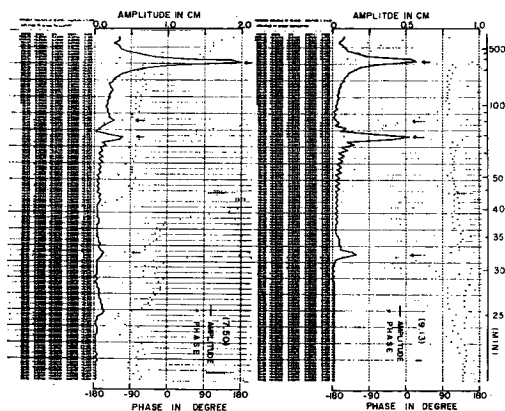


Fig. 5 Examples of spectra of amplitude (solid line) and phase (mark +) of oscillations of water surface.

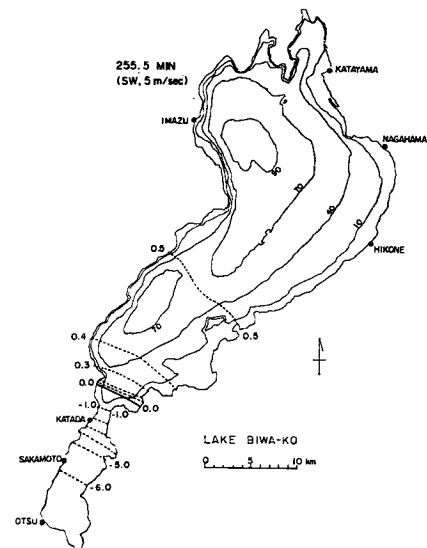


Fig. 6 (a) Horizontal distribution of the amplitude of the uni-nodal seiche.

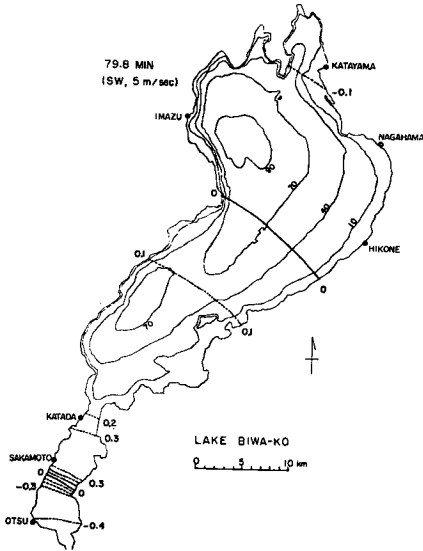


Fig. 6 (b) Horizontal distribution of the amplitude of the bi-nodal seiche.

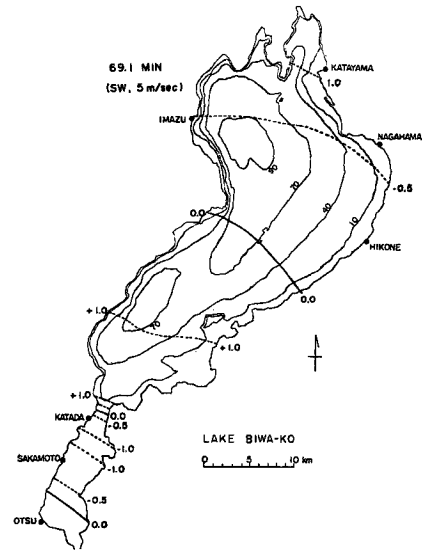


Fig. 6 (c) Horizontal distribution of the amplitude of the tri-nodal seiche.

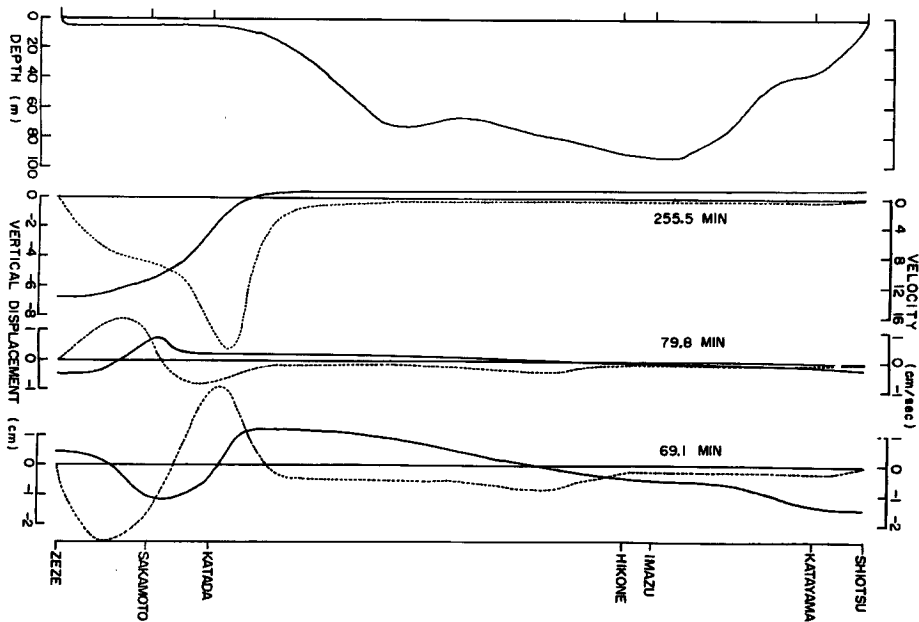


Fig. 7 Distributions of vertical displacement (solid curve) and maximum velocity (dashed curve) of each component of the seiches.

流速の変化をとり出して見たのが Fig. 7 である。水位変化を実線で、流速分布を破線であらわしてある。また参考までに水深分布も示してある。255.5 分周期の Seiche の南湖での振巾は北湖での振巾の 10 倍にも達していて、しかも北湖ではほとんどいたるところで同程度の水位変化しか示していない。このモードの振動に伴う流速は堅田沖からびわ湖大橋附近にかけて最も速く、最大値 19.9 cm/sec にも達している。これに

対して北湖の水はほとんど動かないといっているほどである。この255.5分に相当する周期の振動は早くから知られていて、南湖の湾振動として扱われて来たものである。この図を見る限りでは湾振動として理解するのがほぼ妥当である様に見える。しかしこの振動を南湖の湾振動と考えて湾口補正を施して得られる Merian 周期は、観測から得られている平均周期230~250分¹⁰⁾や、今回われわれの得た255.5分にくらべて小さい。この点についての説明がいくつか試みられて来たが^{11), 12)}、今回得られた結果はびわ湖全体を一つの系として扱い、しかも2次元的なひろがりを考えることによって解決できることを示したものとえよう。

79.8分周期と69.1分周期の振動の振巾については南湖ではほぼ同じであるにもかかわらず、北湖では69.1分周期の方が5倍から7倍も大きい。従って実際の観測記録を見ると70分位の振動しか存在しない様に見えるし、従来もこの70分附近の周期の振動を単一のモードの振動とみて、北湖の単節振動として理解しようとする考え方が強かった様である^{11), 13)}。しかしながら浅くて狭い南湖と深くて広い北湖の結合系全体の中に起こる振動として、この2つのモードの振動が実在することは最近の報告¹⁰⁾をみても明きらかである。79.8分周期の振動に伴う流れは最大値1.1 cm/sec (唐崎沖)、69.1分周期に伴う流れでは最大で2.6 cm/sec (唐崎沖と堅田沖)位となっている。なおこの図で作図の都合上69.1分周期のものは他の2つと南湖南端で逆位相としてプロットしてあるが、実際には255.5分周期の振動とは41°、79.8分周期の振動とは64°の位相差となっていることを注意しておこう。60分周期より短周期の振動についてはかなり複雑な分布をする様であって、さらに詳細な検討をおこなう必要があると思われるのでここではふれないことにする。

6. 湖流について

計算から得られる水位変化や流速変化から振動成分を落したものは、風の吹き寄せによる水位変化とそれに伴う湖流をあらわしている。ほぼ定常状態に達したとみられる12.3時間以後の値を用いて得られた吹き寄せによる水位変化と湖流の分布を示したものが、それぞれ Fig. 8 と Fig. 9 である。まず吹き寄せにつ

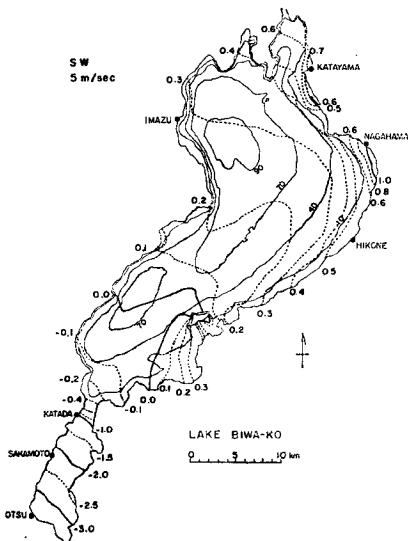


Fig. 8 Horizontal distribution of the elevation of water surface by the wind in the case of uniform south-west wind with the constant speed of 5 m/sec.

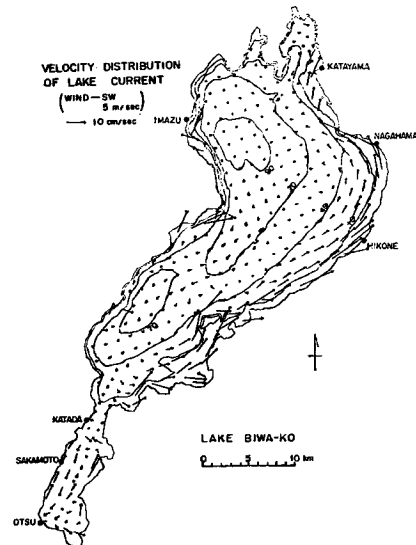


Fig. 9 Horizontal distribution of wind driven lake currents in the case of uniform south-west wind with the constant speed of 5 m/sec.

いては南湖と北湖で最大約 4.5 cm の水位差が生じていることがわかる。日野川川口沖から沖の島附近にかけてかなり複雑な分布をしていることは注目すべきであるが、これが格子のとり方のためにおこっているのか、この附近の地形がもたらす必然的な結果なのかどうかは、この附近をもっと細かい格子網で置きかえて検討する必要がある。風による吹き寄せによる水位変化に関しては、これまでに報告があまりなく、観測から正確な値を求めることは現在でも非常にむづかしいのが実状である。

Fig. 9 の湖流の流速分布からわかる様に SW 風の場合、びわ湖の東岸沿いにかかなり強い流れがあり、最大 20 cm/sec にも達している。また湖北部に反時計廻りの環流が明瞭に認められる。この環流は、最初神戸海洋気象台による観測¹⁴⁾から見出され、第一環流と名づけられたものに相当し、1927 年には日高¹⁵⁾が模型実験をおこない、長浜と沖の島附近を吹き抜ける ESE 風によって作られることを示した。最近では岡本・森川¹⁶⁾が夏季のびわ湖の湖流を地衡流として取扱うことが可能であることを示して、水温観測の資料からこの環流の存在を支持している。小規模ではあるが別の反時計廻りの環流が沖の島から北湖南端にかけての領域に存在している。また安曇川川口から高島町沖にかけての湖岸沿いに小さな時計廻りの環流と今津沖から竹生島西方の領域には時計廻りのかなり明瞭な環流が形成されている。北湖南部の小さな 2 つの環流については神戸海洋気象台¹⁴⁾が報告している第 2、第 3 環流に相当するものとは考えられない。南湖でもいくつかの循環流が形成されている様で、規模は北湖にくらべて小さいけれども決して単純な流れの場ではないことに注目する必要があると思われる。びわ湖大橋附近の水道部分では流れは弱い西岸沿いに南下し、東岸沿いに北上する流れが存在しており、南湖と北湖の間の水の交換を考える場合には、考慮しておかなければならない一つの要素であると思われる。しかしながら、その構造をもっとはっきりさせるためには、この部分の格子間隔を細かくした計算が必要である。

Fig. 9 の SW 風による湖流のパターンを模式化して Fig. 10 に示しておく。同じ Fig. 10 はそれぞれ 5 m/sec の ESE 風と NW 風による湖流のパターンが示してあるが、これはいずれも SW 風の場合と同じ諸係数を与え、同様の操作を施したものである。ESE 風の場合、反時計廻りの環流は細長く湖北部に押しやられて、北湖中央部には時計廻りの環流が形成されている。NW 風になるとこの環流は沖の島以北全体に大きくひろがっていることがわかる。今回の計算から、従来いわれている北湖の反時計廻りの環流がほぼ南を中心として吹く風によって作られる可能性が示されたわけであるが、原因をすべて風に帰するためには、短

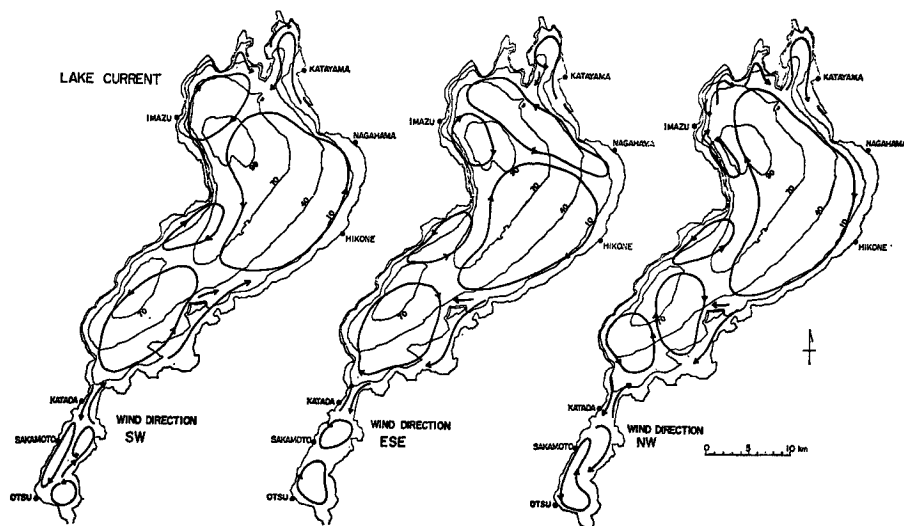


Fig. 10 Schematic patterns of wind driven lake currents in three cases of the wind direction of SW, ESE, and NW.

時間の間におこる風向の変化によって流れの場がどの様に変形されるか、また一たん形成された流れの場の寿命はどれ位かということが把握されなければ、風によって作られた環流の安定性がどの様なものか、決定的なことはいえない。

7. 非線形項およびコリオリ項の効果について

最後に水底摩擦応力項、慣性項、およびコリオリ項の効果について簡単にまとめておく。Fig. 2 中の地点 2, 3, 4, 6, 9 の 5 点について風が吹き出してから 1110 分までの値を移動平均法によって振動成分と流れ成分とを分離した。これら 5 点の特徴についてみると、地点 2, 3 は深くて、流速はあまり大きくない。地点 4 は浅くて流速が大きく、30 分より短い周期の Seiche が卓越している地点である。地点 9 は南湖にあって水深は小さく、流れもあまり大きくなく、4 時間周期の Seiche が卓越している。

まず表 1 に示した流れの成分に対する各項の大きさの X 成分、Y 成分をみると、流速が大きい地点 4 以外では水底摩擦項、慣性項は共に圧力勾配項のだいたい 1/100 以下の大きさとなっていて、浅くて流速の大きいところ以外では非線形項の効果は無視出来ることがわかる。一方、コリオリ項の効果を見ると北湖の反時計廻りの環流の部分ではその大きさは圧力勾配項と同程度であり、従って湖流に関しては運動方程式でコリオリ項、圧力勾配の項、風の水面摩擦応力の項の釣合いが成立していると考えられる。このことは近似的に地衡流として環流を取扱ってよいことを示唆しているが、この取扱いが成り立つためには $\tau_s=0$ とした時の湖

Table 1 Evaluation of effects of nonlinear terms and Coriolis' term on the lake currents.

	POSITION	DEPTH (M)		BOTTOM STRESS'T.	INERTIA TERM	CORIOLIS' TERM	PRESSURE GRADIENT
FLOW	2 (9, 13)	84.7	X Y	0.00012 0.0013	0.0034 0.0040	0.53 0.098	0.55 1.20
	3 (18, 16)	59.3	X Y	0.0016 0.004	0.011 0.041	0.096 0.47	0.48 0.83
	4 (24, 21)	11.9	X Y	0.23 0.67	0.17 0.83	1.10 0.31	0.57 0.64
	6 (7, 46)	19.1	X Y	0.0016 0.011	0.0027 0.023	0.11 0.21	1.60 1.60
	9 (7, 59)	5.1	X Y	0.0023 0.077	0.014 0.038	0.011 0.041	0.30 1.20

Table 2 Evaluation of effects of nonlinear terms and Coriolis' term on the oscillations.

	POSITION	DEPTH (M)		BOTTOM STRESS'T.	INERTIA TERM	CORIOLIS' TERM	VELOCITY TIME CHANGE	PRESSURE GRADIENT
OSCILLA-TION	2 (9, 13)	84.7	X Y	0.000016 0.00006	0.00017 0.00007	0.022 0.012	0.141 0.229	0.49 0.60
	3 (18, 16)	59.3	X Y	0.00010 0.00017	0.0012 0.00053	0.024 0.013	0.182 0.167	0.50 0.39
	4 (24, 21)	11.9	X Y	0.0021 0.010	0.047 0.048	0.0072 0.011	0.0883 0.0694	0.28 0.22
	6 (7, 46)	19.1	X Y	0.0013 0.0062	0.0045 0.025	0.065 0.020	0.0439 0.2181	0.16 0.62
	9 (7, 59)	5.1	X Y	0.0011 0.047	0.0016 0.020	0.046 0.011	0.0294 0.3473	0.12 0.58

Table 3 The ratio of effects of nonlinear terms and Coriolis' term on the lake currents to these on the oscillations.

POSITION	DEPTH (M)		BOTTOM STRESS'T	INERTIA TERM	CORIOLIS' TERM	PRESSURE GRADIENT
2 (9, 13)	84.7	X	0.133	0.050	0.042	0.891
		Y	0.046	0.018	0.122	0.500
3 (18, 16)	59.3	X	0.063	0.109	0.250	1.041
		Y	0.043	0.013	0.028	0.470
4 (24, 21)	11.9	X	0.009	0.277	0.007	0.491
		Y	0.015	0.058	0.036	0.344
6 (7, 46)	19.1	X	0.813	1.667	0.591	0.100
		Y	0.563	1.087	0.095	0.388
9 (7, 59)	5.1	X	0.478	0.114	4.18	0.400
		Y	0.610	0.268	0.526	0.483

流の寿命がどれ位であるかという推定が必要である。まだ充分には整理が進んではいないが、現在得られつつある若干の計算結果をみると、一たん生じた湖流の寿命はそれ程短かくはない様で、非常に急激な風の変化がなければ、湖流に関しては近似的に定常状態の仮定が成り立ち、地衡流近似による湖流の推定がほぼ可能であると考えられる。南湖ではコリオリ項の大きさは水底摩擦項や慣性項の大きさと同程度であって、流れに対する効果は無視し得る様であるが、これは南湖が小さいことがその原因だと考えられる。風速が 10 m/sec をこえる強風時においても、非線形項の効果について上述の様なことが成り立つかどうかについては今後検討すべき問題である。

次に振動成分に対する値を示した表 2 の結果によると、予想される様に振動成分に対しては流速の時間変化の大きさは圧力勾配の項と同程度の大きさになっていることがまずわかる。北湖の深いところでは、水底摩擦応力項、慣性項は圧力勾配項の 1/400 以下で非線形項の効果は小さい。これらの地点では 4 時間周期の振動の影響をあまり受けないので、コリオリ項の効果も大きくなく、圧力勾配項の 1/20 以下である。しかしながら、地点 4 の様に浅いところでは慣性項の効果はかなり顕著であって、振動に対しても流れの場合と同様にやはり無視することは出来ない。また南湖およびその周辺の 4 時間周期の振動に伴う流れの大きいところでは、コリオリ項の効果が無視出来ないことがわかる。南湖の浅いところでは水底摩擦の効果もやはり無視することができない。

各地点での各項の流れ成分に対する振動成分の大きさの比を表 3 に示したが、北湖ではいずれの項も振動成分は流れ成分よりも小さい。また地点 6 より南では両成分の大きさはほぼ同程度となっているが、これは規模の大きい長周期の Seiche が卓越していることがその原因と考えられる。

なお、表には示さなかったがもう一つの非線形項 $\rho_w g \eta \partial \eta / \partial x$, $\rho_w g \eta \partial \eta / \partial y$ の項は、全ての領域にわたって $h \gg \eta$ であって、それぞれ $\rho_w g h \partial \eta / \partial x$, $\rho_w g h \partial \eta / \partial y$ に対して無視して差しつかえない。以上非線形項とコリオリ項が持つ効果についてごく大まかな取扱いのもとに検討をおこなったわけであるが、さらにたんねんなやり方でもう少し多くの地点についての検討を進める必要がある。

8. む す び

非線形 1 層 2 次元モデルを用いて、全湖一様に 5 m/sec の SW 風が吹き続けるという境界条件の下で、びわ湖の Seiche と湖流について考察をおこなってきた。しかしながらこの種の数値計算を進める場合に今後解決しなければならない多くの問題点があることは明らかなである。その第 1 は摩擦応力の項や、慣性項に含まれる諸係数をどうえらぶかということである。この問題は観測資料を集積して、それに対応した計算を繰返すことによって妥当な値を見出す努力をおこなうことによって解決しなければならない。第 2 は風の

場の与え方である。びわ湖上の風速・風向分布についてはほとんど知られていないといつてよいが、かなり局地性が強いと考えられ、われわれが考えた一定風速の風が全湖一様に一定方向に向って吹き続けることはあまりないかも知れない。この点を明らかにしていくことは湖流の維持機構を考察していく上できわめて重要だと考えられる。第 3 はわれわれの採用した 1 層モデルそのものについてである。1 層モデルは躍層の消滅する冬期のモデルに対応すると考えられるのであって、特に成層期に卓越するといわれている湖流を扱う場合には、2 層モデルを用いる必要がある。これらの点を完全に解決するのはそんなに容易だとは考えられないが、そのための努力は始められている。例えば成層期の湖流の問題については、線形 2 層 2 次元モデルによる計算を筆者の一人金成を中心として進められていて、既に興味ある結果が得られ始めている。また、流入・流出河川の効果や降雨の効果を考慮した計算、あるいは風の分布を考慮した計算も既に始められている。

最後に、この研究を進めるに際し、資料整理に協力していただいた梶浦陽子、村島悦子両嬢に感謝します。数値計算は京都大学大型計算機センターの FACOM 230-60 を利用させていただいたことと、計算センターの現場の多くの方々の御援助をいただいたことに感謝します。この研究は防災研究所びわ湖流域水文観測特別事業とも関連して、主として昭和 45 年度文部省科学研究費（特定研究 I）によっておこなわれたものであることを記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 児玉良三：滋賀県の風系について，研究時報，第 8 巻，昭41，pp. 49-52.
- 2) 田平 誠：模型実験による琵琶湖周辺の気流に関する研究，京都大学理学部昭和 41 年度修士論文，昭42.
- 3) 気象庁：日本気候表.
- 4) Wilson, B. W.: Note on Surface Wind Stress over Water at Low and High Wind Speeds, J. G. R., Vol. 65, 1960, pp. 3377-3382.
- 5) Kunishi, H.: An Experimental Study on the Generation and Growth of Wind Waves, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 61, 1963, pp. 1-41.
- 6) Miyazaki, M., T. Ueno, and S. Unoki: Theoretical Investigations of Typhoon Surges along the Japanese Coast, The Oceanographical Magazine, Vol. 13, 1961, pp. 51-75, pp. 103-117.
- 7) Hansen, W.: Theorie zur Errechnung des Wasserstandes und der Stroemungen in Randmeeren nebst Anwendungen, Tellus, Vol. 8, 1956, pp. 287-300.
- 8) 第二港湾建設局：東京湾における高潮の推算，昭39.
- 9) 伊藤 剛・日野幹雄・渡辺二郎・日野和子：数値模型による東京湾横断堤の防潮効果に関する研究，第 11 回海岸工学講演会講演集，昭39，pp. 108-117.
- 10) Imasato, N.: Study of Seiche in Lake Biwa-ko [1] —On the Numerical Calculation by Defant's Method, Special Contributions, Geophysical Institute, Kyoto Univ., No. 10, 1970, pp. 93-103.
- 11) Nomitsu, T.: Surface Fluctuation of Lake Biwa Caused by the Muroto Typhoon, Mem. College Sci., Kyoto Imperial Univ., A, Vol. 18, No. 5, 1935, pp. 221-238.
- 12) 高橋達敏・滑川忠夫：琵琶湖南部の静振に就て（第一報），海と空，Vol. 18, No. 7, 1938, pp. 256-261.
- 13) Nakamura, S. and K. Honda: Seiches in Some Lakes of Japan, J. College Sci., Imperial Univ. Tokyo, Vol. 28, 1902, pp. 1-95.
- 14) 須田院次・関 和男・石井次郎・高谷静馬・水内松一：琵琶湖調査報告第一篇，神戸海洋気象台彙報，第 8 巻，大15，pp. 1-104.
- 15) 日高孝次：琵琶湖の表面流に関する実験，神戸海洋気象台彙報，第13 巻，昭 2，pp. 1-4.
- 16) 岡本 巖・森川光郎：密度分布より見たびわ湖の湖流について- 陸水学雑誌，Vol. 22, 昭36, pp. 193-200.