

琵琶湖環流の数値シミュレーション

NUNERICAL SIMULATION OF GYRES IN LAKE BIWA

山敷庸亮¹, 松井三郎², 瀬津家久³, 熊谷道夫⁴

Yosuke YAMASHIKI, Saburo MATSUI, Iehisa NEZU, and Michio KUMAGAI

¹ 正会員 工博 国連環境計画 国際環境技術センター協力企画官 (〒525-0001 草津市下物町1091)

² 正会員 Ph.D. 京都大学環境質制御研究センター センター長 (〒520-0811 大津市由美浜1-2)

³ 正会員 工博 京都大学大学院教授 環境地球工学専攻 (〒606-851 京都市左京区吉田本町)

⁴ 理博 滋賀県琵琶湖研究所 総括研究員 (〒520 大津市打出浜1-10)

The formation process of three gyres in Lake Biwa, as observed using ADCP, has been simulated by using Large Eddy Simulation (LES). Two different dynamic subgrid-scale (SGS) models - Dynamic Mixed Model (DMM) and Mixed Scaling Formulation Model (MSFM)- are employed to describe stratified non-isotropic SGS stress due to the large disproportion between horizontal and vertical grid-spacing in the computational grid.

The driving force of gyre formation is assumed to be differential heating due to heat volume differences between middle-lake and shoreline areas. This condition was created in the simulation by setting the initial temperature distribution in the lake based on field observations. Significant gyre formation patterns are calculated by LES both with DMM and MSFM. Due to the huge disproportion between horizontal and vertical grid spacing, the isotropic SGS model (such as the Smagorinsky Model) does not perform well.

Key Words: Mixed Scaling Formulation Model (MSFM), LES, DMM, gyre, Lake Biwa

1. はじめに

琵琶湖北湖に3つの環流が存在することが1925年夏に行われた神戸海洋気象台の観測¹⁾によって初めて提唱された。以来、遠藤らによるGPS浮標を用いたラグランジュ的方法²⁾による湖流観測や、熊谷ら³⁾による3次元ADCP観測等、様々な観測が行われているが、成層期における第一環流の存在については概ね合意が得られている。

遠藤⁴⁾は、過去の研究から、琵琶湖の環流について以下の特徴を記載している。すなわち(1)第一環流は成層期全般(5-11月)にわたって安定して存在する(2)環流の流れは成層の発達に比例して発達し、第一環流の最大エネルギーは7月に観測される(3)環流は上層にのみ観測される(4)平均流は地衡流平衡にあるが、瞬間流は内部波、内部静振や風の影響により複雑に変化する(5)環流の流速はほぼ 0.1ms^{-1} 程度であるが、時には 0.3ms^{-1} にも及ぶ流れが観測される(6)第一環流の形はほぼ円形であり、最大流速は中心部からほぼ3-4km付近に見つかる(7)環流の位置は過去に推測されたもの¹⁾と著しく異なる(遠藤・奥村⁵⁾) (図1)。

熊谷ら³⁾はADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)を用いて1994年の成層期全般にわたって琵琶湖環流の季節変化の観測を行った。彼らは観測を通じ(1)反時計回りの第一環流は成層期全般にわたって安定に存在し、台風の通過等により一時的に消失するが数日で回復し、その位置は上層内部の鉛

直方向水温勾配が大きくなるにつれ南に移動する。(2)時計回りの第二環流は安定して存在せず、第一環流の発達によって南にその位置を変える(3)第三環流は安定して存在しないことを結論づけた。

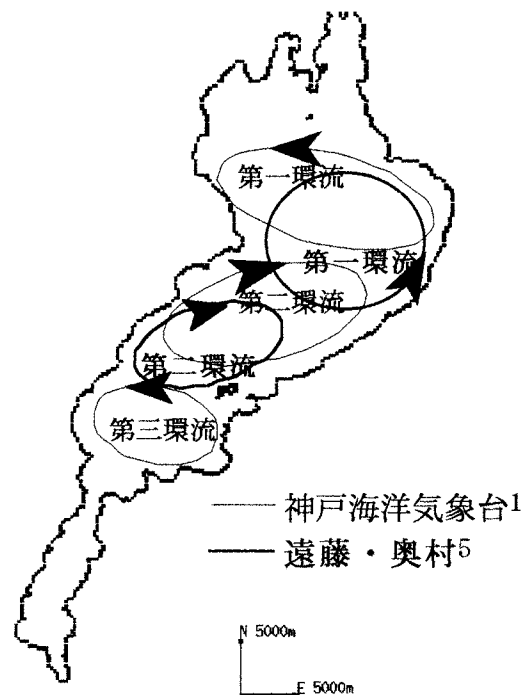


図1 過去の観測による環流の位置

これらの環流の生成機構は、渦度をもつ風による説（日高⁶⁾）と、差分加熱による説（大西⁷⁾、大久保ら⁸⁾）がある。遠藤ら⁹⁾の観測によると、琵琶湖北部には地形条件により正の渦度をもつ風が存在しており、2層モデルによる数値計算から、第一環流の持続に大きな影響を及ぼすと述べられている。概して風は第三環流の生成過程には大きな影響を及ぼすと考えられるが、第一環流の生成原因を風のみにより考える事は困難であり、差分加熱による傾圧がが主要な生成要因と考えられる。遠藤ら¹⁰⁾は第一環流形成点付近において水温の観測を行い、地衡流平衡にあることを示した。大久保ら⁷⁾は回転する水理模型の湖岸部をヒータで加熱することにより環流を形成し、熱の加え方の差違により環流生成のパターンが変化する事を報告し、差分加熱によって環流が生成することを実験的に裏付けている。

現在までに琵琶湖環流の形成過程を数値シミュレーションにより再現しようとした試みは、2層モデルを用いて風による環流形成を検討したKanari¹¹⁾、遠藤ら¹²⁾、3次元傾圧モデルを用いて環流形成を検討した岩佐・井上¹³⁾がある。岩佐らは琵琶湖北湖中央部に冷水塊を設置し、密度偏差の式を導入した3次元傾圧モデルを用いて、第一環流に相当する反時計回りの水平渦と鉛直渦を形成した。しかし彼らの計算は初期条件を人為的に設定したものであるため現実の水温・気象条件において環流が生成するかは不明であり、また鉛直の渦循環を議論するためにはLESの利用は有効な手段であると考えられる¹⁴⁾。

SGSモデルとしてSmagorinskyモデルや1方程式モデルをSGSモデルに用いる場合、定数をあらかじめ決定する必要がある、成層の発達度合等により鉛直混合の形態が著しく変化する湖沼へのそのままの適用は困難であると考えられる。Zangら¹⁵⁾はDynamic Mixed Model(DMM)を用いて沿岸地域の上昇流の計算を行い、模型実験との良好な一致を見た。しかしながらDMMはSGSへの浮力効果を陽に組み込まない¹⁶⁾ため、格子間隔を十分に狭める必要があった。Wongら¹⁷⁾によるScaling Formulation Model は局所平衡等を仮定する事なしに、Dynamic procedureによりSGS粘性散逸率を求めることにより、チャンネル流の解析においてDNSデータベースに近い結果を得ている。

本研究においては環流の生成原因が主に差分加熱による湖内水温分布によるという立場から、琵琶湖研究所¹⁸⁾や宗宮ら¹⁹⁾²⁰⁾による水温観測データを元にした初期条件を用い、LESを用いた琵琶湖北湖の3次元非定常解析による環流の生成過程の再現を試みた。また、SGSモデルにはSmagorinsky²¹⁾モデル、DMMの他に、WongらのScaling Formulation Modelに修正レナード項を負荷したMixed Scaling Formulation Model (MSFM)²²⁾を用いた。

2. 数値計算

(1) 支配方程式

支配方程式は格子平均操作を行った回転系における非圧縮性NS方程式とスカラー（この場合水温）輸送方程式である。

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\bar{\rho} u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} u_i u_j - \lambda_{ij})}{\partial x_j} = & \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} \\ & + \bar{\rho} F \frac{\partial x_j}{\partial x_i} + f \bar{\rho} \left(\bar{u}_2 \frac{\partial x_i}{\partial x_i} - \bar{u}_1 \frac{\partial x_2}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\bar{\beta})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\beta} u_j + \chi_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x_j} \right] + P_s \quad (3)$$

ここに x_i : 東方向($i=1$), 北方向($i=2$), 上方向($i=3$), u_i ($i=1,2,3$)水の流速、 β : スカラー量(この研究では水温)、 μ : 水の粘性係数、 K : 水温伝導率、 P : 水圧、 ρ : 水の密度、 F : 重力加速度、 P_s : 生成項である。なお、 λ_{ij}, χ_j はそれぞれSGS dynamic応力とSGSフラックス²²⁾であり、(2)SGSモデルに記載する。今後の研究でこのモデルを高渦度の密度流の解析に適用することを目的として、ブジネスク近似を用いなかった。 f はコリオリパラメータであり、琵琶湖におけるコリオリパラメータは $8.39 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ を用いた。

(2) SGSモデル

DMMによるSGS dynamic応力の標記は以下の通りである。

$$\lambda_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \lambda_{kk} = -2\rho C \overline{\Delta^2 |S|} \bar{S}_{ij} + \mathcal{L}_{ij}^m - \frac{\delta_{ij}}{3} \mathcal{L}_{kk}^m \quad (4)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

ここに $\mathcal{L}^m$ は以下に示す密度を含む修正レナード項である。

$$\mathcal{L}_{ij}^m = \overline{\rho u_i u_j} + \overline{\rho u_i} \bar{u}_j \quad (6)$$

式(4)中のモデル定数 C は以下の式により定められる。

$$C = - \frac{(\mathcal{L} - \mathcal{E}) M_{ij}}{2 M M_{ij}} \quad (7)$$

ここに、

$$\mathcal{E}_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (8)$$

$$\mathcal{L}_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (9)$$

$$M_{ij} = \alpha^2 \overline{|S|} \bar{S}_{ij} - \overline{|S_{ij}|} \bar{S}_{ij} \quad (10)$$

$$\alpha = \overline{\Delta} / \bar{\Delta} \quad (11)$$

ただし、 $\overline{\quad}$ はグリッドフィルタ操作、 $\overline{\quad}^T$ はテストフィルタ操作を示した。

Mixed Scaling Formulation Model によるSGS歪み応力の標記は以下の通りである。

$$\lambda_{ij} - \frac{\delta}{3} \lambda_{kk} = -2C_{\mu} \overline{\Delta}^{4/3} \overline{S}_{ij} + \mathcal{L}_{ij}^m - \frac{\delta}{3} \mathcal{L}_{kk}^m \quad (12)$$

モデル定数 C_{μ} は以下により定める。

$$C_{\mu} = - \frac{(\overline{\mathcal{Q}} - \overline{\Psi}) \overline{S}^T}{2\Gamma \overline{S}^T} \quad (13)$$

ここに、

$$\overline{\mathcal{Q}} = \overline{\rho u_i u_j}^T - \overline{\rho u_i}^T \overline{u_j}^T \quad (14)$$

$$\overline{\Psi} = \overline{\rho u_i u_j}^T - \overline{\rho u_i}^T \overline{u_j}^T \quad (15)$$

$$\Gamma = \overline{\Delta}^{4/3} - \overline{\Delta}^{4/3} \quad (16)$$

の数値計算においてフィルター幅は以下の式により定められる。

$$\overline{\Delta} = \sqrt{\delta x_H \delta x_V} \quad (17)$$

ここに δx_H , δx_V はそれぞれ水平・鉛直方向格子サイズである。また、テストフィルター幅は以下の通りである。

$$\overline{\Delta}^T = 2 \sqrt{\delta x_H \delta x_V} \quad (18)$$

SGSフラックスは以下の通りである。

$$\chi_j = - \frac{C_{\mu}}{\rho T} \overline{\Delta}^{4/3} \frac{\partial \overline{\beta}}{\partial x} + P_j \quad (19)$$

ここに

$$\frac{1}{T} = - \frac{\rho}{C_{\mu}} \frac{\langle (\mathcal{Q}_j - \mathcal{Q}_j) B_x \rangle}{\langle \Gamma B_x^2 \rangle} \quad (20)$$

$$\mathcal{Q}_j = \overline{X_j} - \overline{\chi_j}^T = \overline{\beta} \overline{u_j}^T - \overline{\beta}^T \overline{u_j}^T \quad (21)$$

$$\mathcal{Q}_j = \overline{\beta} \overline{u_j}^T - \overline{\beta}^T \overline{u_j}^T \quad (22)$$

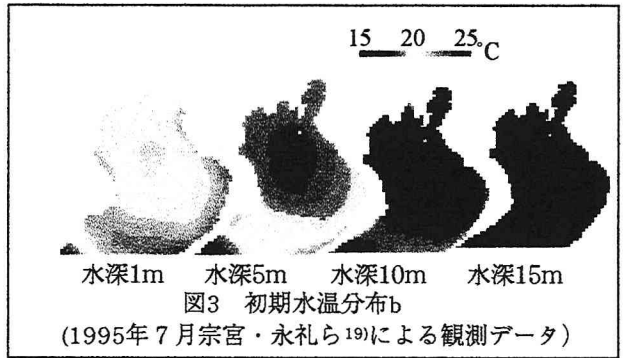
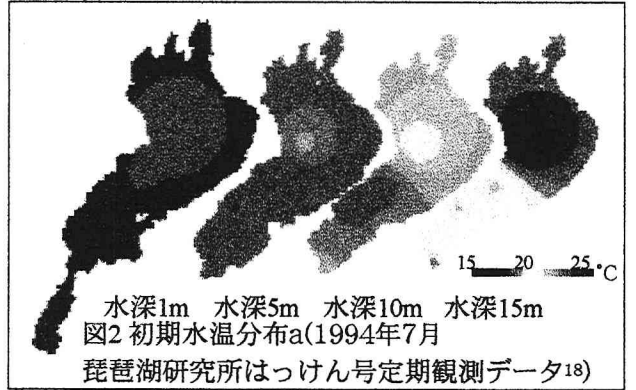
$$B_x = \frac{\partial \overline{\beta}^T}{\partial x_j} \quad (23)$$

$$P_j = \overline{\beta} \overline{u_j} - \overline{\beta}^T \overline{u_j} \quad (24)$$

(3) 初期条件および境界条件

水温分布の初期条件は琵琶湖研究所による定期観測結果¹⁸⁾および宗宮ら¹⁹⁾²⁰⁾の観測結果を3次元スプライン関数を用いて補間したもの（それぞれ初期水温条件a(図2), b(図3)を用いた。風を含む気象条件はAmeDASによるものを用い、湖上での補間を行った。ただし風には渦度は含まれていない。水平方向格子サイズは500m、鉛直は2mとし、全計算格子数は最大で83x128x51となった。離散化はCIPを用いた。変数の配置はセル中央部で、流速値はセルの端点でスタッガード格子を用いた。時間積分は

アダマス・パッシュフォース法を用いた。すべての3次元変数は1次元行列に変換し、セルの旗付け(Flagging)を行うことにより陸域における余分なメモリ消費を防いだ。



水面や底面における境界条件は、岩佐ら¹³⁾を参考に設定した。

3. 結果の考察

図4に1994年夏のADCP観測結果³⁾とLESによる結果との比較を示す。いずれも初期水温設定後6日間の加熱を行った。MSFMを用いた計算結果では3つの環流の生成がみられるが、Smagorinskyモデルでは逆回転の一つの渦の形成のみが見られ、非現実的な回転が再現された。これはSmagorinskyモデルのような等方性SGSモデルにおいて鉛直渦動拡散係数が過大評価になっていることによるものと考えられる。非等方性項（修正レナード項）を持つDMM, MSFMでは第一環流の方向は観測値と一致するが、Smagorinskyモデル成分を持たないMSFMがより良好な環流生成パターンを表現しているようである。これらの計算は初期水温分布に琵琶湖研究所の観測結果を用いているが、環流の中心位置がやや西によりすぎている。

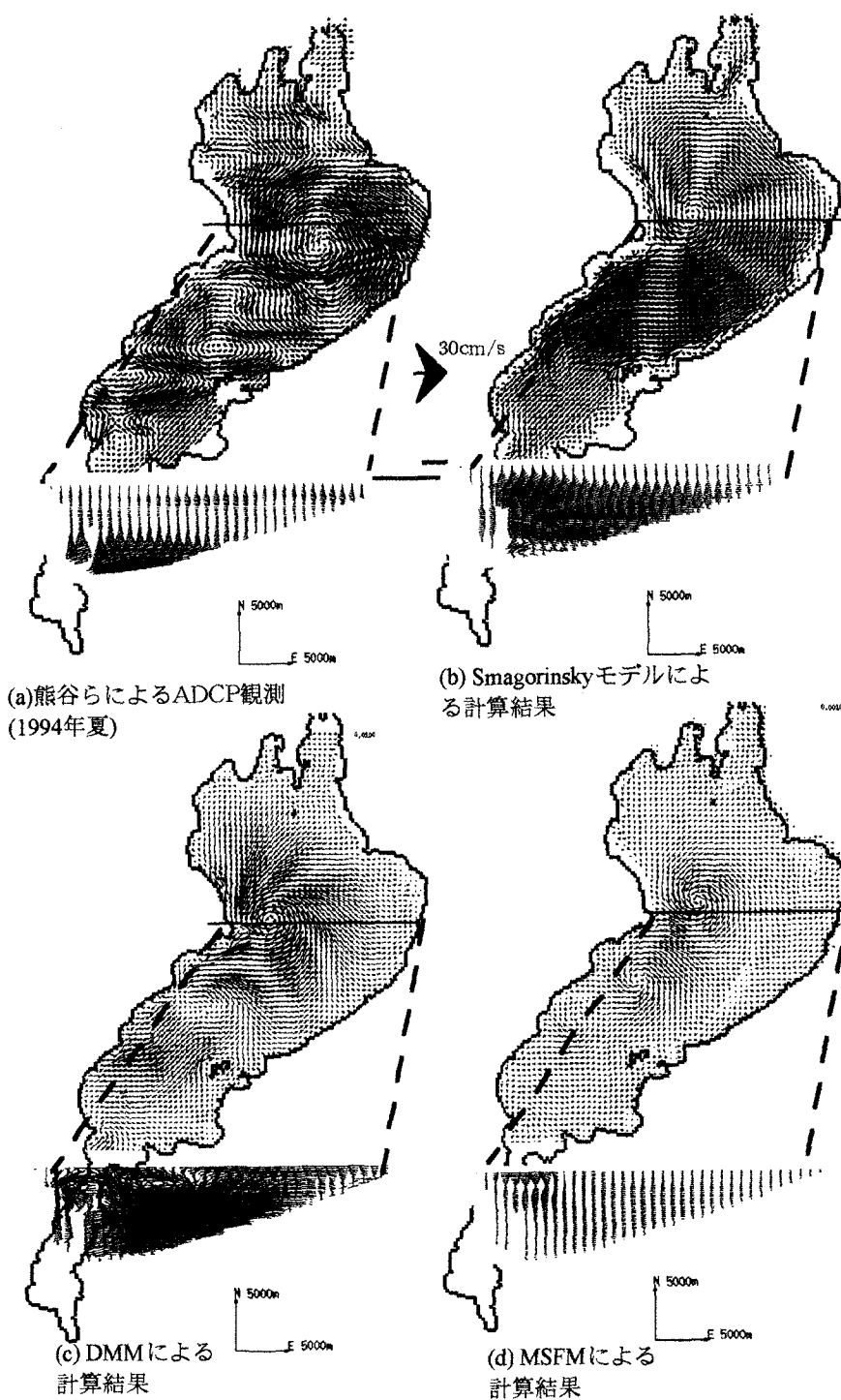


図4 琵琶湖における環流の形成に関する観測結果(a)と
初期水温分布aによるLESによる計算結果(b)-(d)の比較

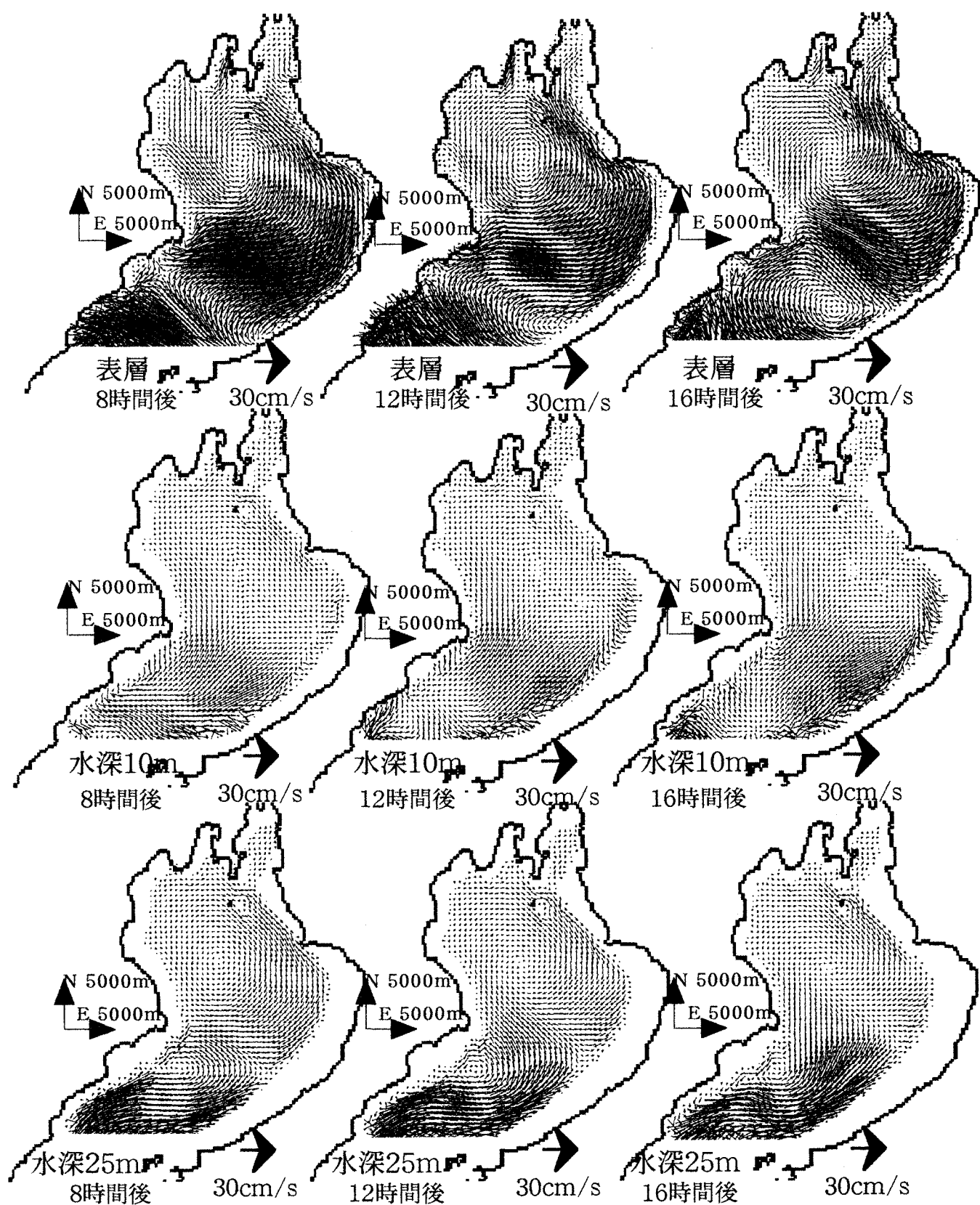


図5 MSFMを用いた環流形成過程の数値シミュレーション

宗宮ら19)20)は琵琶湖北湖の23観測点についてそれぞれ水温の鉛直分布を求めたが、これを初期条件として陸域の若干の加熱を行った初期水温条件bを用い、MSFMによる環流の生成過程のシミュレーションを行った。計算結果を図5に示す。初期水温分布形状に従って、表層においてまず反時計回りの第一環流が形成され、その後時計回りの第二環流が形成される様子が再現されている。

計算結果より、上層の中央部（水深10m付近）は渦が卓越せず、下層に逆回りの渦が再現されている。しかしながらこれらの流れの観測は、内部静振の位相の違い等に影響をうけるため、現地観測においては十分に確認されていない。また現実の琵琶湖においては深水層の流れは内部波および風により複雑な挙動を示すはずであり、計算の際内部波の位相を考慮しなければならない。

4. おわりに

LESによる琵琶湖北湖環流の生成過程の数値シミュレーションを行った。環流のおおよそのパターンや流速等は熊谷らによる観測値と類似していること、初期水温分布により大きく渦の形成過程が変化することが明らかになった。しかしながら内部の流れ構造や、内部波の影響等については、十分な初期条件を制定することができず、また観測による流速値も位相差等により十分に利用することができなかった。今回の計算においては初期水温分布を仮定し、加熱を最小限にして環流を生成させることに成功したが、初期水温分布を全く仮定せず、太陽による加熱のみを考慮した計算を今後行ってゆく必要があると思われる。加えて、鉛直方向の拡散係数とSGS応力との比較についても詳細な検討が必要である。

謝辞

本研究は、土木学会水理委員会河川懇談会と建設省近畿地方建設局との共同研究第6「河川国際間比較」の成果の一部であり、ここに謝辞を表します。また京都大学の宗宮教授・永礼氏および浅田氏には貴重なデータを提供していただき、ここに謝意を表します。最後に、Dynamic SGSモデル等においてアドバイスをいただいたStanford大学S.MonismithおよびR.Street両教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 神戸海洋気象台:びわ湖調査報告、神戸海洋気象台年報、Vol.8,1926.
- 2) Okumura, Y. And S. Endoh: Telemetry Lagrangian Measurement of Water Movement in Lake using GPS and MCA, Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.31,pp.1324-1328, 1995.
- 3) Kumagai, M., Y.Asada, and S. Nakano: Gyres Measured by ADCP in Lake Biwa, Physical Processes in Lakes and Oceans, Coastal and Estuarine Studies, Vol.54,pp.199-208,1998.
- 4) Endoh, S.: Review of Geostrophic Gyres, Physical Processes in a Large Lake: Lake Biwa, Japan, Coastal and Estuarine Studies, Vol.48,pp.7-13,1996.

- 5) Endoh, S., and Y.Okumura: Gyre system in Lake Biwa derived from recent current measurement, Jap. J. Limnol., Vol.54, pp.191-197,1993.
- 6) Hidaka, K., Model Experiment on the lake current in the surface layer of Lake Biwa, 神戸海洋気象台年報第13号,pp1-4,1927.
- 7) Oonishi, Y. :Development of the current induced by the topographic heataccumulation (I) - the case of the axis-symmetric basin. J. Oceanogr. Soc. Japan, 31:pp.243-254,1975.
- 8) K. Ookubo, Y. Muramoto, Y. Oonishi, and M. Kumagai: Laboratory Experiments on Thermally Induced Currents in Lake Biwa, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol.34, Part 2, No.304, 1984.
- 9) Endoh, S., M. Watanabe, H. Nagata, F. Maruo, T. Kawae, C. Iguchi, and Y. Okumura : Wind Fields over Lake Biwa and Their Effect on Water Circulation, Jpn. J. Limnol., 54, 4, pp269-278,1995.
- 10) Endoh, S., Y.Okumura and I.Okamoto : Physical Processes in a Large Lake: Lake Biwa, Japan, Coastal and Estuarine Studies, Vol. 48, pp.15-29,1995.
- 11) Kanari, S.: On the study of numerical experiments of two-layer Lake Biwa, Jpn. J. Limnology. Vol.35:pp.1-17,1974.
- 12) Endoh, S.:Study on the water circulation in Lake Biwa, M.S. Thesis, Kyoto Univ. (J), 1976.
- 13) 岩佐義朗,井上和也,松岡隆之:三次元解析法による琵琶湖湖流に関する二、三の検討,第29回水理講演会論文集,pp.751-756, 1985.
- 14) 村本嘉雄:湖沼の水理とその解析、水工学シリーズ92-A-5, 1992.
- 15) Zang, Yan, and R.L.Street:Numerical simulation of coastal upwelling and interfacial instability of a rotating and stratified fluid, J. Fluid Mech., Vol.305, pp.47-75,1995.
- 16) 村上周三:浮力乱流モデル,スカラー・温度場乱流モデル第8章,乱流の数値流体解析,東京大学出版会,pp.401-420.,1998.
- 17) Wong, V.C. And D.K. Lilly : A comparison of two dynamic subgrid closure methods for turbulent thermal convection, Phys. Fluids 6(2),pp.1016-1023,1994.
- 18) 滋賀県琵琶湖研究所:実験調査船はっけん号データリポート(III), No.94-B2,1994.
- 19) 宗宮功,永礼英明、未発表データの供与、京都大学環境工学,1999
- 20) 永礼英明,宗宮功,藤井滋穂:水質特性による琵琶湖の水域分割とその特徴,第33回日本水環境学会年会講演集,pp234,1999.
- 21) Smagorinsky J. :General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment, Mon. Weather Rev.,pp.91-99,1963.
- 22) Yamashiki, Y.: Development of a Numerical Prediction Model for Currents and Suspended Particles in Lake Biwa and its application on eutrophication analysis, Doctoral theses, Faculty of Engineering, Kyoto University,1999.

(1999.9.30受付)