

3次元非定常モデルによる琵琶湖湖流の解析法に関する研究

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
東京電力 正員 長内 進 京都大学大学院 学員 阿部 徹

1.はじめに：本報は、琵琶湖の湖流を数値解析する第一歩として、鉛直方向に3層に分割したいわゆる3次元レベルモデルを適用し、運動の外力として日射による受・放熱に伴う密度変化および風によるせん断応力を考え、数値解析法として大西の方法¹⁾を用いたもので、受熱期および放熱期における湖流、とくに北湖における環流の発生に注目して計算を行ったものである。

2.基礎方程式：X、Y、Z軸は右手系直交座標で、Z軸は鉛直下向きとする。U、V、WはそれぞれX、Y、Z方向の平均流速、 ζ は水位の基準平衡水位からの鉛直上向き変位、Bは浮力、 ρ は水の密度、 ρ_0 は水の基準密度(1g/cm³)、 A_h は各々鉛直渦動粘性係数、水平渦動粘性係数、 K_v K_h は各々鉛直渦動拡散係数、水平渦動拡散係数、 f はコリオリパラメータ、 g は重力加速度である。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + w \frac{\partial \zeta}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} + A_h \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + A_h \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + w \frac{\partial \zeta}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} + A_h \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + A_h \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \\ \text{ただし } \zeta &= U \frac{\partial \zeta}{\partial x} + V \frac{\partial \zeta}{\partial y} + W \frac{\partial \zeta}{\partial z} \\ P &= \rho g (\zeta + Z) - \rho_0 \int_0^{\zeta} B dz, B = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \zeta B &= K_v \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} + K_h \nabla^2 B \end{aligned}$$

境界条件は、湖面($z=0$)では $\frac{\partial \zeta}{\partial z} = -(u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y})_{z=0}$, $-\rho_0 A_h (\frac{\partial \zeta}{\partial x}, \frac{\partial \zeta}{\partial y}) = (\tau_x, \tau_y)$, $-K_v \frac{\partial \zeta}{\partial z} = Q_z$ で、 τ_x, τ_y は風の応力のX,Y成分、 Q_z は湖面に入る浮力束である。湖底($z=H$)では $w=0$, $\rho_0 A_h (\frac{\partial \zeta}{\partial x}, \frac{\partial \zeta}{\partial y}) = (\tau_x, \tau_y)$ で τ_x, τ_y は湖底での摩擦応力のX,Y成分である。陸岸では $u=v=0$ である。

数値計算手法は大西¹⁾のそれによったので、詳細は省略する。

3.計算条件：琵琶湖全域を対象とし、水平格子間隔を1km、鉛直方向には最大層数で3層となるように分割を行い、1200ステップ(5200秒 ≈ 8.33 日)まで計算した。流出河川は瀬田川と疏水の2川であり、それらの流量は年間平均値を与え、

流入河川は琵琶湖の貯水量が一定に保たれるという前提のもとに流出流量と同量が流入するとし、主な河川の流域面積に比例した流量をその河口地点に対応する格子点に与えた。湖面に入る浮力束については、定常的な湖流の計算を試みる上で、成層化に至る過程においては正の浮力束として $20 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{s}$ (湖面に供給された熱エネルギーのうち蒸発に消費された分を除いた $840 \text{ kcal}/\text{m}^2/\text{day}$ に相当する。

ただし、この値は年平均値からの偏差である。)を

与え、また成層破壊過程においては負の浮力束 $-20 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{s}$ を与えた。また風については、基本的な応答特性を確認する目的で全湖一様に、風速 200 cm/s で、風向が琵琶湖長軸方向、すなわち北東風および南西風の2種類の風を想定した。各Caseにおけるこれらの取り扱い

表-1

	風		水温の初期値			湖面での 浮力束
	風向	風力	第1層	第2層	第3層	
Case 1	NE	200cm/s	7.0℃	7.0℃	7.0℃	$2.0 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{s}$
Case 2	SW	200cm/s	7.0℃	7.0℃	7.0℃	$2.0 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{s}$
Case 3	NE	200cm/s	27.0℃	17.0℃	10.0℃	$-2.0 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{s}$
Case 4	SW	200cm/s	27.0℃	17.0℃	10.0℃	$-2.0 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{s}$
Case 5	NE	200cm/s	4.0℃	4.0℃	4.0℃	0.0
Case 6	SW	200cm/s	4.0℃	4.0℃	4.0℃	0.0

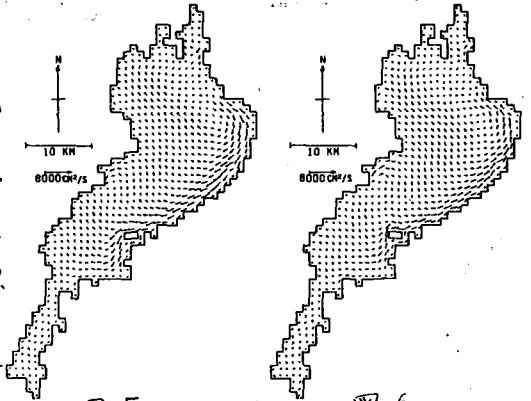
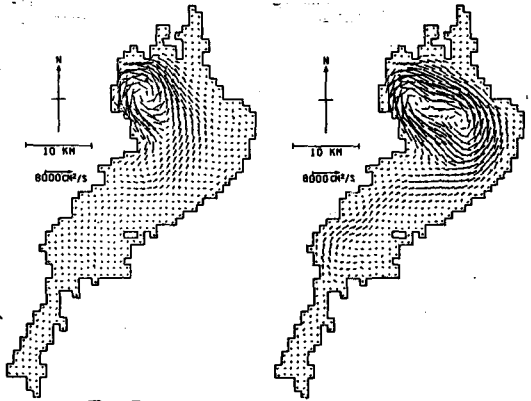
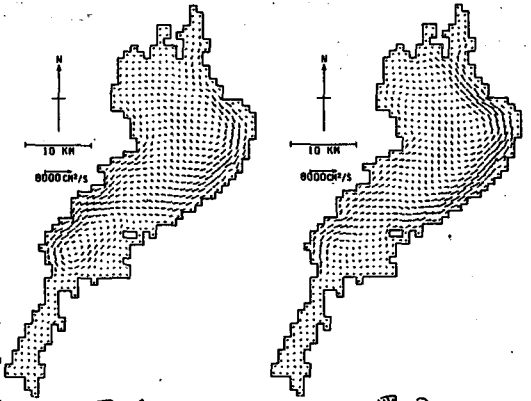
$$A_h = 100000 \text{ cm}^2/\text{s} \quad A_v = 1.0 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$K_h = 10000 \text{ cm}^2/\text{s} \quad K_v = 1.0 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$f = 8.36 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

とその他の入力諸元を表1に示す。ただし、初期水温分布については表1のように、成層化に至る過程では全層一様とし、成層破壊過程では仮想的な水温成層をつくって与えた。

4.結果: Case1~Case6の1層目の流量ベクトル図をそれぞれ図1~図6に示す。まず、正の浮力束を与えた場合は湖水の熱対流よりも風による吹送流の作用の影響を強く受けた結果が得られた。これは密度を一定とし、ただ単に風による吹送流の効果を考慮した場合(Case5, Case6)と比較すれば明白である。このように風の吹送流の効果によって、従来から指摘されているとおり、水深の分布によって風の応力に対抗する圧力勾配に差が生じて発生すると考えられる地形性環流の存在が確認できた。次に、負の浮力束を与えた場合はいずれの風の条件でも北湖の北部の水深が深いところで反時計回りの環流が発生している。一方、密度を全層において一様とし負の浮力束を与えた場合の計算結果ではこのような環流は発生しなかった。このことから浮力値より初期に想定される密度の状態が成層化しているかないかの方が大きい役割を果たすように思われる。また、これは夏期における北湖北部の安定な水平循環流の存在という実現象に結びつくのではないかと思われる。



5.今後の検討課題: 本研究では、計算条件における風力、風向の選定、あるいは湖面からの熱流出入を表わす浮力束の値を実現象に適応したように与えなければならぬことなどまだまだ残された問題が山積みである。しかも、差分スキームにセミインプリット法を採用したため、大きな Δt を用いて安定に計算できる利点をもつが、一方、用いられる式の特徴から計算上水位の変動が抑制される欠点を有し、琵琶湖での水位変動、静振などを扱うには不十分な計算方法となっていることが見い出されている。今後は差分スキームの改良、あるいは琵琶湖南湖に適用された2次元1層モデル²⁾の変数配置の採用などによって、総合的にモデルを検討することが必要とされる。

【参考文献】 1) 大西行雄：数値研究(その手法、環境科学としての海洋学、第15号、坂部純男編、東大出版会、昭和53年
2) 岩佐、井上、足立：琵琶湖南湖の湖流と拡散に関する数値シミュレーション、京都大学防災研究所年報、21号B、1978